

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM VE CAMSI MALZEMELERDE
SERTLİK-EĞME DAYANIMI İLİŞKİSİ**

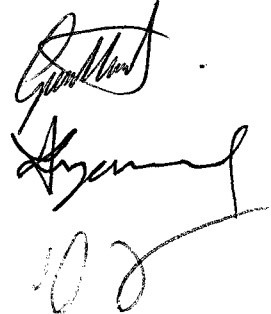
Hande Güniz ZEYBEKOĞLU

FBE Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ
154339

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cemalettin YAMAN

İSTANBUL, 2004

The block contains three handwritten elements: a signature at the top, a second signature below it, and the date '10.2' at the bottom.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAPSAM VE YÖNTEM.....	1
3. TEMEL BİLGİLER.....	3
3.1 Seramiklerin Mekanik Özellikleri.....	3
3.2 Elastik ve Gevrek Kırılma.....	4
3.3 Elastik Deformasyon.....	7
3.4 Young Modülü.....	7
3.5 Kayma Modülü.....	7
3.6 Poisson Oranı.....	8
3.7 Kırılma Dayanımı.....	8
3.8 İç Gerilmeler.....	9
4. FRİT.....	10
5. SIR.....	12
5.1 Sırın Mekanik Özellikleri.....	13
6. CAM.....	15
6.1 Cam Çeşitleri.....	17
6.2 Camın Özellikleri.....	19
6.3 Cam Üretimi.....	20
6.4 Temperlenmiş Cam.....	21
6.4.1 Tanım.....	21
6.4.2 Isıl İşlem Prensibi.....	22
6.4.3 Üretim Prosesi.....	23
6.4.4 Mukavemet.....	23
6.4.5 Güvenlik.....	23
6.4.6 Temperlenmiş Camın Kullanımı.....	24
6.4.7 Tepe Penceresinde Kullanılan Temper Camlar.....	24
6.4.8 Kullanım ve Yükleme.....	24
6.4.9 Eksiklikler.....	25

6.4.10	Görünüm.....	25
6.4.11	Temperlenmiş Camın Kırılması.....	25
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
7.1	Numune Alma ve Hazırlama.....	27
7.2	Mikrosertlik Ölçümleri.....	28
7.3	Makro İnceleme.....	33
7.3.1	Sırlı Seramiklerde Sır Kalınlığının Etkisi.....	33
7.4	Eğme (Eğilme) ve Kırılma Mukavemeti.....	37
7.5	Sırlı Seramikler.....	39
7.5.1	Sırlı Seramiklerde Sır Kalınlığı – Sertlik İlişkisi.....	42
7.5.2	Sırlı Seramiklerde Sır Kalınlığı – Eğme Dayanımı İlişkisi.....	43
7.6	Temperlenmiş ve Temperlenmemiş Cam.....	46
8.	İRDELEME VE SONUÇ.....	50
KAYNAKLAR.....		52
ÖZGEÇMİŞ.....		55



SİMGE LİSTESİ

σ_i	Çekme gerilmesi
E	Young modülü
ε	Uzama
B	Sabit
E_o	Sıfır porozitedeki young modülü
P	Porozite
D	Sabit
T	Sıcaklık
T_c	Tanımlanan karakteristik sıcaklık
G	Kaymada rijitlik modülü yada elastisite modülü
$\Delta d/d$	Kalınlık azalması
$\Delta L/L$	Boy uzaması
ν	Poisson Oranı
P	Numunenin kırılması anında uygulanan en yüksek yük miktarı
L	Mesnetler arası açıklık mesafesi
b	Numune genişliği
d	Numune kalınlığı
T_g	Transformasyon sıcaklığı
T_s	Yumuşama sıcaklığı
HK	Knoop sertlik değeri
HV	Vickers sertlik değeri
P_1	Uygulanan sertlik uç yük
d_1	Sertlik izinin uzun köşegen uzunluğu
d_2	Sertlik izinin kısa köşegen uzunluğu
KHN	Ortalama knoop değeri
s	Standart sapma
n	Ölçüm sayısı
M	Eğme dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

CPSC	The Consumer Product Safety Commission
MOR	Modulus of Rupture
SEM	Scanning Electron Microscopy



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Malzemelerin gevrek ve sünek davranışları.....	4
Şekil 3.2 Seramik malzemelerin lineer ve linner olmayan elastik davranışları.....	5
Şekil 3.3 Plastik deformasyona uğramış bir malzemenin gerilme-uzama eğrisi.....	5
Şekil 3.4 Seramik malzemelerin sürünme davranışı.....	6
Şekil 3.5 Seramik malzemerde kayma ve kopma kuvveti karşılaştırması.....	6
Şekil 5.1 Sır üretimi genel akım şeması.....	13
Şekil 6.1 Camda ve kristalde sıcaklık-hacim bağıntısı.....	16
Şekil 6.2 Dilatometreyle elde edilen grafikte Transformasyon sıcaklığının tesbiti.....	17
Şekil 6.3 Tipik cam üretim diyagramı.....	20
Şekil 6.4 Temperlenmiş camda gerilme dağılımı ve eğmenin gerilme dağılımına etkisi.....	22
Şekil 6.5 Kırık bir cam yüzeyinin görüntüsü.....	26
Şekil 7.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin bir kısmının görüntüleri.....	27
Şekil 7.2 Cam, frit ve sırlı seramiklerin Vickers ve Knoop mikrosertliklerinin ölçüldüğü Zwick ZHV 10 mikrosertlik cihazı.....	28
Şekil 7.3 (a) S1 kodlu alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, (b) S2 kodlu alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, sıraltı dekorlu seramik malzemelerde yüzey, kesit ve serbest yüzeyden ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.....	29
Şekil 7.4 S1 numunesine ait Vickers ve Knoop sertlik iz fotoğrafları.....	30
Şekil 7.5 Sırlı bir seramiğin sır-astar-bisküvi tabakalarını gösteren SEM mikroyapı fotoğrafı.....	33
Şekil 7.6 Sırlı seramik kesitinin şematik gösterimi.....	33
Şekil 7.7 Üç nokta eğme deney düzeneği.....	37
Şekil 7.8 Seramik ve cam numunelerinin eğme dayanımlarının ölçüldüğü <i>INSTRON model</i> <i>Zwick Z250 universal çekme cihazı</i>	38
Şekil 7.9 S1 sırlı seramik malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı.....	39
Şekil 7.10 S4, S5 ve S6 sırlı seramik malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı.....	40
Şekil 7.11 Sırlı seramiklerin eğme dayanımı ve sertlik ilişkisi.....	41
Şekil 7.12 Sertlik-sır kalınlığı arasındaki ilişki.....	42
Şekil 7.13 Eğme dayanımı-sır kalınlığı ilişkisi.....	44
Şekil 7.14 Temperlenmiş cam malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı.....	46
Şekil 7.15 Temperlenmemiş cam malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı.....	47
Şekil 7.16 Eğme dayanımı ile Knoop ve Vickers Sertlikleri Arasındaki ilişki.....	48
Şekil 7.17 Eğme dayanımı ile Vickers Sertlikleri Arasındaki bağıntı.....	49

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1 Camların ve sırların mekanik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan oksitlere ait katsayılar.....	14
Çizelge 6.1 Rüzgar basıncı altında temperlenmiş cam ile tavlanmış camın karşılaştırılması..	23
Çizelge 7.1 Sertlik ölçümlerinin Standart Sapması.....	30
Çizelge 7.2 Numunelerin türleri, tanımlamaları ve sertlikleri.....	31
Çizelge 7.3 Sır Kalınlıkları ölçülen sırlı seramikler.....	35
Çizelge 7.4 S1 kodlu kare kesitli ticari karonun kalınlık, genişlik, kopma yükü, eğme dayanımı, sertlik değerleri.....	39
Çizelge 7.5 S4, S5 ve S6 kodlu dairesel kesitli ticari karoların kalınlık, çap, kopma yükü, eğme dayanımı ve sertlik değerleri.....	40
Çizelge 7.6 Sır kalınlığına karşılık gelen sertlik değerleri.....	42
Çizelge 7.7 Sırlı seramiklerin eğme dayanımları ve sır kalınlıkları.....	44
Çizelge 7.8 Temperlenmiş ve temperlenmemiş camların boyutları, kopma yükleri ve de eğme dayanımları.....	46
Çizelge 7.9 Temperlenmiş ve temperlenmemiş camların sertlik değerleri.....	47

ÖNSÖZ

“Cam ve Camsı Malzemelerin Sertlik-Eğme Dayanımı İlişkisi” adlı bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu, Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü’nde TÜBİTAK-MİSAG tarafından desteklenen *Environmentally Friendly Glazes and Slips for Traditional and Antique Type Ceramic Artefacts* Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmam süresince yardımlarını ve bilimsel katkılarını esirmeyen tez danışmanım Y.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Cemalettin Yaman’a, bu çalışmayı gerçekleştirebilmem için bana her türlü imkanı sağlayan, deneysel çalışmalarında bana yol gösteren Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü’nden Uzman Araştırmacı Sayın Dr. Füsun Okyar’a, yardımlarını ve dostluklarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Bayise Kavaklı, Ayşen Kılıç ve Ergin Kaymak başta olmak üzere bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen tüm MAM-MKTAE Malzeme Teknolojileri çalışanlarına, daima beni yüreklendiren ve yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Hande Güniz Zeybekoğlu



ÖZET

Seramik malzemeler yük taşıma amacıyla kullanıldıklarında mekanik özellikleri önem kazanır. Aynı zamanda mekanik özellikler; elektriksel, manyetik, optik ve kimyasal özellikler gibi diğer özelliklerle de bağlantılıdır. Seramik malzemeler bu etkilere direnmek için tasarlanmadıysa, herhangi bir yük uygulandığında bu durum kopma için yeterli sebep oluşturur. Pek çok seramik malzemede çatlak yayılması ani kopmalarla sonuçlanır.

Bu çalışmada sırlı seramik, frit ile temperlenmiş ve temperlenmemiş camların mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla sertlik ölçümleri ve eğme testleri yapılmıştır.

Temperlenmiş camın HV sertlik değeri eğme mukavemetinin yaklaşık 4,4 katı, temperlenmemiş camın HV sertlik değeri eğme mukavemetinin yaklaşık 9 katı olduğu görülmüştür. Sırlı seramiklerin eğme dayanımları ve Vickers sertlik değerleri arasında bir bağlantı bulunmuş, sır kalınlığı azaldıkça sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam, temperlenmiş cam, sır, karo, sırlı seramikler, Vickers sertliği, üç nokta eğme dayanımı.

ABSTRACT

Mechanical behaviour of ceramics has high importance since they can be used for load carrying purposes. Furthermore mechanical properties are so related with many other properties such as electrical, magnetic, optical and chemical. If ceramic materials were not designed to endure to these kinds of effects occurring of flaw, failure and fracture is an inevitable result when a load is applied and in many ceramic materials crack propagation results with sudden flaws.

In this study, to compare mechanical properties of various vitreous materials, micro hardness and modulus of rupture (MOR) measurements of glazed ceramics, frits, tempered and untempered glass has done.

For tempered and ordinary glass the proportion between HV hardness value and MOR is found simultaneously app 4.4 and 9. For glazed ceramics a mathematical equation is obtained between HV hardness and MOR value and an increase in micro hardness is found when the glaze thickness is decreased.

Keywords: glass, tempered glass, glaze, tile, floor tile, tree-point bending, hardness vickers, modulus of rupture.

1. GİRİŞ

Malzeme, uygulanan gerilmelerle ya deformasyona uğrar yada gerilim dayanım sınırlarını aşarsa çatlak oluşturur veya kırılır. Seramiklerin mekanik özellikleri de deformasyon ve kırılma mekanizmaları ele alınarak açıklanır.

Seramik malzemeler yük taşıma amacıyla kullanıldıklarında mekanik özellikleri önem kazanır. Aynı zamanda mekanik özellikler; elektriksel, manyetik, optik ve kimyasal özellikler gibi diğer özelliklerle de bağlantılıdır. Seramik malzemeler bu etkilere direnmek için tasarlanmadıysa, herhangi bir yük uygulandığında bu durum kopma için yeterli sebep oluşturur. Pek çok seramik malzemedeki çatlak yayılması ani kopmalarla sonuçlanır.

Seramik malzemesinin mekanik özelliklerini anlayabilmek, bu gibi sorunların giderilmesini sağlayabilir. Seramik kullanıcılarının her biri seramiklerin mekanik özelliklerini bilmelidir.

2. KAPSAM ve YÖNTEM

Bu çalışmada laboratuvar şartlarında prototip olarak üretilen ve endüstriden temin edilen çeşitli camların, camsı malzemelerin ve sırlı seramiklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada incelenecek malzemelerden kesilecek numuneler üzerinde yüzeyden mikrosertlik ölçümlerinin yapılması ve aynı seramiklerden hazırlanacak numuneler üzerinde eğme testi uygulanması ile mukavemetleri incelenmiştir.

Çeşitli fritlerin üretilmesi ve bu fritlerin hamur, astar ve sır yapımında kullanılarak çini üretimi aşamalarında uygulama ve proses geliştirme çalışmaları yapılması ve ürünlerin teknik özelliklerinin saptanmasını kapsayan geniş ve çok yönlü bir araştırma projesinin* bir kısmı olarak gelişen bu çalışmada genel olarak kurşunlu, alkali kurşun, alkali borlu ve kurşun içeren borlu frit ve sırların mekanik özellikleri ile ilgili incelemeler yapılmıştır.

* “Environmentally Friendly Glazes and Slips for Traditional and Antique Type Ceramic Artefacts”, 2003-2004, Destekleyici: TÜBİTAK-MİSAG

Prototip olarak üretilen sırlı seramik ürünlerin ve endüstriden temin edilen ürünlerin sertlik karşılaştırmalarında Knoop ve Vickers sertlik değerleri arasında herhangi bir bağıntı olup olmadığı irdelenmiştir. Aynı zamanda kalınlık ile mukavemet değerleri arasında ve de sertlik ile mukavemet arasında herhangi bir bağıntı olup olmadığı konusunda irdemeler yapılmıştır.



3. TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde, çalışmada kullanılan test yöntemlerinin tanımlanmasını, ölçülen mekanik özellikleri, tanımları ve matematiksel formülasyonları kapsamaktadır.

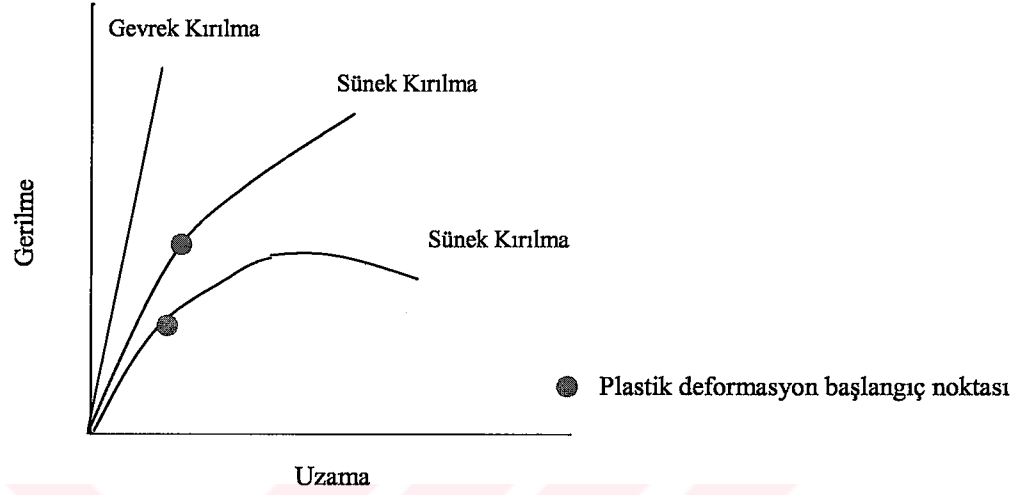
3.1 Seramiklerin Mekanik Özellikleri

Seramikler genellikle çok sert ve gevrek davranış gösteren malzemelerdir. Gevrek olduklarından iç yapı kusurları, çentikler, çizikler ve mikroçatlaklar gerilme yığılmasına neden olur, dolayısıyla çekme etkisinde kolay kırılırlar. Basma mukavemetleri çok yüksek olmakla beraber çekme mukavemetleri çok düşüktür. Seramiklerde basma mukavemeti ortalama olarak çekme mukavemetinin sekiz katıdır. Isılişlemlerle yüzeyde artık basma gerilmeleri oluşturarak çekmeye karşı mukavemetleri arttırılabilir. Örneğin; yumuşama noktasına kadar ısıtılıp hızla soğutulmuş camın mukavemeti üç katına çıkabilir. Bunlara *temperlenmiş cam* yada *duracam* denir. Diğer taraftan iç yapı kusurlarını azaltacak şekilde üretilen camın çekme mukavemeti yüksek olur. İnce lifler halinde üretilen camda kusurlar çok az olur ve mukavemetleri cam çubukların mukavemetinin yüz katı kadar olabilir. Cam lifleri epoksi veya polyesterle yapıştırılarak çok yüksek mukavemetli kompozit malzemeler elde edilmektedir.

