

T.C
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ORTAK YÜKSEK LİSANS PROGRAMI



**NADİR TOPRAK ELEMENTLERİYLE KATKILANDIRILMIŞ
BORAT CAMLARININ FİZİKSEL VE RADYASYON ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İlyas İZGÜDEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ-2023

T.C
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ORTAK YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**NADİR TOPRAK ELEMENTLERİYLE KATKILANDIRILMIŞ
BORAT CAMLARININ FİZİKSEL VE RADYASYON ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İlyas İZGÜDEN
190020008

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ-2023

T.C
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ORTAK YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİYLE KATKILANDIRILMIŞ BORAT
CAMLARININ FİZİKSEL VE RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

İlyas İZGÜDEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 11/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza

Doç.Dr.Uğur ÇALIGÜLÜ
(Fırat Üniversitesi)

BAŞKAN

İmza

Doç.Dr.Yahya TAŞGIN
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza

Doç.Dr.Gökhan KAHRAMAN
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No:

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

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 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.

İlyas İZGÜDEN

İmza
Danışman
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında emeği geçen başta sürekli desteğini ve varlığını hissettiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yahya TAŞGIN'a, Harran Üni. Mak. Müh. Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Bülent AKTAŞ hocam ve Arş. Gör. Sayın Abuzer AÇIKGÖZ olmak üzere, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü yönetimi ve çalışanlarına, tezi değerlendiren ve katkı sağlayan kıymetli jüri üyelerine, hiçbir konuda bana desteğini esirgemeyen eşim Elif İZGÜDEN'e, Kızlarım Ayşe Yaren ve Feyza Nur'a, son olarak hayatımın her alanında yanımda olan, her zaman kuvvet aldığım, kendileri okuma-yazma bilmedikleri halde evlatlarını okutmak için büyük çabalar sarfeden ve maalesef Yüksek Lisans eğitime başlamış olduğum 2019 yılında onbir gün arayla kaybettiğim merhum babam H.Reşit İZGÜDEN ve Merhum annem H.Sultan İZGÜDEN'e sonsuz teşekkür ederim.

İlyas İZGÜDEN
TUNCELİ- 2023

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	.V
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Camlar.....	1
1.2. Cam çeşitleri	4
1.2.1. Silika camlar	4
1.2.2. Borat camlar.....	5
1.2.3. Fosfat camlar	7
1.2.4. Doğal camlar.....	9
1.2.5. Kalkojenit camlar.....	9
1.2.6. Metalik camlar	10
1.3. Camların özellikleri	12
1.3.1. Mekanik özellikler	12
1.3.2. Yapısal özellikler	15
1.3.2.1. X-ışını difraksiyonu (XRD	15
1.3.2.2. . Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Dönüşümlü FTIR)	17
1.3.3. Radyasyon özellikleri	128
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	22
3. TEZİN AMACI VE ÖNEMİ	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
4.1. Materyal	28
4.2. Yöntem	28
5. DENEYLER	31
5.1. Yoğunluk Ölçümü	31

5.2. XRD Analizi	32
5.3. Sertlik, Kırılma Toklukları ve Gevrekliklerin Belirlenmesi	32
5.4. UV-Vis Spektroskopisi	34
5.5. FT-IR analizi.....	35
5.6. Radyasyon zırhlama parametreleri	35
5.6.1. Kütle zayıflama katsayıları	38
5.6.2. Ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı	38
5.6.3. Etkili atom numarası.....	38
5.6.4. Elektron yoğunluğu	38
5.6.5. Hızlı nötron giderme kesiti	39
5.6.6. Maruz kalma oluşturma faktörü.....	39
5.6.7. Kütle durdurma gücü ve öngörülen menzil	39
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
6.1. Yoğunluk ve Molar Hacim	39
6.2. Camların mekanik özellikleri	41
6.3. X-Işını kırınım (XRD) analizi	42
6.4. Uv-vis Analizleri	43
6.5. FT-IR analizleri	43
6.6. Radyasyon özelliklerinin analizi.....	44
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
7.1. SONUÇ.....	53
7.2. ÖNERİLER.....	54
8. KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kartanesi obsidiyeni (Rasmussen, 2012)	1
Şekil 1.2. Tipik silica bağ yapısı (URL-1, 2022)	2
Şekil 1.3. Silika camının teorik iki boyutlu görüntüsü	5
Şekil 1.4. Boroksol halkası	6
Şekil 1.5. Erbiyum katkılı fosfat camlar	8
Şekil 1.6. Kalkojenit camların uygulama alanları	10
Şekil 1.7. Metalik bir camdan üretilmiş bir dişli	11
Şekil 1.8. Bir malzemenin tipik gerilme-gerinme grafiği	13
Şekil 1.9. Tipik bir ultrasonik ölçüm cihazı	14
Şekil 1.10. Vickers sertlik yöntemi ile alınmış bir çentik izi	14
Şekil 1.11. XRD çalışma prensibi	16
Şekil 1.12. FTIR çalışma prensibi	17
Şekil 1.13. İlk röntgen görüntüsü	19
Şekil 1.14. Radyasyon uygulaması için kullanılan bir eldiven hücresi	21
Şekil 4.1. Cam kompozisyonu için tozların tartım işlemi.	29
Şekil 4.2. Cam eriyiğın şekillendirme işlemi	30
Şekil 4.3. Üretimi yapılmış camlar	30
Şekil 5.1. Arşimet yoğunluk kiti	31
Şekil 5.2. a) Zımparalama ve parlatma cihazı b) Sertlik ölçüm cihazı	33
Şekil 5.3. Sertlik ölçümü işlemi yapılan numuneler	34
Şekil 5.4. UV-Vis spektrometresi	35
Şekil 5.5. Deney düzeneği	36
Şekil 5.6. Deney düzeneği geometrisi	37
Şekil 5.7. Ba ¹³³ kaynağı P2 ve P4 örnekleri ile elde edilen tipik spektrumlar.	31
Şekil 6.1. Yoğunluk, molar hacim grafiği	41
Şekil 6.2. Sertlik ve kırılma tokluğu grafiği	42
Şekil 6.3. Numunelerin X-ışını kırınım desenleri	42
Şekil 6.4. Numunelerin Uv-Vis spektrumları	43
Şekil 6.5. FT-IR grafikleri	44
Şekil 6.6. Hazırlanan cam örneklerinin LAC değerleri	45
Şekil 6.7. Hazırlanan cam örneklerinin HVL değerleri	46
Şekil 6.8. Hazırlanan cam örneklerinin MFP değerleri	46

Şekil 6.9. Hazırlanan cam örneklerinin Z_{eff} değerleri.....	47
Şekil 6.10. Hazırlanan cam örneklerinin N_{el} değerleri.	47
Şekil 6.11. Hazırlanan cam örneklerinin FAST değerleri	48
Şekil 6.12. P1 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi.....	48
Şekil 6.13. P2 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi.....	49
Şekil 6.14. P3 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi.....	49
Şekil 6.15. P4 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi.....	49
Şekil 6.16. P5 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi.....	50
Şekil 6.17. Araştırılan camlar için kinetik enerjinin bir fonksiyonu olarak proton kütle durdurma güçlerinin (MSP) ve öngörülen aralığın (PR) değişimi.....	50
Şekil 6.18. Araştırılan camlar için kinetik enerjinin bir fonksiyonu olarak alfa kütlesi durdurma güçlerinin (MSP) ve öngörülen aralığın (PR) değişimi.....	51

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. İlk camlara renk vermek için kullanılan metaller	4
Tablo 4.1. Cam üretimi için kullanılan malzemeler.....	28
Tablo 4.2. Cam kompozisyon oranları.....	28
Tablo 5.1. Cam kompozisyon element ağırlıkları.....	35
Tablo 6.1. Numunelerin fiziksel özellikleri	40
Tablo 6.2. Numunelerin mekanik özellikleri	41
Tablo 6.3. Numunelerin deneysel ve teorik kütle zayıflama katsayıları (MAC)....	52



SİMGELER VE KISALTMALAR

M.Ö.	: Milattan önce
M.S.	: Milattan sonra
SiO₂	: Silisyum dioksit
SiO₄	: Silika
Na₂CO₃	: Sodyum karbonat
Fe₂O₃	: Demir oksit
Cr₂O₃	: Krom oksit
CoO	: Kobalt oksit
Pb₃O₄	: Kurşun oksit
Mn₂O₃	: Mangan oksit
Si	: Silisyum
O	: Oksijen
AX₂	: A, ağ katyonları; X anyonlar
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
H₃BO₃	: Borik asit
B₂O₃	: Borik oksit
H₂O	: Su
R	: Radikal bileşik
CO₃	: Kalsiyum karbonat
CO₂	: Karbon dioksit
Nd	: Neomidyum katkılı
P₂O₅	: Fosfor pentoksit
IR	: Kızılötesi
MHz	: Megahertz
Ba₂TiSi₂O₈	: Fresnoit
GPa	: Gigapaskal
mSv	: Mili sievert
K_α	: K kabuğundaki alfa ışınımı
K_β	: K kabuğundaki beta ışınımı
ALARA	: Makul olarak gerçekleştirilebilecek ölçüde düşük (As Low As Reasonably Achievable)
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu
ICRP	: Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu
KAK	: Kütle azaltma katsayısı:
KeV	: Kilo elektron volt
kV	: Kilovolt
LAK	: Lineer azaltma katsayısı
mA	: Miliamper
MeV	: Mega elektron volt
V_m	: Molar hacim
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
I	: Hedef malzemeden çıkan foton şiddeti
I'	: Spesifik gama ışını sabiti
I₀	: Hedef numuneye gelen foton şiddeti
UV	: Mor ötesi
VIS	: Görünür bölge
Z_{etk}	: Etkin atom numarası

X	: Mesafe
x	: Numune kalınlığı
XRD	: X-ışınları difraksiyonu
α	: Alfa
β	: Beta
β^+	: Pozitron
γ	: Gama



ÖZET

Bu çalışmada Ülkemizde yer alan zengin bor madeni rezervinin daha verimli kullanılması amacıyla ana maddesi bor oksit olan ve içerisine yine ülkemizde ham madde olarak bulunan ve yeni keşifler ve incelemelere konu nadir toprak elementleri katkılanarak hazırlanan ve kurşun katkılı camlara alternatif olabilecek ve yüksek teknoloji ürünlerinde (Akıllı cihaz ekranları, uzay ve sağlık teknolojileri gibi) kullanılabilecek yeni nesil radyasyon kalkanlayıcı camlar üretmektir.

Üretimi yapılan ürünlerin öncelikle XRD yöntemi ile faz tanımlaması yapılmış ve numunelerin amorf yapısına sahip cam olduğu belirlenmiştir.

Üretilen numunelerin FTIR yöntemi ile kimyasal bağları ve moleküler yapıları araştırılarak düzgün bağlar oluşturan camlar olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen numunelerin UV-Vis Spektroskopisi yöntemi ile ışık geçirgenliği ve soğurma spektrumları belirlenerek normal cam karakteri gösterdiği belirlenmiştir.

Camların camsı özelliklerinin iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiş ve mekanik özelliklerden yoğunluk, sertlik, kırılma toklukları ve gevreklikleri incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Cam örneklerinin radyasyon zırlama ölçümleri Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Prof. Dr. Wolf Weyrich Yüksek Enerji Spektroskopisi Laboratuvarı'nda bulunan deney düzeneği kullanılarak yapılmış ve cam örneklerinin kurşun katkılı camlara alternatif olabilecek seviyede radyasyon kalkanlama yaptığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı yapılan nadir toprak elementleri katkılı borat camlarda radyasyon zırlamanın yanı sıra mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesinde yardımcı olacak bir yayın (Tez) oluşturarak bilimsel çözümler sunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Cam, Mekanik Özellikler, Radyasyon koruması, Nadir toprak elementi katkılı camlar, borat camlar

ABSTRACT

Analysis of Elastic, Mechanical, Optical and Radiation Shielding Properties of Rare Earth Elements Doped Borate Glass Tunceli

In this study, in order to use the rich boron mineral reserves in our country more efficiently, the main material of which is boron oxide and is prepared by adding rare earth elements, which is also a raw material in our country and which is the subject of new discoveries and investigations, can be an alternative to lead added glasses and can be used in high technology products (Smart device). to produce new generation radiation shielding glasses that can be used (such as screens, space and health technologies).

First of all, the phase definition of the manufactured products was made by XRD method and it was determined that the samples were glass with amorphous structure.

The chemical bonds and molecular structures of the produced samples were investigated by the FTIR method and it was determined that they were glasses that formed smooth bonds.

The light transmittance and absorption spectra of the obtained samples were determined by UV-Vis Spectroscopy method and it was determined that they showed normal glass character.

It was determined that the glassy properties of the glasses gave good results and the mechanical properties such as density, hardness, fracture toughness and brittleness were examined and the results were evaluated.

Radiation shielding measurements of glass samples were made by Atatürk University, Faculty of Science, Department of Physics. Dr. It was made by using the experimental setup in the Wolf Weyrich High Energy Spectroscopy Laboratory and it was determined that the glass samples had radiation shielding at a level that could be an alternative to lead-doped glasses.

The aim of this study is to present scientific solutions by creating a publication (Thesis) that will help in improving the mechanical and physical properties of borate glasses with rare earth elements, as well as radiation shielding.

Keywords: Glass, Mechanical Properties, Radiation protection, Rare earth element added glasses, borate glasses

1. GİRİŞ

1.1. Camlar

Camlar görünüşte şeffaf olan inorganik katı ve kristal olmayan malzemelerdir. Arkeolojik kanıtlar kullanarak cam kullanımının izi tarih boyunca sürülebilir (Pye ve ark., 1972). Bazı silahlar ve aletler, doğal olarak oluşan volkanik camdan yapılmıştır. Cam üretme yeteneğinden çok önce, ilk kabileler doğa tarafından oluşturulan camları keşfetmiş ve şekillendirmiştir. Obsidiyen adıyla da bilinen bu tür koyu renkli volkanik camlar, volkanik lavın ani soğumasından oluşan silika esaslı malzemelerdir (Shackley, 2013).

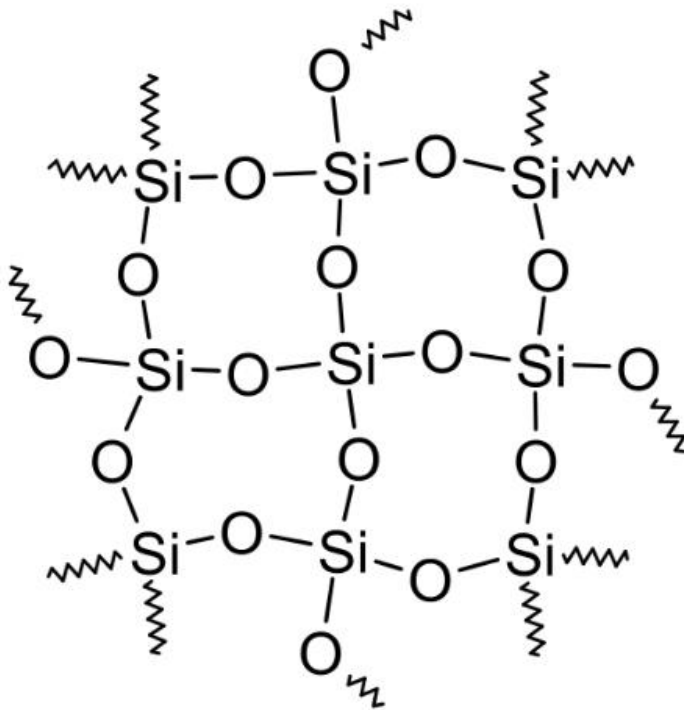


Şekil 1.1. Kartanesi obsidiyeni (Rasmussen, 2012)

Sentetik cam üretim teknolojisinin M.Ö. 3000'e kadar dayandığı düşünülmektedir (Macfarlane ve Martin, 2002). Cam üretimi çeşitli uygulamalar için hem kimyasal bileşimin hem de tekniklerin sürekli geliştirilmesiyle yavaş yavaş büyüdü. Bu gelişme Roma döneminde oldukça ilerlemiş ve M.S. birinci ila dördüncü yüzyıllar arası genellikle Camın Birinci Altın Çağı olarak tanımlanmıştır (Mohajerani ve ark., 2017; Pye ve ark., 2005). Camın üretimi ve kullanımı Roma İmparatorluğu döneminde tarihteki diğer zamanlarda

olduğundan daha yaygın hale gelmiş ve cam üretimi Roma egemenliği altındaki her ülkede gerçekleşmiştir (Mirti ve ark., 1993).

Cam, bu dönemde kullanılan diğer malzemelerden farklı bir yapıya sahiptir. Erimiş cam hemen hemen her şekle dökülebilir ve soğuduktan sonra bu şekli korur, bu da onu çok yönlü bir malzeme haline getirebilir. Cam, yüksek sıcaklıkta sıvı iken, oda sıcaklığında aşırı soğutulmuş sıvı veya amorf katı olarak karakterize edilir (Berthier ve Biroli, 2011). Yani cam katıdır, ancak düzensiz doğası nedeniyle oda sıcaklığında akamayacak kadar viskoz bir sıvıya benzer özelliklere sahiptir. Çoğu cam, ampirik bir SiO_2 formülü ile ağırlıklı olarak silikadan oluşur (Griscom, 1991). Silikanın bağ yapısı Şekil 2.'de verilmiştir. Doğal silikanın en yaygın şekli kuvarstır. Bununla birlikte, kuvars kristal bir katıdır ve düzenli tekrar eden kristal kafese sahiptir, camın ise makromoleküler yapısında düzenli bir tekrar yoktur ve bu nedenle sıvı haldeki bir madde gibi düzensiz bir yapıya sahiptir. Hem kristal hem de cam olan silikat katılar, SiO_4 tetrahedradan oluşan genişletilmiş üç boyutlu ağlardır, burada bitişik tetrahedranın oksijenleri, iki silikon arasında bir oksijen atomu bağlanacak şekilde birbirleriyle köşeleri paylaşırlar (Abhilash, ve ark., 2015).



Şekil 1.2. Tipik silica bağ yapısı (URL-1, 2022)

Camın birincil bileşeni olarak kullanılan silika kaynağı, tipik olarak ya sahil kumu ya da kuvars çakıllarından gelir (Jacoby, 1993). Bu tür silika kaynaklarının füzyonu tek başına bir cam hali ile sonuçlanabilirken, silikayı eritmek için gereken sıcaklık (1710 °C), eski ustaların kullandığı yöntemlerle elde edilemeyecek kadar yüksektir. Bu sorun, M.Ö. 2000 civarında, Mısır veya Mezopotamya'daki zanaatkarlar tarafından silikanın erime noktasının bir akış kullanılarak önemli ölçüde düşürülebileceğini keşfettiklerinde çözülmüştür. Akışın kaynağı, cürufu eritme sıcaklığında sıvı hale getirmek için eritme fırınına eklenen bir bileşenden oluşmaktadır (Hill ve ark., 2005). Eritme fırınının cürufu esas olarak silikatlar ve alüminatların (kaya, kum ve diğer mineraller) bir karışımından oluştuğu için, bunun silika füzyonu uygulamasını gerektirmekteydi. Bu da metalürji ile cam üretiminin doğuşu arasında güçlü bir bağlantıya ortaya koymuştur. İlk cam üreticileri tarafından kullanılan en yaygın akış maddesi sodaydı (sodyum karbonat veya Na_2CO_3) (Poling ve Yohe, 1933) ve uygulanması silikanın erime noktasını 100°C'nin altına düşürmekteydi.

Sodyum karbonat erime sıcaklığını düşürmesine rağmen sodyumun yüksek çözünürlüğünden dolayı cam malzemenin kimyasal olarak stabil olmasını da engellemekteydi. Bunu engellemek için üçüncü bir malzeme stabilizatör olarak kullanılmalıydı. Araştırmacılar bunu çözmek için kalsiyum veya magnezyum kullanmayı tercih ettiler. Böylece camın erime noktası 725 °C'ye kadar düşürülmüştü (Rehren, 2008). İlk camlar kalsiyum veya magnezyumun yanı sıra çok çeşitli istenmeyen safsızlıklar içermekteydi ve bu ek bileşenler, elde edilen camın özelliklerini çeşitli şekillerde etkilemekteydi. Safsızlıkların en büyük etkisi ortaya çıkan camların rengiydi. Antik çağda üretilen ilk camlar, esas olarak kumdaki veya akıdaki demir safsızlıkları nedeniyle nadiren renksizdi (Sayre ve Smith, 1961). Tüm kumlar, çok güçlü bir renklendirici olan ve genellikle cama açık mavi-yeşil bir renk veren belirli bir miktarda Fe_2O_3 içermekteydi (Lahlil ve ark., 2008). Demirin renklendirme etkisi başlangıçta kasıtsız olsa da ilk cam üreticileri çeşitli renkli camlar üretmek için bir dizi geçiş metali katkı maddesi geliştirmişlerdir. Bu geçiş metali tuzları, erimiş karışımın oluşumu sırasında metal oksitler üreterek elde edilen camın güçlü bir şekilde renklenmesini sağlamaktaydı (Rasmussen, 2008). İlk camlara renk vermek için kullanılan metaller Tablo 1.1'de gösterilmiştir. Renksiz camlar ise düşük demir içerikli ince kumun uygun miktarda seçilmesi ve manganez dioksit veya antimon gibi renk giderici maddelerin eklenmesiyle elde edilebilmiştir. Bu camlar hava kabarcığı içermediği sürece transparan bir görüntüye sahipti.

