



**KİMYASAL TEMPERLENMİŞ SODA-KİREÇ  
CAMININ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Onur SAVAŞIR**

**Eskişehir, 2019**

**KİMYASAL TEMPERLENMİŞ SODA-KİREÇ CAMININ BALİSTİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Onur SAVAŞIR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emrah DÖLEKÇEKİÇ**

**Eskişehir  
Eskişehir Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Ocak 2019**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Onur SAVAŞIR'ın "KİMYASAL TEMPERLENMİŞ SODA-KİREÇ CAMININ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezi 10/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Unvanı Adı Soyadı

### İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Dr. Öğr. Üyesi Emrah DÖLEKÇEKİÇ .....

Üye : Doç. Dr. Erhan AYAS .....

Üye : Doç. Dr. Hakan GAŞAN .....

Prof. Dr. Ersin Yücel  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### KİMYASAL TEMPERLENMİŞ SODA-KİREÇ CAMININ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Onur SAVAŞIR

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, OCAK, 2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emrah DÖLEKÇEKİÇ

Bu çalışmada geleneksel transparan zırh sistemlerine alternatif olarak kullanılabilir, daha hafif, ince ve aynı zamanda ticari olarak üretilmesine olanak sağlanabilecek kapasitede transparan zırh malzemesi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın başlangıç aşamasında piyasadan kolayca elde edilebilecek soda-kireç camı 450 °C sıcaklığındaki KNO<sub>3</sub> tuzunda 8 saat, 16 saat, 1, 3, 5, ve 7 gün boyunca iyon değişimi için bekletilmiştir. Daha sonra her bir numune grubu için on adet sertlik ve beş adet nokta eğme testi uygulanmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskopunda EDX yöntemiyle KNO<sub>3</sub> tuzunun nüfuz etme derinliği ve konsantrasyonu gösterilmiştir. Elde edilen bilgiler doğrultusunda 6 âdeti kimyasal iyon değişim yöntemi ile mukavemet kazandırılmış olmak üzere toplam 16 adet balistik test numunesi üretilmiştir. MIL-STD-662F test standardına göre gerçekleştirilen V<sub>50</sub> balistik testi sonucuna göre mukavemet kazandırılmış numunelerin %17 daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** İyon Değişimi, Kimyasal Temperleme, Mukavemet Kazandırma, Transparan Zırh

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF BALLISTIC PROPERTIES OF CHEMICALLY TEMPERED SODA-LIME GLASS

Onur SAVAŞIR

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Graduate School of Sciences, January, 2019

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Emrah DÖLEKÇEKİÇ

In this study, it is aimed to develop transparent armor material that can be used as an alternative to conventional transparent armor systems, which is lighter, thin and also affordable by commercially. At the beginning of the study, soda-lime glass, which can be easily obtained from the market, was immersed in the  $\text{KNO}_3$  salt at 450 °C for 8 hour, 16 hour, 1, 3, 5 and 7 days for ion exchange. Then, hardness and four point bending test were applied for each sample group. In addition, the penetration depth and concentration of  $\text{KNO}_3$  salt were investigated by the EDX method in the scanning electron microscope. In accordance with the information obtained, a total of 16 ballistic test specimens were produced. The  $V_{50}$  ballistic test performed according to MIL-STD-662F test standard showed 17% better performance of the strengthened samples.

**Keywords:** Ion Exchange, Chemical Tempering, Strengthening, Transparent Armor

## ÖNSÖZ

Özellikle ülkemizin içinde bulunduğu bölgesel ve küresel ölçekte savunma harcamalarında genel bir artış eğilimi görülmektedir. Türk savunma sanayiinin millileşerek dışa bağıllığın önlenmesinde, sürdürülebilirliğinin ve ihracat potansiyelinin artırılmasında bu ve bunun gibi çalışmalar öncü olmakla beraber bundan sonraki benzer çalışmalara da ışık tutmaktadır. Bu tez çalışmasında zırhlı araçlarda kullanılmak üzere maliyet-performans indeksi bakımından transparan zırh sistemlerinde uygulanabilir bir malzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Öncelikle tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup bana yardımcı olan, tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Emrah DÖLEKÇEKİÇ' e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Onur SAVAŞIR

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu, çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Onur SAVAŞIR

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| BAŞLIK SAYFASI .....                                               | i    |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....                                         | ii   |
| ÖZET .....                                                         | iii  |
| ABSTRACT.....                                                      | iv   |
| ÖNSÖZ .....                                                        | v    |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....                   | vi   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                  | vii  |
| TABLolar DİZİNİ .....                                              | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                               | x    |
| GÖRESELLER DİZİNİ.....                                             | xii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                | xiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                     | 1    |
| 2. GENEL BAKIŞ .....                                               | 2    |
| 2.1. Malzemelerin Sınıflandırılması .....                          | 2    |
| 2.1.1. Metaller .....                                              | 3    |
| 2.1.2. Seramikler .....                                            | 4    |
| 2.1.3. Polimerler .....                                            | 6    |
| 2.1.4. Kompozitler .....                                           | 6    |
| 2.2. Camlar.....                                                   | 7    |
| 2.2.1. Cam yapısı ve oluşumu .....                                 | 7    |
| 2.2.2. Camların mekanik özellikleri .....                          | 10   |
| 2.2.3. Camların mekanik özelliklerini geliştirme yöntemleri.....   | 14   |
| 3. LİTERATÜR.....                                                  | 19   |
| 3.1. Transparan Zırh Sistemleri .....                              | 19   |
| 3.1.1. Transparan zırh sistemi tasarımında kriterler .....         | 20   |
| 3.1.2. Transparan zırh sistemleri için alternatif malzemeler ..... | 20   |
| 3.2. Kimyasal İyon Değişim Yöntemi .....                           | 23   |



|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1. İyon değişiminin kinetiği .....                   | 24 |
| 3.2.2. İyon değişimi esnasında gerilme oluşumu .....     | 25 |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMA .....                                | 28 |
| 4.1. İyon Değişimi İçin Parametrelerin Belirlenmesi..... | 28 |
| 4.1.1. Test numunelerinin hazırlanması.....              | 28 |
| 4.1.2. Test numunelerinin analizi.....                   | 28 |
| 4.1.2.1. Sertlik.....                                    | 28 |
| 4.1.2.2. Eğilme mukavemeti .....                         | 30 |
| 4.1.2.3. İçyapı incelemeleri .....                       | 30 |
| 4.2. Lamine Cam Hazırlama .....                          | 31 |
| 4.2.1. İyon değişimi.....                                | 31 |
| 4.2.2. Lamine cam hazırlama .....                        | 31 |
| 4.3. Balistik Testler.....                               | 32 |
| 5. SONUÇ TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....                      | 36 |
| 5.1. Test Numunelerinin Analiz Sonuçları.....            | 36 |
| 5.1.1. Sertlik .....                                     | 36 |
| 5.1.2. Eğilme mukavemeti .....                           | 37 |
| 5.1.3. İçyapı incelemeleri .....                         | 38 |
| 5.2. Balistik Test Sonuçları.....                        | 39 |
| 5.3. Tartışma ve Öneriler .....                          | 42 |
| KAYNAKÇA.....                                            | 44 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                           | 50 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                   |                                                                   |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo2.1.</b>  | Cam yüzeyine yapılan işlemlerin genel görünümü.....               | 16 |
| <b>Tablo2.2.</b>  | Isıl ve kimyasal temperlemenin karşılaştırılması.....             | 18 |
| <b>Tablo 3.1.</b> | Transparan zırh malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri... | 22 |
| <b>Tablo 5.1.</b> | Sertlik değerleri.....                                            | 36 |
| <b>Tablo 5.2.</b> | Eğilme mukavemeti değerleri.....                                  | 37 |
| <b>Tablo 5.3.</b> | Balistik test sonuçları.....                                      | 39 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                                              |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Mühendislik malzemeleri olarak malzemelerin sınıflandırılması.                                               | 2  |
| Şekil 2.2.  | Malzemelerin sınıflandırılması.....                                                                          | 3  |
| Şekil 2.3.  | Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki yoğunlukları.....                | 4  |
| Şekil 2.4.  | Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki elastik modülleri.....           | 5  |
| Şekil 2.5.  | Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki çekme mukavemetleri.....         | 5  |
| Şekil 2.6.  | Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki kırılma tokluğu değerleri.....   | 6  |
| Şekil 2.7.  | Dört adet oksijenle bağ yapan silis atomu. Mavi renkli atom Silis, kırmızı renkli atom oksijen atomudur..... | 7  |
| Şekil 2.8.  | Sıcaklığın cam oluşum entalpisi üzerine etkisi.....                                                          | 8  |
| Şekil 2.9.  | Silikat camındaki atomların yerleşmesinin temsili şekilde gösterilmesi.....                                  | 9  |
| Şekil 2.10. | Griffith'in kırılma için çatlak modeli.....                                                                  | 11 |
| Şekil 2.11. | Çatlak ucundan uzağa doğru gerilme dağılımı.....                                                             | 12 |
| Şekil 2.12. | Çekme mukavemetine karşılık gelen etkin çatlak derinliği .....                                               | 15 |
| Şekil 3.1.  | Lamine camlar ve polimerik ara katmanlarla oluşturulmuş geleneksel transparan zırh sistemi.....              | 19 |
| Şekil 3.2.  | İyon değişiminin görseli.....                                                                                | 23 |
| Şekil 3.3.  | Zamana göre ağırlık artışı.....                                                                              | 24 |
| Şekil 3.4.  | 72 saatlik iyon değişim işlemi sonrası potasyum penetrasyon derinliği.....                                   | 25 |
| Şekil 3.5.  | İyon değişimi sırasında difüzyon ve stres oluşumu için koordinat eksenleri.....                              | 25 |
| Şekil 3.6.  | Soda-kireç camında maksimum yüzey altı gerilimin varlığı.....                                                | 27 |
| Şekil 4.1   | Vickers sertlik deneyi.....                                                                                  | 29 |

|                   |                                                                                                                                                 |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.2.</b> | Dört nokta eğme test düzeneği.....                                                                                                              | 30 |
| <b>Şekil 4.3.</b> | (a) Balistik test düzeneği ve (b) şeması.....                                                                                                   | 33 |
| <b>Şekil 5.1</b>  | Sertlik-Zaman grafiği.....                                                                                                                      | 36 |
| <b>Şekil 5.2</b>  | Eğilme Mukevemeti-Zaman grafiği.....                                                                                                            | 37 |
| <b>Şekil 5.3.</b> | Cam kesitinden alınan EDX analizi.....                                                                                                          | 38 |
| <b>Şekil 5.4.</b> | (a) Kimyasal temper işlemine tabi tutulmuş ve (b) tutulmamış<br>numunelere ait çarpışma hızına karşılık gelen tam penetrasyon<br>olasılığı..... | 40 |



## GÖRESELLER DİZİNİ

|                    |                                                                                                                                                                       |    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Görsel 2.1.</b> | (a) Kumlama yapılmış ve (b) dağlanmış cam yüzeyinin SEM görüntüsü.....                                                                                                | 17 |
| <b>Görsel 4.1.</b> | İyon değişimi için kullanılan elektrikli fırın.....                                                                                                                   | 28 |
| <b>Görsel 4.2.</b> | (a) Lamine camların otoklava yerleştirilmesi ve (b) iç kısmının görüntüsü.....                                                                                        | 31 |
| <b>Görsel 4.3.</b> | Elde Elde edilen lamine camların a) önden ve b) yandan görüntüsü.....                                                                                                 | 32 |
| <b>Görsel 4.4.</b> | (a) Balistik test için imal edilen mesnet ve (b) numunenin sabitlenmesi.....                                                                                          | 34 |
| <b>Görsel 4.4.</b> | Mermi çekirdeği ve kovanının birleştirilmesi.....                                                                                                                     | 35 |
| <b>Görsel 5.1.</b> | Cam kesitinden alınan SEM görüntüsü.....                                                                                                                              | 38 |
| <b>Görsel 5.2</b>  | (a) Tam delinme ve (b) kısmi delinme görülmüş işlem yapılmamış numune. (c) Tam delinme ve (d) kısmi delinme görülmüş kimyasal iyon işlemine tabi tutulmuş numune..... | 41 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|           |                                           |
|-----------|-------------------------------------------|
| B         | :Cooper katsayısı                         |
| C         | :Konsantrasyon                            |
| D         | :Yayınım katsayısı                        |
| E         | :Elastik modülü (Pa)                      |
| EDX       | : Enerji saçılımlı X-ışını spektrometresi |
| F         | :Kuvvet (N)                               |
| HV        | : Vickers sertlik                         |
| K         | :Potasyum                                 |
| Na        | :Sodyum                                   |
| NIR       | :Kızılötesi yakını                        |
| P         | :Yük (kgf)                                |
| PC        | :Polikarbonat                             |
| PPM       | :Milyonda bir parça                       |
| PU        | :Poliüretan                               |
| PVB       | :Polivinil butiral                        |
| $r_0$     | :Atomlar arası uzaklık (nm)               |
| SEM       | :Taramalı elektron mikroskobu             |
| Si        | :Silisyum                                 |
| U         | :Statik çatlak enerjisi (J)               |
| $U_E$     | :Elastik enerji (J)                       |
| $U_S$     | :Yüzey enerjisi (J)                       |
| UV        | : Ultraviyole                             |
| V         | :Poisson oranı                            |
| Vis       | :Görünür ışık                             |
| $W_L$     | :Mekanik enerji (J)                       |
| $\gamma$  | : Kırılma yüzey enerjisi (J)              |
| $\lambda$ | :Dalga boyu (nm)                          |
| $\sigma$  | :Gerilim (Pa)                             |

## 1. GİRİŞ

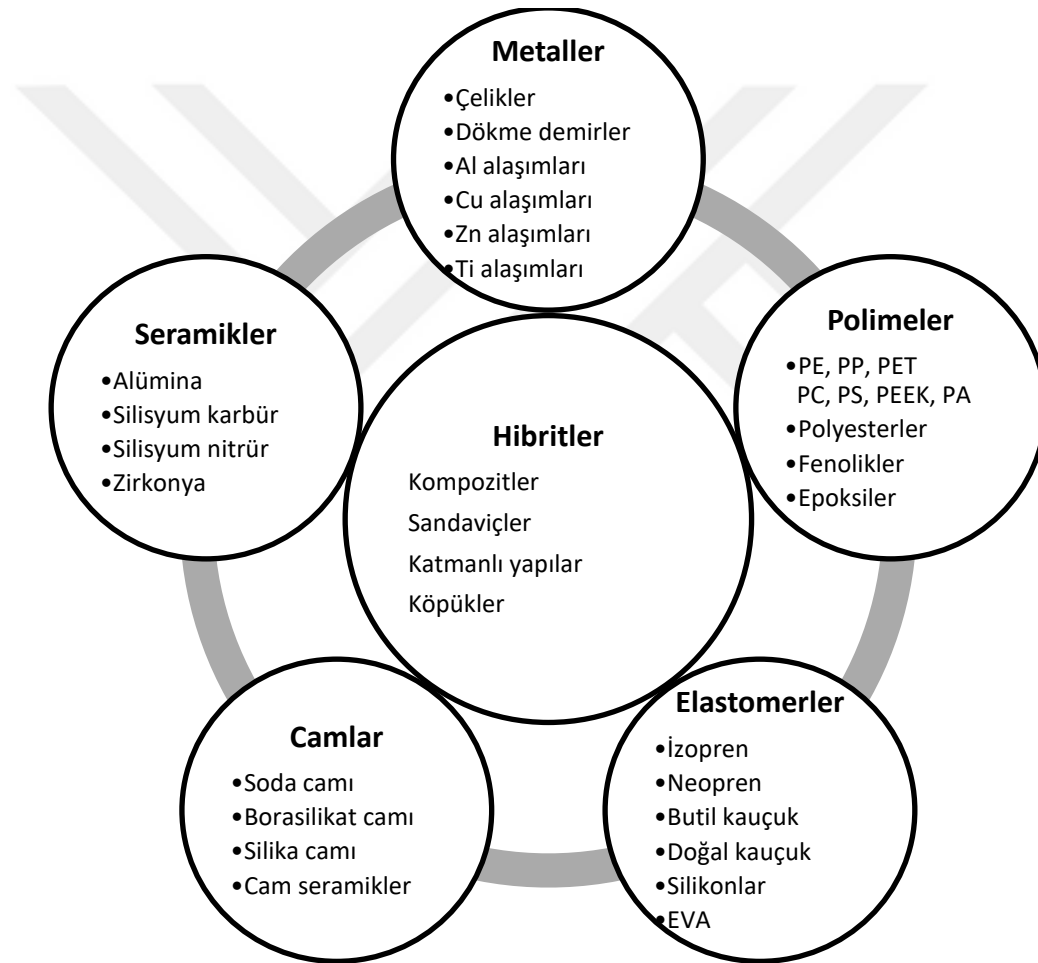
Savaşlar insanlığın başlangıcından beri var olmaktadır. İnsanoğlu, düşmanlarını alt edecek ve yenecek yeni yöntemler üzerinde sürekli çalışmıştır. Silahların tarih boyunca geliştirilmesine bağlı olarak koruyucu zırhlarda geliştirilmiştir. İlkçağlarda hayvan derileri kullanılırken orta çağlarda metal plakalar kullanılmıştır. Günümüzde ise sivil ve askeri platformda en yoğun tehdidi modern ateşli silahlardan çıkan kinetik enerjili mermiler oluşturmaktadır ve bunların yanı sıra tank gibi belirli bir hedefe yönelik olarak dizayn edilen ve çalışma prensibi kinetik enerjili mermilerinden oldukça farklı olabilen özel tipte mermilerden de bahsedilmektedir. Zamanımızın tehditlerine göre fiber takviyeli polimerler, seramikler ve yüksek mukavemetli tekstil ürünleri yoğun bir kullanım alanı bulmakla beraber üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir [1-3].

Kurşungeçirmez cam veya transparan zırh yakın tarihte daha fazla önem kazanmıştır. Transparan zırhın ilk kullanımı II. Dünya Savaşı sırasında uçaklarda lamine cam olarak pilotları korumak amacıyla kullanılmıştır. Daha sonraki zamanlarda ise zırhlı araçlar için kaçınılmaz bir yer edinmiştir. Son 10 yıllık süreçte zırhlı araçların koruma seviyeleri de sabit olarak artmaktadır. Günümüzde ise silahlı kuvvetler merkez üslerinden uzak bölgelerde zırh delici mühimmatlar ve yüksek güçte patlayıcıların kullanıldığı daha düşmanca topraklarda çarpışmaktadırlar. Bunun sonucu olarak balistik performansı sağlamak için daha kalın ve ağır transparan zırh kullanmaya itmiştir. Ne yazık ki araçlarda transparan zırhların kullanımı araçlar üzerine fazladan yük getirmekte ve hareket kabiliyeti ile beraber yük taşıma kapasitesini düşürmektedir[4, 5]. Bazı koruma seviyelerinde, standart zırhlı camlar zırh çeliklerinin alansal ağırlığının 4 katına kadar çıkmaktadır ve bu durum tasarım aşamasında bir sorun haline gelmiştir. Ağırlığın yanı sıra kalınlığın artması da ışık geçirgenliğinin düşmesi sebep olacağından optik özellik bakımından negatif bir etmen olmaktadır [6]. Artan talepler ve büyüyen marketle birlikte cam üreticileri değişen tehdit unsurlarını da göz önüne alarak daha etkili lamine cam tasarımları üzerine çalışmaya ve transparan seramikler gibi malzemelere yönelmeye itmiştir.[4, 6].

