

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİJİTAL VİDEO GÖSTERİCİ ÜRÜNLERİN EKRANLARINDA
KULLANILAN CAMLARIN KIRILMA MEKANİZMASI ARAŞTIRILMASI
VE KARAKTERİZASYONU

Coşkun AKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR

Nisan 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİJİTAL VIDEO GÖSTERİCİ ÜRÜNLERİN EKRANLARINDA
KULLANILAN CAMLARIN KIRILMA MEKANİZMASI ARAŞTIRILMASI
VE KARAKTERİZASYONU

Coşkun AKAN tarafından hazırlanan tez çalışması tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon Anabilim Dalı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR , Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU , Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Vedat TEMİZ , Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Dijital Video Gösterici Ürünlerin Ekranlarında Kullanılan Camların Kırılma Mekanizmasının Araştırılması Ve Karakterizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

Coşkun AKAN

İmza



Aileme
ve
arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin yazılması sürecinde bana desteğini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR'a, yapılan testler sırasında her konuda yardımcı olan ve sürekli olarak beni motive eden iş arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
1.4 Cam Üretimi	3
1.5 Isıl Temperlenmiş Camın Dayanımı.....	3
2 Kimyasal Temperlenmiş Alüminosilikat Camların Mekanik İncelemesi	4
2.1 Giriş.....	4
2.2 Kimyasal Temperleme Prosedürleri.....	6
2.3 Kimyasal Temperleme Sırasında Boyutsal Değişimler.....	7
2.4 Kimyasal Temperlemede Sıcaklık ve Zaman	8
2.5 Kimyasal Temperleme Sonrası Parlatma İşlemi	11
3 Camda Hasar Oluşumu	12
3.1 Kimyasal Temperlenmiş Camlardaki Başlıca Kırılma Biçimi Keskin Uç Darbesi ve Sonucunda Oluşan Eğilmedir	12
3.2 Elmas Uç Kullanarak Keskin Uç Darbesine Tepkinin Simüle Edilmesi	14
3.3 Kimyasal Temperlenmiş Camlarda Vickers Uç ile Radyal, Yanal ve Bileşik Kırıkların Oluşumu	15
3.4 Kimyasal Temperlenmiş Camda Deformasyon	16

3.5	Deformasyon Mekanizmaları	17
3.6	Kimyasal Temperlenmemiş Alkali Alüminosilikat Camlarda Çeşitli Uç Yapıları ile 500 g-kuvvet Yük Uygulanması ve Hasarın Kesiti.....	17
3.7	Uç Şekli Kütlettikçe Kimyasal Temperlenmemiş Camların Yüzeyindeki Kırılma Davranışı Daha Fazla Basma Gerilmesi Karakteristiği Gösteriyor ..	18
3.8	Deformasyon Mekanizmaları ve Darbe Hızı	19
4	TV'lerde Kullanılan Open Cell'lerin Kırılma Mekanizmasının Araştırılması	23
4.1	Cam Kalınlığına Göre Kırılma İçin Gereken Kuvvetin Ölçülmesi	23
4.1.1	Test Düzenegi.....	23
4.1.2	Kırılma İçin Gereken Kuvvetlerin Ölçülmesi.....	26
4.1.3	Kırılma İçin Gereken Gerilmelerin Hesaplanması	27
4.2	TV Halinde İken Kırılmanın İncelenmesi	28
4.2.1	Kutusuz TV Düşürme Testleri.....	28
4.2.2	1 m'den Ağırlık Düşürme Testi (Straforsuz)	29
4.2.3	1 m'den Ağırlık Düşürme Testi (Straforlu)	31
4.3	Kutulu TV Düşürme Testleri	33
4.3.1	Kontrollü Test 1 – 28 Adet Kutulu TV Düşürme Testi.....	33
4.3.2	İncelemeler ve Straforda İyileştirme	36
4.3.3	Kontrollü Test 2 – 28 Adet Kutulu TV Düşürme Testi.....	41
4.4	Ağırlıklı Titreşim Testleri.....	43
4.5	Testlerin Sonuçları	45
5	Sonuç Ve Öneriler	46
	KAYNAKLAR.....	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Camın dayanımını ölçmek için hazırlanan düzenek.....	3
Şekil 2.1	Camdaki artık gerilmelerin fotoelastik yöntemle incelenmesi.....	6
Şekil 2.2	Artık basma gerilim tabakası kalınlığı için sıcaklık ve süre ilişkisi [2] ..	8
Şekil 2.3	Artık basma gerilim değeri için sıcaklık ve süre ilişkisi [2].....	9
Şekil 2.4	Farklı sıcaklık ve zamanlarda kimyasal temperlenmiş camlarda oluşan artık basma gerilmeleri [12].....	10
Şekil 3.1	Kırılma başlangıcı	13
Şekil 3.2	Keskin uç darbesinin merkezi.....	13
Şekil 3.3	2 yüzü arasındaki açı 136° olan kare piramit şekle sahip elmas uç (Vickers sertlik ölçme yönteminin ucudur).....	14
Şekil 3.4	Kırılma çeşitleri: radyal, yanal, bileşik.....	15
Şekil 3.5	Kimyasal <i>temperlenmemiş</i> cama Vickers uç ile 1 kg-kuvvet uygulanması sonucu oluşan kesit.....	16
Şekil 3.6	Kimyasal <i>temperlenmiş</i> cama Vickers uç ile 1 kg-kuvvet uygulanması sonucu oluşan kesit.....	17
Şekil 3.7	Uç açısının kırılma şekline etkisi	18
Şekil 3.8	Oluşan gerilmelerin kırılma şekline etkisi	18
Şekil 3.9	Kuvvet çok yavaş uygulandığında oluşan kırığın şekli.....	20
Şekil 3.10	Kuvvet çok hızlı uygulandığında oluşan kırığın şekli	20
Şekil 3.11	Tempersiz ve kimyasal temperli camların farklı yükleme hızlarında eğilme dayanımı [18].....	21
Şekil 3.12	Yükleme hızının sertlik ve elastisite modülüne etkileri [19].....	22
Şekil 4.1	Basma deney cihazının kuvvet uygulayan çubuğu ve ucuna yapıştırılmış sünger	23
Şekil 4.2	Test sırasında yatay duracak şekilde sabitlenmiş open cell	24

Şekil 4.3	Open cell'in sabitlendiği çeneler	24
Şekil 4.4	Open cell'in sabitlenmesi ve kuvvet uygulanması	25
Şekil 4.5	Kuvvet uygulama sırası	25
Şekil 4.6	20-30 cm kutusuz TV düşürme testleri.....	29
Şekil 4.7	0,7 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforuz)	30
Şekil 4.8	0,5 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforuz)	31
Şekil 4.9	0,7 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforlu)	32
Şekil 4.10	0,5 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforlu)	33
Şekil 4.11	Kontrollü test 1 kapsamında düşürme şekilleri.....	35
Şekil 4.12	Füzyon kontrol cihazı.....	38
Şekil 4.13	Mevcut straforda füzyon ölçümü	38
Şekil 4.14	Yüksek yoğunlukta üretilen straforda füzyon ölçümü.....	39
Şekil 4.15	Impact test cihazı.....	40
Şekil 4.16	Yüksek yoğunlukta üretilen straforda yoğunluk, impact ve füzyon değerleri	40
Şekil 4.17	Kontrollü test 2 kapsamında düşürme şekilleri.....	42
Şekil 4.18	Ağırlıklı titreşim testinin uygulama şekli	43
Şekil 4.19	Ağırlıklı titreşim testleri kapsamında yapılan denemeler	44

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 4.1	Open cell köşe kırılması test sonuçları.....	27
Grafik 4.2	Kontrollü test 1 kapsamında test yüksekliğine göre camın kırılma durumu	35
Grafik 4.3	Kontrollü test 1 kapsamında kırılma gerçekleşen düşürüşler	36
Grafik 4.4	Kontrollü test 2 kapsamında kırılma gerçekleşen düşürüşler	42



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1	Temperlenmemiş ve kimyasal temperlenmiş camın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [20]	5
Tablo 2.2	Farklı temperleme süreleri için artık basma gerilimi ve tabaka kalınlığı [19]	10
Tablo 3.1	Kırılma için gereken kuvvetin uç açısına göre değişimi	19
Tablo 4.1	Kırılma için gereken kuvvetler	26
Tablo 4.2	Kontrollü test 1 için düşürme kombinasyonları.....	34
Tablo 4.3	Kontrollü test 2 için düşürme kombinasyonları.....	41

Dijital Video Gösterici Ürünlerin Ekranlarında Kullanılan Camların Kırılma Mekanizmasının Araştırılması Ve Karakterizasyonu

Coşkun AKAN

Makine Mühendisliği Bölümü

Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR

Video gösterici ürünlerin ekranlarında kullanılan camlar 0,4 – 0,5 mm kalınlığa sahip iki camın lamine edilmesiyle üretiliyor ve bunların kırılmaları bu ürünlerde karşılaşılan en büyük sorunlardan bir tanesidir. Bu kırılmaların sebeplerinin bilinmemesi önlem almayı zorlaştırmaktadır. Kırılma sebepleri ve kırılma mekanizması bilindiğinde, alınacak önlemlerle çok büyük miktarda hurda masrafından kaçınılabılır.

Bu çalışmada öncelikle literatür araştırması yapılarak camın temel özellikleri incelenmiştir. Ardından camların mukavemet özelliklerini arttırmak için kullanılan yöntemlerden biri olan kimyasal temperleme işlemi incelenmiştir. Bunun sebebi TV’lerde kullanılan camların tamamının kimyasal temperlenmiş olmasıdır. Bu bilgiler edinildikten sonra çalışmanın ana nedeni olan camda hasar oluşumu ve bu hasarların karakteristiği çalışılmıştır. Oluşan hasarların anlaşılması,

sınıflandırılması ve bunlara çözüm bulunabilmesi için incelemeler yapılmıştır. Son bölümde ise TV özelinde çok sayıda test yapılarak kırılmaların nasıl oluştuğu incelenmiş, her test grubundan sonra elde edilen bilgiler ışığında iyileştirmeler yapılmış, testler tekrarlanarak ya da değiştirilerek iyileştirmelerin devamı sağlanmıştır. Bu iyileştirmelerin sonucunda kırılmalar büyük oranda azalmış ve hurda masrafları azaltılmıştır.

Anahtar kelimeler: Cam, Kimyasal Temperli Cam, TV, Kırılma Mekanikği



Research and Characterization of Fracture Mechanics of Glasses That Is Used In Digital Video Display Products' Screens

Coskun AKAN

Mechanical Engineering

Department of Construction

Master of Science Thesis

Advisor

Dr. Öğretim Üyesi Alperen ACAR

Glasses that is used in video display products' screens are produced laminating two glasses that have 0,4 – 0,5 mm thickness and their fracture is one of the most encountered problem in these kind of products. Not knowing the reasons of these fractures is making difficult to take precaution. When we know fracture reasons and mechanics, it is possible to avoid huge amount of scrap cost.

In this study, firstly, basic properties of glass have been studied. And then, chemical tempering has been studied which is one of the methods that is used in order to enhance glass strength. Main reason for this is that all glasses that is used in TV sets are chemically tempered. After having this knowledge, fracture formation in glass and characteristics of these fractures have been studied which is the main reason of

this study. Required forces for failure have been determined by applying tests and test values have been compared to theoretical failure force values. Examinations have been done in order to understand formation of fractures, classify and find solutions. How application speed effects strength has been examined together with applied force. How application speed changes the shape of fracture gives us truly valuable information regarding classification of fractures. By this means, opportunity to solve the problems directly has been achieved for encountered issues. In the last chapter, running lots of tests, how fractures happen has been studied, improvements have been done using information that comes from tests, continuation of improvements has been ensured repeating or changing these tests. As a result of these improvements, fractures in glasses and scrap costs have decreased.

Keywords: Glass, Chemically Tempered Glass, TV, Fracture Mechanics

1.1 Literatür Özeti

Renksiz cam tamamıyla ışık geçirir değildir. 6 mm kalınlığındaki bir renksiz cam, ışığın görünür spektrumdaki kısmının %87'sinin geçmesine izin verirken %13'ünü yutar. Görünür kısımdan uzaklaştıkça geçirgenlik oranı değişir. [1]

İşlem görmemiş cam basma gerilmesine karşı oldukça güçlüdür ve 1034 MPa'a kadar basma gerilmesine dayanır. [2]

Teorik olarak, mikro kusurların olmadığı mükemmel bir yüzeye sahip cam bu seviyede çekme gerilmesine de dayanır. Ancak gerçekte camın dayanımı çok daha düşüktür ve 20-25 MPa çekme gerilmesine dayanabilir çünkü yüzeyindeki mikro kusurlar cam boyunca ve içine doğru ilerler. [1]

Cam temperlendiğinde, kenarlar da dahil olmak üzere tüm dış yüzey artık basma gerilmesine sahip olur. İç gerilmelerin dengelenmesi için camın iç kısmı da artık çekme gerilmelerine sahip olacaktır. Yabancı madde ya da hava kabarcığı olmadığı müddetçe, çekme gerilmesine sahip kısımda mikro kusurlar olmayacağı için bu çekme gerilmesi sorun olmayacaktır. Bu durum temperlenmiş camı işlem görmemiş cama göre genellikle 4-5 kat daha yüksek dayanımlı yapacaktır.

Camın büyüklüğü ya da nerede kullanıldığı fark etmeksizin temel temperleme süreci aynıdır. Cam önce "Camsı Geçiş Sıcaklığının" üstüne kadar ısıtılır, burada düz olması sağlanır ya da istenen şekil verilir. Daha sonra kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu noktada camın yüzeyi ile merkezi arasında bir sıcaklık farkı olur. Cam oda sıcaklığına geldiğinde soğurken oluşan büzülme farkından dolayı artık gerilmeler oluşacaktır.

Temperlenmiş cam için ilk patent 1874 yılında alınmış olsa da 1900'lü yılların başına kadar bir gelişme olmamıştır. 1940'lı yıllarda otomobillerde temperli cam kullanılmaya başlanmış ve 1950'lerde yaygın hale gelmiştir. [1]

1.2 Tezin Amacı

Dijital video gösterici ürün sektöründeki büyük rekabet sebebiyle video gösterici ürünlerde kullanılan camlar, tamamen maliyet odaklı olarak incelenmektedir. Bunun yanında, ekran boyutlarının yıllar içinde sürekli olarak büyümektedir.

TV özelinde, 2009 yılında 40" - 49" arası ekran boyutunun pazar payı %25 iken 2018 yılında %52 olmuştur. 49" üstü ekran boyutlarının pazar payı 2009 yılında %7 iken 2018 yılında %29'a çıkmıştır.

2014-2015 yıllarında open cell kalınlıkları 1.8 mm'den 1.6 – 1.5 mm'lere düşmüş ve sonrasında 2019 yılında 1.1 mm'lere kadar incelmıştır.

Camların incelmesi ve ekran boyutlarının büyümesi, birlikte etki ederek, TV üretim sektöründe "ekran kırılması" sorununun önemli bir yer tutmaya başlamasına sebep olmuştur.

Video gösterici ürünlerde en büyük maliyet kalemi ekran (open cell) olduğundan, kırılmaların önlenmesi en önemli odak noktalarından biridir. Bu tez, camların kırılma mekaniğinin bilinmesi ve alınacak önlemlerle hurda masraflarından kaçınmak amacıyla yapılmıştır.

1.3 Hipotez

TV kutulu halde taşınırken birden çok kez elleçlemeye maruz kalmaktadır. Bu esnarlarda istemeden de olsa çeşitli yüksekliklerden çeşitli şekillerde düşebilmektedir. Ambalaj yapısındaki kutu ve straforun görevi bu düşmelerde yaşanacak olumsuzlukları engellemek olsa da bu görevi her koşulda gerçekleştirememektedir. TV'nin hangi düşme açılarında daha fazla kuvvete maruz kaldığını ve hangi düşme açılarında daha çok korunması gerektiğini bularak iyileştirmeler yapılması planlanmaktadır. Bunun yanında nakliye sırasında yol şartlarından kaynaklanan titreşimler, TV kutusu, yasak olsa da, yatırılıp üzerine yük konduğunda kırılmalara sebep olabilmektedir. Bu şartlardaki kırılma mekaniği, yapılan testlerle çözümlenerek iyileştirmeler yapılması planlanmaktadır.