Tablo 1.1. İlk camlara renk vermek için kullanılan metaller

Renk	Metal grubu	Renk veren oksit
Yeşil	Krom	Cr_2O_3
Mavi	Kobalt	CoO
Kırmızı	Kurşun	Pb_3O_4
Sarı	Demir	Fe_2O_3
Mor	Mangan	Mn_2O_3

1.2. Cam çeşitleri

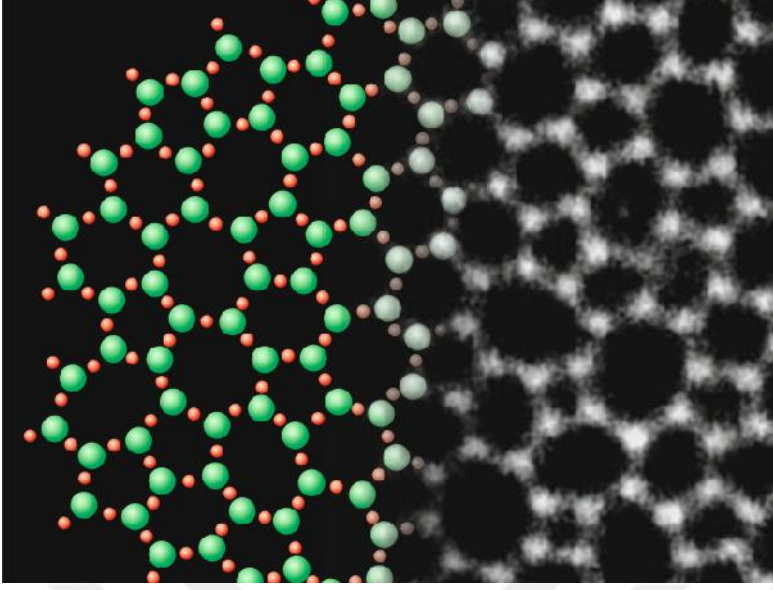
1.2.1. Silika camlar

Silikat camların üretimi en eski antik çağa kadar uzanır; ateşin kontrolünü takip eder ve coğrafi olarak değişen Tunç Çağı ile eşzamanlıdır. Silikat camları, isimlerini, oluşumlarını sağlayan silikon oksit (SiO_2) temel oksit bileşeninden alır. Basit kimyası nedeniyle silika camın yapısının basit olduğu düşünülebilir. Ancak aslında öyle bir karmaşıklık seviyesi sergiler ki, SiO_4 tetrahedral birimlerinin orta menzilli düzende üç boyutlu düzenlemeleri hakkında kesin bir fikir birliği mevcut değildir. Silika camının yapısını ortaya koyan ilk kişi Zachariasen'dır (1932). Bu modele göre, Si ve O yapısal bölgeleri enerjisel olarak eşdeğerdir ve Si ve O atomları, AX_2 camlarının oluşumunu yöneten dört kuralı takip ederek bu siteler arasında rastgele dağılır:

1. Sistem, A katyonları etrafında X anyonlarının üçgen veya tetrahedrasının oluşumunu sağlamak için yeterli X anyonu içerir.
2. Bu üçgen/tetrahedra köşelerinde apikal X anyonlarını paylaşır.
3. Belirli bir X anyonu yalnızca iki A katyonunu birbirine bağlar.
4. Üçgen/tetrahedra, yüzlerini veya kenarlarını değil, yalnızca köşelerini paylaşır (Musgraves ve ark., 2019).

Silika camda, bu model, birbirine bağlı dört yüzlü halkalardan ve kafeslerden oluşan üç boyutlu düzensiz bir ağın oluşumu şeklindedir. Huang ve ark., (2012) bu ağ yapısının Şekil 1.3' de göstermişlerdir.

Silika aslında Angell (1985) tarafından ortaya koyulan sıvıların güçlü-kırılgan biriminde bilinen en güçlü sıvıdır. Güçlü bir sıvı, viskozitesinin logaritması ile $T_g = T$ oranı arasında neredeyse doğrusal bir ilişki ile karakterize edilirken, kırılgan sıvılar bu doğrusallıktan güçlü bir sapma gösterirler.



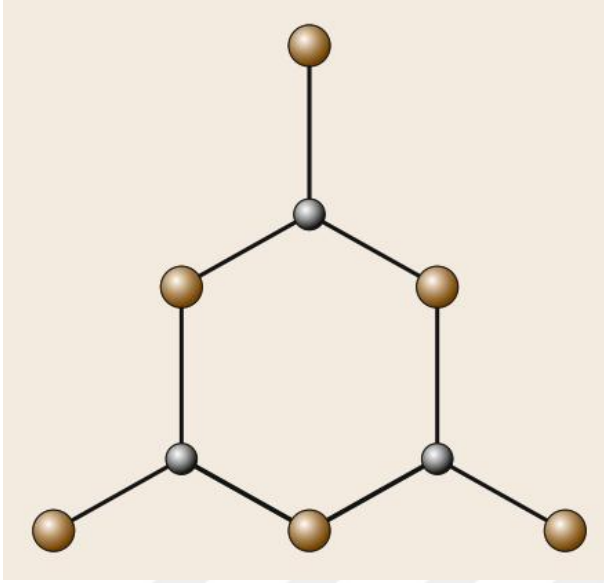
Şekil 1.3. Silika camının teorik iki boyutlu görüntüsü

Silika cam sadece SiO_2 'den oluşur ve çok az miktarda metalik safsızlık içerir. Bu camlar yalnızca görünür aralıkta değil, ultraviyole ve kızılötesini de kapsayan çok çeşitli dalga boylarında mükemmel iletim özelliklerine sahiptirler. Silika camlar kimyasal olarak son derece kararludur ve mükemmel kimyasal dirence sahiptirler. Ancak, hidroflorik asit, fosforik asit veya alkali çözeltilerle uzun süre kullanıldığı durumlarda, bu kimyasallar tarafından aşındırılabileninden dikkatli olunmalıdır (Hülsenberg ve ark., 2008).

1.2.2. Borat camlar

Borat camları hem bilimsel olarak ilginç hem de şaşırtıcı derecede pratiktir. Silikat bazlı camlara katkı maddesi olarak son derece faydalı olabilirler. Borat camların endüstride zengin ve uzun bir kullanım geçmişi vardır ve bilim çevrelerinde ilgi görmektedirler. Birçok ticari cam, katkı maddesi olarak bor oksit içerir. Bor oksit ilavesi, camlarda arzu edilen birkaç özelliğin oluşmasına izin verir; örneğin camın çalışma sıcaklığını kontrollü bir şekilde düşürebilir (Al-Hadeethi ve Sayyed, 2020). Borat sistemi, çeşitli yapı ve özellik sistemlerine iyi yanıt verdiğinden dolayı bilimsel çalışmalar için mükemmel bir sistemdir. Bu camlar, fizikğin birçok özelliğini yöneten dört koordinasyonlu bor fraksiyonunun borat anomalisine sahiptir. Dört koordinasyonlu borların niceliksel varlığı bir dizi yapısal teknik kullanılarak tespit edilebilir.

Bor oksit camı, borik asidin uygun bir pota içinde ısıtılmasıyla aşağıdaki reaksiyona göre (Denklem 1.1) kolayca oluşur. Klasik bir boroksol halkası Şekil 1.4’de gösterilmiştir (Musgraves ve ark., 2019).



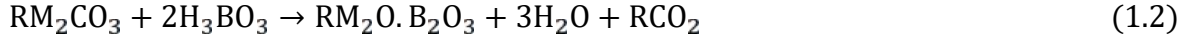
Şekil 1.4. Boroksol halkası

Bor oksit eriyiklerinin çok yüksek viskozitesi nedeniyle sistem 1000 °C’yi aşan sıcaklıklara getirilmelidir. Cam ancak bu koşulda potadan dökülebilir ve atmosferik basınç altında cam elde edilebilir (Rockett ve Foster, 1965). Bor oksit cam yapmak için platin gibi yüksek sıcaklıklara dayanma kabiliyeti ve inertliğe sahip potalar kullanılmalıdır. Platin potalarda aşırı modifiye edilmiş borat camları güvenilir bir şekilde yapılamaz ve camsı karbon gibi diğer pota malzemelerine ihtiyaç vardır.

Bor oksit camın yoğunluğu, hazırlama yöntemine ve tavlama koşullarına göre değişir ve tipik olarak 1.80-1.90 g/cm³ aralığındadır (Krogh-Moe, 1969). Kristal bor oksit ise oda sıcaklığında 2.46 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Bor oksit kristal olarak 450 °C’de erir ve kaynama noktası 1860 °C’dir (Kuo ve Du, 2022). Camsı geçiş sıcaklığı 200-300 °C aralığındadır.

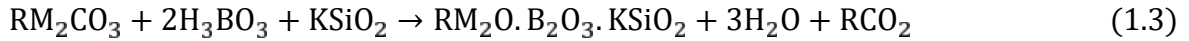
B³⁺ ve O²⁻, oksijenin bor ile iki koordineli olmasıyla kimyasal olarak üç koordineli bir bor iyonu oluşturmaktadır. Bu sp² hibridizasyonu, aslında bor oksidin hem kristal hem de camsı formları için görülen bor oksijen üçgenleri ile sonuçlanır. Bu borlu camların farklı

bileşen yapıları ile oluşabileceği manasına gelir. Bu manada ikili ve üçlü sistemlere sahip camlar üretebilmek mümkündür. Tüm oksit cam oluşturma sistemlerinde olduğu gibi, bor oksit, alkali oksit, alkali toprak oksit, ağır metal oksitler ve diğerleri gibi çeşitli bileşenlerin eklenmesiyle değiştirilebilir. Alkali borat camlar ikili sistemlere en tipik örnektir. Bu camları aşağıdaki reaksiyona göre üretmek mümkündür.



Modifiye edici oksidin bor okside molar oranı olan R tercih edilen bileşimsel ve yapısal parametredir. R cinsinden, çeşitli borat kısa menzilli birimlerin bileşimleri mevcuttur.

Üçlü sistemlere en güzel örnek borosilikat camlardır. Alkali borosilikat camların kullanım alanı oldukça geniştir. Pyrex'te, cam contalarda, yüksek silika içerikli camlarda, Vycor işleminde, büyük astronomik teleskoplarda, borat içeren biyoaktif camda ve nükleer atık immobilizasyonunda genel olarak kullanılırlar (Jean ve Fang, 2001; Hanneborg ve ark., 1991; Konon ve ark., 2022; Huang ve ark., 2013). Aşağıda üçlü sistem için örnek bir reaksiyon gösterilmiştir.



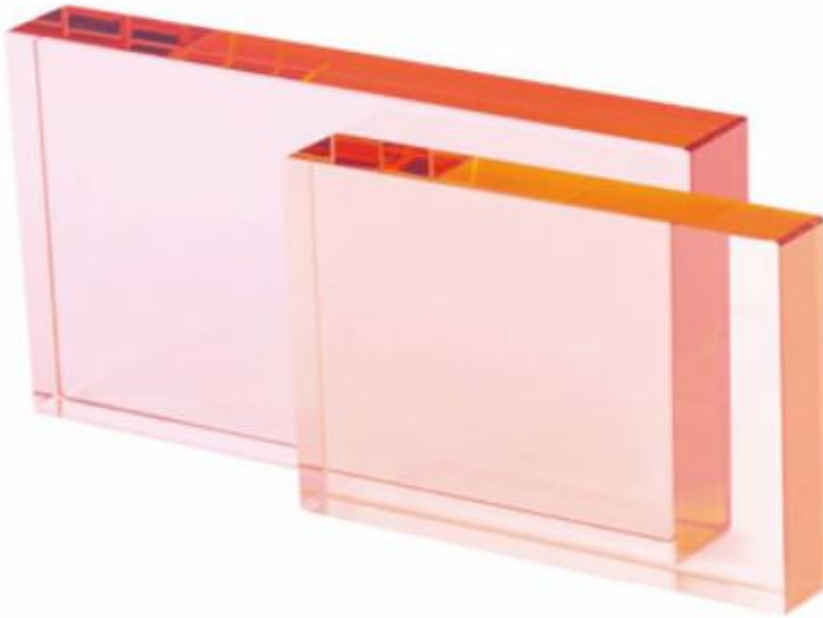
1.2.3. Fosfat camlar

P₂O₅ tabanlı camlar son yıllarda sürekli artan sayıda çalışmalardan dolayı parlak bir potansiyele sahiptirler (Alalawi ve ark., 2022). Karmaşık yapıları araştırmacıları çalışmalarını bu alana yönlendirmelerini sağlamıştır. Ek olarak Nd-lazer camlarının eritilmesi için kullanılan özel camlar gibi büyük ölçekte hazırlanmalarındaki ilgili zorluklar özel yöntemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Özellikle düşük kimyasal dayanıklılığa sahip oldukları bilinmektedir, ancak bileşimlerinin optimizasyonundaki ilerleme bunun çok rekabetçi olabileceğini göstermektedir ve bu bağlamda, nitrülenmelerinin bir sonucu olarak özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür (Pascual ve Durán, 1996). Fosfat camlarının genel olarak yalıtım ve lazer camları, biyomedikal camlar ve katı elektrolitler veya atıkların

depolanması gibi günümüzde önemini koruyan alanlarda kullanılmaktadırlar (Shoaib ve ark., 2021; Abo-Mosallam ve Mahdy, 2022).

Zachariasen'in (1932) çalışmasından bu yana, fosfat cam ağının, oksijenlerden en az birinin komşu tetrahedra ile köprü oluşturmeyen bir nokta oluşturduğu, yapı ve özelliklerinde önemli farklılıklara yol açan PO_4 birimlerinden oluştuğu bilinmektedir. Daha sonra Van Wazer (1950), modifiye edici ve fosfor oksit konsantrasyonları arasındaki orana bağlı olarak yapı birimlerinin polimerizasyon derecesine dayalı olarak fosfatların kısa ve orta menzilli sıralı yapısının geçici bir tanımını yapan ilk kişilerden biri olmuştur.

Fosfat camların sahip oldukları yüksek çözünürlükten dolayı başlıca avantajlarından biri, erbiyum (Er^{3+}), iterbiyum (Yb^{3+}) ve neodimyum (Nd^{3+}) gibi nadir toprak iyonlarının yüksek miktarda kullanılabilmesidir. Bu, lazere karşı aktif nadir toprak iyonlarının yüksek konsantrasyonlarının, kümelenme gibi zararlı etkiler olmaksızın fosfat camlarına dahil edilebileceği anlamına gelir. Örneğin, erbiyum katkılı lifler, silika liflerinden çok daha yüksek katkı oranlarında kullanılabilir. Bu, yalnızca kompaktlık nedenleriyle değil, faydalı olabilecek oldukça kısa fiber lazerlerin ve amplifikatörlerin yapımına izin verir. Şekil 1.5'de erbiyum katkılı camlar gösterilmektedir (URL-2, 2022).



Şekil 1.5. Erbiyum katkılı fosfat camlar

1.2.4. Doğal camlar

Doğal camlar tarih öncesi çağlardan beri kullanılmaktadır ve insanlığın gelişimi ile güçlü bir şekilde bağlantılıdır. Dünya’da camlar tipik olarak eriyiklerin hızlı soğumasıyla üretilir ve mineraller ve kayalarda olduğu gibi, doğal camlar Dünya’nın gelişim hakkında önemli bilgiler verir (Cicconi ve Neuville, 2019). Doğal camların oluşum mekanizmalarının çeşitli doğal amorf malzemelere yol açtığı bilinmektedir. Dünya yüzeyinde, ay gibi karasal cisimlere kıyasla cam daha az bulunmaktadır çünkü yüzeydeki koşullar kristalleşmeye neden olur.

Doğal camlardan bahsederken, ilk bahsedilmesi gereken, insanlığın başlangıcından beri var olan ve onu etkileyen volkanik bir cam olan obsidiyen camlardır. Doğal camların (örn. Obsidiyen, perlit ve zift taşı) en büyük hacimleri (km^3) volkanik aktivite ile bağlantılıdır ve yüzeye yakın soğuma ile ilişkilidir. Dünya üzerinde bilinen doğal camları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (O’Keefe, 1984);

1. Sönmüş camlar (volkanik camlar, ay camları)
2. Dünya dışı camları (Tektit ve mikrotekit camlar, Fulgurit camlar)
3. Obsidiyen camlar

1.2.5. Kalkojenit camlar

Kalkojenit camlar, kükürt, selenyum veya tellür kimyasal elementlerine dayalı camsı malzemelerdir. Geniş kızılötesi şeffaflık, nadir toprak iyonları emisyonunun yüksek kuantum verimliliği ve yüksek doğrusal olmayan kırılma indeksleri gibi benzersiz optik özellikler sergilerler. İstisnai optik özelliklere sahip olmanın yanı sıra, çeşitli kalkojenit cam bileşimleri, lenslerin kalıplama yoluyla, optik fiberlerin çizim yoluyla ve çeşitli biriktirme teknikleri ile ince filmlerin üretilmesine izin veren kristalleşmeye karşı çok kararlıdır (Zakery ve Elliott, 2003).

Son otuz yılda, benzersiz optik özellikleri ve farklı mimarilere sahip çok çeşitli optik nesneler için üretilebilmeleri ve çok avantajlı özellikleri nedeniyle kalkojenit camlar üzerine dünya çapında yoğun araştırmalar yapılmıştır (Bureau ve ark., 2004). Kalkojenit camları oksit veya florür muadillerinden ayıran başlıca optik özellikler şunlardır:

1. Tellür açısından zengin camlarla $25\ \mu\text{m}$ ’ye kadar genişleyebilen geniş kızılötesi şeffaflık sağlar.

2. Nadir toprak iyonları emisyonunun yüksek kuantum verimliliği, diğer camlarda, özellikle orta kızılötesi (orta IR)’de erişilemeyen dalga boylarında ışıltamaya olanak verir.
3. Düşük uyarım güçleri veya kısa ışık-madde etkileşimi uzunlukları kullanarak verimli doğrusal olmayan uyarımların ortaya çıkmasına izin veren yüksek doğrusal olmayan kırılma indekslerine sahiptirler. Kalkojenit camların uygulama alanları Şekil 1.6’da verilmiştir.



Şekil 1.6. Kalkojenit camların uygulama alanları

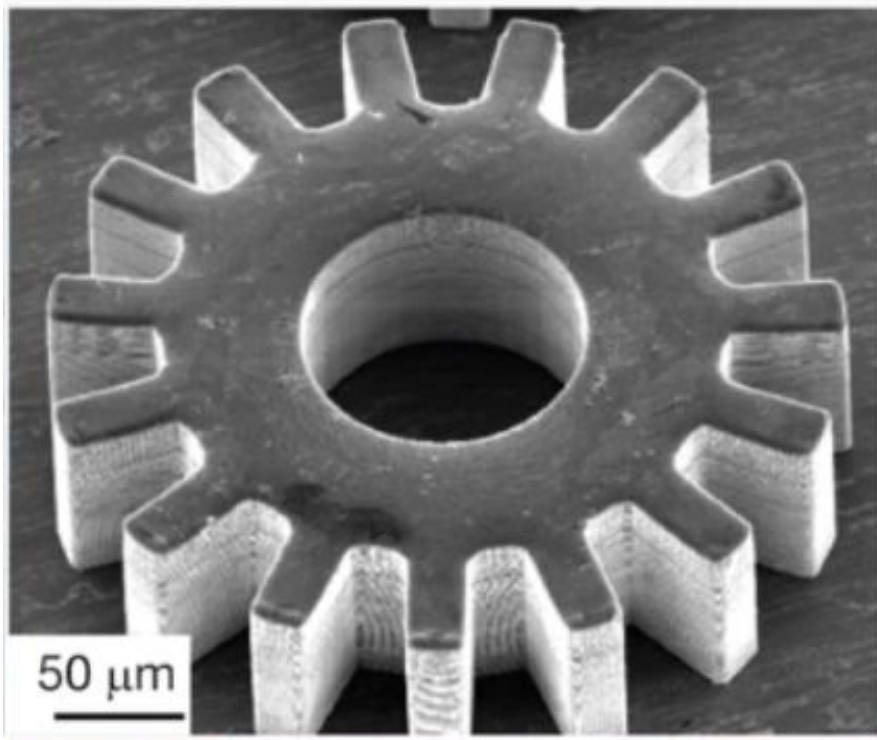
1.2.6. Metalik camlar

Birçok endüstriyel uygulama, dikkate değer ve bazen zıt özelliklere sahip malzeme kullanımını gerektirir. Biyomalzemeler (diş implantları), mikromekanik (dişliler) veya mücevher veya saat (lüks saatler) alanında bu tür malzemelerin kullanımına ihtiyaç vardır. Bu malzemeler hem sert hem aşınmaya dayanıklı hem biyouyumlu hem de yüksek mukavemete sahip malzemelerdir. Bununla birlikte, bu tür “ideal” materyaller şu anda mevcut değildir ve bu nedenle bu alanda devam eden çok sayıda araştırma mevcuttur. Polimerlerin kullanımı kolaydır ve deforme olabilir ancak mekanik olarak dirençli değildir; seramikler çok sert ama genellikle kırılındır, metaller deforme olabilir, ancak bu durumda sıradan mekanik özelliklerle karakterize edilirler. Metalik camlar bu tür uygulamalar için nispeten uygun malzemelerdir (Wang ve ark., 2004.). Bu camların endüstriyel uygulamalar

için büyük bir potansiyele sahip olduğu iyi bilinmektedir. Genel olarak metalik camlar, kristal malzemelere kıyasla yüksek mukavemete, yüksek elastik limitlere, m kemmekorozyon direncine ve termoplastik  ekillendirilebilirliėe sahiptir. Bu yapısal ve işlevsel özellikler kombinasyonu, onları geleneksel malzemelerin kullanımının bir etkinlik sınırına ulaştığı uygulamalar için potansiyel adaylar haline getirir.