## 2. GENEL BAKIŞ

### 2.1. Malzemelerin Sınıflandırılması

Malzeme sınıfları birçok şekilde tanımlanmaya çalışılmıştır. Bir ayırım doğal ve doğal olmayan malzemeler şeklinde yapılmıştır. Bu ayırmda tahta, altın ve hatta bakır gibi doğal formunda element olarak bulunan madenler doğal sayılmış, bir takım işleme tabi tutulan çelikler gibi malzemeler ise insan yapımı malzeme sınıfına sokulmuştur [7]. Bir diğer sınıflandırma çeşidi ise mühendislik malzemeleri olarak Şekil 2.1’de gösterildiği üzere altı gruba ayrılmıştır.

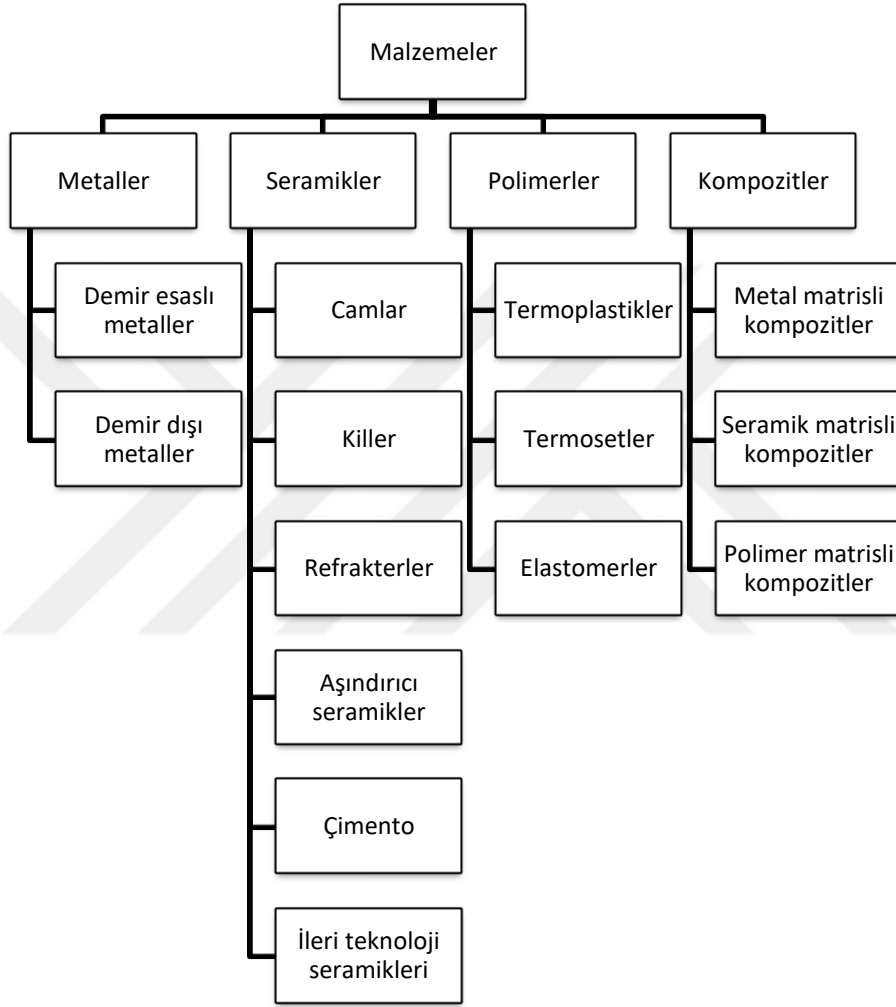


Şekil 2.1. Mühendislik malzemeleri olarak malzemelerin sınıflandırılması. [8]

Bu ayırımların yanında eski olmasına rağmen hala en yaygın kullanılan ve en geçerli sayılan; metaller, polimerler ve seramikler olmak üzere üç ana kategoride ayırım yapılmaktadır (Şekil 2.2). Bu ayırım öncelikli olarak kimyasal yapıtaş ve atomik



dizilime dayanmaktadır ve birçok malzemeyi kolaylıkla ayırmaktadır. Ayrıca her bir malzeme ailesinin kendine ait karakteristik özellikleri de bulunmaktadır. Bunlara ek olarak iki veya daha fazla malzemenin mühendislik kombinasyonu yapılarak kompozit malzemeler yine daha sonra bu gruba eklenmiş ve dört ana gruba incelenmesi daha uygun bulunmuştur [9].

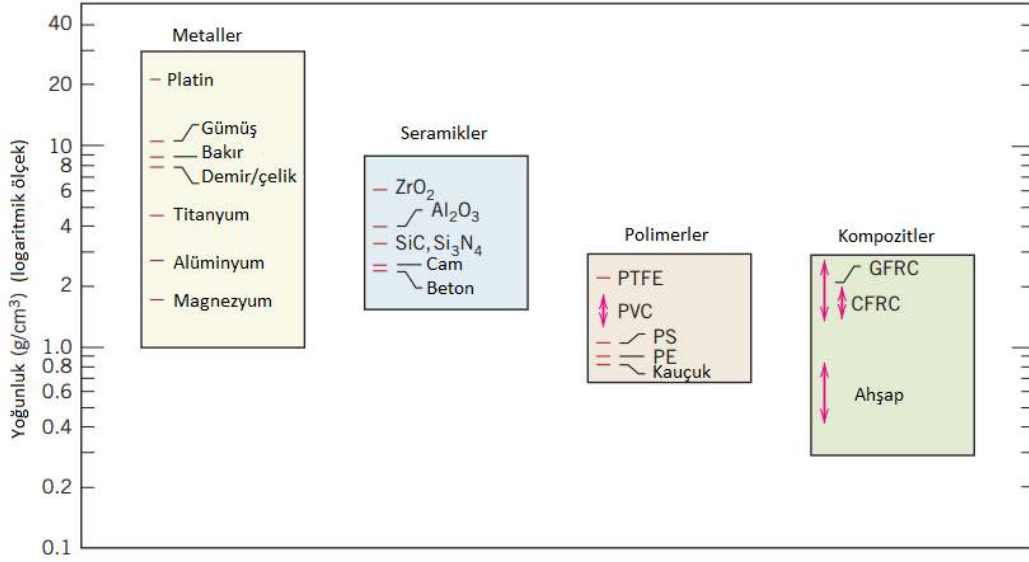


Şekil 2.2. Malzemelerin sınıflandırılması [9]

### 2.1.1. Metaller

Metaller, bir veya daha fazla metalik elementin (demir, alüminyum, bakır, titanyum, altın, nikel vb.) ve sıklıkla metal olmayan elementlerin (karbon, azot, oksijen vb.) çok az miktarlarda karışmasıyla elde edilen malzemelerdir. Metalleri ve alaşımlarını oluşturan atom dizilimleri seramikler ve polimerlere kıyasla çok daha düzenli yapıda olduğu için Şekil 2.3’de gösterildiği üzere yoğunlukları göreceli olarak daha fazladır [9]. Metallerin deformasyona olan dirençleri göreceli olarak yüksektir.

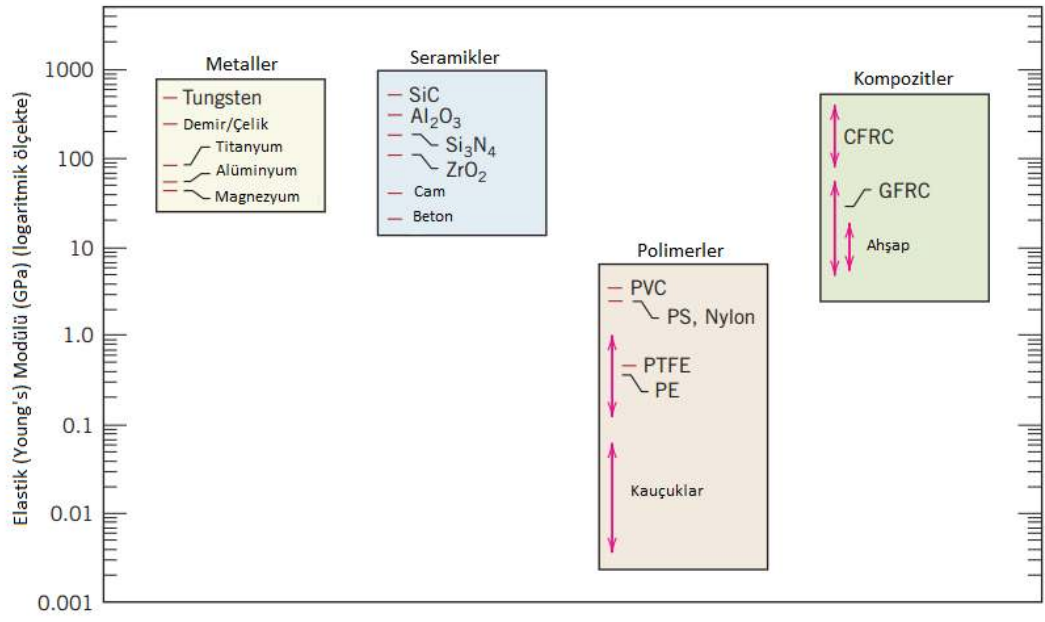
Saf hallerinde yumuşak ve kolayca deforme olurken alaşım halinde ve mekanik ve ısıl işlemler ile sertlik mukavemet kazancı sağlanmaktadır. Genel olarak yüksek toklukları sayesinde kırılmaya karşı dirençlidirler. İyi elektrik ve ısı iletkenlikleri vardır fakat birçoğunun korozyona karşı dirençleri çok azdır [8].



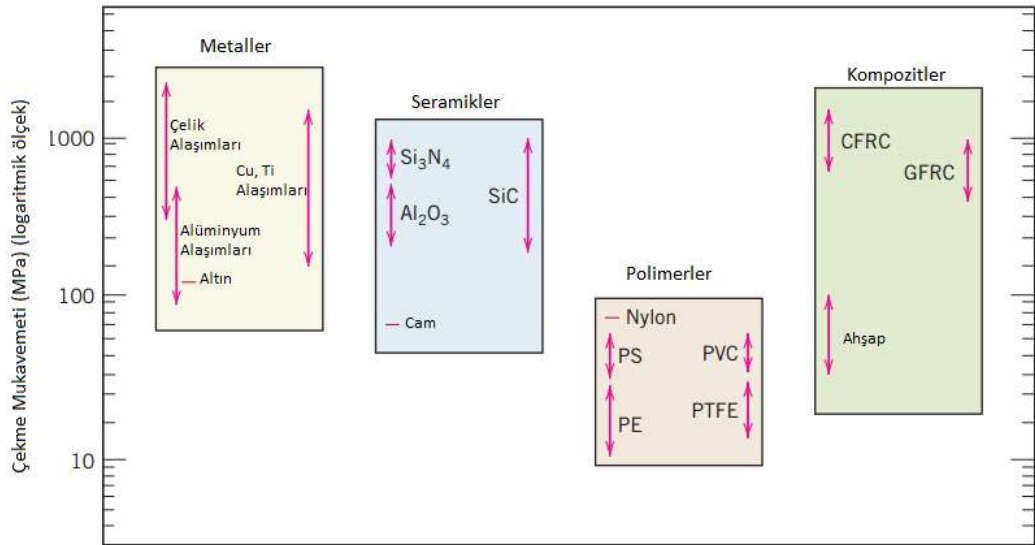
Şekil 2.3. Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki yoğunlukları [9]

### 2.1.2. Seramikler

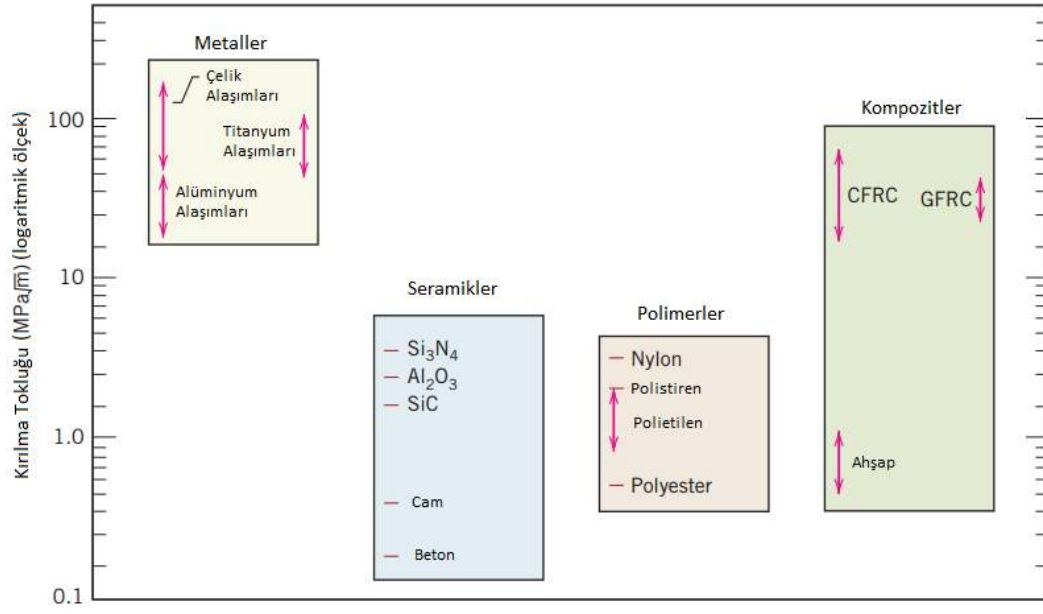
Seramikler, metal ve ametal elementlerin bileşik kurmasıyla ortaya çıkan malzemelerdir. En yaygın olanları; oksitler, nitrürler ve karbürlerdir. Alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silika (SiO<sub>2</sub>), silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) iyi birer örnektir. Karışım olan kil minerali (porselen vb.) ise geleneksel seramik olarak bilinmekte ve ayrıca çimento ve camlar da seramik malzemeler içinde yer almaktadır. Mekanik özellikleri bakımından seramik malzemelerin elastik modülleri ve çekme mukavemetleri Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de gösterildiği üzere metallerle kıyaslanabilecek ölçüdedir. Seramikler genel olarak çok sert ve esneklik özelliklerinin olmamasından dolayı Şekil 2.6’da gösterildiği üzere kırılma toklukları diğer malzemelere göre daha zayıftır [9].



Şekil 2.4. Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki elastik modülleri [9]



Şekil 2.5. Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki çekme mukavemetleri [9]



Şekil 2.6. Çeşitli metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki kırılma tokluğu değerleri [9]

### 2.1.3. Polimerler

Polimer malzemeler karbon (birkaç çeşidi silikon) atomunun uzun zincirler şeklinde dizilmesi sonucu ortaya çıkan organik esaslı malzemelerdir. Polimerler malzemeler metallere ve seramiklere göre çok düşük yoğunluk ve kabaca söylemek gerekirse 50 kat daha az bir elastik modüle sahiptir. Düşük yoğunluklarından dolayı birim kütleye düşen çekme mukavemetleri kıyaslandığı zaman metal ve seramikler ile kıyaslanabilecek ölçüdedir. Çok sünek ve plastik yapıda olmaları kompleks şekillerde üretilmelerini kolaylıkla sağlamaktadır. Genel olarak kimyasal olarak pasif ve çevresel etkilerden etkilenmezler fakat sıcaklıkla birlikte yumuşamaya veya bozunmaya başlamaları dezavantajlarıdır [8,9].

### 2.1.4. Kompozitler

Kompozitler iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilerek oluşturulduğu malzemelerdir. Kompozit malzeme tasarımının ana amacı tek bir malzemenin özelliğini kendi başına gösteremediği özellikleri ortak birden fazla malzeme kullanarak bu malzemelerin özellik kombinasyonunu kullanmaktır [9]. Birçok kompozit malzeme diğer malzemeyi kaplayan ve sürekli olan matris fazı ve takviye fazından oluşmaktadır. Matris malzemesine göre polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler olarak

sınıflandırılabileceği gibi ayrıca takviye malzemesine göre parça takviyeli, fiber takviyeli, yapısal kompozitler olarak da sınıflandırılır [8].

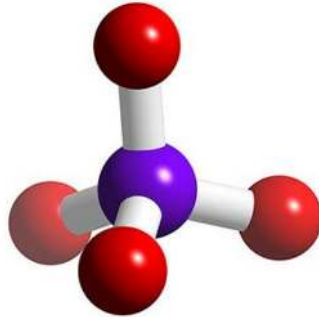
## 2.2. Camlar

Cam, camsı geçiş özelliği gösterip kristal yapıda olmayan katı malzemeler için tanımlanır. Geleneksel cam ise kimyasal bakımdan inorganik oksitlerin birleşiminden oluşmaktadır. Bu bileşimlere tuzlar, organik malzemeler ve metaller de ilave edilebilir. Camın yapısı ise genellikle rastgele biçimde ağ kurmuş ve düzenli yapılardan noksan olarak tasvir edilir. Silikon ve oksijen atomları tetrahedra oluşturacak şekilde bağlanırlar yani Si atomu 4 adet oksijen atomu ile bağ kurar (Şekil 2.7). Her oksijen ise iki tetrahedral yapı arasında yer alır. Camın önemli özellikleri binlerce yıldır neden camı en etkileyici malzemelerden biri yaptığını açıkça ortaya koymaktadır [10,11].

- Transparanlık
- Sertlik
- Kimyasal dayanım
- Şekil koruyabilme yeteneği
- Kolay şekillendirilmesi
- Maliyet

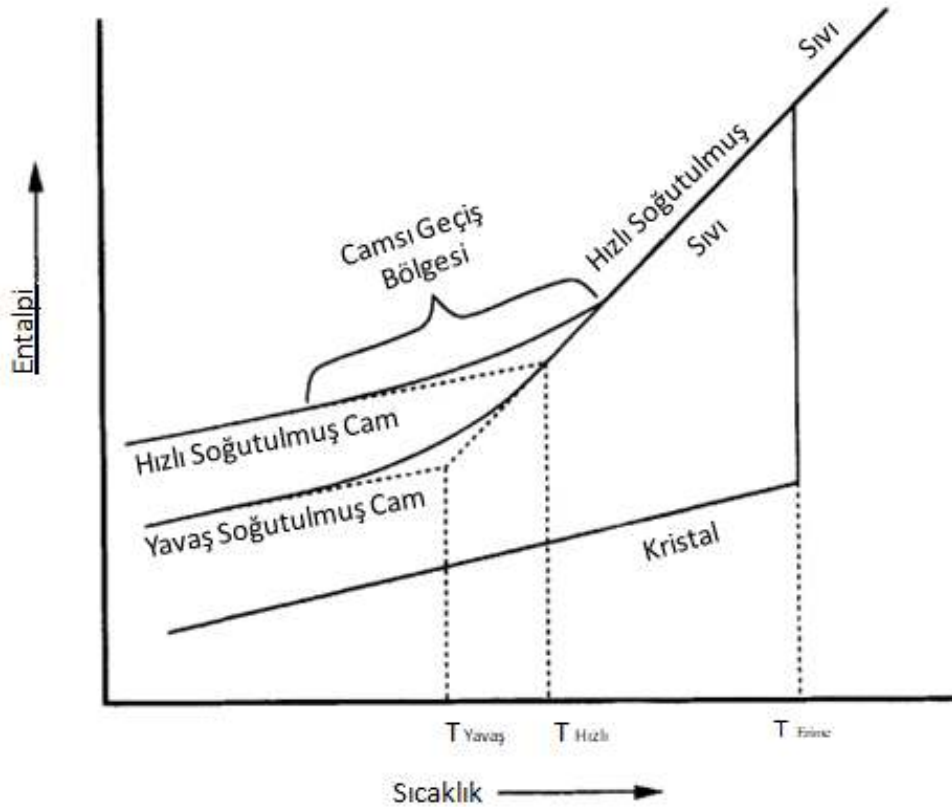
### 2.2.1. Cam yapısı ve oluşumu

Yapıyı oluşturan oksitler temelde üç grupta toplanır. Bunlar, cam iskeletini oluşturan oksitler ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), modifiye edici oksitler ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ), şartlı cam yapıcı oksitler ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) olarak sıralanabilir [11].