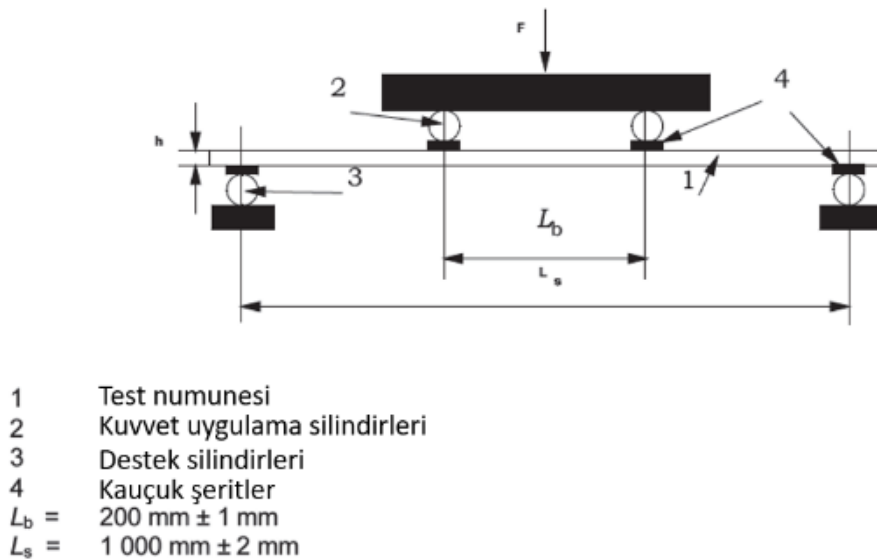
1.4 Cam Üretimi

Cam belirli malzemelerin karıştırılması ve soğutulularak katılaştırılması ile üretilir. Yaklaşık olarak %72 silisyum dioksit, %13 soda külü, %12 kireçtaşı ve az miktarda alüminosilikat karıştırılır ve fırına konur. Burada 1510 °C'ye kadar ısıtılarak ergitilir. Yaklaşık 1100 C'ye kadar soğutulduktan sonra ergiyik kalayın üzerine dökülür ve yerçekimi yardımıyla düzleştirilir. Yerçekimi ve yüzey geriliminin dengeye geldiği noktada camın doğal kalınlığı 6 mm'dir. Daha ince camlar için aynı yönde dönen haddeler ile daha kalın camlar için ters yönde dönen haddeler ile istenen kalınlığa getirilir. [4]

1.5 Isıl Temperlenmiş Camın Dayanımı

Camın dayanımı genellikle kırılana kadar eğilme momenti uygulanarak ve kırılması için gerekli kuvvet ölçülerek belirlenir. TS EN 1288-3:2000 ile tanımlanmış bir testtir. Bu standarda göre 1100 mm $\pm$ 5 mm uzunluğunda 360 mm $\pm$ 5 mm genişliğinde ve istenen kalınlıkta bir numune 4 nokta eğilme test cihazına konur. Numune sayısı ile ilgili kesin bir kural bulunmamaktadır.

Testin uygulanışı aşağıdaki şekilde görülebilir.



Şekil 1.1 Camın dayanımını ölçmek için hazırlanan düzenek

Kimyasal Temperlenmiş Alüminosilikat Camların Mekanik İncelemesi

2.1 Giriş

Çok ince, yüksek dayanımlı ve yüksek çizilme dirençli camların video gösterici elektronik ürünlerde ve araç camlarında kullanımı çok hızlı şekilde artmıştır. Cam yüzeyindeki kusurlar sebebiyle camların gerçek dayanım değerleri teorik değerlerinin yüzde birinden daha azdır. Bu yüzden dayanımı arttırmak için en önemli olan konu bu kusurların yok edilmesidir. Son yıllarda ısı temperleme ve kimyasal temperleme gibi cam güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Alkali içeren camların ergiyik tuz banyosuna batırılmasıyla yapılan kimyasal temperleme, ince ya da düz olmayan şekle sahip camlarda yüksek CS sağladığından cam güçlendirme için en önemli yöntem olmaktadır. Kimyasal temperleme ile güçlendirilmiş camların özellikleri basma gerilimi (CS) ve iyon değişimi yapılmış tabaka kalınlığı (DOL) ile karakterize edilir.

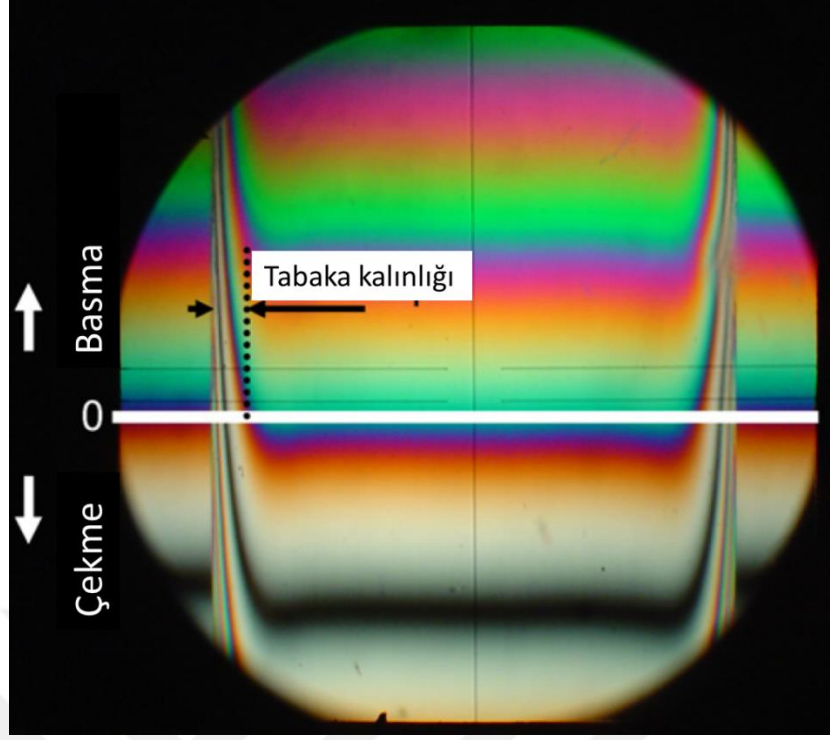
Potasyum ve sodyum iyon değişimi ile kimyasal temperlenmiş alüminosilikat camlar mükemmel mekanik özellikleri sebebiyle son zamanlarda çok ilgi çekmektedir. Son araştırmalar alkali alüminosilikat camların 430-490 °C sıcaklıkta 3-8 saat boyunca temperlenmesiyle DOL değerinin 30-75 µm kalınlığa ulaştığını ve sertliğin arttırılabildiğini göstermektedir. Yüksek dayanımlı ve yüksek çizilme dirençli camlara olan ilginin artması sebebiyle CS, DOL ve sertlik değerlerini arttırmak için yeni yöntemler bulunması araştırmaların odağı haline gelmiştir. Şimdiye kadar çoğu araştırma güçlendirme prosesi, ergiyik tuz banyosu ve cam bileşimi üzerine olmuştur. Ancak, kimyasal temperleme ile alüminosilikat camların güçlendirilmesi DOL değerlerinin görece düşük olması sebebiyle sınırlıdır. Yüksek DOL değeri basma gerilimi tabakasındaki kusurların doldurulmasını gerektirir. [3]

Yapılan bir çalışmada temperlenmemiş ve kimyasal temperlenmiş camın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1 Temperlenmemiş ve kimyasal temperlenmiş camın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [20]

Özellik	Temperlenmemiş cam	Kimyasal temperlenmiş cam
Yoğunluk (kg/m ³)	2545.62	2584.3
Elastisite modülü (GPa)	75.13	84.35
Poisson oranı	0.22	0.21
Kayma modülü (GPa)	30.79	34.85

Kimyasal temperleme sonrası kalınlık – artık gerilme dağılımını incelemek için genellikle camdaki artık gerilmelerin ölçüldüğü fotoelastik yöntemler kullanılır [10]. Fotoelastisite malzeme üzerindeki gerilim dağılımlarını tespit etmek için kullanılan deneysel bir yöntemdir. Diğer analitik gerilim tespit yöntemlerine nazaran fotoelastisite, malzeme içerisinde aniden oluşan süreksizlik etrafında bile tam olarak doğru gerilim dağılımını göstermektedir. Maddelerin kritik gerilim noktalarının tespitinde ve düzensiz geometrik düzlemlerde gerilim yoğunluğu tespitinde önemli bir rol almaktadır. Kimyasal temperlemenin camın fotoelastisite katsayısını kayda değer bir biçimde değiştirmedeği kabul edilir. Bu yöntemlerden en basitinde kimyasal temperlenmiş camdan küçük dikdörtgen bir numune çıkarılır. Numune yüzeyine paralel gelen ışık gözlemlenir. Işık saçılımlarının artık gerilme profilinde olduğu gözlemlenecektir. Şekil 2.1’de bununla ilgili bir örnek görülebilir [11].



Şekil 2.1 Camdaki artık gerilmelerin fotoelastik yöntemle incelenmesi

2.2 Kimyasal Temperleme Prosedürleri

Kimyasal Temperleme sonucunda cam tabakası yüzeyinde yüksek basma gerilmesi ve yüksek DOL elde edilir. Bu camlar TV, cep telefonu, tablet gibi elektronik ürünlerde kullanılır.

Kimyasal temperleme, cam yüzeyine daha büyük boyutlu iyonlar doldurarak camı güçlendirir. Kimyasal temperleme sürecinde, cam belirli sıcaklıktaki ergiyik tuz banyosuna batırılır. Isı sayesinde cam yüzeyindeki görece daha küçük iyonlar yüzeyden ayrılır ve yerlerine ergiyik tuzdaki daha büyük iyonlar geçer. Cam bu banyodan çıkarılıp soğutulduğunda, soğumadan dolayı büzülür. Cam yüzeyine yerleşmiş büyük iyonlar yüzeyde sıkışıp kalır. Bu durum basma gerilimli bir yüzey yaratarak kırılmaya karşı daha güçlü bir cam oluşmasını sağlar.

Kimyasal temperleme aynı zamanda eş dağılımlı bir gerilim katmanı oluşturur. Bunun sebebi iyon değişiminin yüzey boyunca eş dağılımlı olarak gerçekleşmesidir. Sıcaklıkla temperlemenin aksine kimyasal temperleme derecesi cam kalınlığına göre değişmez.

Kimyasal temperlemenin derecesi artık basma gerilim değeri ve artık basma gerilimli tabakanın derinliği (DOL) ile ölçülür. Artık basma gerilim değeri ve artık basma gerilimli tabakanın derinliği camın tuz banyosunda kalma süresi, tuz banyosunun sıcaklığı ve tuz banyosunun bileşimine bağlıdır. Genellikle, yüksek sıcaklıkta temperleme daha derin tabaka (DOL) oluştururken artık basma gerilimi değeri sıcaklığın tavlama etkisinden dolayı bir miktar düşer. [5]

2.3 Kimyasal Temperleme Sırasında Boyutsal Değişimler

Camdaki boyutsal değişime sebep olan iki mekanizma vardır. İlki sıcaklık artışından kaynaklanan hacimsel artış, ikincisi ise camın potasyum iyonları ile doldurulmasından kaynaklanan genleşmedir. Bazı camlar üretim sırasında tamamen tavlama olmaz. Bu camların kimyasal temperleme sırasında bir miktar daha tavlama olması ölçüsel küçülmeye sebep olur. Bu küçülme üretim sırasında uygulanan tavlama göre değişir.

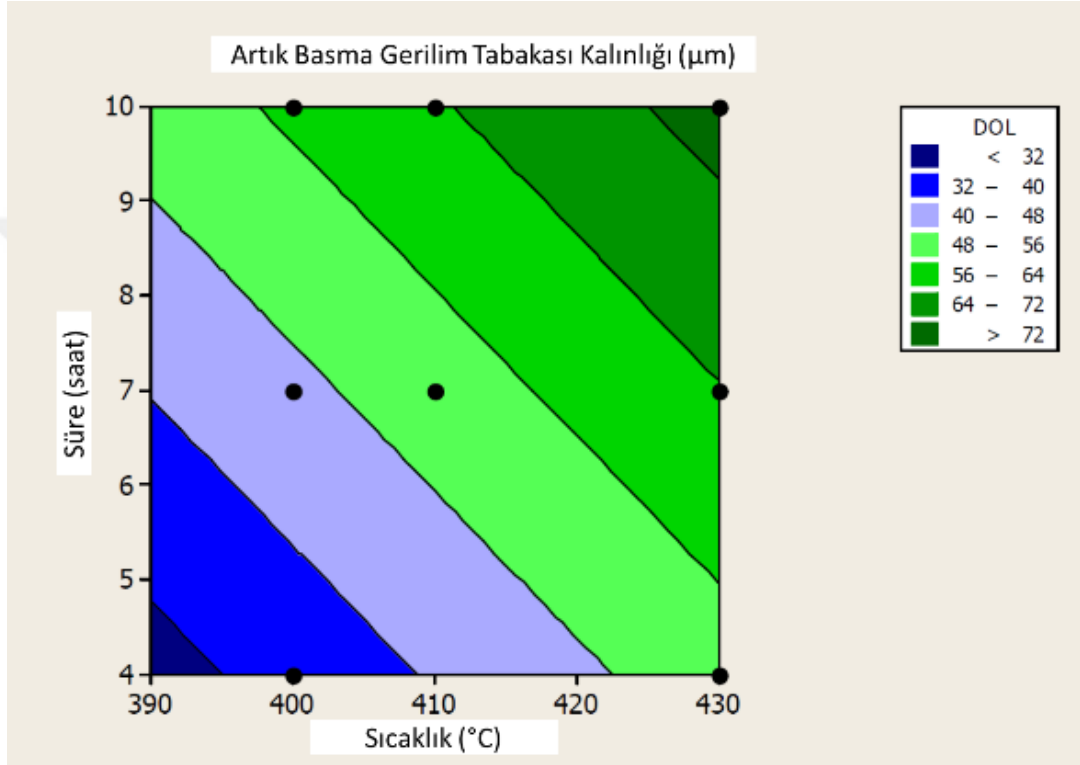
Cam yüzeyi büyük potasyum iyonları ile doldurulduğunda cam yüzeyinde genleşme eğilimi oluşur. Camın geri kalanı bu genleşmeye karşı koyar ve ölçüler aynı kalır. Cam kalınlığı ne kadar küçük olursa basma gerilimi altındaki tabaka kalınlığı ve bu tabakanın genele oranı daha fazla olur ve cam kimyasal temperleme sürecinde daha fazla genleşir. Örneğin, 0,75 mm kalınlığındaki bir camda 50 μm DOL kimyasal temperleme sırasında %0,05 genleşmeye sebep olacaktır. [3]

Net boyutsal değişim, iyon değişimi sonucu genleşme ve tavlama sonucu büzülme arasındaki fark kadardır. Bu durumda genleşme, DOL'nin, cam kalınlığının ve iyon değişimi olan tabakanın hacminin bir fonksiyonudur. 0,75 mm kalınlığa sahip bir cam 50 μm DOL'ye sahip olacak şekilde temperlendiğinde %0,05 genleşme beklenir. Bu durum proses parametrelerine bağlı olduğundan, dar tolerans aralıklarında çalışılıyorsa, genleşme iyi belirlenmelidir. [6]

2.4 Kimyasal Temperlemede Sıcaklık ve Zaman

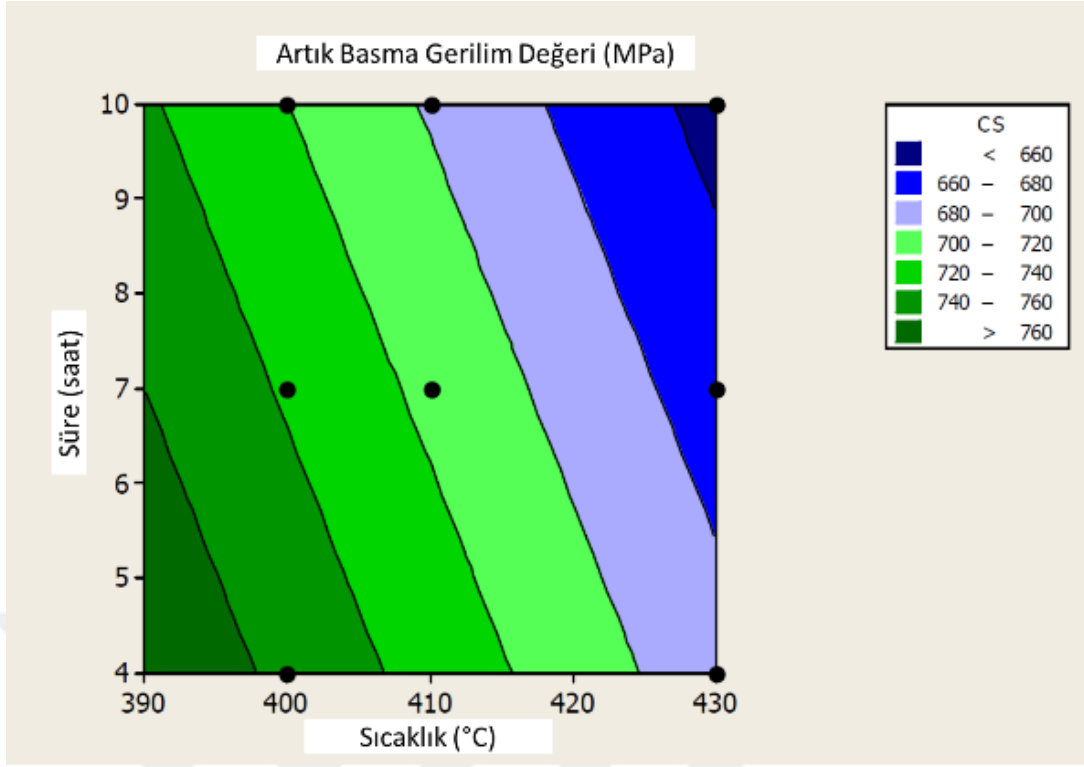
İstenen basma gerilimi karakteristiklerine ulaşmak zaman/sıcaklık parametrelerine bağlıdır. Daha kararlı bir proses için zaman/sıcaklık kontrolü esastır.