Metalik camlar, amorf bir yapıya sahip katı metal ala ımlarıdır. Başka bir deyişle, metalik camlar uzun mesafelerde atomik ölçekte bir bozukluk gösterir. Bununla birlikte, atom konfigürasyonları bir topolojik kısa menzil düzenine (TSRO) veya bir kimyasal kısa menzil düzenine (CSRO) sahip olabilir. Amorf metalik camların elde edilebilmesi ve kompozisyonlarının seçiminde bazı durumları göz önüne almak önemlidir. Kimyasal elementlerin seçimi için aşağıdaki ampirik kuralları önerilmiştir (Inoue ve Takeuchi, 2011)

1. Alaşım en az üç elementten oluşmalıdır.
2. Çeşitli atomik elementlerin boyutları, ana elementler arasında en az %12 olmak üzere mümkün olduğu kadar çeşitli olmalıdır.
3. Ana elementler arasındaki karışım entalpisi negatif olmalıdır. Metalik bir cam kullanılarak  retilmi i bir di li (Kumar ve ark., 2009.).



Şekil 1.7. Metalik bir camdan üretilmiş bir di li

1.3. Camların özellikleri

1.3.1. Mekanik özellikler

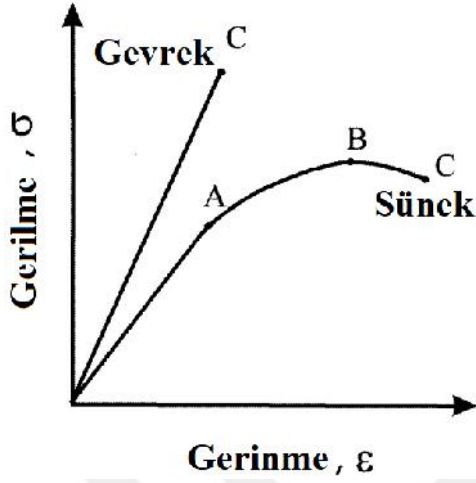
Camlar camsı geçişin altındaki sıcaklıklarda oldukça kırılıgandırılar. Kırılma, numune çekme altında yüklendiğinde, basınç altında yüklendiğinden çok daha düşük gerilmelerde meydana gelir ve cam uygulamaları için son derece önemlidir. Bir camı gerilim altında test etmenin en basit yolu, prensipte bir çubuk veya fiber formunda çekmektir, ancak pratikte numuneleri kavramanın birçok zorluğu vardır. Üç ve dört noktalı eğilme, çift eksenli bükülme ve Brezilya veya çapsal sıkıştırma testleri de bunların yanı sıra sıklıkla kullanılır (Jnr ve Zanotto, 1996). Cam, T_g'nin çok altındaki sıcaklıklarda gevrek olarak adlandırılan bir malzemedir ve kırılıncaya kadar elastik olarak deforme olur. Elastik alanda bir cam numunenin tek eksenli çekme yükleme eğrisi bu durumda doğrusaldır. Gerilmenin formülü aşağıdaki gibidir;

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.4)$$

Burada ε elastik bölgedeki birim şekil değiştirmeyi ifade eder. E ise elastisite modülüdür. Daha büyük bir E değeri, daha sert bir malzeme, yani elastik deformasyonlara karşı daha büyük bir direnç anlamına gelir. Malzeme yükleme eksenini boyunca deforme olurken, genliği Poisson oranına bağlı olan bir yan deformasyona maruz kalır. Elastik modül, camın bileşimine bağlıdır ve ağırlık hem atomlar arası bağlanma gücünü hem de paketleme yoğunluğunu yansıtır. Camların modüllerinin camsı geçiş sıcaklığı ile birlikte arttığı bilinmektedir. Tipik bir malzemenin gerilme-gerinim grafiği Şekil 1.8'de verilmiştir. Doğal bozuklukları nedeniyle, geleneksel melt-quenching yöntemiyle yapılan camların homojen ve izotropik olması beklenir (Minami ve ark., 2007). Sadece küçük bir gerilim-gerinim uygulandığında, çoğu inorganik cam lineer elastik cisimler gibi davranır.

İnorganik camlar gibi izotropik malzemeler için iki elastik parametreyi (E ve ν) ölçmek diğer parametreleri çıkarmak için yeterlidir. Young modülü (E), çekme gerilimi ile yükleme yönünde etkilenen gerinim arasındaki oran ve Poisson oranı (ν) gerinimler arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntem metaller veya polimerler için yaygın olarak kullanılırken, inorganik camlar gibi kırılğan malzemeler için

nadiren kullanılır, çünkü çekme testleri için numunelerin hazırlanması çok daha zordur ve daha az pahalı ve daha az zaman alan teknikler mevcuttur.



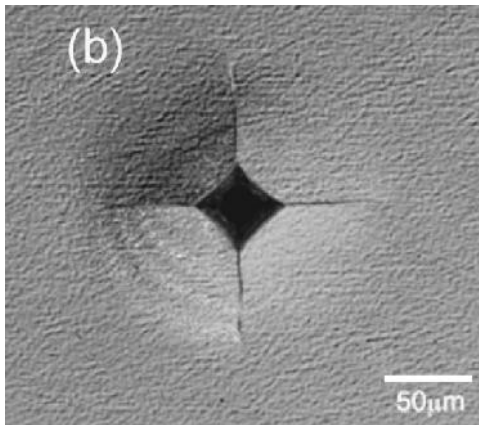
Şekil 1.8. Bir malzemenin tipik gerilme-gerinme grafiği

Çekme ve basma testleri, kırılğan malzemelerin elastik özelliklerini ölçmek için nadiren kullanılırken, camlar için yaygın olmasa da üç noktalı eğilme testi hala kullanılmaktadır. Bu yöntem, altta iki silindir tarafından desteklenen bir cam kırışın tam ortasından başka bir silindir vasıtasıyla tepeye bir yük uygulanması şeklinde meydana gelir. Camların elastik özelliklerini ölçmek için en yaygın kullanılan yöntem is ultrasonik yöntemlerdir. Yönteme ultrasonik ekografi veya ultrasonik spektroskopi denir (Mpourazanis ve ark., 2019). Tipik olarak MHz'den daha büyük frekanslarda bir piezoelektrik dönüştürücü kullanılarak numunenin yüzeyinde bir darbe üretilir. Darbe, ilk yüzeye paralel olarak karşı yüzeye ulaşmak için numune boyunca yayılır, kısmen yansıtılır ve aynı zamanda bir alıcı görevi görerek dönüştürücüye geri döner. Piezoelektrik dönüştürücü sayesinde darbenin geçiş süresi ölçülür ve kalınlık bilgisi ile beraber hız çıkarılır. Elde edilen veriler ilgili formüllerde yerine yazılarak Elastisite modülü bulunur (Keryvin ve ark., 2008). Tipik bir ultrasonik ölçüm cihazı Şekil 1.9'da gösterilmiştir. Ultrasonik spektroskopi tahribatsızdır, az miktarda cam gerektirir (boyutlar yalnızca dalga boyundan daha büyük olmalıdır). Tipik olarak birkaç santimetreküptür cam numune yeterlidir ve teorik olarak yüksek sıcaklıklarda bile çalışır. Ancak, cam homojen olmadığında (dalga boyu ölçeğinde), yani cam çok sayıda kabarcık, kusur veya kristal Bozukluk içeriyorsa çalışmaz. Ultrasonik spektroskopi, bu kusurları tespit etmek için başka yerlerde kullanılır, ancak elastik özellikleri ölçmek için bu durumlarda kullanılamaz.



Şekil 1.9. Tipik bir ultrasonik ölçüm cihazı

Camların sertliği genellikle ya Mohs ölçeği kullanılarak çizilme sertliği ya da bir Vickers çentiği kullanılarak çentik sertliği cinsinden tanımlanır. Mohs ölçeğinde oksit camlar 5 ila 7 aralığındadır. Oksit camların Vickers sertliği 2 ila 8 GPa arasında değişmekler birlikte nitrürlenmiş camlar için 11 GPa'nın üzerindedir. Bu değerler 100 GPa olan elmasın Vickers sertliğinden çok daha düşüktür. Borat, almanat ve fosfat camları tipik olarak silikat camlarından daha yumuşaktır. Kalkojenit camları çok daha yumuşaktır. $Ba_2TiSi_2O_8$ camları üzerine yapılmış bir çalışmada alınan vickers izi Şekil 1.10.'da gösterilmiştir (Shinozaki ve ark., 2011).



Şekil 1.10. Vickers sertlik yöntemi ile alınmış bir çentik izi

Camların kırılma toklukları genellikle teorik dayanımlarından çok daha azdır. Kırılma mukavemeti sadece bir dağılım fonksiyonu olarak tanımlanabilir ve belirli bir cam bileşiminin tek bir değer karakteristiğini sergilemez. Mukavemetteki azalma, camı ciddi şekilde zayıflatan yüzey kusurlarına atfedilebilir.

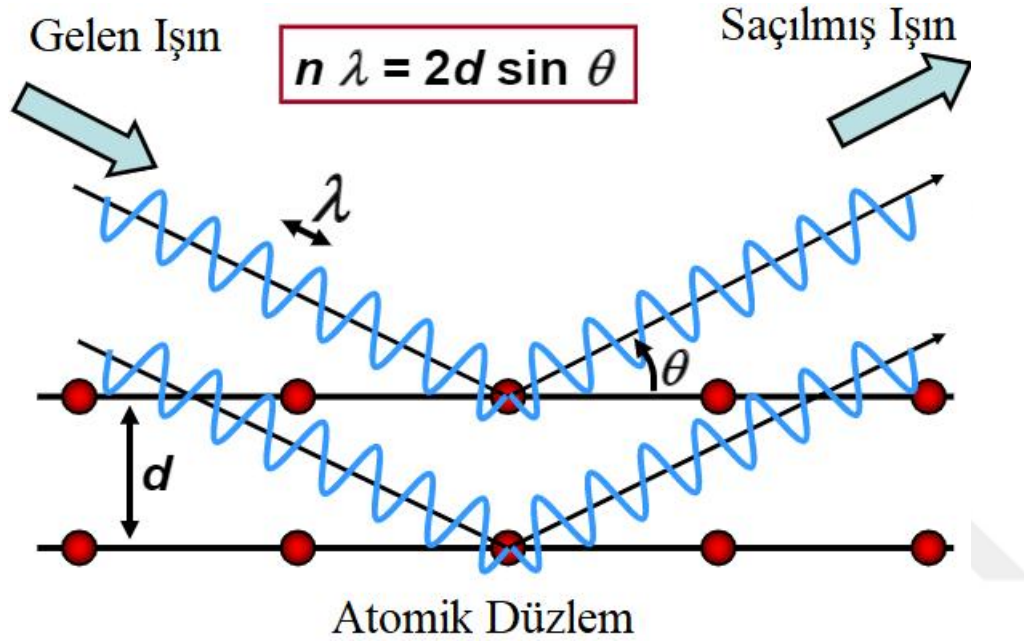
1.3.2. Yapısal özellikler

1.3.2.1. X-ışını difraksiyonu (XRD)

X-ışını difraksiyonu, kristal yapıdaki malzemeleri karakterlerini belirlemek için kullanılan güçlü ve tahribatsız bir metottur. Kristal malzemelerin fazları, yapıları, tercih edilen kristal yönelimleri (doku özellikleri) ve ortalama tane boyutu, kristallik, gerinim ve kristal kusurları gibi diğer yapısal veriler hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Kristal malzemeler için XRD tepe noktaları, bir numunedeki her bir kafes düzlemi kümesinden belirli açılarda saçılan monokromatik bir X-ışınları demetinin yapıcı girişimi ile üretilir. Pik noktalarının yoğunlukları, kafes düzlemler içindeki atomik konumlar tarafından tespit edilir. Netice olarak, X ışını kırınım modeli, belli başlı bir malzemedeki periyodik atomik düzenlemelerin yansımasıdır. X-ışını toz kırınım desenleri için standart bir veritabanının çevrimiçi olarak aranması, çok çeşitli kristal örnekler için hızlı faz tanımlamasına olanak tanır.

X-ışını difraktometreleri prensip olarak üç temel unsurdan oluşur: Bunlar X-ışını tüpü, bir numune tutucu ve bir X-ışını detektörüdür. X-ışınları, elektron üretmek için ince bir iletkeni (filaman) ısıtarak, bir voltaj uygulayarak elektronları bir hedefe doğru hızlandırarak ve hedef malzemeyi elektronlarla bombardımana tabi tutarak bir katot ışın tüpünde üretilir. Elektronlar, söz konusu malzemenin iç kabuk elektronlarını yerinden ayırmak için yeterli enerjiye sahip olduğunda, karakteristik X-ışını spektrumları açığa çıkar. Bu spektrumlar, en yaygın olanları $K\beta$ ve $K\alpha$ olmak üzere birkaç bileşenden oluşur. $K\alpha$, kısmen $K\alpha_1$ ve $K\alpha_2$ 'den oluşur. $K\alpha_1$, biraz daha kısa dalga boyuna ve $K\alpha_2$ 'nin iki katı yoğunluğa sahiptir. Özgül dalga boyları, hedef malzemenin (Fe, Cu, Cr, Mo) karakteristiğidir. Difraksiyon yani kırınım oluşturmak için gerekli olan monokromatik X-ışınlarını üretmek için folyolar veya kristal monokrom cihazlarıyla filtreleme gereklidir. Bakır elementi, Cu $K\alpha$ radyasyonu = 1.5418Å ile tek kristal kırınım için en yaygın hedef malzemelerden birisidir. Bu X-ışınları hizalanır ve numuneye doğru yönlendirilir. Numune

ve dedektör birlikte döndürüldükçe yansıyan X-ışınlarının yoğunluğu kaydedilir. Hedef numuneye çarpan X-ışınlarının geometrisi Bragg Denklemini sağladığında ise, yapıcı girişim meydana gelir ve istenen yoğunlukta bir tepe noktası oluşur. Bir dedektör, bu X-ışını sinyallerini kaydeder. Kayıt altına alınan sinyali işler ve bu sinyali daha sonra yazıcı veya bilgisayar monitörü gibi istenen cihazlara gönderilen bir sayım verisine dönüştürür. XRD analizinde klasik bir ışın demetinin hareketi Şekil 1.11’de verilmiştir.



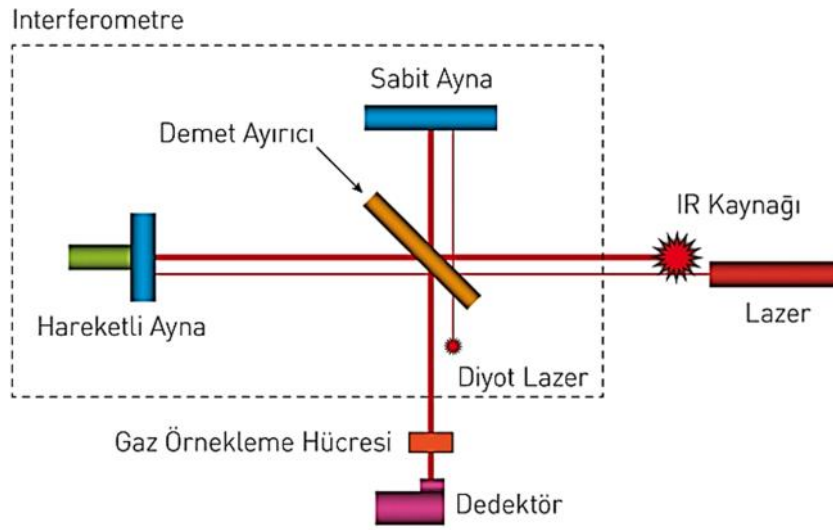
Şekil 1.11. XRD çalışma prensibi

X-ışını kırınım çalışmaları, 1930’larda Warren ve çalışma arkadaşlarının öncü çalışmasından bu yana, camların kısa ve orta aralık yapısı hakkında bilgi elde etmek için uzun süredir kullanılmaktadır (Warren, 1937). Camların yüksek enerjili X-ışını kırınım çalışmaları genel olarak üç ana alana ayrılabilir: oksitler, kalkojenitler ve kalkohalitler ve dökme metalik camlar (Ohno ve ark., 2001). Oksit camlardaki XRD verileri, nötronlar oksijen atomlarına daha duyarlı olduğundan ve genellikle kısmi yapı faktöründe keskin bir kontrast sağladığından, nötron kırınımı verilerini tamamlayıcı niteliktedir. Kalkojenit camlar, periyodik tablonun 16. grup elementinden önemli bileşenlerdir. Bu camlar, oksitler gibi kovalent olarak bağlıdır, ancak aynı zamanda yapısal motiflerin daha zengin bir kombinasyonunu oluşturan homopolar bağlar da oluşturabilirler. Dökme metalik camlar, iyi elektrik iletkenliğine sahip güçlü malzemeler üretmek için genellikle hızlı soğutma yöntemleriyle küçük partiler halinde üretilirler. Yüksek enerjili X-ışını kırınımı, yüksek

sinyal/arka plan sinyali ve hem ikili hem de çok bileşenli sistemler nedeniyle metalik camların incelenmesi için çok uygundur (Benmore, 2012).

1.3.2.2. Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Dönüşümlü FTIR)

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi(FTIR), organik bileşiklerin ve bazı inorganik malzemelerin kimyasal bağları ve moleküler yapıları hakkında özel bilgiler sağlar. Referans kızılötesi spektrumları mevcut olduğunda bilinmeyen bileşiklerin tanımlanması mümkündür (Berthomieu ve Hienerwadel, 2009). Kızılötesi radyasyona maruz kaldığında, kimyasal bağlar kızılötesi rejiminde karakteristik frekanslarda titreşir ve titreşim modlarına uyan frekanslarda radyasyonu emer. Soğurulan radyasyonun frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülmesiyle, fonksiyonel grupları ve bileşikleri tanımlamak için kullanılabilecek bir spektrum elde edilir. Bu sistemin çalışma prensibi Şekil 1.12’de gösterilmiştir (URL-3).



Şekil 1.12. FTIR çalışma prensibi

FTIR, organik fonksiyonel grupları tanımlayabilen tahribatsız bir tekniktir ve genellikle spesifik organik bileşikler ve bileşik tanımlama için kapsamlı spektral kütüphaneler içerir. Teknik, vakum koşulları gerektirmediğinden uçucu kirleticiler için uygun bir yöntemdir. FTIR, bazı inorganik bileşikler için mevcut spektral kitaplıkları barındırmadığından dolayı inorganik kirleticiler için çok uygun değildir. Kızılötesi spektrumlar fonksiyonel grup konsantrasyonlarının nicel bir ölçüsünü sağlamaz ve piklerin arka plan özelliklerinden ayırt edilmesi genellikle zordur. Ayrıca, varlığı diğer analitik

tekniklerle tanımlanmış olan bazı fonksiyonel grupları tespit etme hassasiyetinden de yoksundur (Smith, 2011).

Kızılötesi spektroskopisinin camların ve özellikle metal oksitlerle modifiye edilmiş camların doğasının araştırılmasında çok faydalı olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni, IR'nin, cam oluşturan oksitlerin karakteristiği olan orta kızıl ötesi bantları kullanarak kısa menzilli düzen yapısı hakkında ve lokalize kaynaklı uzak kızıl ötesi yoğun bantları analiz ederek metal iyon-yer etkileşimleri hakkında bilgi sağlayabilmesidir. Camlar, kızılötesi radyasyonun güçlü emicileri olduğundan, orta kızılötesi spektrumların çoğu, örneğin alkali metal halojenür tuzları gibi uygun matris malzemeleri içinde dağılmış toz halinde cam peletleri üzerinden ölçülebilir.

Tahribatsız özellikleri nedeniyle kızılötesi spektroskopisi, camlarda geniş bir uygulama alanı bulur. Bunlar, çeşitli cam oluşturma sistemlerinin bileşiminin bir fonksiyonu olarak cam yapısının değerlendirilmesini ve kimyasal ve fiziksel işlemler sırasında gelişen cam yapısının izlenmesini içerir. Ayrıca, cam yüzeylerin korozyonuna, sol-jel işleme sırasında cam ağının evrimine, camlarda iyon değişimi fenomenine, cam yapısı üzerindeki strese, cam yüzeyinden derinliğin bir fonksiyonu olarak yapının oluşumlarını incelemeye olanak verir (Kamitsos, 2015).

1.3.3. Radyasyon özellikleri

Röntgen tarafından 8 Kasım (1895)'te Almanya'nın Wuerzburg kentinde X ışınlarının tamamen beklenmedik keşfi, modern fizikte iyonlaştırıcı radyasyon hikayesinin başlangıcı olarak kabul etmek için uygun bir noktadır. X ışınları keşiflerinin ardından bu ışınlar tıbbi uygulamalar için kullanıma girdi. Bir elin ilk defa bu yöntem ile alınan görüntüsü Şekil 1.13'te gösterilmiştir (Röntgen, 1895).



Şekil 1.13. İlk röntgen görüntüsü

Büyük veya tekrarlanan maruziyetlerin zararlı olabileceği hemen netlik kazanmasa da ilk birkaç yıl boyunca artan kanıtlar zararlı olabileceğinin net göstergesiydi. İlk buunduğu dönemlerde, röntgen cihazları ve hastalar arasında cilt yanığı raporları yaygınlaşmıştı. Hastalar ve operatörlerin gereksiz maruziyetten korumak için önlem ve cihazlara ihtiyaç duymaları radyasyon sağlığı korumasının başlangıcını temsil ediyordu. Hem X ışınlarına hem de radyoaktif kaynaklardan gelen radyasyona maruz kalmayı sınırlamak için erken kriterler, birkaç kişi ve grup tarafından önerildi. Zamanla, radyasyon sorunlarını dikkate almak ve resmi önerilerde bulunmak için kuruluşlar kuruldu. Bugün, uluslararası sahnede bu rol, Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) ve Amerika Birleşik Devletleri'nde Ulusal Radyasyondan Korunma ve Ölçümler Konseyi (NCRP) tarafından yerine getirilmektedir.