Seramiklerin kaymaya karşı direnci de çok yüksektir, plastik şekil değiştirmeksizin kırılırlar. Ayrıca bazıları çok sert olduklarından geniş ölçüde aşındırıcı malzeme (abrasif) olarak kullanılırlar. [Onaran, 1995]

Cam gibi kristalin olmayan malzemeler yumuşama sıcaklığının altında daima kırılmandır ve kırık yüzeyin görünümü konkoidaldir. Kristalin bileşiklerde ise gevrek kırılma genellikle belirli kristalografik düzlem üzerinde yarıma şeklinde meydana gelir. Yüksek sıcaklıklarda kristalin bileşik, tane sınırlarında bozunur. Taneler arasında çatlakların ve tane sınırında kaymaların oluşumunu meydana getiren bu etki bölgesel gerilmelere ve sonuç olarak kırılmaya neden olur.

Pek çok seramik malzemede gevrek kırılma meydana gelmesine karşın, sünek metallerde boyun verme şeklinde şekil değiştirir ve incelen yerden kopma gerçekleşir. Malzemelerin gevrek ve sünek davranışları Şekil 3.1’de şematize edilmiştir.



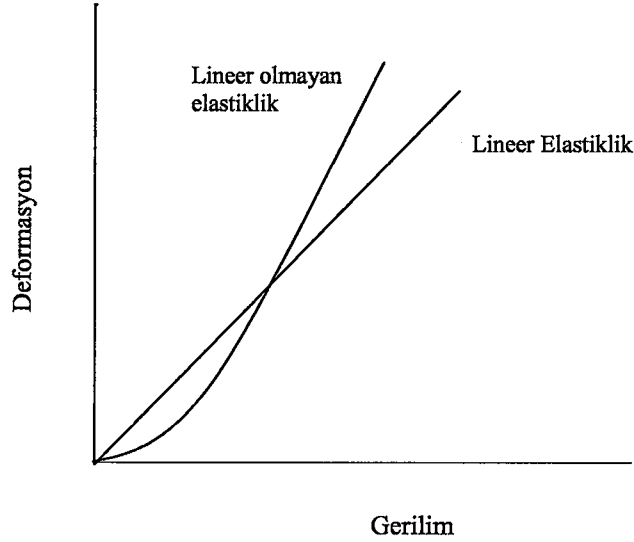
Şekil 3.1 Malzemelerin gevrek ve sünek davranışları

Sabit yük altında malzemede deformasyon çok hızlı gerçekleşebilir, uzun bir süre yavaşça deforme olmaya devam eder yada durur. Gerilme ve deformasyon davranışlarını zamana bağlı olarak tanımlamaya gerek yoktur.

3.2 Elastik ve Gevrek Kırılma

Gerilme altında elastik deformasyon ve gevrek kırılma seramikler için en önemli mekanik özelliklerdendir. Uygulanan gerilmenin bir fonksiyonu olarak deformasyonu (ani ve zamana bağlı) gösteren Şekil 3.2’de malzemenin elastik davranışı gösterilmektedir.

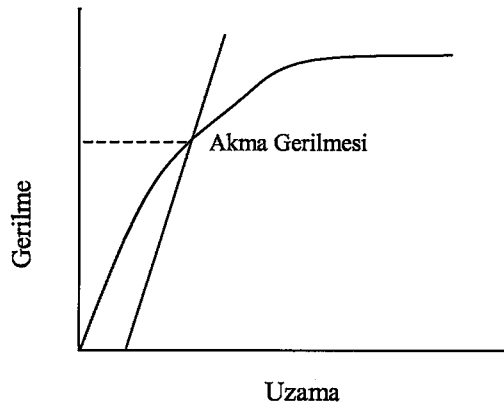
Elastik deformasyon, gerilmenin kaldırılmasıyla geri kazanılan uzama miktarı ile açıklanabilir. Bazı seramikler oda sıcaklığında elastiktir. MgO tek kristaller gibi diğer seramiklerde yük kaldırıldığında artık deformasyon (*residual deformation*) gösterirler. Hatta, oda sıcaklığında genellikle elastik olan polikristalin alümina oksit seramiklerde kalıcı deformasyon miktarının küçük olduğu söylenebilir. Kalıcı deformasyon; 10^{-6} ’yı aştığında elastik sınır aşılmış demektir.[Wachtman, 1996]



Şekil 3.2 Seramik malzemelerin lineer ve lineer olmayan elastik davranışları

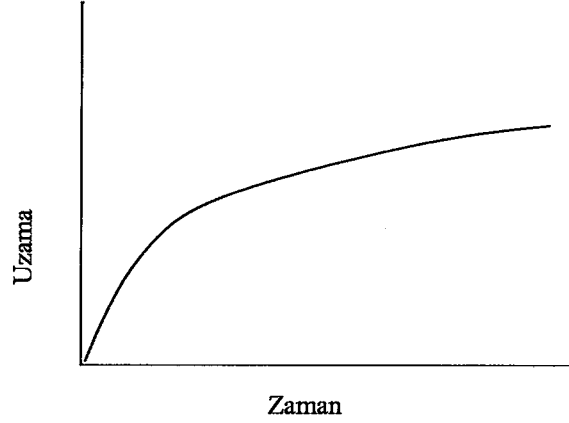
Kalıcı deformasyon tiplerinden biri; plastik deformasyondur. Yük kaldırıldığında malzemede meydana gelen toparlanma miktarıyla malzemedeki toplam uzamanın farkı plastik deformasyonu verir. Şekil 3.3'te plastik deformasyona uğramış bir malzemenin gerilme-uzama eğrisi gösterilmiştir.

Plastik deformasyon metallerde oda sıcaklığında meydana gelirken sertlik ölçümü gibi özel durumlarda meydana gelen bölgesel plastik deformasyon haricinde, seramiklerde plastik deformasyon sadece yüksek sıcaklıklarda meydana gelir.



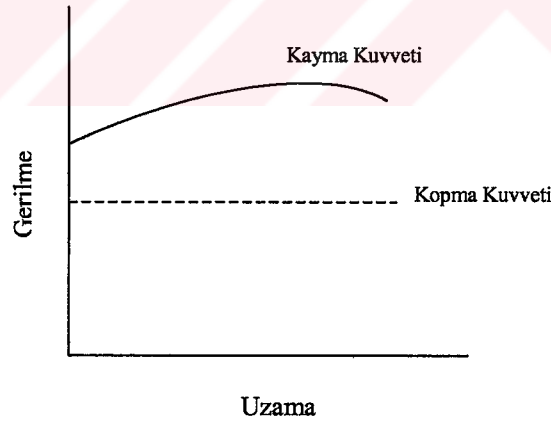
Şekil 3.3 Plastik deformasyona uğramış bir malzemenin gerilme-uzama eğrisi

Seramiklerde diğ er bir kalıcı deformasyon ise; s ur unmedir (creep). Gerilme uygulanırken bu deformasyon ba şlar ve zamanla hızında azalma olur ancak Şekil 3.4'te görüldüğü gibi kopma sınırına kadar deformasyon devam eder.



Şekil 3.4 Seramik malzemelerin sürünme davranışı

Kil gibi bazı maddeler istisna edilirse, seramik malzemelerin kayma kuvveti yüksek, kopma kuvveti d    kt  r (Şekil 3.5). Dolayısıyla kolay kırılırlar.



Şekil 3.5 Seramik malzemerde kayma ve kopma kuvveti kar ı ıla tırması

Seramiklerin mekanik davranışları Hooke Kanunu'nun matematiksel ifadesiyle tanımlanmaktadır [Wachtman, 1996].

3.3 Elastik Deformasyon

Seramiklerin, uygulanan bir gerilim altında elastik deformasyonun kullanılması yada kontrolünün sağlanması gibi pek çok önemli uygulaması vardır. Gerilme, doğrudan uzama ile orantılıdır (Hooke kanunu) :

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (3.1)$$

Burada σ çekme gerilmesini, E Young modülünü ve ε uzamayı göstermektedir.

3.4 Young Modülü

Young modülünü etkileyen parametreler; porozite, sıcaklık ve tane boyutudur. Bu parametrelerin etkisi deneysel çalışmalarla edinilen ve genel uygulanabilirliği olan denklemlerle öngörülmüştür. Bunlar;

$$E = E_0.e^{-BP} \quad (3.2)$$

Burada B sabit, E_0 sıfır porozitedeki young modülü, P de porozitedir. Sıcaklığın etkisi ise;

$$E = E_0 - DT \exp -(T_c/T) \quad \text{ile açıklanır.} \quad (3.3)$$

Burada D sabit, E_0 sıfır porozitedeki young modülü, T_c tanımlanan karakteristik sıcaklık, T ise değişen sıcaklık. Young modülüne sıcaklığın etkisi düşüktür. O nedenle sıcaklık parametresi bu çalışmada irdelenmeyecektir. Üçüncü etki; ikinci fazlar yada empüritelerdir.

3.5 Kayma Modülü

Seramiklerin kaymaya karşı direnci çok yüksek olduğundan ve plastik şekil değiştirmeksizin kırıldıklarından daha önceki bölümlerde söz etmiştik. Denklem3.1'e benzer şekilde kayma gerilmesi τ de doğrudan kayma uzaması γ ile orantılıdır:

$$\tau = G.\gamma \quad (3.4)$$

Burada G, kaymada rijitlik modülü yada elastisite modülü olarak tanımlanır.

3.6 Poisson Oranı

Bir numune gerilme altında uzarsa kalınlığında azalma meydana gelir. Kalınlık azalmasının boy uzamasına oranı Poisson Oranını verir:

$$\nu = \frac{\Delta d/d}{\Delta L/L} \quad (3.5)$$

Plastik akma için $\nu = 0.5$, elastik deformasyon için Poisson Oranı 0.2 ile 0.3 arasındadır. Poisson Oranı ile Young modülü ve Elastisite modülü arasında şöyle bir bağıntı vardır:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.6)$$

Bu ilişki sadece doğultunun bir tek bağımsız elastik sabiti değerinin olduğu izotropik bünyeler için uygulanabilir. [Kingery,1976]

3.7 Kırılma Dayanımı

Bir numunenin üç nokta yada dört nokta eğme testiyle kırılmasıyla o malzemenin Eğme/Eğilme/Kırılma Dayanımı (MOR-Modulus of Rupture) hesaplanır (Denklem 3.7-8). Seramiklerin gerilme dayanımı da genellikle bu denklemle ile ölçülür. Kırılma, en yüksek gerilme altında, numune yüzeyinde başlar ve bu noktadaki gerilme miktarı kırılma dayanımını ifade eder.

Diktörtgen numunelerde,

$$M = 3.P.L / (2.b.d^2) \quad (3.7)$$

Dairesel numunelerde,

$$M = 8.P.L / (\pi.d^3) \quad (3.8)$$

P: Numunenin kırılması anında uygulananen yüksek yük miktarı (N),

L: Mesnetler arası açıklık mesafesi (mm),

b: Numune genişliği (mm),

d: Numune kalınlığı (mm)'dir.

3.8 İç Gerilmeler

Malzemenin dayanımı, yüzey tabakalarında basma gerilmelerinin etkisiyle gelişir. Yüzeyde basma gerilmelerinin ortaya çıkışının  yolu vardır: sırlama, proses ve termal işlemler. Sır, genellikle bünyeden daha düşük genleşme katsayısına sahiptir. Bu nedenle soğuma sonrası sır gerilimlidir. Sır, bünye malzemesiyle uyumlu olmalıdır. Aksi halde bünye malzemesindeki yüzey çatlakları olur ve bünye malzemesinde çekme gerilmelerinin oluşması sonucu dayanımın düşmesine neden olur [Davidge, 1970] .



4. FRİT

Öğütölüp toz haline getirilmiş seramik hammaddelerin bir reğeteye göre hazırlandıktan sonra eritilmesi ve eriyiğin hızlı bir şekilde soğutulması neticesinde ortaya çıkan cam yapılı ara ürüne *frit* denir.

Fritler seramik sırlarında kullanılan camsı hammaddelerdir. Sır bileşimindeki frit oranı üretilen seramik malzemeye bağlı olup, duvar karosu ve çinilerde sırdaki katı madde oranının yaklaşık %90-95'ini oluşturlar. Bu nedenle fritler sır reğetelerinde çok önemli rol oynamaktadır. Frit formölasyonlarının belirli kullanımlar ve prosesler için istenilen özellikleri sağlaması için özel hazırlanması gerekmektedir. Sırdan beklenen teknik (ergime, genişleme katsayısı) ve estetik (opaklık, parlaklık, renk) özelliklere göre hazırlanan değişen oranlarda oksitlerden oluşturulmaktadır. Her fritte bulunan başlıca bileşen silika olup, diğerleri Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , ZnO , ZrO_2 , BaO , PbO gibi oksitlerdir,

Frit çini üretiminde hem hamur içersinde kullanılmakta hem de sırn yaklaşık %95'ini oluşturmaktadır. Kullanılan fritin özelliği ise tüm üretim sürecini ve çini teknolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Sırda kullanılan frit kuvars, flaks karışımlarının ergitilmesi ile elde edilmektedir. Elde edilen kütle kırılarak öğütölmekte, yıkanma ve eleme işleminden sonra kurutulmakta ve sır karışımlarının ana bileşeni olarak kullanılmaktadır.

Fritler hammaddelerin karıştırılıp yüksek sıcaklıklarda ergitilip havada soğutulması veya suya dökölmesi ile elde edilmiştir. Frit üretmek için çok çeşitli kompozisyonlar oluşturulabilir. Maliyet, kimyasal, fiziksel, mineralojik özellikler ve ulaşılması istenilen özellikler reğetelerin oluşturulmasında belirleyici rol oynamıştır. Fritlerin ana bileşeni silika olup, reğetelerde Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , ZnO , ZrO_2 , BaO , PbO gibi diğer oksitlerle birlikte kullanılmıştır. Bilindiği gibi silika, cam yapıcı olarak rol oynadığı, termal genişlemeyi kontrol edip belirlediği ve asitlere dayanıklılığı artırdığı için yüksek kuvarslı karışımlar hazırlanmaktadır. Potasyum ve sodyum feldspat ise başlıca silika ve alkali ve alümina kaynağı olarak kullanılmıştır. Alümina aşınmaya ve çizilmeye karşı dayanıklılığı da artırmak için kullanılmaktadır. Bor ilavesi ergimeyi ve camlaşmayı kolaylaştırdığı gibi, bor katkısı ile ısıl genişleme katsayısı düşürmekte, çizilmeye karşı dayanımı yani mikrosertliği arttırmaktadır. Bor oksit iyi bir ergitici olup kolayca ergiyen bir frit vermekte ve düşük sıcaklıklarda gelişen

sırlar yaratmaktadır. Sırdaki kurşun oksitin yerine tamamen veya kısmen kullanabilme imkanı yaratmaktadır [Okyar, 2004].



5. SIR

Öğütülmüş uygun bileşimli seramik hammaddelerden elde edilen ve seramik bünye üzerinde pişirme neticesinde cam yapıya benzer bir yapı oluşturabilen karışımlara ve sözkonusu tabakaya *sır* denir.

