



**YENİ NESİL KURŞUNSUZ RADYASYON
ZIRHLAYICI CAM MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melda İPLİKÇİOĞLU

**Danışman
Pof. Dr. Taner KAVAS**

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2023

Bu tez çalışması 22.FEN.BİL.15 numaralı proje ile BAPK ve 121M096 numaralı
proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YENİ NESİL KURŞUNSUZ RADYASYON ZIRHLAYICI
CAM MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Melda İPLİKÇİOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Taner KAVAS

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Melda İPLİKÇİOĞLU tarafından hazırlanan “Yeni Nesil Kurşunsuz Radyasyon Zırhlıyıcı Cam Malzeme Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 10 / 04 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Taner KAVAS

Başkan : Prof. Dr. İskender Akkurt
Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hüseyin Özkan TOPLAN
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Taner KAVAS
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10 / 04 / 2023

Melda İPLİKÇİOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YENİ NESİL KURŞUNSUZ RADYASYON ZIRHLAYICI CAM MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Melda İPLİKÇİOĞLU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Taner KAVAS

Bu araştırma kapsamında, teknolojinin gelişmesi sonucu radyasyona maruziyet miktarının artmasıyla, özgün bir reçeteye sahip radyasyon zırhlayıcı kurşunsuz gadolinyum-bizmut-borosilikat (GBBS) cam sistemlerinin araştırılması ve üretilmesi hedeflenmiştir. İlgili numuneler geleneksel ergitme yöntemiyle 1325 ile 1375 derece arasındaki sıcaklıklarda sentezlenmiştir. Katkısız haldeki GBBS0 numunesi berrak bir görünüme sahipken, Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilaveleri eklenen diğer numunelerde renk merkezlerine kayma olduğu gözlemlenmiştir. Fiziksel özellikler açısından bakıldığında GBBS0 numunesi 3.3125 g/cm^3 yoğunluk değerine sahipken, artan Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içerik oranlarıyla birlikte GBBS1 ile GBBS4 numunelerinin yoğunluk değeri sırasıyla 3.5951, 3.8903, 3.9116 ve 3.8613 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Tüm cam serilerinin amorf yapıda olduğu tespit edilmiştir. Optik özellikler göz önüne alındığında GBBS0 numunesi en düşük soğurmaya sahipken GBBS2 numunesi ise en yüksek soğurma kabiliyetiyle öne çıkmıştır. Cam serilerinin 662, 1173, 1332 keV foton enerjilerindeki radyasyon zırhlama bulguları irdelendiğinde, GBBS2 numunesi en iyi sönümleme yeteneğini (LAC) 662 keV foton enerjisinde gösterirken, GBBS4 numunesi en iyi sönümlemeyi 1173 ve 1332 keV foton enerji seviyelerinde göstermiştir. Öte yandan belirlenen enerji düzeylerinde görünen artış sebebiyle LAC değerlerinde ise tüm numuneler için düşüş görülmüştür. Son olarak HVL kalınlık değerleri, 662 keV foton enerji seviyesinde 2.090 ila 2.507 cm arasında değişim gösterirken, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde HVL değerleri 2.850 ile 3.241 cm ve 3.165 ile 3.692 cm arasında değişim göstermiştir.

Tüm cam serilerinin içinde GBBS0 numunesinin en düşük RPE değerine sahip olurken, en yüksek değerin GBBS2 numunesinin sağladığı görülmüştür. Yapılan tüm deneysel ve teorik hesaplamaların sonucunda, GBBS2 numunesinin en ideal kurşunsuz radyasyon zırhayıcı cam malzeme gereksinimlerini sağladığı bu tez çalışmasında ortaya konulmuştur.

2023, xi + 33 sayfa

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırlama, Cam, Borosilikat, Kurşunsuz, Gadolinyum oksit, Bizmut oksit



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF NEW GENERATION LEAD-FREE RADIATION SHIELDING GLASS MATERIAL

Melda İPLİKÇİOĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Prof. Taner KAVAS

In this research, the increase in the amount of radiation exposure as a result of the development of technology, radiation shielding material with an original prescription is aimed to investigate and produce glass gadolinium-bismut-borosilicate (GBBS) systems. Related samples were synthesized by conventional melting method at temperatures between 1325 and 1375 degrees. While the unadulterated GBBS0 sample had a clear appearance, a shift in the color centers was observed in other samples with Bi_2O_3 and Gd_2O_3 additions. In terms of physical properties, GBBS0 sample had a density value of 3.3125 g/cm^3 , while GBBS1 and GBBS4 with increasing Bi_2O_3 and Gd_2O_3 content ratios were observed. The density values of the samples were determined as 3.5951, 3.8903, 3.9116 and 3.8613 g/cm^3 respectively. It has been determined that all glass series have amorphous structure. Considering the optical properties, GBBS0 sample has the lowest absorption while GBBS2 sample stands out with its highest absorption ability. When the radiation shielding findings of the glass series at 662, 1173, 1332 keV photon energies were examined, GBBS2 sample showed the best damping ability (LAC) at 662 keV photon energy, while GBBS4 sample showed the best damping at 1173 and 1332 keV photon energy levels. On the other hand, there was a decrease in LAC values for all samples due to the apparent increase in the determined energy levels. Finally, the HVL thickness values varied between 2.090 and 2.507 cm at the 662 keV photon energy level, while the HVL values varied between 2.850 and 3.241; 3.165 and 3.692 cm at the 1173 and 1332 keV photon energies.

Among all glass series, GBBS0 sample has the lowest RPE value, while GBBS2 sample has the highest value. As a result of all experimental and theoretical calculations, it has been revealed in this thesis that GBBS2 sample provides the most ideal lead-free radiation shielding glass material requirements.

2023, xi + 33 pages

Keywords: Radiation shielding, Glass, Borosilicate, Lead-free , Gadolinium oxide, Bismuth oxide.



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasına 22.FEN.BİL.15 proje numarası ile verdikleri destek için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne ve 121M096 proje numarası ile destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırmanın konusunun belirlenmesinde, deneysel çalışmaların yönlendirilmesinde, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Taner KAVAS'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma, test ve yazım süresince yardımlarını, önerilerini ve desteğini esirgemeyen, Sayın Arş. Gör. Recep KURTULUŞ'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, hayatım boyunca yanımda olan aileme tüm destekleri için minnettarım.

Melda İPLİKÇİOĞLU
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Cam.....	4
2.2 Yaygın Kullanımlı Camlar.....	6
2.2.1 Şişe ve Düz Cam	6
2.2.2 Borosilikat Camları	6
2.3 Cam Bileşenleri (Oksit Camlar)	7
2.3.1 Cam Haline Gelebilen Oksitler (Cam Yapıcılar)	7
2.3.2 Düzenleyiciler	7
2.3.3 Aradakiler (Stabilizatörler).....	7
2.4 Oksit Olmayan Camlar	8
2.4.1 Halojenler.....	8
2.4.2 Kalkojenler.....	8
2.4.3 Metalik Camlar.....	8
3. MATERYAL ve METOT	9
3.1 Yöntem.....	10
3.1.1 Karışım Hazırlama	10
3.1.2 Ergitme Süreçleri	10
3.1.3 Şekillendirme	11
3.1.4 Tavlama.....	11
3.1.5 Karakterizasyon.....	12

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	15
4.1 Fiziksel Özellikler.....	15
4.2 Yapısal Özellikler	16
4.3 Optik Özellikler	17
4.4 Radyasyon Zırhlama Özellikleri.....	18
5. SONUÇ.....	26
6. KAYNAKLAR.....	29
ÖZGEÇMİŞ.....	34



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CaO	Kalsiyum oksit
K ₂ O	Potasyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
P ₂ O ₅	Fosfor pentaoksit
ZnO	Çinko oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Bi ₂ O ₃	Bizmut oksit
B ₂ O ₃	Bor oksit
SrO	Stronsiyum oksit
SiO ₂	Silisyum dioksit
ZrO ₂	Zirkonyum dioksit
TeO ₂	Telleryum dioksit
GeO ₂	Germanyum dioksit
BaO	Baryum oksit
CeO ₂	Seryum oksit
MgO	Magnezyum oksit
Li ₂ O	Lityum oksit
PbO	Kurşun oksit
Sb ₂ O ₃	Antimon trioksit
BeF ₂	Berilyum florür
ZnCl ₂	Çinko klorür
ZrF ₄	Zirkonyum Florür
Bi ₂ O ₃	Bizmut oksit
Gd ₂ O ₃	Gadolinyum oksit
Rb ₂ O	Rubidyum oksit
Se	Selenyum
S	Kükürt
Ge	Germanyum
Te	Tellür
Si	Silisyum
Bi	Bizmut
Gd	Gadolinyum

Kısaltmalar

D	Deneyisel çalışma
DT	Deneyisel ve teorik çalışmalar arası bağıl hata yüzdesi
GBBS	Gadolinyum bizmut borosilikat cam sistemi
HVL	Yarı değerli katman
LAC	Doğrusal sönümleme katsayısı
MFP	Ortalama alınan yol
RPE	Radyasyon koruma verimliliği
T	Teorik çalışma
T _f	Katılma sıcaklığı
T _g	Cama geçiş sıcaklığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Süreç akım şeması.	9
Şekil 4.1 GBSS serisi camlar için yoğunluk değerleri.....	14
Şekil 4.2 Sentezlenen GBSS serisi camlar için X-ışını kırınım desenleri.....	17
Şekil 4.3 GBBS cam serileri için dalga boyuna karşılık soğurma eğrileri.	18
Şekil 4.4 Sentezlenen GBBS cam serileri için 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde deneysel ve teorik ile elde edilen LAC değerleri.	20
Şekil 4.5 Sentezlenen GBBS cam serileri için 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde deneysel ve teorik ile elde edilen HVL değerleri.	23
Şekil 4.6 Sentezlenen GBBS cam serilerinin 662 keV foton enerjisinde farklı kalınlık değerlerinde sergiledikleri RPE yüzdeleri.	25

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Başlangıç hammaddelerine ilişkin bazı bilgiler.....	10
Çizelge 3.2 GBBS cam sistemleri için oluşturulan molce yüzde reçete tasarımları.....	9
Çizelge 4.1 Deneysel ve teorik verileri arasındaki bağıl hata yüzdeleri.....	21
Çizelge 4.2 Sentezlenen GBBS cam serilerinin 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerindeki deneysel ve teorik çalışmaları sonucu elde edilen MFP değerleri	24



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 1.1 Yıllara göre radyasyon koruyucu cam malzemeler alanında yapılan yayın sayıları.	2
Resim 2.1 Camsı, sıvı ve katı haller arasındaki ilişki.	5
Resim 2.2 (a) kristalindeki atomik düzenlemenin şematik iki boyutlu gösterimi ve (b) cam.....	6
Resim 3.1 Sentezlenen GBBS serisi camlar (üst kısım soldan sağa: GBBS0, GBBS1 ve GBBS2, alt kısım soldan sağa: GBBS3 ve GBBS4).	11