Birleşmiş Milletler bünyesinde 1955 yılında kurulan Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), iyonlaştırıcı radyasyonun günümüz dünyasında varlığı ve etkileri hakkında kapsamlı bir çalışma ve analiz gerçekleştirmiştir. UNSCEAR 2000 Raporu dünya çapında radyasyona maruz kalmanın çeşitli kaynakları ve seviyeleri hakkında geniş bir inceleme ve 1986 Çernobil reaktör kazasının radyolojik sonuçlarının bir değerlendirmesini sunmuştur (Charles, 2001). Rapordan alınan bilgilere göre, bir birey yaklaşık 2,8 mSv'lik ortalama yıllık etkili doza maruz kalmaktadır.

İnsanoğlu tıpta, endüstride, araştırma ve enerji üretiminde X ışınlarının, radyoizotopların ve bölünebilir malzemelerin kullanımından büyük ölçüde yararlanmıştır. Ancak bu kazanımların gerçekleşmesi, kaynakların temininde ve normal kullanımında kişilerin rutin olarak radyasyona maruz kalmasına sebep olmuştur. Herhangi bir radyasyona maruz kalma ilgili bireyler için bir miktar risk içerdiğinden, izin verilen maruziyet seviyeleri sağlığı riske etmeyecek seviyede olmalıdır. Bu nedenle, prensipte radyasyondan korunmanın genel amacı, radyasyon içeren faaliyetlerden kaynaklanan riskleri ve faydaları dengelemektir. Standartlar çok gevşekse, riskler kabul edilemez derecede büyük olabilir; standartlar çok katıysa, faaliyetler toplumun geneline zarar verecek şekilde aşırı derecede pahalı veya pratik olmayabilir. Maruziyet miktarı da bir yıl boyunca insan vücudu baz alındığına, bir kişiye 20 mSv'ye eşit bir etkili doz sağlayacak bir radyonüklidin aktivitesi olarak tanımlanır (Jayasinghe ve ark., 2020).

Prensip olarak, bir kişinin harici bir radyasyon kaynağından alabileceği dozu, kaynaktan olan mesafeyi artırarak, maruz kalma süresini en aza indirerek ve koruyucu ekipman ile azaltmak mümkündür. Mesafe genellikle basit ve etkili bir şekilde kullanılır. Örneğin, maşa, vücudun geri kalanının yanı sıra ellere olan dozu en aza indirmek için kullanılabilir. Maruz kalma süresini önemli ölçüde sınırlamak her zaman mümkün değildir, çünkü belirli bir görevi gerçekleştirmek için genellikle belirli bir süre gerekir. Harici radyasyondan korunmada mesafe ve zaman faktörleri avantajlı bir şekilde kullanılabilirken, koruyucu ekipman, doz oranını sınırlayarak personelin maruz kalmasını azaltır. Camlar da radyasyona karşı koruyucu ekipman olarak kullanılan malzemelerin önde gelenlerindendir.

Günümüzde kurşun cam ve diğer özel cam türleri, radyasyona maruz kalmaya karşı koruma için hayati malzemeler olarak kabul edilmektedir. Ayarlanabilir mekanik, kimyasal ve optik özellikler sunmanın yanı sıra kurşun içeren camlar gama, x-ışını ve nötron radyasyonunu güçlü bir şekilde emer. Bu benzersiz özellikler, camı tıbbi radyografi ve nükleer yakıt işleme gibi görüş hattının gerekli olduğu uygulamalar için paha biçilmez bir radyasyon kalkını yapar. Bu uygulamaların çoğunda, radyasyon koruyucu cam, sıcak hücreler ve eldivenli hücre olarak bilinen kaplar biçiminde kullanım bulur. Her ikisi de radyoaktif malzemelerin güvenli bir şekilde depolanması ve manipülasyonu için kullanılan radyasyon geçirmez cam izleme pencerelerine sahip korumalı kaplardır. Sıcak hücreler, kullanılmış nükleer yakıt çubukları gibi yüksek yoğunluklu radyasyon kaynakları için kullanılan daha kapsamlı korumalı ağır hizmet kaplarıdır. Eldiven hücreleri (Şekil 1.14), belirli radyofarmasötikler gibi daha düşük yoğunluklu radyasyon kaynakları için kullanılır.



Şekil 1.14. Radyasyon uygulaması için kullanılan bir eldiven hücresi

Diğer alanlarda, radyasyon koruyucu camdan yapılmış ekranlar ve pencereler, sağlık çalışanlarını ve araştırmacıları spektrometreler ve bilgisayarlı tomografi (CT) tarayıcıları gibi x-ışını kaynaklarından korur.

Genel olarak radyasyondan koruma uygulamaları için kullanılan camlar, kurşun oksit (PbO) ve bizmut oksit (Bi_2O_3) gibi ağır metal oksit modifiye edicileri içerir (Sayyed ve ark., 2020). Bu kimyasallar, sıradan silikat camı, nötronları, gama ışınlarını ve x-ışınlarını etkin bir şekilde emebilen şeffaf radyasyon kalkanlarına dönüştürebilir. Ortaya çıkan camlar, görünür ışığın geçmesine izin verirken beton ve diğer standart koruyucu malzemelerle karşılaştırılabilir seviyelerde radyasyonu azaltma yeteneğine sahiptir. En önemlisi, ağır metal oksit camları radyasyona maruz kalmanın bir sonucu olarak nispeten az optik veya mekanik bozulma yaşar.

Kurşun oksit içeren camlar yaygın olmakla birlikte, kurşun içeriğinin artırılması hem erime noktasında hem de camın sertliğinde bir azalmaya yol açar. Bu, kurşun kullanımıyla ilgili çevresel kaygıları artırır ve radyasyondan korunma uygulamaları için diğer cam türlerine yönelik araştırmaları teşvik eder. Bunlara bor, tellür, baryum ve silikon oksitleri dahildir. Bazı araştırmalar, bu camların gama ışını koruyucu malzemeler olarak geleneksel betonların yerini alabileceğini öne sürmektedir.(Singh ve ark., 2014)

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

D. Yardımcı ve arkadaşları (2013) iyi bir cam oluşturuca olan bor oksidin (B_2O_3) tellür oksit (TeO_2) ile karıştırılması neticesinde cam sisteminin şekil verme kabiliyetinin artacağını ve bu durumda elde edilecek camların optik özelliklerinin ve termal kararlılığının gelişeceğini belirtmiştir.

Reza Bagheri ve arkadaşları (2018) cam malzemelerin aynı zamanda kompozisyon değişiklikleri ile özelliklerinin kolaylıkla değiştirilebilmesi gibi bazı özellikler sunduklarını belirtmektedir. Camlar, bileşimlerine metal oksitler eklenerek radyasyondan koruyucu malzeme olarak kullanılabilirler. Ağır metal oksit camlar günümüzde bu konuda büyük değer kazanmaktadır. Cam malzemelerin atom numarası ne kadar yüksekse, radyasyon fotonlarının malzeme ile etkileşim olasılığı o kadar yüksektir, dolayısıyla radyasyon koruma kapasitesi yükselir. Ağır metal oksitler, eklendikleri cam sisteminin yoğunluğunu artırdıkları için belirgin şekilde radyasyon zırhlamada en etkili olanlardır.

K. Kirdsiri ve arkadaşları (2009) bor oksidin (B_2O_3) en önemli cam oluşturucaardan ve eritken malzemelerden biri olduğunu belirtmiş ve bor oksisidin cam bileşimlerinde yüksek sıcaklıkta eriyiklerin viskozitesini azaltan bir eritici madde olduğuna değinmiştir. Bor oksisin maksimum cam oluşturma eğilimine sahip olduğu, çünkü erimiş bor oksitin düşük hızda soğutulduğunda bile kendi kendine kristalleşmediği ve sadece basınç altında kristalleştiğini belirtmiştir.

Gaafar ve arkadaşları (2009) Bi_2O_3 (bizmut oksit) camlara oksit halde Er_2O_3 ile PbO eklemek suretiyle ürettikleri camların FTIR ve ultrasonik özelliklerini incelemişlerdir. Formül olarak $90 Bi_2O_3 - (10-x) - xPbO$ oranlarında camlar hazırlamış ve kurşun ile erbiyum oksit katkılanarak ortaya çıkan değişimin ultrasonik özelliklerde yaptığı değişiklikleri incelemişlerdir. Kurşun oksit miktarı artan camlarda yoğunluk oranının arttığı ve numunelerin özgül hacimlerinde azalma olduğunu görmüşlerdir. Bununla birlikte Kurşun katkısı oranı artan numunelerin ultrasonik hızlarında hem enine hem de boyuna arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca kurşun oksit katkısı arttıkça camlara ait numunelerde elastisite modüllerinin belirgin olarak yükseldiğini gözlemlemişlerdir.

Ashok Kumar(2017) bor oksidin düşük yoğunluğa sahip olduğunu belirtmiştir. Yoğunluğun herhangi bir ortamın radyasyondan koruma özelliklerini etkileyen en önemli

faktörlerden biri olduğu bilindiğinden, cam sistemlerinin yoğunluğunu artırmak için cam numunelerinin hazırlanması sırasında borat camlarına ağır metal oksitlerin dahil edilmesinin bir gereklilik olduğunu gözlemlemiştir.

Shyu ve arkadaşları (2010) kalay ve fosfat oksit camlarına %0–8 Er_2O_3 katarak yapısal, termal ve kristallenme davranışlarını incelemiştir. Er_2O_3 oranı arttıkça camın şeffaflığının kaybolduğunu ve opaklaştığını bildirmiştir. Er_2O_3 oranı %2 mol'den az olduğunda numunelerin amorf yapılı olduğunu, daha yüksek oranlarda ise kristal fazın görüldüğünü bildirmiştir. Er_2O_3 katkı oranı arttıkça camların yoğunlukları artmıştır. Er_2O_3 oranı %0.5'e kadar olan numunelerde cam yüzeyinde kristallenme görülmüştür bu da ciddi çatlaklara neden olmuştur ancak daha yüksek Er_2O_3 oranlarında ise yüzey kristalizasyonun önleniği ve cam şekillendirmeye yardımcı olduğunu gözlemlemiştir.

Kaur ve arkadaşları (2013) γ -ışınlarını koruma uygulamaları için $\text{PbO-P}_2\text{O}_5$ cam sistemleriyle katkılanmış baryumun potansiyel kullanımını bildirmiştir. BaO katkılı $\text{PbO-P}_2\text{O}_5$ cam sisteminin 'barit' betona kıyasla daha iyi kütle zayıflama katsayısına ve yarı değerli katman parametre değerlerine sahip olduğunu ve cam sisteminin γ -ışınları kalkanlama uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Camlarla ilgili radyasyon zırhlama özelliklerini ilk kez Singh ve arkadaşları (2004) sistematik olarak ele almışlardır. Bu çalışmalarında üretmiş oldukları bizmut-borat ve bizmut-kurşun-borat cam sistemlerinin gama radyasyonuna karşı geçirgenliklerini incelenmiş ve piyasada yer alan standart radyasyon zırhı olarak kullanılan betonlar ile kıyaslamalar yapmışlardır.

Bizmut (Bi) silikat camlarına (Nb_2O_5) niyobyum oksit ve (CeO_2) seryum oksit ekleyerek camlara ait soğurma etkisini inceleyen Nengli Dai ile diğerleri (2015) seryum oksidin katkıda ki oranı arttıkça sönümleme piklerinin gittikçe zayıfladığını ve cam numunelerin renklerinin kızıl kahveden parlak bir renge büründüğünü gözlemlemiştir. Oksitleyici olarak katkılanan seryumun ve niyobyum oksitin katkı oranı arttıkça emisyon şiddetinin arttığı görülmüştür.

H.ERTAŞ (2014) beton ile ilgili yaptığı çalışmada kireç taşı ve maden atığı agregalarının karışımından hazırlanan beton örneklerde maden atığı agregalarının beton bünyesindeki oranının artışına bağlı olarak radyasyon soğurma katsayılarının da arttığını belirlemiştir. Üretimi yapılan betonların kalınlık artışıyla doğru orantılı olarak radyasyon

soğurma özelliğinin ve beton dayanım sınıfının radyasyon soğurma özelliği üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını gözlemlemiştir.

Singh ve diğerleri (2014) silikat camları ile ağır metal oksit camların (borat) gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemiştir. Bu çalışma kapsamında camların radyasyon sönümleme çarpanını, efektif atom numarasını ve maruz kalınan düzeltme faktörünü kullanarak hesaplamalar yapmışlardır. 0,015 MeV'den başlayarak 15 MeV'e kadar olan foton enerji aralığında bizmut oksit (Bi_2O_3) katkılı borosilikat camın diğer üretimi yapılan numunelere kıyasla en yüksek lineer zırhlama katsayısına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Barlet ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada sodyum borosilikat camlarını incelemiştir ve yaptıkları çalışmada sodyum oranı arttıkça camın sertliğinin düştüğünü incelemiştir. Çatlak direncinin de yine sodyum oranı azaldıkça arttığını gözlemlemiştir. Kırılma tokluğuyla sodyum oranı arasında ise net bir orantı gözlemlenememiştir.

V.Akıllı (2019) ve arkadaşları üretmiş olduğu $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-PbCl}_2\text{-TeO}_2$ cam sistemine ait camların çok daha az kurşun içermesine rağmen beton blok ve mevcut ticari radyasyon kalkanı camlarla yapılan kıyaslamaları sonucu daha iyi radyasyon zırhlama özellikleri gösterdiklerini belirlenmiş ve sonuç olarak radyasyon zırhlama uygulamalarında yüksek kullanım potansiyeline sahip olduklarını tespit etmiştir.

Bootjomchai ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada soda-kireç camlarına seryum oksit katkılayarak gama radyasyonu etkisi altında elastiklik özelliklerini incelemiştir. Camların yoğunlukları seryum oksit oranı arttıkça artmıştır. Radyasyona maruz bırakıldıktan sonra yoğunluklarda az da olsa bir azalma görülmüştür ancak CeO_2 oranına göre yoğunluk yine artış göstermeye devam etmiştir. Ultrasonik ve kesme hızları seryum oksit oranı arttıkça azalmaktadır. Radyasyona maruz bırakıldıktan sonra cam numunelerin ultrasonik ve kesme hızları bir miktar azalmıştır. Ancak CeO_2 oranına göre artışları devam etmiştir. Boyuna hız modülü, kesme hız modülü, elastiklik modülü ve sertlik değerleri radyasyona maruz kalmadan önce %1 CeO_2 oranına kadar azalış gösterirken %1 CeO_2 değerinde bir miktar azalma göstermiştir. Radyasyona maruz kalındıktan sonra ise boyuna hız modülü hariç diğer değerlerde CeO_2 oranı arttıkça azalış görülmüştür. Radyasyona maruz kalındıktan sonra köprüsüz oksijen sayısı kırılan bağlardan dolayı arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Albařkara ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada radyasyon kalkanlayıcı olarak üretilcek cam malzemesi için CeO_2 ve Er_2O_3 katkılanarak hazırlanan borosilikat camların mekanik özellikleri bakımından bir dezavantaj doğurmadığını yaptıkları deneylerle kanıtlamıştır. Tam aksine cam içeriğine eklenen Er_2O_3 ve CeO_2 katkılar ile borat camların mekanik özelliklerinin arttığı sonucuna ulaşmıştır.



3. TEZİN AMACI VE ÖNEMİ

Radyasyonun yayıcı cihaz ve sistemlerin kullanımının artmasıyla geline aşamada radyasyonun zararlı etkilerinden korunma konusu da oldukça önemli bir problem haline gelmiştir. Radyasyonun zararlı etkilerinden olumsuz etkilenmemek adına (As Low As Reasonably Achievable)ALARA kuralı doğrultusunda makul olarak gerçekleştirilebilecek düşük maruziyet kuralı esas alınmaktadır. Söz konusu ALARA prensibinin temeli maruz kalınan radyasyon oranının en aza indirilmesidir. Bunun sağlanabilmesi için radyasyonla temas süresi ya da doz alım zamanı minimum seviyede tutulmalı, radyasyon yayıcılarına olan mesafe maksimum olmalı ve arada yer alacak zırhlama çok iyi olmalıdır. Bazı zorunlu hallerde zamanı ve arada ki mesafeyi değiştirmek mümkün olmamaktadır. Bu sebeple radyasyon etkisinden korunmak için iyi bir zırhlama yapmak gerekmektedir. Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için kullanılan zırhlar çoğunlukla kurşun bazlı malzemeler ve beton bloklardır. Kurşun (Pb) elementi iyi bir radyasyon zırh malzemesi olmasına karşın ağır yapısı ve toksik etkisi nedeniyle insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Beton ise bünyesinde bulunan su içeriği nedeniyle yüksek radyasyona maruz kaldığında bulunan su buharlaşmakta ve beton hem mukavemetini kaybetmekte hem de betonun zırhlama özellikleri azalmaktadır. Ayrıca hem beton hem de kurşun opak yani şeffaf olmayan malzemelerdir. Bu nedenlerden ötürü alternatif radyasyon kalkanlayan malzeme arayışına girilmiş ve radyasyon zırhlayıcı olarak kullanılmak üzere özellikle saydamlıkları nedeniyle çeşitli cam malzemeler üretilerek geliştirilmiştir. Günümüzde ticari olarak kullanılan ve cam görevi gören radyasyon zırhlama malzemeleri ya yüksek oranlarda (%50-70 ağırlıkça) Pb içermekte ya da istenilen radyasyon zırhlama özelliklerini sağlayamamaktadır. Bu sayılan sebeplerden dolayı son dönemlerde yüzde olarak çok daha düşük oranda kurşun (Pb) içeren veya hiç kurşun içermeyen ayrıca daha iyi radyasyon kalkanlama özelliğine sahip camların geliştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar sürdürülmektedir (Çetin ve ark., 2017; Aktaş ve ark., 2019; Yılmaz ve ark., 2020; Yalçın ve ark., 2019).

Bu kapsamda silika, borat, borosilikat, alümina silikat, fosfat, germanat, tellürit ve bizmut camlar gibi pek çok farklı cam sistemi üzerine araştırma geliştirme faaliyetleri yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında nadir toprak iyonlarının oksit bileşik formlarından Hafniyum oksit ve Praseodimyum oksit birlikte borat cam sistemine katkılanarak mekanik, yapısal, optik ve radyasyon zırhlama parametreleri analiz edilmiştir

Önceki yapılan çalışmalar ve literatür araştırılması yapılarak tespit edilen bilgi ve bulgulara göre radyasyon zırhlamada kullanılacak cam materyeline katkılanacak malzemenin atom numarası ve oluşturulan ürünlerin (beton gibi) yoğunluğu arttıkça söz konusu malzemenin daha iyi bir radyasyon kalkanlayıcı özellik gösterdiği belirlenmiştir. Bu sebeple bu tez çalışmasında, bor esaslı ve radyasyon zırhlayıcı cam tasarımı için, yoğunlukları ve atom numarası yüksek NTE olan Praseodimyum oksit (Pr_2O_3) ve Hafniyum oksit (HfO_2) elementleri katkı maddesi olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın amacı ülkemizde bol miktarda yer alan bor elementinin üretim çeşitliliğini arttırmak adına Pr_2O_3 ve HfO_2 gibi nadir toprak elementleri kullanılarak fiziksel dayanım özellikleri çok daha iyi, renkli veya şeffaf ve yüksek kütle soğurma katsayısına sahip radyasyon zırhlayıcı camlar üretmektir. Fakat üretilecek camlarda yüksek radyasyon zırhlama özelliğine ilave olarak, mekanik özelliklerin de bilinmesi gerekmektedir. Çünkü üretimi yapılacak cam çok iyi bir radyasyon zırhlayıcı olsa da mekanik olarak göstereceği özelliklerinin istenilen değerde olmadıkça uygulanabilir olması ve yüksek teknoloji cihazlarında kullanılabilir olması beklenemez. Bu sebepten, bu tez çalışmasında radyasyondan korunma malzemesi olarak kullanılmak üzere nadir toprak elementi katkılı borat camlar üretilmiş ve bu camlara ait mekanik özellikler incelenmiştir

Radyasyon geçirgenliğini azaltmak için kullanılan ve doğaya zararlı olan kurşun katkılı camlardan daha faydalı, ALARA prensibine fazlasıyla uygun ve daha iyi mekanik özelliklerde borat camların elde edilebileceği düşünülmektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Nadir toprak elementi katkıları olarak hazırlanacak borat cam üretimi için tercih edilen başlangıç malzemeleri Borik asit (H_3BO_3) ve Tellür oksit (TeO_2) MERC firmasından, Alümina (Al_2O_3) ise NANOGRAFİ firmasından satın alınarak tedarik edilmiştir. Katkı malzemesi için tercih edilen nadir toprak elementlerinden cam yapıcı özelliği bilinen Hafniyum oksit (HfO_2) ve kütle numarası büyük olduğu için tercih sebebi olan Praseodimyum oksit (Pr_2O_3) ise NANOGRAFİ firmasından satın alınmak suretiyle tedarik edilmiştir. Tablo 4.1’de kullanılan malzemelerin genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Cam üretimi için kullanılan malzemeler

Malzeme	Formül	Molar Kütle (g/mol)	Yoğunluk (g/cm ³)
Borik Asit	H_3BO_3	61.83	2.46
Tellür Oksit	TeO_2	159,6	5,67
Alüminyum Oksit	Al_2O_3	101.96	3.95
Hafniyum Oksit	HfO_2	210,49	9.7
Praseodimyum Oksit	Pr_2O_3	329,813	6.5

4.2. Yöntem

Bu çalışmada nadir toprak elementi (Pr_2O_3 ve HfO_2) katkılı camlar $(69-x) H_3BO_3-20TeO_2-10Al_2O_3-1HfO_2+z xPr_2O_3$ ($x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) kompozisyonu ile üretilmiştir. Buna göre 5 farklı kompozisyon belirlenmiş ve eritme dökme metodu kullanılarak numuneler üretilmiştir. Camlar için belirlenen kompozisyon oranları Tablo 4.2.’de gösterildiği şekildedir.