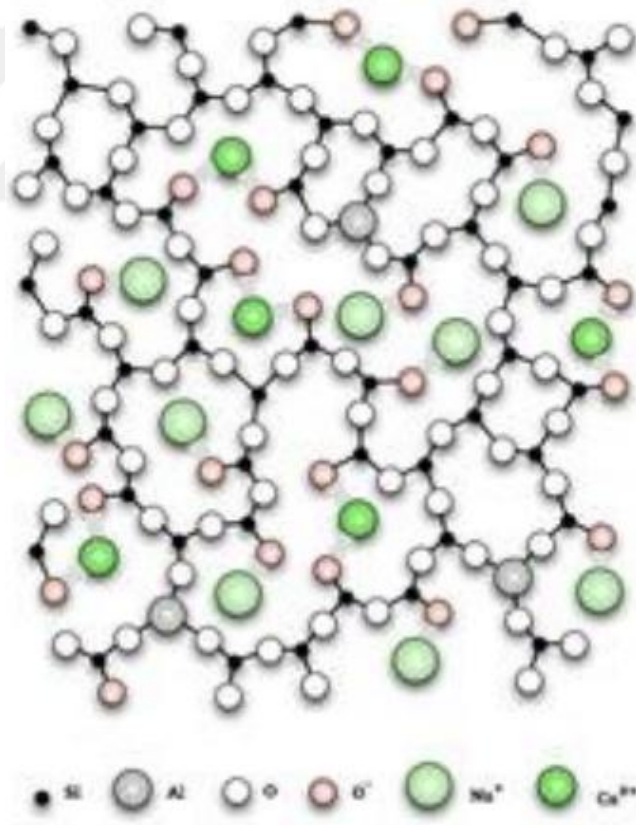
**Şekil 2.7.** Dört adet oksijenle bağ yapan silis atomu. Mavi renkli atom Silis, kırmızı renkli atom oksijen atomudur [11]

Cam denge dışında bir yapıya sahiptir ve bir sıvının bir şekilde erime sıcaklığının altına kristalleşme yaşanmayacak şekilde aniden geçilmesiyle gerçekleşir. Son sıcaklık, atom veya molekülerin hareket edip daha stabil kristal yapı oluşturamayacak kadar yeterince düşük olmalıdır [12]. Bu geçiş ise malzemenin camsı geçiş sıcaklığı ile sağlanmaktadır. Geleneksel olarak camsı geçiş davranışı Şekil 2.8’de gösterildiği gibi entalpi veya hacim değişimine karşılık sıcaklık olarak gösterilmektedir. Sıcaklığın erime sıcaklığı altına düşmeye başlamasıyla camın vizkozitesi de artmaya başlayacaktır. Vizkozitedeki bu artış artık bir noktadan sonra o kadar büyük olur ki atomlar verilen zaman içerisinde bir araya gelip denge yapısını tamamlayamazlar. Bu bölgeye camsı geçiş sıcaklığı denir ve grafikte eğimli olarak gösterilen bölgedir. Bu yüzden hızlı soğutulmuş malzemenin entalpisi ve hacmi yavaş soğutulmuş camdan daha fazladır. Malzemeye kristal yapı oluşturacak şekilde soğutma yapılır ise entalpi kristal yapıya uyacak şekilde düşüş gösterecektir ve soğutulmaya devam edilir ise kristalin ısı kapasitesine bağlı olarak entalpi düşüşü gözlenmeye devam edecektir [13].



Şekil 2.8. Sıcaklığın cam oluşum entalpisi üzerine etkisi [13]

Silikat camların karakteristik yapısı tetrahedral şeklindeki bağlanmalara sahip olmasıdır. Si-O bağlanmasındaki mesafe yaklaşık 1,62Å'dur . Önceden bahsedildiği üzere kısa mesafeli ve düzensiz yapısı vardır. Saf kuvars camı yapısındaki kovalent bağlanma nedeni ile yüksek sıcaklıklarda erir. Erime sıcaklığını düşürmek için yapıya modifiye edici malzemeler (sodyum, potasyum, kalsiyum, vb.) katılır. Amaç katyonların yapıyı parçalayarak SiO<sub>2</sub> bağlarının arasına girmesi ve erime için gereken enerjiyi düşürmeleridir. Şekil 2.9'da ilave katyonların yapıyı nasıl parçaladığı temsili olarak gösterilmektedir. Oksinitrür camların yapıları hakkındaki ilk düşünceler, silikat camlarının aynı kompozisyona sahip olan malzemelerin çok küçük (7 – 20 Å) kristalcikleriyle aynı yapıda olduğu yönündeydi. Fakat bu düşünce Zachariasen ve Warren tarafından türetilen “düzensiz ağ modeli” ile çürütüldü. Silikat camlarda Si<sup>+4</sup> haricindeki tetrahedra oluşturan katyonlar ağ düzenleyici olarak da düşünülebilirler [11].



**Şekil 2.9.** Silikat camındaki atomların yerleşmesinin temsili şekilde gösterilmesi. Yeşil atomlar kalsiyum, beyaz atomlar oksijen, pembe atomlar tek bağ yapan oksijenler, gri atomlar alüminyum, siyah atomlar silis atomunu olarak gösterilmiştir [11]

### 2.2.2. Camların mekanik özellikleri

Camın gerçekteki mukavemeti teorik mukavemetinin çok altındadır. Bir malzemenin teorik mukavemeti yükün maksimum restoratif kuvveti yenmesiyle tahmin edilebilir. Atomlar arası uzaklık maksimum restoratif kuvveti aştığı zaman yükün uygulanmaya devam etmesiyle bağlar arası uzaklık bağı kırana kadar devam edecek ve malzeme üzerinde çatlak ilerlemeye başlayacaktır. Orowan'ın önerisine göre bağı kırmak için gerekli olan yük iki adet yeni yüzey oluşturmak için gerekli olan enerji ile bulunabilir. Orowan stresi  $\sigma_m$  Denklem 2.1'de gösterildiği gibidir [13].

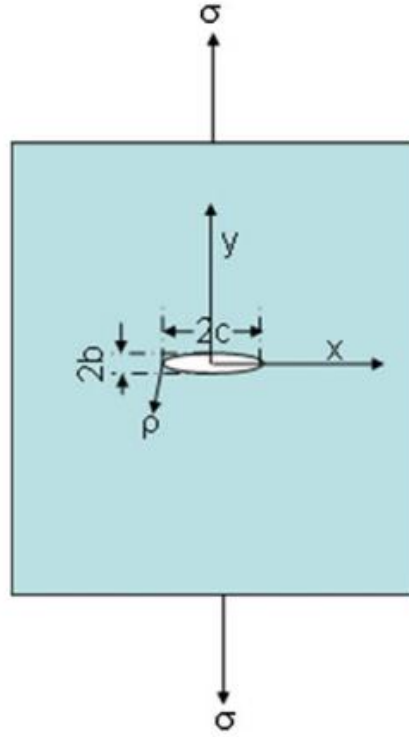
$$\sigma_m = \sqrt{\frac{E\gamma}{r_0}} \quad (2.1)$$

Denklemde  $\gamma$ , 2 ila 4 J m<sup>-2</sup> aralığında olan kırılma yüzey enerjisidir. Değerleri E=70 GP,  $\gamma= 3 \text{ J m}^{-2}$  ve  $r_0=0.2 \text{ nm}$  olarak yerine koyarsak tipik bir silika camının teorik mukavemetini 32 GP olarak bulunur [13].

Denklem 2.1'de bulunan değerler camın gerçekteki uygulamalarından çok daha yüksektir. Bu düşüş camın yüzeyinde bulunan çatlaklardan meydana gelmektedir. Bu çatlaklar stres konsantrasyonu olarak davranır, bölgesel stres konsantrasyonundaki artış teorik mukavemet değerini geçmesine olanak sağlar ve camda kırılma gerçekleşir. Bu problem için Griffith başka bir denklem üretmiştir [13]. Griffith'in kırılma yaklaşımı enerji denge teorisi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.10'da çatlak merkezde gösterilmiştir fakat çatlak malzemenin yanlarında yarım çatlak olarak da bulunabilir.

Griffith'in teorisinde camın içerisinde gerilme içeren küçük oluk şeklinde düz çatlaklar olduğu kabul edilmiştir. Çatlak oluşumu gerilme-enerji salınımı ile ilgilidir. Griffith, bu problem için bulduğu çözüm aşağıdaki gösterildiği gibi türetilmiştir.





**Şekil 2.10.** Griffith'in kırılma için çatlak modeli, merkezdeki düz eliptik model çatlakı temsil etmektedir [14]

İnglis tanımına göre çatlak, uygulanan  $\sigma_a$  gerilimini x eksenini boyunca elipsin sonunda büyütülmüş olarak kabul eder. Bu konfigürasyon içindeki elipsin tanımı Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

$$\frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2.2)$$

Eğriliğin yarıçapı  $\rho$  aşağıdaki gibidir

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

Çatlak ucundaki gerilme konsantrasyonu, c yarım ana eksen ve b yarım ikincil eksen aşağıdaki şekilde verilir.

$$\sigma_{\max}(c, 0) = \sigma_a \left(1 + \frac{2c}{b}\right) = \sigma_a \left(1 + 2 \left(\frac{c}{\rho}\right)^{1/2}\right) \quad (2.4)$$

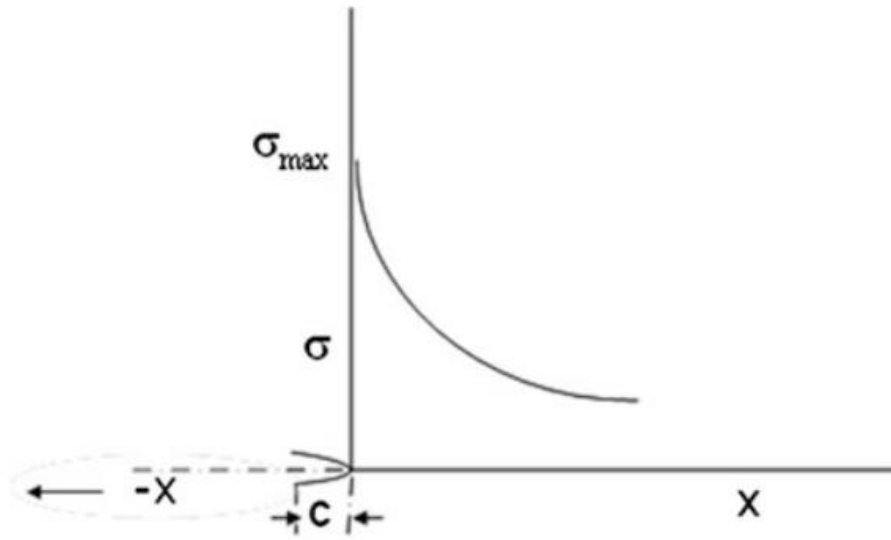
Denklem 2.4'deki son terim, Denklem 2.3'de b nin yerine koyma sonucudur. Çentik olarak düşünüldüğünde  $b \ll c$  olacaktır ve Denklem 2.4 yeniden düzenlendiğinde,

$$\frac{\sigma_{\max}(c, 0)}{\sigma_a} \approx \frac{2c}{b} = 2 \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Dairesel delikler için  $b=c$  olacağından, Denklem 2.4 çekildiğinde,

$$\frac{\sigma_{\max}(c, 0)}{\sigma_a} \approx 3 \quad (2.6)$$

X boyunca gerilme dağılımı Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.11.** Çatlak ucundan uzağa doğru gerilme dağılımı [14]

Statik çatlak enerji sistemi için toplam enerji üç terimin toplamıdır.

$$U = (-W_L + U_E) + U_S \quad (2.7)$$

Burada  $U_E$  elastik enerjiyi,  $U_S$  yüzey enerjisini ve  $W_L$  ise mekanik enerjiyi veya diğer bir tabirle uygulanan yük tarafından yapılan işi tanımlamaktadır. Gerilme

enerjisindeki düşüş çatlak oluşumu ile sonuçlanacaktır. Bu sebepten termodinamik eşitlik:

$$dU/dc = 0 \quad (2.8)$$

Sabit yük uygulanan cismin çatlak oluşumu sırasındaki mekanik enerjisi:

$$W_L = 2U_E \quad (2.9)$$

Keskin çatlak etrafındaki gerilme ve gerinme için Inglis 'in çözümü:

$$U_E = \pi c^2 \frac{\sigma_L^2}{E} \quad (\text{İnce levhalar için gerilme}) \quad (2.10)$$

Kalın levhalar için aşağıdaki şekilde düzeltilebilir.

$$U_E = \pi(1 - \nu^2)c^2 \frac{\sigma_L^2}{E} \quad (\text{Kalın levhalar için gerilme}) \quad (2.11)$$

Levha üzerindeki çatlağın yüzey enerjisi:

$$U_S = 4c\gamma \quad (2.12)$$

$\gamma$ , çatlağın birim alana düşen yüzey enerjisidir. Denklem 2.12'de ilişki çatlağın birim enine düşecek şekilde ilişkilendirilmiştir. Plaka gerilmesindeki toplam enerji denklem 2.10 ve 2.11 toplamı olacak şekildedir.

$$U = -\pi c^2 \frac{\sigma_L^2}{E} + 4c\gamma \quad (2.13)$$

Eksi işareti, çatlak büyümesi sonucu ortaya çıkan gerilme enerjinin salınmasından dolayıdır. Çekme gerilmesi çatlak yüzeyine dik etki etmektedir. Griffith kavramındaki denge koşullarını kullanarak sabit yük altındaki plaka koşulları şu şekilde ifade edilir:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c}} \quad (2.14)$$

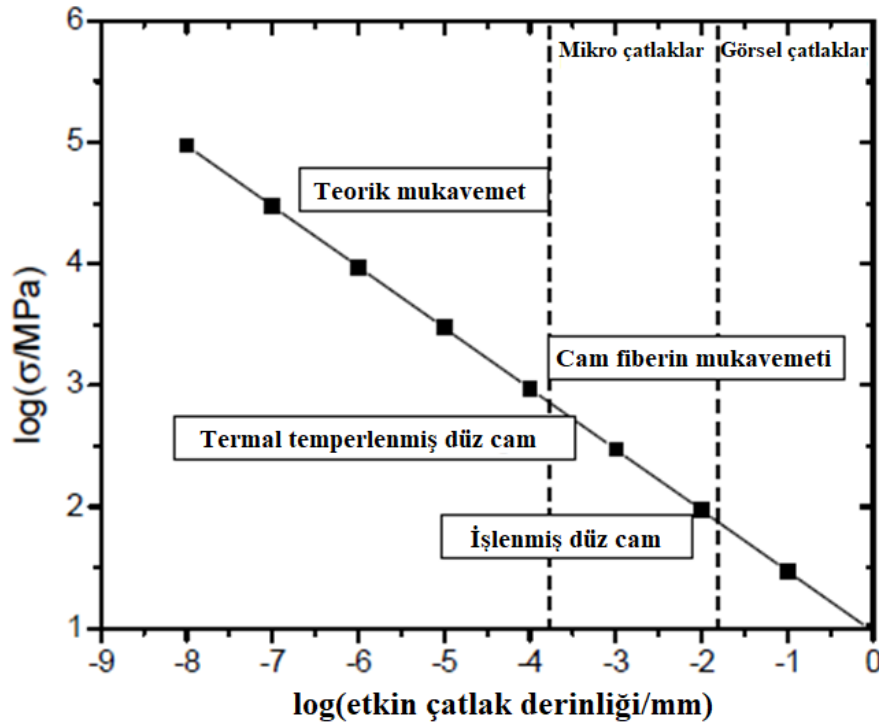
Sabit yük ve plaka gerinmesi koşulları altında:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{2\gamma E}{(1 - \nu^2)\pi c}} \quad (2.15)$$

Büyük bir darbenin dışında Griffith teorisi cam gibi gevrek malzemeler üzerinde tamamen kırılma davranışı açıklayabilmektedir. Griffith çatlakları, çatlak uçlarına atomik boyutta yaklaşırken tipik olarak eğriliklere sahiptir, Orawan ise herhangi bir uygulanacak gerilmenin Griffith kriterine göre malzemenin teorik mukavemetini geçeceğini tartışmaktadır, bu yüzden Griffith kriteri kırılma olması için kullanışlı ve yeterlidir. Metal gibi sünek malzemelerin kırılma davranışı tamamen farklı mekanizmalar içerdiği için bu malzemelerin kırılma davranışı için genişletilemez [13,14].

### 2.2.3. Camların mekanik özelliklerini geliştirme yöntemleri

Saf silika camı, silika içeren cam çeşitleri içerisinde en güçlü cam olduğu söylenebilir. Cam bileşimi içerisindeki sodyum miktarının cam mukavemetini olumsuz yönde etkilediği daha öncelerde belirtilmiştir. Ayrıca ortam sıcaklığı gibi etmenler de camın mukavemeti üzerine etkilidir [15]. Özellikle yüzey hataları diğer hatalara göre malzemenin mukavemetini kısıtlamaktadır. Örneğin bir numunenin mukavemeti 100 MPa civarında ve standart sapması ise ~20MPa ise yüzeydeki çatlaklar 1-10 µm aralığında bulunmaktadır [16]. Şekil 2.12’de etkili çatlak derinliğine karşılık gelen çekme mukavemeti grafiği verilmiştir.



Şekil 2.12. Çekme mukavemetine karşılık gelen etkin çatlak derinliği (Young modülü (E) 70 GPa ve yüzey enerjisi (γ) 2 J/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır) [17]

Camların mekanik özellikleri geliştirmek için bir takım metotlar mevcuttur. Bu metotlar yüzey ve gövde özellikleri olarak iki ana kısma ayrılır. Yüzey metotları genellikle yüzeyde oluşan deformasyonlara karşı hassasiyetin artırılmasıyla camın mukavemetini artırmaya dayanmaktadır. Gövde metotları ise malzeme kompozisyonundaki değişiklikler ve diğer seramik malzemelerde olduğu gibi fiber veya parçacık takviyesi ile artırılmasına dayanmaktadır. Cam seramikler ve lamine camlar gövde özellikleri ile camların mekanik özelliklerin iyileştirilmesine iyi birer örnektir. Cam mukavimleştirme koşulları aşağıdaki üç ana kategori başlığında sağlanabilmektedir [18].

- Süreç içerisinde yüzeyde hata oluşumunun önlenmesi
- Süreç içerisinde daha önce oluşan yüzey hatalarının giderilmesi
- Yüzey hatası içerse bile camın mukavemetinin artırılması

Cam yüzeyinde yapılan işlemler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir [19].