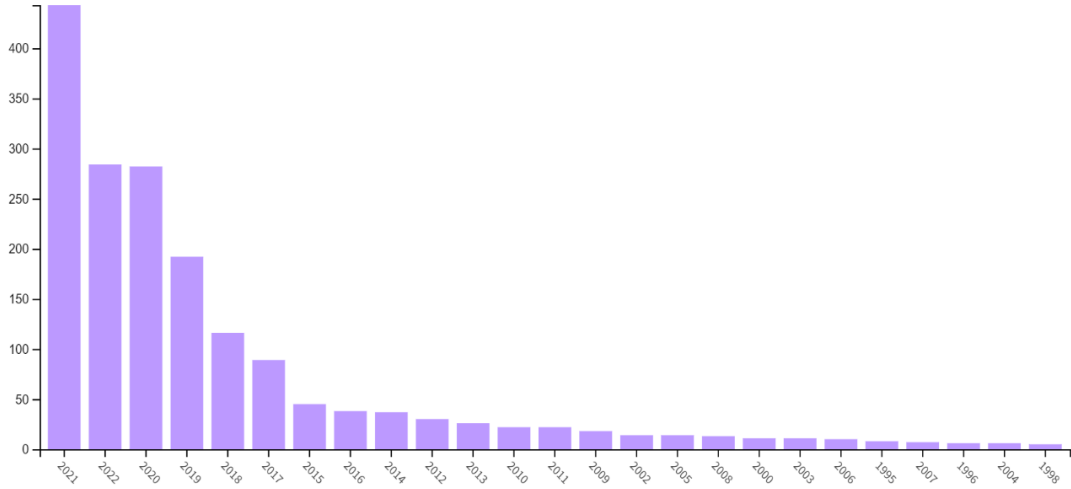
1. GİRİŞ

Radyasyon geçmişten günümüze doğal ve yapay olarak her alanda insan hayatında bulunmuş ve nükleer teknolojinin gelişmesiyle birlikte nükleer santraller, nükleer tıp ve savunma sanayisi gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmıştır (Stalin vd. 2021). Bu sebeple radyasyonun insan sağlığı ve çevreye olan etkileri gündeme gelmeye başlamıştır.

Yapılan araştırmalar sonucunda yüksek dozda radyasyona maruz kalmanın, hücrelere ve canlı dokulara ciddi şekilde zarar vererek sağlık açısından olumsuzluklara yol açtığı kanıtlanmıştır (Tekin vd. 2019). Bilim insanları radyasyona direkt maruz kalan kişiler ve radyoaktif ortamlar için gerekli önlemlerin alınması gerektiğini öne sürmektedir. Rutin olarak radyasyona maruz kalan bireyler için olumsuz etkileri en aza indirmek için üç ana yaklaşım izlenmektedir (Sürücü ve Subaşı 2021). Radyasyona maruz kalınan süre en aza indirilmeli, radyasyon kaynağı ile araya olabildiğince çok mesafe koyulmalı ve son olarak radyasyon dozunun kabul edilebilir seviyelere düşmesi için zırhlayıcı malzeme kullanılmasıdır (Almatari vd. 2019).

Hızlı büyüyen alanlardan biri olan tıbbi uygulamalarda ise radyasyon zırhlayıcı cam malzemelere olan gereksinim artmıştır (Almatari 2019). Bunun en büyük sebebi aşırı dozda radyasyona maruz kalmanın geri dönüşü olmayan sağlık sıkıntılarına sebep olmasıdır. Özellikle cihazların çalıştırılması sonucu radyasyonun oluşabileceği odaları gözlemlmek için bir gözlem penceresine ihtiyaç duyulmaktadır. Gözlem penceresinde ihtiyaç olan şeffaflık cam malzemelerden elde edilmektedir (Glinicki vd. 2012). Radyasyonun kullanıldığı her alanda maruz kalınan radyoaktif doz miktarı göz önüne alındığında, radyasyon zırhlayıcı malzemelere olan araştırmalar yoğun bir şekilde artmıştır. Web of Science veri tabanı üzerinde radyasyon zırhlayıcı malzemelere yönelik bir literatür incelemesi yapıldığında Resim 1.1’de verilen grafik elde edilmiştir. 2000 yılından itibaren yapılan araştırmaların son 7 yılda ivmelendiği görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda radyasyon zırhlayıcı malzemeler arasında cam malzemeler yüksek optik geçirgenlikleri sayesinde ön plana çıkmaktadır (Kurtuluş vd. 2021).

Bununla birlikte yüksek yoğunluk, kimyasal dayanıklılık, esneklik ve geri dönüştürülebilirlik açılarından da cam malzemeler tercih edilmektedir (Kurtuluş vd. 2021). Ek olarak, ham maddelere kolay erişim, iyi cam oluşturmak için bileşimsel esneklik, gelişmiş eritme ve şekillendirme teknikleri, cam araştırmalarını radyasyondan korunma ihtiyaçları konusunda arttırmıştır.



Resim 1.1 Yıllara göre radyasyon koruyucu cam malzemeler alanında yapılan yayın sayıları.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Literatürde radyasyon zırhlayıcı camlarla ilgili araştırmaların hızlanmasıyla birçok farklı cam sistemi ve reçete mevcuttur. Toksik olmayan $\text{CaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ reçetesi üzerinden yapılan araştırmalarda, üretilen camın radyasyon zırhlama spektrumları, 200-1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrofotometre ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda P_2O_5 mol yüzdesinin artmasıyla doğrusal zayıflatma katsayısının (μ) azaldığı görülmüştür (Al-Harbi vd. 2021).

Farklı bir çalışmada ise $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-BiO}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ camlarının yapısal, elastik ve koruyucu özellikleri X-ışını kırınımı (XRD), yoğunluk, molar hacim, ultrasonik hızlar ve EPICS2017 simülasyonu ile incelemiştir. Cam yapının amorf fazı XRD ölçümü ile doğrulanmıştır. ZnO içeriğinin artmasıyla camların yoğunlukları artarken molar hacimlerinde azalma meydana gelmiştir. Oksijen molar hacim değerleri ve ZnO içeriği arttıkça oksijen paketleme yoğunluğunun azaldığı ve ultrasonik hızların arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, cam ağı ZnO içeriği eklendiğinde camların elastik modülünün artması cam ağına yüksek sertliğe sahip olduğunu gösterir (Zaid vd. 2021). Bir başka araştırmada değişken SrO ve BaO bileşimlerine sahip $\text{SrO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ cam sisteminin fiziksel, optik ve radyasyon koruma özellikleri irdelenmiştir. İncelenen parametrelerin, camlardaki değişen BaO konsantrasyonlarından etkilendiği bulunmuştur. BaO içeriği %0-%10 arası yükseldikçe kırılma indisi (n) ve yalıtkanlık sabiti (ϵ) değerlerinin keskin bir şekilde azaldığı, %10'luk içeriğin artmasıyla ϵ 'da hafif bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir (Almuqrin vd. 2021).

Başka bir literatür incelenmesinde $\text{TeO}_2\text{-xGeO}_2\text{-20ZnO-10Li}_2\text{O}$ reçetesiyle GeO_2 içeriğinin cam formuna etkisini araştırmıştır. GeO_2 eklenmesi ile numunede yoğunluk (ρ) ve poisson oranının (σ) azalmasının yanı sıra, sıkıştırma yoğunluğu (V_t), artmıştır (Kaky vd. 2020).

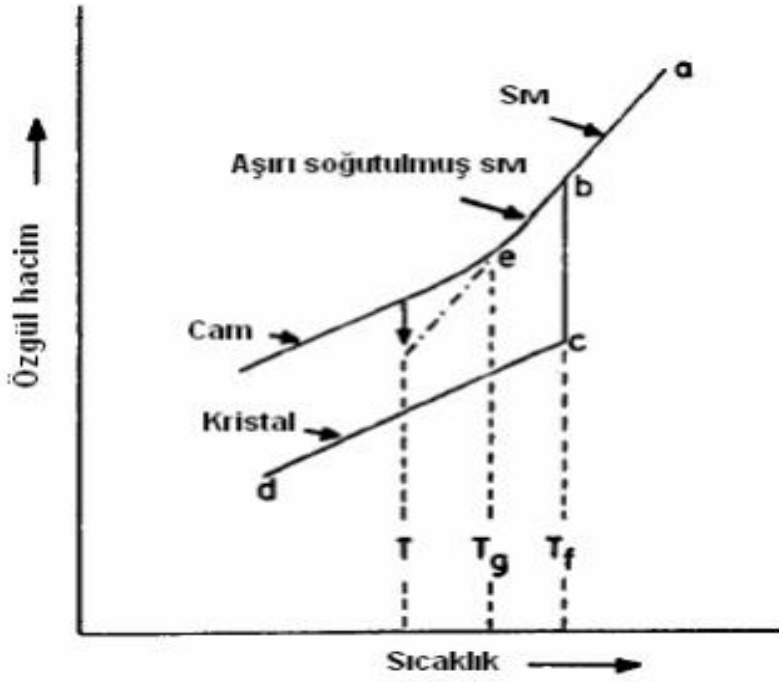
Farklı bir araştırmada ise, $(55-x)\text{SiO}_2: 13\text{B}_2\text{O}_3: 1\text{Al}_2\text{O}_3: 4.5\text{BaO}: 6.3\text{CaO}: 0.2\text{Sb}_2\text{O}_3: 20\text{Na}_2\text{O}: x\text{CeO}_2$ reçetesinde eriterek su verme tekniğini kullanmışlardır. Cam numunelerin yoğunluğu ve kırılma indisleri, CeO_2 konsantrasyonunun artmasıyla artış göstermiştir. Absorpsiyon spektrumları, CeO_2 konsantrasyonunun eklenmesiyle absorpsiyon zirvesinde 300'den 450 nm'ye bir kayma göstermiştir.

CeO₂ içeriğindeki artışla birlikte doğrusal soğurma katsayısı (μ) değerlerinin arttığı gözlenen eğilimler nedeniyle foton zayıflama olasılığı artmıştır. CeO₂ konsantrasyonunun artmasıyla yarı değerli katman (HVL) ve onda bir kalınlık değeri (TVL)'deki azalma, daha yüksek CeO₂ içeriği ile düşük kVp değerinde daha fazla x-ışını yoğunluğunun azaltıldığını yansıtmıştır. Bu olay onları yüksek enerjili radyasyon kalkanından korunmak için potansiyel aday yapmıştır. %5 mol CeO₂ katkılı cam numunelerinin HVL değeri, ticari X-ışını camları ile benzer koruma kabiliyeti gösterdiğini bildirmişlerdir (Kaewjaeng vd. 2022).

2.1 Cam

Cam geçmişten günümüze insanlık tarihinin en önemli malzemelerinden biri olarak kabul edilmiştir. Gelişen nüfus ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda, teknolojinin gelişmesiyle birlikte cam malzemelere karşı ilgi artmıştır. ASTM'de bir cam 'kristalleşme olmaksızın katı olacak koşullara kadar soğutulmuş inorganik bir füzyon ürünü olarak tanımlanmaktadır (Karmakar 2016). Bu tanıma göre cam, eriyik söndürme işlemiyle elde edilen kristal olmayan bir malzemedir.