Tablo 4.2. Cam kompozisyon oranları

Numune Kodları	Numune Bileşenleri mol %				
	H_3BO_3	TeO_2	Al_2O_3	HfO_2	Pr_2O_3
P1	69	20	10	1	0
P2	68.75	20	10	1	0.25
P3	68.5	20	10	1	0.5
P4	68.25	20	10	1	0.75
P5	68	20	10	1	1

İlk aşama olarak Tablo 4.2.'de gösterilen kompozisyon oranlarında tozlar tartılmıştır. Tartma işleminde 0,01 mg hassasiyetine terazi kullanılmış ve üretimi yapılacak cam numune boyutuna göre toplam ağırlık 12 gr olacak şekilde hesaplama yapılmıştır. Her bir tozdan belirlenen miktarlar şekil 4.1 de verildiği gibi hassas terazide tartılmıştır.



Şekil 4.1 Cam kompozisyonu için tozların tartım işlemi

Elde edilen tozlar birbirleri içerisinde homojen dağılması maksadı ile manyetik karıştırıcıda 30 dk boyunca 700 rpm'de karıştırılmıştır. Tozları eritmek için 50 ml hacminde alümina potalar kullanılmıştır. Eritme işlemi normal hava atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Tozların ergitmesi için yüksek dereceli MSE 1600 marka fırın kullanılmıştır. Eritme işlemi kademeli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk kademede toz karışımında borik asitten dehidrasyon ile bor oksit elde etmek için 5 °C/dk ısıtma hızında 200 °C ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat boyunca bekletilmiştir. İkinci aşamada yine 5 °C/dk ısıtma hızında sıcaklık 950 °C ısıtılmış eriyik haline gelen toz karışımının homojenizasyonu için bu sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletilmiştir. Elde edilen eriyik Şekil 4.2 de verilen önceden 300 °C'ye kadar ısıtılmış grafit kalıplara dökülmüş ve metal bir zımba vasıtası ile camlar 3 mm kalınlığında ve her karışımdan 3'er adet olarak üretilmiştir.



Şekil 4.2 Cam eriyiğin şekillendirme işlemi

Cam numunelerde kırılmalar meydana gelmesini önlemek amacıyla sıcaklık 1 saat içerisinde kademeli olarak oda sıcaklığına düşürülmüştür. Şekil 4.3 verilen numunelerdeki artık gerilmeleri gidermek için gerilme giderme tavlama işlemi yapılmıştır. Elde edilen numuneler 2°C/dk ısıma hızı ile 300 °C tekrar ısıtılmış bu sıcaklıkta 3 saat bekletildikten sonra yine tekrar 2°C/dk soğutma hızında oda sıcaklığına getirilmiştir.



Şekil 4.3. Üretimi yapılmış camlar

5. DENEYLER

5.1. Yoğunluk Ölçümü

Elde edilen cam numunelerinin yoğunlukları, yine Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.1’de gösterilen Radwag markalı yoğunluk ölçme cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Camların yoğunluklarının belirlenmesi için Arşimet ilkesi yöntemlerine göre ilk önce numunenin havada asılı ağırlığı ve daha sonra saf suyun içinde bulunduğu durumdaki ağırlıkları ölçülmüştür. Yoğunluk hesaplarının yapılmasında, aşağıda belirtilen Denklem 5.1 kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Arşimet yoğunluk kiti

$$\rho = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times \rho_s \quad (5.1)$$

Bu denklemden;

ρ : Numune yoğunluğunu (gr/cm³)

m_h : Numuneye ait havadaki ağırlığı (gr)

m_s : Numuneye ait sıvı içerisindeki ağırlığı (gr)

ρ_s : Saf suya ait yoğunluğu (gr/cm³) göstermektedir.

Cam numunelere ait molar hacimler (V_M) ise aşağıda yer alan Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_M = \frac{M_T}{\rho} \quad (5.2)$$

Burada;

M_T : Çok komponentli cam sisteminin toplam moleküler ağırlığı (gr/mol)

ρ : Numunenin yoğunluğudur. (gr/cm³)

5.2. XRD Analizi

Malzemenin yapısına ve malzemeye gönderilen x- ışınının dalga boyuna bağlı olarak farklı kırınım desenleri meydana gelir. XRD sonucunda elde edilen kırınım desenindeki tek geniş pik malzemenin amorf yapısını doğrular. Malzeme üretimi sırasında yapılan ısı işlem sıcaklığı ve ısı işlem maruz kalma süresi çok önemlidir. Bu verilerin farklı değerlerde açığa çıkması incelenen malzemenin farklı yapıda olduğunu (cam, cam seramik vb.) anlamına gelmektedir.

Cam numunelerin X-ışınları difraktometresi Harran Üniversitesi Bilimsel ve teknolojik Araştırma Merkezinde (HÜPTAM) bulunan Rigaku Dmax 2000 X ışını difraktometresinde 10-90° tarama açısında 0.02 tarama adımında alındı. X-ışınları difraksiyonu yöntemiyle cam numunelerin amorf yapısının doğrulanması, oluşan yapıların saptanması yapılmıştır.

5.3. Sertlik, Kırılma Toklukları ve Gevrekliklerin Belirlenmesi

Üretilen numunelere yüzey işlemleri uygulanarak mekanik özelliklerin ölçümlerinin sağlıklı yapılması sağlanmıştır. Bunun için öncelikle epoksi ile numunelere soğuk kalıplama işlemi yapılmıştır. Daha sonra kalıplardan çıkarılan numuneler sırasıyla 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 gridlik SiC zımparalarla yüzeydeki tüm çizikler giderilene kadar zımparalanmıştır. Daha sonra numune yüzeyleri 3 ve 1 µm'lik elmas solüsyonlar kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. (Şekil 5.2a).



Şekil 5.2. a) Zımparalama ve parlatma cihazı b) Sertlik ölçüm cihazı

Camların mekanik özelliklerine Pr_6O_{11} ilavesinin etkilerini tespit etmek için Harran Üni. Mak. Müh. Bölümü malzeme laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.2b’de gösterilen AOB Lab. Marka mikro Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Cam örneklerin sertlikleri, 1000 gr yükün 15 sn boyunca uygulanması ile ölçüm yapılmıştır. Her numune üzerinden 5 adet ölçüm alınmış ve ortalamaları konulmuştur. Sertlik ölçümleri esmasında söz konusu numuneler üzerinde oluşan iz köşegenleri ölçülerek ve aşağıda yer alan Denklem 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$H_v = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (5.3)$$

Burada;

H_v : Vickers sertliğini (kg/mm^2)

P: Uygulanan yükü (kg)

d: İzin köşegen uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.

Cam örneklerin kırılma toklukları ise Half-Peny-Crack yöntemiyle aşağıdaki Denklem 5.4 kullanılarak hesaplanmıştır. (Anstis, 1981). Burada sertlik izlerinin uçlarında oluşan çatlak boyları kullanılmıştır.

$$K_{Ic} = 0,016 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{C^{3/2}} \right) \quad (5.4)$$

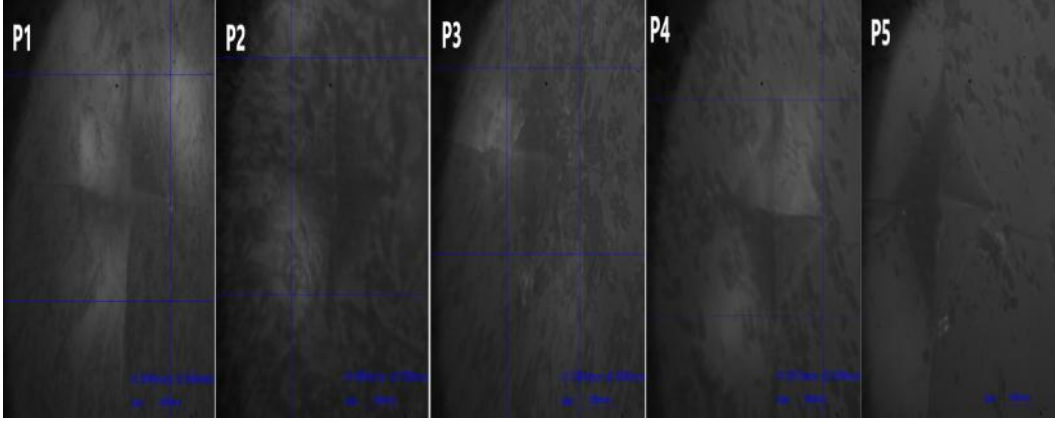
Burada;

K_{Ic} : Kırılma tokluğunu ($\text{MPa.m}^{0.5}$)

E: Malzemenin elastisite modülünü (GPa)

P: Uygulanan yükü (kg)

c: Çatlak uzunluğunu (m) ifade etmektedir.



Şekil 5.3. Sertlik ölçümü işlemi yapılan numuneler

Sertlik ölçümleri yapılan cam örnekleri üzerinde yük uygulanmasından sonra oluşan çentik izleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

5.4. UV-Vis Spektroskopisi

Spektroskopik çalışmaların temeli elektromanyetik dalganın söz konusu madde ile etkileşmesi prensibine dayanmaktadır. Bu etkileşim, elektromanyetik dalganın söz konusu materyal tarafından soğurulması(emilim) veya yayınlanması şeklinde olmaktadır. Materyal üzerine yollanan elektromanyetik dalganın, atom veya atom moleküllerini uyarmak için fotonlar tarafından soğurulmasına mor ötesi-görünür (UV-Vis) spektroskopisi denmektedir. UV-Vis spektroskopisi, mor ötesi veya görünür bölgedeki bir elektromanyetik ışının madde tarafından soğurulmasına dayanır ve sistemlerin molekül orbitallerine eşdeğer olan enerji seviyeleri arasındaki elektronik uyarımlara karşılık gelir (UV=200-400 nm, Vis= 400-800 nm). Malzemeyi geçen elektromanyetik dalgalar analiz edildiğinde, soğurulan fotonlara karşı gelen dalga boyu değeri azalır ve dalga boyları her atom veya molekül için farklıdır. Dolayısıyla, analiz sonucunda elde edilen değerler malzeme hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar. Morötesi bölgesi; moleküler bağ yapıları ve şekilleri, görünür bölge; elektronik geçişler ve maddelerin elektronik yapılarının durumu hakkında bilgi verirler (Zhong-Zhang, 2009). UV-Vis ölçümlerinde döteryum (D2), tungsten (W), hidrojen (H2), ksenon (Xe), civa buhar lambası gibi sürekli ışık kaynakları kullanılır.

Bu tez çalışmasında nadir toprak elementleri katkılanarak sentezlenen camların geçirgenlik ve soğurma spektrumları Harran bilimsel araştırmalar merkezi Laboratuvarı'nda bulunan Shimadzu UV-1700 PharmaSpec Spectrophotometre kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 5.3'te gösterilen UV-Vis spektrometresi 1 nm slit değerinde 100-1400 nm aralığında tarama yapabilmektedir.



Şekil 5.4. UV-Vis spektrometresi

5.5. FT-IR analizi

Üzeritimi yapılan camlara ait yapısal karakter analizleri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yöntemi ile belirlenmiştir. Cam numunelere ait 400-4000 cm^{-1} dalga numarası aralığında reflektans değerleri laboratuvar ortamında Bruker Hyperion 3000 model FT-IR cihazı ile belirlenmiştir.

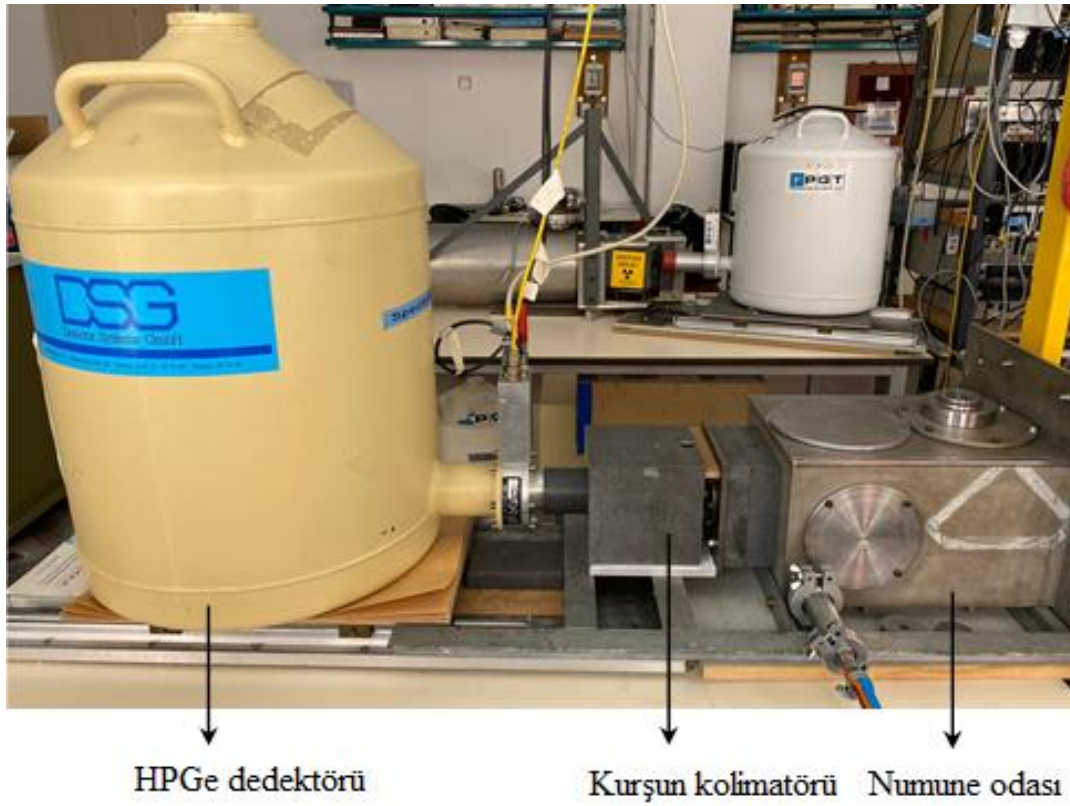
5.6. Radyasyon zırlama parametreleri

Cam numuneler için elementlerin ağırlıkları kesirleri, ortalama atom sayıları, bileşimlerdeki katkı miktarları (% mol olarak) ve yoğunluk Tablo 5.1'de verilmiştir.

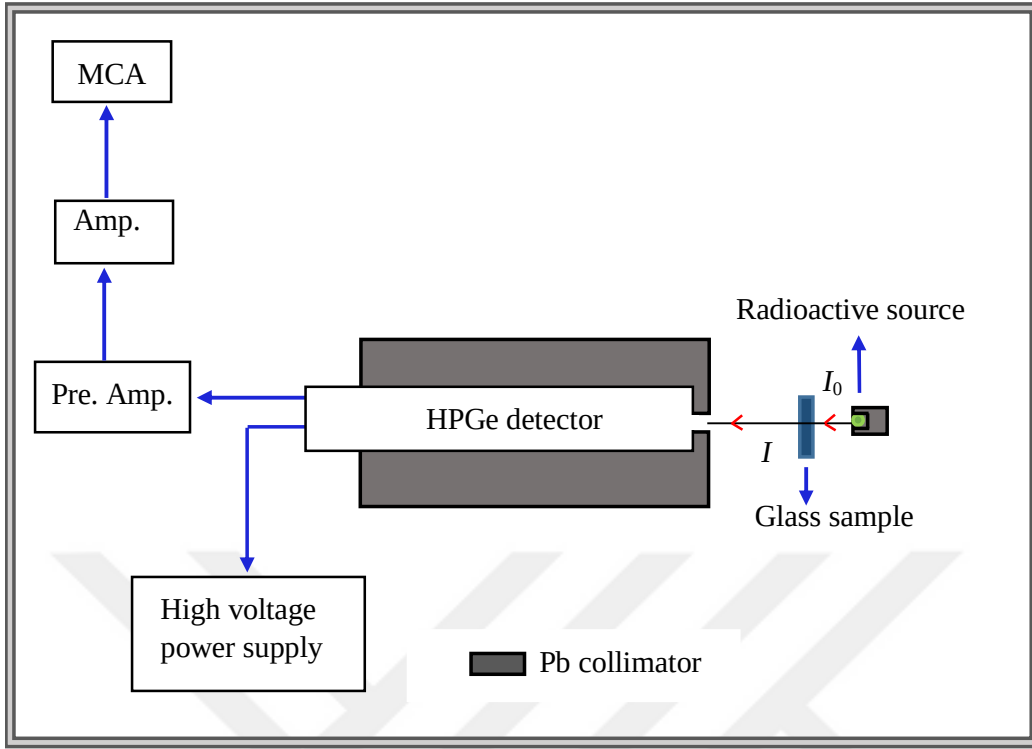
Tablo 5.1. Cam kompozisyon element ağırlıkları

Numune Kodları	Numune bileşenleri ağırlıkları(g)					
	B	O	Te	Al	Hf	Pr
P1	0.1617	0.4838	0.2766	0.0585	0.1617	0
P2	0.1571	0.4751	0.2697	0.0570	0.1571	0.0223
P3	0.1527	0.4667	0.2630	0.0556	0.1527	0.0436
P4	0.1485	0.4587	0.2567	0.0543	0.1485	0.0638
P5	0.1445	0.4512	0.2507	0.0530	0.1445	0.0831

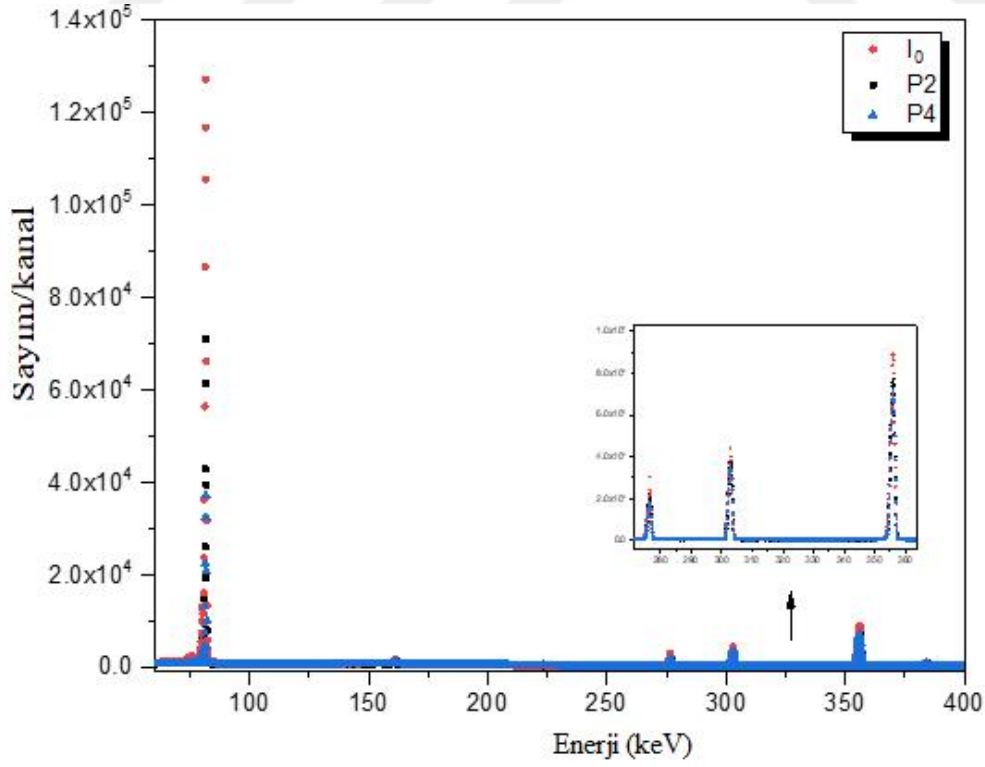
Hazırlanan cam numuneler için tüm numunelerde P kısaltması kullanılmaktadır. 59.54 keV 80.99 keV, 276.39 keV, 302.85 keV, 356.01 keV, 383.85 keV ve 661.62 keV enerji fotonları için hazırlanan camın radyasyon koruma parametreleri (MAC, LAC, MFP, HVL, Zeff ve Nel) bir HPGe kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Şekil 5.4. ve Şekil 5.5. sırasıyla deney düzeneğinin fotoğrafını ve geometrisini göstermektedir. Veriler Maestro yazılımı tarafından toplandı ve analiz edildi. Darbe yüksekliği spektrumları 900 s için toplandı. Ba¹³³ kaynağı ile bombardımana tutulan numunelerin (P2 ve P4) I₀ ve I yoğunlukları için tipik gama spektrumları Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Deney düzeneği



Şekil 5.6 Deney düzeneği geometrisi



Şekil 5.7. Ba^{133} kaynağı P2 ve P4 örnekleri ile elde edilen tipik spektrumlar

5.6.1. Kütle zayıflama katsayıları

Kütle zayıflama katsayıları (MAC, cm^2g^{-1}) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\rho} \quad (1)$$

Denk. (11), μ (cm^{-1}), I_0 , I sırasıyla doğrusal zayıflama katsayısı (LAC), gelen ve iletilen foton yoğunluklarıdır. t (cm) ve ρ (gcm^{-3}) cam numunesinin kalınlığı ve yoğunluğudur. İncelenen örneklerin teorik MAC değerleri XCOM programı kullanılarak hesaplandı. (Radiat. Phys. Chem., 2004)

5.6.2. Ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı

Ortalama serbest yol (MFP) ile yarı değer katmanı (HVL) hesaplamaları aşağıdaki fomüllerle yapılır.