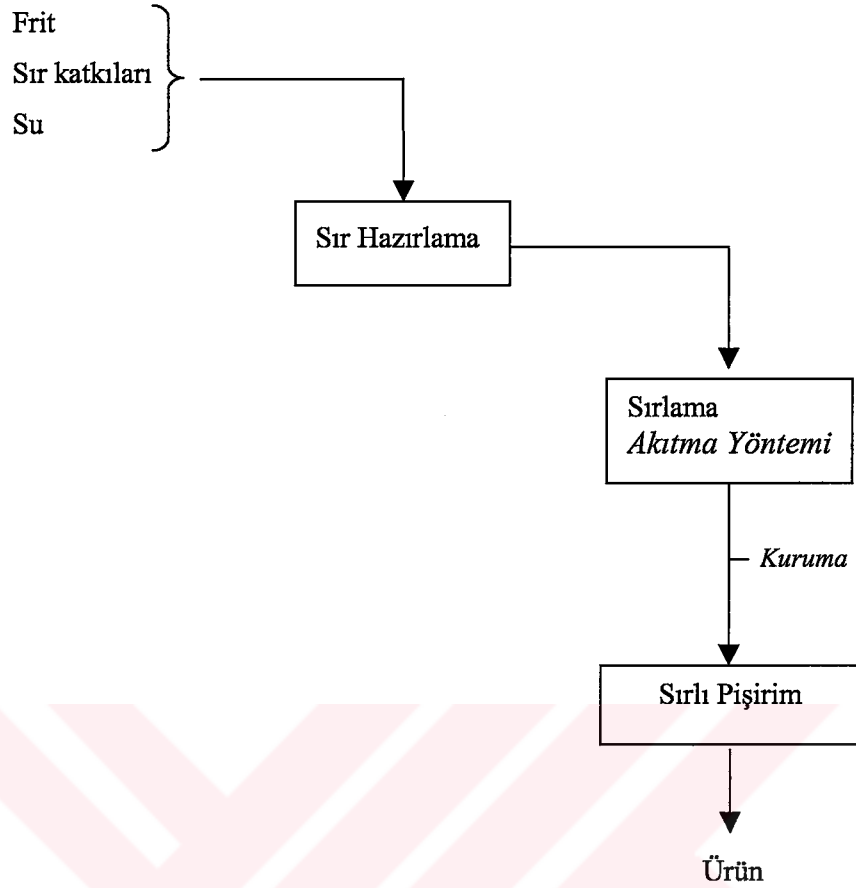
Sır kavramı hem toz halindeki çoğu kez birden fazla sır hammaddesinin genelde suyla karıştırılarak elde edilen süspansiyonunu hem de bitmiş mamül üzerinde oluşturulan cam tabakasını kapsamaktadır.

Seramik malzemeleri sırlamanın iki önemli nedeni vardır: Bunlardan birincisi genelde gözenekli ve mikro seviyede pürüzlü bir yüzeye sahip olan seramik bünyeyi dışta gözeneksiz ve düzgün, parlak bir yüzeye sahip olan cam tabakasıyla kaplayarak daha hijyenik, daha rahat temizlenebilir bir duruma getirmektir. Sırlamanın ikinci nedeni ise estetik açıdan güzel bir görünüm oluşturmak ve yüzeyin dekorlanma olanaklarını arttırmaktır.

Genellikle 0.15-0.5mm kalınlığında ince camsı bir kaplama olan sır, aynı zamanda ürünün mukavemetini ve çoğu zaman yüzey sertliğini artırıcı bir rol de oynar. Kimyasal dış etkilere karşı dayanımı artırır [Kartal, 1998].

Ürünün kullanım koşullarında sıranın kimyasal etkilere karşı dayanımı arttırması yanında mekanik ve ısı etkilere karşı da dayanıklı olması gerekir. Belirli standartlara göre üretilen ürünler bu standartlarda açıklanan metotlarla testlere tabi tutulurlar. Standartlar oluşturulurken esas alınan kriter, ürünün kullanım sırasında maruz kalacağı etkiler ve bu etkilerin laboratuvar koşullarında ortaya konulmasıdır.

Aşağıda Şekil 5.1’de sır üretimi için genel akım şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Sır üretimi genel akım şeması [Okyar, 2004]

5.1 Sırın Mekanik Özellikleri

Sır çatlakları oluşumu açısından özellikle çekme mukavemeti davranışları önem taşımaktadır. Sır tabakalarında çekme mukavemeti oldukça düşüktür. Camlarla ilgili teorik olarak hesaplanmış mukavemet değerleri mevcuttur. Aşağıdaki Çizelge 5.1’de camların ve sırların mekanik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan oksitlere ait katsayılar verilmiştir.

Mekanik özellikler bünyenin ısı etkenlerinden kaynaklanan gerilimlere karşı da dayanımını belirleyen parametrelerdir. Farklı ısısal genleşmelere sahip olan sır ve seramik bünye soğuma esnasında çekme veya basma gerilmelerine maruz kalırlar.

Çizelge 5.1 Camların ve sırların mekanik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan oksitlere ait katsayılar.

	Çekme Mukavemeti (MPa)	Basma Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
SiO ₂	0,90	12,3	650-715
Al ₂ O ₃	0,50	10,0	1140
CaO	2,00	2,0	1115
MgO	0,10	11,0	920
BaO	1,50	6,0	600
PbO	0,25	4,8	430
B ₂ O ₃	0,65	9,0	100-1800
Na ₂ O	0,20	6,0	595
K ₂ O	0,10	0,5	410

Sırlama neticesinde elde edilen sır tabakasının kalınlığı hep aynı ve yüzey görüntüsü düzgün olmak zorundadır. Dikkat edilmediği takdirde oluşabilecek sır tabakası kalınlığı farkları gerek örtücülük ve renk açısından gerekse yüzey düzgünlüğü açısından pişirmeden sonra da kendini hissettirir.

6. CAM

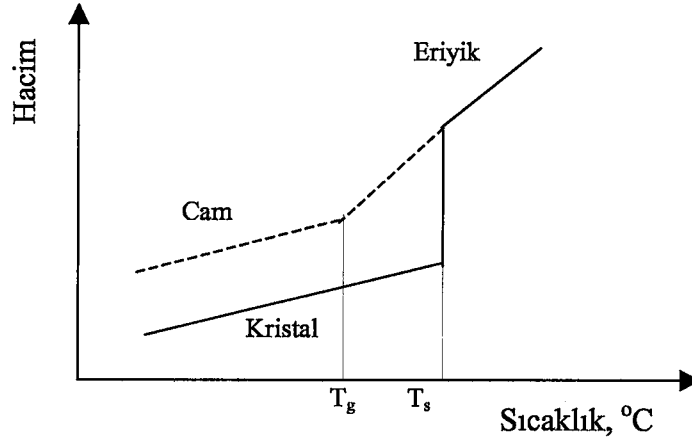
Sıvı haldeki düzensiz yapısını aynen koruyarak katılaşılan cisimlere genellikle *camlar* denir. Cam burada bir yapı türünü belirtir. Pencere camı bir malzeme türü olmakla beraber aynı zamanda amorf yapılıdır. Katılaşılan sıvının camsı veya kristalli yapıya dönüşmesi olayını hacmin sıcaklıkla değişimini gösteren eğrilerin şekline bakarak açıklamak mümkündür.

Her sıvı kendisine özgü bir sıcaklığın altına soğutulduğu zaman katı bir hal alır. Katılaşma ya yapıyı oluşturan ögelerin bünyede üç yönde düzenli bir şekilde yerleşerek yani kristalleşerek yada ögelerin sıvı haldeki düzenlerinin ani soğutulmasıyla gerçekleşir. İkinci olasılık neticesinde oluşan yapı *cam* veya *amorf* yapı olarak adlandırılır.

Cam yapıda ögelerin sahip olduğu sınırlı düzenlilik amorf yapıda daha da sınırlıdır. Amorf yapının ihtiva ettiği enerji sırasıyla cam ve kristal yapılardan daha fazladır. Sıvılar soğutulurken bazı özellikleri değişir. Yumuşama sıcaklığının (T_s) altına düşülünce normal koşullarda kristalleşme ve ani hacimsel bir küçülme olur. Fakat bazı eriyikleri kristalleşmeye fırsat vermeden soğutarak katılaştırmak mümkündür. Şekil 6.1’de soğuyan bir eriyiğin sıcaklığa bağlı olarak hacimsel değişimi görülmektedir. Erime noktasında kristalleşme neticesinde hacimde ani bir düşüş olurken, kristalleşmeye fırsat verilmezse erime noktasının altındaki belli bir sıcaklığa kadar eriyiğin davranışları devam eder. Ancak transformasyon sıcaklığı (T_g) diye tanımlanan sıcaklığa ulaşıncaya katı hale dönüşüm gerçekleşir. Bu şekilde cam yapı oluşur. Kristale göre hacmi fazla ve yoğunluğu düşüktür. Termodinamik açıdan kristal ve eriyik yapı denge durumunda olup sabittirler. Buna karşın erime noktasında cam oluşumuna kadar (cam dahil) yapı termodinamik açıdan denge durumunda değildir. Maddenin en düşük enerji seviyesine sahip olma özelliğinin gereği camın kristalleşme eğilimi vardır, yalnız bu süreç oldukça uzun zaman almaktadır. Çünkü katı yapı içinde ögelerin hareketi yok denecek kadar azdır.

Eriyiğin viskozitesi ne kadar yüksek olursa kristalleşmeye fırsat vermeden katı hale dönüştürmek o kadar kolay olmaktadır. Silikat bileşimindeki eriyikler genelde yüksek viskoziteye sahiptirler. Yüksek viskozite soğuma esnasında ögelerin rahat hareket etmesine engel olduğu için düzenli yapı oluşması (kristalleşme) zorlaşır ve cam halinde katılaşma gerçekleşir. Bir eriyiğin viskozitesi sıcaklığın düşmesiyle artar. Belli bir viskozite değerine ulaştığı zaman artık katı madde davranışları geçerli olmaya başlar. Bu değer bütün cam

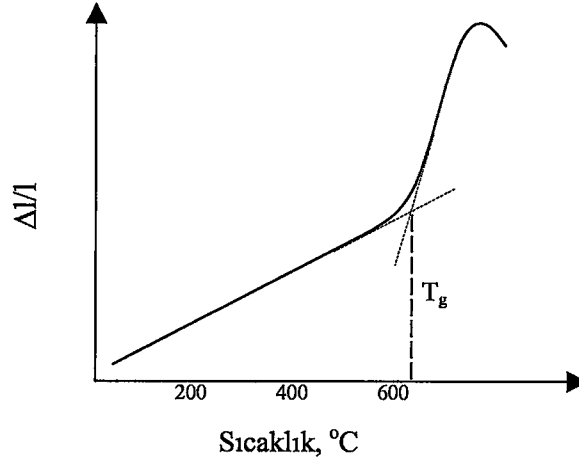
oluşturan eriyikler için aynıdır. Viskozite değerleri sıcaklığa bağlı olarak geniş bir rakam aralığını kapsadığı için genellikle logaritmaları belirtilir.



Şekil 6.1 Camda ve kristalde sıcaklık-hacim bağıntısı

Yumuşak halden katı hale geçişin gerçekleştiği sıcaklıkta cam oluşturan eriyiklerin viskozite değeri aynı olup 10^{13} dPas'dir ($\lg \eta = 13$). Bu viskozite değerinin oluşmasını sağlayan sıcaklık *Transformasyon Sıcaklığı* olarak tanımlanır ve bu sıcaklığın altında katı cam yapısı söz konusudur. Bu sıcaklıktan itibaren hacimsel küçülme önceye göre çok azdır. Transformasyon sıcaklığının değeri soğutma hızına da bağlıdır. Hızlı soğutulunca bu değer yüksek sıcaklığa doğru kayar. Bu da bileşimin yanı sıra soğutma hızının da camdaki bir takım özellikleri etkilediği anlamına gelir. Teknik açıdan transformasyon sıcaklığının bilinmesi önemlidir. Cam şekillendirmede bu sıcaklığın altında işlem yapmak mümkün değildir.

Transformasyon sıcaklığının tespiti *Dilatometre* ölçümleriyle yapılabilir. Bu ölçümlerde sıcaklığa bağlı olarak uzunluk değişimi tespit edilir. Sonuç olarak bağıl uzunluk değişimi sıcaklığa bağlı olarak Şekil 6.2'deki gibi değişir. Bu grafikte farklı eğimlere sahip aynı camın katı ve yumuşak haldeki ısısal genleşme davranışlarını temsil eden iki doğrunun kesim noktalarına tekabül eden sıcaklık o camın transformasyon sıcaklığıdır [Kartal, 1998].



Şekil 6.2 Dilatometreyle elde edilen grafikte Transformasyon sıcaklığının tesbiti [Kartal, 1998].

6.1 Cam Çeşitleri

Soda camı : Cam karışımın soda veya potas şeklinde alkalik katmanlar ergitici malzeme olarak önemli rol oynarlar. Karışımında soda (sodyum karbonat, Na_2CO_3) ,yani bir sodyum bileşimi bulunduğu taktirde *soda camı* elde edilir. Benzer şekilde karışımında potas (potasyumkarbonat, K_2CO_3) yani bir potasyum bileşimi bulunduğu taktirde potas camından söz edilir. Aynı şekilde her iki alkalisinde bulunduğu camlar vardır ki bu durumda pota-soda camından söz edilir.

Cam üretiminde en çok silikatlar kullanılır. Yüzlerce cam türü bulunmakla beraber en önemlileri: soda-kireç camı (pencere camı), kurşunlu cam, boronsilikat camı ve silis camıdır.

Silis camı: En iyi cam oluşturan bileşik silis (SiO_2)'dir. Silisin ergime sıcaklığı çok yüksek olduğu gibi (1710°C) yumuşak halde viskozitesi çok büyüktür, bu nedenle işlenmesi zordur. Bununla beraber ergime sıcaklığı yüksek, ısıl genleşme katsayısı düşük olduğundan ısı şokuna iyi dayanır, dolayısıyla sıcaklığa dayanıklı cam eşya üretimine elverişlidir.

Soda-Kireç camı: Silise soda (Na_2O) ve kireç (CaO) katılacak olursa Si-O bağlarının sürekliliği yer yer bozulur ve açık kalır, ergime sıcaklığı düşer ($650-815^\circ\text{C}$) ve viskozite

azalır, dolayısıyla kolay işlenir. CaO camın suya ve kimyasal etkilere direncini artırır, sertliğini yükseltir. Isıl genleşme katsayısı yüksek ve ısı iletkenliği düşük olduğundan soda-kireç camı ısı şokuna dayanamaz, kolayca çatlar. Bu tür cam genellikle pencere camı ve ucuz cam eşya üretiminde kullanılır.

Kurşunlu cam: Silise kireç yerine kurşun oksit (PbO) katılırsa elde edilen kurşunlu camınışığı kırma ve yansıtma özelliği yüksek olur. Ayrıca parlak ve parıltılı bir görünüşte olduğundan kristal cam eşye üretimine elverişlidir.

Boron silikat camı: Silise alkali metal oksitleri yerine boron oksit (B_2O_3) katılırsa camdaki kuvvetli kovalent bağlar sürekliliğini korur. Bu tür camın ısı genleşme katsayısı çok düşüktür (pencere camının 1/3'ü kadar), kimyasal etkilere ve yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Laboratuvar aletleri ve ateşe dayanıklı cam üretiminde kullanılır.

Cam seramiği, seramik cam (pyro-cerem) : Cam şeffaf veya şeffafa yakın niteliği, amorf yapısı ve sert cisim olmasına rağmen kimyasal yapısıyla sıvılara yaklaşan bir cisimdir. Seramik ise bunun aksine şeffaf olmayan, kristalli yapısı bulunan bir cisimdir. Katı maddeler arasında sayılır. Ancak "sırlama" işleminde bir araya gelirlerse de bu işlemde de "cam" ve "seramik", yani sır ve bisküvi kimyasal olarak tamamen birbirinden ayrı maddeler olarak kalırlar

"Cam seramiği"nde ise cam ile seramiğin bir arada bulunmasından çok iki metaryelin iç içe bulunması söz konusudur. Cam seramiğin temel maddesi cam benzeri bir kimyasal bileşim olup, bu madde uygun ısı işlemler sonucunda "cam özelliğini yitirir" ve böylece cam yapısı yanında bir oranda kristal yapısı da olan seramik nitelikli bir madde oluşur.