Sıcaklık ve sürenin artık basma gerilimi ve bu gerilim tabakasının kalınlığına olan etkisi aşağıdaki şekillerde görülebilir.



Şekil 2.2 Artık basma gerilim tabakası kalınlığı için sıcaklık ve süre ilişkisi [2]

Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere sıcaklık ve süre ayrı ayrı ya da beraber olarak arttıkça tabaka kalınlığı da artmaktadır. Sıcaklık arttıkça cam yüzeyindeki atomlar arası boşluk artacak ve potasyum iyonlarının bu boşluklara girmesi kolaylaşacaktır. Süre arttıkça da potasyum iyonları daha derinlere ulaşabilecek ve böylece tabaka kalınlığı artacaktır.



Şekil 2.3 Artık basma gerilim değeri için sıcaklık ve süre ilişkisi [2]

Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere sıcaklık ve süre ayrı ayrı ya da beraber olarak arttıkça artık basma gerilim değeri azalmaktadır. Çeliklerin tavlansından da bildiğimiz üzere yabancı atomların oluşturduğu dislokasyonlar, sıcaklık ve süre arttıkça rahatlamaktadır.

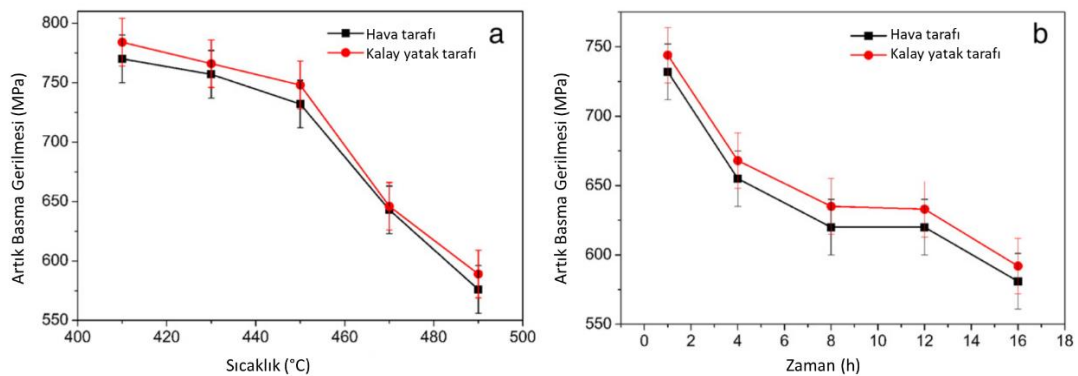
Yapılan başka bir çalışmada 420 °C sıcaklık için farklı sürelerde kimyasal temperleme yapılmıştır. 1, 12 ve 48 saat temperleme süresi için ölçülen artık basma gerilimi ve artık basma gerilim tabakası kalınlığı değerleri aşağıdaki Tablo 2.1’de görülebilir. Tablo incelendiğinde, diğer çalışmalara paralel olarak, temperleme süresi arttıkça artık basma gerilim değerinin azaldığı ve bu tabaka kalınlığının arttığı görülecektir.

Tablo 2.2 Farklı temperleme süreleri için artık basma gerilimi ve tabaka kalınlığı [19]

Temperleme süresi (h)	1	12	48
Artık basma gerilimi (MPa)	747 ± 20	710 ± 20	640 ± 20
Artık basma gerilim tabakası kalınlığı (μm)	15 ± 2	43 ± 2	77 ± 2

Cam üretildikten sonra soğutulurken alttaki kalay yatağa temas eden tarafı ile üstteki hava ile temas eden tarafı arasında elastisite modülü ve sertlik açısından fark yoktur. Ancak kimyasal temperleme sonrasında kalay yatak tarafı hava ile temas eden tarafa göre her zaman daha yüksek sertliğe sahiptir. Yapılan bir çalışmada kimyasal temperlenmiş alüminosilikat camların yüzeyinde oluşan artık basma gerilmesinin camın iki tarafındaki sertlik ve elastisite modülüne etkileri incelenmiştir [12]. Bu çalışmaya göre kimyasal temperleme sonucunda sertlik ve elastisite modüllerinin arttığı bulunmuştur [13,14]. Ancak artık basma gerilmesi değerleri ile sertlik de doğru orantılı artarken elastisite modülünün bundan etkilenmediği bulunmuştur [12].

Farklı sıcaklık ve sürelerde kimyasal temperlenmiş camın hava ve kalay yatak taraflarının artık basma gerilim değerlerine ait grafikler Şekil 2.4'te görülebilir.



Şekil 2.4 Farklı sıcaklık ve zamanlarda kimyasal temperlenmiş camlarda oluşan artık basma gerilmeleri [12]

Yukarıdaki şekil incelendiğinde, artık basma gerilmesi değerlerinin artan sıcaklık ve süre değerleri ile artmakta olduğu ancak kalay yatak tarafının hava tarafına göre her zaman yaklaşık 10 MPa daha fazla olduğu görülmektedir.

Kimyasal temperleme sonrası artık basma gerilmelerinin kalay yatak tarafında hava tarafına göre her zaman daha fazla olmasının sebebi kalay yataktaki kalayın camdaki bağları güçlendirmesi olabilir [15]. Cam bağlarının güçlenmesi termal genişleme katsayısını düşürecek [16] ve potasyum iyonlarının difüzyonunu azaltacaktır. Bu durum tabaka kalınlığının azalmasına sebep olur [17].

2.5 Kimyasal Temperleme Sonrası Parlatma İşlemi

Artık basma gerilimi değeri bu tabakanın derinlerine inildikçe azalır. Yüzeyinde 750 MPa basma gerilimi olan bir camda DOL kalınlığı 50 µm ise, basma gerilimi değeri 15 MPa/µm oranında azalacaktır ($750/50=15$). Temperleme sonrası parlatma işlemi basma gerilimi değerini azaltacaktır ve parçanın dayanımı ve sertliği daha az olacaktır. [7]

Camda Hasar Oluşumu

Cam, inorganik ve amorf yapılı silikat sistemidir. Sıvı halde viskozitesi çok yüksek olduğundan katılaşıırken moleküller kristal yapıya geçemez. Bu yüzden kırılğan yapıdadır.

Camın elastisite modülü alüminyuma benzer ve yaklaşık olarak 70 GPa kabul edilebilir. Çekme dayanımı ise 7 MPa ile 17 GPa arasında değişir. 17 GPa değeri teorik bir değerdir ve yüzeydeki hatalar ile dramatik olarak düşer. Yüzey kusurlarının dayanıma etkisi diğer mühendislik malzemelerine göre çok daha yüksektir. Bu yüzden temperlenmiş camlarda bile 20-25 MPa çekme dayanımlarına ulaşılabilir. Bunun yanında yaklaşık olarak 1000 MPa basma dayanımına sahiptir. [8]

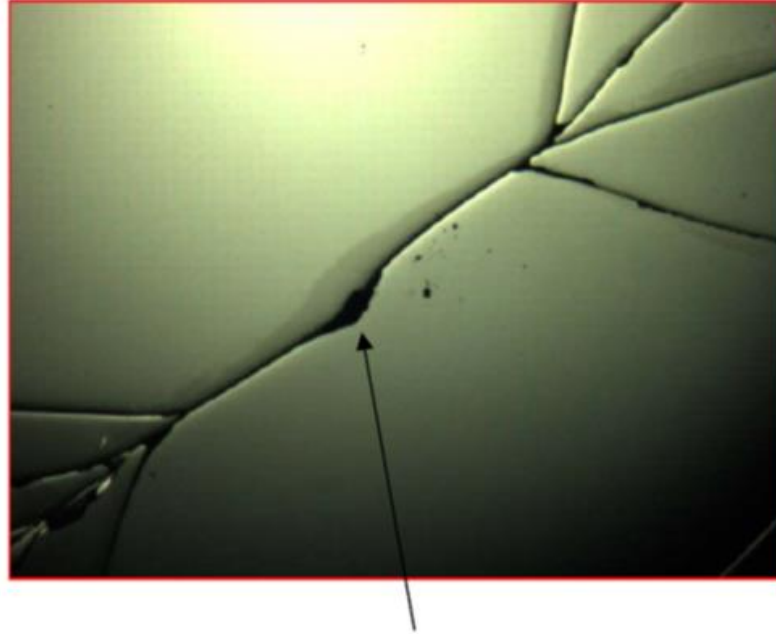
3.1 Kimyasal Temperlenmiş Camlardaki Başlıca Kırılma Biçimi Keskin Uç Darbesi ve Sonucunda Oluşan Eğilmedir

Keskin uç darbesi ile kırılma, camın tepkisi ile tanımlanır. Yük küçük bir alana uygulandığında ve elastik limit aşıldığında kalıcı deformasyon oluşur. Mekanik dayanımı sınırlayan kusur oluşumu kalıcı deformasyon bölgesinde başlar. Aşağıdaki görüntülerde yük uygulanan nokta ve kırılmanın başladığı bölge görülebilir.



Kırılma
başlangıcı

Şekil 3.1 Kırılma başlangıcı



Keskin uç darbesinin merkezi

Şekil 3.2 Keskin uç darbesinin merkezi

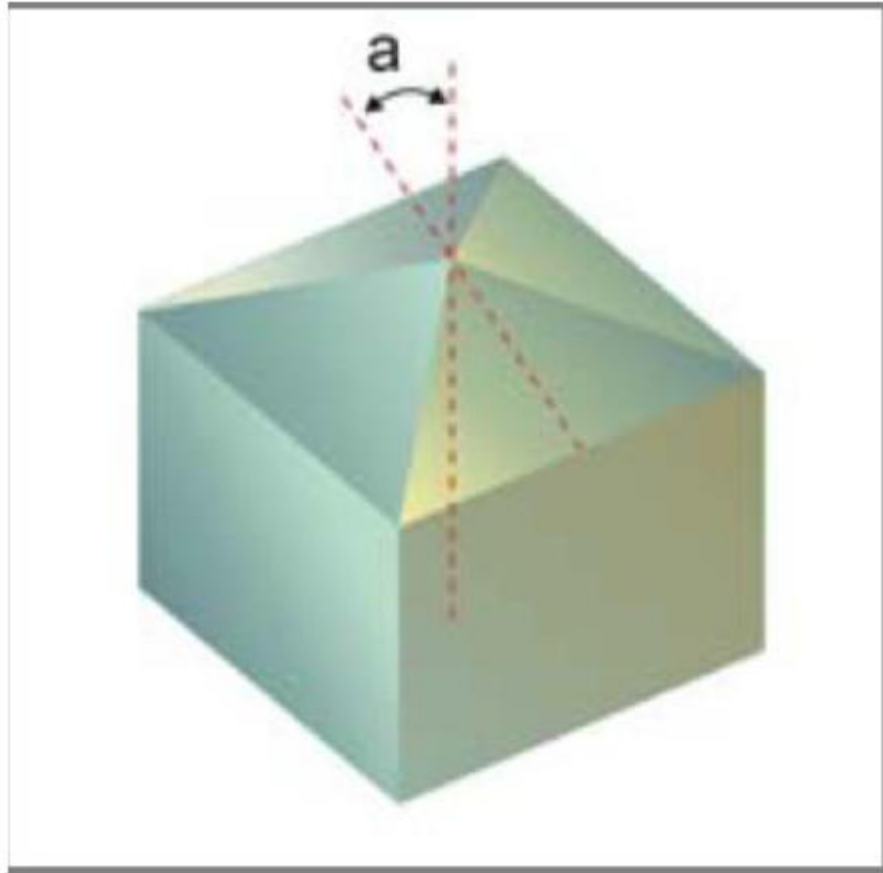
3.2 Elmas Uç Kullanarak Keskin Uç Darbesine Tepkinin Simüle Edilmesi

Cam yüzeyine keskin bir uç ile darbe uygulanması ile ilgili bir uluslararası standart bulunamamıştır. Kırıkların karakterize edilebilmesi için uç açısının ve uygulama hızının etkisini inceleyen çalışmalar yapılmıştır.

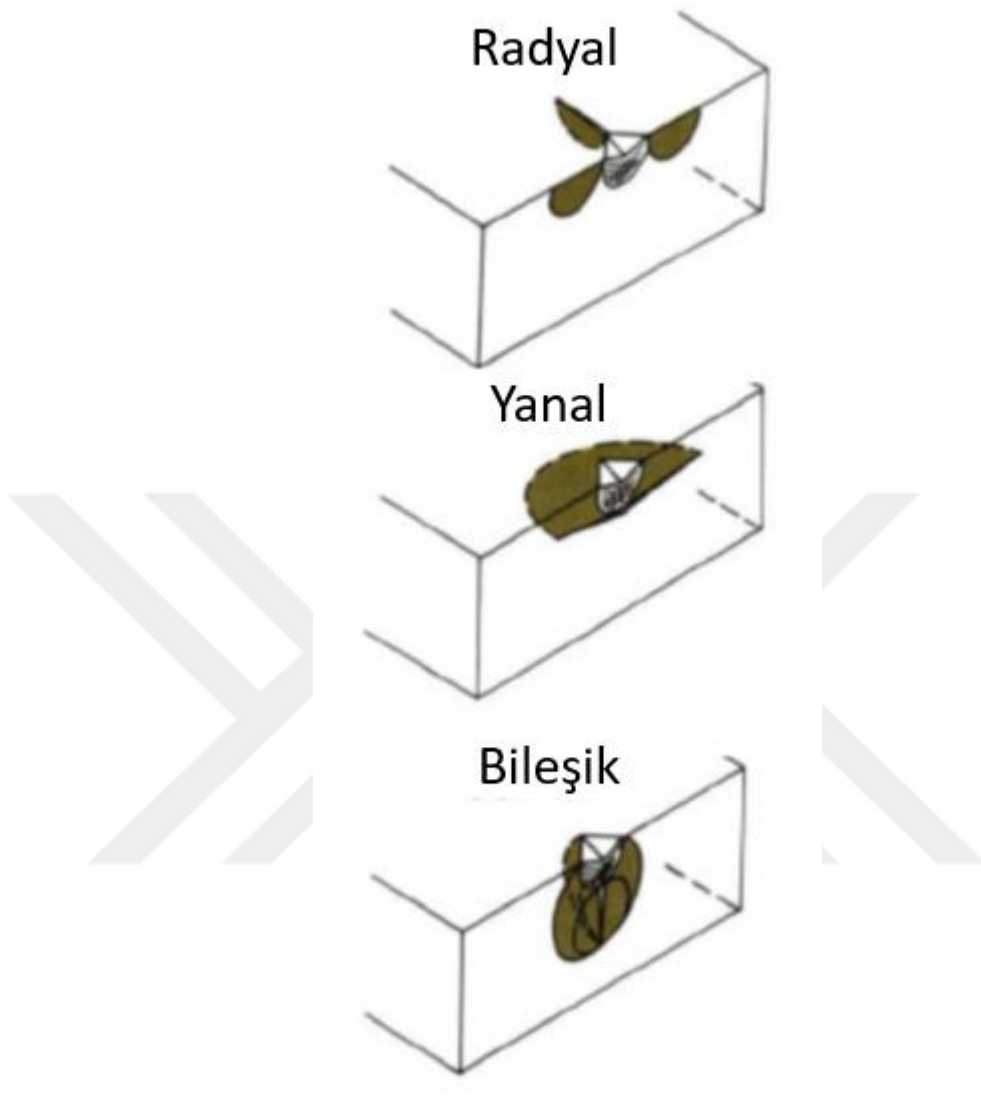
2 yüzü arasındaki açı 136° olan kare piramit şekle sahip elmas uç ile keskin uç darbesi ve kırılma eşitleri aşağıdadır. Bu uç, Vickers sertlik lme yönteminde kullanılan standartlaşmış uçtur.