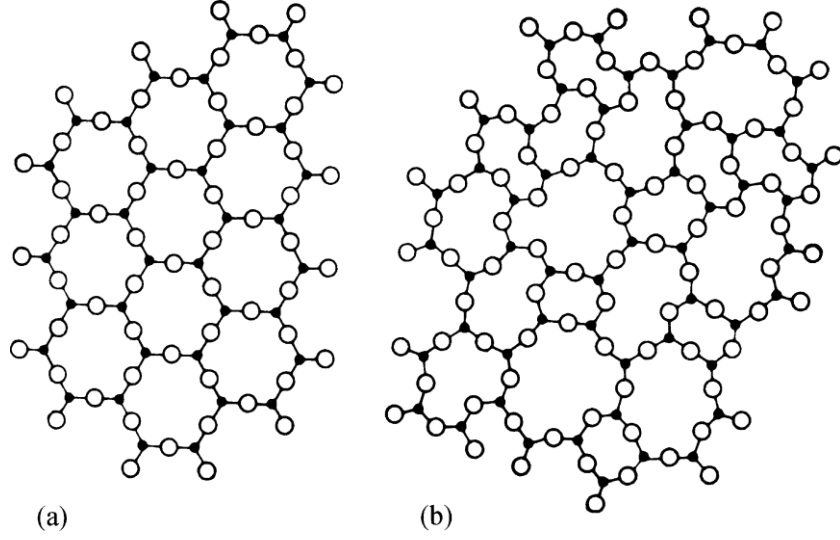
Camlar, diğer malzemelerin sahip olduğu düzenli ve tekrarlı kristal yapılardan farklı olarak yakın mesafeli düzene sahiptir. Camlar diğer kristal malzemeler gibi sabit bir ergime sıcaklıklarına sahip değildir. Cam soğutma aşamaları yavaş ve hızlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Reçete sonucu elde edilen cam malzeme yeterince hızlı soğutulursa atomlar düzenli bir yapıya sahip olamaz ve bu halde donduklarında bu sonuç amorf yapıyı oluşturur. Düzenli bir yapı elde etmek için yavaş soğutma tekniği kullanılır. Kristalizasyon denilen bu olayda belirli sıcaklıkta sıkı paketlemelerden kaynaklı ani hacim kaybı görülmektedir (Kothiyal vd. 2012).



Resim 2.1 Camı, sıvı ve katı haller arasındaki ilişki.

Erime sıcaklığının üstünde a noktasında olan bir sıvı soğutulmaya başlandığında, c çizgisine kadar hacimsel olarak azalır. Ortamda yeterli koşulların yanında yeterli yavaş soğuma süresiyle birlikte T_f katılma bölgesinde kristallenme başlar. Kristallenmenin başlamasıyla b-c aralığında hacimsel küçülmeye ters orantılı olarak maddenin yoğunluğu artar. Madde yeterince hızlı soğutulursa T_f sıcaklığında kristallenme olmaması sebebiyle a-e aralığında aşırı soğutulmuş sıvı elde edilir. T_g cam geçiş sıcaklığının gösterildiği ve cam özelliklerinin bu sıcaklığın altında elde edildiği önemli bir noktadır. T_g noktası üzerinde madde visko-elastik bir davranış gösterir (Shelby 2005). Camı, sıvı ve katı haller arasındaki ilişki Resim 2.1’de verilmiştir.

Günümüzde, aynı bileşimdeki eritilerek söndürülmüş camlardan ayırt edilemeyen kristal olmayan malzemeler, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel işlemi vb. gibi çeşitli teknikler kullanılarak elde edilebilmektedir. 'Kristal olmayan katılar' ve 'cam geçişi' kelimeleri, bir camın kuvars, safir vb. gibi kristalli malzemeler kategorisinde veya sıvı kategorisinde sınıflandırılmayacağını gösterir. Bir camın atomik düzeni, kristal malzemelerinkinden farklıdır ve Resim 1.3’de şematik olarak gösterildiği gibi, uzun menzilli düzenlilikten yoksundur (Callister ve Rethswich 2015).



Resim 2.2 (a) Kristalindeki atomik düzenlemenin şematik iki boyutlu gösterimi ve (b) Cam.

2.2 Yaygın Kullanımlı Camlar

2.2.1 Şişe ve Düz Cam

$\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ sistemine dayalı olan ve günlük hayatta en yaygın olarak kullanılan cam çeşididir. Üretilen diğer camların yaklaşık %90'ı bu kompozisyona sahiptir. Cam özelliklerini geliştirilebilmesi için oksit ilaveleri yapılabilir.

2.2.2 Borosilikat Camları

Hem iç hem de dış pazarlarda yaygın olarak kullanılan bor ürünlerinin dünya rezervlerinin %73'ü Türkiye'de üretilmektedir. Sahip olduğu nitelikli özellikleri sebebiyle birçok sektörde tercih edilen bor cam sektörünün önemli hammaddelerindendir. Cam ürünleri bor katkısıyla birlikte kimyasallara ve ısıya karşı dayanıklı bir hal almışlardır.

$\text{B}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ sistemine dayalı yüksek şok dayanımına sahip camlardır. Kimyasal reaksiyonlara karşı dirençli ve düşük ısıl genişleme katsayısına sahiplerdir. Isıya karşı dayanıklılık ve kimyasal direnç istenen cihazların camları, aydınlatma sistemleri, uçak ve otomotiv sektöründe, şişelerde, ilaç sektöründe ve bilimsel araştırma yapılan laboratuvarlarda kullanılan ürünler gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Shoua vd.

2015).

2.3 Cam Bileşenleri (Oksit Camlar)

Camı oluşturan ana bileşenleri üç grupta toplanılabilir; camlaştırmacılar, eriticiler ve stabilizatörler.

2.3.1 Cam Haline Gelebilen Oksitler (Cam Yapıcılar)

Cam yapıcılar cam oluşumunda zorunlu olup ağ yapıyı oluştururlar. İskeleti oluşturan oksitler içerisinde en önemlileri SiO_2 , B_2O_3 ve P_2O_5 'dir. Bu oksitler bileşime başka oksitlerin ilavesiyle ekonomik ve çeşitli cam oluşturabildikleri gibi tek başlarına da oluşturabilirler (Kothiyal vd. 2012).

2.3.2 Düzenleyiciler

Bu maddeler kısmen bir cam yapıcı ve kısmen de bir tadil edici gibi hareket ederler. Düzenleyici maddenin kullanılma amacı camın devitrifikasyon (kristallenme) eğilimini azaltmak ve sağlamlığını artırmaktır. Camın atomik ağ yapısına bir cam yapıcı gibi katılırlar. Cam yapıcı ve tadil edici maddelerin rolünü birlikte oynayarak, cam özelliklerini etkiledikleri gibi aynı zamanda atomik ağ yapısını zenginleştirirler. Düzenleyiciler olarak adlandırılan katkıların başlıcaları; MgO , Li_2O , K_2O ve Li_2O 'dir (Kocabağ 2002).

2.3.3 Aradakiler (Stabilizatörler)

Stabilizatörler de özellikle camın kimyasal dayanımı, kırılma indisi, dielektrik özellikleri üzerine etki yapan katkılardır. Formülüne stabilizatör ilave edilmemiş bir cam su karşısında kararlı değildir. Stabilizatörlerin başlıcaları; Al_2O_3 , PbO , Sb_2O_3 ve ZnO 'dir (Shoua vd. 2015).

2.4 Oksit Olmayan Camlar

2.4.1 Halojenler

Halojenler elektronegatiflikleri en yüksek olan element grubudur. BeF_2 , ZnCl_2 ve ZrF_4 gibi bileşikler cam oluştururlar. Yüksek elektronegatiflikleri sebebiyle neme karşı duyarlı ve kristallenmeye yatkındırlar.

2.4.2 Kalkojenler

Bileşiminde Se, S, Ge, Te, Si gibi elementlerin bulunduğu, yapıları ve atomlar arası bağların özellikleri yönünden diğer cam sistemlerinden farklı camlardır. Çoğu yarı iletkenliğe sahiptir. Optik ve elektrik özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Bununla birlikte mekanik özellikler bakımından zayıf camlardır (Kocabağ 1997).

2.4.3 Metalik Camlar

Geleneksel cam malzemelerden yapısal olarak farklıdır. Metalik cam, esas olarak metal malzemeden oluşan bir tür yarı kararlı metal malzeme olmasıyla birlikte atomik yapısı düzensizdir. Metalik camlar özellikle manyetik özellikleri yönünden öne çıkmaktadır. Düşük bir manyetik alan uygulandığında kolayca manyetik hale getirilebilirler (Callister ve Rethswich 2015).

3. MATERYAL ve METOT

Reçete tasarımlarını yapılmadan önce her oksit bileşiminin başlangıç hammaddesi belirlenmiştir. Seçilen hammadde içerikleri, sağladıkları oksitler, tedarik yerleri ve safsızlık oranları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Başlangıç hammaddelerine ilişkin bazı bilgiler.

Başlangıç Hammaddesi	Sağladığı Oksitler	Tedarik Yeri	Safsızlık (%)
Silis kumu	SiO_2	Sigma Aldrich	Min. 99.5
Kolemanit	B_2O_3 , CaO	EtiMaden	Min. 99.0
Bizmut oksit	Bi_2O_3	Riedel-de-Haen	Min. 99.5
Soda külü	Na_2O	EtiSoda	Min. 99.5
Rubidyum karbonat	Rb_2O	Abcr	Min. 99.0
Barit	BaO	Blanc Fixe	Min. 99.0
Çinko oksit	ZnO	Ekmekçioğulları	Min. 99.0
Gadolinium oksit	Gd_2O_3	Abcr	Min. 99.9

3.1 Yöntem

Tez çalışması kapsamında gadolinium-bizmut-borosilikat (GBBS) cam sistemine farklı oranlarda Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilavesiyle radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada öncelikle GBBS cam sisteminde optimum oranların tespiti yapılmış olup sonrasında optimum oranlara sahip GBBS cam sisteminde oksit ilaveler için optimum oran bulunmuştur. Yapılan çalışmada izlenen adımlar Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Süreç akım şeması.

3.1.1 Karışım Hazırlama

Başlangıç olarak karışım hazırlama adımı için ihtiyaç olan hammaddelerin tedarikleri yapılmıştır. Çizelge 3.2’de gösterilen reçete tasarımları yapılmıştır. Optimum oran çalışması yapılacak olan Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içerikleri, silisyum dioksit (SiO_2) yerine 0, 2.5, 5.0 ve 7.5 mol% oranlarında ilave edilmiştir. B_2O_3 içeriği için 15 mol%, Na_2O ve ZnO için 7.5 mol% oranları kullanılırken, Rb_2O içeriği için 2.5, CaO için 10 mol% oranları kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 GBBS cam sistemleri için oluşturulan molce yüzde reçete tasarımları.