Bu açıdan "cam seramiği" porselene çok benzer; çünkü porselende de cam ve en küçük yapıdaki kristaller iç içe geçmiş bir bütün oluştururlar. Ancak kristal yapısındaki farklılık maddelerdeki farklılığı da oluşturur. "Cam seramiği" yapısıyla ısı değişimlerine olağanüstü uygun bir nitelik gösterir. 1 gradlık ısı arttırımında cam seramiği gerçek uzunluğunun ancak milyonda 1,5'u kadar genişler. Bunun sonucunda ani ısınma ve soğuma sonucunda termik şok dolayısıyla korkulan patlamalar, dağılımlar engellenmiş olur. "Cam seramiğin" oluşumunu sağlayan "cam niteliğini yitirme" olgusu cam yapımcıları için yeni değildir. Aksine bu tür soğuma sırasında kısmen kristal yapısı kazanma eğilimindedir. Cam yapımcıları birçok uygun

engelleme tedbirleriyle bu “cam niteliğini yitirme” olgusunu önlemeye çalışırlar, çünkü aksi taktirde şekillendirilen cam kullanılmaz duruma gelir.

Sertleştirilmiş (duralanmış-temperlenmiş) cam : Sertleştirilmiş veya öngerilimli cam mekanik mukavemeti yüksek olan, darbeye dayanıklı, kullanımında normal camdan daha dayanıklı olan bir cam türüdür. Bu dayanıklılık cam mamülün ergime noktasına yakın bir dereceye kadar ısıtıldıktan sonra basınçlı hava ile aniden soğutulmasıyla sağlanır. Bu ısılişlemlerle camın yüzeye yakın kısımlarında basınç gerilimi kazandırılır. Bundan dolayı cam için tehlikeli olan yüzey kısmındaki çekme gerilimleri, ancak daha fazla mekanik zorlamalardan sonra ortaya çıkabilmekte, çünkü önce basınç gerilmelerinin yenilenmesi gerekmektedir. Bu şekilde öngerilim kazandırılan camlar normal camlardan daha serttirler; çiziklere, darbelere, kırılmalara karşı normal camdan 6 defa daha fazla dayanıklıdır. Ancak sertleştirilmiş camdaki bu gerilim tabakası yine de aşıldığı taktirde normal şekilde kırılabilmekte, parçalanabilmektedir. Bu camlardan endüstriyel amaçlı faydalanılır. Genellikle otomobil camları bu camlardan üretilir [1].

6.2 Camın Özellikleri

1-Yoğunluk ve Termik (Isı) Genleşme: Çeşitli cam türlerinin yoğunlukları bileşimlerine göre $2,2 \text{ gr/cm}^3$ ile $3,0 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Bazı özel cam türlerinde 8 gr/cm^3 gibi yoğunluklara ulaşmaktadır. Camın termik genişlemesi aynı zamanda termik şoka dayanıklılığını da belirtir.

2-Mekanik Özellikler: Cam; darbe, vurma ve basınçla belirgin şekil değişiklikleri elde edilmesine uygun olmayan kırılabilir nitelikte bir cisimdir. Camların dayanıklılığı çekme mukavemeti ile belirlenmektedir. Camın çekme mukavemeti $5-14 \text{ kg/cm}^2$ 'dir. Bu dayanıklılık dış yüzeydeki bozulmalarla (belli belirsiz çizikler, çapaklar vb... gibi) önemli oranda azalmaktadır. Cam elyafın dayanıklılığı normal camlardan yaklaşık 100 kez fazladır.

Bir camın (öngerilimli cam, sekurit cam vb gibi) yüzeyinde basınç gerilimi olduğu taktirde basınca dayanıklılığı artmaktadır. Camın basma dayanıklılığı çekme dayanıklılığından fazla olup $60-120 \text{ kg/mm}^2$ kadardır.

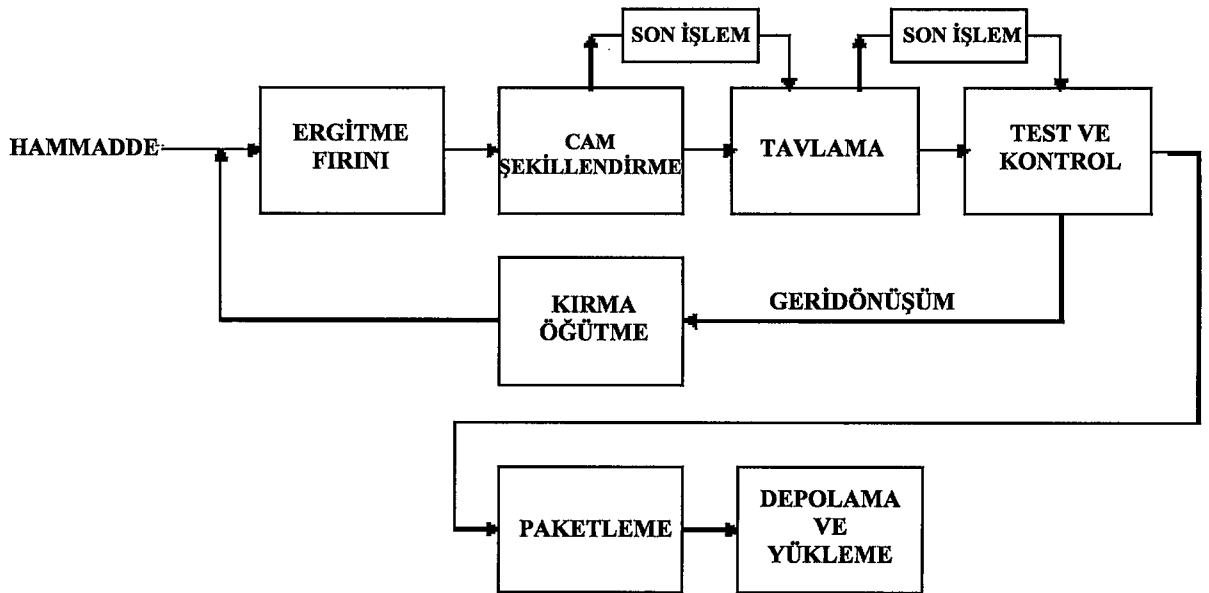
Cam eritilmiş halde çok kolay biçimlendirilebilen, şekillendirilebilen bir maddedir. Camın yumuşama (erime) sıcaklığı 500-800°C arasında değişir. Camın ısı ve elektrik iletkenliği son derece zayıftır. Camın özgül ağırlığı ise yaklaşık 2,5 gr/cm³'tur.

3-Kimyasal Özellikler: Cam kimyasal açıdan birçok maddelere karşı dayanıklıdır, etkilenmez. Yalnızca hidrofluorik asit ve bazı alkalik çözeltiler (eriyikler) camı etkilemektedir. Su ise yalnızca uzun zaman sürelerinde camı etkiler. Genel olarak 4 hidrolik sınıftan söz edilir: Suya dayanıklı, biraz etkilenebilir, fazlaca etkilenebilir ve fazla etkilenir

4-Optik Özellikler: Camın en önemli ve en değerli özelliği bir hayli yüksek seviyede ışık geçirgenliği, başka deyişle saydamlığıdır. Bunun dışında cam ışığı yansıtır (raflakte eder) ve kırar, yani güneş ışığını geniş bir renk tayfına (spektrum) ayırır [1].

6.3 CAM ÜRETİMİ

Ticari camlar; soda-kireç, kurşun, silikat, bor silikat yada %96 silika içerikli olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Soda-kireç camı, toplam cam üretiminin %77 sini oluşturmaktadır. Kum, soda külü ve cam kırığından oluşur. Bu tür camların üretimi 4 aşamada olmaktadır: (1) hammadde hazırlama, (2) ergitme, (3) şekillendirme ve (4) son işlem. Şekil 6.3'te tipik cam üretim diyagramı verilmiştir [2].



Şekil 6.3 Tipik cam üretim diyagramı [2].

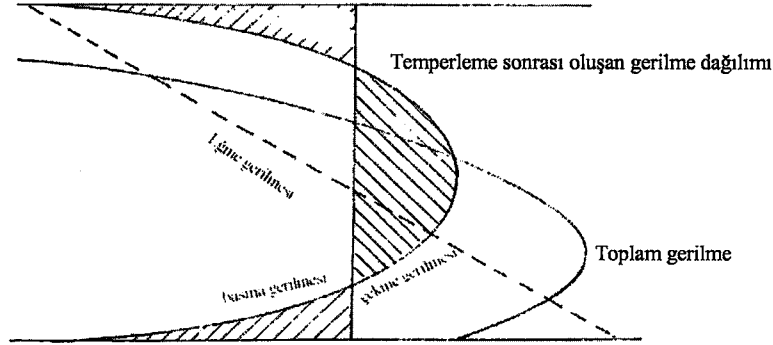
Cam endüstrisi ürünleri; düz camlar, cam şişeler ve preslenebilir ve üfleme camlarıdır. Üretim prosesi, şekillendirme ve son işlemler dışında tüm camlar için aynıdır. Toplam soda-kireç cam üretiminin sırasıyla % 51 ve 25'i olan cam şişeler ve preslenebilir ve üfleme camları için, istenen ürünün şekillendirilmesinde presleme, üfleme veya presleme ve üfleme işlemleri kullanılır. Düz camlar ise yüzdürme, çekme veya haddeleme yöntemleri ile elde edilir.

Malzeme fırınına verildiğinde, fırın içinde bulunmakta olan eriyik camın üzerinde akmaya başlar. Ergidiğinde ergiticinin önüne geçerek rafinasyon bölgesine kadar akmaya devam eder. Rafinasyon kısmında eriyik cam, şekillendirme prosesi için hazırlanır. Rafinasyon işleminden sonra ergimiş cam, fırının ön kısmından geçerek şekillendirileceği bölgeye gider, fakat düz camlarda bunun yerine ergimiş cam direkt kalay banyosuna akar. Presleme ve üfleme, taslak kalıbı ve kesiciler kullanılarak mekanik olarak uygulanır. Çekme prosesinde, ergimiş cam merdaneler aracılığıyla yukarı doğru ince plaka şeklinde çekilir, kalınlığı da hızıyla belirlenir. Haddelemede benzer bir çekme prosesi bir düzlem veya merdaneler üzerinde yatay olarak uygulanır ve düz cam için aşındırma ve parlatma işlemlerine ihtiyaç duyar. Yüzdürmede ise ergimiş cam, aşındırma ve parlatma işlemleri gerekmeden direkt olarak kalay banyosuna alınır. Son ürün, dekorasyon veya kaplama gibi bir son işlem ile tavlama gibi işlemlerden geçirilir, daha sonra kalite kontrolü yapılır. Hatalı ürünlerin geri dönüşümü yapılabilmektedir [2].

6.4 TEMPERLENMİŞ CAM

6.4.1 Tanım

Düz cam üretiminde silika bazlı eriyik kontrollü şartlarda yavaşça soğutulur. Bu tavlama işlemi ile camdan istenmeyen gerilimler giderilir. Tavlama işlemi; yumuşama sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılmış camın kontrollü şartlarda hızla soğutulmasıdır ve bu cama *ısılişlem görmüş cam* denir. Bu ısılişlem sonucunda camda mukavemet artışı, termal gerilim direnci ve darbe direnci sağlayan gerilimler (*induced stress*) sağlanmış olur. Şekil 6.4'te temperlenmiş camda gerilme dağılımı ve eğmenin gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir [Kingery, 1976].



Şekil 6.4 Temperlenmiş camda gerilme dağılımı ve eğmenin gerilme dağılımına etkisi. [Kingery, 1976]

Isıl işlem görmüş camlar, tamamen temperlenmiş yada ısıl mukavemeti arttırılmış olarak sınıflandırılabilir. ASTM C 1048 standardına göre tamamen temperlenmiş cam, 69 MPa yada daha çok yüzey basıncı yada 67 MPa yada daha çok kenar basıncına sahip olmalıdır. Isıl mukavemetli cam ise 24 ve 69 MPa yüzey basıncı ile 38 ve 67 MPa'lık kenar basıncına sahip olmalıdır. Bu camın kırılma karakteristiği ise 24 MPa seviyesinde tavlanmış cam ve 69 MPa seviyesinde tamamen temperlenmiş cam gibi geniş bir aralıkta değişmektedir [3].

6.4.2 Isıl İşlem Prensibi

Cam, yüzeyi veya köşeleri gerilime maruz kaldığında kırılır. Bu şartlar altında içte kendiliğinden oluşmuş yüzey ve kenar çatlakları görünür çatlaklara neden olabilir.

Isıl işlem prosesinde temel prensip yüzey ve kenar basınç için başlangıç yaratabilmektir. Bu şartlar camın ilk olarak ısıtılması sonra da yüzeyin hızla soğutulması ile elde edilir. Bu da camın iç kısmının yüzeye göre sıcak kalmasına neden olur. İç kısım daha geç soğuyacağından yüzey ve kenarlarda basma oluşur. Uygulanan tüm yükler kırılmadan önce bu basma gerilimini yenmek zorundadır [3].

6.4.3 Üretim Prosesi

Isıl işlem prosesinde anahtar nokta temper fırından cam sıcak olarak (650°C) alınırken hızlı bir tavlama uygulanmasıdır. Bu ani etki, camın temperlenmesini sağlar. Havanın tüm yüzeylerle düzgün olarak temas etmesi ve sıcak olan iç kısmın yüzeyleri tekrar ısıtmasının önlenmesi için yeterince uzun tutulması gerekir. Sıcaklık yaklaşık $200-316^{\circ}\text{C}$ altına düşürüldüğünde tavlama şartları kararlı hale gelir.

Isıl işlem görmüş cam üretmek için iki prensip vardır. Birincisi, ısı cama yatay olarak uygulanmalı, ikincisi ise cam fırında dikey pozisyonda hareket etmelidir [3].

6.4.4 Mukavemet

Rüzgar basıncı altında temperlenmiş cam tavllanmış cama göre 4 kat daha üstündür (Çizelge 6.1). Kırılmaya karşı da tavllanmış cama göre 2 kat daha dayanıklıdır. Tavllanmış camın dayanamayacağı sıcaklık farklılıklarında ($90-150^{\circ}\text{C}$) temperlenmiş camın kırılma dayanımı daha yüksektir [3].

Çizelge 6.1 Rüzgar basıncı altında temperlenmiş cam ile tavllanmış camın karşılaştırılması [3].

	<u>Tavllanmış cam</u>	<u>Temperlenmiş cam</u>
Tipik kırılma dayanımı	41,5 MPa	165,5 MPa
Tipik kırılma için darbe hızı	$\cong 0,15$ m/s	$\cong 0,31$ m/s

6.4.5 Güvenlik

Tamamen temperlenmiş cam güvenlik şartlarından dolayı pek çok alanda tercih edilir. Bu güvenilirliği mukavemet ve tek kırılma paterninden kaynaklanır. Darbe ve rüzgar basıncına dayanımını arttıran mukavemet pek çok uygulamada güvenilirlik sağlar. Temperlenmiş cam kırıldığında parçalar küçük ve zararsızdır. Kesici parçalar oluşmadığı için insanlara zarar vermez. Bu tür camlar kapılarda, duşakabinlerde, özel bölümlerdeki camlarda tercih edilir [3].

6.4.6 Temperlenmiş Camın Kullanımı

Temperlenmiş cam genellikle diğer camların kullanılamayacağı, yüksek mukavemet ve kırılma dayanımı gerektiren yerlerde tercih edilir. Yapı malzemeleri, otomobil sanayii, bazı üretim endüstrilerinde etkili ve ekonomik olarak kullanılmaktadırlar. Kamu binalarında da, kapı, köşe lambaları, duşlar, asansör ve merdivenler gibi kullanım alanı bulurlar. Camlarda ve rüzgar basıncı, darbe ve termal gerilim direnci nedeniyle tercih edilir. Tenis kortu, güneş enerjisi panelleri gibi özel alanlarda da kullanılır. Otomobil, kamyon ve çok amaçlı araçlarda temperlenmiş cam kullanılır. Buzdolabı, mobilyalar, fırınlar gibi kullanım alanları da vardır.