Kırılma eşitleri řu şekilde karakterize edilebilir:

- Radyal
- Yanal
- Bileşik



şekil 3.3 2 yüzü arasındaki açı 136° olan kare piramit şekle sahip elmas uç
(Vickers sertlik lme yönteminin ucudur)



Şekil 3.4 Kırılma çeşitleri: radyal, yanal, bileşik

3.3 Kimyasal Temperlenmiş Camlarda Vickers Uç ile Radyal, Yanal ve Bileşik Kırıkların Oluşumu

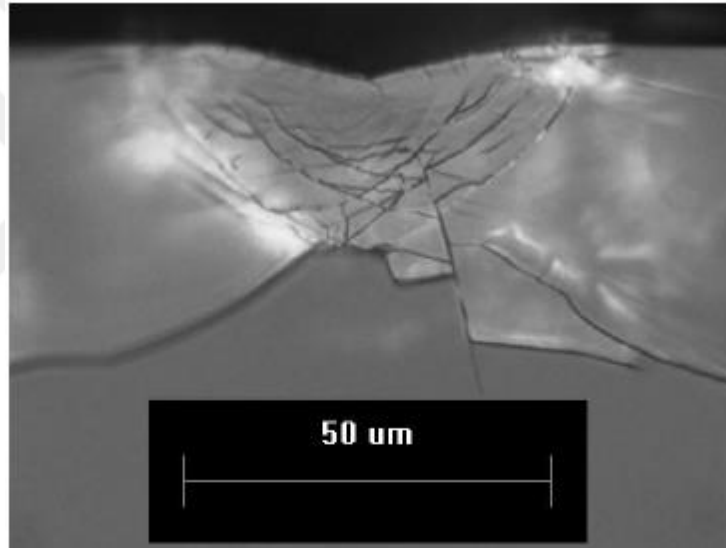
Keskin uç ile kuvvet uygulama, dayanımı sınırlayan kusurların oluşumuna karşı direnci belirlemek için kullanılır. Örneğin radyal ve bileşik kırıklar cam yüzeyine dik olarak yönelmektedir.

Alkali alüminosilikat camın Vickers radyal/bileşik kırılma değeri temperlenmemiş camda 500 g-kuvvet iken kimyasal temperlenmiş camda 7000 g-kuvvet değerlerine,

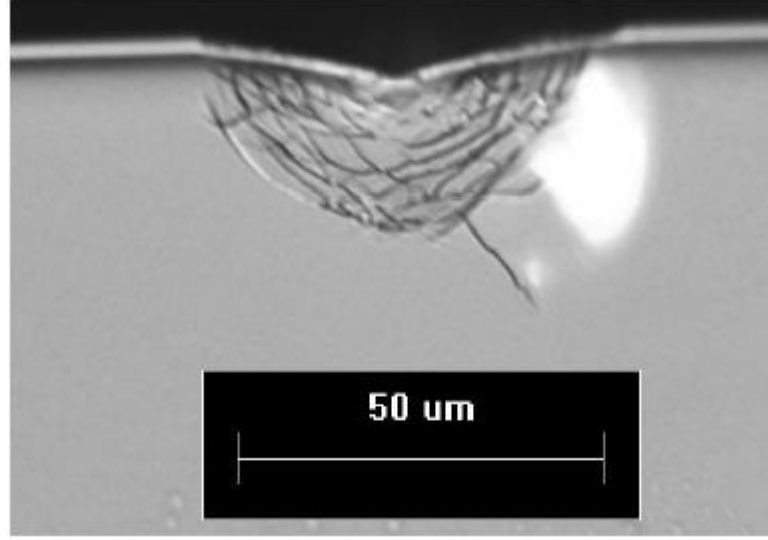
basma gerilimi 700 MPa'a ve temper tabakası kalınlığı 50 mikrona kadar yükselir.
[9]

3.4 Kimyasal Temperlenmiş Camda Deformasyon

Kimyasal temperlenmiş ve temperlenmemiş camlardaki deformasyon mekanizması aynıdır. Kimyasal temperlenmiş ya da temperlenmemiş fark etmeksizin deformasyon kayma gerilmesi ile oluşur. Ancak kayma gerilmesi ile oluşan *hasarın dağılımı*, temperlenmiş camın basma gerilmesine daha dayanıklı olması sebebiyle daha sınırlı olacaktır.



Şekil 3.5 Kimyasal *temperlenmemiş* cama Vickers uç ile 1 kg-kuvvet uygulanması sonucu oluşan kesit



Şekil 3.6 Kimyasal *temperlenmiş* cama Vickers uç ile 1 kg-kuvvet uygulanması sonucu oluşan kesit

3.5 Deformasyon Mekanizmaları

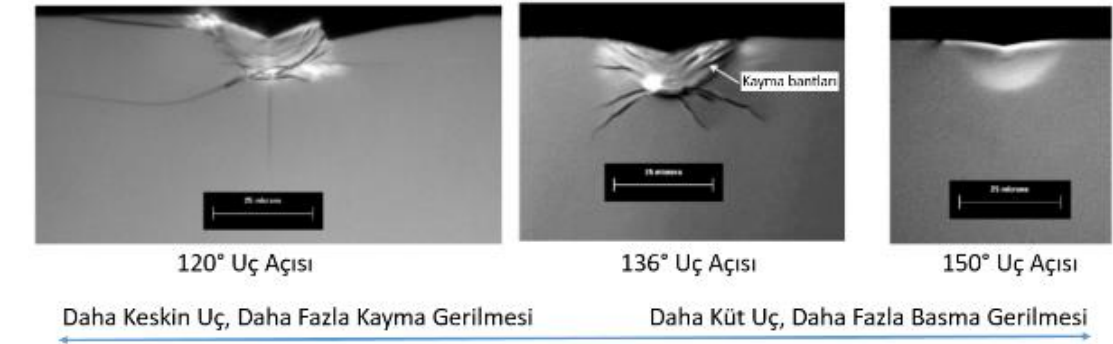
Keskin uç darbesi ile kalıcı deformasyon, kayma ve basma gerilmelerinin sonucu olarak ortaya çıkar. Deformasyon mekanizmalarının oluşması, camın yapısı, keskin uç geometrisi ve uygulanan yüke göre değişir. Daha sivri uçlar tanecikler arası kaymaya sebep olarak kayma gerilmesinin daha fazla olmasını sağlar. Daha küt uçlarla kuvvet uygulanması ise basma gerilmesinin daha yüksek olmasını sağlayacaktır. Daha önce bahsedildiği üzere camın basma dayanımı çekme dayanımına oranla daha yüksektir. Bu yüzden camın kırılabilmesi için daha küt uçlar ile daha yüksek kuvvetler uygulamak gerekecektir. Aşağıdaki 2 başlıkta bu fark incelenecektir.

3.6 Kimyasal Temperlenmemiş Alkali Alüminosilikat Camlarda Çeşitli Uç Yapıları ile 500 g-kuvvet Yük Uygulanması ve Hasarın Kesiti

Kayma gerilmesi ile deformasyon daha büyük kırıkları başlatacak yüzey altı çatlaklara sebep olur. Daha büyük kırıklardan kasıt radyal, yanal ya da bileşik

kırıklar olabilir. Taneler arası kaymaya sebep olan kayma gerilmelerinin daha fazla artık gerilme oluşturur.

Basma gerilmesi ile deformasyon daha az yüzey altı hasar ve daha az artık gerilme oluşturur ve böylece kırılmayı başlatacak olan yük artar.



Şekil 3.7 Uç açısının kırılma şekline etkisi

3.7 Uç Şekli Kütleştirikçe Kimyasal Temperlenmemiş Camların Yüzeyindeki Kırılma Davranışı Daha Fazla Basma Gerilmesi Karakteristiği Gösteriyor



Şekil 3.8 Oluşan gerilmelerin kırılma şekline etkisi

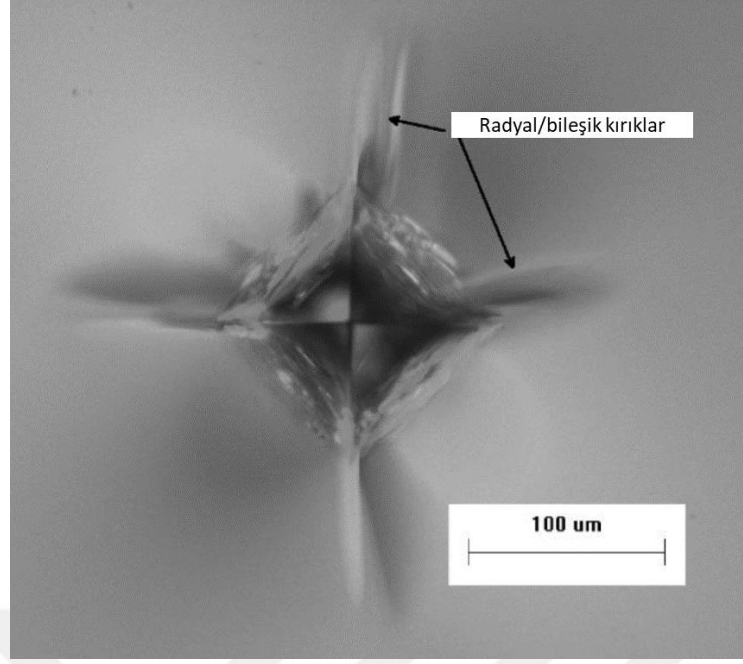
Uç şekli kütleştikçe kimyasal temperlenmemiş camların yüzeyindeki kırılma davranışı daha fazla basma gerilmesi karakteristiği gösteriyor. Deformasyon mekanizması daha fazla basma gerilmesine kaydıka kırık oluşumuna direnç artıyor. Aşağıdaki tabloda uç açısına göre kırılma için gereken kuvvetin nasıl değıştiğı görülebilir.

Tablo 3.1 Kırılma için gereken kuvvetin uç açısına göre değışimi

Uç Açısı	Kimyasal Temperlenmemiş Camda Kırılma Kuvveti [g-kuvvet]	Kimyasal Temperlenmiş Camda Kırılma Kuvveti [g-kuvvet]
120°	15 - 30	50 - 100
136°	300 - 500	5000 - 7000
150°	7000 - 8000	>10000

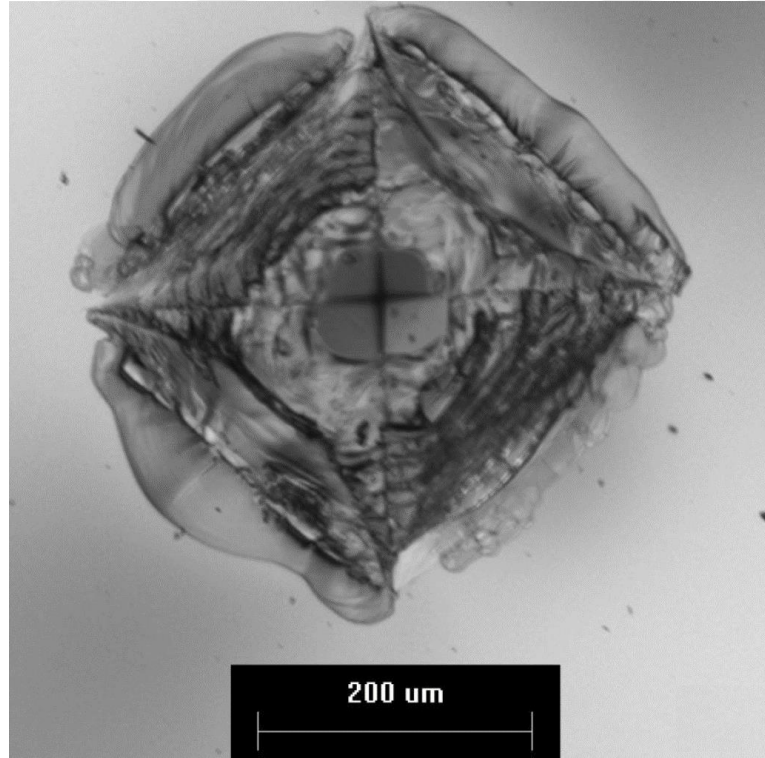
3.8 Deformasyon Mekanizmaları ve Darbe Hızı

Aşağıdaki görüntüler darbe hızının kırık şekline olan etkisini göstermektedir. Neredeyse sıfıra yakın hızla uygulanan görece çok daha düşük yükte radyal/bileşik kırıklar oluşurken çok daha hızlı uygulanan daha yüksek yükte radyal/bileşik kırıklar görülmemektedir.



Şekil 3.9 Kuvvet çok yavaş uygulandığında oluşan kırığın şekli

Kimyasal temperlenmiş alüminosilikat cama çok yavaş hızda 7 kg-kuvvet yük uygulandığında radyal/bileşik kırıklar görülmektedir (yük 0,0033 mm/s hızda 10 s boyunca uygulanmıştır).

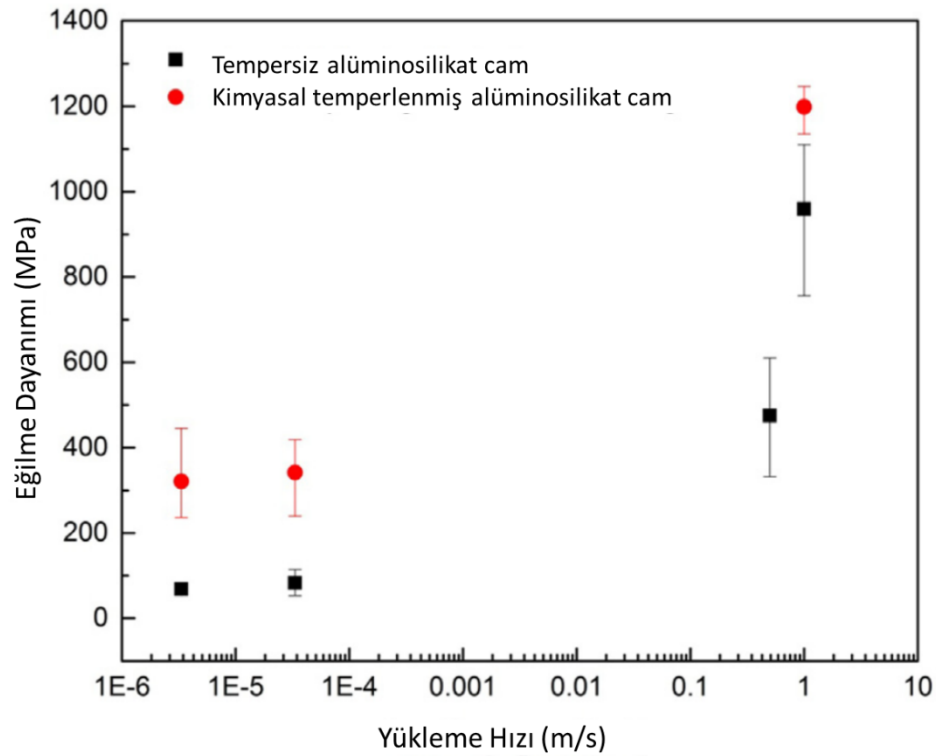


Şekil 3.10 Kuvvet çok hızlı uygulandığında oluşan kırığın şekli

Kimyasal temperlenmiş alüminosilikat cama hızlı bir şekilde 57,3 kg-kuvvet yük uygulandığında radyal/bileşik kırıklar görülmemektedir (yük 410 mm/s hızda uygulanmıştır).