Kod	SiO_2	B_2O_3	Bi_2O_3	Na_2O	Rb_2O	CaO	BaO	ZnO	Gd_2O_3	Toplam
GBBS0	42.5	15.0	0.0	7.5	2.5	10.0	15.0	7.5	0.0	100
GBBS1	37.5	15.0	2.5	7.5	2.5	10.0	15.0	7.5	2.5	100
GBBS2	32.5	15.0	5.0	7.5	2.5	10.0	15.0	7.5	5.0	100
GBBS3	32.5	15.0	7.5	7.5	2.5	10.0	15.0	7.5	2.5	100
GBBS4	32.5	15.0	2.5	7.5	2.5	10.0	15.0	7.5	7.5	100

Sonraki adım olarak molce yüzdelere karşılık gelen ağırlıkça yüzdelere tespit edilmiştir. Sonrasında GBBS0 ile GBBS4 arasındaki numuneleri elde etmek amacıyla tartım adımı gerçekleştirilmiştir. Tartım işlemi için tolerans değeri ± 0.001 olan Precisa XB220U isimli analitik hassas terazi kullanılmıştır. Her bir cam serisi için ayrı tartım yapılmıştır. Tartım işleminden sonra bir agat havan kullanılarak, tartılan bileşimler 10 dakika süre ile karıştırılmıştır. Bu adımdaki en önemli nokta olabildiğince homojen karışım elde etmektir. Her bir karışım ayrı plastik kaplara koyularak diğer sürece hazırlık sağlanmıştır.

3.1.2 Ergitme Süreçleri

Ergitme prosesi kapsamında reçetesi ve karışımı hazırlanan her cam serisi öncelikle tek tek Au-Pt alaşımlı bir kroze içerisine konulmuştur. 1600 °C’ye çıkış kapasiteli bir MSE marka asansörlü eritiş fırınının içerisine kroze oda sıcaklığında yerleştirilmiştir. Ardından, 5 °C/dk ısıtma hızında 1350 °C’ye çıkması için fırın ayarlanmıştır. Belirlenen sıcaklığa çıktığında 60 dakika bekletilmiştir. Gerekli süreleri tamamlayan cam serileri fırından çıkarıldığında ani soğutmaya maruz bırakılmıştır.

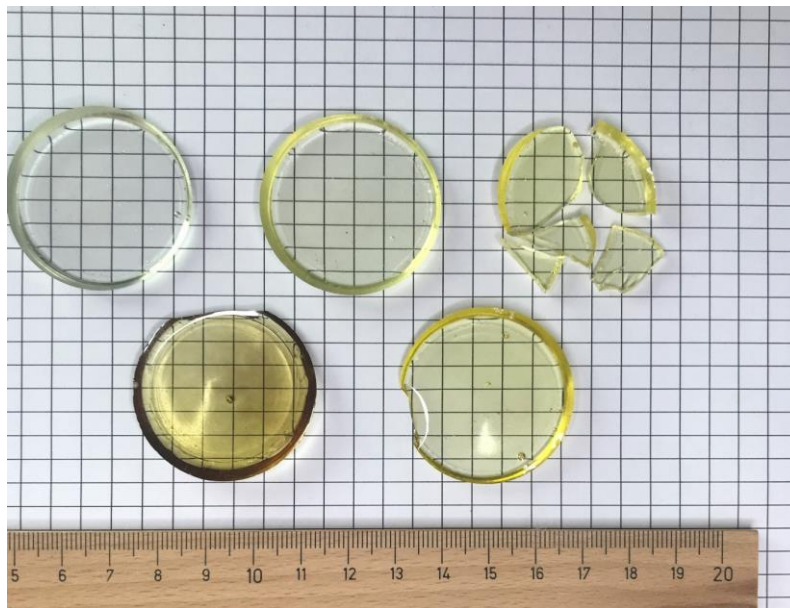
Elde edilen fritler, agat havan içerisinde toz haline getirilerek fırına konulmuştur ve yine en yüksek sıcaklıkta 30 dakikalık süre ile fırında bekletilmiştir.

3.1.3 Şekillendirme

Fırında 30 dakikalık süre sonucunda çıkarılan cam serilerine direkt kroze içinde bekletme yöntemi uygulanmıştır. En yüksek sıcaklığa ulaşıp çıkarılan krozenin, alümina tozların üzerine bırakılarak oda sıcaklığında soğuması beklenmiştir. Yaklaşık 15 dakikalık bir süre sonunda, krozenin ters çevrilmesiyle elde edilen camın düz bir yüzeye sahip olan krozenin şeklini alması sağlanmıştır.

3.1.4 Tavlama

Protherm marka 1200 °C'ye kadar çıkabilen bir fırına krozeden çıkan tüm cam serileri yerleştirilmiştir. Fırının, 10 °C/dk ısıtma hızı ile 550 °C sıcaklığa gelmesiyle cam sistemleri fırına yerleştirilmiştir. Cam serilerinin belirlenen sıcaklıkta 20 dakika kalması sağlanmıştır. Bir sonraki aşama olarak fırın kapatılarak oda sıcaklığında herhangi bir soğutma işlemi uygulanmadan direkt olarak soğumaya bırakılmıştır. Tüm aşamalar sonucunda sentezlenen GBBS cam serilerine ilişkin görsel Resim 3.1'de gösterilmiştir.



Resim 3.1 Sentezlenen GBBS serisi camlar (üst kısım soldan sağa: GBBS0, GBBS1 ve GBBS2, alt kısım soldan sağa: GBBS3 ve GBBS4).

Resim 3.1’de gösterilen numune örneklerinde görüldüğü gibi herhangi bir katkı bulunmayan GBBS0 numunesi gayet berrak bir görüntü sağlarken GBBS1, GBBS2, GBBS4 daha sarımsı bir renge sahiptir. GBBS3 ise daha kahverengimsi bir renkte olup en koyu görüntüye sahiptir.

3.1.5 Karakterizasyon

Üretim prosesi tamamlandıktan sonra bazı malzeme karakterizasyon testleri uygulanmıştır. İlk adım olarak Arşimet yöntemi ile yoğunluk değerleri formül 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_{cam} = \frac{mhava}{mhava - msivi} * \rho_{sivi} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikteki ρ_{cam} , $mhava$, $msivi$ ve ρ_{sivi} parametreleri sırasıyla camın yoğunluğu, numunenin havadaki ağırlığı, numunenin sudaki ağırlığı ve ortam sıvısının yoğunluğunu göstermektedir. Bununla birlikte amorf yapı araştırması için amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) tekniği uygulanmıştır. Bruker D8 Advance (Afyonkarahisar, Türkiye) cihazı ile 10 ile 80 derece arasında 0.02 adımlama tarama hızıyla 40 kV ve 30 mA değerlerinde analizler yapılmıştır.

Optik özelliklerin analiz etmek amacıyla UV-Vis analiz yöntemi kullanılmıştır. Spectrum Instruments (Afyonkarahisar, Türkiye) marka SP-UV-300 model cihaz ile 190 ile 1100 nm dalga boyu arasında geçirim (T) eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler, formül 3.2 kullanılarak soğurma (A) eğrilerine dönüştürülmüştür.

$$AA = 2 - \log(\%TT) \quad (3.2)$$

Çeşitli analizler neticesinde elde edilen ham veriler, OriginLab Pro 2021 Öğrenci Sürümü kullanılarak grafiksel hale dönüştürülmüştür. Fiziksel, yapısal ve optik özellikler açısından farklı malzeme karakterizasyon testlerinin uygulanmasına ek olarak, radyasyon koruma yeteneklerini belirlemek için deneysel gama ışını spektroskopik

testleri yapılmıştır.

Burada radyoaktif kaynaktan yayılan fotonların bir kolimatör tarafından yönlendirilmesi, cam numunesi üzerinden geçirilmesi, sinyallerin bir Na dedektörü yardımıyla alınması ve bilgisayar yazılımı ile yorumlanması prensibi ilgili test yöntemi içindedir.

Bu testin sonuçlarından elde edilen eğrilerle yapılan hesaplamaların yapılması ve formül 3.3’de sunulan Beer-Lambert bağıntısıyla elde edilen doğrusal sönümlleme katsayısı (LAC, μ), her numune için 662, 1173, 1332 keV foton enerjilerinde elde edilmiştir.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu x) \quad (3.3)$$

Bu bağıntıda I, I_0 , μ ve x değişkenleri sırasıyla, dedektörün cam numunesiyle tespit ettiği etkiyi, cam numunesi olmadan dedektör tarafından tespit edilen şiddeti, doğrusal sönümlleme katsayısını ve cam numunesi kalınlığını temsil etmektedir. Radyasyon zırhlayıcı özelliklerinin belirlenmesi açısından en önde gelen özellik olan LAC parametresinin deneysel olarak elde edilmesinin yanı sıra, farklı parametrelerinde hesaplaması yapılmıştır. Denklem 3.4, 3.5 ve 3.6’da verilen bağıntılarıyla sırasıyla, yarı değer katman (HVL), ortalama alınan yol (MFP) ve radyasyondan koruma verimliliği (RPE) elde edilmiştir. Burada, x değişkeni kalınlık değerini temsil etmektedir.

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3.4)$$

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (3.5)$$

$$RPE = (1 - \exp(-\mu x)) * 100 \quad (3.6)$$

Radyasyon zırhlayıcı özelliklerin deneysel çerçevede ortaya çıkarılması ile elde edilen bulgular, literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Teorik hesaplamalar için literatürde oldukça sık tercih edilen Phy-

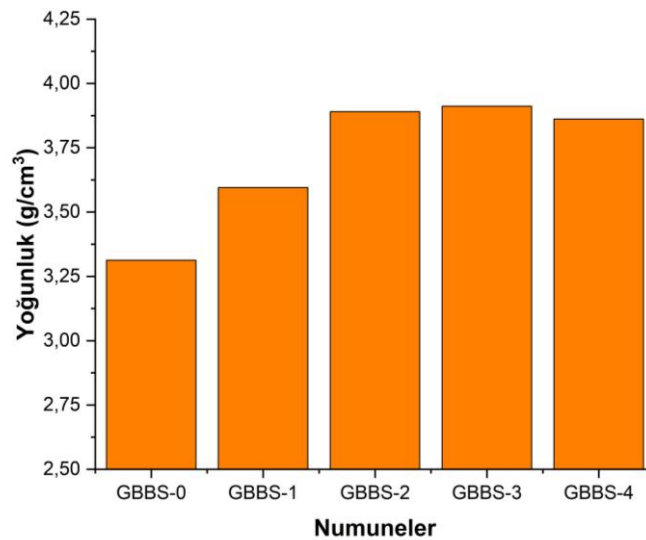
X/PSD yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda cam formülasyonu ve yoğunluk değerleri bilinen cam serilerinin bilgileri yazılıma tanımlanmış olup, daha sonra 662, 1173 ve 1332 keV foton enerji seviyelerinde LAC, HVL, MFP ve RPE parametrelerinin değerleri hesaplanmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1 Fiziksel Özellikler

Ortam ışığı altında cam numunelere Resim 3.1'e bakıldığında, katkısız olan GBBS0 numunesinin oldukça berrak bir görünüm sergilediği görülmektedir. Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilave oranları ile birlikte, GBBS1 ve GBBS2 numunelerinde, renk merkezlerinde kayma olduğu görsel olarak ayırt edilebilir durumdadır. Her iki numune için de sarımsı tarafa doğru bir kayma olduğu, fakat berraklık açısından gözle görülür bir kayıp olmadığı çıkarımı yapılabilmektedir. Bi_2O_3 ilave oranının Gd_2O_3 içeriğine göre daha fazla olduğu GBBS3 numunesinde, renk merkezinin sarımsı taraftan kahverengi bir renge doğru ilerlediği göze çarpmıştır. Bu nedenle de, ortam ışığı altında şeffaflık durumunun bozunuma uğradığı yorumu yapılabilmektedir. Son olarak, Gd_2O_3 ilave oranının Bi_2O_3 içeriğine göre daha fazla olduğu GBBS4 numunesinde, renk merkezinin GBBS2 numunesine benzer biçimde kayma gösterdiği, yani sarımsı bir renk verdiği görülmektedir. Netice olarak, renk ve şeffaflık durumu söz konusu olduğunda GBBS3 numunesi hariç diğerlerinin hafif sarımsı renk taşıdığı görülmüştür. Radyasyon zırhlayıcı uygulamalara bakıldığında, yüksek yoğunluklu malzeme sistemlerinin ön planda olduğu görülmektedir (Al-Buriahi 2022, Cheewasukhanont vd. 2022). Bu özellikteki malzemelerle gelen foton enerjisini sönmelenme olayı iyileştirilmektedir.