Yangın direnci için haddelenmiş cam kullanıldığı için binalarda temperlenmiş cam kullanılmaz. Kurşun geçirmezlik için tek başına kullanımı yetersiz olup tavlanmış cam ile birlikte kullanılmalıdır [3].

6.4.7 Tepe Penceresinde Kullanılan Temper Camlar

Isıl gerilimlere ve darbeye yüksek dayanımından dolayı temperlenmiş camlar tepe camlarında kullanılır. Nadir bazı durumlarda bu temperlenmiş camlar kırıldığında küçük ve zararsız pek çok parçaya ayrılır. Bu parçalar kesici olmamakla birlikte önemsenecek bir ağırlığa sahiptir. Bazı binalarda, kırılma riskine ve sonuçlarına karşın tepe camlarının altında koruyucu perde kullanımı gerektiği vurgulanabilir [3].

6.4.8 Kullanım ve Yükleme

Tavlanmış cam kadar temperlenmiş camlara da aynı dikkati göstermek gerekir. Temperlenmiş camın geliştirilmiş mukavemetine karşın kullanımında dikkatsizlikler yaşanmaktadır. Dikkatsiz kullanım ve düzensiz yükleme camda kesici parçaların oluşmasına neden olur. Kenarları zarar görmüş, temperlenmiş cam mekanik gerilimden kaynaklanan ortalama bir ısıya maruz kaldığında *gecikmiş kırılma* gerçekleşir. Basma gerilimine sahip tabakanın penetrasyonu nedeniyle temperlenmiş camda ani parçalanma meydana gelir. Temperlenmiş camlar ısı işlemi takiben kesilemez ve modifiye edilemezler [3].

6.4.9 Eksiklikler

Camdaki kalıntılar, harman yada cam kırığındaki safsızlıklardan ya da fırın refrakterleriyle etkileşiminde kaynaklanır. Bu kalıntılar genelde alümina taşlar, demir taşlar ve silisyumdur. Nikel sülfür taşlar ise çok rastlanır olmasa da camdaki mikroskobik hataları oluşturur ve kırılmaya neden olur. Gecikmiş kırılma, cam kalınlığının ortasında nikel sülfür bulunması durumunda gerçekleşir.

Temperleme prosesi nadir olarak camda bazı eksikliklere neden olabilir. Cam, kabarcık, pullanma, boşluklar ve kalıntılar içerebilir ve eğer temperlemeden önce kontrollerde farkedilmezse başlangıç sıcaklığında ya da son tavlama işleminde kırılmaya neden olur. Kalıntılar temperleme prosesi sırasında giderilemezse daha sonradan probleme neden olur [3].

6.4.10 Görünüm

Temperlenmiş cam, tavllanmış cam ile aynı optik özellikleri gösterir. Gerilim şartları bazı durumlarda temper lambalarda hafif bir eğim oluşturur. Dikey temper fırınında üretilen temperlenmiş cam, bir kenar boyunca perçinleri temsil eden küçük yüzey basınçları içerir. Bunlar, camı akışı boyunca destekleyen metal kısıkaçlardan kaynaklanır. Fırından yatay olarak geçen cam, merdaneyele temas etmesi durumunda hafif dalgalara sahip olur. Bu dalgalanma, uzak mesafeden bakıldığında görüntüden anlaşılabilir. Son olarak, nozüllerden hava verilir. Bu hava verilen bölge, polarize camda çizgilerden anlaşılır. Işık altında bu bölgeler tipik bir ışık olarak görülür [3].

6.4.11 Temperlenmiş Camın Kırılması

1. Genelde temperlenmiş camın “kırılmaz olduğu” ya da en azından “kırılmazlığa yakın” olduğuna ilişkin yanlış bir inanış vardır. Bu yanlıştır ve tavllanmış camı kırabilen herşey temperlenmiş camın da kırılmasına neden olmaktadır.

2. Örneğin duşakabinlerde kullanılmakta olan tamamen temperlenmiş camlar aynı tip ve kalınlıktaki tavllanmış cama göre 4-5 kat daha dayanıklıdır ve 1. ile 2. kategori güvenlik kaplamaları için kırılma emniyeti ihtiyacını karşılayan CPSC¹ standardına uygundur.

¹ CPSC break-safe requirements for Category I or II safety glazing

3. Tamamen temperlenmiş cam kırıldığında yüzlerce küçük parçaya ayrılır. Bu, dizayna bağlıdır ve iyi temperlenmiş bir ürün için iyi bir ispattır. Temperlenmiş camın güvenlik özellikleri bu camların koruma kaplamaları uygulamalarında kullanılmalarını sağlar.

4. Tavlanmış camın kırılması genellikle dikkat çekmeyen birkaç çizgisel kırıktan kaynaklanır. Tavlanmış camın ışık kırılmaları pek çok kez görülmesine rağmen şaşırtıcı değildir. Bunun aksine tamamen temperlenmiş camın kırılımı şaşırtıcı, az rastlanır olduğu için sorgulanır.

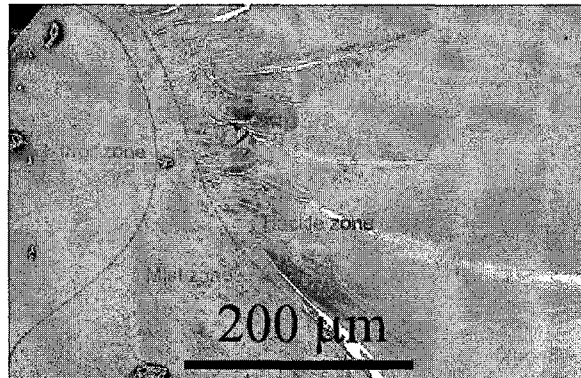
5. Tavlanmış cam, mekanik gerilimler, darbe ve ortalama ısıl gerilimlerden kolayca etkilenir ve kırılır. Tamamen temperlenmiş cam ise tavlanmış cama göre bu tür etkilere daha fazla dayanıklıdır. Fakat doğası gereği tavlanmış camdaki gibi değil ama pek çok küçük parçaya bölünerek kırılır.

6. Lamba üretimi, yüklenmesi ya da kullanımı sırasında zarar görürse kendiliğinden ya da gecikmeli olarak elde edilir. Camdaki hataların kalıntı gerilimine sahip olması temperleme işleminin ısıl sertliğini kurtaramayacaktır.

7. Kırılmaların kendiliğinden oluşmasına karşın bir kısmı da nedeni tam olarak bulunamadığı için böyle kabul edilmiştir. Camın kırılma noktasına yakın bir noktada gerildiğinde, bir hareket veya sıcaklık değişimi camın gevşemesine neden olur.

8. Açıklanamayan kırılmaların diğer bir nedeni ise istemeden yada isteyerek bozmak olabilir [3].

Şekil 6.5'te kırık bir cam yüzeyinin tabakalı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.5 Kırık bir cam yüzeyinin görüntüsü [4].

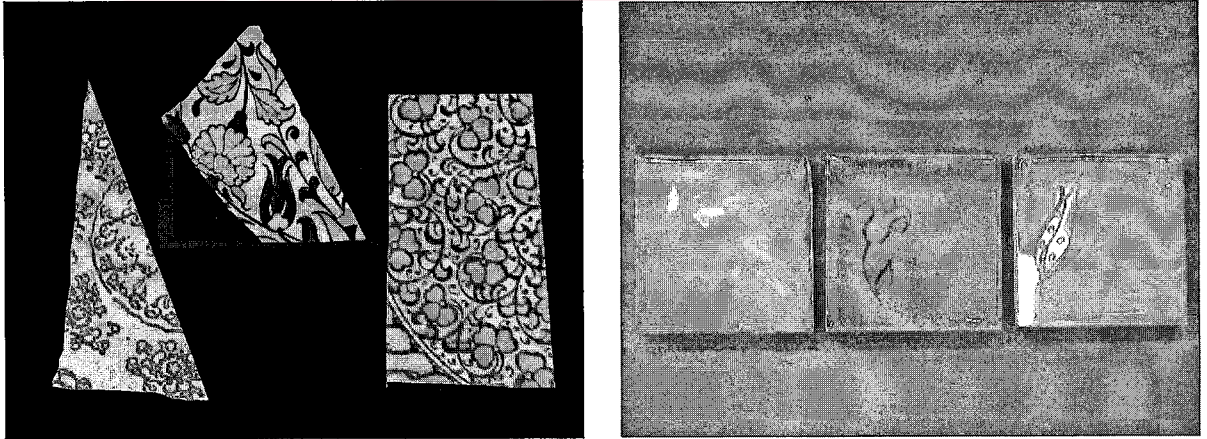
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Denemelerde sırlı seramikler, fritler ve camlar olarak üç farklı grup numune üzerinde ölçümler yapılmıştır. Temperli oto camı ve pencere camlar ile sırlı seramik ve fritlerin 13 adedi firmalar tarafından üretilen ürünler olup, 17 adet frit ve sırlı seramikler ise laboratuvar koşullarında üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin kodlama ve tanımlamaları Çizelge 7.2’de verilmiştir.

7.1 Numune Alma ve Hazırlama

Mikrosertlik ölçümü yapılacak numunelerden seçilen S2 ve S1 kodlu 2 adet numune Struers Epofix reçine içine kalıplanmış ve standart metalografik yüzey hazırlama işlemleri uygulanarak yüzeyleri 1µm’a kadar parlatılmıştır. S2 ve S1 kodlu numunelerin parlatılmış yüzey ve serbest yüzey sertlik değerleri karşılaştırıldığında ölçümleri yanıtacak bir fark gözlenmemesi nedeniyle diğer numunelerde metalografik hazırlamaya gerek duyulmamıştır (Çizelge 7.1, standart sapma).

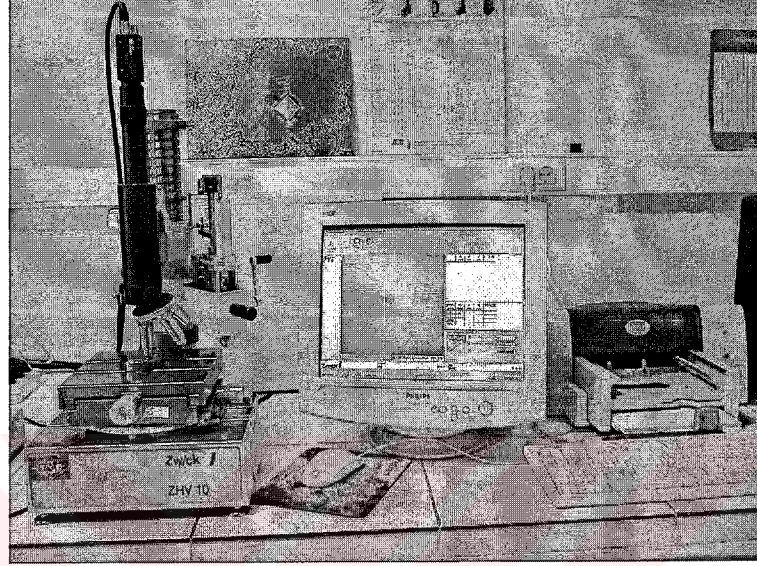
Şekil 7.1’de üzerinde ölçümler yapılan bir grup numunenin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 7.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin bir kısmının görüntüleri

7.2 MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Mikrosertlik ölçümü *ASTM E 384* standardına uygun olarak ve Şekil 7.2’de gösterilmiş olan Zwick ZHV10 sertlik ölçme cihazı kullanılarak yapılmış, tüm numunelerde sabit 100g yük uygulanmıştır. Her numunenin hem Vickers hem de Knoop sertlik değerleri incelenmiştir.



Şekil 7.2 Cam, frit ve sırlı seramiklerin Vickers ve Knoop mikrosertliklerinin ölçüldüğü Zwick ZHV 10 mikrosertlik cihazı.

Cam, frit ve sırlı seramiklerin mikrosertlik ölçümlerinde *ASTM E 384-89*, *ASTM C 849-88* ve *ASTM C 730-85* standartlarına göre inceleme yapılmıştır.

Knoop sertlik değerleri için;

$$HK=14229.P_1/d_1^2 \quad (7.1)$$

Vickers sertlik değerleri için;

$$HV=1854,4. P_1/[(d_1+d_2)/2]^2 \quad (7.2)$$

formülü kullanılmıştır. Burada

P_1 = Uygulanan yük (gf),

d_1 = Uzun köşegenin uzunluğu (μm),

d_2 = Kısa köşegenin uzunluğu (μm)’dır.

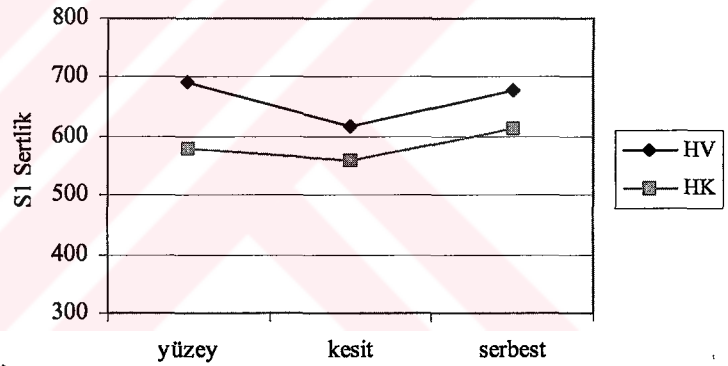
Sertlik deneyinde sertliğin ölçüldüğü yerin önemli olup olmadığını anlamak için 3 ayrı yerde 5'er kez sertlik ölçülerek ortalama değerler alınmış ve sonuçlar Şekil 7.3'te verilmiştir.

1- *Serbest* ile verilen yer doğrudan karonun yüzeyinden ölçülen sertlik değeridir.

2- *Parlatılmış yüzey*, karonun sır yüzeyi metalografik parlatma yapıldıktan sonra ölçülen sertlik değerini göstermektedir. Burada parlatma işleminde dikkat edilmesi gereken husus; parlatma işleminde sır kalınlığı dikkat edilmesi gereken bir husustur. Parlatma işlemi sonrasında sır bölgesi aşılmamış olmalıdır. Bu nedenle özellikle sır kalınlığı az olan malzemelerde kontrollü bir parlatma yapmak gerekir.

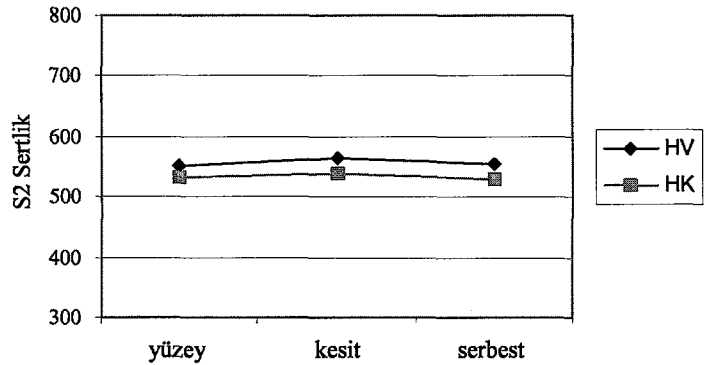
3- *Kesit* ile verilen yer karonun sırlı üst yüzeyine dik doğrultudaki yüzeyinden, metalografik parlatma yapıldıktan sonra ölçülen sertlik değeridir.

S1	HV	HK
yüzey	692	580
kesit	618	557
serbest	678	612



(a)

S2	HV	HK
yüzey	552	532
kesit	564	539
serbest	555	528



(b)

Şekil 7.3 (a) S1 kodlu alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, (b) S2 kodlu alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, sıraltı dekorlu seramik malzemelerde yüzey, kesit ve serbest yüzeyden ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.

Referans olarak seçilen Şekil 7.3'teki S1 ve S2 kodlu numunelerin parlatılmış yüzey ve serbest yüzey sertlik değerleri arasındaki fark, ölçülen standart sapma (Çizelge 7.1) değerinin altında kalması sebebiyle diğer numunelerin metalografik hazırlanmasına gerek olmaksızın tüm numunelerde sertlik değerleri için serbest yüzeylerinin sertlik değerleri alınmıştır. Kesitteki sertlik değeri parlatılmış yüzey ve serbest yüzeye göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle sertlik ölçme amacıyla kesit yüzeyi kullanılmamıştır.