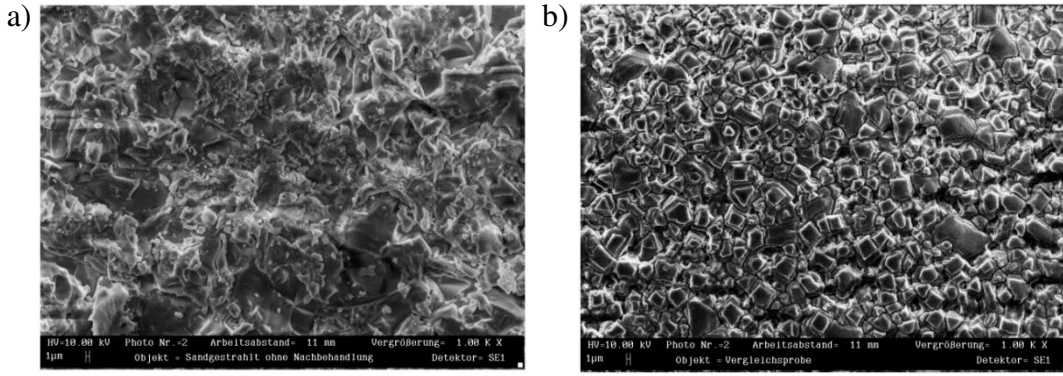
- Orijinal yüzeyden malzeme kaldırarak yeni bir yüzey oluşturmak,
- Orijinal yüzeye yeni bir malzeme ekleyerek yeni bir yüzey elde etmek,
- Yeni bir yüzey elde etmek yerine yüzeyde modifikasyon yapmak.

Bu metotlar Tablo 2.1’de detaylı olarak verilmiştir

**Tablo2.1.** Cam yüzeyine yapılan işlemlerin genel görünümü [19]

| <b>Yüzeyden malzeme kaldırma</b>                                  | <b>Yüzeyde modifikasyon Yapma</b>           | <b>Yüzeye malzeme Eklemek</b>                                                            |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mekanik;</b><br>-Rodajlama<br>-Polisaj<br>-Kumlama<br>-Su jeti | <b>Difüzyon;</b><br>-Kimyasal iyon değişimi | <b>Plazmadan;</b><br>-İyon<br>-PECVD                                                     |
| <b>Kimyasal;</b><br>-Dağlama                                      |                                             | <b>Gaz fazından;</b><br>-PVD<br>-CVP<br>-Sputtering                                      |
| <b>Termal;</b><br>-Alevle polisaj                                 |                                             | <b>Katı/Sıvı fazından;</b><br>-Boya<br>-Seramik kaplama<br>-Sol-Gel<br>-Au/Pt/Ag kaplama |
| <b>Diğer;</b><br>-Lazer                                           |                                             |                                                                                          |

Mekanik olarak işleme süreci cam yüzeyinden küçük parçalar aşındırılmak suretiyle kaldırılmaktadır. Geleneksel yöntem olarak rodajlama, kumlama ve polisaj teknikleri kullanılır. Mekanik olarak işlenmiş yüzeyler genellikle pürüzlü bir yüzey yaratır fakat bu yüzeyler optik olarak kullanılabilecek noktaya kadar kontrol edilerek azaltılabilmektedir. Eğer son ürün olarak elde edilecek camın toleransları optik parçalar vb. ürünler gibi çok düşük ise aşındırma yöntemi uygulanması kesinlikle gereklilik haline gelmektedir. Kumlama da mekanik iyileşme beklenmeden yüzey pürüzlülüğünü artırmak için kullanılmaktadır. Dezavantajı ise yüzeyde çatlaklar oluşturarak camın mukavemetini düşürmesidir [19]. Alevle polisaj ve dağlama da sıkça kullanılan yöntemlerdendir fakat mukavemete artırımında yalnızca geçici bir süre etkilidir. Kumlama ve dağlama arasındaki yüzey pürüzlülüğü farkı Görsel 2.1’de açıkça görülmektedir. Cam kenarlarının CO<sub>2</sub> lazeri ışınlarına maruz bırakılması, geleneksel yöntemlerden olan polisaj yapılmasının aksine eğilme mukavemetinin ve kırılma tokluğunun daha yüksek olduğu bulunmuştur. Yüzeyi kaplama metodu da daha önce oluşan yüzey hatalarının giderilmesi ve süreç içerisinde yüzeyde oluşabilecek hataların önlenmesinde etkili bir yöntemdir [20].



**Görsel 2.1.** (a) Kumlama yapılmış ve (b) dağlanmış cam yüzeyinin SEM görüntüsü [19]

Yüzey basma gerilimini artırarak süreç içerisinde daha önce oluşan hataların giderilmesinde ve yüzeyde çatlak oluşumunun başlamasını zorlaştıracaktır. Yüzey basma gerilimi ısı temperleme, kimyasal iyon değişimi, camsı sırlama veya düşük termal gerilime sahip malzeme ile kaplamayla elde edilebilir. Isıl temperleme ve yüzeyi düşük termal gerilime sahip malzeme ile kaplamak diğer metotlara göre daha kalın bir basma gerilimi tabakası yaratır [20].

Isıl temperleme sürecinde camın erime noktasına kadar ısıtılması ve ardından soğutulması safhasında yüzeyin iç kısımlardan daha hızlı soğutulması sonucu daha önce küçülmesi sağlanır. Sıcak camda yüzeyde yaratılan bu çekme gerilmesi orta kısmın soğuyup küçülmesiyle beraber yerini basma gerilmesine bırakacaktır. Oluşan gerilmenin değeri camın kalınlığı ve soğutma oranıyla doğrudan ilişkilidir. Isıl temperleme aynı zamanda kırılma esnasında absorbe edilen enerji miktarına da artırmaktadır [21].

Isıl temperlenmiş cam kırıldığı zaman küçük parçalara ayrıldığı, keskin ve sivri bir kenar barındırmadığı için ayrıca güvenlik camı olarak da bilinmektedir. Isıl mukavemetleştirmede iç kısımdaki çekme gerilmesi bu olayı oluşturacak kadar gerinme enerjisine sahiptir. Kırılma oluştuğunda malzeme içindeki gerinme enerjisi birçok yeni yüzey oluşturmaya yetecek kadardır. Geri kalan enerji ise kırılma sırasında oluşan ses, ısı ve paraların sıçramasına harcanır. Mukavemet, merkezdeki çekme gerilmesiyle lineer olarak artarken kırılma kuvveti şeklinde artmaktadır [22]. Mukavimleştirmenin birçok derecesi vardır. Tipik olarak ısıl temperleme yöntemiyle mukavemet kazandırılmış bir camın içerisindeki çekme gerilmesi 40-50 MPa ve kabuk kısmındaki basma gerilmesi yaklaşık olarak 100 MPa civarındadır. Camın ısıl olarak temperlenebilmesi için bir sınırlama bulunmaktadır. Bu sınırlama genellikle 3 mm

incelik olarak alınsa da geçmiş çalışmalar 2 mm kalınlığındaki camı bile ısı temperleme yöntemiyle mukavim hale getirilebileceğini göstermiştir. Diğer bir sınırlama ise geometrik boyutlardan ve camın yüksek genleşme katsayısından kaynaklanan ulaşılabilecek maksimum soğutma oranıdır [23].

Isıl temperleme yöntemi uygulama kolaylığı ve üretim maliyetleri açısından kimyasal temperlemeye (kimyasal iyon değişimi) göre daha fazla tercih edilmektedir fakat ısı temperleme her uygulama için uygun değildir. Bu iki mukavemet kazandırma yöntemi Tablo 2.2’de detaylı olarak karşılaştırılmıştır [15]. Kimyasal iyon değişim işlemine Bölüm 3.2’de detaylı olarak yer verilmiştir.

**Tablo2.2.** Isıl ve kimyasal temperlemenin karşılaştırılması [15]

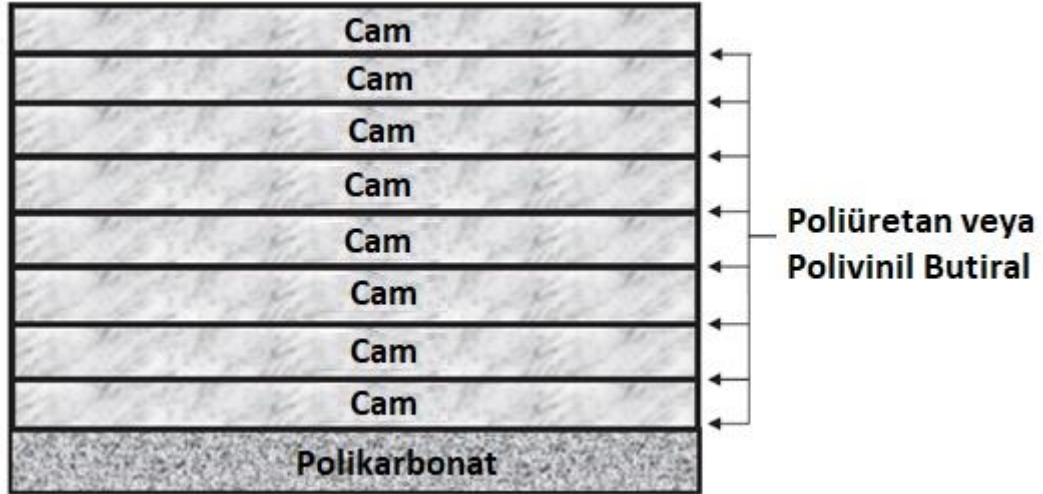
|                                       | <b>Isıl Temperleme</b>                                            | <b>Kimyasal Temperleme</b>                           |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Maksimum mukavemet                    | 350-400 MPa                                                       | 700-1000 MPa                                         |
| Gerilim dağılım profili               | Parabolik                                                         | Yassı, daha çok kare                                 |
| İşlenebilirlik                        | Kesme, delme yapılamaz                                            | İç gerilmeye bağlı olarak kesme ve delme yapılabilir |
| Maliyet                               | Düşük                                                             | Pahalı                                               |
| Cam ısı genleşmesi                    | Yüksek değer gerekli                                              | Önemli değil                                         |
| Optik bozulma                         | Isıtma ve soğutma işlemi bozulma olmaması için dikkatli yapılmalı | Bozulma yok                                          |
| Spontane kırılma                      | Evet                                                              | Hayır                                                |
| İşlem süresi                          | Kısa zaman (dakika)                                               | Uzun zaman (saatler)                                 |
| Malzeme kalınlığı                     | Minimum 3mm                                                       | 0.5-15 mm                                            |
| Malzeme şekli                         | Bütün yüzeylere uygulanamaz                                       | Sıra dışı şekiller için uygun                        |
| Cam kompozisyonu                      | Çoğu cam için uygulanabilir                                       | Özel kompozisyon gerekli                             |
| Aşınmış malzemelere uygulanabilirliği | Hayır                                                             | Evet                                                 |



### 3. LİTERATÜR

#### 3.1. Transparan Zırh Sistemleri

Geleneksel transparan zırh sistemleri soda-kireç camının polimerik katmanlar yardımıyla yapıştırılıp lamine edilmesiyle elde edilir. Transparan lamine camlarda zırh 3 ana malzeme sınıfından oluşur. Gelen mermiyi aşındırmak, kırmak ve yavaşlatmak için cam. Camın sağladığı sertlik aynı zamanda kum, toz ve sileceğin çalışmasından kaynaklanan dış etmenlerin çizme ve aşındırma etkilerine karşı da koruma sağlamaktadır. Arta kalan parçaları tutmak için polikarbonat; malzemeleri transparan olarak bir araya getirmek için ara katman. Geleneksel transparan kurşun geçirmez camlar Şekil 3.1’de gösterildiği üzere monolitik cam üzerine poliüretan (PU) ve polivinil butiral (PVB) kullanarak elastomer benzeri polikarbonat (PC) ın lamine edilmesi ile üretilir [24, 25].



**Şekil 3.1.** Lamine camlar ve polimerik ara katmanlarla oluşturulmuş geleneksel transparan zırh sistemi [24]

Balistik koruma alanında yapıştırıcı olarak kullanılan malzemelerin ana görevi darbe gelmeden ve geldikten sonra camın homojenitesini korumak, delinme ve deformasyon sırasında ise şokları absorbe etmektir. Bu yüzden yapıştırıcının ne çok kuvvetli ne de çok zayıf olması beklenmektedir. Yapıştırıcılar aynı zamanda ışığı geçirmeli veya çok az bir miktarını absorbe etmelidir. Sensor ve gece görüş kameralarını da düşünecek olursa görünür ışık tayfına yakın dalga boylarını da aynı şekilde geçirilmesi beklenmektedir [26].

### 3.1.1. Transparan zırh sistemi tasarımında kriterler

Camın göreceli olarak yüksek yoğunluğa sahip olmasından dolayı bu sistemlerde, tek ve çoklu isabet penetrasyon direnci lamine kalınlığıyla elde edilir. Bu çözüm genellikle pratik olmamakla birlikte araç ağırlığının artmasına, kabin içi alanın azalmasına, optik bozulmaların artmasına ve transparanlık görüşün düşmesine sebebiyet vermektedir [24].

Kara araçları koruma uygulamalarında önemli fonksiyonel gereklilik olarak [24]:

- Tekli ve çoklu atış balistik direnci;
- Optik berraklık/transparanlık için bozulmamış ve dayanıklı yüzeyler;
- Aracın hareket kabiliyetini kısıtlamayacak, taşıma kapasitesinden feragat etmeyecek ve süspansiyon/frenleme/direksiyon gibi sistem performansını etkilemeyecek şekilde minimum alansal yoğunluğa sahip;
- Araç içinde kapladığı alanı minimize etmek amacıyla ince panel kalınlığı;
- On-board görülmeyen spektrumdaki görüntüleme ve iletişim araçlarıyla uyumlu;
- Yüksek aşınma, darbe ve çizilme direnci;
- Göreceli olarak yüksek performans/maliyet oranı.

### 3.1.2. Transparan zırh sistemleri için alternatif malzemeler

Çekirdek kısmı sert malzeme (çelik, tungsten karbür veya tungsten) kullanılarak üretilmiş zırh delici mermilerle yapılmış olan testlerde geleneksel transparan camların gelen mermi çekirdeğini güçlkle aştığını ve kıramadığı gözlemlenmiştir. Bu sebepten ötürü geleneksel malzemeler kullanılarak zırh delici mermilere karşı dayanabilmesi için daha fazla kalınlık ve ağırlık gereksinimi doğurmuştur. Önemli derece bir ağırlık kazananımı ön yüzeylerinde yüksek sertliğe sahip transparan seramik malzemeler kullanılarak elde edilebilir. Safirin konsept sert bir transparan ön yüzey olarak kullanılması mermiye erozyona uğratma ve kırılma davranışı bakımından kabul edilmiştir. Son 30 yıldaki malzeme teknolojisi gelişimi alüminyum oksinitrür (AlON) magnezyum alüminat spinel ( $MgAl_2O_4$ ) ve mikron altı tanecik boyutlarına sahip kristal alüminayı transparan zırh sistemi olarak kullanımına olanak sağlamıştır. Bu alternatif seramiklerin tam olarak gereksinimi olan sertlik ve transparanlık olduğu söylenebilir[27].

Yapılan bir çalışmada [28] ticari olarak kullanılan borasilikat camının ve cam seramiğinin (%25 nanokristal spinel) balistik özelliklerini 0.50 kalibreyi temsil edecek

şekilde çelik rotlarla test etmişlerdir. Şaşırtıcı bir şekilde üstün basma dayanımına sahip cam seramiğinin sonuçları daha iyi olarak nitelendirilmemiş, bu sınıf malzemeler ve tehditler için çekme dayanımının daha önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Tek kristalli malzemelerden farklı olarak, ışığı dağıtmak için porlar, tanecikler ve tanecik sınırları, ikinci fazlar başta olmak üzere çeşitli bölgeler vardır. Bir seramiğin transparanlığını etkileyen en önemli faktörlerden biri porozitedir. Porların yüzeyindeki sınırla esas faz arasında ciddi miktarda optik özellik farkı bulunduğundan ışığı yansıtmaktadır. Bu porlardan çok fazla miktarda bulunması seramik malzemeyi opak yapmaktadır. Yine aynı şekilde tanecik ve tanecik sınırları arasında fark var ise ışığın saçılmasına sebep olacaktır [29]. Diğer bir taraftan, çok kristalli seramiklerde ışık absorpsiyonu sadece porlardan ve tanecik sınırlarından kaynaklanmamakta, ışığın bir kristalden diğer bir kristala geçişi sırasında çift kırılmalı saçımından da kaynaklanmaktadır. Bu saçılımdaki kayıpları düşürmenin bir yolu da elektromanyetik dalga paketleri mikron altı tanecik boyutlarını görsel kristal olarak algılamamasıdır. Tipik olarak tanecik boyutu 0.5 µm olan yüksek oranda sinterlenmiş 1 mm kalınlığında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alümina) 'nın gerçek geçirgenliği (Real in-line transmission)  $\lambda = 640$  nm dalga boyunda %60 (teorik olarak %70) civarındadır. Bu kayıpların tamamı kalınlıkla birlikte arttığından sinterlenmiş alüminada çift kırılmalı saçınım diğer izotropik malzemelerden daha fazladır. Spinel (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ise diğer bir kübik kristal yapısına sahip oksit olmakla birlikte çift kırınım olayı daha büyük tanecik boyutlarında gerçekleşmektedir, bu durum da porları ortadan kaldırmak için daha yüksek sıcaklık uygulamaya olanak sağlamaktadır [30].

ALON ve Spinel üretimi diğer teknik seramiklerin üretiminde olduğu gibi birçok aşama içermektedir. Bunun yanında kristal seviyesinde temiz bir transparanlığa ulaşmak ek olarak zorlu kritik süreçlerin eklenmesine sebep olmaktadır. Bu gereklilikler;

- >%99 yoğunluk - 40 nm boyutundan daha fazla poroziteler ışığın saçılmasına sebep olacaktır.
- Çok yüksek saflık – PPM seviyesinde bulunan geçiş metalleri renk verecektir.
- Temiz mikroyapı- Tanecik sınırlarında ikincil fazlar bulunmamalıdır.

Bu süreç çok karmaşık bir süreç içermekle beraber laboratuvar ortamından tamamıyla ticari bir ürüne dönüşebilmesi için on milyonlarca dolara ihtiyaç duymaktadır [31].

Transparan zırh olarak kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de gösterildiği şekilde not edilmiştir [32].