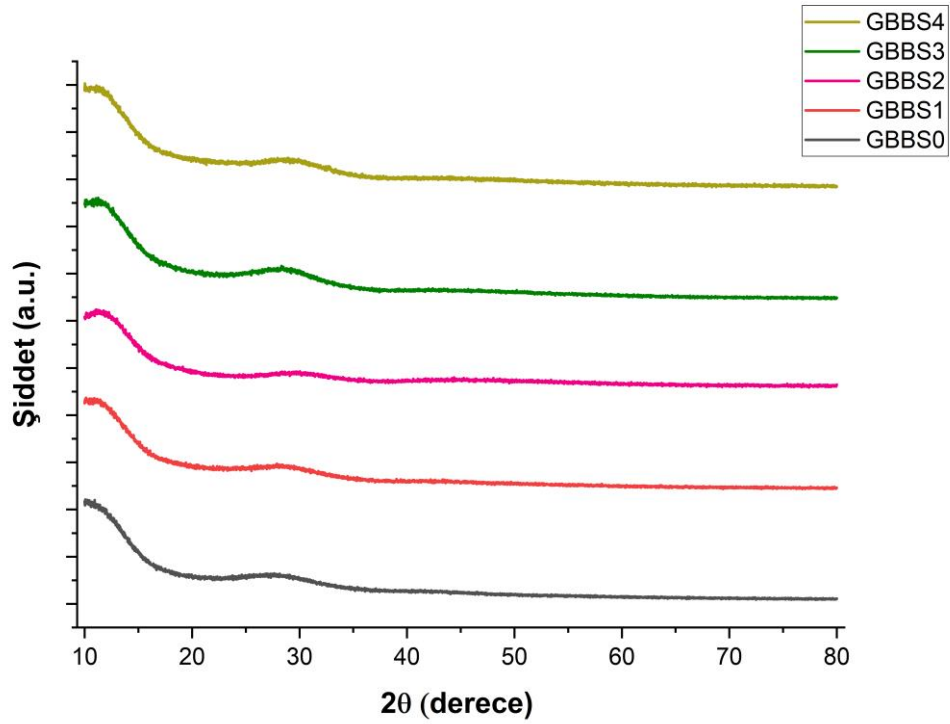
Şekil 4.1 GBSS serisi camlar için yoğunluk değerleri.

Bu duruma göre tez kapsamındaki ilgili cam sistemlerinin mümkün olan en yüksek yoğunluk değerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. GBSS serisi camlar için yoğunluk değerindeki değişim Şekil 4.1'de verilmiştir. GBBS0 numunesi herhangi bir katkı maddesi olmadan yoğunluk değeri olarak 3.3125 g/cm^3 sağlarken artan Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilave oranları ile yoğunluk değeri GBBS1-GBBS2-GBBS3 ve GBBS4 numunelerinde sırasıyla 3.5951, 3.8903, 3.9116 ve 3.8613 g/cm^3 olarak bulunmuştur. Cam yoğunluk değerindeki etkili artışın sebebi Bi_2O_3 (8.90 g/cm^3) ve Gd_2O_3 (7.41 g/cm^3) içeriklerinin SiO_2 (2.65 g/cm^3) içeriğine göre daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip olmasıdır. Bununla beraber Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içeriklerinin, malzemelerin yoğunluk değerini arttırabildiğine dair literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur (Kurtuluş vd. 2022, Kavas vd. 2021, Akkurt vd. 2020).

Yapılan yoğunluk ölçümleri sonucunda GBBS3 cam numunesinin en yüksek yoğunluk değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin GBBS3 numunesinin diğer numunelere göre %7.5 mol daha fazla Bi_2O_3 içeriğine sahip olması gösterilebilmektedir. Kısaca, en yüksek yoğunluk değerine göre GBBS3 numunesinin daha uygun olduğu düşünülürken, saydamlık kriteri dikkate alındığında ise GBBS3 numunesinin yeterli verimde olmadığı sonucuna varılmıştır. Yüksek yoğunluk ve şeffaflık kriterlerinin ele alındığı bir değerlendirme sonucunda, GBBS serisi camlardan GBBS2 isimli numunenin daha optimum sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

4.2 Yapısal Özellikler

Sentezlenen GBBS serisi camlar için X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Elde edilen desenler incelendiğinde kristal fazların oluşmadığı ve herhangi bir tepe noktası bulunmamıştır. Diğer taraftan, 15 ile 35 derece (2θ) arasında görülen yayvan tepelenme, amorf yapının önemli bir göstergesidir. Aynı durum tüm GBBS serisi camlarda için de geçerlidir. Sonuç olarak, GBBS serisi camların hiçbirinde kristal faza rastlanmamış fakat tamamında amorf yapı oluşumu rapor edilebilmektedir.



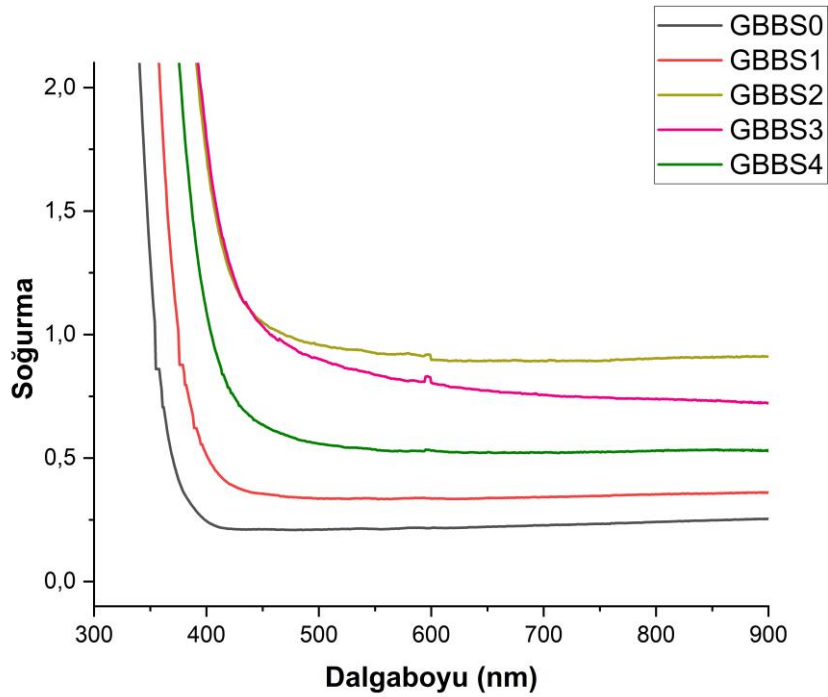
Şekil 4.2 Sentezlenen GBBS serisi camlar için X-ışını kırınım desenleri.

4.3 Optik Özellikler

Sentezlenen GBBS cam serisinin optik özelliklerini belirlemek için UV-Vis analizi yapılmıştır. Şekil 4.3'de, GBBS cam serisi için dalga boyuna karşılık soğurma eğrileri gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde katkısız GBBS0 numunesinin en düşük soğurma özelliğine sahip olduğu, GBBS2 numunesinin ise en yüksek soğurma özelliğine sahip olduğu görülmektedir.

Bunlarla beraber, numunelerin hiçbirinde belirgin bir tepe noktasına rastlanmamıştır. GBBS1 numunesi değerlendirilirken, soğurma kabiliyetinin katkısız GBBS0 numunesine göre iyileştiği saptanırken GBBS4 numunesinin incelenmesi sonucunda, ilave Gd_2O_3 oranının artış göstermesi soğurma özelliklerinde büyük değişiklik yapmadığı gözlenmiştir. Ek olarak GBBS2 numunesinde artan Bi_2O_3 ilave oranının soğurma kabiliyetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni, bizmut elementinin (2.3 Å°), silisyum elementi ve (2.1 Å°) gadolinyum elementine (1.8 Å°) göre daha yüksek atom çapına sahip olması gösterilebilmektedir.

Çünkü büyük atom çapına sahip bizmut elementi cam ağ yapısı içerisine yerleştirildiğinde madde-ışın etkileşimini desteklemekte ve iletim hızlarını azaltan yönde hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple GBBS3 numunesi, GBBS4 numunesine kıyasla daha iyi soğurma yeteneği göstermektedir. Diğer taraftan en yüksek soğurmayı sağlayan GBBS2 numunesi incelendiğinde her iki oksit ilavesinin de aynı oranda (%5 mol) bulunmasının bu durumda etkili olduğu görülmektedir. Özetle soğurma özelliğinin en yüksek olduğu numunenin elde edilmesi için GBBS sisteminde Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilave oranlarının mol olarak %5'e eşit olması gerektiği görülmektedir.