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{\mu} \quad (3)$$

5.6.3. Etkili atom numarası

Etkili atom numaraları (Z_{eff}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Z_e = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}} \quad (4)$$

Hesaplamalarda toplam elektronik kesit ($\sigma_{t,e}$) ve toplam atomik kesit ($\sigma_{t,a}$) kullanıldı.

5.6.4. Elektron yoğunluğu

Elektron yoğunluğu (N_e) aşağıdaki ifade kullanılarak elde edilir

$$N_e = N_A \frac{n Z_e}{\sum_i n_i A_i} \quad (5)$$

burada i_{th} elementin atom sayısı, n_i toplam atom sayısı, N_A Avogadro sayısı ve i_{th} elementin atom ağırlığı ise A_i şeklinde gösterilmiştir.

5.6.5. Hızlı nötron giderme kesiti

Hızlı nötron uzaklaştırma kesiti (ΣR) aşağıdaki gibi verilir:

$$\Sigma R = \sum_i W_i \left(\Sigma_{R/\tau} \right)_i \quad (6)$$

Hızlı nötron uzaklaştırma kesiti, i_{th} elementin kısmi yoğunluğu (W_i , g/cm³) ve kütle çıkarma kesiti ($\Sigma_{R/\tau}$, cm²/g) kullanılarak hesaplanır. (Phy-X / PSD 2020)

5.6.6. Maruz kalma oluşturma faktörü

Maruziyet oluşturma faktörü (EBF), cihaza ulaşana kadar havadaki radyasyon değişimlerinin etkisini ayarlayan bir değişkendir. Oluşum faktörü, foton enerjisine ve penetrasyon derinliğine bağlıdır. Bu çalışmada, EBF, 40mfp'ye kadar 0.015-15MeV enerji bölgesinde G-P uydurma parametrelerini sağlayan Phy-X/PSD programından hesaplanmıştır (Phy-X / PSD 2020)

5.6.7. Kütle durdurma gücü ve öngörülen menzil

Yüklü bir parçacığın kütle durdurma gücü (MSP), kinetik enerjisindeki azalmayı belirler. Öngörülen aralık (PR), yüklü parçacıkları durdurmak için ortalama aralıktır. Proton ve alfa parçacıkları için MSP ve PR, SRIM bilgisayar programı kullanılarak hesaplandı. (J. Ziegler 2004)

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

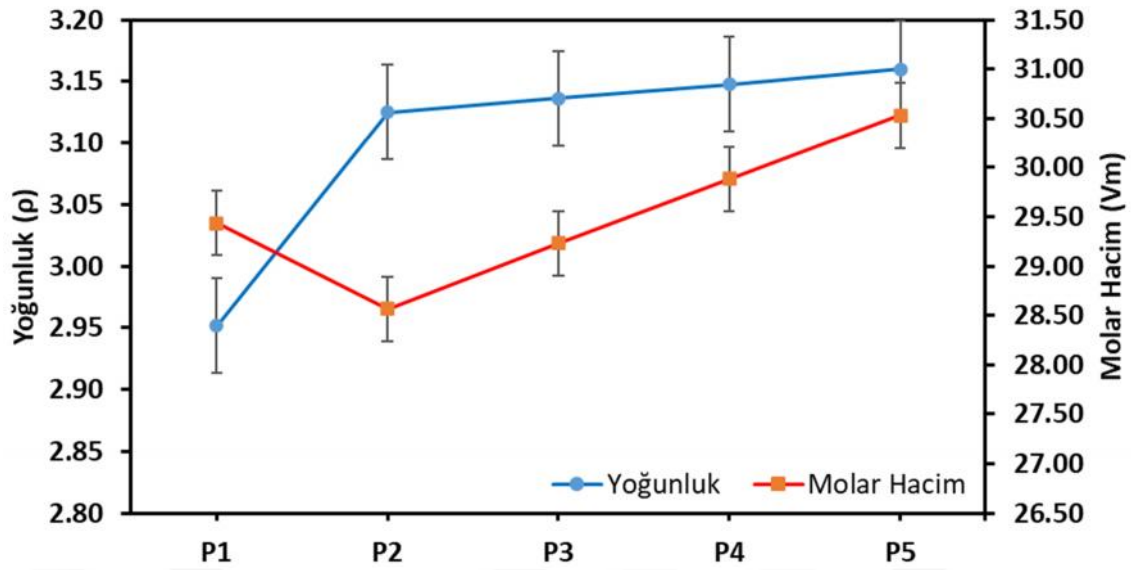
6.1. Yoğunluk ve Molar Hacim

Cam ağındaki yapısal farklılıklar, camların fiziksel parametrelerindeki farklılıkla açıklandığı gibi, nadir toprak iyonlarının eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Camın yoğunluğu, endüstriyel/ticari cam üretimi için temel parametrelerden biridir. Molar hacmi, elastik özellikleri, kırılma indisini ve birçok fiziksel özelliği hesaplamak için cam yoğunluğu temel oluşturur. Tablo 6.1'de cam örneklerinin molar hacmini ve yoğunluğunu göstermektedir.

Tablo 6.1. Numunelerin fiziksel özellikleri

Numune Kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Molar Hacim (cm ³ /mol)
P1	2.952	29.44
P2	3.125	28.57
P3	3.136	29.23
P4	3.148	29.89
P5	3.160	30.53

Numunelere Praseodimyum Oksit ilavesiyle molar hacim değişirken numunelerin yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Yoğunluktaki artışın nedeni öncelikle molar kütlesi ve yoğunluğu daha düşük olan B₂O₃ moleküllerinin (M=69,62 g/mol, ρ =2,46 g/cm³) yerine molar kütlesi ve yoğunluğu çok daha yüksek olan Praseodimyum Oksit (Pr₆O₁₁) (M=1021.44 g/mol, ρ =6,82 g/cm³) ikamesiyle açıklamak mümkündür. Molar kütlesi daha fazla olan Praseodimyum iyonlarının cam yapısına katılması ile cam yapısında köprülenmeyen oksijen (NBO'lar) oluşturarak modifiye edici olarak ağı girer ve dolayısıyla yoğunluk artar. Praseodimyum Oksit eklenmesiyle [BO₃] kristal yapılarının çok daha sıkı kristal oryantasyona sahip [BO₄] yapılarına dönüşmesine neden olmuştur. Sentezlenen camlar arasındaki molar hacimdeki artış, cam yapıyı oluşturan bileşiklerdeki atomlar arası boşluktaki değişikliklerden de kaynaklanabilir. Praseodimyum oksit eklenmesiyle, boron-boron ayrılma mesafesi artar. Praseodimyum Oksit konsantrasyonundaki artışla camdaki rastgeleliğin arttığı anlamına gelir. Nadir toprak iyonu hem ağ oluşturunca hem de ağ değiştirici olarak işlev görür. Bazı cam bileşimleri için cam yapısının kompaktlığını artıracak ve diğer bazı cam bileşimleri için, nadir toprak iyonlarının eklenmesiyle kompaktlık azalacaktır. Pr³⁺ iyonlarının iyonik yarıçapı büyük olduğu için cam yapıda bir genleşme olur ve dolayısıyla molar hacim artar (V_m). yoğunluk ile molar hacimde yaşanan değişim Şekil 6.1.'de gösterildiği şekilde olmuştur.



Şekil 6.1 Yoğunluk, molar hacim grafiği

6.2. Camların mekanik özellikleri

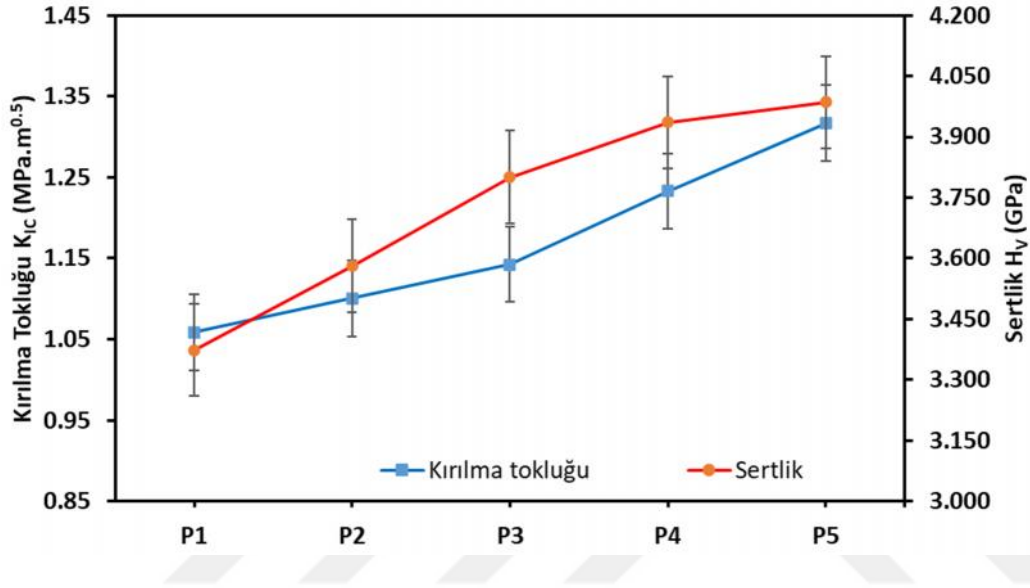
Numunelerin sertliğinin değerlendirilmesi için cam numuneler üzerinde vickers mikro sertlik test cihazı kullanılarak mikro girinti deneyi yapılmıştır. Sentezlenmiş camların farklı uygulamalar için gerilmelere karşı mekanik olarak kararlı olması kritik öneme sahiptir. Vickers sertlik deneyinde 1000 g ağırlığındaki yük her bir için 15 s girinti yapılmış ve her numuneden 5 sertlik ölçümü yapılmıştır. Şekil 6.2’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde numunelerde Pr_6O_{11} konsantrasyonu arttıkça sertlik değerlerinin yükseldiği gözlenmiştir. Cam sistemi için mekanik özelliklerden kırılma tokluğu ve gevreklik değerlerine ait sonuçlar da Tablo 6.2.’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Numunelerin mekanik özellikleri.

Numune kodu	Sertlik (GPa)	Kırılma tokluğu ($\text{MPa.m}^{0.5}$)	Gevreklik ($\mu\text{m}^{0.5}$)
P1	3.371	1.059	3.186
P2	3.582	1.100	3.255
P3	3.801	1.142	3.327
P4	3.936	1.233	3.192
P5	3.985	1.317	3.026

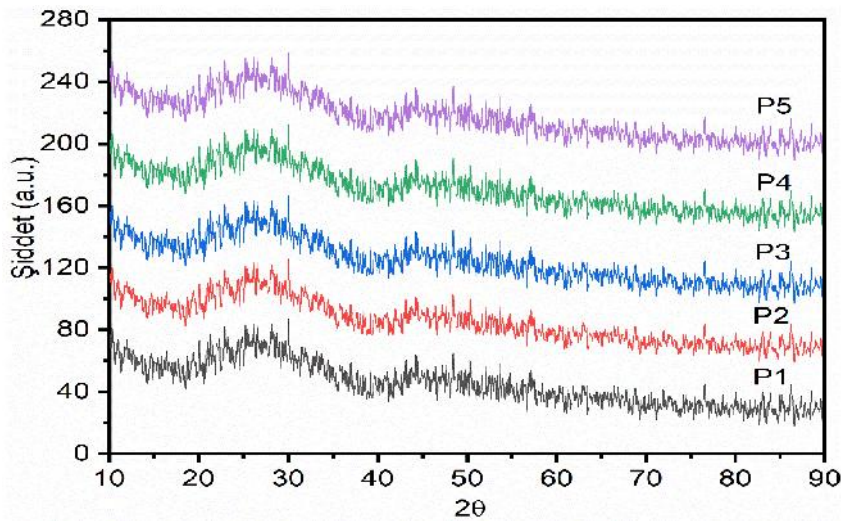
Numunelerin kırılma tokluğu değerleri Half-Penny modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bu modelde numunelere uygulanan sertlik izlerinin ucunda meydana gelen

radyal ve medyan çatlak boyları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu cam sisteminde farklı numunelerde elde edilen değerlerin karşılaştırılabilmesi için tüm camlara uygulanan yükün aynı olması gerekir. Tüm numunelerin girinti köşelerinde medyan/radyal çatlakları iletirmek için yeterli enerji 1 kg yük ile yaratılmıştır. Numunelerde sertlik davranışına paralel olarak Pr_6O_{11} konsantrasyon arttıkça kırılma tokluğu değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Dolayısıyla numunelerin gevreklik indisi de azalmıştır.



Şekil 6.2. Sertlik ve kırılma tokluğu grafiği

6.3. X-Işını kırınım (XRD) analizi

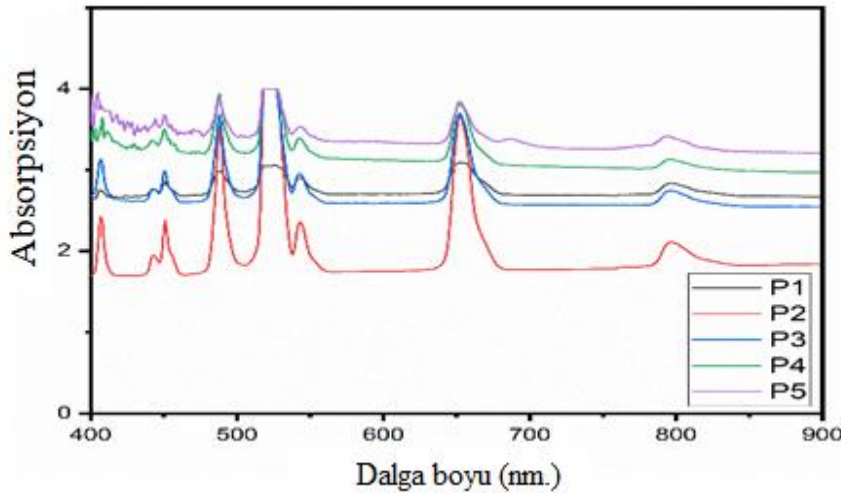


Şekil 6.3. Numunelerin X-ışını kırınım desenleri

Mevcut camların amorf doğasını analiz etmek için X-Işını Kırınımı (XRD) gerçekleştirilmiştir. Pr_6O_{11} katkılı camların toz XRD desenleri Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Tüm Pr_6O_{11} katkılı camların XRD desenlerinden $2\theta=22^\circ$ ila 34° ve 41° ila 49° arasında iki geniş pik gözlemlendi. Bragg piklerinin olmaması, hazırlanan camların amorf doğasını gösteriyor. Bu, amorf malzemelerin karakteristik bir doğasıdır. Lodi ve arkadaşlarına göre, iki hale, trigonal (BO_3) ve tetrahedral (BO_4) borat gruplarının varlığından ve bunların cam ağındaki düzlemler arası boşluklarından kaynaklanmaktadır.

6.4 Uv-vis Analizleri

Şekil 6.4'te oda sıcaklığında bulunan cam numunelerdeki Pr_6O_{11} ilavesinin optik absorpsiyon spektrumlarını gösterilmektedir. Elde edilen grafik verileri direkt bant aralığı enerjilerini içermektedir. Pr_6O_{11} bileşeni arttıkça bant aralığı enerji değerleri yükselmekte, bu da incelenen cam yapının değiştiğini göstermektedir.

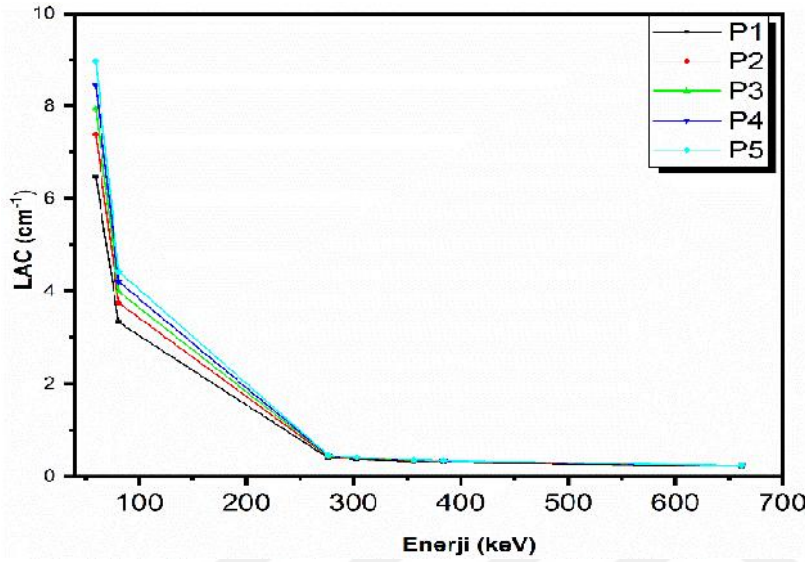


Şekil 6.4. Numunelerin Uv-vis spektrumları

6.5 FT-IR analizleri

Cam sistemlerinde yer alan yapısal değişikliklerden kaynaklanan kimyasal bağları belirlemek için borosilikat camlarının FTIR spektrumları incelenmiştir. Yapısal değişiklikler nedeniyle cam kalitelerinde önemli değişiklikler meydana gelebilir. Çalışılan ve içeriğine nadir toprak elementleri katkılanarak hazırlanan camların kızılötesi spektrumları Şekil 6.5'te sunulmaktadır.

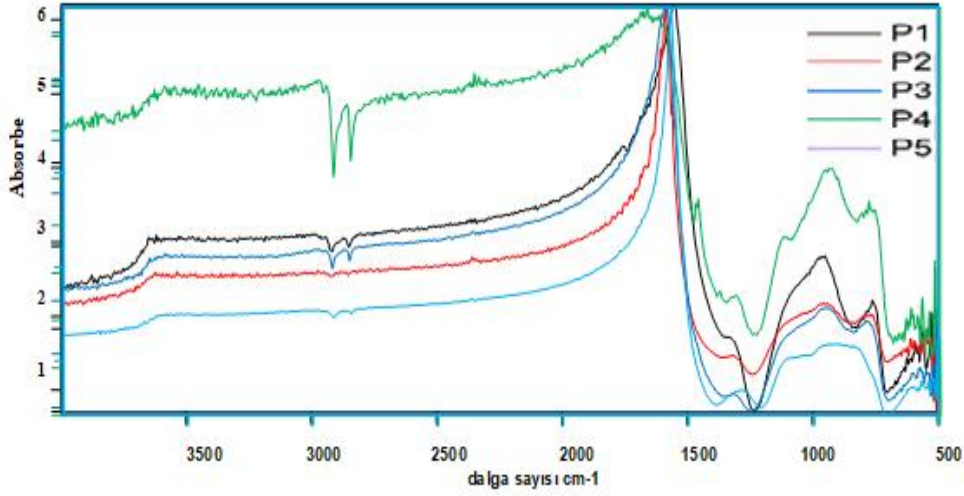
Her numunenin 3000-2500 cm^{-1} bölgesinde Pb-O gerilme titreşimlerine atfedilebilen küçük bir absorpsiyon bandı bulunmaktadır. $[\text{PbO}_4]$ yapı birimlerindeki Pb-O kovalent bağlarının titreşimlerine ilişkin bantlar tüm cam sistemlerinde 1500-500 cm^{-1} arasında gözlenmektedir.



Şekil 6.5. FT-IR grafikleri

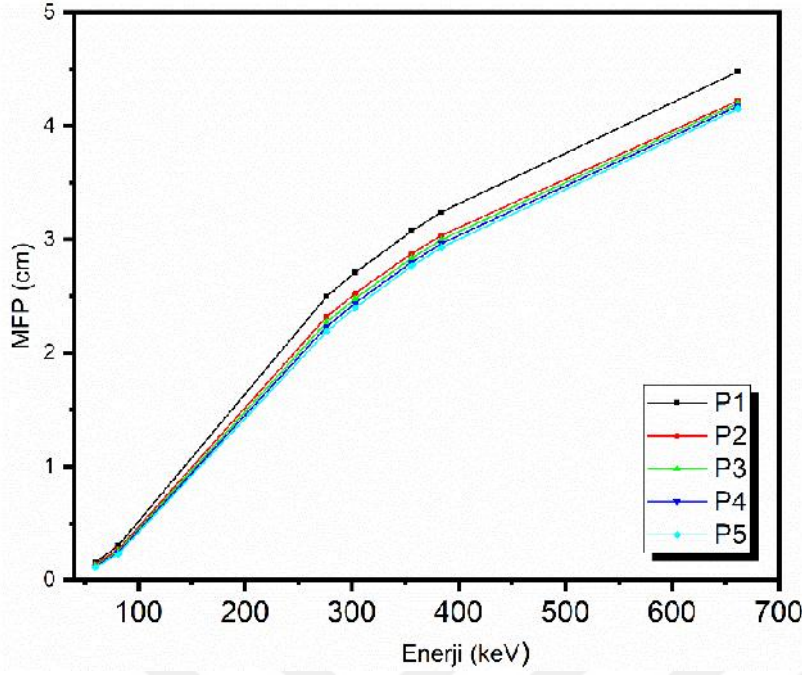
6.6 Radyasyon özelliklerinin analizi

Elde edilen 5 adet numunenin lineer azaltma katsayısı (LAC) değerlerinin numune üzerine gönderilen enerji ile birlikte azaldığı ve LAC değerinin cam kopozisyon içerisindeki Praseodimyum konsantrasyonunun artması ile yükseldiği görülmektedir.