Oluşan kırıklardaki şekil farklılığı, kırığa nasıl bir kuvvetin sebep olduğu noktasında bize ışık tutmaktadır. Bir TV'deki en yüksek maliyet kalemi "open cell" olduğundan bunu anlamak çok önemlidir. Ürüne kutulu haldeyken dışarıdan bir kuvvet gelebilmekte ya da kutusuz iken taşıma sırasında istemeden de olsa elle baskı uygulanabilmektedir. Elle yapılan baskıların çok daha yavaş olacağı kabul edilebilir. Kırıkların nedensel olarak ayrıştırılıp analiz edilmesinde bu farklılık kullanılabilir.

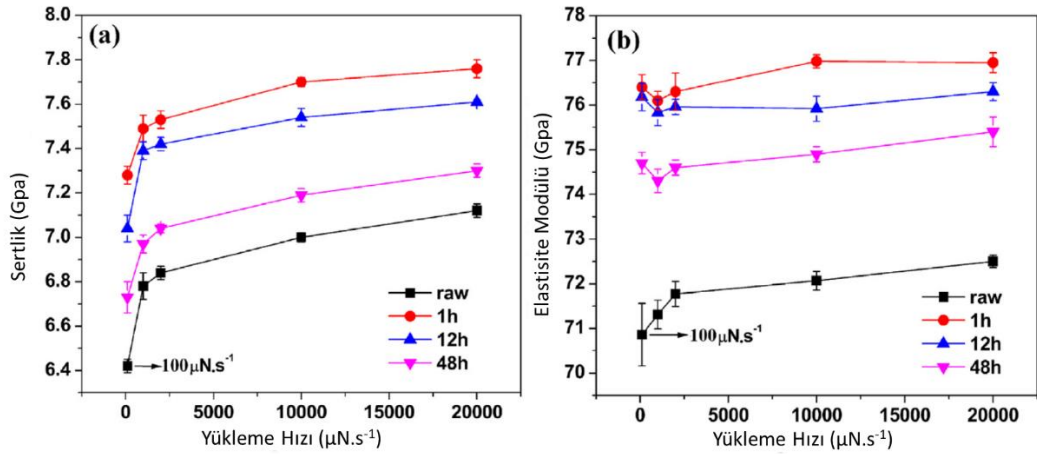
Yapılan bir çalışmada temperlenmemiş ve kimyasal temperlenmiş camların eğilme dayanımları yükleme hızına göre incelenmiştir. Aşağıdaki şekilde yükleme hızına göre eğilme dayanımının nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.11 Tempersiz ve kimyasal temperli camların farklı yükleme hızlarında eğilme dayanımı [18]

Yapılan bir çalışmada, temperlenmemiş ve kimyasal temperlenmiş camlarda yükleme hızının elastisite modülüne ve sertliğe etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.12’de görülebilir.

Yükleme hızı $100 \mu\text{N.s}^{-1}$ ’den $20000 \mu\text{N.s}^{-1}$ ’ye çıktığında temperlenmemiş camın sertliği $\sim\%10.9$ artmaktadır. Kimyasal temperlenmiş camda, aynı yükleme hızı artışında, sırasıyla 1 saat, 12 saat ve 48 saat kimyasal temperlenmiş numunelerin sertlik artışı sırasıyla $\sim\%6.6$, $\sim\%8.1$ ve $\sim\%8.5$ olarak ölçülmüştür. Temperlenmemiş camda, aynı yükleme hızı artışı için, elastisite modülü artışı $\sim\%2.3$ olarak ölçülürken kimyasal temperlenmiş camda artış çok küçük değerdedir [19].



Şekil 3.12 Yükleme hızının sertlik ve elastisite modülüne etkileri [19]

TV'lerde Kullanılan Open Cell'lerin Kırılma Mekanizmasının Araştırılması

4.1 Cam Kalınlığına Göre Kırılma İçin Gereken Kuvvetin Ölçülmesi

Video gösterici ürünlerin ekranlarında kullanılan camlar, ki bunlara “open cell” ismi veriliyor, 0,4 – 0,5 mm kalınlığa sahip iki camın lamine edilmesiyle üretiliyor ve bunların kırılmaları bu ürünlerde karşılaşılan en büyük sorunlardan bir tanesidir. Bu kırılmaların sebeplerinin bilinmemesi önlem almayı zorlaştırmaktadır. Kırılma sebepleri ve kırılma mekanizması bilindiğinde, alınacak önlemlerle çok büyük miktarda hurda masrafından kaçınılabılır. Bu sebeple bir test düzeneği hazırlanmış ve farklı kalınlıklardaki open cell'lerin köşelerine kuvvet uygulanarak kırılma için gereken kuvvetler ölçülmüştür.

4.1.1 Test Düzeneği

Bu testte 50 mm/dakika sabit hızda kuvvet uygulayan basma deney cihazı kullanılmıştır. Kuvvet uygulayan çubuğun ucuna 20 mm çapında bir sünger yapıştırılmıştır.



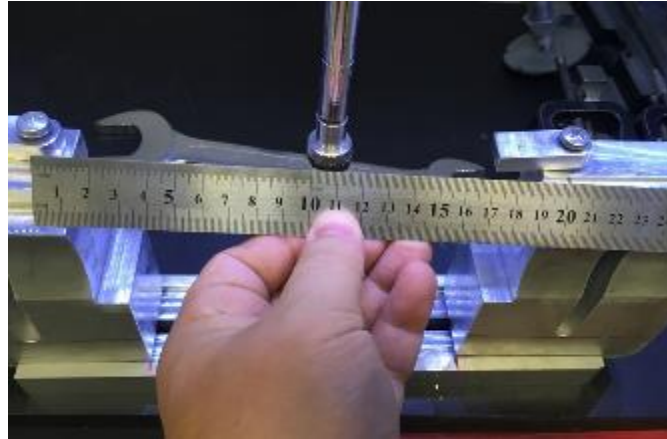
Şekil 4.1 Basma deney cihazının kuvvet uygulayan çubuğu ve ucuna yapıştırılmış sünger

Open cell'ler test sırasında yatay duracak şekilde sabitlenmiştir.

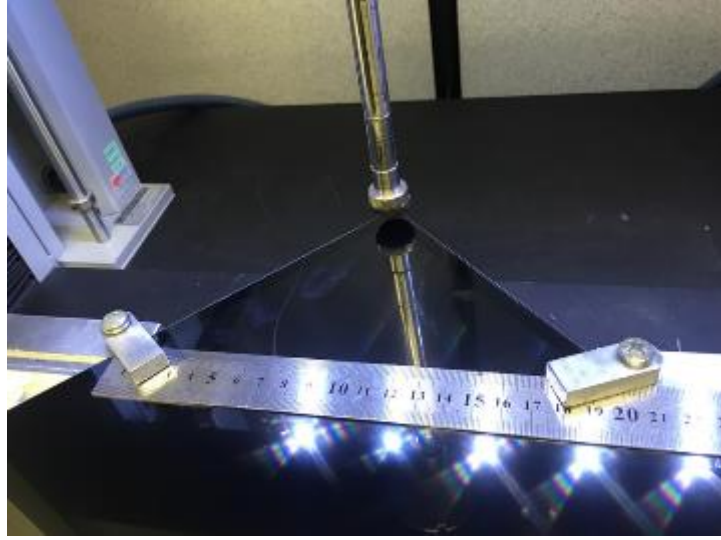


Şekil 4.2 Test sırasında yatay duracak şekilde sabitlenmiş open cell

Köşelerden 140 mm uzaklıktaki noktalar işaretlenmiş ve open cell bu noktalardan sabitlenmiştir. Kuvvet ise tam köşeye uygulanmıştır.



Şekil 4.3 Open cell'in sabitlendiği çeneler



Şekil 4.4 Open cell'in sabitlenmesi ve kuvvet uygulanması

İlk olarak sağ üst köşeye kuvvet uygulanmıştır. Ardından sırasıyla sağ alt, sol üst ve sol alt köşeler teste tabi tutulmuştur.



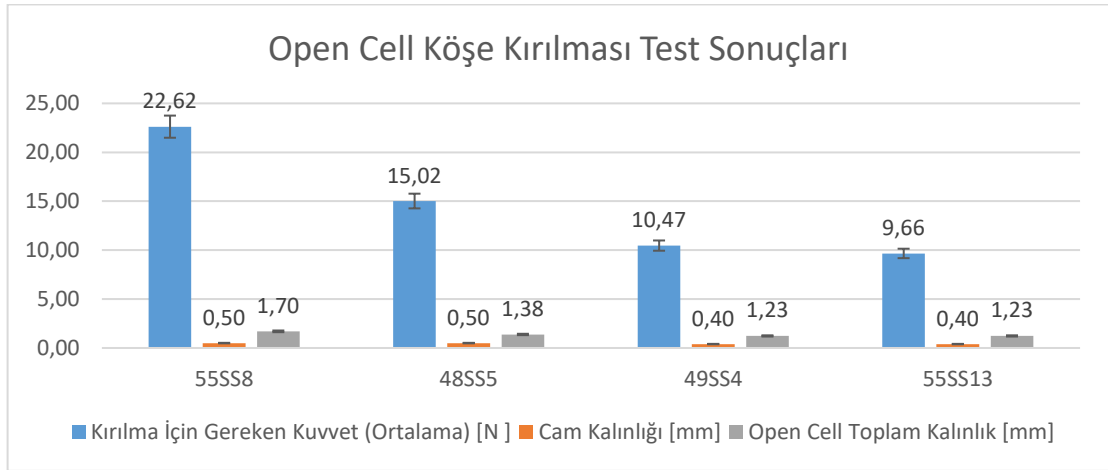
Şekil 4.5 Kuvvet uygulama sırası

4.1.2 Kırılma İçin Gereken Kuvvetlerin Ölçülmesi

Kırılma için gereken kuvvetler kaydedilmiştir ve aşağıdaki tabloda görülebilir.

Tablo 4.1 Kırılma için gereken kuvvetler

Test Numunesi Kodu	Ekran Boyutu [inç]	Cam Kalınlığı [mm]	Open Cell Toplam Kalınlık [mm]	Kırılma İçin Gereken Kuvvet [N]	Kırılma İçin Gereken Kuvvet (Ortalama) [N]
55SS8	55,00	0,50	1,70	22,10	22,62
				19,80	
				24,00	
				26,40	
				20,80	
48SS5	48,00	0,50	1,38	18,70	15,02
				10,50	
				14,50	
				16,80	
				14,60	
49SS4	49,00	0,40	1,23	9,51	10,47
				9,10	
				8,59	
				7,24	
				13,84	
				12,11	
				12,87	
55SS13	55,00	0,40	1,23	10,38	9,66
				12,59	
				10,00	
				8,11	
				9,82	
				9,79	
				8,61	
				8,00	



Grafik 4.1 Open cell köşe kırılması test sonuçları

Cam kalınlığının ve open cell toplam kalınlığının artmasıyla kırılma için gereken kuvvetin artması, beklenen bir sonuç olarak görülmüştür.

4.1.3 Kırılma İçin Gereken Gerilmelerin Hesaplanması

48SS5 kodlu numunede oluşan gerilmenin hesaplanması için gereken veriler aşağıdadır.

Kuvvet kolu: $140 / \sqrt{2} = 99 \text{ mm}$

Uygulanan kuvvet: 15,02 N

Numune kalınlığı 1,38 mm

$$\sigma_{max} = \frac{M.y}{I} = \frac{15,02 \cdot 99 \cdot \left(\frac{1,38}{2}\right)}{\frac{(140 \cdot \sqrt{2}) \cdot (1,38)^3}{12}} = 23,6 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

Daha önce Bölüm 1 ve Bölüm 3'te camın mekanik dayanım değerlerinden bahsetmiştik. Bu noktada open cell'in tek bir cam katmanı olmadığı göz önünde tutulmalıdır. En dış kısımlarda yer alan plastik filmler ve orta kısımda yer alan sıvı içerisindeki elektronik komponentler dayanımı düşürmektedir. Numunemiz tek bir cam katmanı olsaydı, temperlenmiş olması sayesinde daha yüksek eğilme gerilmesi

beklerdik çünkü temperlenmiş camın yüzeyinde basma gerilmesi bulunmaktadır. Bu sayede, eğilme sonucu oluşan çekme kuvvetleri önce basma gerilmesini yenmeli, daha sonra çekme gerilimi bölgesine geçerek camı kırabilecek seviyeye ulaşmalıdır. Az önce bahsedilen plastik filmler ve sıvı içerisindeki elektronik komponentler sebebiyle dayanım düşmektedir. Sonuç olarak, testlerden elde edilen sayısal veriler de bu değerlerle uyumlu görünmektedir.

4.2 TV Halinde İken Kırılmanın İncelenmesi

4.2.1 Kutusuz TV Düşürme Testleri

Ürün halinde iken TV'lere serbest düşme uygulanmıştır. Önce 20 cm'den ardından 30 cm'den düşürülen TV'lerde cam kırılması görülmemiştir.

Laboratuvar zeminine belirtilen yüksekliklerden aşağıdaki şekillerde düşürülmüştür.

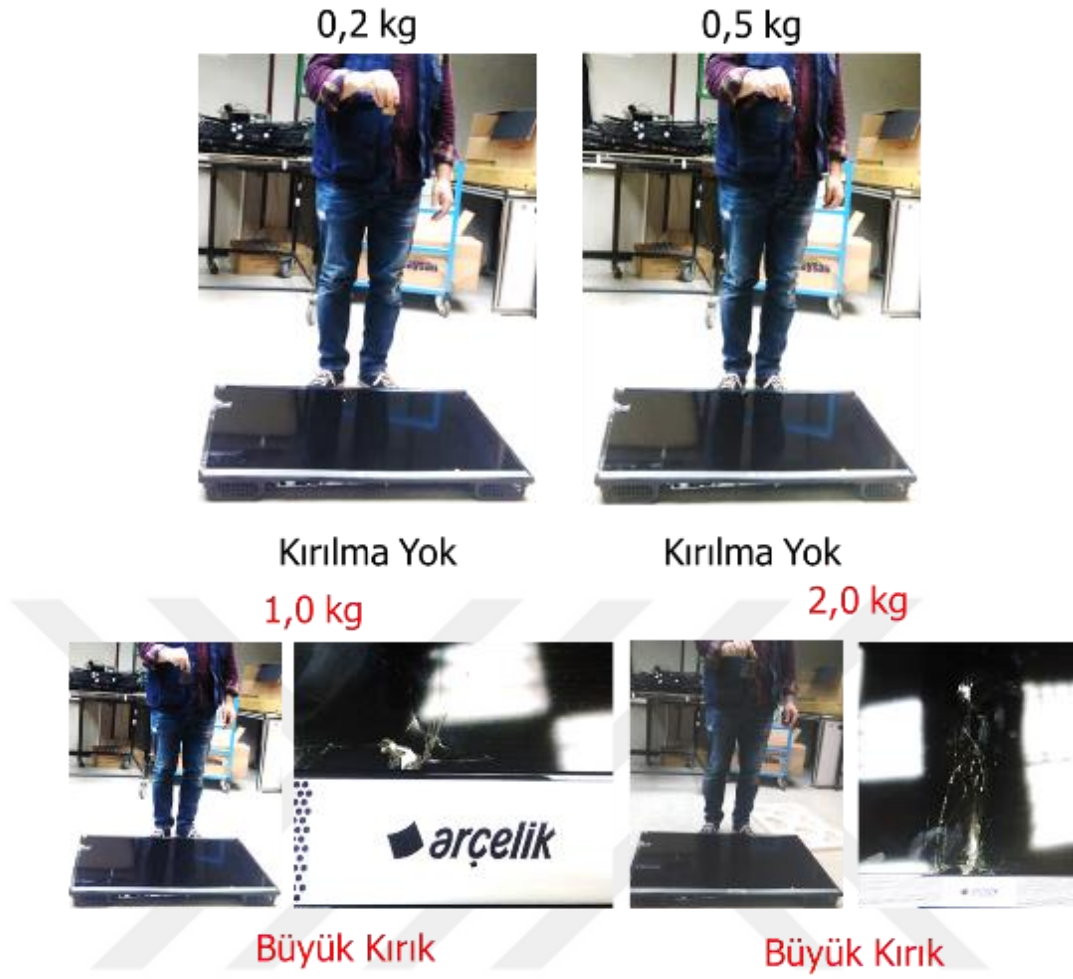
- Alt yüzey
- Üst yüzey
- Sol yüzey
- Sağ yüzey
- Ön yüzey
- Arka yüzey
- Sağ alt kenar
- Sol alt kenar
- Sağ üst kenar
- Sol üst kenar
- Ön alt kenar
- Ön üst kenar



Şekil 4.6 20-30 cm kutusuz TV düşürme testleri

4.2.2 1 m'den Ağırlık Düşürme Testi (Straforsuz)

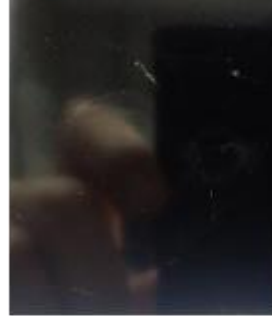
TV yatay olarak bir zemine yerleştirilmiş ve 1 m yükseklikten sırasıyla 0,2 kg – 0,5 kg – 1,0 kg – 2,0 kg kütlesinde ağırlıklar straforsuz olarak TV yüzeyine düşürülmüş ve kırılma durumları incelenmiştir. 0,7 mm cam kalınlığına sahip open cell'li TV'lerde 0,5 kg'a kadar kırılma görülmemiştir.