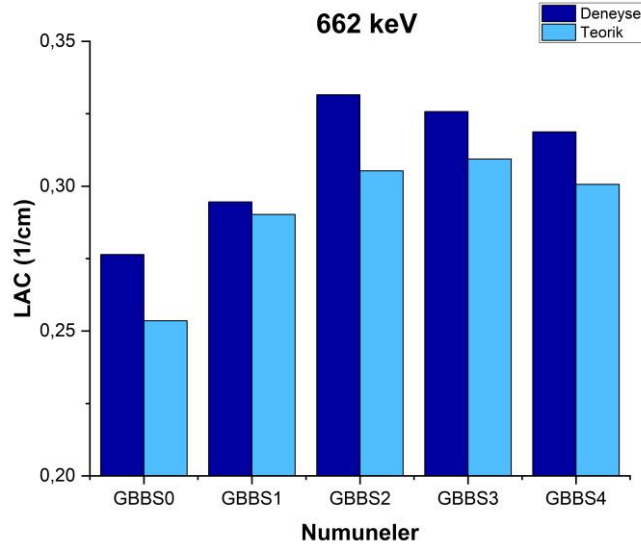


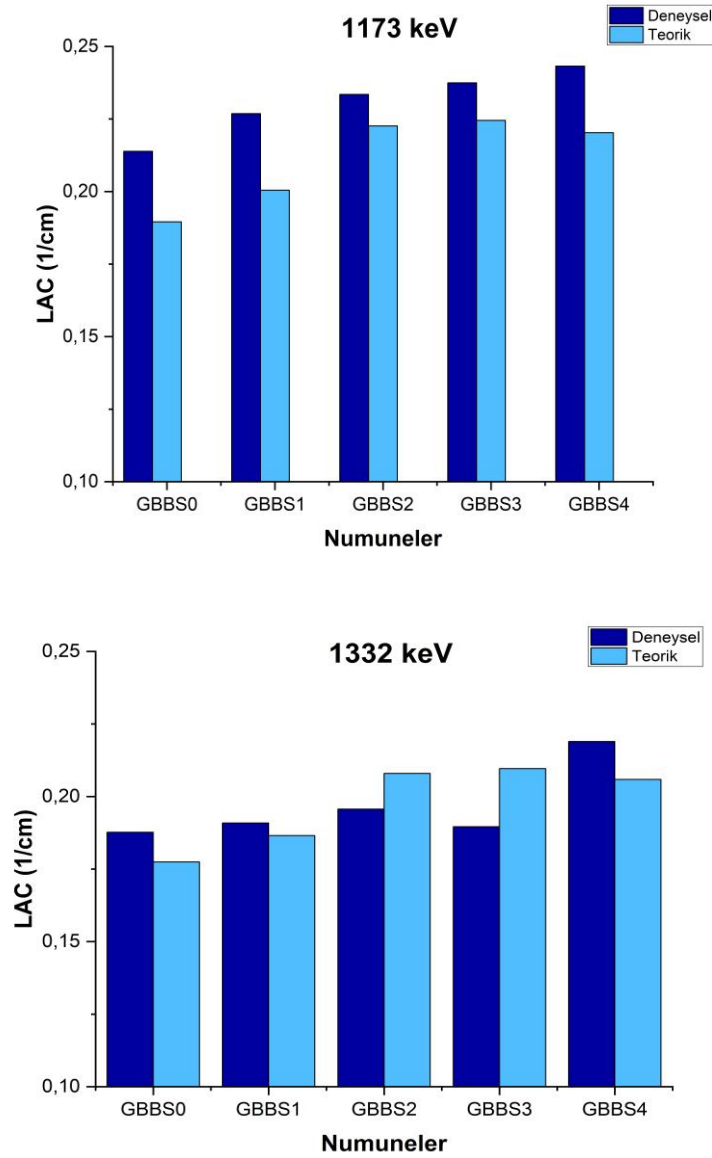
Şekil 4.3 GBBS cam serileri için dalga boyuna karşılık soğurma eğrileri.

4.4 Radyasyon Zırhlama Özellikleri

Radyasyon zırhlayıcı malzemelerin koruyucu özelliklerini belirlemek için öne çıkan parametre olan doğrusal sönümleme katsayısı (LAC) incelenmektedir. LAC parametresi, bir ışın kaynağından yayılan parçacıkların veya elektromanyetik dalgaların bir malzemeye ne kadar nüfuz edebildiğini göstermektedir (Sayyed vd. 2021, Al-Ghamdi vd. 2022). Bu nedenle madde ve ışın arasındaki etkileşimler hakkında önemli veriler sağlamaktadır.

Bundan yola çıkarak sentezlenen GBBS cam serilerinin 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde teorik ve deneysel olarak elde edilen LAC değerleri Şekil 4.4'de gösterilmektedir. 662 keV foton enerji düzeyinde LAC değerleri 0.27 ile 0.34 1/cm arasında değişirken, 1173 ve 1332 keV foton enerji düzeylerinde sırasıyla 0.21 ile 0.25 1/cm ve 0.18 ile 0.22 1/cm arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi artan foton enerjisi, LAC değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Bunun sebebi sisteme gönderilen foton enerjisinin seviyesi arttıkça penetrasyon durumunun da artmasıdır (Aloraini vd. 2022, Rammah vd. 2022). Diğer taraftan artış gösteren foton enerjisine karşı korunmayı artırmak için, GBBS cam serisinin davranışlarının incelenmesi oldukça önemlidir. Deneysel verilerin sonucunda GBBS2 numunesi en iyi sönümleme yeteneğini 662 keV foton enerjisinde gösterirken, GBBS4 numunesi en iyi sönümlemeyi 1173 ve 1332 keV foton enerji seviyelerinde göstermektedir. Deneysel sonuçların önemli yol gösterici olduğu bu aşamada 662 keV foton enerjisi için GBBS2 numunesi öne çıkarken, diğer foton enerjilerinde GBBS4 numunesi öne çıkmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, düşük enerji seviyelerinde mol bazında %5 oranında eklenen AO çiftinin ideal olarak kabul edilebileceğini ve yüksek foton enerjilerinde ise yüksek Gd_2O_3 katkısının etkili sonuçlar getirdiği söylenebilmektedir. Bu durumda yoğunluk farklarına rağmen Gd (2.38 Å^0) elementinin, Bi (2.30 Å^0) elementine göre madde ve ışın etkileşiminin, daha yüksek atomik yarıçapı ve elektronik konfigürasyonunda s^2 orbitali ile sağladığına dair bir çıkarım yapılmaktadır (Poojha vd. 2022, D'Souza vd. 2022).





Şekil 4.4. Sentezlenen GBBS cam serileri için 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde deneysel ve teorik ile elde edilen LAC değerleri.

Teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda ulaşılan LAC değerlerine göre GBBS cam serilerinin gösterdikleri performans Şekil 4.4'te değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeleri güçlendirmek için her üç yöntemin bağıl hata yüzdeleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Burada D kısaltması deneysel, T kısaltması teorik çalışmaları göstermektedir. DT kısaltması ise deneysel ve teorik çalışmalar arasındaki bağıl hata yüzdesini gösterir. Çizelgeye bakıldığında DT için bağıl hata yüzdeleri 1 ila 11 arasında değişmektedir. Deneysel ölçümlerden elde edilen bağıl hata yüzdeleri, numune kaynağından ve test düzeneği kurulumundan kaynaklanabilmektedir.

Sonuç olarak, LAC değerlerinin deneysel ve teorik çalışmalar olarak farklı açılardan incelenmesi çok önemli olmasıyla birlikte, bu değerlerin incelenmesi sürecinde herhangi bir ölçüm yöntemi karşılaştırılırken bağıl hata yüzdelerinin dikkate alınması gereklidir. Son olarak, GBBS2 cam sisteminin düşük foton enerji seviyelerinde daha başarılı, GBBS4 cam sisteminin ise yüksek foton enerjilerine karşı etkili bir koruma sağladığı gözlemlenmiştir.

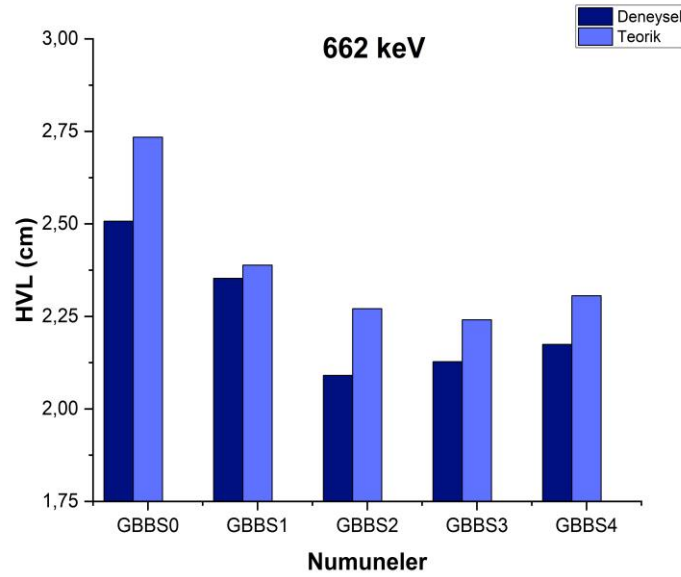
Çizelge 4.1. Deneysel ve teorik verileri arasındaki bağıl hata yüzdeleri.

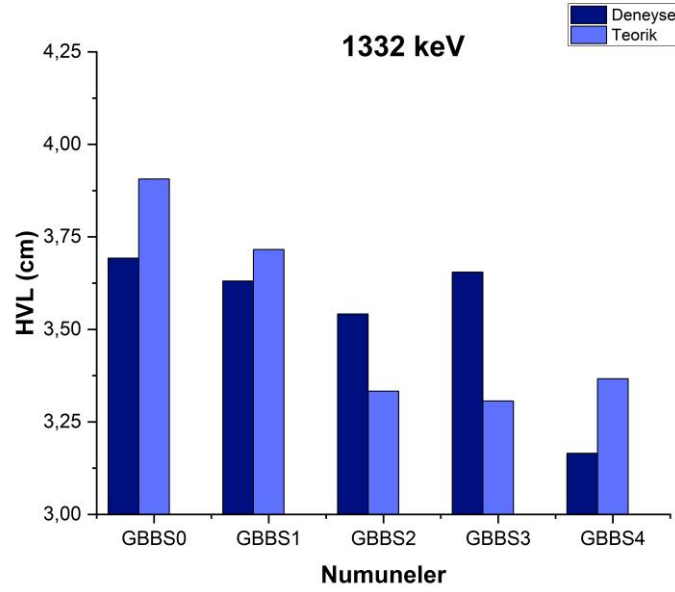
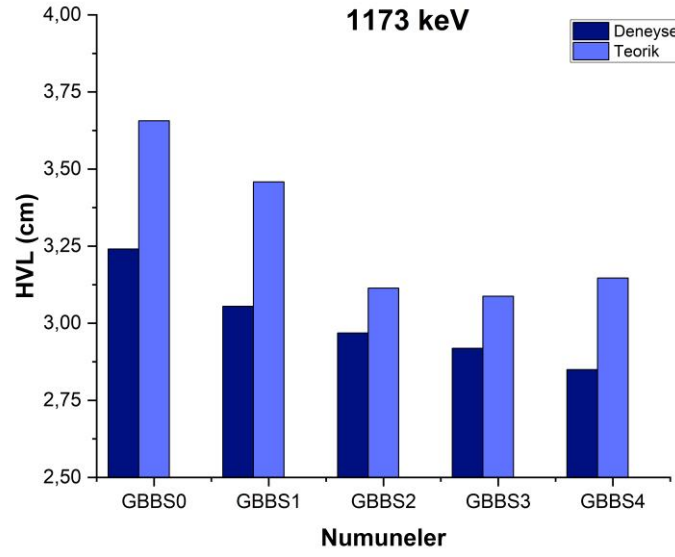
	662 keV	1173 keV	1332 keV
	DT (%)	DT (%)	DT (%)
GBBS0	8.28	11.35	5.46
GBBS1	1.47	11.65	2.27
GBBS2	7.92	4.65	6.28
GBBS3	5.03	5.45	10.56
GBBS4	5.67	9.42	5.96

Bilindiği üzere LAC parametresinin elde edilmesi ile diğer önemli radyasyon zırhlayıcı parametreler daha kolay hesaplanabilmektedir. Bu parametrelerden biri olan yarı değerli katman (HVL) , ışın kaynağından yayılan bir foton enerjisinin malzeme içinde yol alırken başlangıç enerjisini %50 oranında kaybettiği kalınlık değeri olarak tanımlanmaktadır (Açıkgöz vd. 2022, Aladailah vd. 2022). Bu nedenle radyasyon zırhlayıcı cam malzeme tasarlanırken kullanılan HVL değeri, kalınlıkla alakalı hesaplamalarda kolaylık sağlamaktadır. Etkili bir tasarım yapabilmek olabilecek en düşük HVL değerinde, en yüksek sönmüleme yeteneği beklenmektedir (Kurtuluş vd. 2021). Burada teorik ve deneysel LAC değerlerinden hesaplanan HVL değerleri Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Foton enerjisinin artmasının HVL değerlerine etkisi incelendiğinde bir artışın olduğu görülmektedir. 662 keV foton enerji seviyesinde HVL kalınlık değerleri 2.090 ile 2.507 cm arasında değişim gösterirken, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde HVL kalınlık değerleri 2.850 ile 3.241 cm ve 3.165 ile 3.692 cm arasında değişim göstermiştir. Bu sebeple foton enerjisini soğurmak için yüksek enerji seviyelerinde daha kalın bir cama ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, GBBS2 numunesi 662 keV foton enerjilerinde 2.090 cm ile en düşük HVL kalınlığını sağlarken, GBBS4 numunesi 1173 ve 1332 keV'de 2.850 ve 3.165 cm ile en düşük HVL

kalınlığını sağlamaktadır.