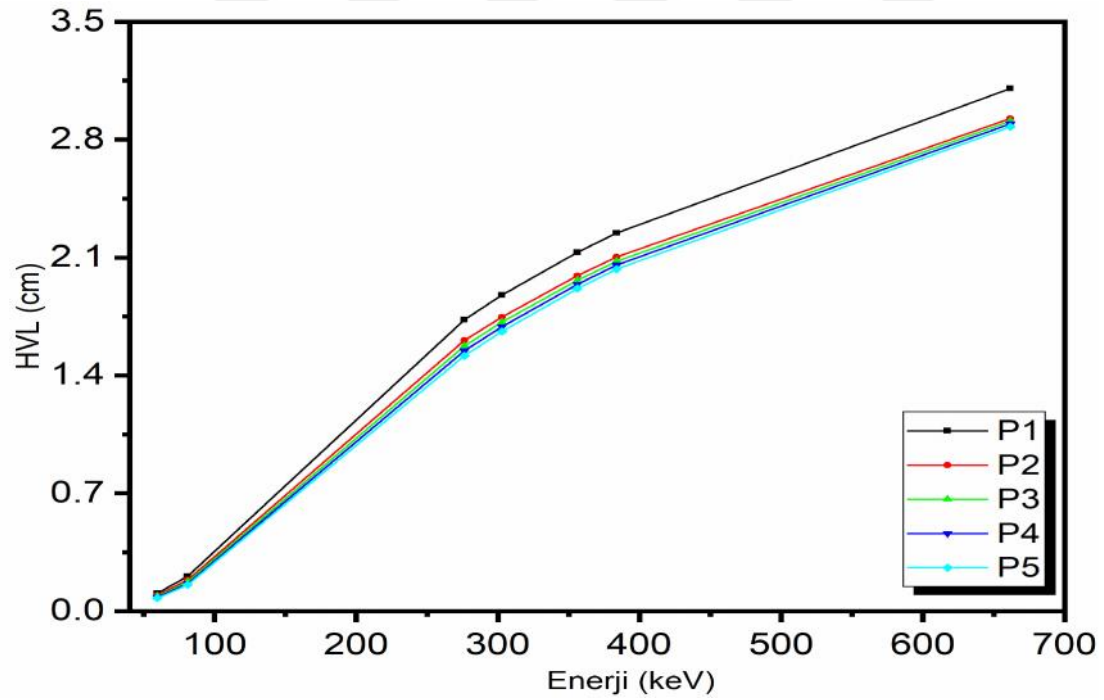


Şekil 6.6. Hazırlanan cam örneklerinin LAC değerleri

Üretimi yapılan camların daha iyi ortalama serbest yol (MFP) ve yarı değer kalınlığı (HVL) değerlerine sahip olması, bu camların daha iyi radyasyon kalkanlayıcı olduğu anlamı taşımaktadır. HVL ve MFP değerleri için yapılan deneyler sonucunda elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Üretilen tüm cam numunelerin HVL ve MFP değerleri cam içeriğinde yer alan katkı konsantrasyonuna ve verilen gama ışını enerjisine bağlı olduğu görülmektedir. Bu değerlerin cam sisteminin katkı konsantrasyonundaki artışla birlikte azaldığı görülmektedir. Üretilen camlardaki nadir toprak elementi (Pr_6O_{11}) katkı konsantrasyonu arttıkça camların radyasyon koruma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Söz konusu grafiklerde gösterilen MFP ve HVL değerleri P5 camı için çalışılan foton enerji aralığındaki en düşük değerlerdir. En yoğun Pr_6O_{11} içeren P5 numunesi incelenen foton enerjilerinde daha düşük HVL ve MFP değerleri sonucu vermesi sebebiyle daha iyi radyasyon zırhlama özelliği göstermektedir.



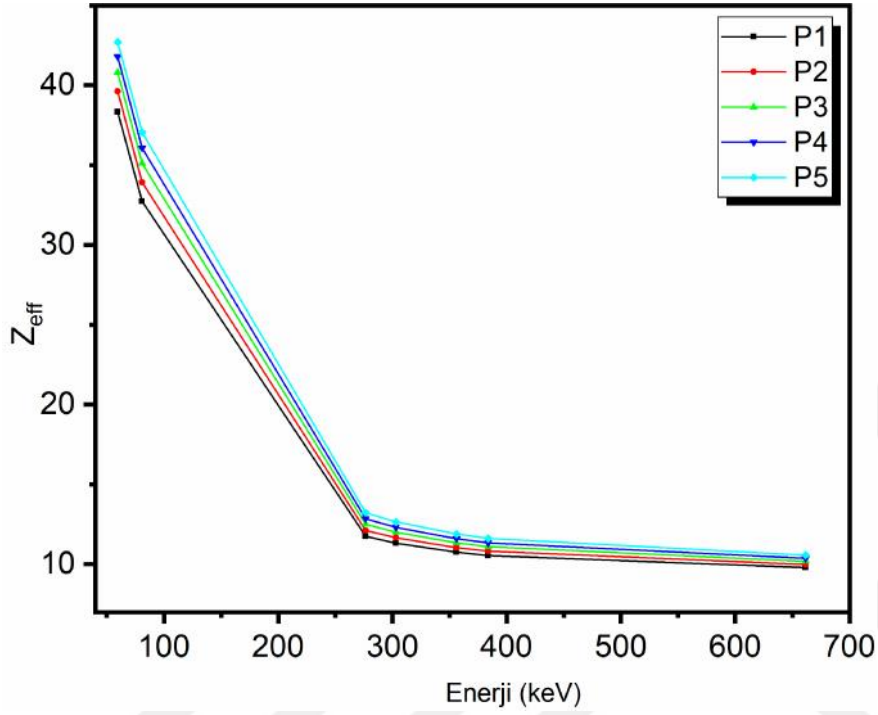
Şekil 6.7. Hazırlanan cam örneklerinin HVL değerleri



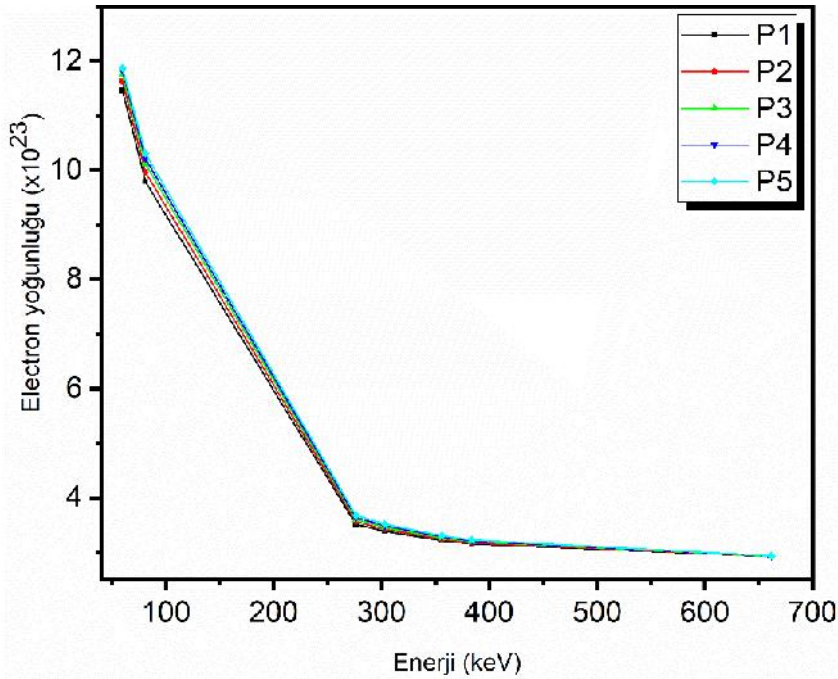
Şekil 6.8. Hazırlanan cam örneklerinin MFP değerleri

Üretimi yapılan camların efektif atom numarası (Z_{eff}) değeri Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Burada Pr_6O_{11} ilavesi ile yükselmesi beklenen atom numarasının yükseldiği

görülmüştür. Ayrıca cam numuneleri deneysel olarak bulunan elektron yoğunluk değeri (N_{el}) Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Burada yine aynı şekilde Pr_6O_{11} ilavesi ile cam numuneler ait N_{el} değerinin arttığı görülmüştür.

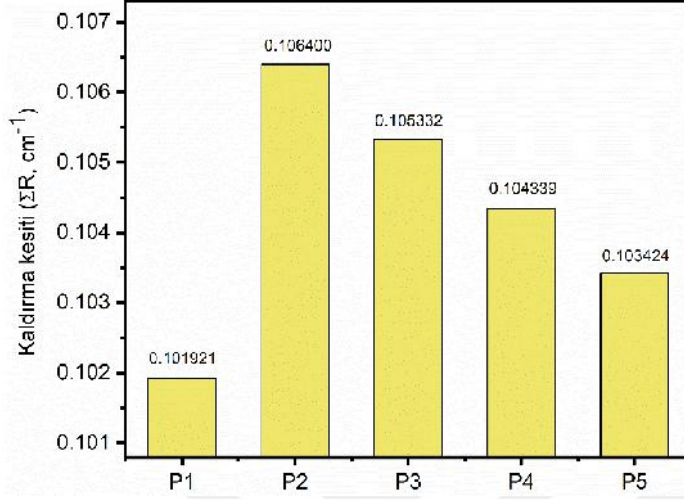


Şekil 6.9. Hazırlanan cam örneklerinin Z_{eff} değerleri



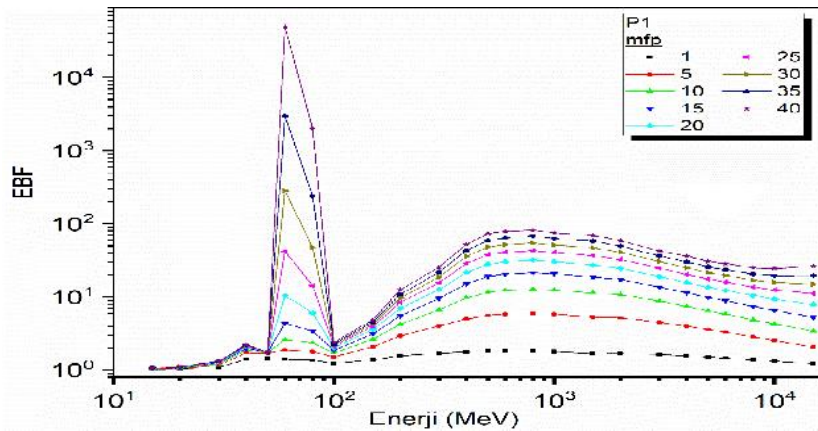
Şekil 6.10. Hazırlanan cam örneklerinin N_{el} değerleri

Üretilen camlara ait hızlı nötron giderme kesiti FAST değerleri grafiği Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Yapılan deneylere göre en düşük FAST değeri P1 numunesinden ve en yüksek FAST değeri P2 numunesinden elde edilmiştir.

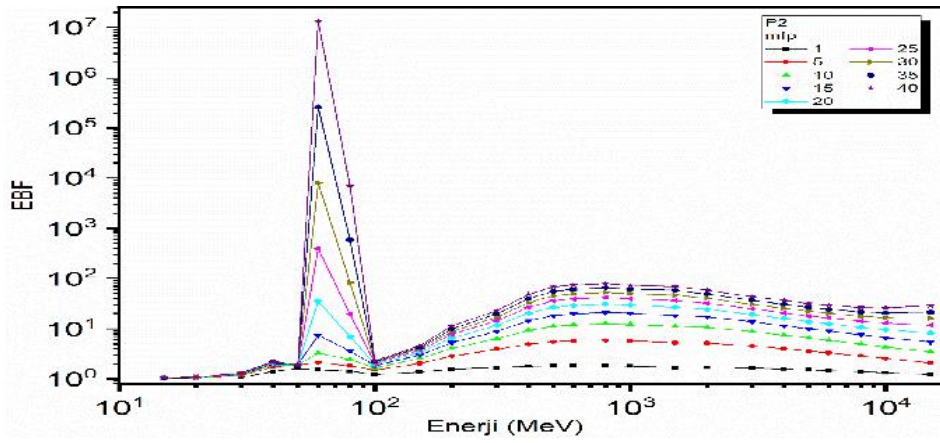


Şekil 6.11. Hazırlanan cam örneklerinin FAST değerleri

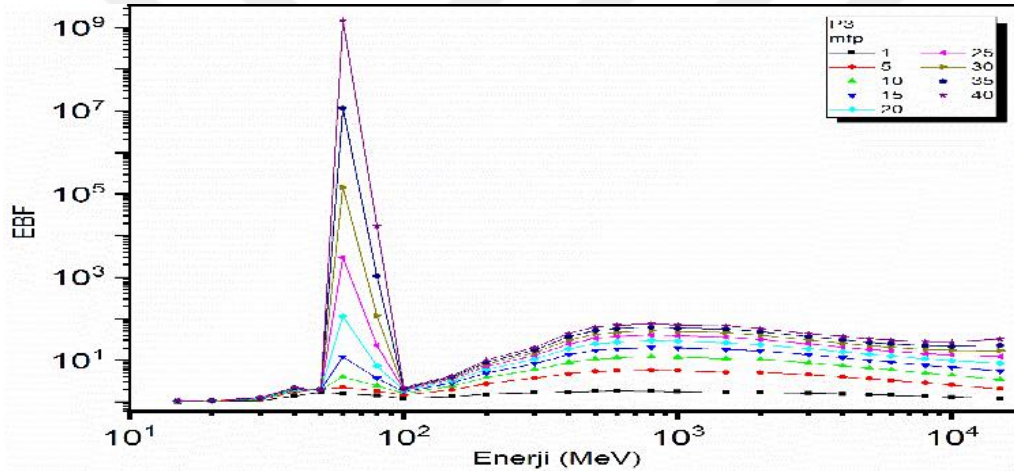
Hazırlanan cam numuneler için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörleri (EBF) her numune için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 6.12 ile Şekil 6.16 aralığında gösterilmiştir. Maruziyet oluşturma faktörü (EBF), numuneye ulaşana kadar havadaki radyasyon değişimlerinin etkisini ayarlayan bir değişkendir. Oluşum faktörü, foton enerjisine ve penetrasyon derinliğine bağlıdır. Bu çalışmada EBF, Phy-X/PSD programı kullanılarak her numune için hesaplama yapılmıştır.



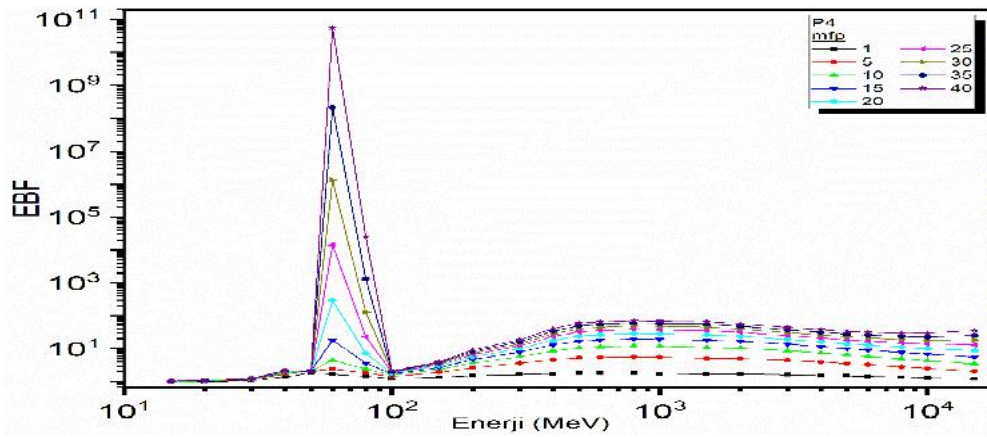
Şekil 6.12. P1 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi



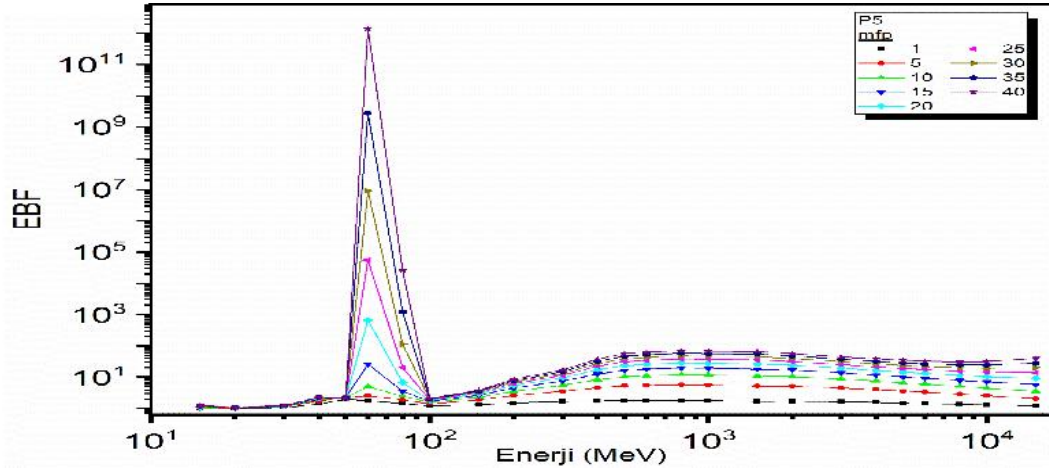
Şekil 6.13. P2 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi



Şekil 6.14. P3 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi

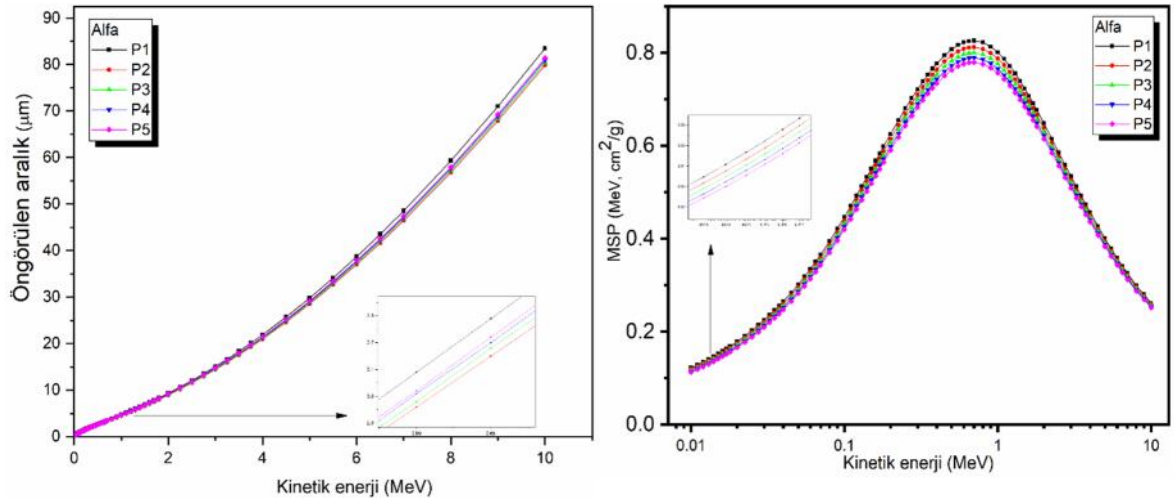


Şekil 6.15. P4 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi

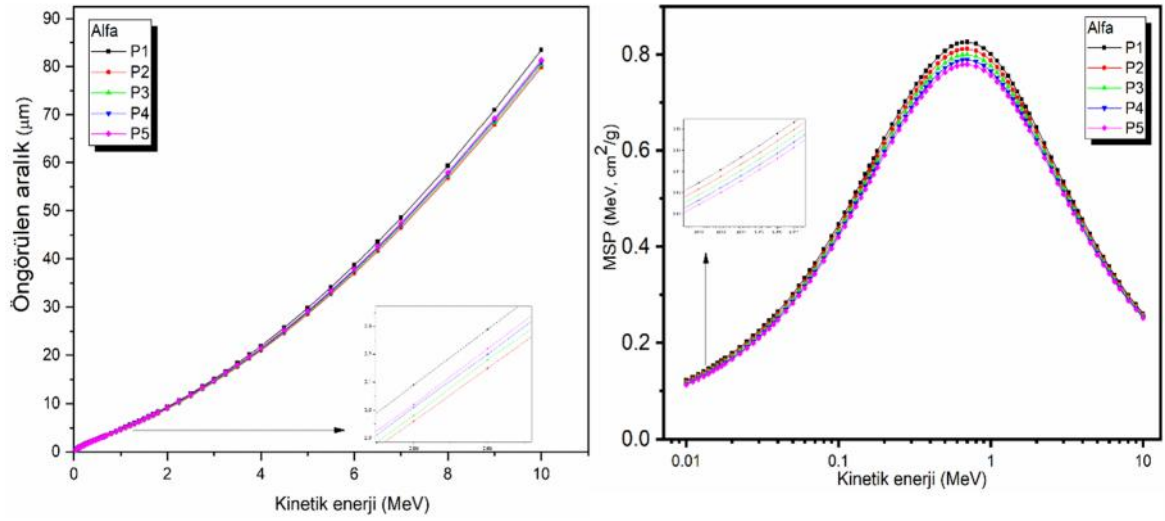


Şekil 6.16. P5 cam numunesi için penetrasyon derinliği ile maruz kalma oluşturma faktörlerinin değişimi

Üretilen camlara ait Kütle durdurma gücü (MSP), ve öngörülen menzil (PR) proton için Şekil 6.17’de ve alfa için Şekil 6.18’de gösterilmiştir. Burada yüklü bir parçacığın kütle durdurma gücü kinetik enerjisindeki azalmayı belirler. Öngörülen aralık (PR), yüklü parçacıkları durdurmak için ortalama aralıktır. Proton ve alfa parçacıkları için MSP ve PR, yine deney düzeneğine bağlı bilgisayar programı kullanılarak hesaplanarak grafik haline dönüştürülmüştür.