Şekil 4.7 0,7 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri
(straforsuz)

0,2 kg

0,5 kg



Kırılma Yok

1,0 kg

Küçük Kırık

2,0 kg



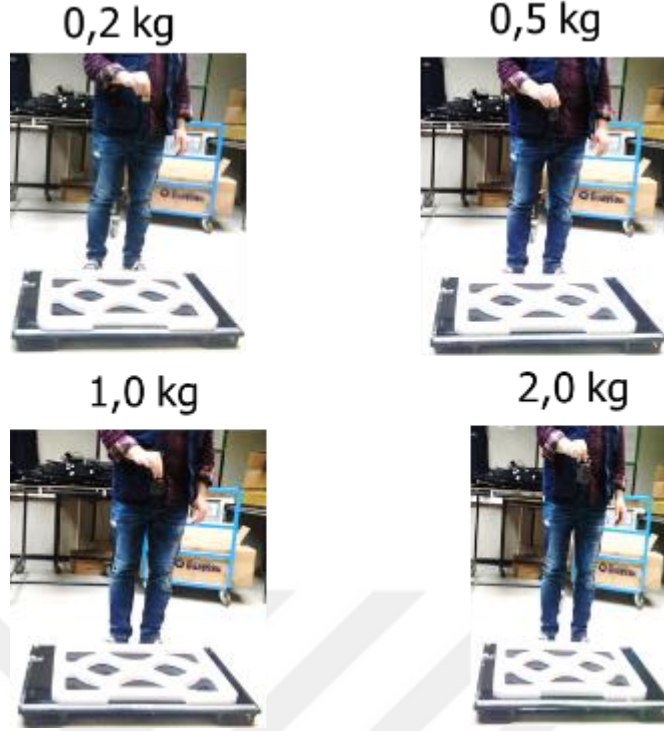
Not: 1 kg'da büyük kırık olması nedeni ile 2 kg testi yapılmamıştır.

Büyük Kırık

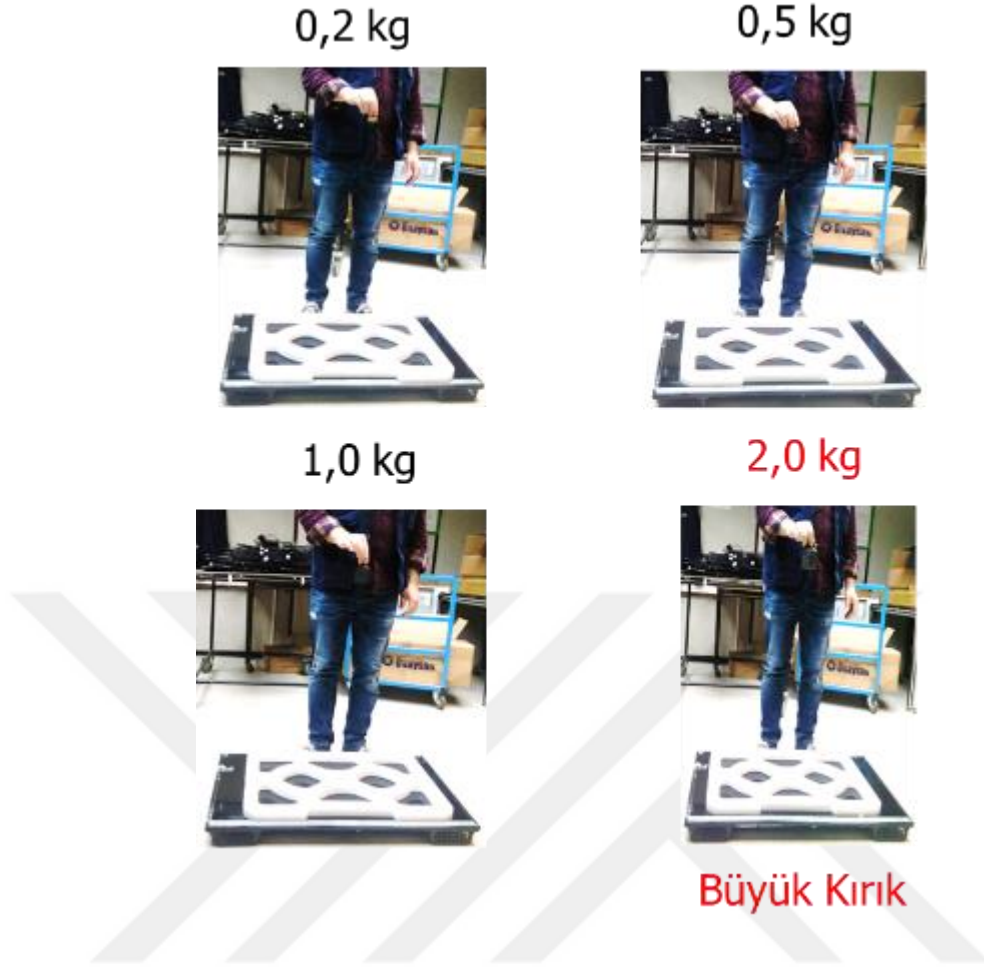
Şekil 4.8 0,5 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforsuz)

4.2.3 1 m'den Ağırlık Düşürme Testi (Straforlu)

TV yatay olarak bir zemine yerleştirilmiş ve 1 m yükseklikten sırasıyla 0,2 kg – 0,5 kg – 1,0 kg – 2,0 kg kütlesinde ağırlıklar straforlu olarak TV yüzeyine düşürülmüş ve kırılma durumları incelenmiştir. 0,7 mm cam kalınlığına sahip open cell'li TV'lerde hiç kırılma görülmezken, 0,7 mm cam kalınlığına sahip open cell'li TV'lerde 2,0 kg'da kırılma görülmüştür.



Şekil 4.9 0,7 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforlu)



Şekil 4.10 0,5 mm cam kalınlığına sahip TV'lere yapılan ağırlık düşürme testleri (straforlu)

4.3 Kutulu TV D   rme Testleri

Bu kapsamda 2 adet kontrollü test yapılmıştır. İlk test setinde 28 adet TV 4 farklı yükseklikten 4 farklı şekilde d   r lm  t r. İkinci test setinde ise ilk setten elde edilen bilgiler yardımıyla kırık oluşumda daha etkili olan d   r  ler 8 adet TV ile gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Kontrollü Test 1 – 28 Adet Kutulu TV D   rme Testi

Bu test kapsamında 4 farklı yükseklikten 4 farklı şekilde  elik y zeyeye düşürme testi gerçekleştirilmiştir. Kombinasyonlar aşağıdadır.

Tablo 4.2 Kontrollü test 1 için düşürme kombinasyonları

Test Numarası	Düşürme Yüksekliği [cm]	Düşürme Şekli	Numune Sayısı
1	60	Kısa Kenar Açılı (Sol Ön)	2
2	60	Kısa Yüzey Dik	2
3	60	Sol Üst Ön Köşe	2
4	60	Sağ Üst Ön Köşe	2
5	100	Kısa Kenar Açılı (Sol Ön)	2
6	100	Kısa Yüzey Dik	2
7	100	Sol Üst Ön Köşe	2
8	100	Sağ Üst Ön Köşe	2
9	120	Kısa Kenar Açılı (Sol Ön)	2
10	120	Kısa Yüzey Dik	2
11	120	Sol Üst Ön Köşe	2
12	120	Sağ Üst Ön Köşe	2
13	160	Kısa Kenar Açılı (Sağ Ön)	2
14	160	Kısa Kenar Açılı (Sol Ön)	2

Kısa Kenar Açılı (Sol Ön) Sol Üst Köşe (Ön Yüz)



Kısa Yüzey Dik

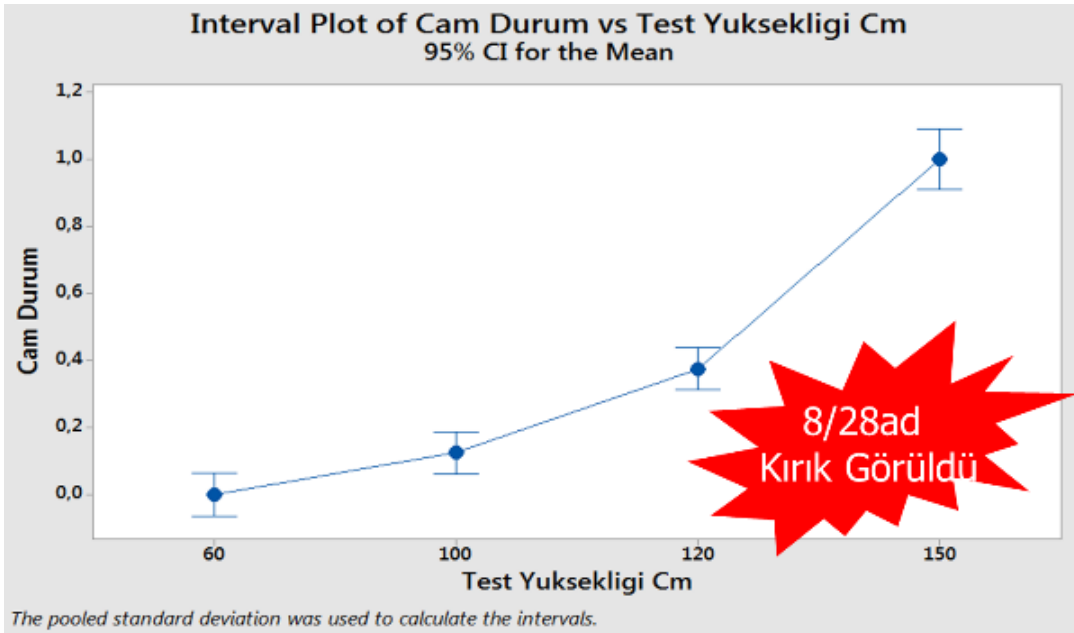


Sağ Üst Köşe (Ön Yüz)



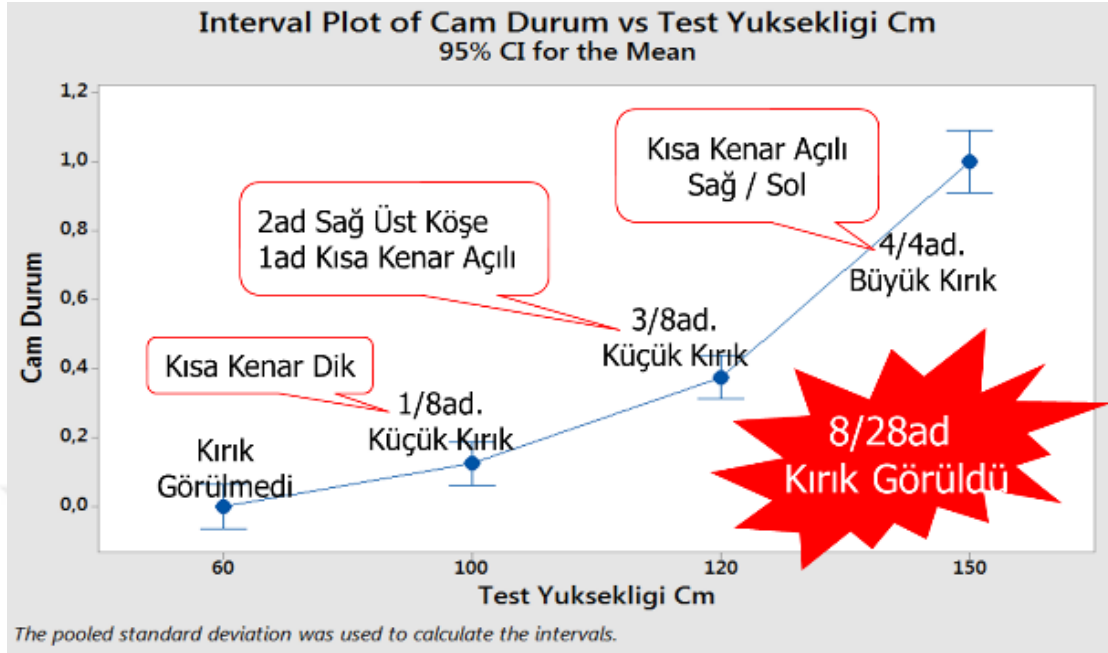
Şekil 4.11 Kontrollü test 1 kapsamında düşürme şekilleri

Testler sonrasında TV'ler açılmış ve kırık durumları incelenmiştir. Test yüksekliğine göre kırık durumunu gösteren grafik aşağıdadır.



Grafik 4.2 Kontrollü test 1 kapsamında test yüksekliğine göre camın kırılma durumu

Kırılmaların hangi yükseklikte hangi düşürüş şekillerinde yaşandığını gösteren bilgiler aşağıdaki grafiktedir.



Grafik 4.3 Kontrollü test 1 kapsamında kırılma gerçekleşen düşürüşler

“Cam durumu” ekseninde “0” değeri kırılma olmamasını, “1” değeri kırılmayı gösterir. Yükseklik grubundaki kırık sayısı, ekseninde oransal olarak belirtilmiştir.

4.3.2 İncelemeler ve Straforda İyileştirme

Yapılan incelemelerde, kırılma yaşanan düşürüşlerin genellikle açılı olanlar olduğu görülmüştür. Cam yüzeyine paralel ya da dik gelen kuvvetler camın kırılması için yeterli olmazken, TV kutusunun açılı düşürülmesi durumunda cam genellikle kırılmaktadır. Camı tutan TV konstrüksiyonu çeşitli sac metal ve plastik parçalardan oluştuğu için yeterince rijit değildir. Bu yüzden bu kuvvetler sonucunda tüm TV’de eğilmeler meydana gelmektedir.

Daha önce bölüm 1.5’te eğilme sonucu oluşan kuvvetleri görmüştük. Bölüm 4.1’de de 1,38 mm toplam kalınlığa sahip bir open cell’de 23,6 MPa’lık bir eğilme gerilmesinin kırılma için yeterli olduğu görülmüştü.

Ayrıca bölüm 3.1.9’da darbenin uygulanma hızı arttıkça dayanımın arttığı da görülmüştü. 120 cm’den yapılan düşürmede 153,4 mm/s; 150 cm’den yapılan düşürmede de 171,6 mm/s hız ile zemine çarpma gerçekleşiyor. Bu durumda, yapılan testlerde oluşan darbe hızının görece yüksek hızda olduğu söylenebilir.

Bu verilerden yola çıkarak yaşanan open cell kırılmalarında en etkili mekanizmanın eğilme olduğu söylenebilir. Open cell’deki eğilmeler engellendiği takdirde kırılmaların önemli ölçüde azalacağı beklenebilir.

TV’nin konstrüksiyonu gereği çok rijit olmadığını söylemiştik. Estetik ve maddi kaygılar sebebiyle TV ürün konstrüksiyonunu kalınlaştırmak ya da konstrüksiyonda daha rijit malzemeler kullanmak tercih edilmemektedir. Bu durumda, yapılan açılı düşürüşlerde TV kabininin eğilmesini önlemek için straforun daha rijit olması ve daha fazla enerji absorbe etmesi çözüm olabilir.