GBBS2 ve GBBS4 numunelerinin HVL kalınlıklarının GBBS0'a göre daha düşük olmasının nedeniyle, GBBS0 numunesine farklı oranlarda eklenmiş olan Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 katkıları gösterilebilir ancak her iki katkınında SiO_2 'ye göre çok yüksek bir yoğunluk değeri getirdiği şeklinde yorumlanabilir (Al-Buriahi vd. 2020, Al-Harbi vd. 2021). Bundan yola çıkarak, hem GBBS0 sistemine farklı oranlarda eklenen Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içeriklerinin HVL kalınlıklarını azaltmada çok etkili olduğu, hem de farklı GBBS cam serilerinin farklı foton enerjilerine karşı etkin koruma söz konusu olduğunda iyi performans sağladığı görülmüştür.





Şekil 4.5. Sentezlenen GBBS cam serileri için 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde deneysel ve teorik ile elde edilen HVL değerleri.

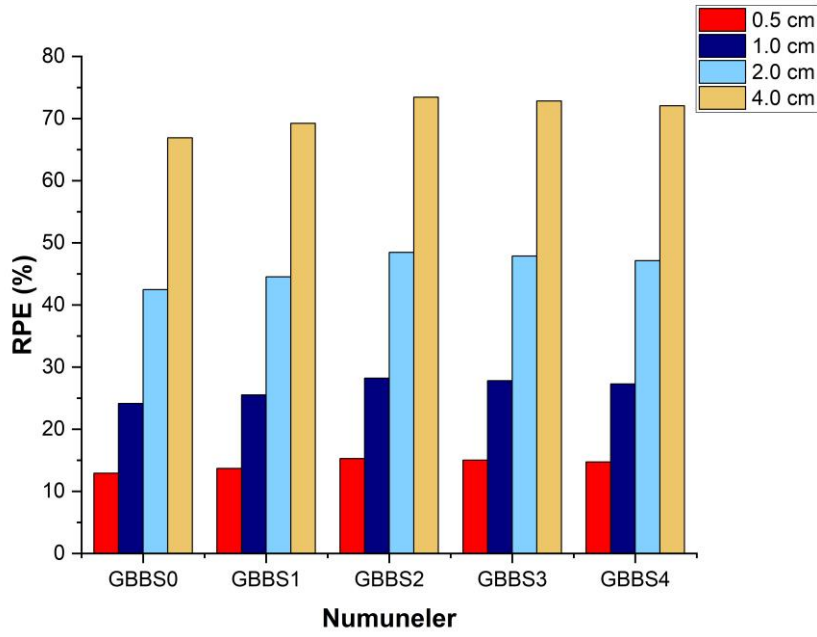
GBBS cam serileri için, radyasyon zırhlayıcı özellikler açısından belirleyici olan ortalama alınan yol (MFP) parametresi ile önemli değerlendirmeler yapılabilmektedir. MFP parametresi, madde ve ışın etkileşimi gerçekleşmeden bir fotonun aldığı ortalama mesafedir (Lakshminarayana vd. 2022, Suresh vd. 2022). MFP parametresinin olabildikçe düşük olması beklenmektedir, böylece radyasyon zırhlayıcı malzeme, sönmüleme kabiliyeti sayesinde etkili bir şekilde kullanılabilir (Khazaalah vd. 2022).

GBBS cam serilerinin 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde teorik ve deneysel çalışmalarla elde edilen MFP değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. Foton enerji seviyelerindeki artışla, MFP değerlerininde artış gösterdiği belirlenmiştir. 662, 1173 ve 1322 KEV foton enerjilerindeki incelemelerle, GBBS0 örneği için sırasıyla deneysel MFP değerleri, 3.62, 4.68 ve 5.33 cm, GBBS1,GBBS2 VE GBBS3 GBBS4 numuneleri için 3.39, 4.41 ve 5.24 cm; 3.02, 4.28 ve 5.11; 3.07, 4.21 ve 5.27 ve 3.14, 4.11 4.57 cm olarak elde edilmiştir. Bu sebeple, yüksek foton enerjilerinin daha fazla nüfuz edebilme şansına yani daha yüksek bir MFP değerine sahip olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, GBBS0 numunesinde yüksek MFP değerleri üç foton enerji seviyesinde de bulunduğu durumda; Bi₂O₃ ve Gd₂O₃ katkılarıyla, bu değerlerde düşüş görülebilmektedir.

Çizelge 4.2 Sentezlenen GBBS cam serilerinin 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerindeki deneysel ve teorik çalışmaları ile elde edilen MFP değerleri

	662 keV		1173 keV		1332 keV	
	D (cm)	T (cm)	D (cm)	T (cm)	D (cm)	T (cm)
GBBS0	3.62	3.94	4.68	5.28	5.33	5.64
GBBS1	3.39	3.45	4.41	4.99	5.24	5.36
GBBS2	3.02	3.28	4.28	4.49	5.11	4.81
GBBS3	3.07	3.23	4.21	4.45	5.27	4.77
GBBS4	3.14	3.33	4.11	4.54	4.57	4.86

Sentezlenen GBBS cam serisindeki radyasyon zırhlayıcı özellikleri incelemek için, radyasyon koruma verimliliği (RPE) önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. RPE parametresi ile LAC değerleri birlikte kullanılarak, farklı bir radyasyon zırhlayan cam malzemesi kalınlığıyla birlikte RPE’nin yüzdesel olarak nasıl değişim gösterdiği incelenmiştir (Kurtuluş vd. 2021, Sayyed vd. 2022). GBBS cam serisindeki kalınlık değerleri 3-5 mm (± 0.1 mm) arasında değişkenlik göstermiştir. Bu noktada, 3 farklı kalınlıkta (0.5, 1.0 ve 2.0 cm) ve 662 keV foton enerji seviyesinde deneysel RPE değişimlerinin yönleri incelenerek ve bulgular Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Sentezlenen GBBS cam serilerinin 662 keV foton enerjisinde farklı kalınlık değerlerinde sergiledikleri RPE yüzdeleri.

Kalınlık değeri 0.5 cm olarak incelendiğinde RPE değerinin yaklaşık %15 olduğu belirlenirken, kalınlık değerleri 1, 2 ve 4 cm olarak incelendiğinde sırasıyla %30, %50 ve %75 olarak elde edilmiştir. GBBS serilerinde, GBBS0 örneğinin en düşük RPE değeri olduğu görülürken, en yüksek değerin GBBS2 örneğinin sağladığı görülmüştür. Başka bir deyişle, 662 keV foton enerjisindeki GBBS2 örneği, diğerlerine göre daha iyi sönümleme kabiliyeti sahibiyken, kalınlığındaki artışla bu yeteneği yaklaşık %75 kadar artış gösterebilir. Bu sebeple, radyasyon zırhlayıcı uygulamalarda optimum koşullarda gama ışınlarına karşı koruyucu bir cam malzeme olarak kullanılabilirliği oldukça yüksek olarak kabul edilir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında gadolinyum-bizmut-borosilikat (GBBS) cam sistemine farklı oranlarda Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilavesiyle radyasyon zırlama özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde aşağıda listelenen sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Katkısız olan GBBS0 numunesinin oldukça berrak ve nötral bir görünüm sergilediği görülürken, GBBS1 ve GBBS2 numunelerinde, renk merkezlerinde sarı renge kayma olduğu gözlemlenmiştir. GBBS3 numunesinde, renk merkezinin sarımsı taraftan kirli bir sarı renge doğru ilerlediği (kahverengi de denebilir) göze çarparken, GBBS4 numunesinde, renk merkezinin GBBS2 numunesine benzer biçimde kayma gösterdiği, yani sarımsı bir renk verdiği görülmüştür.
2. GBBS0 numunesi, yoğunluk değeri olarak 3.3125 g/cm^3 sağlarken, artan Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilave oranları ile birlikte yoğunluk değeri GBBS1'den GBBS4 numunelerine kadar sırasıyla 3.5951, 3.8903, 3.9116 ve 3.8613 g/cm^3 şeklinde bulunmuştur.
3. Cam yoğunluğu değerinde meydana gelen artışının sebebi Bi_2O_3 (8.90 g/cm^3) ve Gd_2O_3 (7.41 g/cm^3) içeriklerinin SiO_2 (2.65 g/cm^3) içeriğine kıyasla oldukça yüksek yoğunluk değerine sahip olmasından kaynaklı olduğu saptanmıştır.
4. GBBS serisi camların hiçbirinde kristal faza rastlanmamış olup, tamamında amorf yapı oluşumu görülmüştür.
5. Optik özellik sonuçlarına göre, katkısız GBBS0 numunesinin en düşük soğurma özelliğine sahip olduğu, GBBS2 numunesinin ise en yüksek soğurma özelliğine sahip olduğu görülmüştür.
6. GBBS1 numunesi değerlendirilirken, soğurma kabiliyetinin katkısız GBBS0 numunesine göre iyileştiği saptanırken, GBBS4 numunesinin incelenmesi

sonucunda, ilave Gd_2O_3 oranının artış göstermesi soğurma özelliklerinde büyük değişiklik yapmadığı gözlenmiştir.

7. GBBS2 numunesinde artan Bi_2O_3 ilave oranının soğurma kabiliyetini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni, bizmut elementinin (2.3 Å^0), silisyum elementi ve (2.1 Å^0) gadolinyum elementine (1.8 Å^0) göre daha yüksek atom çapına sahip olması şeklinde çıkarım yapılmıştır.
8. Optik özellik tespitlerinin bir sonucu olarak, soğurma özelliğinin en yüksek olduğu numunenin elde edilmesi için GBBS sisteminde Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 ilave oranlarının mol olarak %5'e eşit olması gerektiği bulunmuştur.
9. Sentezlenen GBBS cam serilerinin 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde teorik ve deneysel radyasyon zırlama bulguları irdelenmiştir.
10. 662 keV foton enerji düzeyinde LAC değerleri 0.27 ile 0.34 $1/cm$ arasında değişirken, 1173 ve 1332 keV foton enerji düzeylerinde sırasıyla 0.21 ile 0.25 $1/cm$ ve 0.18 ile 0.22 $1/cm$ arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi artan foton enerjisi, LAC değerlerinin düşmesine neden olduğu bulunmuştur.
11. Deneysel verilerin sonucunda GBBS2 numunesi en iyi sönümleme yeteneğini 662 keV foton enerjisinde gösterirken, GBBS4 numunesi en iyi sönümlemeyi 1173 ve 1332 keV foton enerji seviyelerinde göstermiştir.
12. Düşük enerji seviyelerinde mol bazında %5 oranında eklenen Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 çiftinin ideal olarak kabul edilebileceğini ve yüksek foton enerjilerinde ise yüksek Gd_2O_3 katkısının etkili sonuçlar getirdiği tespit edilmiştir.
13. Deneysel ve teorik bulgular arasındaki bağıl hata oranının yüzde 1 ile 11 arasında değişkenlik gösterdiği bulunmuştur. Literatür çalışmaları ile kıyaslandığında kabul edilebilir nitelikte oldukları düşünülmüştür.