Şekil 6.17. Araştırılan camlar için kinetik enerjinin bir fonksiyonu olarak proton kütle durdurma güçlerinin (MSP) ve öngörülen aralığın (PR) değişimi



Şekil 6.18. Araştırılan camlar için kinetik enerjinin bir fonksiyonu olarak alfa kütlesi durdurma güçlerinin (MSP) ve öngörülen aralığın (PR) değişimi

Deneysel ve teorik kütle zayıflama katsayıları (MAC) Tablo 6.3'te verilmiştir. MAC değerlerine ait deneysel ve teorik sonuçlar arasında çok iyi uyum olduğu görülmüştür. Bu değer foton enerjilerine bağlıdır ve cam numuneye uygulanan foton enerjisi arttıkça MAC değeri azalmaktadır. Cam numunede Pr_6O_{11} molar konsantrasyonu arttıkça sistemin MAC değeri artış göstermektedir.

Tablo 6.3. Numunelerin deneysel ve teorik kütle zayıflama katsayıları (MAC)

Enerji (keV)	P1		P2		P3		P4		P5	
	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
59,54	21,929	2,1897±0,0311	23,653	2,2530±0,0478	25,334	2,6254±0,0304	26,869	2,6756±0,0816	28,381	2,8425±0,1322
80,99	11,276	1,1125±0,0158	11,988	1,1875±0,0252	12,725	1,2845±0,0160	13,354	1,3312±0,0399	14,017	1,4123±0,0657
276,39	0,1357	0,1342±0,0019	0,1370	0,1355±0,0029	0,1404	0,1428±0,0018	0,1424	0,1431±0,0044	0,1446	0,1469±0,0068
302,85	0,1252	0,1246±0,0018	0,1269	0,1274±0,0027	0,1288	0,1325±0,0017	0,1304	0,1333±0,0041	0,1320	0,1365±0,0063
356,01	0,1102	0,1159±0,0016	0,1113	0,1184±0,0025	0,1125	0,1196±0,0015	0,1134	0,1184±0,0037	0,1145	0,1223±0,0057
383,85	0,1045	0,1024±0,0015	0,1054	0,1087±0,0023	0,1064	0,1124±0,0016	0,1072	0,1131±0,0035	0,1080	0,1152±0,0054
661,62	0,0757	0,0721±0,0010	0,0758	0,0742±0,0016	0,0760	0,0762±0,0010	0,0761	0,0765±0,0024	0,0763	0,0772±0,0036

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇ

Deneyler sonucunda nadir toprak elementi katkılı borat cam numuneleri özellikle düşük katkı oranlarında şeffaf ve daha sarımtırak bir görünüme sahip olmuşlardır. Molar yüzdesi arttırılarak üretilen yeni her numunede renk yeşile doğru değişim göstermiştir.

XRD analizleri neticesinde üretilen camlarda kristal yapının oluşup oluşmadığına bakılmıştır. Üretilen camlar Praseodimyum oksit (Pr_2O_3) ve Hafniyum oksit (HfO_2) katkılı cam numunelerin tamamında amorf yapı gözlemlenmiştir. NTE katkılanmamış P1 numunesi dahil tüm numuneler cam özelliği göstermiştir. Deney kısmında belirtilen şekilde yoğunluklar Arşimet prensibiyle hesaplanmış hesaplanan yoğunluk sonuçlarına göre artan katkı miktarıyla yoğunluğun arttığı belirlenmiştir.

Üretilen cam numunelerin göstermiş olduğu sertlik değeri P1 katkısız numunesinden itibaren başlayarak katkının artmasına paralel olarak yükselmiştir.

Mekanik özellikler açısından bakıldığında nadir toprak elementi katkılı borat camların diğer kakalanmamış camlarla kıyaslandığında gerek tokluk ve gerekse gevreklik gibi mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Sonuçta radyasyon kalkını olarak üretilmesi planlanan cam numunelerin nadir toprak elementi katkılanmasıyla katkısız borat camlar ile mekanik özellikler açısından herhangi bir dezavantajının olmadığı deneylerle kanıtlanmıştır. Aksine yapılan katkılar ile borat camların mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Ancak yapılan yoğunluk ölçümleri ile üretilen ve molar kütle bakımından radyasyon zırhlama için mol kütlesi büyük olarak seçilen nadir toprak elementi ile katkılanan camların birim yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir.

Üretilen camların $(69-x)\text{H}_3\text{BO}_3-20\text{TeO}_2-10\text{Al}_2\text{O}_3-1\text{HfO}_2+x\text{Pr}_2\text{O}_3$ ($x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) camlarının radyasyon zırhlama parametreleri deneysel olarak 59.54-661.62 keV foton enerjileri aralığında ölçülmüştür. Ayrıca MAC değerleri teorik olarak XCOM programından hesaplanmıştır. MAC değerlerinin deneysel ve teorik sonuçları arasında çok iyi uyum olduğu görülmüştür. (%0.46 - %8.54). Deneysel olarak MAC değerlerinin deneysel ölçümlerindeki genel hata, gama piklerinin altında kalan alanların belirlenmesinden ($\approx\%3,43$) ve kütle kalınlığı hesaplamasından ($\approx\%2,23$) kaynaklanır. Elde edilen sonuçlar, MAC değerlerinin

foton enerjilerine bağılı olduğunu ve enerjinin artmasıyla MAC değerlerinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, Tablo 6.3'ten görüldüğü gibi, Praseodimyum konsantrasyonu arttıkça MAC değerleri de artmaktadır. LAC değerleri artan enerji ile azalmakta ve cam kopozisyon içersindeki Praseodimyum konsantrasyonunun artması ile artmaktadır. Esasen MAC ve LAC arasında sadece bir yoğunluk çarpanı bulunmaktadır. MFP ve HVL değerleri, LAC ile ilişkilidir. Malzemenin radyasyon koruma özelliğini araştırmak için kullanılır. Malzemenin daha düşük MFP ve HVL değerlerine sahip olması, daha iyi radyasyon koruması anlamına gelir. MFP ve HVL için deneysel sonuçlar, sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'te verilmiştir. Üretilen tüm camlarının MFP ve HVL değerlerinin katkı konsantrasyonuna ve gama ışını enerjisine bağılı olduğu görülmektedir. MFP ve HVL değerleri, cam sisteminin katkı konsantrasyonundaki artışla birlikte azalır. Üretilen camlardaki Pr konsantrasyonu, radyasyon koruma kapasitesini arttırır. Foton enerjisi arttıkça bu parametreler artar. Ayrıca söz konusu parametreler yoğunluğun artmasıyla azalma eğilimi göstermiştir. MFP ve HVL değerleri P5 camı için çalışılan foton enerjileri aralığındaki en düşük değerlerdir. P5, incelenen foton enerjilerinde daha düşük HVL ve MFP değerleri nedeniyle daha iyi zırhlama özelliği göstermektedir. Hızlı nötron soğurma tesir kesiti (Şekil 6.11) hazırlanan ilk Pr katkılı numunede (P2) Pr katkısız numuneye (P1) göre artış gösterirken, Pr konsantrasyonunun artmasıyla azalmaktadır. EBF değerleri etkileşim derinliğinin ve Pr konsantrasyonunu artmasıyla artmaktadır (Şekil 6.12-6.16). Şekil 6.17 ve 6.18'den görüldüğü üzere Pr katkı konsantrasyonunu artmasıyla proton ve alfa parçacıkları için kütle durdurma gücü azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar üretilen cam numuneler arasında P5 numunesinin en iyi radyasyon soğurucu malzeme olduğunu göstermektedir.

7.2. ÖNERİLER

Radyasyondan korunma ve radyasyonu kalkanlayabilme, radyasyon olgusunun insan sağlığına veya çevreye olan olumsuz etkilerini giderebilmek bakımından önemli bir durumdur. Radyasyon etkilerine karşı perdeleyici olarak kullanılan kurşun alaşımlı mevcut camlara karşı yeni bir seçenek olarak çevre ve doğa dostu alternatif cam veya materyallerin araştırma ve geliştirme süreçleri yürütülmektedir. Bu tez kapsamında da radyasyonun zararlı etkilerinin kalkanlanmasına dair nadir toprak elementi katkılı cam üretilmeye ve mekanik özelliklerinin durumu hakkında bilgi edinmeye çalışılmıştır.

Yapılan alışmalar Praseodimyum oksit (Pr_2O_3) ve Hafniyum oksit (HfO_2) katkılı borat camların mekanik özelliklerinin iyi olduğunu göstermiştir. NTE katkılı borat camların kullanılması durumunda mekanik olarak herhangi bir dezavantaj ortaya çıkmayacaktır. Cam numulerinin ağırlılığının daha az olması beklenen uzay teknolojileri veya havacılık sektörleri için molar kütlesi daha düşük nadir toprak elementleri katkılanarak daha hafif camlar retiler. Cam yapıcı ve renklendirici elementler ile katkılandırılarak insan göz sağlığına uygun filtreleme özelliklerine sahip optik ve aynı zamanda radyasyon zırhlayan camlar retiler. Bu tez kapsamında yer alan araştırmalar daha ileriye taşınarak istenilen renkte ve daha sağlam mekanik özelliklere sahip camlar üretilerek ve radyasyon bariyeri görevi görebilecek insan ve evre için önemli camların üretimi yapılabilir.



8. KAYNAKLAR

- Pye, L.D., Stevens, H.J., & LaCourse, W.C.,** 1972. Introduction to glass science. *The Vitreous State Plenum Press*, New York.
- Shackley, M.S. (Ed.),** 2013. Archaeological obsidian studies: method and theory (Vol. 3). *Springer Science & Business Media*, New York.
- Rasmussen, S.C.,** 2012. How glass changed the world: The history and chemistry of glass from antiquity to the 13th century. *Springer Science & Business Media*, New York.
- Macfarlane, A., & Martin, G.,** 2002. Glass: a world history. *University of Chicago Press*. Chicago.
- Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T.H.H., Kurmus, H., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S.,** 2017. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156:443-467.
- Pye, D., Joseph, I., & Montenero, A.,** 2005. Properties of glass-forming melts. *CrC Press*. Boca Raton, USA.
- Mirti, P., Casoli, A., & Appolonia, L.,** 1993. Scientific analysis of Roman glass from Augusta Praetoria. *Archaeometry*, 35(2):225-240.
- Berthier, L., & Biroli, G.,** 2011. Theoretical perspective on the glass transition and amorphous materials. *Reviews of modern physics*, 83(2):587.
- Griscom, D.L.,** 1991. Optical properties and structure of defects in silica glass. *Journal of the Ceramic society of Japan*, 99(1154):923-942.
- Abhilash, P., Sebastian, M.T., & Surendran, K.P.,** 2015. Glass free, non-aqueous LTCC tapes of Bi₄ (SiO₄)₃ with high solid loading. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(8):2313-2320.
- URL-1,** 2022. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SiO2.svg>. SiO₂ bağ yapısı. 13 Nisan 2022.
- Jacoby, D.,** 1993. Raw materials for the glass industries of Venice and the Terraferma, about 1370–about 1460. *Journal of Glass Studies*, 65-90.
- Hill, R.G., Da Costa, N., & Law, R.V.,** 2005. Characterization of a mould flux glass. *Journal of non-crystalline solids*, 351(1):69-74.
- Poling, E., & Yohe, G.R.,** 1933. Reaction of pyrex glass with Na₂CO₃. *Journal of Chemical Education*, 10(4):242.

- Rehren, T.**, 2008. A review of factors affecting the composition of early Egyptian glasses and faience: alkali and alkali earth oxides. *Journal of Archaeological Science*, 35(5):1345-1354.
- Sayre, E.V., & Smith, R.W.**, 1961. Compositional categories of ancient glass. *Science*, 133(3467):1824-1826.
- Lahlil, S., Biron, I., Galois, L., & Morin, G.**, 2008. Rediscovering ancient glass technologies through the examination of opacifier crystals. *Applied Physics A*, 92(1):109-116.
- Rasmussen, S. C.**, 2008. Advances in 13th century glass manufacturing and their effect on chemical progress. *Bull Hist Chem*, 33:28-34.
- Zachariasen, W. H.**, 1932. The atomic arrangement in glass. *Journal of the American Chemical Society*, 54(10):3841-3851.
- Musgraves, J.D., Hu, J., & Calvez, L. (Eds.)**, 2019. Springer handbook of glass (No. Part A, p. 326). Berlin: Springer.
- Angell, C.A.**, 1985. Spectroscopy simulation and scattering, and the medium range order problem in glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 73(1-3):1-17.
- Hülseberg, D., Harnisch, A., & Bismarck, A.**, 2008. Silicate glasses: a class of amorphous materials. *Microstructuring of Glasses*, 3-56.
- Al-Hadeethi, Y., & Sayyed, M.I.**, 2020. BaO–Li₂O–B₂O₃ glass systems: potential utilization in gamma radiation protection. *Progress in Nuclear Energy*, 129:103511.
- Rockett, T.J., & Foster, W.R.**, 1965. Phase relations in the system boron oxide–silica. *Journal of the American Ceramic Society*, 48(2):75-80.
- Krogh-Moe, J.**, 1969. The structure of vitreous and liquid boron oxide. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1(4):269-284.
- Kuo, P.H., & Du, J.**, 2022. Effect of boron oxide on mechanical and thermal properties of bioactive glass coatings for biomedical applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(6):3986-4008.
- Jean, J.H., & Fang, Y.C.**, 2001. Devitrification kinetics and mechanism of Pyrex borosilicate glass. *Journal of Materials Research*, 16(6):1752-1758.
- Hanneborg, A., Nese, M., & Ohlckers, P.**, 1991. Silicon-to-silicon anodic bonding with a borosilicate glass layer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1(3):139.

- Konon, M., Antropova, T., Zolotov, N., Simonenko, T., Simonenko, N., Brazovskaya, E., Kreisberg V., Polyakova, I.** 2022. Chemical durability of the iron-containing sodium borosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 584:121519.
- Huang, Z., Chen, C., Lv, C., & Chen, S.**, 2013. Tungsten-doped vanadium dioxide thin films on borosilicate glass for smart window application. *Journal of Alloys and Compounds*, 564:158-161.
- Alalawi, A., Eke, C., Alomairy, S., Alsalmi, O., Sriwunkum, C., Alrowaili, Z.A., Al-Buriah, M.S.**, 2022. Attenuation properties and radiation protection efficiency of Tb₂O₃-La₂O₃-P₂O₅ glass system. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 1-9.
- Pascual, L., Durán, A.**, 1996. Nitridation of glasses in the system R₂O-MO-P₂O₅. *Materials research bulletin*, 31(1):77-95.
- Shoaib, M., Rooh, G., Chanthima, N., Sareein, T., Kim, H. J., Kothan, S., Kaewkhao, J.**, 2021. Luminescence behavior of Nd³⁺ ions doped ZnO-BaO-(Gd₂O₃/GdF₃)-P₂O₅ glasses for laser material applications. *Journal of Luminescence*, 236:118139.
- Abo-Mosallam, H.A., & Mahdy, E.A.**, 2022. Effect of strontium on crystallization characteristics and properties of ZnO-Fe₂O₃-B₂O₃-P₂O₅ glass-ceramics for biomedical applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 583:121467.
- Wazer, J.R.V.**, 1950. Structure and properties of the condensed phosphates. III. Solubility fractionation and other solubility studies. *Journal of the American Chemical Society*, 72(2):647-655.
- URL-2**, 2022. <https://www.meta-laser.com/laserglass/erbium-doped-phosphate-glasses.html>. Erbium katkılı fosfat camlar. 17 Nisan 2022.
- Cicconi, M.R., Neuville, D.R.**, 2019. Natural glasses. In *Springer Handbook of Glass* (pp. 771-812). Springer, Cham.
- O'Keefe, J. A.**, 1984. Natural glass. *Journal of non-crystalline solids*, 67(1-3):1-17.
- Zakery, A., & Elliott, S.R.**, 2003. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 330(1-3):1-12.
- Bureau, B., Zhang, X. H., Smektala, F., Adam, J. L., Troles, J., Ma, H. L., Boussard-Plèdel, C., Lucas, J., Lucas, P., Coq, D.L., Riley, M.R., Simmons, J. H.**, 2004. Recent advances in chalcogenide glasses. *Journal of non-crystalline solids*, 345:276-283.
- Wang, W.H., Dong, C., Shek, C.H.**, 2004. Bulk metallic glasses. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 44(2-3):45-89.

- Inoue, A., & Takeuchi, A.,** 2011. Recent development and application products of bulk glassy alloys. *Acta Materialia*, 59(6):2243-2267.
- Kumar, G., Tang, H.X., & Schroers, J.,** 2009. Nanomoulding with amorphous metals. *Nature*, 457(7231):868-872.
- Jnr, A.M., & Zanolto, E.D.,** 1996. Fracture strength of glass analysed by different testing procedures. *Glass technology*, 37(3).
- Minami, K., Mizuno, F., Hayashi, A., Tatsumisago, M.,** 2007. Lithium ion conductivity of the Li_2S – P_2S_5 glass-based electrolytes prepared by the melt quenching method. *Solid State Ionics*, 178(11-12):837-841.
- Mpourazanis, P., Stogiannidis, G., Tsigoiias, S., Papatheodorou, G. N., Kalampounias, A. G.,** 2019. Ionic to covalent glass network transition: effects on elastic and vibrational properties according to ultrasonic echography and Raman spectroscopy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 125:43-50.
- Keryvin, V., Rouxel, T., Huger, M., Charleux, L.,** 2008. Elastic moduli of a ZrCuAlNi bulk metallic glass from room temperature to complete crystallisation by in situ pulse-echo ultrasonic echography. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 116(1356):851-854.
- Shinozaki, K., Honma, T., Komatsu, T.,** 2011. Elastic properties and Vickers hardness of optically transparent glass–ceramics with fiesnoite $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ nanocrystals. *Materials Research Bulletin*, 46(6):922-928.
- Röntgen, W.C.,** 1895. Ueber eine neue Art von Strahlen (pp. 1-10). *Phys.-med. Gesellschaft*.
- Charles, M.,** 2001. UNSCEAR Report 2000: sources and effects of ionizing radiation. *Journal of Radiological Protection*, 21(1):83.
- Jayasinghe, C., Pinnawala, U. C., Rathnayaka, T., Waduge, V.,** 2020. Annual committed effective dosage from natural radionuclides by ingestion of local food growing in mineral mining area, Sri Lanka. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(7):2205-2214.
- Sayyed, M.I., Zaid, M.H.M., Effendy, N., Matori, K.A., Lacomme, E., Mahmoud, K. A., AlShammari, M.M.,** 2020. The influence of PbO and Bi_2O_3 on the radiation shielding and elastic features for different glasses. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4):8429-8438.
- Singh, K.J., Kaur, S., Kaundal, R.S.,** 2014. Comparative study of gamma ray shielding and some properties of PbO – SiO_2 – Al_2O_3 and Bi_2O_3 – SiO_2 – Al_2O_3 glass systems. *Radiation Physics and Chemistry*, 96:153-157.
- Warren, B.E.,** 1937. X-ray determination of the structure of liquids and glass. *Journal of Applied Physics*, 8(10):645-654.

- Ohno, H., Kohara, S., Umesaki, N., & Suzuya, K.,** 2001. High-energy X-ray diffraction studies of non-crystalline materials. *Journal of non-crystalline solids*, 293:125-135.
- Benmore, C.J.,** 2012. A review of high-energy X-ray diffraction from glasses and liquids. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- Berthomieu, C., & Hienerwadel, R.,** 2009. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis research*, 101(2):157-170.
- URL-3,** 2022, <https://cementurk.com.tr/ftir-teknolojisi/>. FTIR çalışma prensibi. 22 Nisan 2022.
- Smith, B.C.,** 2011. Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy. *CRC press*. Boca Raton, USA.
- Kamitsos, E.I.,** 2015. Infrared spectroscopy of glasses. *Modern glass characterization*, 1-42.
- Organization, W.H.,** (1996). Trace elements in human nutrition and health, Cenevre.
- Press, P., (1991).** 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Oxford: ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21(1-3).
- I.A.E.A., (2014).** Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, International Basic Safety Standards, Viyana, Avusturya.
- Krane S.K., (1988).** Nuclear Physics, John Wiley&Sons, New York.
- Eaves G., (1964).** Principles of Radiation Protection, Iliffe Books L.T.D., London
- Kaçar, A., (2006).** Yapılarda Radyasyon Kalkanı Olarak Kullanılan Barit Agregalı Ağır Beton Elemanların Zırh Kalınlık Hesaplarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ünal O., Çoşkun A., (2016).** “Barit Agregalı Betonların Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Araştırılması”, Akü Femübid, 16: 125-131.
- Kilinçarslan Ş., Akkurt İ., (2007).** “Barit Agregalı Ağır Betonların Radyasyon Zırhlama Amacıyla Kullanımının Araştırılması”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt 22, No 2: 393-399.
- WinXCom** A program for calculating X-ray attenuation coefficients, in: Radiat. Phys. Chem., 2004: pp. 653–654
- Phy-X / PSD 2020** Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry.

J. Ziegler, Instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms., in: Elsevier, 2004.

The Stopping and Range of Ions in Matter, in: Treatise Heavy-Ion Sci., Springer US, Boston, MA, 1985: pp. 93–129. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8103-1-3>.

D. Yardımcı, M. Çelikbilek, A.E. Ersundu, S. Aydın. "TeO₂ - B₂O₃ sisteminde termal ve mikroyapı karakterizasyonu ve kristalizasyon kinetiği çalışmaları". Materials Chemistry and Physics, Ocak 2013.

K. Kirdsiri, J. Kaewkhao, A. Pokaipisit, W. Chewpraditkul, P. Limsuwan. "xPbO:(100 -x)B₂O₃ gözlük sisteminin 662 keV'de gama ışınları koruma özellikleri". Annals of Nuclear Energy Eylül 2009.

Ashok Kumar. "PbO-Li₂O-B₂O₃ camlarının gama ışını koruma özellikleri". Radyasyon Fiziği ve Kimyası, Temmuz 2017.