Bu kapsamda, üründe kullanılan straforun yoğunluğu arttırılarak rijitliğinin ve enerji absorbe edebilmesinin arttırılması planlanmıştır.

Strafor kırılınca straforun rijitlik konusunda ürüne verdiği destek kaybolmaktadır.

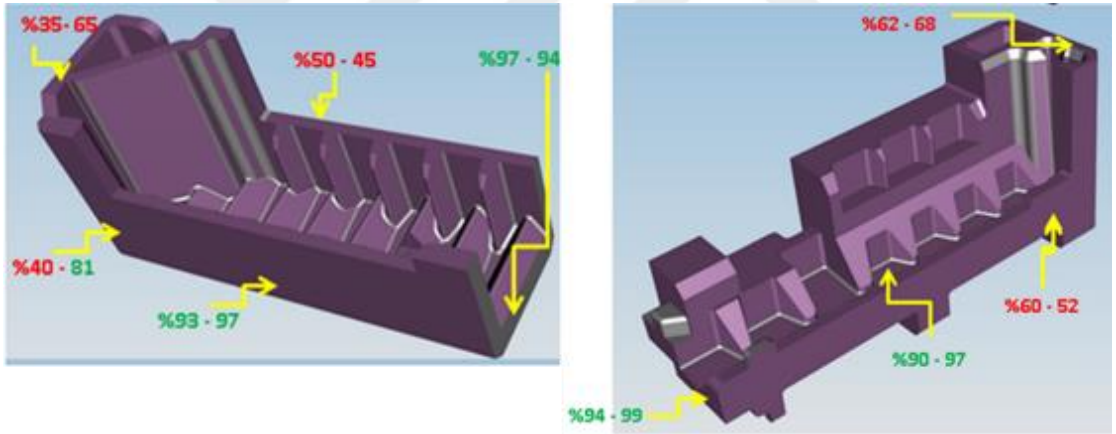
Bu amaçla, yoğunluk, füzyon ve impact testi değerleri ölçülmüştür.

Yoğunluk ölçümü için straforun ölçülecek bölgelerinden numuneler kesilir ve suya batırılır. Taşan su miktarı ile yoğunluk hesabı yapılır.

Füzyon testi füzyon kontrol cihazı ile yapılır. Bu test için uluslararası bir standart bulunamamıştır. Hava basıncı ile çalışan bu cihazda bir prob bulunur ve bu prob ölçüm yapılacak bölgeye batırılır. Cihaz probun ucundan hava göndermeye çalışır. Strafor tanecikleri arasında ne kadar boşluk varsa prob ucundan o kadar çok hava çıkışı olur. Çıkan hava kadar basınç düşümü olacağından hava deposunun göstergesinden bu değer okunabilir. Ölçüm yapılan bölgede tanecikler arası kaynaşma tam olarak gerçekleşmişse probun ucundan hava çıkışı olmaz ve füzyon %100 kabul edilir. Füzyon kontrol cihazı aşağıdaki şekilde görülebilir.



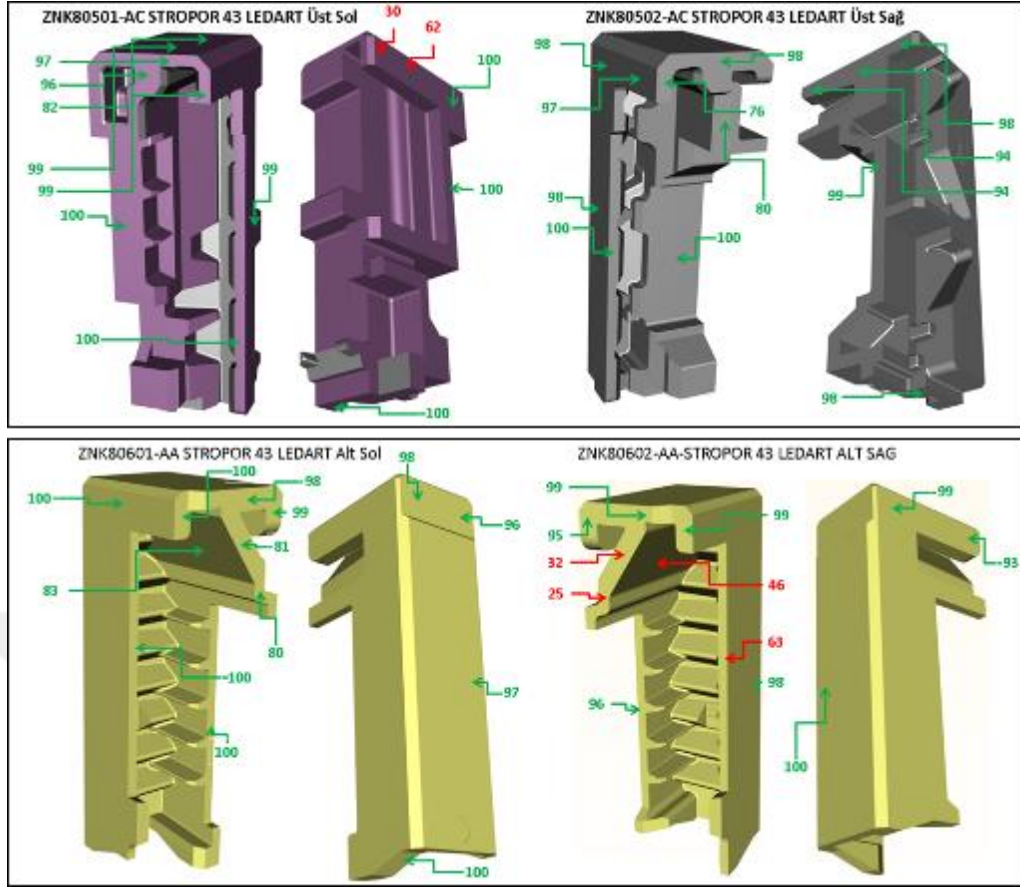
Şekil 4.12 Füzyon kontrol cihazı



Şekil 4.13 Mevcut straforda füzyon ölçümü

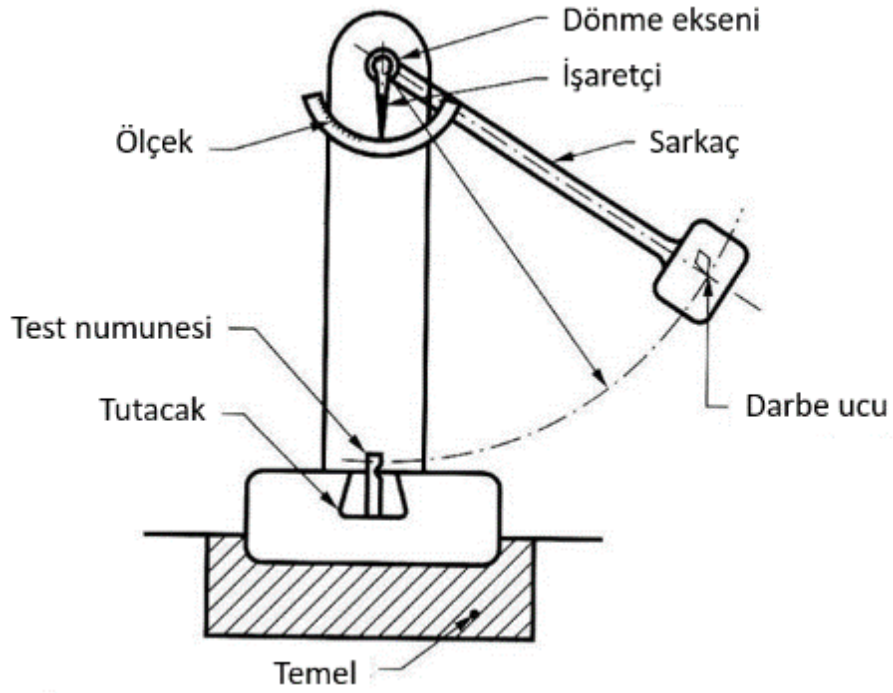
Mevcut strafor daha yüksek yoğunlukta üretilmiş ve aynı testler tekrar edilerek ölçümler yapılmıştır.

Yüksek yoğunlukta üretilen straforların füzyon ölçümleri aşağıdaki şekilde görülebilir.



Şekil 4.14 Yüksek yoğunlukta üretilen straforda füzyon ölçümü

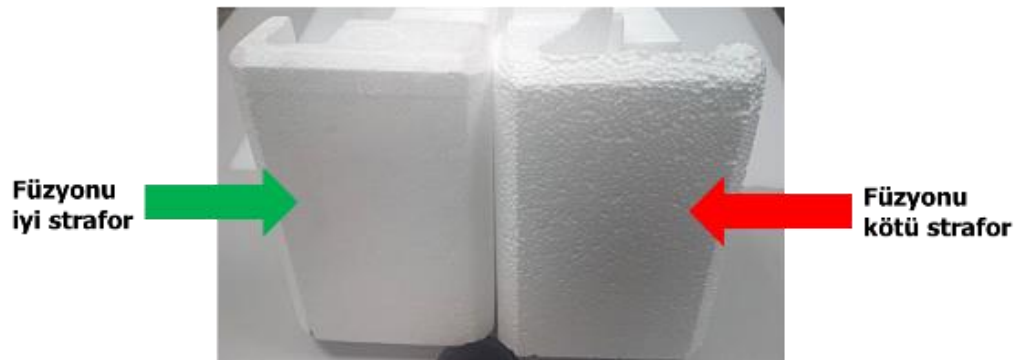
Impact testi impact test cihazı ile ASTM E23 standardına göre yapılır. Bir kütle bir sarkaç yardımıyla bırakılır ve yer çekimiyle test numunesine çarptırılır. Sarkaç ilk konumda belli bir potansiyel enerjiye sahiptir. Sarkaç test numunesini kırdıktan sonra yoluna bir miktar daha devam eder ancak bu sefer diğer tarafta daha alçak bir noktada hareketini tamamlar. İki yükseklik arasındaki potansiyel enerji farkı test numunesini kırmak için harcanmıştır. Bu değer not edilir. Impact testinin prensibini açıklayan görsel aşağıdadır.



Şekil 4.15 Impact test cihazı

Yüksek yoğunlukta üretilen straforların yoğunluk, füzyon ve impact testi ölçümleri ve önceki haliyle karşılaştırması aşağıdaki şekilde görülebilir.

	Yoğunluk [18 --> 28 g/dm ³]				Impact Testi [kj/m ²]				Füzyon [%] (min %70)			
	Alt Sağ	Alt Sol	Üst Sağ	Üst Sol	Alt Sağ	Alt Sol	Üst Sağ	Üst Sol	Alt Sağ	Alt Sol	Üst Sağ	Üst Sol
Mevcut	22	19	19	20	2,1				35-40-45-50-65-81-93-94-97			52-60-62-68-90-94-97-99
Yüksek Yoğunluk Deneme	29	25	35	35	8,2	8,6	7	8,6	25-32-46-63-95-96-98-99	80-81-83-96-97-98-99-100	76-80-94-97-98-100	30-62-96-97-99-100



Şekil 4.16 Yüksek yoğunlukta üretilen strafora yoğunluk, impact ve füzyon değerleri

4.3.3 Kontrollü Test 2 – 28 Adet Kutulu TV Düşürme Testi

Bu test kapsamında 2 farklı yükseklikten 4 farklı şekilde çelik yüzeye düşürme testi gerçekleştirilmiştir. Her test için 2 TV kullanılmıştır. Kombinasyonlar aşağıdadır.

Tablo 4.3 Kontrollü test 2 için düşürme kombinasyonları

Düşürme Yüksekliği [cm]	Strafor	Düşürme Şekli	Açıklamalar
120	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sol Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sol Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sol Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok
120	Yüksek Yoğunluklu	Sol Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sol Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sol Üst Ön Köşe	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Ön Kısa Kenar	Sağ alt köşede cam kırık
150	Yüksek Yoğunluklu	Sağ Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sol Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok
150	Yüksek Yoğunluklu	Sol Ön Kısa Kenar	Camda kırık yok

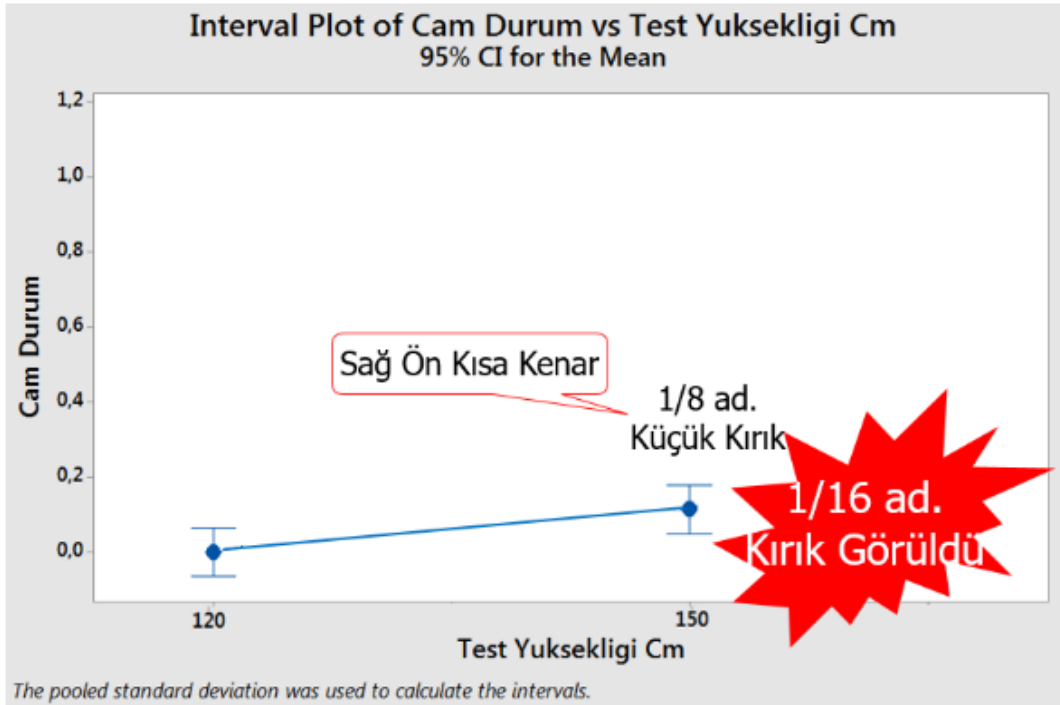
Test Yüksekliği 120cm
Sol Üst Ön Köşe
Sağ Üst Ön Köşe
Sağ Ön Kısa Kenar
Sol Ön Kısa Kenar



Test Yüksekliği 150cm
Sol Üst Ön Köşe
Sağ Üst Ön Köşe
Sağ Ön Kısa Kenar
Sol Ön Kısa Kenar



Şekil 4.17 Kontrollü test 2 kapsamında düşürme şekilleri

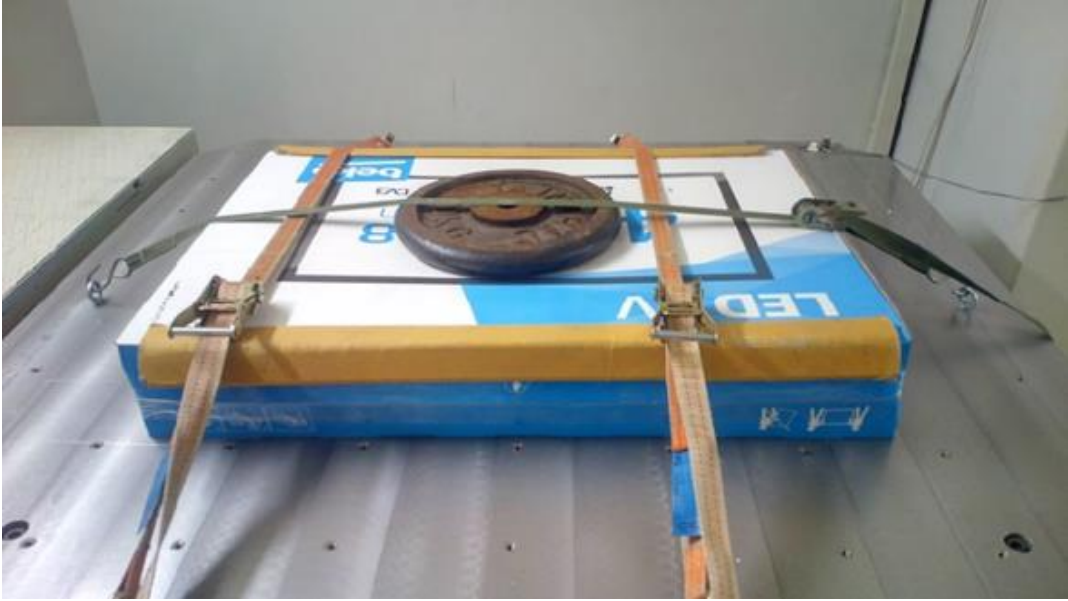


Grafik 4.4 Kontrollü test 2 kapsamında kırılma gerçekleşen düşürüşler

“Cam durumu” ekseninde “0” değeri kırılma olmamasını, “1” değeri kırılmayı gösterir. Yükseklik grubundaki kırık sayısı, eksende oransal olarak belirtilmiştir.