Çizelge 7.1 Sertlik ölçümlerinin Standart Sapması

	HV	HK
Std.Sapma	83,17943	86,39471
Std.Hata	6,305816	7,101601
Min	415	400
Maks	804	759

ASTM C730'a göre standart sapma;

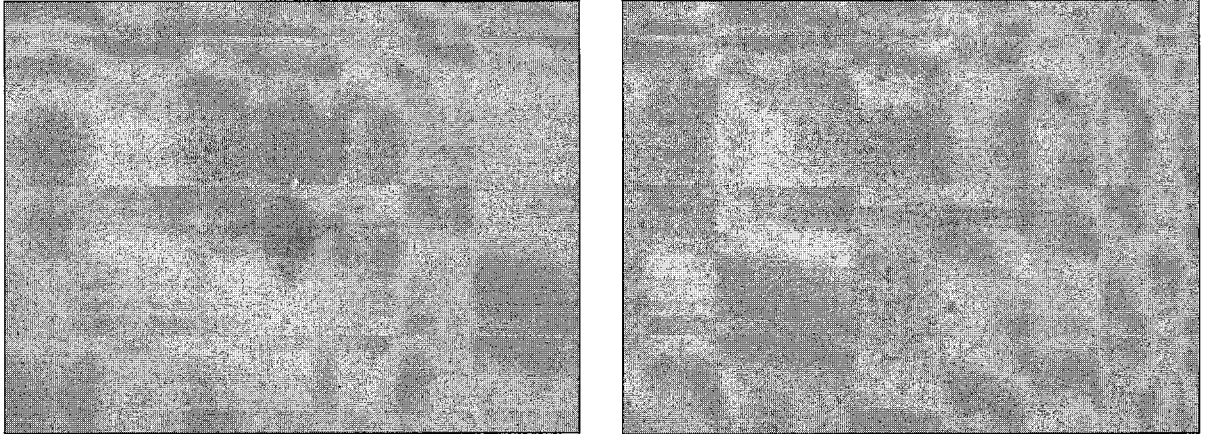
$$S = \sqrt{\sum (KHN - KHN_n)^2 / (n-1).n}$$

KHN- ortalama knoop değeri

s- standart sapma

n- ölçüm sayısı

Her numuneden altı adet ölçüm alınmış ve bunların ortalama değerleri sözkonusu Çizelge 7.2'ye işlenmiştir. Buradan da görüldüğü gibi Vickers sertlik değerlerinin 400-800HV, Knoop sertlik değerlerinin 400-750HK arasında olduğu, Vickers sertlik değerlerinin Knoop'a göre genellikle daha yüksek bulunduğu görülmektedir. Şekil 7.4'te sertlik iz fotoğrafları örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.4 S1 numunesine ait Vickers ve Knoop sertlik iz fotoğrafları

Çizelge 7.2 Numunelerin türleri, tanımlamaları ve sertlikleri

Numune kod	Numune türü	Tanım	HV	HK
S1	Sırlı seramik	155µm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 200x200x7mm	678	612
S2	Sırlı seramik	534µm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, sıraltı dekorlu seramik, 235x235x15mm	555	528
S3	Sırlı seramik	855µm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, sıraltı dekorlu seramik, 235x235x9mm	623	492
S4	Sırlı seramik	135µm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, Ø162x6mm	538	518
S5	Sırlı seramik	125µm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, Ø162x9mm	530	519
S6	Sırlı seramik	264µm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, Ø162x7mm	554	489
S7	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 75x32x13mm	521	496
S8	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 60x38x13mm	547	617
S9	Sırlı seramik	alkali borlu sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 36x20x13mm	759	727
S10	Sırlı seramik	alkali borlu sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 45x40x13mm	654	588
S11	Sırlı seramik	alkali borlu sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 40x43x12mm	694	643
S12	Sırlı seramik	alkali borlu sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 46x26x12mm	596	496
S13	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 45x25x12mm	589	475

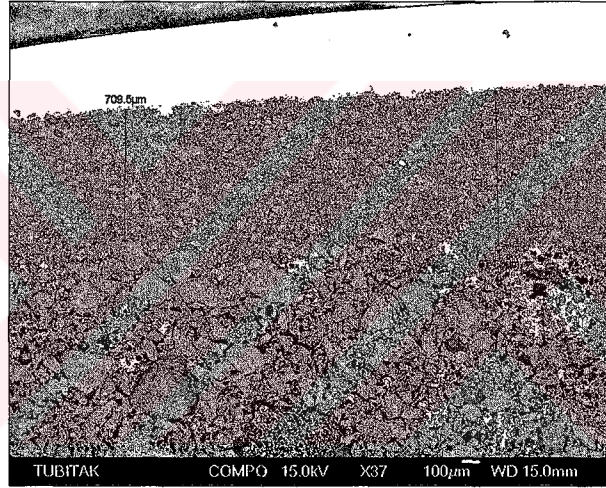
S14	Sırlı seramik	547 μ m kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 280x280x12mm	543	459
S15	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 70x70x15mm	504	430
S16	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, tek renkli sıraltı dekorlu seramik, 70x70x15mm	534	660
S17	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, tek renkli sıraltı dekorlu seramik, 70x70x15mm	489	590
S18	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, tek renkli sıraltı dekorlu seramik, 70x70x15mm	545	519
S19	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 280x280x14mm	641	579
S20	Sırlı seramik	alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik, 280x280x14mm	656	654
F1	Frit	Alkali silikat	554	547
F2	Frit	Alkali silikat	690	618
F3	Frit	Alkali silikat	588	475
F4	Frit	Alkali kurşun silikat	665	634
F5	Frit	Alkali silikat	503	444
F6	Frit	alkali kurşun silikat	566	538
F7	Frit	alkali kurşun silikat	497	527
F8	Frit	alkali kurşun silikat	495	492
G1	Cam	Temperlenmiş oto camı	823	724
G2	Cam	Temperlenmemiş pencere camı	657	593

7.3 MAKRO İNCELEME

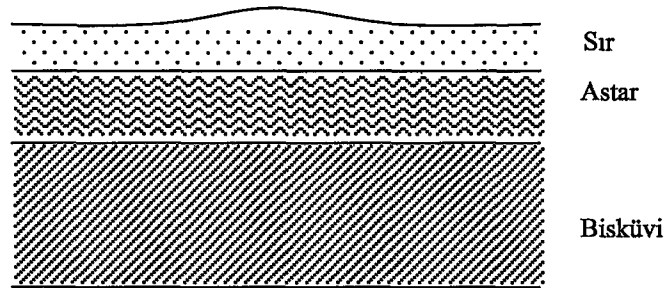
7.3.1 Sırlı Seramiklerde Sır Kalınlığının Etkisi

Bu bölümde sırlı seramiklerin sır kalınlığının mekanik özelliklere etkisi olup olmadığı incelenmiştir.

Şekil 7.5'te sırlı bir seramiğin sır-astar-bisküvi tabakalarını gösteren SEM mikroyapı fotoğrafı verilmiştir. Sırlı seramik malzemelerin sır kalınlıkları, *OLYMPUS BX51M* optik mikroskobunda Şekil 7.6'teki şematik gösterimde görülen sır bölgesi üzerinde *SPOT INSIGHT V3.5.1* programının ölçülendirme özelliği kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 7.5 Sırlı bir seramiğin sır-astar-bisküvi tabakalarını gösteren SEM mikroyapı fotoğrafı



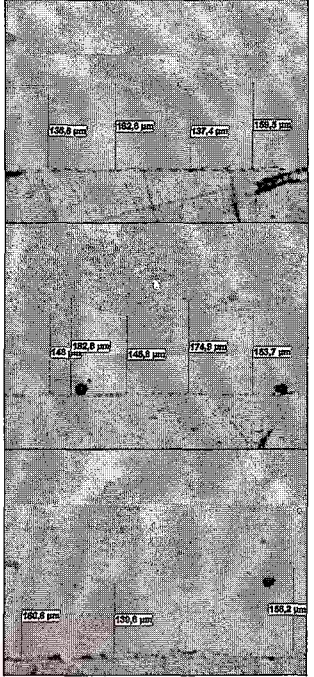
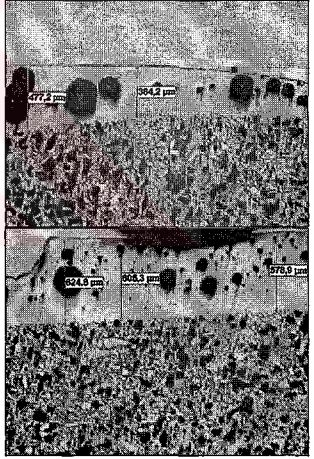
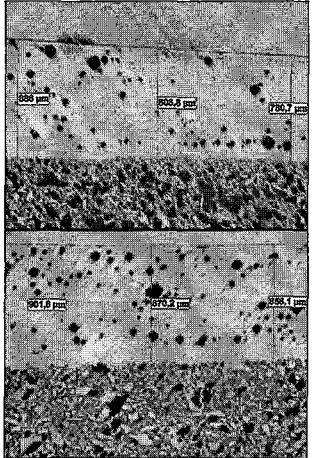
Şekil 7.6 Sırlı seramik kesitinin şematik gösterimi.

Çizelge 7.3'te gösterilen ortalama sır kalınlık değerleri, ölçülen tüm kalınlıklar arasında en yüksek ve en düşük değerler çıkarılmak suretiyle geri kalan kalınlık değerlerinin ortalamalarının alınması ile bulunmuştur.

Çizelge 7.3'e göre sırlı seramiklerde sır kalınlığı ile sertlik arasında bir bağ olup olmadığı sonraki bölümlerde irdelenecektir.



Çizelge 7.3 Sır Kalınlıkları ölçülen sırlı seramikler

Numune	Kalınlık değeri (μm)	ortalama kalınlık (μm)	fotoğraflar
S1	159,5 137,4 162,6 138,8 148 182,8 145,8 174,9 153,7 160,8 139,6 158,2	155,18	
Sertlik; 678HV, 612HK			
S2	477,2 384,2 624,6 605,3 578,9	534	
Sertlik; 555HV, 528HK			
S3	886 808,8 780,7 901,8 870,2 856,1	855	
Sertlik; 623HV, 492HK			

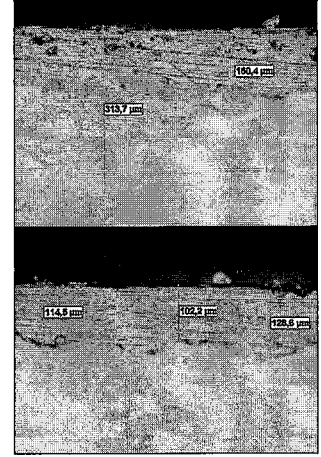
Çizelge 7.3 devam,

S4

160,4
313,7
114,5
102,2
128,6

135

Sertlik;
538HV, 518HV

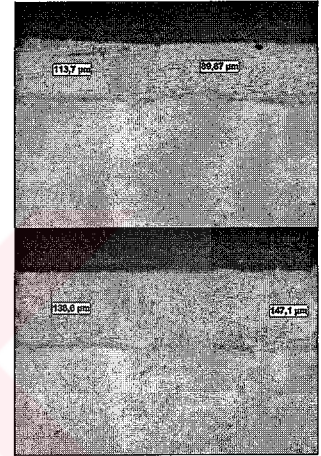


S5

113,7
89,87
136,6
147,1

125

Sertlik;
530HV, 519HK

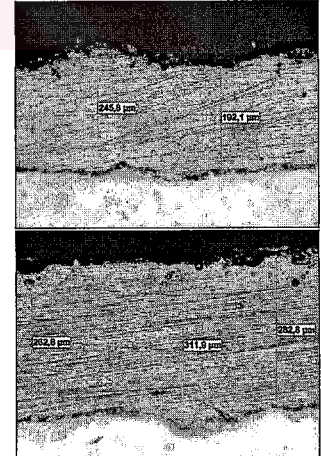


S6

245,8
192,1
262,6
311,9
282,8

264

Sertlik;
554HV, 489HK

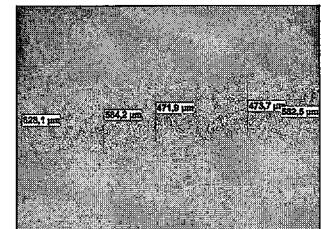


S14

628,1
584,2
471,9
473,7
582,5

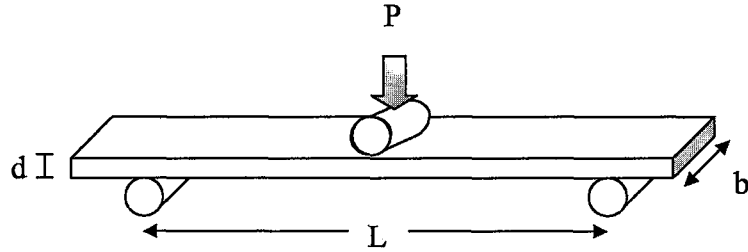
547

Sertlik;
543HV, 459HK



7.4 EĞME (EĞİLME) ve KIRILMA MUKAVEMETİ

Sırlı seramiklerde ve camlarda eğme dayanımları üç nokta eğme testiyle ASTM C 674-88 standardına uygun olarak yapılmıştır. En az 12 cm uzunluğunda ve 2,5 cm genişliğinde numuneler eğme testi için yeterlidir. Üç nokta eğme deneylerinde uygulanan yük hızı (çene hızı) 2mm/dak'dır. Üç nokta eğme deney düzeneği Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7 Üç nokta eğme deney düzeneği.

Eğme dayanımı (N/mm^2), MOR (Modulus of Rupture), aşağıdaki formülüne göre hesaplanmıştır.

Dikdörtgen numunelerde,

$$M = 3.P.L / (2.b.d^2)$$

Dairesel numunelerde,

$$M = 8.P.L / (\pi.d^3)$$

P: Numunenin kırılması anında uygulanan yük miktarı (N),

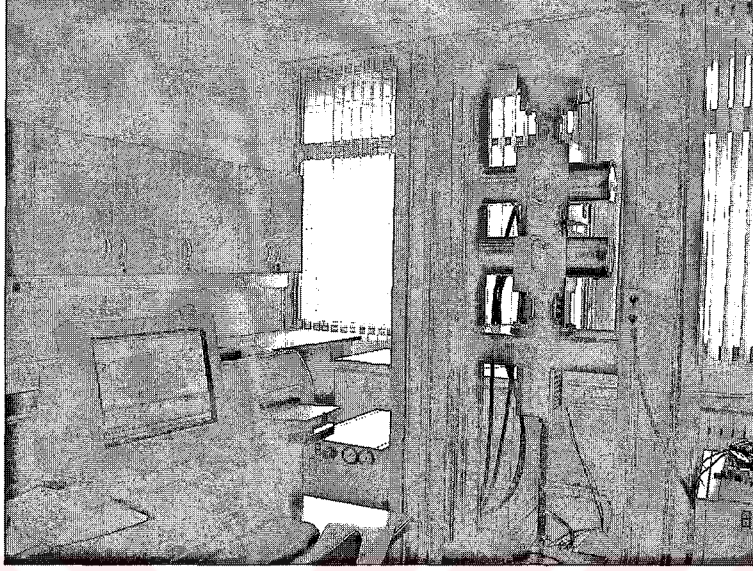
L: Mesnetler arası açıklık mesafesi (mm),

b: Numune genişliği (mm),

d: Numune kalınlığı (mm)'dir.

Formülden de görüldüğü gibi numune kalınlığı arttıkça mukavemet azalmaktadır. Seramik ve cam numunelerin boyutsal değeri ve eğme dayanımları Çizelge 7.4, 7.5 ve 7.8'de verilmiştir.

Seramik numunelerinin eğme dayanımları *INSTRON model Zwick Z250* universal çekme cihazında ölçülmüştür (Şekil 7.8).