**Tablo 3.1.** *Transparan zırh malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri [32]*

| Malzeme        | Sertlik<br>HV <sub>0.1</sub> | Refraktif<br>İndeks<br>$N_D$ | Geçirgenlik (%)     |                      |                       |
|----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
|                |                              |                              | UV (200–<br>380 nm) | Vis (380–<br>780 nm) | NIR (780–<br>3200 nm) |
| AlON           | 1772                         | 1.7938                       | 1–82                | 82–85                | 85–87                 |
| Safir          | 2158                         | 1.7681                       | 1–75                | 75–82                | 82–85                 |
| Kuvars Cam     | 756                          | 1.4586                       | 53–91               | 91–92                | 83–93                 |
| Cam<br>Seramik | 633                          | 1.5263                       | 1–29                | 29–88                | 70–88                 |
| Flot Camı      | 572                          | 1.5204                       | 1–87                | 82–92                | 72–82                 |

Polikarbonat (PC) yüksek oranda kuvvet gelmesi durumunda kırılma davranışı göstermeden plastik deformasyona uğrar ve yüksek kırılma dayanımına sahip olduğundan dolayı en önemli transparan polimerlerden birisidir. Darbe anında çoğu enerji ısı ve iç enerjiye dönüşür. Oda sıcaklığında çok yüksek bir sünek davranış gösterir ve statik veya dinamik olarak yüklendiğinde ise büyük bir plastik deformasyona uğrar. Statik yüklenme durumunda deformasyon dinamik yükleme durumundan daha yüksektir, çünkü dinamik yüklemde bozunma kırılma küçük plastik gerinmelerden oluşmaktadır. Arta kalan parçacık ve şarapneller polikarbonat zırh plakasında sorun teşkil etmezler [33]. Polikarbonatın diğer transparan polimelere karşı büyük bir avantajı olduğu fiziksel özelliklerinden dolayı aşıkardır. Ayrıca yüksek hızlı mermilere polimetilmetakrilat (PMMA) için düşünüldüğünde zırh panellerinde alternatif olarak kullanılabilecek kadar dayanıklıdır. Yine de polikarbonatın bir diğer dezavantajı da düşünüldüğünde ultraviyole (UV) ışınlarında, ozon, nitrojen oksit, nem ve çözeltiler karşısında bozulup yaşlanmaya uğramasıdır [34-36].

Transparan zırh malzemeleri genel olarak şu şekilde özetlenmiştir [37]:

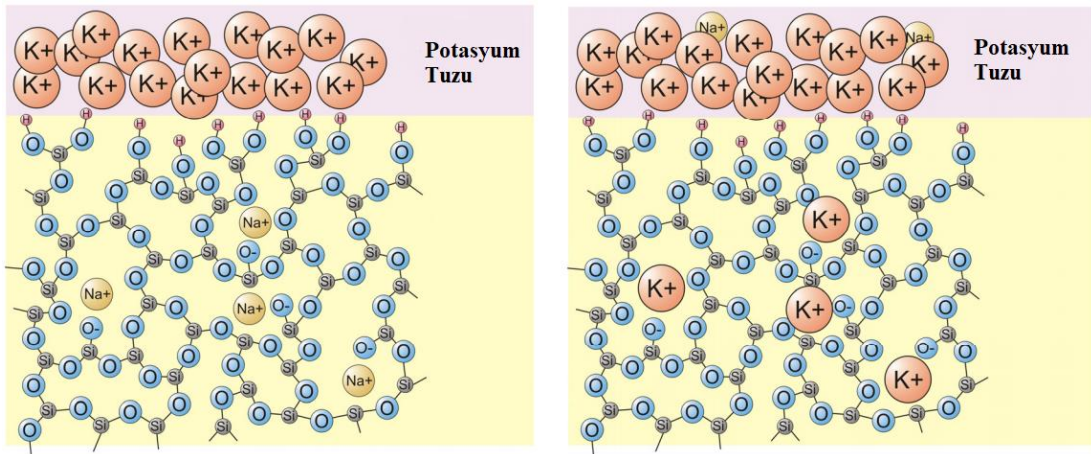
- Soda-kireç ve borasilikat gibi flot camları düşük maliyetli fakat balistik koruma gereksinimleri kalınlıkla arttığı için önemli ölçüde ağırlık getirmektedir.
- PMMA ve PC gibi düşük ağırlık ve maliyetli polimerik malzemeler termal, UV, kimyasal ve çizilme dirençleri çok düşüktür.
- AlON, safir, ve spinel gibi önemli malzemeleri içeren transparan seramik grubu olağanüstü balistik dayanıma sahip olmalarına karşın, çok yüksek maliyetlidirler ve üretilebilirlik olarak limitli bir ölçüdedirler.

- Lityum alümina silikat, lityum magnezyum silikat, lityum çinko silikat gibi ana cam seramikler göreceli olarak yüksek balistik dirence sahip olmasına rağmen üretim süreçleri çok karmaşıktır.

### 3.2. Kimyasal İyon Değişim Yöntemi

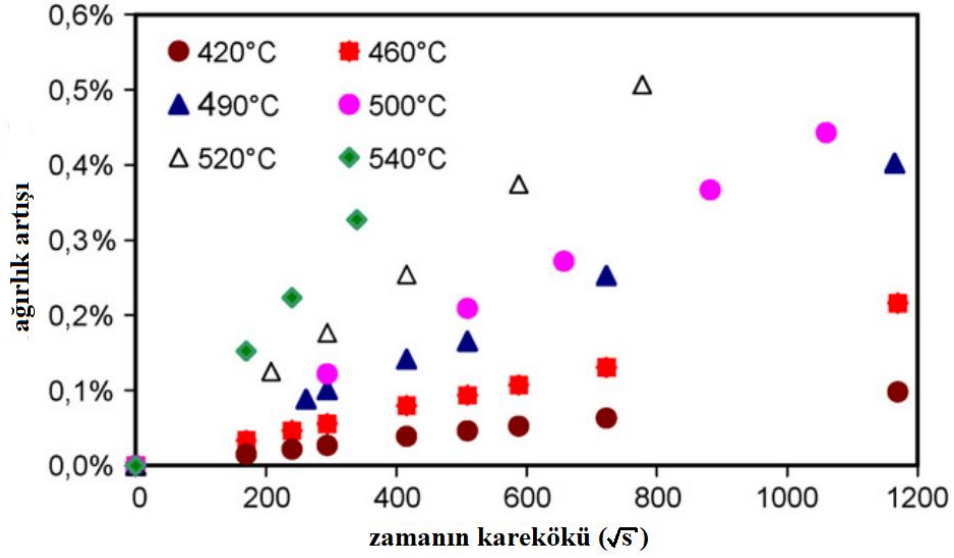
İyon değişim yöntemi ilk olarak Kistler [38] ve Acloque ve Tochon [39] tarafından 1962 yılında keşfedilmiştir. 50 yıl gibi bir süreden daha önce keşfedilmesine karşın Corning Gorilla Glass [40], Schott Xensation [41] ve Asahi Dragontrail [42] gibi şirketler tarafından piyasaya sürülmeden önce geniş bir market bulmakta başarısız olmuştur.

İyon değişim yöntemiyle cama mukavemet kazandırma işlemi camsı geçiş sıcaklığı altında camın alkali tuz banyosuna daldırılmasıyla gerçekleşir. Bu daldırma süresince cam yüzeyinde bulunan alkali iyonları ile tuz içerisindekiler yer değiştirir (Şekil 3.2.). Termal olarak aktive edilen bu süreçte, yüzeydeki küçük iyonların ayrılıp yerine daha büyük iyonların gelmesiyle oluşan yüzey gerilimi sayesinde camda mukavemet kazancı elde edilir [43].



Şekil 3.2. İyon değişiminin görseli [15]

Cam içerisinde sodyum ve ergimiş tuz içerisindeki potasyum iyonlarının tek yer değiştiren iyon olduğu varsayılırsa, potasyum iyonun sodyum iyonuna göre daha ağır olmasından kaynaklı malzeme üzerinde bir ağırlık artışı olması söz konusudur. Şekil 3.3 zamana göre düz bir cam örneği üzerindeki ağırlık artışını göstermektedir [43].



Şekil 3.3. Zamana göre ağırlık artışı [43]

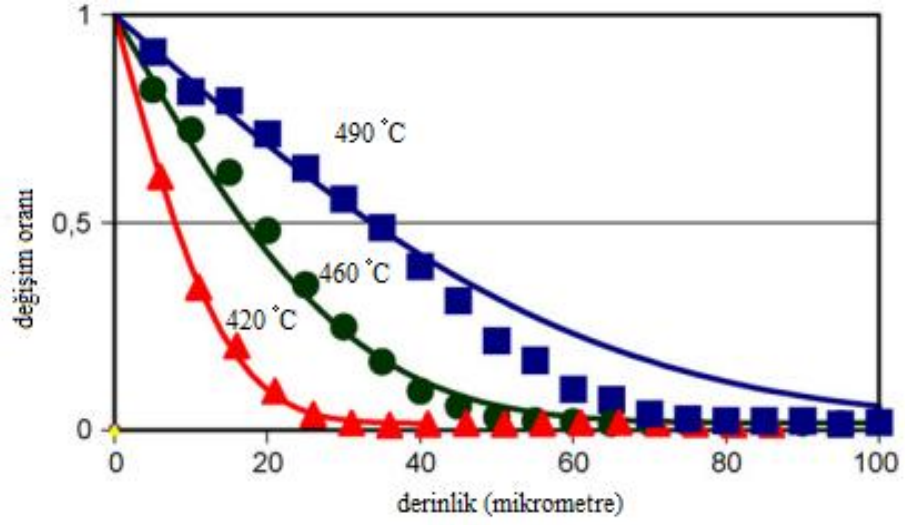
### 3.2.1. İyon değişiminin kinetiği

İyon değişim yönteminde, cam içerisinde bulunan  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Li}^+$  gibi küçük alkali iyonlar ergimiş tuz içerisinde bulunan  $\text{K}^+$  gibi daha büyük iyonlar ile yayınışma sonucu yer değiştirirler [44, 45]. İyon boyutları farklı olduğundan bu iyonların cam içerisindeki hareket hızları da farklıdır. Hızlı iyonların yavaş iyonların önüne geçmesi cam içerisinde bir elektrik alan oluşumuna sebep olur. Bu elektrik alan ise yavaş olan iyonları hızlandırmaya, hızlı olanları yavaşlatmaya eğimlidir. Bütün süreç aşağıda verilen bir iç yayınım katsayısıyla açıklanabilir [13].

$$D = \frac{D_A D_B}{D_A C_A + D_B C_B} \quad (3.1)$$

Burada  $D_A$  ve  $D_B$  iyonların yayınım katsayılarını,  $C_A$  ve  $C_B$  ise A ve B iyonlarına ait konsantrasyon oranlarını temsil etmektedir [13]. Sürecin devam etmesi sonucu büyük katyonların cam içine nüfuz ettiği kadar küçük katyonlar da tuz banyosuna karışacak ve tuz banyosunun kirlenmesine sebep olacaktır. Bu kirlenme ise iyon değişimi için gerekli olan termodinamik gücün azalmasına sebep olacaktır [46]. Bu kirlenmenin neden olduğu kinetikler matematiksel olarak modellemiş ve deneysel olarak iyi birer bağlantı da elde edilmesi mümkündür [47].

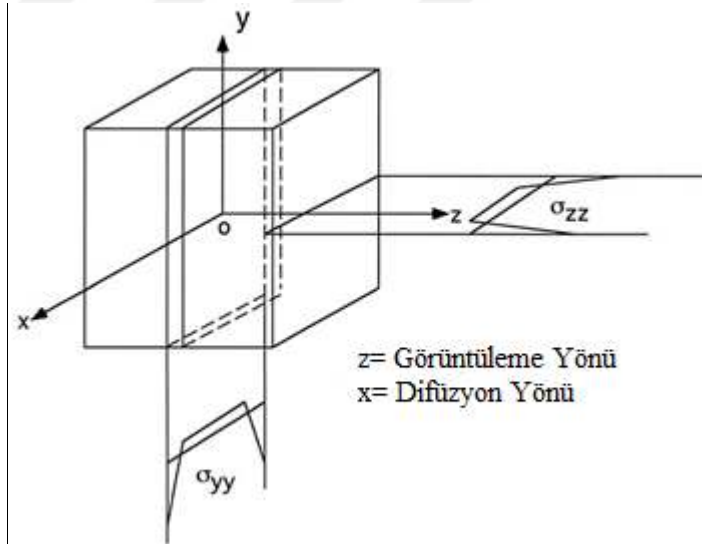
Farklı iyon değişim parametrelerinin derinliğe göre potasyum konsantrasyonu Şekil 3.4 'de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık ve uzun işlem sürecinde potasyum penetrasyon derinliği düşük sıcaklık ve kısa işlem sürecine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [43].



Şekil 3.4. 72 saatlik iyon değişim işlemi sonrası potasyum penetrasyon derinliği [43]

### 3.2.2. İyon değişimi esnasında gerilme oluşumu

İyon değişimi sırasında gerilme oluşumu Cooper ve Krohn [48] tarafından termal gerilime benzetilerek tanımlanmıştır. Kalınlığı  $2L$  olan yarı sonsuz ( $y$  ve  $z$  boyutları boyunca Şekil 3.5) bir cama  $\pm x$  yönü boyunca penetre olan  $x$  yerindeki katyonun stresi Denklem 3.2 verildiği gibidir.



Şekil 3.5. İyon değişimi sırasında difüzyon ve stres oluşumu için koordinat eksenleri [49]

$$\begin{aligned}
 (\sigma_{xx})_x &= 0 \\
 (\sigma_{zz})_x &= (\sigma_{yy})_x = \frac{BEC_x}{(1-\nu)} + \frac{1}{L} \int_0^L \frac{BEC_x}{(1-\nu)} dx
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

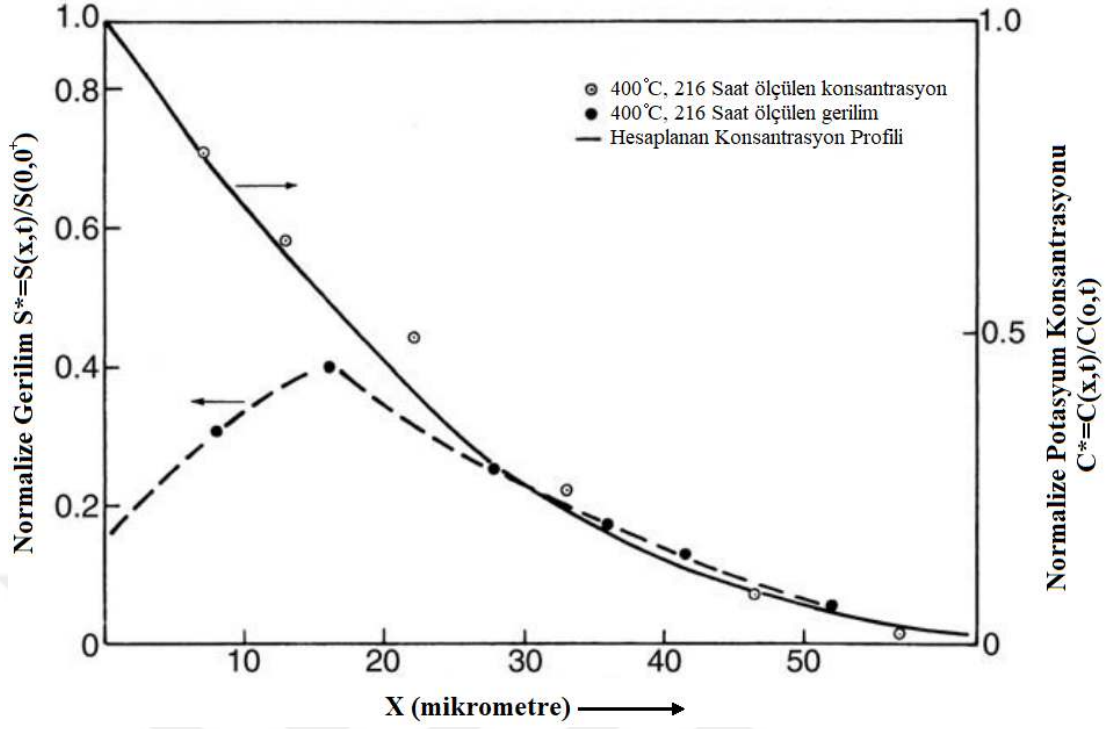
Burada  $E$  young modülünü,  $\nu$  Poission's oranını ve  $B$  ise Alfred R. Cooper anısına “Cooper katsayısı” olarak tanımlanmıştır. Lineer termal genleşme katsayısına benzer bir şekilde, lineer örgü genleşme katsayısı da  $C$  konsantrasyonu başına hacim  $V$  'deki göreceli değişimin  $1/3$ 'üdür. Özünde gerilim, sıcaklık olan  $T$  nin konsantrasyon olan  $C$  ile ve lineer termal genleşme katsayısının lineer örgü genleşme katsayısı  $B$  ile değiştirilmesiyle elde edilir [51].

$$B = \frac{1}{3V} \frac{\partial V}{\partial C} = \frac{1}{3} \frac{\partial \ln V}{\partial C} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'den bulunan lineer örgü genleşme katsayısı Denklem 3.2'den bulunan değerden genellikle 2-4 daha fazla olduğu bulunmuştur. Denklem 3.3'den elde edilen  $B$  değerinin iyon değişiminden elde edilen gerçek sıkışma değerinden 2-4 kat daha fazla olduğundan gerçekten önemlidir. Diğer bir değişle Denklem 3.3'de belirtilen teorik değere ulaşmak iyon değişimi sırasında başarısızlığa uğrar. Bu fenomeni açıklayan birkaç teori mevcuttur. Bu gerilme farklılığı stres rahatlamasına uğramayacak kadar kısa bir süre olduğunda bile mevcuttur. Bu anormallik cam örgüsü içindeki plastisite ile açıklanabilir [47]. Camın atomlar arası boşluğu istilacı iyon ile doldurulduğunda ilk başta cam örgüsü elastik olarak genleşir, uyumluluk yaratmak için gerilmeler oluşur ve daha sonra plastik olarak deforme olur veya boyut eşitsizliğinden bağda bükülme/eğilme gerçekleşir. Plastik deformasyon sırasında fazla gerilme üretilemez. Esasında gerilme, gerinmenin tamamıyla elastik noktadan plastik noktaya geçişi sınırına kadar üretilir. Daha fazla faydalı sıkıştırma gerilmesi üretimi için elastik ve plastik akma mukavemetinin yüksek olması gerekmektedir [51]. Ayrıca  $T_g$  civarlarında katyonların bağlarını kırarak tekrardan dizilmeleri sırasında katyon kaynaklı stres rahatlaması görüldüğü de açıklamaktadır [50].

Çoğu iyon değişim işlemi yapılmış soda kireç camlarında maksimum sıkıştırma gerilimi Denklem 3.2. de tahmin edildiği gibi değil, yüzeyin altında bulunmaktadır (Şekil 3.6). Bunun temelindeki öneriler viskoz akıştır. Mantıklı tahmin olarak camı geçiş sıcaklığı cam yüzeyindeki karışık iyonlardan dolayı daha düşüktür ve bunun sonucu olarak yaratılan gerilmeyi rahatlatmak amacıyla viskoz akış burada daha kolay gerçekleşir [51]. Buna karşın Sane ve Cooper [52] bu hareketin viskoz akışla tamamen açıklanamayacağını, bu gerilim gevşemesinin bağ kırılması ve kısa mesafeli difüzyonla açıklanabileceğini öne sürmüştür.





Şekil 3.6. Soda-kireç camında maksimum yüzey altı gerilimin varlığı [52]

Kompozisyonunda yeterli miktarda alkali içeren bütün silika camları iyon değişimi metoduyla temperlenebilmektedir. Alkali oranının yükselmesi erime noktasının düşmesine bu da iyon değişimi sırasında visko-elastik davranışa sebep olmaktadır. Bu sebepten ötürü soda-silika camları, soda-kireç-silika camlarına göre kimyasal temperleme için daha uygun bir adaydır. İçeriğindeki yüksek alümina içeriği silika ağı içerisinde eşleşmemiş oksijen atomlarının sayısını düşüreceğinden alkali difüzyon katsayısı daha da artacaktır. Bu uygulama birçok için cam kompozisyonu patentlenmiştir. Saint-Gobain isimli firma kokpitler ve uçak camları için ticari çözümler bulmuşlardır. Geniş gövdeli uçaklar için tipik kokpit camı özel kimyasal temperlenmiş cam laminesi çözümü içermektedir ki bu cam 1.8 kg ağırlığındaki bir kuşun 180 m/s hızla çarpmasına dayanacak şekildedir [43].