4.4 Ağırlıklı Titreşim Testleri

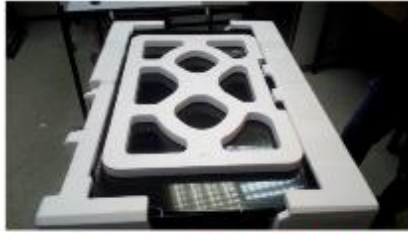
Nakliye sırasında ürünün yan yatırıldığı ve üzerine başka yükler konduğu, istenmeyen bir durum olsa da ve kutu üzerinde bu durumu yasaklayan işaretler bulunsa da, bilinen bir gerçektir. Bunu simüle edebilmek için hali hazırda uygulanan titreşim testi, “ağırlıklı titreşim testi” şeklinde değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Mevcut durumda kullanılan ön straforun ürünü yeterince korumadığı düşünülmektedir.



Şekil 4.18 Ağırlıklı titreşim testinin uygulama şekli

Daha önce bölüm 3.1.8’de görüldüğü üzere kuvvet uygulayan ucun açısı arttıkça kırılma için gereken kuvvet üstel olarak artmaktadır. Mevcut ön strafor yapısındaki boşaltmaların uç açısını küçülttüğü kabul edilebilir. Straforun open cell’e basan yüzeyindeki kenarlar bir bakımdan 90 derecelik uç gibi davranmaktadır.

Bu amaçla aşağıdaki denemeler yapılmış ve kırık konusunda önemli iyileştirmeler elde edilmiştir.



Mevcut 5 dk. büyük kırık (1/1)



Boşaltmasız 5 dk – kırılmadı (0/1)
15 dk – büyük kırık (2/3)



Kenar Boşaltmalı 5 dk–kırılmadı (0/1)
15 dk–büyük kırık (2/3)



Komple – panel strafor-5 dk–kırılmadı (0/1)
15 dk–kırılmadı (0/3)

Şekil 4.19 Ağırlıklı titreşim testleri kapsamında yapılan denemeler

Testlerde 20 kg'lık yük kullanılmıştır.

Öncelikle mevcut strafor kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. 5 dakika sonunda kutu açılıp incelendiğinde büyük kırıkla karşılaşılmıştır. Daha sonra iç boşaltmaları olmayan bir ön strafor kullanılarak test tekrarlanmıştır. 5 dakika sonunda kırıkla karşılaşılmamasına rağmen 15 dakikalık testte ürün yine kırılmıştır. Bu testlerde kullanılan ön straforlar doğrudan open cell'e basmaktadır.

Ön straforun doğrudan open cell'e basmaması için strafor yanlardan genişletilerek öncelikle ön çerçevenin yan kenarlarına basması sağlanmıştır. Üst ve alt kenarlar uzatılmamıştır. Bu denemede bir iyileştirme görülmemiştir.

Son olarak ön strafor 4 kenardan da uzatılarak kenarlardan TV'nin ön çerçevesine basması sağlanmıştır. 3 TV numunesi de 15 dakikalık testlerin sonunda hasar görmemiştir.

Uygulanan kuvvetin uç açısı değerlendirilerek yapılan bu denemeler çok önemli bir iyileştirme sağlamıştır.

4.5 Testlerin Sonuçları

"Kısa kenar açılı" ve "Sağ-Sol üst köşe" düşmelerin cam kırılmasında etkili olduğu görölmüşür.

Alt-üst straforlarda yoğunluk arttırıldığında artan füzyon değeriinin kırılmalarda azalmaya sebep olduğu görölmüşür. Bu değeriin artmasıyla birlikte TV daha az eğilmeye maruz kalmıştır ve kırılmalar önemli ölçüde azalmıştır.

Ön koruma straforunun plastik çerçeveye bastığı durumlarda kırılmanın azaldığı görölmüşür.



Sonuç Ve Öneriler

Cam, ışık geçirgenliği sayesinde her zaman önemli bir mühendislik malzemesi olmuştur. Bununla birlikte diğer mühendislik malzemelerine oranla çok daha kırılğan bir yapıya sahiptir. Eskiden en önemli kullanım alanı inşaat sektörü iken artık otomotivde ve gelişen teknoloji ile birlikte tüketiciler elektroniklerinde çok önemli bir yer tutmaktadır.

Video gösterici ürünlerde kullanılan camlar, sektördeki büyük rekabet sebebiyle tamamen maliyet odaklı olarak incelmektedir. Buna ek olarak, TV özelinde ekran boyutlarının yıllar içinde sürekli olarak büyüdüğünü görüyoruz.

2009 yılında tüm dünyada satılan TV'lere baktığımızda 40"-49" arası ekran boyutunun %25 ve 49" st ekran boyutunun %7'lik bir pazar payına sahip olduğunu görürken 2018 yılında 40" - 49" arası ekran boyutunun %52 ve 49" st ekran boyutunun %29'luk bir pazar payına sahip olduğunu görüyoruz.

Hem camların incelmesi hem de ekran boyutlarının büyümesi, TV retim sektöründe "ekran kırılması" sorununun çok önemli bir yer tutmaya başlamasına sebep olmuştur.

Sektöründe lider bir şirketin "panel kırık" hatalarına baktığımızda kayda değer bir fark görüyoruz. Bahsedilen inceleme yıllar içerisinde sürekli bir halde olsa da 2014-2015 yıllarında open cell kalınlıkları 1.8 mm'den 1.6 - 1.5 mm'lere düşmüş ve sonrasında 2019 yılında 1.1 mm'lere kadar incelmifştir. 48" - 49" aralığındaki ekranların ürün haline geldikten sonraki kırılma oranları 2016 yılında 2014 yılına göre %38 artmıştır. Tüm ekran boyutlarını ele aldığımızda 2016 yılındaki kırılma oranı 2014 yılına göre %86 artmıştır. Daha büyük ekran boyutları bu artışın daha da fazla olmasına neden olmuştur.

Video gösterici ürünlerde en büyük maliyet kalemi ekran (open cell) olduğundan, kırılmaların önlenmesi başlıca odak noktalarından biridir. Bu noktada camların

kırılma mekaniğinin bilinmesi ve alınacak önlemlerle hurda masraflarından kaçınılması amacıyla çalışmalar yapılmıştır.

43" – 49" arası ekran boyutlarında open cell maliyetinin tüm maliyet kalemlerine oranı %47 – 51 arasında iken 55" – 65" arası ekran boyutlarında bu oran %53 – 59 arasında olmaktadır. Tamiri mümkün olmayan bir parça olduğu düşünüldüğünde alınacak önlemlerin ne kadar önemli olduğu görülecektir.

Öncelikle camların genel yapısı incelenmiş ve özellikleri araştırılmıştır. Kırılğan yapısıyla bilinen camlar artık işlemsiz olarak kullanılmamakta, ısı ve kimyasal temperleme işlemleriyle mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Video gösterici ürünlerin ekranlarında kimyasal temperlenmiş camlar kullanıldığından kimyasal temperleme işlemi araştırılmış ve bu konuda yapılan bilimsel yayınlar taranmıştır.

TV'lerde kullanılan open cell'lerin mekanik özellikleri, testler yapılarak incelenmiş ve kırılma için gereken kuvvetler ve gerilmeler bulunmuştur. Kompozit bir yapıya sahip olan open cell'leri 5 kısma ayırabiliriz. En dış kısımda ince plastik filmler bulunmaktadır. Bunlardan hemen sonra 0.4 – 0.5 mm kalınlığa sahip camlar bulunurken orta kısımda elektronik komponentler vardır. Testlerden elde edilen sonuçlar kimyasal temperlenmiş camların mekanik özellikleri ile karşılaştırılmış ve yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Ürün özelinde kırılmanın anlaşılabilmesi için ürün halinde testler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda TV'ler belirli yüksekliklerden belirli şekillerde düşürülerek saha şartları simüle edilmeye çalışılmıştır. Burada "kısa kenar açılı" ve "sağ-sol üst köşe" düşmelerin cam kırılmasında etkili olduğu görülmüştür. Bu düşürüşlerde zeminden gelen kuvvetler ürün üzerinde eğilme gerilmelerine sebep olmaktadır.

Alt-üst straforlarda yoğunluk arttırıldığında artan füzyon değerlerinin kırılmalarda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Bu değerlerin artmasıyla birlikte TV daha az eğilmeye maruz kalmıştır ve kırılmalar önemli ölçüde azalmıştır.

Yapılan ilk kontrollü testte 120 ve 150 cm'den yapılan düşürüşlerde 7/12 (%58) kırılma oranı ortaya çıkarken, yoğunluğu arttırılmış straforlarla yapılan ikinci kontrollü testte 1/16 (%6) kırılma oranı görülmüştür. Yan yüzeylere yapılan dik düşürüşlerin etkili olmadığını da görmüştük. Bu karşılaştırmadan "yan yüzey – dik"

düşürüşlerini çıkartırsak, 7/10 (%70) ve 1/16 (%6) değerlerini buluruz. Bunun çok önemli bir iyileştirme olduğu görülmektedir.

TV'nin önüne konan ön straforun şeklinin ve yapısının ne kadar önemli olduğu yapılan testlerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu noktada ön straforun plastik çerçeveye bastığı durumlarda kırılmanın azaldığı görülmüştür. Ayrıca mevcut durumda ön straforun yapısında bulunan iç boşaltmalar, cama gelen kuvvetlerin uç açısını azaltmakta ve kırılmaların önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu yüzden iç boşaltmalar kaldırılarak uç açısı teorik olarak 180° yapılmış ve kutu dışından ürüne doğru dik gelen kuvvetler açısından kayda değer iyileştirmeler sağlanmıştır.

Ön straforun en önemli görevlerinden birini simüle eden ağırlıklı titreşim testinde, mevcut boşaltmalı ve kenarlara basmayan yapı ile 5 dakikalık bir süre sonunda kırılma yaşanırken, boşaltmasız ve kenarlara basan yapı ile 15 dakikada kırılmaya rastlanmamıştır.

Literatür araştırmasında, yükleme hızının mekanik özelliklere etkisini inceleyen bilimsel çalışmalara bakıldığında, yükleme hızının çok yavaş olması durumunda mekanik özelliklerin çok düştüğü görülmüştür. Yaptığımız testlerde çok benzer sonuçlar alınmış ve kırık şeklinin çok farklı olduğu görülmüştür. Kutulu halde kırılan ürünler incelendiğinde ürüne nasıl bir kuvvetin geldiği anlaşılamamaktadır. Oluşan kırıklardaki şekil farklılığı, kırığa nasıl bir kuvvetin sebep olduğu noktasında bize ışık tutmaktadır. Bir TV'deki en yüksek maliyet kalemi "open cell" olduğundan bunu anlamak çok önemlidir. Ürüne kutulu haldeyken dışarıdan bir kuvvet gelebilmekte ya da kutusuz iken taşıma sırasında istemeden de olsa elle baskı uygulanabilmektedir. Elle yapılan baskıların çok daha yavaş olacağı kabul edilebilir. Kırıkların nedensel olarak ayrıştırılıp analiz edilmesinde bu farklılık kullanılabilir.

- [1] Barr, J. (2015). The Glass Tempering Handbook—Understanding the Glass Tempering Process. Self Published. 5, 14.
<http://www.glassblower.info/books/TheGlassTemperingHandbook.pdf>
erişim tarihi 04/04/2019
- [2] Corning Gorilla Glass, (2007). “Chemical Tempering Handbook” 1, 3.
- [3] Zeng, H., Wang, L., Ye, F., Yang, B., Chen, J., Chen, G., & Sun, L. (2016). Mechanical–structural investigation of chemical strengthening aluminosilicate glass through introducing phosphorus pentoxide. *Frontiers in Materials*, 3, 53.
- [4] Karlsson, S., Jonson, B., & Stålhandske, C. (2010). The technology of chemical glass strengthening-a review. *Glass Technology*, 51(2), 41-54.
- [5] Chang, K. C., Tung, L. T., & Liu, Y. C. (2014, June). P-66: The Mechanical Properties of Aluminosilicate Glass with Chemical Strengthening. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 45, No. 1, pp. 1226-1229).
- [6] Solinov, V. F. (2015). Ways to strengthen glass: toughening, ion-exchange. *Glass and Ceramics*, 72(5-6), 191-193.
- [7] Wu, Z., Shen, X. H., and Tian, Y. L. (2011). High Strength Aluminosilicate Glass and Chemically Toughening Process Thereof. CN101337770.
- [8] Chapman, C. L., Dejneka, M. J., Gomez, S., & Lamberson, L. A. (2014). U.S. Patent No. 8,759,238. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [9] Zeng, H., Wang, L., Ye, F., Yang, B., Chen, J., Chen, G., & Sun, L. (2016). Mechanical–structural investigation of chemical strengthening aluminosilicate glass through introducing phosphorus pentoxide. *Frontiers in Materials*, 3, 53.
- [10] Aben, H., & Guillemet, C. (1993). Integrated photoelasticity. In *Photoelasticity of Glass* (pp. 86-101). Springer, Berlin, Heidelberg.

- [11] Gy, R. (2008). Ion exchange for glass strengthening. *Materials Science and Engineering: B*, 149(2), 159-165.
- [12] Li, X., Jiang, L., Zhang, X., & Yan, Y. (2014). Influence of residual compressive stress on nanoindentation response of ion-exchanged aluminosilicate float glass on air and tin sides. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 385, 1-8.
- [13] Howell, J. A., Hellmann, J. R., & Muhlstein, C. L. (2008). Nanomechanical properties of commercial float glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(17), 1891-1899.
- [14] Jiang, L. B., Li, X. Y., Guo, X. T., Li, L., Zhang, G. L., & Yan, Y. (2013). Stress relaxation of ion exchanged float aluminosilicate glass at different temperature. In *Advanced Materials Research* (Vol. 650, pp. 216-219). Trans Tech Publications.
- [15] Kolluru, P. V., Green, D. J., Pantano, C. G., & Muhlstein, C. L. (2010). Effects of surface chemistry on the nanomechanical properties of commercial float glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(3), 838-847.
- [16] Ziemath, E. C., Saggioro, B. Z., & Fossa, J. S. (2005). Physical properties of silicate glasses doped with SnO₂. *Journal of non-crystalline Solids*, 351(52-54), 3870-3878.
- [17] Jiang, L., Guo, X., Li, X., Li, L., Zhang, G., & Yan, Y. (2013). Different K⁺-Na⁺ inter-diffusion kinetics between the air side and tin side of an ion-exchanged float aluminosilicate glass. *Applied Surface Science*, 265, 889-894.
- [18] Zhen, W., Zhenbiao, H., Tao, S., Fenghua, Z., Yulong, L., Sheikh, M. Z., ... & Yinmao, W. (2018). A comparative study on the effect of loading speed and surface scratches on the flexural strength of aluminosilicate glass: Annealed vs. chemically strengthened. *Ceramics International*, 44(10), 11239-11256.
- [19] Li, X., Jiang, L., Li, J., Mohagheghian, I., Dear, J. P., Li, L., & Yan, Y. (2018). Elastic-plastic deformation in ion-exchanged aluminosilicate glass by loading rate dependent nanoindentation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 491, 79-88.
- [20] Sheikh, M. Z., Wang, Z., Du, B., Suo, T., Li, Y., Zhou, F., ... & Wang, Y. (2019). Static and dynamic Brazilian disk tests for mechanical characterization of

annealed and chemically strengthened glass. *Ceramics International*, 45(6), 7931-7944.