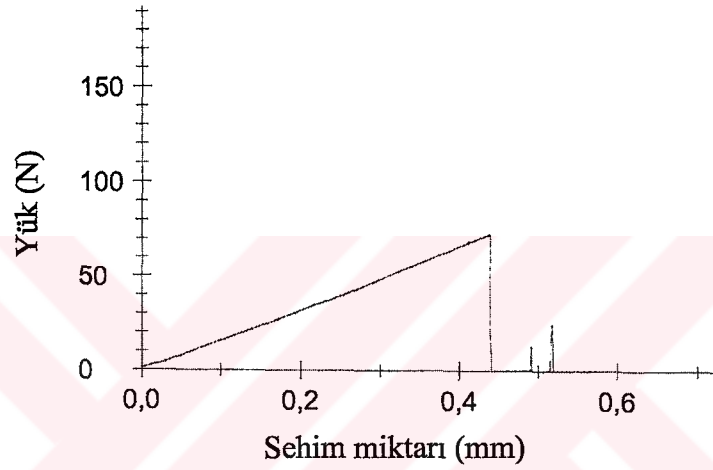
Şekil 7.8 Seramik ve cam numunelerinin eğme dayanımlarının ölçüldüğü *INSTRON model Zwick Z250 universal çekme cihazı*.

Eğme testine tabi tutulan numunelerden kare kesitli S1'den ilgili standartta belirtildiği üzere 2,5 cm genişliğinde dilimler kesilerek eğme testi uygulanmıştır. Daire kesitli S4, S5 ve S6 karoları ile temperlenmiş ve temperlenmemiş cam numunelere ise kesilmeden eğme testi uygulanmıştır.

Laboratuvar koşullarında üretilen sırlı seramiklere geometri müsaade etmediği için eğme testi uygulanamamıştır.

7.5 SIRLI SERAMİKLER

Piyasadan rastgele alınmış olan sırlı seramikler üzerinde eğme ve sertlik deneyleri uygulanmıştır. Eğme testinde her numunede uygulanan kopma yüküne karşılık numunede sehim meydana gelir. S1 numunesi için eğme deneyinde meydana gelen yük-sehim diyagramı Şekil 7.9’da verilmiştir. Sırlı seramikler çok gevrek malzemelerdir. Bu nedenle şekilden de görüldüğü gibi yük-çökme diyagramında plastik deformasyon göstermeden doğrusal değişim gösterirler ve ani kırılırlar. Kırılma sırasında depoladıkları enerji de oldukça düşüktür.



Şekil 7.9 S1 sırlı seramik malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı

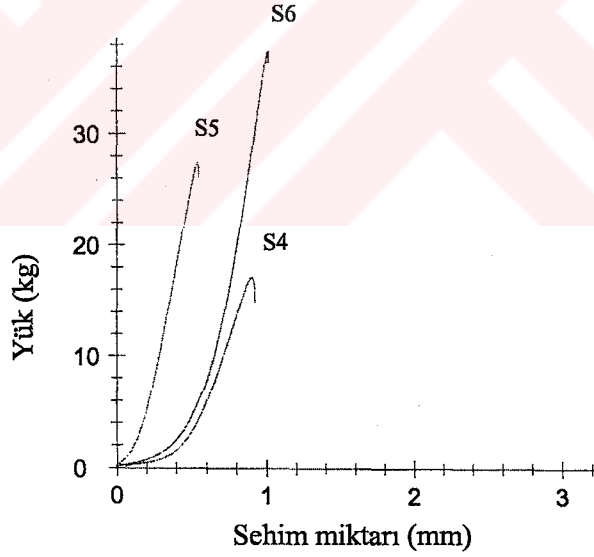
Çizelge 7.4 S1 kodlu kare kesitli ticari karonun kalınlık, genişlik, kopma yükü, eğme dayanımı, sertlik değerleri.

Numune	d (mm) Kalınlık	b (mm) Genişlik	P (kgf) Kopma Yüğü	M (N/mm ²) Eğme Dayanımı	Sertlik
S1 Sır kalınlığı: 155µm	6,9	25	7,38	10,94	678 HV 612 HK

Çizelge 7.5 S4, S5 ve S6 kodlu dairesel kesitli ticari karoların kalınlık, çap, kopma yükü, eğme dayanımı ve sertlik değerleri.

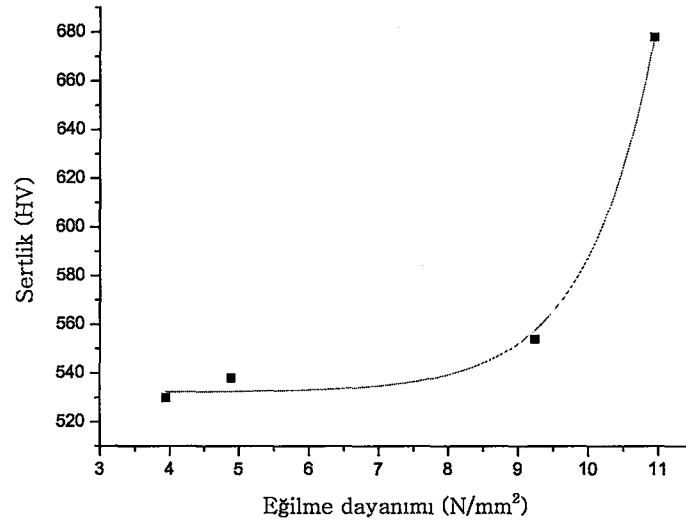
Numune	d (mm) Kalınlık	b (mm) Çap	P (kgf) Kopma Yükü	M (N/mm ²) Eğme Dayanımı	Sertlik
S4 Sır kalınlığı: 135µm	5,91	162	0,37	4,89	538 HV 518 HK
S5 Sır kalınlığı: 125µm	8,33	162	0,83	3,95	530 HV 519 HK
S6 Sır kalınlığı: 264µm	6,36	162	0,87	9,24	554 HV 489 HK

Şekil 7.10’da S4, S5 ve S6 sırlı seramikleri için eğme deneyinde meydana gelen yük-sehim diyagramı verilmiştir.



Şekil 7.10 S4, S5 ve S6 sırlı seramik malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı

Eğme testi uygulanan numunelerin boyutsal bilgileri, eğme dayanımı ve sertlik sonuçları Çizelge 7.4-5’te verilmiş ve eğme dayanımı-sertlik ilişkisi Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



Şekil 7.11 Sırlı seramiklerin eğme dayanımı ve sertlik ilişkisi

ORIGIN 6.0 programı kullanılarak çizilen grafik (Şekil7.11) ve yapılan hesaplama ile sırlı seramiklerin eğme dayanımları (x) ve Vickers sertlik değerleri (y) arasında şöyle bir bağıntı bulunmuştur.

Bağıntı: $y_0 + A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} + A_2 \cdot e^{(-x_0/t_2)}$:

-----Katsayılar -----Hata-----

y0	514,96203	2,91264E-145
A ₁	0,00196	--
t ₁	-0,97591	--
A ₂	17,28943	2,91264E-145
t ₂	-5,46949E92	--

y : Sertlik (HV)

x : Eğme dayanımı (N/mm²)

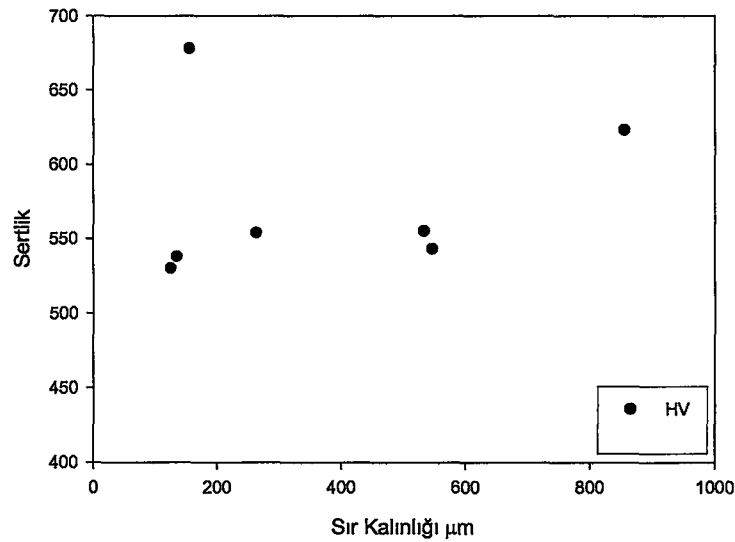
Sırlı seramiklerde eğme dayanımı düştükçe sertlik çok hızlı düşme göstermektedir. Sertlik-eğme dayanımı oranı da değişkenlik göstermektedir. Bu düşüşün parabolik olduğu söylenebilir.

7.5.1 SIRLI SERAMİKLERDE SIR KALINLIĞI – SERTLİK İLİŞKİSİ

Sırlı seramiklerde sır kalınlığı–sertlik ilişkisine ait sonuçlar aşağıdaki Çizelge 7.6’da ve Şekil 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.6 Sır kalınlığına karşılık gelen sertlik değerleri

Numune	Sır kalınlığı (μm)	HV	HK
S1 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	155	678	612
S2 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, sıraltı dekorlu seramik	534	555	528
S3 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, sıraltı dekorlu seramik	855	623	492
S4 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	135	538	518
S5 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	125	530	519
S6 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	264	554	489
S14 alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	547	543	459



Şekil 7.12 Sertlik-sır kalınlığı arasındaki ilişki

Şekil 7.12’de görüldüğü gibi sır kalınlığının 150-800µm arasında değişmesi durumunda sertlik-sır kalınlığı arasında belirgin bir ilişki kurulamamıştır. Burada sır-gövde arasında termal genleşme farkının rolü olduğu kadar bu farkın miktarı da önem kazanmaktadır.

Sırlı seramiklerde sır termal genleşme katsayısı gövde genleşme katsayısından büyükse termal genleşme farkı arttıkça sır yüzeyinde meydana gelen basma gerilmeleri artar. Bu gerilmeler arttıkça sırlı seramiğin eğme dayanımı da artar. Fakat sır yüzeyindeki basma gerilmeleri ile sertlik artışı eğme dayanımına paralel olarak artış göstermez bu da sertlik-eğme dayanımı ilişkisini bozar.

Sırlı seramiklerde sır termal genleşme katsayısı gövde genleşme katsayısından küçükse termal genleşme farkı arttıkça sır yüzeyinde meydana gelen çekme gerilmeleri artar. Bu gerilmeler arttıkça sırlı seramiğin eğme dayanımı da düşer. Fakat sır yüzeyindeki çekme gerilmeleri ile sertlik azalışı eğme dayanımına paralel olarak düşüş göstermez. Bu da sertlik-eğme dayanımı ilişkisini bozar. Aşağıda temperlenmiş camda anlatılacağı gibi eğme dayanımı önemi ölçüde düştüğü halde sertlikte önemli bir değişme meydana gelmemektedir.

Sır tabakasının kalınlığı ve sırdaki basma gerilmeleri, sertliği sabit kalmak koşuluyla gövde malzemesinin kalınlığı arttırılırsa gövde (bisküvi) malzemesinin özellikleri etkinliğini arttırır. Bu nedenle sır/gövde oranı da önemlidir.

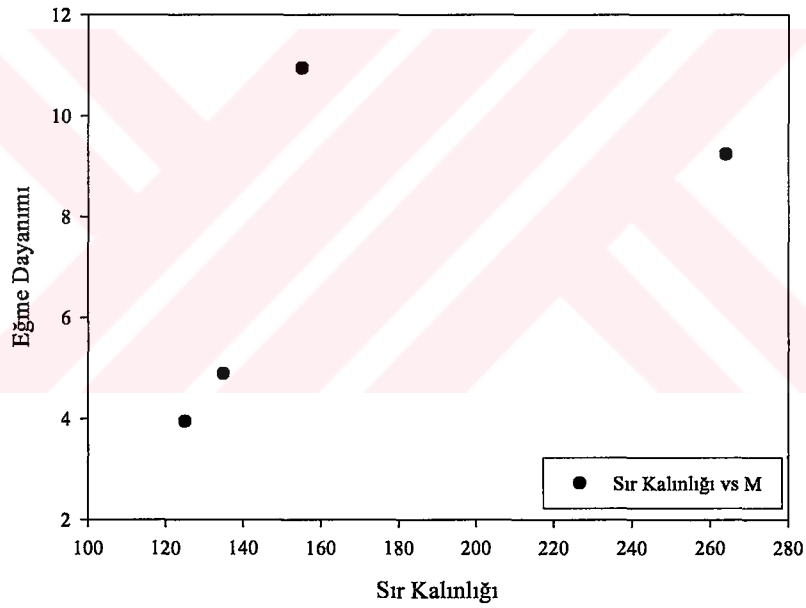
Bu nedenle sertlik-sır kalınlığı ilişkisi için çok sayıda parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Yukarıdaki Şekil 7.12 göstermektedir ki; sertlik-sır kalınlığı arasında belirli bir ilişki kurmak mümkün değildir.

7.5.2 SIRLI SERAMİKLERDE SIR KALINLIĞI – EĞME DAYANIMI İLİŞKİSİ

Sırlı seramiklerde sır kalınlığı-eğme dayanımı ilişkisine ait sonuçlar aşağıdaki Çizelge 7.7’de ve Şekil 7.13’de verilmiştir.

Çizelge 7.7 Sırlı seramiklerin eğme dayanımları ve sır kalınlıkları

Numune	Sır kalınlığı(μm)	Eğme Dayanımı (N/mm^2)
S1 155 μm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	155	10,94
S4 135 μm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	135	4,89
S5 125 μm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	125	3,95
S6 264 μm kalınlığında alkali kurşun silikat sırlı, astarlı, çok renkli sıraltı dekorlu seramik	264	9,24



Şekil 7.13 Eğme dayanımı-sır kalınlığı ilişkisi.

Şekil 7.13'te görüldüğü gibi sır kalınlığının 150-260 μm arasında değişmesi durumunda eğme dayanımı-sır kalınlığı arasında belirgin bir ilişki kurulamamıştır. Ancak sertlik sır kalınlığı kadar anormal bir değişiklik sözkonusu değildir. Çünkü sırlı seramiklerde sır termal genleşme katsayısı gövde genleşme katsayısından büyükse termal genleşme farkı arttıkça sır yüzeyinde meydana gelen basma gerilmeleri de artmaktadır. Bu gerilmeler arttıkça sırlı seramiğin eğme dayanımı da artmaktadır. Sır yüzeyinde meydana gelen basma gerilmeleri ile eğme dayanımı arasında hemen hemen doğrusal bir ilişki sözkonusudur. Eğme deneyi sırasında yüzeyde

meydana gelen çekme gerilmeleri önce yüzeydeki basma gerilmelerini sıfırlamak zorundadır, ondan sonra eğme dayanımına ulaşır parçayı kırmak zorundadır. Bu nedenle sırda meydana gelen basma gerilmeleri attıkça eğme dayanımı da artmaktadır.

Sırlı seramiklerde sır termal genleşme katsayısı gövde genleşme katsayısından küçükse termal genleşme farkı arttıkça sır yüzeyinde meydana gelen çekme gerilmeleri artar. Bu gerilmeler arttıkça sırlı seramiğin eğme dayanımı da düşer. Fakat sır yüzeyindeki çekme gerilmeleri ile sertlik azalışı eğme dayanımına paralel olarak düşüş gösterir. Aşağıda temperlenmiş camda anlatılacağı gibi eğme dayanımı önemli ölçüde düştüğü halde sertlikte önemli bir değişim meydana gelmemektedir. Eğme dayanımı ile sertlik arasındaki bu ciddi fark diyagramlara yansımaktadır.

Sır tabakasının kalınlığı ve sırdaki basma gerilmeleri, sertliği sabit kalmak koşuluyla gövde malzemesinin kalınlığı arttırılırsa gövde (bisküvi) malzemesinin özellikleri etkinliğini arttırır. Bu nedenle sır/gövde oranı da önemlidir.