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 4.1. İyon Değişimi İçin Parametrelerin Belirlenmesi

#### 4.1.1. Test numunelerinin hazırlanması

Bu çalışmada ticari olarak üretilen 1 mm kalınlığında ve 26x76 mm ebatlarında soda-kireç camı kesilmiştir. Kesilen camlar, kesim sırasından kaynaklanabilecek küçük çatlakların tamamen giderilmesi ve deney sonuçlarını etkilememesi amacıyla rodajlama işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler, her bir grup 5 adet numune içerecek şekilde, Görsel 4.1’de gösterilen elektrikli fırında 8 saat, 16 saat, 1 gün, 3 gün, 5 gün ve 7 gün olmak üzere 450 °C sıcaklıkta KNO<sub>3</sub> tuzu içerisinde daldırılarak iyon değişimi yapılmıştır. Numuneler iyon değişimi öncesi isopropil alkol temizlenerek üzerinde bulunabilecek yabancı maddelerden arındırılmış, iyon değişimi sonrası ise su ile iyice durulama yapılarak kalıntı KNO<sub>3</sub> tuzunun uzaklaştırılması sağlanmıştır.



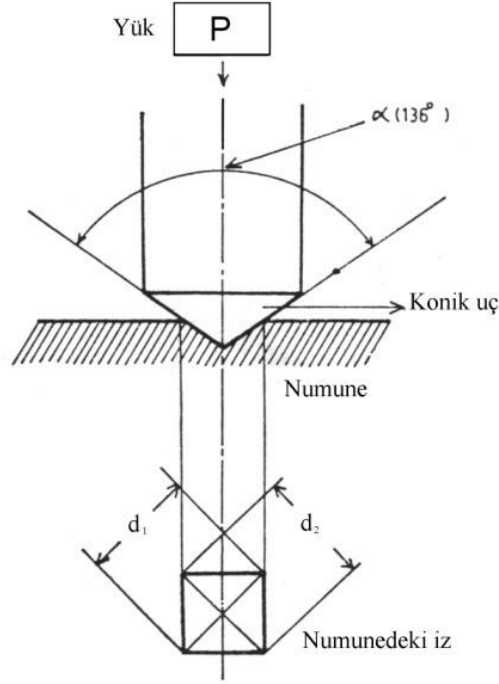
Görsel 4.1. İyon değişimi için kullanılan elektrikli fırın

#### 4.1.2. Test numunelerinin analizi

##### 4.1.2.1. Sertlik

Sertlik testi emco marka micro sertlik cihazı ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve indent izleri, ASTM C1327 [53] standartlarına değerlendirilerek seçilmiştir. Sertliği ölçülecek numunelere Şekil 4.1’de gösterildiği gibi piramit elmas uç ile 10 saniye süre ve 1 kg yükü kalıcı kare tabanlı iz oluşturulmuştur. Oluşan simetrik izin köşegen ortalaması belirlenerek Denklem 4.1’de verilmiş olan bağıntı yardımıyla

malzemenin Vickers sertlik değeri hesaplanabilmektedir. Ölçümler her bir numune grubu için 10 defa tekrarlandı ve standart sapmaları hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Vickers sertlik deneyi

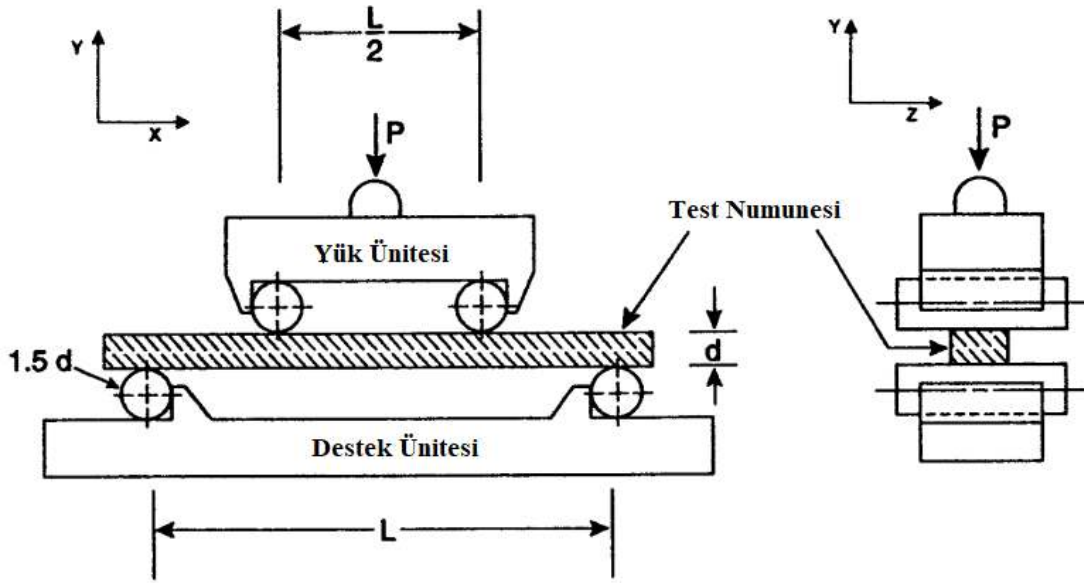
$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (4.1)$$

Burada; HV Vickers sertliği, F uygulanan yük (kgf), d izin köşegen uzunluğunun ortalamasıdır (mm). Buradan elde edilecek değer vickers sertlik değeridir ve buradan çıkan değeri SI (GPa) birimine çevirmek için çıkan sonucu 0,009807 değeri ile çarpmamız gerekmektedir. Ortaya çıkan yeni değerle birlikte denklem aşağıda belirtilen şekilde yeniden yazılabilmektedir.

$$HV = 0,0182 \frac{F}{d^2} \quad (4.2)$$

#### 4.1.2.2. Eğilme mukavemeti

Eğilme mukavemeti testi dört nokta eğme cihazı Instron 5581 ile oda sıcaklığında, 1000 N yük altında ve tahrik düzeneği 1 mm/dak olacak şekilde ASTM C1161 [54] standartları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinin şeması Şekil 4.3’de detaylı olarak verilmiştir. Hesaplamalar için ise Denklem 4.2 kullanılmaktadır. Ölçümler her bir numune grubu için 5 defa tekrarlandı ve standart sapmaları hesaplandı.



Şekil 4.2. Dört nokta eğme test düzeneği

$$S = \frac{3PL}{4bd^2} \quad (4.3)$$

Burada; P uygulanan yük, L desteğin genişliğini, d numunenin kalınlığını ve b ise numunenin genişliğini temsil etmektedir.

#### 4.1.2.3. İçyapı incelemeleri

Üretilen numunelerin içyapı incelemeleri Zeiss Evo 50 SEM cihazında 1000 büyütme oranında SEM görüntüsü alınarak yapılmış, iyon değişimini ispatlayabilmek için bölgeden EDX analizi yapılmıştır.

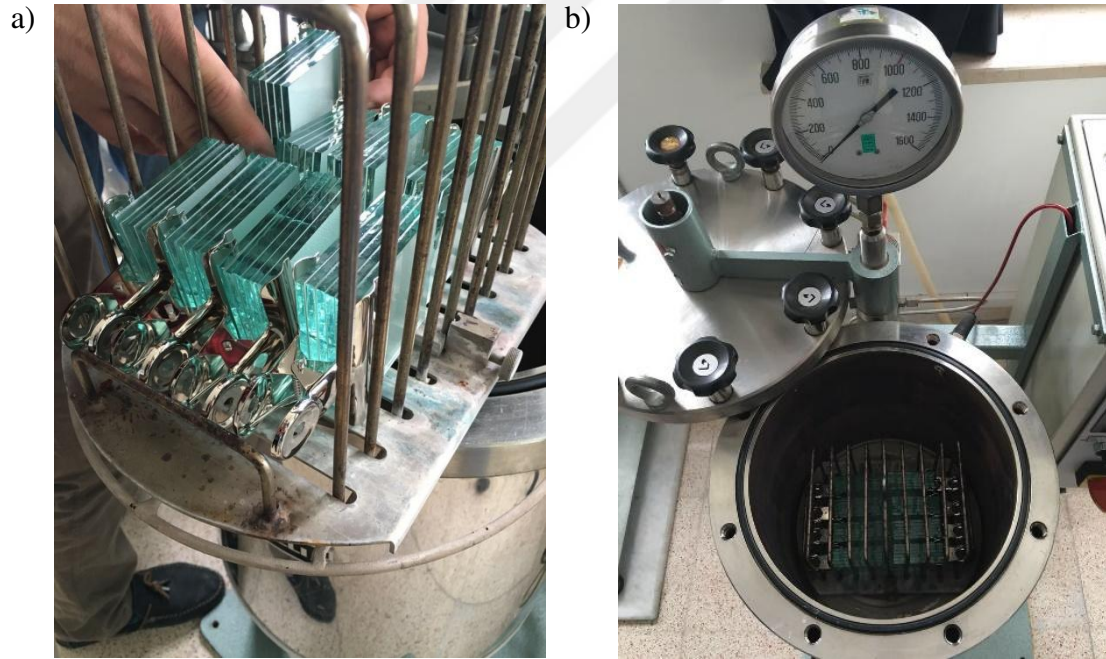
## 4.2. Lamine Cam Hazırlama

### 4.2.1. İyon değişimi

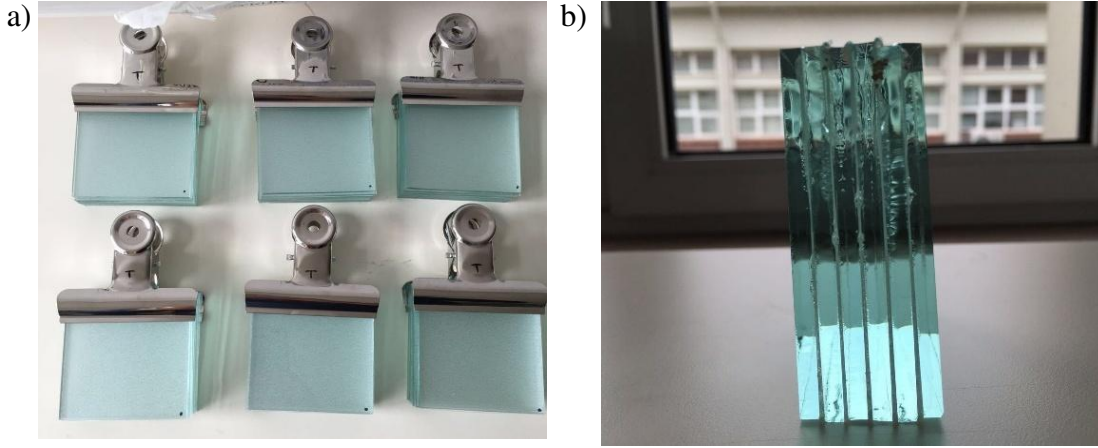
Kimyasal iyon değişimi için fırın haznesinin ebatlarından kaynaklanan sınırlamalardan dolayı 4 mm kalınlığındaki numuneler 50x50 mm boyutunda kesilmiştir ve iyon değişim işlemi için daha önce testleri yapılan ve en başarılı parametre olan 450 °C sıcaklığında KNO<sub>3</sub> tuz banyosu içerisinde 16 saat boyunca bekletilmiştir.

### 4.2.2. Lamine cam hazırlama

Balistik testlere tabi tutulması amacıyla 50x50x4 mm ebatlarındaki camlar 6 kat olacak şekilde aralarında PVB malzeme kullanarak 12 bar basınç ve 120 °C sıcaklık altında Görsel 4.2’de gösterilen otoklavda 8 saat boyunca bekletilmiştir. Bu numunelerden 6 adetinin sadece atış yüzeyi kimyasal iyon değişimine tabi tutulmuş camlardan, 10 adeti ise işlem yapılmamış camlardan olmak üzere toplam 16 adet lamine cam elde edilmiştir (Görsel 4.3).



**Görsel 4.2.** (a) Lamine camların otoklava yerleştirilmesi ve (b) iç kısmının görüntüsü



**Görsel 4.3.** Elde edilen lamine camların a)önden ve b) yandan görüntüsü

#### 4.3. Balistik Testler

Dünyada balistik testler ile ilgili birçok standart bulunmaktadır. Kimyasal iyon işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış numunelerin herhangi bir standardın hangi koruma seviyesine denk geldiğinden ziyade balistik direnç gösterdiği sınırı tespit etmek daha önemlidir. Bu iki farklı numune arasındaki balistik limit değerlerini kıyaslayabilmek amacıyla  $V_{50}$  balistik çarpma hızı limiti dünya üzerinde belirli otoritelerce kabul görmektedir. Bu limit parçacığın belirli bir kritik hız değerinde numuneyi %50 olasılıkla delme olasılığına denk gelmektedir. Burada mermi hızı arttığında numunenin delinme olasılığı artacak, hız azaldığında ise numunenin delinme olasılığı azalacaktır. MIL-STD-662F standardına göre  $V_{50}$  hızını tespit edebilmek için en az iki adet tam delinme (Complete Penetration) ve en az iki adet kısmi delinme (Partial Penetration) hızlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Yine aynı şekilde bu hızlar arasındaki farklarında test numunesi ve koşullara bağlı olarak 18, 27, 30 ve 38 m/s olacak şekilde alınmalıdır. Standart, tam delinmeyi tespit edebilmek için atış numunesinin  $152 \pm 12,7$  mm arkasına, atış numunesine paralel şekilde, 0,51 mm kalınlığında ve 2024 T3 alüminyum malzemeden yapılmış levhayı şahit plaka olarak yerleştirilmesi gerektiğini söylemektedir. Bu plakada balistik test sonucu mermiden veya atış plakasından sıçrayan parçaların ve şarapnellerin yarattığı çatlaklar ve delikler 110 volt, 60 watt gücünde bir ampul ışığı altında bakıldığında ışık geçirecek kadar var ise tam delinme olarak nitelendirilir, onun dışında kısmi delinme olarak isimlendirilir.

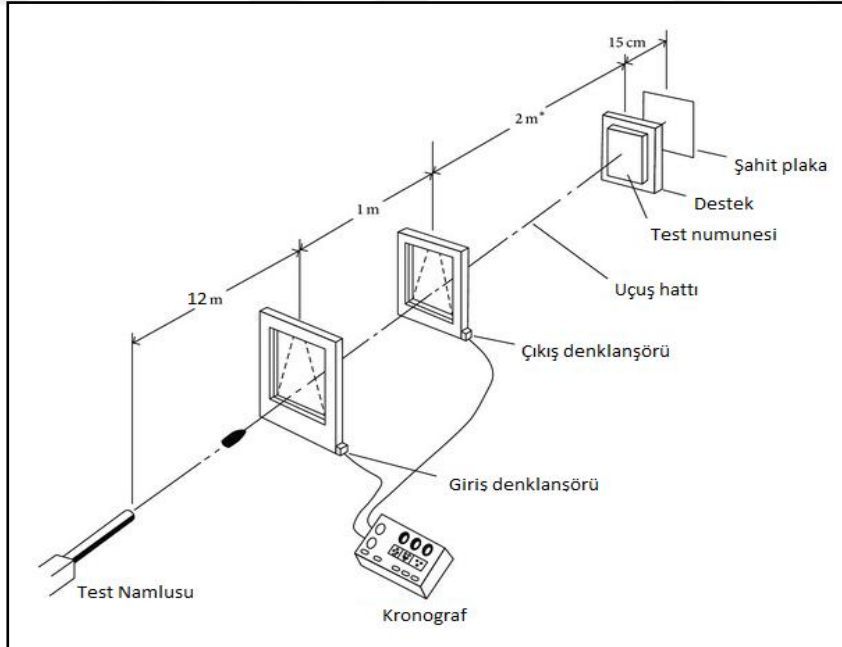


Balistik testler için Nurol Teknoloji'ye ait Şaşmaz yerleşkesinde bulunan balistik test laboratuvarı kullanılmıştır. Balistik testte kullanılan test düzeneği Şekil 4.3'da detaylı olarak verilmiştir.

a)

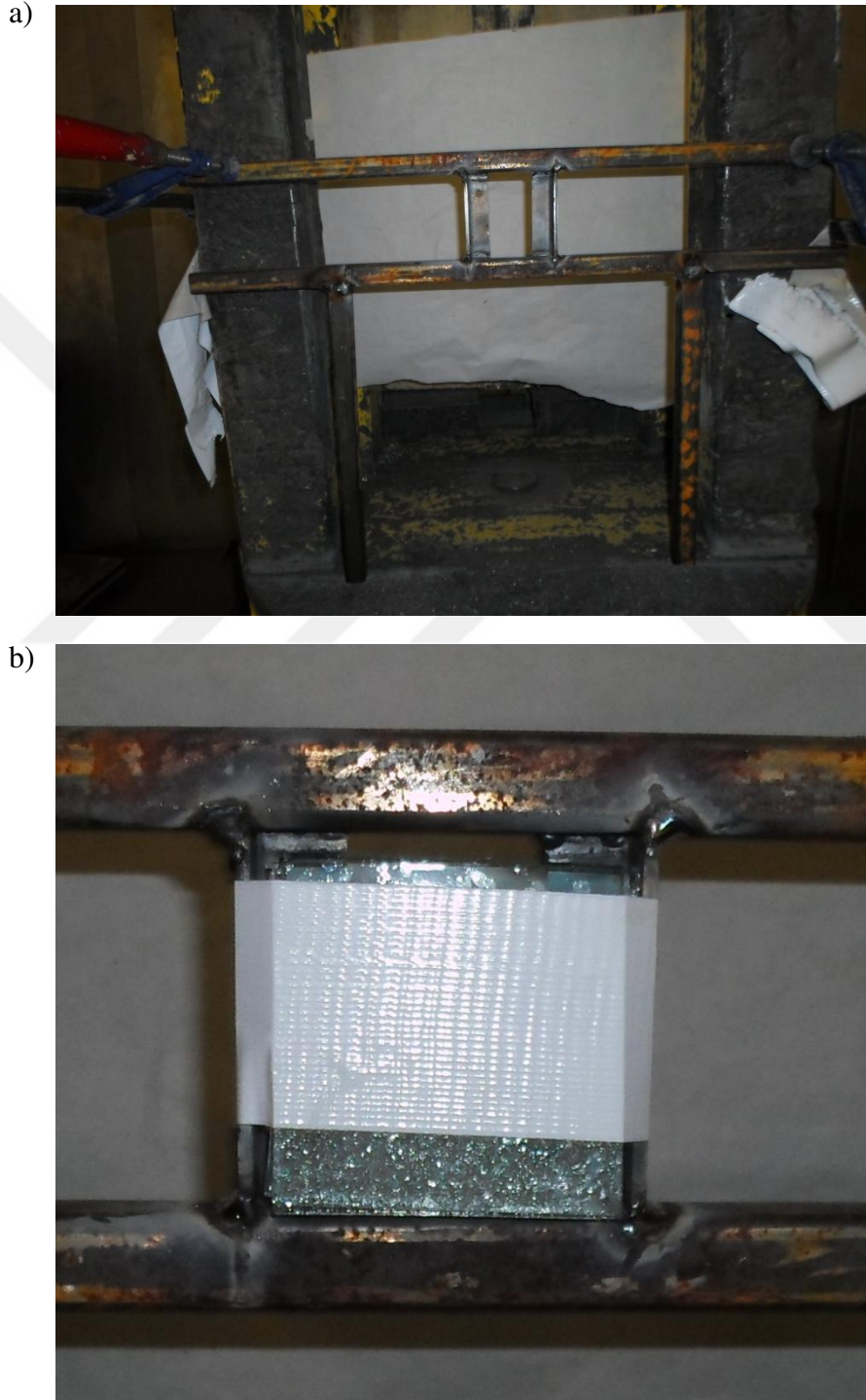


b)



Şekil 4.3. (a) Balistik test düzeneği ve (b) şeması

Balistik testler sırasında numunenin küçük olmasından ötürü numuneyi hedef standına sabitleyebilmek adına Görsel 4.4 'de gösterilen mesnet özel olarak imal edilmiştir ve elastik özelliği yüksek bir bant kullanılarak numune mesnete çarpışma esnasında düşmeyecek şekilde bantlanmıştır.



**Görsel 4.4.** (a) Balistik test için imal edilen mesnet ve (b) numunenin sabitlenmesi



Balistik testler 5,56x45 mm M193 NATO mühimmatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her test öncesinde mermi çekirdeği kovandan çıkartılarak çekirdek ve barut ağırlık ölçümleri alınmış, tekrardan Görsel 4.5 'de gösterilen alet yardımı ile tekrardan birleştirilmesi sağlanmıştır.



**Görsel 4.5.** Mermi çekirdeği ve kovasının birleştirilmesi

İlk test sonucu tam delinme görüldüğünden barut ağırlığı azaltılarak ikinci test yapılmış, yine aynı şekilde tam delinme görüldüğünden barut miktarı biraz daha azaltılarak tekrarlanmıştır. Üçüncü atış sonucu kısmi delinme görüldüğünden barut miktarı artırılmış ve tam delinme görülmüştür. Tam delinme görüldüğünde barut ağırlığını azaltma, kısmi delinme görüldüğünde barut ağırlığını artırma süreci on altı numune için tekrarlanmıştır.

## 5. SONUÇ TARTIŞMA VE ÖNERİLER

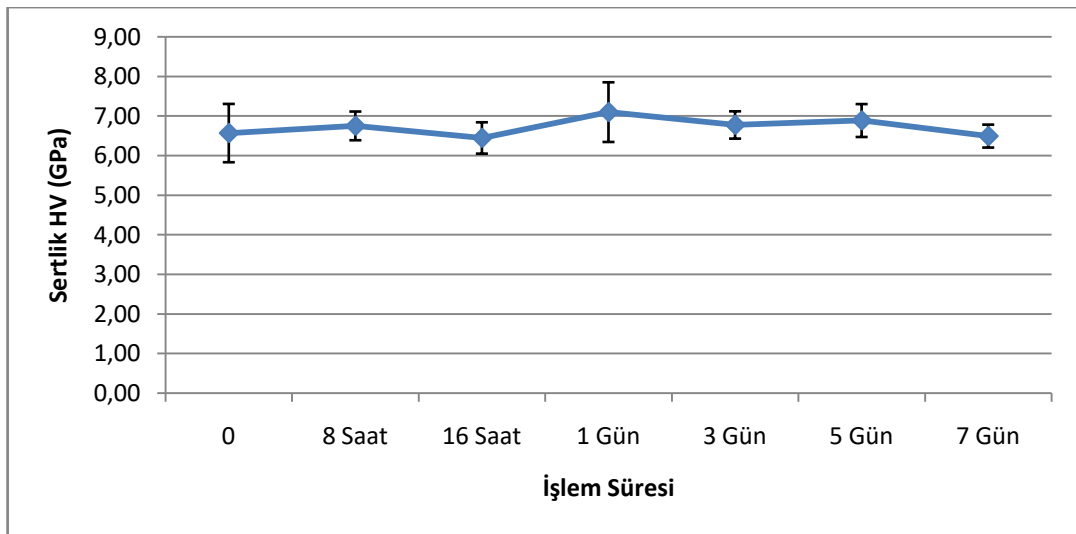
### 5.1. Test Numunelerinin Analiz Sonuçları

#### 5.1.1. Sertlik

Sertlik testi sonuçları Tablo 5.1 de verilmiştir. Kimyasal iyon değişimi işlemine tabi tutulmamış numunelerde sertlik ortalaması 6,57 GPa değerindedir. Bunun yanında, bir gün boyunca işleme tabi tutulan numunelerde sertliklerinin ortalamalarında 7,10 GPa olduğu görülmektedir. Kimyasal iyon değişimine bir günden daha fazla devam etmek Şekil 5.1’de gösterildiği gibi sertliğinde ve standart sapmada bir düşüşe sebep olmuştur.

**Tablo 5.1.** Sertlik değerleri

| Süre                     | 0    | 8 Saat | 16 Saat | 1 Gün | 3 Gün | 5 Gün | 7 Gün |
|--------------------------|------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Sertlik<br>Vickers (Gpa) | 5,65 | 6,26   | 6,17    | 6,82  | 6,98  | 6,87  | 6,56  |
|                          | 6,13 | 6,82   | 6,46    | 8,38  | 6,41  | 7,04  | 6,51  |
|                          | 5,99 | 7,15   | 6,56    | 7,96  | 7,09  | 6,41  | 6,71  |
|                          | 6,36 | 7,09   | 6,22    | 6,87  | 7,04  | 7,27  | 6,31  |
|                          | 7,04 | 6,66   | 7,27    | 7,45  | 6,56  | 7,7   | 6,41  |
|                          | 7,04 | 7,32   | 6,82    | 6,56  | 6,46  | 7,04  | 6,87  |
|                          | 7,51 | 6,71   | 6,36    | 5,69  | 7,15  | 6,61  | 6,61  |
|                          | 7,83 | 6,26   | 6,51    | 7,09  | 6,82  | 6,36  | 5,86  |
|                          | 5,95 | 6,46   | 5,81    | 6,76  | 6,17  | 6,56  | 6,31  |
|                          | 6,17 | 6,76   | 6,26    | 7,38  | 7,04  | 6,98  | 6,76  |
| Ortalama                 | 6,57 | 6,75   | 6,44    | 7,10  | 6,77  | 6,88  | 6,49  |
| Standart Sapma           | 0,74 | 0,36   | 0,40    | 0,75  | 0,34  | 0,42  | 0,29  |



**Şekil 5.1.** Sertlik-Zaman grafiği

### 5.1.2. Eğilme mukavemeti

Eğilme mukavemeti sonuçları Tablo 5.2. de verilmiştir. İşlem yapılmamış numunelerin eğilme mukavemeti ortalaması 56,04 MPa ve standart sapma değeri ise 15,77 MPa olarak saptanmıştır. Kimyasal iyon değişimi işlemine 16 saat boyunca tabi tutulmuş numunelerde eğilme mukavemeti ortalaması en yüksek değer olan 190,49 MPa görülmektedir (Şekil 5.2). İyon değişim işlemine devam edildikçe eğilme mukavemeti ortalamasında ciddi bir düşüş görülmektedir.

**Tablo 5.2 Eğilme mukavemeti değerleri**

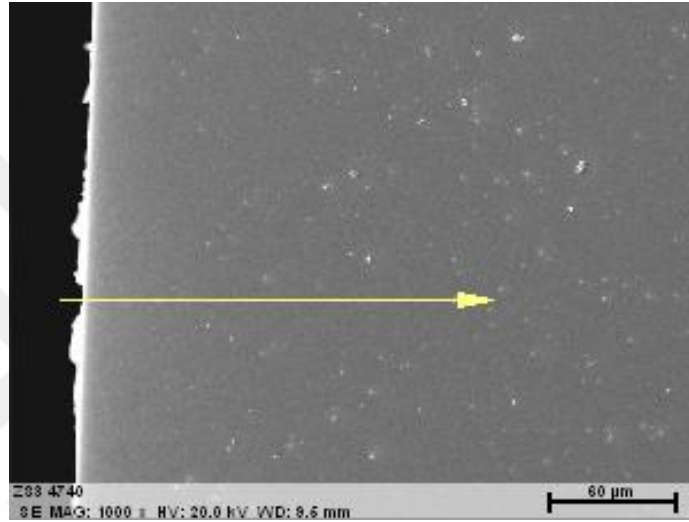
| Süre                    | 0     | 8 Saat | 16 Saat | 1 Gün  | 3 Gün  | 5 Gün  | 7 Gün  |
|-------------------------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Eğilme Mukavemeti (Mpa) | 87,53 | 125,65 | 197,13  | 185,54 | 149,11 | 100,87 | 161,15 |
|                         | 55,19 | 124,93 | 208,12  | 118,64 | 212,84 | 170,26 | 158,42 |
|                         | 54,78 | 146,49 | 242,50  | 224,79 | 118,66 | 168,30 | 117,68 |
|                         | 46,45 | 145,32 | 198,12  | 197,64 | 77,16  | 105,01 | 225,37 |
|                         | 58,14 | 162,59 | 106,58  | 174,11 | 139,26 | 148,90 | 152,39 |
| Ortalama                | 60,42 | 141,00 | 190,49  | 180,14 | 139,41 | 138,67 | 163,00 |
| Standart Sapma          | 15,77 | 15,88  | 50,40   | 39,20  | 49,48  | 33,70  | 38,99  |



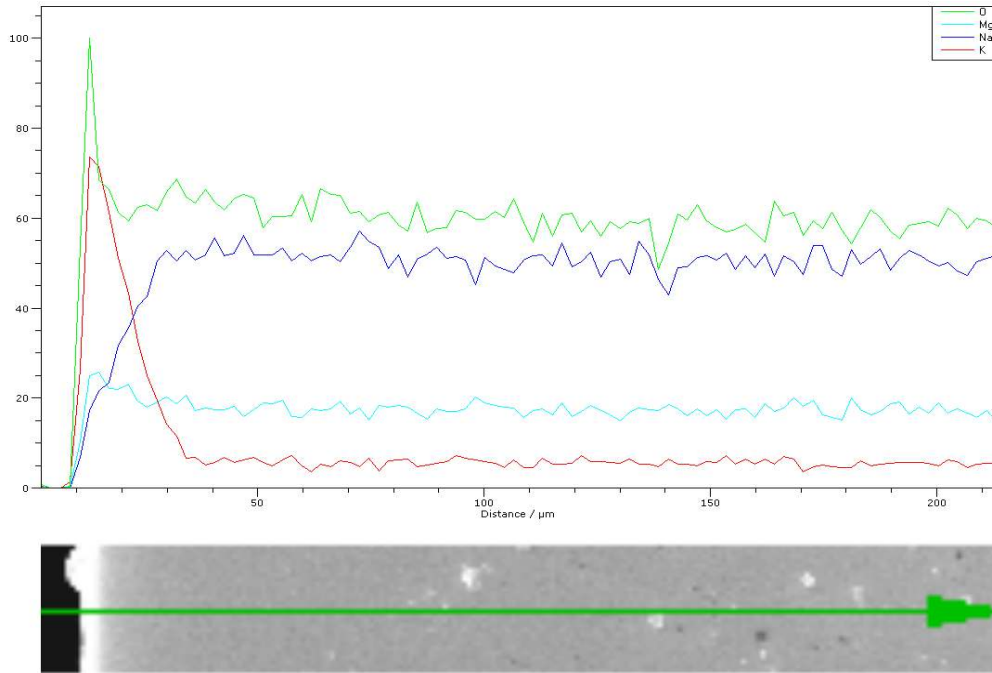
**Şekil 5.2. Eğilme Mukavemeti-Zaman grafiği**

### 5.1.3. İçyapı incelemeleri

İçyapı analizi için 16 saat işleme tabi tutulmuş numuneden alınan cam kesitinin SEM görüntüsü Görsel 5.1’de verilmiştir. izgi ile gösterilen bölgelerden alınan EDX analizi (ekil 5.3) sonucu yüzeye yakın bölgelerde potasyum elementinin varlığını ve sodyum elementinin eksikliğini, daha derine doğru ilerledikçe ise beklenenden potasyum konsantrasyonunda azalma ve sodyum konsantrasyonunda artış gözlemlenmektedir.



Görsel 5.1. Cam kesitinden alınan SEM görüntüsü



Şekil 5.3. Cam kesitinden alınan EDX analizi

## 5.2. Balistik Test Sonuçları

Alınan ağırlık ölçümleri ve test sonuçları Tablo 5.3’de detaylı olarak verilmiştir. Tabloda kırmızı ile belirtilen satırlar tam penetrasyonu, yeşil ile belirtilen satırlar ise parçalı penetrasyonu ifade etmektedir.  $V_{50}$  değerini hesaplamak amacı ile kullanılan hız değerleri ise mavi işaretli olarak gösterilmiştir.

**Tablo 5.3** Balistik test sonuçları

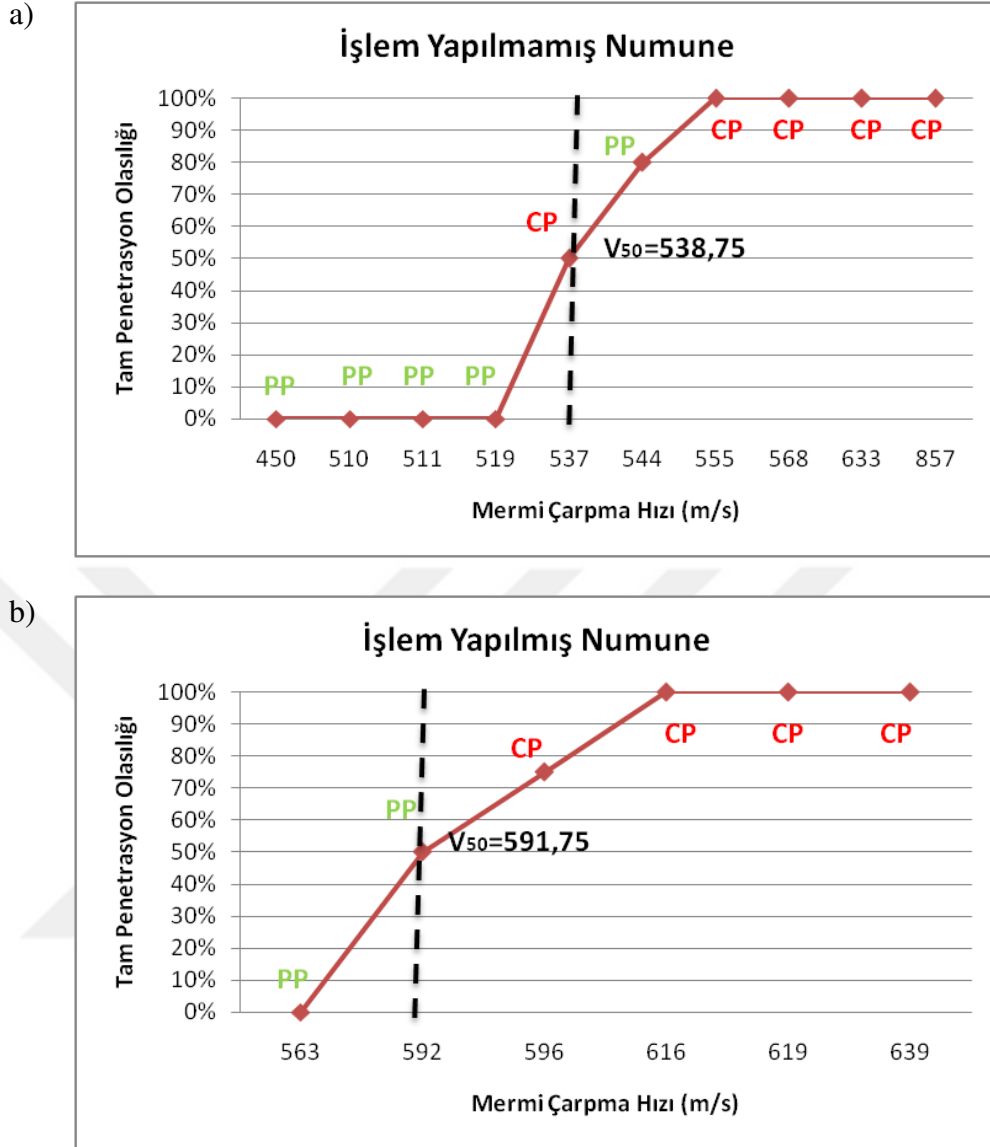
|                 | Atış No | Çekirdek Ağırlığı<br>(Grain) | Barut Ağırlığı<br>(Grain) | Hız<br>(m/s) | Sonuç |
|-----------------|---------|------------------------------|---------------------------|--------------|-------|
| Tempersiz       | 1       | 63,10                        | 23,32                     | 857          | CP    |
|                 | 2       | 63,30                        | 17,70                     | 633          | CP    |
|                 | 3       | 63,20                        | 12,54                     | 450          | PP    |
|                 | 4       | 63,06                        | 15,66                     | 568          | CP    |
|                 | 5       | 63,00                        | 14,18                     | 510          | PP    |
|                 | 6       | 63,04                        | 15,00                     | 511          | PP    |
|                 | 7       | 63,00                        | 15,30                     | 555          | CP    |
|                 | 8       | 62,96                        | 15,18                     | 544          | PP    |
|                 | 9       | 62,20                        | 15,20                     | 519          | PP    |
|                 | 10      | 62,90                        | 15,44                     | 537          | CP    |
| 1. kat temperli | 11      | 63,22                        | 15,50                     | 563          | PP    |
|                 | 12      | 63,06                        | 16,84                     | 592          | PP    |
|                 | 13      | 63,30                        | 17,24                     | 616          | CP    |
|                 | 14      | 63,24                        | 17,18                     | 639          | CP    |
|                 | 15      | 63,20                        | 16,88                     | 596          | CP    |
|                 | 16      | 63,10                        | 16,62                     | 619          | CP    |

Buna göre numunelerin  $V_{50}$  değerini bulmaya yönelik hesaplamalar Denklem 5.1’de gösterilmiştir.

$$V_{50} = (555 + 544 + 519 + 537)/4 = 538,75 \text{ m/s} \quad (5.1)$$

$$V_{50} = (563 + 592 + 616 + 596)/4 = 591,75 \text{ m/s}$$

Değerlerin daha net anlaşılabilmesi amacı ile hız değerlerinin grafiksel olarak numune üzerindeki tam penetrasyon olasılığı Şekil 5.4 ‘de verilmiştir.



**Şekil 5.4.** (a) Kimyasal temper işlemine tabi tutulmuş ve (b) tutulmamış numunelere ait çarpışma hızına karşılık gelen tam penetrasyon olasılığı

Numunelerin, merminin kinetik enerjisinden yola çıkarak enerji absorbe etme yeteneklerine ilişkin hesaplamalar Denklem 5.2’de verilmiştir.