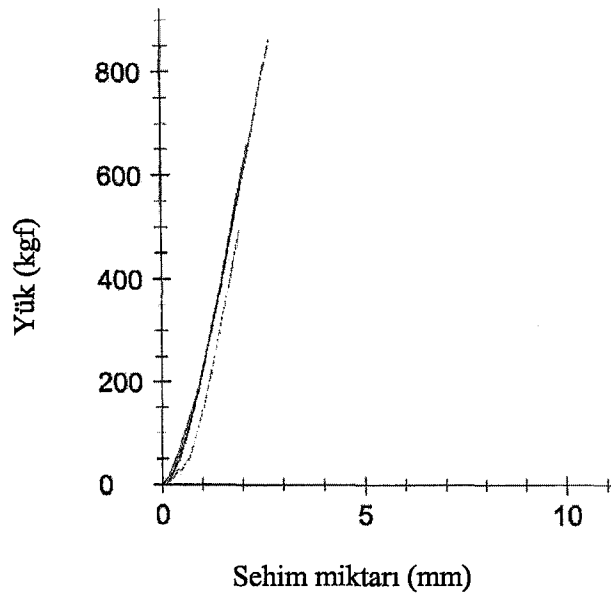
Sertlik-eğme dayanımı ilişkisi, sertlik-sır kalınlığı ilişkisi kadar karmaşık değildir. Yukarıdaki Çizelge 7.7 ve Şekil 7.13 göstermektedir ki; eğme dayanımı-sır kalınlığına bağlı olarak bir artış göstermektedir. Fakat kalınlık gibi bazı parametrelerin etkisiyle belirli bir ilişkinin dışına çıkmaktadır.

7.6 TEMPERLENMİŞ VE TEMPERLENMEMİŞ CAM

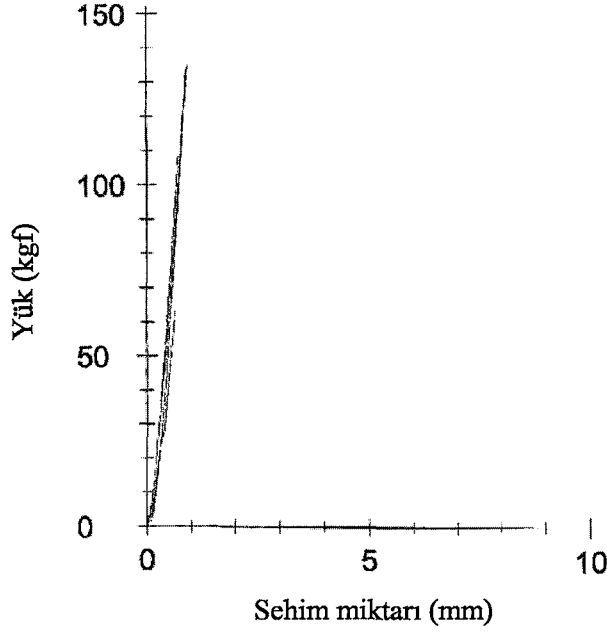
Aşağıdaki temperlenmiş ve temperlenmemiş camların boyutsal ölçümleri, kopma yükleri ve eğme dayanımları (Çizelge 7.8) ile Vickers ve Knoop sertlik değerleri (Çizelge 7.9) tablolar halinde verilmiştir. Eğme dayanımları Denklem 3.7-8'e göre hesaplanmıştır. Eğme testi sonuçlarına göre oluşan yük-sehim diyagramları Şekil 7.14-15'te verilmiştir. Camların deneysel çalışmalarında 4'er adet numune kullanılmıştır.

Çizelge 7.8 Temperlenmiş ve temperlenmemiş camların boyutları, kopma yükleri ve de eğme dayanımları.

Numune	d (mm) Kalınlık	b (mm) Genişlik	A (mm ²) Alan	P (N) Kopma Yüğü	M (N/mm ²) Eğme Dayanımı
Temperlenmiş G1	3,97	291	1155	3836,03	113
	3,94	270	1064	8443,01	272
	3,94	293	1154	4835,51	144
	3,94	275	1084	6471,74	205
Temperlenmemiş G2	3,98	160	636,8	1316,18	70
	4,14	136	563	1338,96	78
	3,92	125	490	1277,2	90
	4,3	140	602	1057,9	55



Şekil 7.14 Temperlenmiş cam malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı



Şekil 7.15 Temperlenmemiş cam malzemesi için yük-çökme (sehim) diyagramı

Çizelge 7.9 Temperlenmiş ve temperlenmemiş camların sertlik değerleri

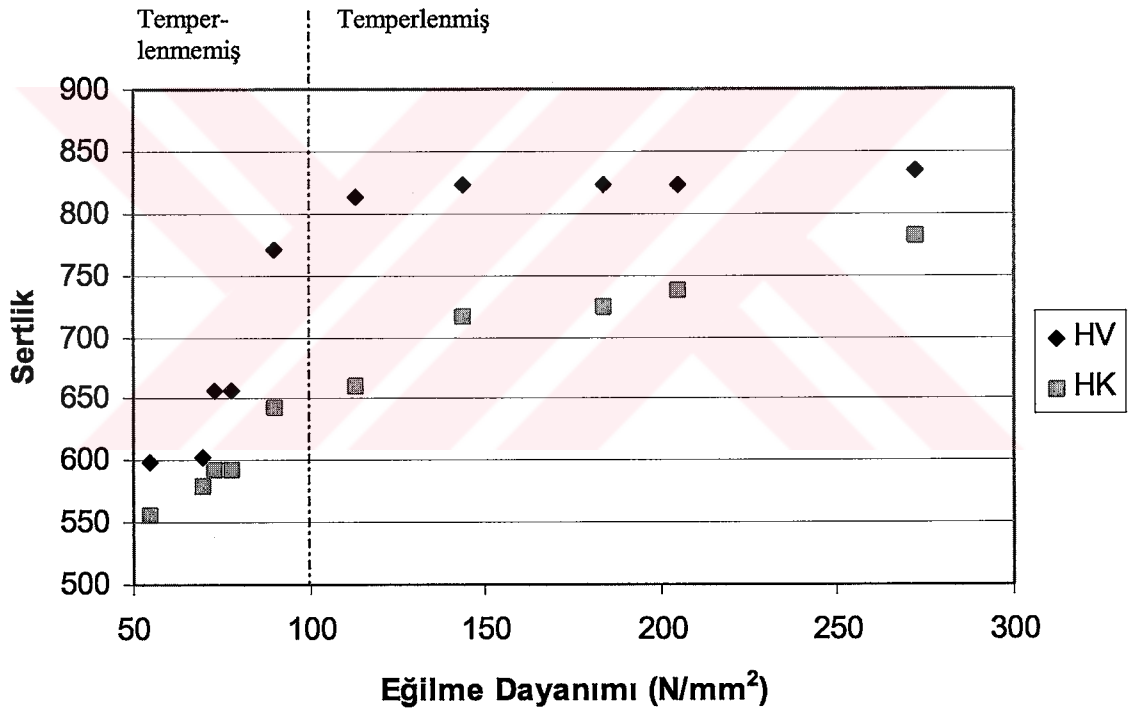
Numune	HV	HK
Temperlenmiş G1	813	660
	823	717
	823	724
	823	738
	834	782
Temperlenmemiş G2	599	556
	603	579
	657	593
	657	593
	770	643

Çizelge 7.8 ve Çizelge 7.9'daki veriler kullanılarak çizilen grafikler Şekil 7.16 ve Şekil 7.17'de gösterilmiştir.

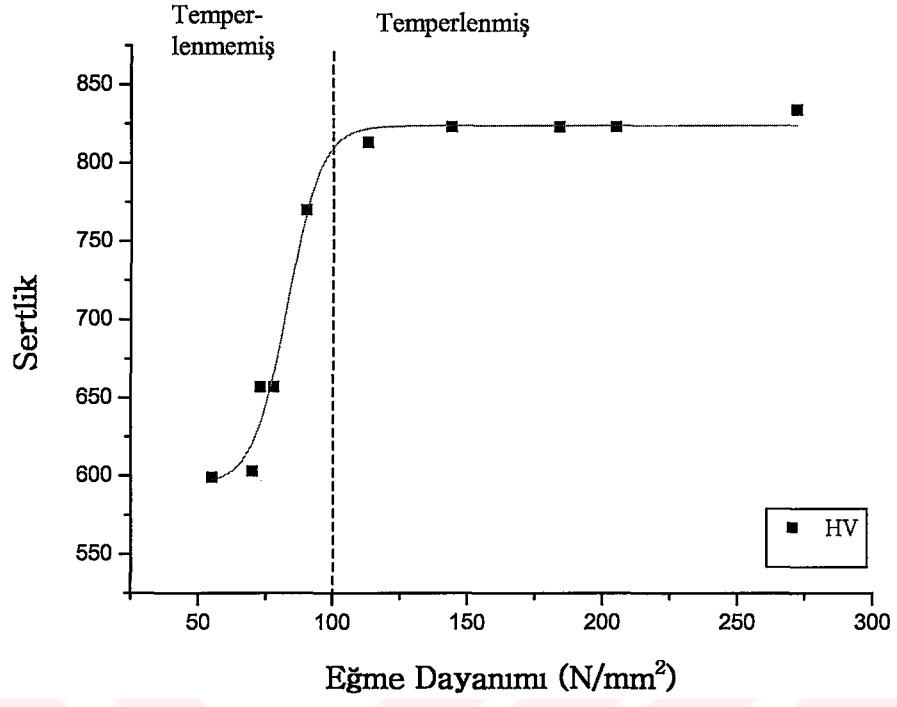
Temperlenmiş camda eğme dayanımı düştükçe sertlik çok az düşme göstermektedir ve sertlik-eğme dayanımı oranı hemen hemen sabittir. Temperlenmemiş camda eğme dayanımı

düştükçe sertlik ciddi şekilde düşme göstermektedir. Buna ilaveten sertlik-eğme dayanımı oranı geniş bir aralıkta değişme göstermektedir. Bu da temperlenmemiş camda imalat sırasında oluşan istenmeyen iç gerilmelere bağlı olarak gerçekleşebilir. Genel olarak temperlenmemiş camların hem eğme dayanımı hem de sertlikleri temperlenmiş cama göre düşüktür.

Şekil 7.16 Eğme dayanımı ile Knoop ve Vickers sertlikleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Vickers-eğme dayanımı ilişkisi ile Knoop-eğme dayanımı ilişkisi birbiriyle büyük ölçüde paralellik göstermektedir. Bu iki sertlik ölçme yönteminden birini diğerine tercih etmek için özel bir neden bulunmamaktadır.



Şekil 7.16 Eğme dayanımı ile Knoop ve Vickers Sertlikleri Arasındaki İlişki



Şekil 7.17 Eğme dayanımı ile Vickers Sertlikleri Arasındaki bağlantı

8. İRDELEME VE SONUÇ

Yapılan çalışma sonucunda;

-Temperlenmiş camda sertlik mukavemetin 4,4 katı, temperlenmemiş camda sertlik mukavemetin yaklaşık 9 katı olduğu görülmüştür. Bilindiği üzere yumuşak çelikte brinell-vickers sertlik değeri ile çekme mukavemeti arasında 10 kat ilişkisi vardır. Metal malzemelerde ise brinell sertlik değeriyle çekme dayanımı arasında 10/1 oranı vardır. Yapılan çalışmada temperlenmemiş camda Vickers sertlik değeriyle eğme dayanımı arasındaki oran 9/1 olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi temperlenmemiş yani iç gerilmeleri az olan pencere camında sertlik-eğme dayanımı ilişkisi metal malzemelerinkine benzerlik göstermektedir.

-Temperlenmiş camda temperleme neticesinde yüzeyde basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmeler hem eğme dayanımını hem de sertlik değerini arttırmaktadır. Temperlenmiş camda sertlik değeriyle eğme dayanımı arasında 4,4/1 oranı bulunmaktadır. Bu oran da göstermektedir ki; temperlenmiş camda eğme dayanımı temperleme sonucu çok fazla artış gösterirken sertlik değeri aynı oranda artmamakta ve 9 değerinden 4.4'e düşmektedir.

-Sırlı seramiklerde sır ve gövde arasındaki termal genleşme farkına bağlı olarak sır ve gövde üzerinde çekme veya basma gerilmeleri meydana gelir. Sırın termal genleşme katsayısı gövdeden büyükse sır üzerinde çekme, gövdede basma gerilmeleri meydana gelir. Sırın termal genleşme katsayısı gövdeden küçükse sır üzerinde basma, gövdede çekme gerilmeleri meydana gelir. Fakat, her iki durumda da gövde kesiti sır kesitinden büyük olduğu için gövdedeki gerilmenin fazla bir önemi olmaz.

-Sırlı seramiklerde eğme dayanımı düştükçe buna bağlı olarak sertlik değeri de düşme göstermektedir. Burada sırdaki gerilme durumunun çok büyük önemi bulunmaktadır. Nasıl ki; temperlenmiş camın yüzeyindeki basma gerilmeleri eğme dayanımını önemli ölçüde artırırken sertlik değerini aynı oranda arttırmıyorsa sırlı seramiklerde de sırdaki basma gerilmeleri eğme dayanımını önemli ölçüde artırır, fakat sertlik değerini aynı oranda arttırmaz.

-Sır kalınlığının artması ile sır içindeki mevcut gaz çıkışı zorlaşır, böylelikle herhangi bir darbe anında por bölgeleri çentik etkisi yaratacağından malzemede çatlak oluşumu bu

bölgelerde meydana gelmektedir. Sonuç olarak, sır kalınlığı azaldıkça sertlik değerlerinde artış gözlenmektedir.

- *ORIGIN 6.0* programı kullanılarak çizilen grafik ve yapılan hesaplama ile sırlı seramiklerin eğme dayanımları (x) ve Vickers sertlik değerleri (y) arasında şöyle bir bağıntı bulunmuştur.

$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} + A_2 \cdot e^{(-x_0/t_2)}$$

KAYNAKLAR

Andreola F., Castellini E., Romagnoli M., Optimization of Fritting Parameters of Ceramic Frits: Effect on the Rheological Behaviour of the Glaze Suspensions, *Interceram*, vol.49, no.4, 216-20, (2000)

Eppler A.R., Eppler R.D., Formulating Lead-free Glazes, *Am. Cer. Soc. Bul.*, (9) V.75, 62-65, (1996)

Eppler A.R., Formulation of Glazes for Low Pb Release, *Ceramic Bulletin*, Vol.54, No.5, 496-99, (1975)

Glass Manufacturing , Mineral Products Industry, 1986

Kartal A., Sır ve Sırlama Tekniği, Çizgi Matbaacılık,1998

Kingery W.D., Bowen H.K., Uhlmann D.R., Introduction to Ceramics, John Wiley&Sons, 1976

Llusar M., Badenes J.A., Calbo J., Tena M. A., Monros G., Environmental Optimization of Flux Additions, *Am. Cer. Soc. Bul.*, 63-71, (July 1999)

R.W. Davidge,A.G. Evans, The Strength of Ceramics, *Mater. Sci. Eng.*, 6(1970) 281-298

Okyar F., “Environmentally Friendly Glazes and Slips for Traditional and Antique Type Ceramic Artefacts” Projesi 2.Gelişme Raporu, TÜBİTAK, Nisan2004

Onaran K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi,1995

Scholes S.R., “Modern Glass Practice”, Cahners Books, Massachusetts, 1975

Shand E. B., “Glass Engineering Handbook”, McGraw-Hill Book Company, 1958

Wachtman J. B., Mechanical Properties of Ceramics, John Wiley&Sons, 1996

ASTM C384-89 Standard Test Method for Microhardness of Materials

ASTM C648-98 Standard Test Method for Breaking Strength of Ceramic Tile

ASTM C674-88(1999) Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials

ASTM C730-98 Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass

ASTM C848-88(1999) Standard Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio For Ceramic Whitewares by Resonance

ASTM C849-88(1999) Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Ceramic Whitewares

ASTM C1505-01 Standard Test Method for Determination of Breaking Strength of Ceramic Tiles by Three-Point Loading



INTERNET KAYNAKLARI

- [1] http://tezim.m_e_i.sitemynet.com/
- [2] <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s15.pdf>
- [3] www.alumaxbath.com/tech
- [4] www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fracture/cracks.php



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 14.08.1975

Doğum yeri Ankara

Lise 1986-1992 Ankara Bahçelievler Deneme Lisesi

Lisans 1993-1998 İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fak.
Metalurji Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum

2000-Devam ediyor TÜBİTAK-MAM MKTAE Araştırmacı