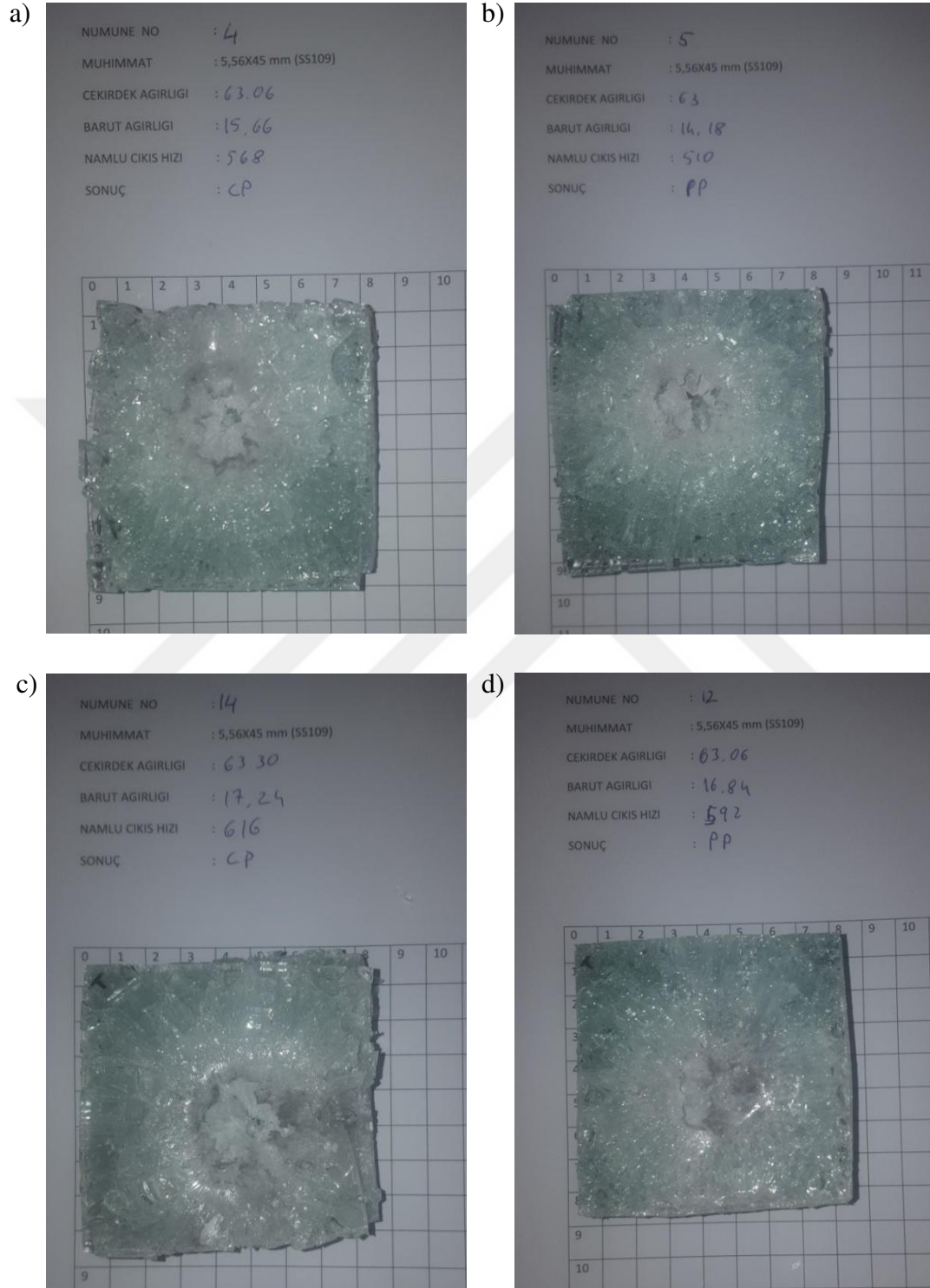
$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

$$E = \frac{1}{2} \times 0,00408 \times 538,75^2 = 592 \text{ J} \quad (5.2)$$

$$E = \frac{1}{2} \times 0,00408 \times 591,75^2 = 714 \text{ J}$$

Burada çarpışma sonucu oluşan enerji absorpsiyonu  $E$ , mermi çekirdeğinin kilogram cinsinden ağırlığı  $m$ ,  $V_{50}$  hızları  $v$  olarak alınmıştır.

Balistik test sonrası numuneler Görsel 5.2’de verilmiştir.



**Görsel 5.2.** (a) Tam delinme ve (b) kısmi delinme görülmüş işlem yapılmamış numune. (c) Tam delinme ve (d) kısmi delinme görülmüş kimyasal iyon işlemine tabi tutulmuş numune

### 5.3. Tartışma ve Öneriler

- Yapılan çalışmalar sonucunda kimyasal işlem yapılmamış numuneler ve yapılmış numunelerde sertlik değeri olarak önemli miktarda bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Sabit sıcaklıkta en büyük sertlik değeri 1 gün süre ile işlem yapılmış numunelerde gözlemlenmiş, artan süre ile beraber sertlik değerinde düşüş yaşanmıştır.
- Sabit sıcaklıkta en büyük eğme mukavemeti değeri 16 saat süre ile işlem yapılmış numunelerde gözlemlenmiş ve 190,49 MPa olarak ölçülmüştür. Artan süre ile beraber eğme mukavemetinde düşüş gerçekleşmiştir.
- EDX analizleri  $K^+$  iyonunun 35  $\mu m$  malzeme içerisine nüfuz ettiğini aynı zaman malzeme içlerinden yüzeye doğru gidildikçe ise  $Na^+$  iyon konsantrasyonunda düşüş olduğunu göstermektedir. Yapılan literatür çalışmaları (bkz. Şekil 3.4.) ile kıyaslandığında 420 °C ve 460 °C arasında 25 ila 60  $\mu m$  penetrasyon görülmesi gerektiği bu sonucu destekler bir biçimde ortaya koymaktadır.
- Gerilim-gerinim grafiğinin altındaki alan da arttığı için toklukta da artış olacaktır fakat bu artışlar mukavemet artışı ile kıyaslandığında çok az olacaktır. Zaten VARSHNEYA, AK. [49] prosesin isminin kimyasal mukavemet kazandırma olmasının sebebi de bu olarak tanımlamıştır.
- Proses devam edildiğinde ise eğilme mukavemetinin düştüğü açıkça görülmektedir. Mukavemet değerinde artış gözlemlenmeyip beklenin aksine düşmesinin sebebi bir zaman sonra gerinim rahatlaması hızının iyon difüzyon hızını geçmesiyle açıklanabilir.
- Kimyasal iyon değişimi için kurulan deney düzeneğinde parametre olarak yalnızca zaman değişkeni olarak ele alınmış, bunun yanında kullanılan camın bileşimi, tuz banyosunun konsantrasyonu ve işlem sıcaklığı gibi parametreler sabit tutulmuştur. Daha sonra yapılabilecek çalışmalar için bu parametreleri de değişken olarak ele almak kimyasal iyon değişim performansı üzerine olumlu bir katkı sağlayacaktır.
- Balistik testler sonucunda ise soda-kireç camı kimyasal temperleme yöntemiyle mukavim hale getirilip kurşungeçirmez cam olarak kullanıldığında balistik yeteneği bakımından %17 daha fazla performans gösterdiği görülmüştür. Bu oran kimyasal iyon değişim süreci üzerinde daha fazla yoğunlaşıp uygun sıcaklık-



zaman-kompozisyon parametrelerini oluřturarak daha da artırılabilceęi dűőűnűlmektedir.

- Yapılan numunelerin sadece saldırı yűzeyine denk gelen camlar iyon deęiőim iőlemine tabi tutulmuőtur. Bu iőlem diğer katmanlar ięin de yapılırsa balistik performansı artıracadı tahmin edilmektedir.
- İyon deęiőim tankı boyut sınırından dolayı lamine cam en fazla 50x50 mm boyutlarında űretilibilmiőtir. Daha bűyűk ebatlarla geręekleőtirilecek balistik testler sonucu daha gűvenilir veriler elde edilecektir.
- Balistik ęarpıőma sonucu kimyasal iyon iőlemine tabi tutulmuő camlarda ısı temperli camlarda olduęu gibi patlama ve daęılma gűrűlmemiő, normal kırılma ve ęatlak ilerlemesi gűrűlműőtur. ęalıőmanın sonucuna bakarak kimyasal iyon deęiőimine tabi tutulmuő camları ticari olarak balistik cam gibi kullanmak maliyet-performans aęısından umut vaat etmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] Atapek, H., Karagöz, Ş., Yılmaz, A., ‘Zırh Çelikleri ve Geliştirilmesi’, 3.Savunma Teknolojileri Kongresi, ODTÜ-Ankara, 2006
- [2] Ness, L.S. 2011. Jane’s Ammunition Handbook 2011-2012, 20th Edition, edited by A.G. Williams. Alexandria, Va,: Jane’s Information Group
- [3] Chen, X; Chaudhry, I. Ballistic protection. Elsevier Ltd, Oct. 1, 2005. 529-556 p. ISBN: 9781855739215.
- [4] Talladay, TG; Templeton, DW. *Glass Armor - An Overview. International Journal of Applied Glass Science.* 5, 4, 331-333, Dec. 2014. ISSN: 20411286.
- [5] Mercier B. (2009, 6 Haziran), *Transparent Armour The New Challenges, Defence Technology Review*, s.20.
- [6] Valpolini, P. Weight-Performance-Cost: *The golden triangle of transparent armour solutions. Armada International.* 38, 1, 16-25, Feb. 2014. ISSN: 02529793.
- [7] Mittemeijer, E. J. (2011). Fundamentals of Materials Science. [electronic resource] : The Microstructure–Property Relationship Using Metals as Model Systems. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] Ashby, M. F., Cebon, D., & Shercliff, H. (2007). Materials : engineering, science, processing and design. Amsterdam : Butterworth-Heinemann, 2007.
- [9] Callister, J.W.D. (2007). *Materials Science and Engineering An Introduction.* USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Karlsson, S 2012, 'Modification of Float Glass Surfaces by Ion Exchange', Linnaeus University, Doctoral dissertation, School of Engineering, Kallered, 2012.

- [11] Orhun, CH., *Oksinitrür camların kızılötesi geçirgenliklerinin iyileştirilmesi*, Anadolu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [12] [Le, B. E. (2014). *Glass : mechanics and technology*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>]
- [13] Shelby, JE. Introduction to glass science and technology / James E. Shelby. Cambridge : Royal Society of Chemistry, c2005., 2005. ISBN: 0854046399. PP168, 189-192
- [14] Pelleg, J. (2014). *Mechanical Properties of Ceramics. [electronic resource]*. Cham : Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2014.
- [15] Karlsson, S, Jonson, B, Stalhandske, C. (2010). *The Technology of Chemical Glass Strengthening – A Review*. European Journal of Glass Science and Technology Part a Glass Technology. 51. 41-54.
- [16] Lacourse, W. C. How surface flaws affect glass strength. Glass Ind., 1987, 68 (7),14–23.
- [17] Akimova, E.M. and O.P. Barinova, Diffusion coloration of industrial thermally polished glass with solid-phase copper-containing reagents. Glass and ceramics, 2008. 65(9): p. 344.
- [18] Donald, I. W. Review Methods for improving the mechanical properties of oxide glasses. J. Mater. Sci., 1989, 24, 4177–208.
- [19] Trier F. (2007). The glass surface and ways of its modification. Laboratory of measurement Technique Fachhochschule, München, Germany.
- [20] Bartholomew, R. F. & Garfinkel, H. M. Chemical strengthening of glass. In Glass Science and Technology. Vol. 5. Elasticity and Strength in Glasses. 1980.
- [21] Ürsel, K; Özgül, F. Investigation of impact characteristics of tempered vehicle and vessel glasses. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 45, 1, 26-38, Jan. 1, 2014. ISSN: 09335137.

- [22] Gulati, S. T. Frangibility of tempered soda-lime glass sheet. In Glass Processing Days. Tampere, Finland, Corning Research, Corning Glass Works, 1997.
- [23] Donald, I. W. Review Methods for improving the mechanical properties of oxide glasses. *J. Mater. Sci.*, 1989
- [24] Grujicic, M; Bell, W; Pandurangan, B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems. *Materials and Design*. 34, 808-819, Jan. 1, 2012. ISSN: 0261-3069.
- [25] Grujicic, M; Pandurangan, B; Coutris, N. A Computational Investigation of the Multi-hit Ballistic-protection Performance of Laminated Transparent-armor Systems. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Country of Publication: USA., 21, 6, 837-848, June 1, 2012.
- [26] Alil, L. Theoretical study on adhesives used in ballistic protection structures and transparent armor. *Buletin Stiintific*. 20, 1, 5-10, Jan. 2015. ISSN: 12245178.
- [27] Strauburger, E. Ballistic testing of transparent armour ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 29, Special Issue on Transparent Ceramics, 267-273, Jan. 1, 2009. ISSN: 0955-2219.
- [28] Bless, S; Tolman, J. Impact strength of glass and glass ceramic. *AIP Conference Proceedings*. 1195, 1, 1421-1424, Dec. 28, 2009. ISSN: 0094243X.
- [29] Wang, S; et al. Transparent ceramics: Processing, materials and applications. *Progress in Solid State Chemistry*. Country of Publication: UK., 41, 1, 20-54, May 1, 2013.
- [30] Krell, A; Klimke, J; Hutzler, T. Advanced spinel and sub- $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  for transparent armour applications. *Journal of the European Ceramic Society*. 29, Special Issue on Transparent Ceramics, 275-281, Jan. 1, 2009. ISSN: 0955-2219.
- [31] Ramisetty, M; Sastri, S. Transparent polycrystalline materials resist bullets: capable of stopping 50-caliber, armor-piercing rounds, ALON and Spinel are hard and durable transparent polycrystalline materials manufactured using powder

- based processes. *Advanced Materials & Processes*. 10, 25, 2015. ISSN: 0882-7958.
- [32] Klement, R., Rolc, S., Mikulikova, R., & Krestan, J. (2008). Transparent armour materials. *Journal Of The European Ceramic Society*, 28(Engineering Ceramics '07: From Engineering To Functionality), 1091-1095. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.036
- [33] Shah, QH. Impact resistance of a rectangular polycarbonate armor plate subjected to single and multiple impacts. *International Journal of Impact Engineering*. 36, 1128-1135, Jan. 1, 2009. ISSN: 0734-743X.
- [34] Shah, QH; Abakry, YA. Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates. *International Journal of Impact Engineering*. 35, 1244-1250, Jan. 1, 2008. ISSN: 0734-743X.
- [35] Dorogoy, A; Rittel, D; Brill, A. Experimentation and modeling of inclined ballistic impact in thick polycarbonate plates. *International Journal of Impact Engineering*. Country of Publication: UK., 38, 10, 804-814, Oct. 1, 2011.
- [36] Walley, S; et al. The effect of temperature on the impact behaviour of glass/polycarbonate laminates. *International Journal of Impact Engineering*. Country of Publication: UK., 30, 1, 31-53, Jan. 1, 2004.
- [37] Luo, Z; et al. Transparent oxynitride glasses: Synthesis, microstructure, optical transmittance and ballistic resistance. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 378, 45-49, Oct. 15, 2013. ISSN: 0022-3093.
- [38] Hassoun F. M., Strengthening Glass for Bullet Impact, *Engineering College, Materials Engineering Departments, Babylon University*
- [39] Kistler, S.S., "Stresses in Glass Produced by Non-uniform Exchange of Monovalent Ions," *J. Am. Ceram. Soc.*, 45 [2] 59–68 (1962).
- [40] Acloque, P. and J. Tochon, "Measurement of Mechanical Resistance of Glass after Reinforcement," *Colloquium on Mechanical Strength of Glass and Ways of*

- Improving It, September 25–29, 1961, Florence Italy. Union Scientifique Continentale du Verre, Charroi, Belgium, pp 687–704, 1962.
- [41] Corning' Gorilla Glass brings King Kong glass strength to high-tech toys. American Ceramic Society Bulletin, 2010. 89(8): p. 41-42.
  - [42] Geithe, A., Touching Allowed, in The Schott Technology Magazine: Solutions. 2011, p.28-29.
  - [43] GY, R. Review: Ion exchange for glass strengthening. Materials Science & Engineering B. 149, E-MRS 2007 Fall Conference Symposium F: The binary ion exchange process in materials science and chemistry: application, characterization and modelling., 159-165, Jan. 1, 2008. ISSN: 0921-5107.
  - [44] Tang Z. et al “High-speed camera study of Stage III crack propagation in chemically strengthened glass” , 2014. 18
  - [45] Glass: science and technology, Vol. 5, D.R. Uhlmann and N.J. Kreidl, Academic Press, New York, 1980
  - [46] A.K. Varshneya, Int. J. Appl. Glass Sci. 1 (2010) 131.
  - [47] Fu, AI; Mauro, JC. Mutual diffusivity, network dilation, and salt bath poisoning effects in ion-exchanged glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 363, 199-204, Mar. 1, 2013. ISSN: 0022-3093.
  - [48] Cooper, A.R. and D.A. Krohn, “Strengthening of Glass Fibers II: Ion Exchange,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 52 [12] 665–669 (1969).
  - [49] Varsneya, AK. The physics of chemical strengthening of glass: Room for a new view. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 356, 12th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids (PNCS 12), 2289-2294, Jan. 1, 2010. ISSN: 0022-3093.
  - [50] M.D. Ingram, J.E. Davidson, A.M. Coats, E.I. Kamitsos, J. Kapoutsis, Origins of anomalous mixed-alkali effects in ion-exchanged glasses, *Glastech. Ber. Glass Sci. Technol.* 73 (4) (2000) 89104.

- [51] Varsneya, AK. Chemical Strengthening of Glass: Lessons Learned and Yet To Be Learned. *International Journal of Applied Glass Science*. 1, 2, 131-142, June 2010. ISSN: 20411286
- [52] Sane, A.Y. and A.R. Cooper, “Stress Buildup and Relaxation During Ion Exchange Strengthening of Glass,” *J. Am. Ceram. Soc.* , 70 [2] 86–89 (1987).
- [53] ASTM C1327-08. (2008). *Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics*, USA.
- [54] ASTM C1161-08. (2008). *Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature*. USA.

## ÖZGEÇMİŞ

Onur Savaşır

Yenibağlar Mah. Beraber Sok. No:3/20

TEPEBAŞI/ESKİŞEHİR

+90 536 796 6019

onursavasir@hotmail.com



### **Kişisel Bilgiler**

Medeni Durumu : Bekar  
Uyruk : Türkiye  
Askerlik Durumu : Yapıldı  
Doğum Tarihi : 03.10.1988  
Doğum Yeri : Tarsus/MERSİN

### **Eğitim Bilgileri**

Lise : Niğde Anadolu Öğretmen Lisesi 2002-2006  
Lisans : Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü (İngilizce) 2008-2012  
Y. Lisans : Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tezli Yüksek Lisans 2014-2019

### **İş Tecrübesi**

#### **Eczacıbaşı Yapı Gereçleri**

05.2016 –06.2018 | Eskişehir - Türkiye | Üretim Uzm. Yrd.

#### **Nurol Teknoloji A.Ş.**

03.2015 –05.2016 | Ankara - Türkiye | Proje Mühendisi

#### **SECANT Teknoloji Geliştirme A.Ş.**

12.2013-11.2014 | Eskişehir - Türkiye | Ar-Ge Mühendisi

#### **TEI Tusaş Engine Industry A.Ş.**

07.2012 - 08.2012 | Eskişehir - Türkiye | Stajyer

### **Bilgisayar Yetkinliği**

- MS Office İyi
- SolidWorks İyi
- Catia Orta
- AutoCAD Orta
- SAP ve MS Dynamics