14. LAC verilerinden hareketle, HVL parametresi irdelenmiştir. 662 keV foton enerji seviyesinde HVL kalınlık değerleri 2.090 ile 2.507 cm arasında değişim gösterirken, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde HVL kalınlık değerleri 2.850 ile 3.241 cm ve 3.165 ile 3.692 cm arasında değişim göstermiştir.
15. GBBS0 sistemine farklı oranlarda eklenen Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içeriklerinin HVL kalınlıklarını azaltmada çok etkili olduğu, hem de farklı GBBS cam serilerinin farklı foton enerjilerine karşı etkin koruma söz konusu olduğunda iyi performans sağladığı görülmüştür.
16. Diğer önemli bir parametre olan MFP de LAC verilerinden hareketle hesaplanmıştır. 662, 1173 ve 1322 keV foton enerjilerindeki incelemelerle, GBBS0 örneği için sırasıyla deneysel MFP değerleri, 3.62, 4.68 ve 5.33 cm, GBBS1 ve GBBS4 numuneleri, 3.39, 4.41 ve 5.24 cm; 3.02, 4.28 ve 5.11; 3.07, 4.21 ve 5.27 ve 3.14, 4.11, 4.57 cm olarak elde edilmiştir.
17. Kalınlık değeri 0.5 cm olarak incelendiğinde RPE değerinin yaklaşık %15 olduğu belirlenirken, kalınlık değerleri 1, 2 ve 4 cm olarak incelendiğinde sırasıyla %30, %50 ve %75 olarak elde edilmiştir.
18. GBBS serilerinde, GBBS0 örneğinin en düşük RPE değeri olduğu görülürken, en yüksek değerin GBBS2 örneğinin sağladığı görülmüştür.
19. Tüm bu analiz yöntemlerinin neticesinde, GBBS2 cam serisinin en ideal sonuçları sağladığı gerçekleştirilen tez çalışması neticesinde ortaya konulmuştur. Dolayısıyla, kurşunsuz yeni nesil radyasyon zırhlayıcı cam geliştirilmesi çerçevesinde, GBBS2 cam serisinin güçlü bir aday olduğu çıkarımı yapılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Acikgoz A, Demircan G, Yılmaz D, Aktas B, Yalcin S, Yorulmaz N, 2022, Structural, Mechanical, Radiation Shielding Properties and Albedo Parameters of Alumina Borate Glasses: Role of CeO_2 and Er_2O_3 , *Material Science and Engineering*, 276, 115-515.
- Akkurt I, Kurtulus R, Kavas T, Gunoglu K, 2021, Theoretical and Experimental Gamma-Rays Attenuation Characteristics of Waste Soda-Lime Glass Doped with La_2O_3 and Gd_2O_3 , *Ceramics International*, 47, 8424–8432.
- Aladailah M W, Tashlykov O L, Shirmanov L A, Strugov E D, Sayyed M I, Marashdeh M W, Elsafi M, Al-Maaitah A F, 2022, Radiation Attenuation Properties of Novel Glass System Using Experimental and Geant4 Simulation, *Radiation Physics and Chemistry*, 199, Article number 110404.
- Al-Buriah M S, Tonguç B, Perişanoğlu U, Kavaz E, 2020, The Impact of Gd_2O_3 on Nuclear Safety Proficiencies of $\text{TeO}_2\text{--ZnO--Nb}_2\text{O}_5$ Glasses: A GEANT4 Monte Carlo Study, *Ceramics International*, 46, 23347–23356.
- Al-Buriah S, 2022, High Density Binary $\text{TeO}_2\text{--Bi}_2\text{O}_3$ Glasses: Strong Potential as a Nontoxic and Environmentally Friendly Glass Shields for Photons/Charged Particles, *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 1311–1318.
- Al-Ghamdi H, Sayyed M I, Almuqrin A A H, Kumar A, Yasmin S, Bashir A R, Khandaker M U, 2022, Design and Development of Transparent Glasses for Radiation Shielding Applications, *Radiation Physics and Chemistry*, 201, Article number 110438.
- Al-Harbi F F, Prabhu N S, Sayyed M I, Almuqrin A H, Kumar A, Kamath S D, 2021, Evaluation of Structural and Gamma Ray Shielding Competence of $\text{Li}_2\text{O--K}_2\text{O--B}_2\text{O}_3\text{--HMO}$ ($\text{HMO} = \text{SrO/TeO}_2\text{/PbO/Bi}_2\text{O}_3$) Glass System, *Optik*, 248, Article number 168074.

- Al-Harbi N, Sayyed M I, Al-Hadeethi Y, Kumar A, Elsafi M, Mahmoud K A, Khandaker M U, Bradley D A, 2021, A novel $\text{CaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ Glass Systems For Radiation Shielding Applications, *Radiation Physics and Chemistry*, 188, Article number 109645.
- Almatari M, 2019, Gamma Radiation Shielding Properties of Glasses within the $\text{TeO}_2\text{-TiO}_2\text{-ZnO}$ System, *Radiochim Acta*, 107, 517-522.
- Almatari M, Agar O, Altunsoy E, Kilicoglu O, Sayyed M, Tekin H, 2019, Photon and Neutron Shielding Characteristics of Samarium Doped Lead Alumino Borate Glasses Containing Barium, Lithium and Zinc Oxides Determined at Medical Diagnostic Energies, *Results in Physics*, 12, 2123–2128.
- Almuqrin A H, Sayyed M I, Jeong J F M, Kumar A, AlShammari M M, Albarzan B, 2021, $\text{SrO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ Glass System: Effects of Varying SrO and BaO Compositions to Physical And Optical Properties, And Radiation Shielding Using EPDL2017 Photoatomic Library, *Optik–International Journal for Light and Electron Optics*, 245, Article number 167670.
- Aloraini D A, Sayyed M I, Kumar A, Yasmin S, Almuqrin A H, Tishkevich D I, Trukhanov A V, 2022, Studies of Physical, Optical, and Radiation Shielding Properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2\text{-MgO-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ Glass System, *Optik*, 268, Article number 169680.
- Callister W, Rethwisch D, 2015, *Materials Science and Engineering*, 992p, Boston
- Cheewasukhanont W, Limkitjaroenporn P, Sayyed M I, Kothan S, Kim H J, Kaewkhao J, 2022, High Density of Tungsten Gadolinium Borate Glasses for Radiation Shielding Material: Effect of WO_3 Concentration, *Radiation Physics and Chemistry*, 192, Article number 109926.
- D'Souza A N, Sayyed M I, Prabhu N S, Kamath S D, 2022, Comparing Basic Radiation Attenuation Factors of Tellurite Glasses Containing PbCl_2 and Bi_2O_3 With Some Other Potential Glass Systems, *Optik*, 249, Article number 168247.

- Glinicki M, Jaskulski R, Dąbrowski M, Ranachowski Z, 2016, Determination of Thermal Properties of Hardening Concrete for Massive Nuclear Shielding Structures, Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technology, 7-11 August 2016, Las Vegas
- Kaewjaeng S, Boonpa W, Kothan S, Kim H J, Jumpee C, Rajaramakrishna R, Tungjai M, Kaewkhao J, 2022, X-ray Radiation Shielding of CeO₂ Doped Borosilicate Glasses And Their Luminescence Characteristics, Radiation Physics and Chemistry, 191, 109-825.
- Kaky K M, Sayyed M I, Ati A A, Mhareb M H A, Mahmoud K A, Bakii S O, Mahdi M A, 2020, Germanate Oxide Impacts on the Optical and Gamma Radiation Shielding Properties of TeO₂-ZnO-Li₂O Glass System, Journal of Non-Crystalline Solids, 546, 120-272.
- Karmakar B, 2016, Fundamentals of Glass and Glass Nanocomposites, Elsevier Science 408p, India.
- Kavas T, Kurtulus R, Akkurt I, Gunoglu K, Tekin H O, Kurtulus C, 2021, A Comprehensive Study On Novel Alumino-Borosilicate Glass Reinforced with Bi₂O₃ for Radiation Shielding, Journal of Material Science Materials in Electronics, 32, 13882–13896.
- Khazaalah T, Shahrim I, Rahman A, Mohd Z M, Hisam R, Muhammad A M, Hayder S N N, Khalib N, 2022, Development of Novel Transparent Radiation Shielding Glasses by BaO Doping in Waste Soda Lime Silica (SLS) Glass, 14, 937.
- Kocabağ D, 2002, Cam Kimyası, Özellikler, Uygulaması, Birsen Yayınevi, 417s, İstanbul
- Kocabağ D, 1997, Cam Hammaddeleri; Bir İşlevsel Değerlendirme, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim 1997, İzmir.
- Kothiyal G P, Ananthanarayanan A, Dey G K, 2012, Functional Materials Preparation, Processing and Applications, Glass and Glass-Ceramics, 14, 320-386.
- Kurtuluş R, Buriahi M S, Issa S A M, Tekin H O, Kavas T, Kavaz E, 2022, Physical, Structural, Mechanical and Radiation Shielding Features of Waste Pharmaceutical Glasses Doped with Bi₂O₃, Optik, 261, Article number 169309.

- Kurtulus R, Kurtulus C, Kavas T, 2021, Nuclear Radiation Shielding Characteristics and Physical, Optical, Mechanical, and Thermal Properties of Lithium-Borotellurite Glass Doped with Rb_2O ,” Progress in Nuclear Energy, 141, Article number 103961.
- Kurtulus R, Kurtulus C, Kavas T, 2021, Physical , Optical , Thermal , Mechanical , and Photon Shielding Properties of $\text{Rb}_2\text{O-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ Glass System, Journal of Material Science Materials in Electronics, 32, Article number 10854.
- Kurtulus R, Sayyed M, Kavas T, Mahmoud K, Tashlykov O L, Khandaker M U, Bradley D A, 2021, A Lanthanum-Barium-Borovanadate Glass Containing Bi_2O_3 for Radiation Shielding Applications, Radiation Physics and Chemistry, 186, Article number 109557.
- Lakshminarayana G G, Tekin H O, Dong M G, Al-Buriah M S, Lee D E, Yoon J, Park T, 2022, Comparative Assessment of Fast and Thermal Neutrons and Gamma Radiation Protection Qualities Combined with Mechanical Factors of Different Borate-Based Glass Systems, Results Physics, 37, Article number 105527.
- Poojha M K K, Marimuthu K, Teresa P E, Almousa N, Sayyed M I, 2022, Role of Modifiers on the Structural, Mechanical, Optical and Radiation Protection Attributes of Eu^{3+} Incorporated Multi Constituent Glasses, Nuclear Engineering and Technology, 54, 3841–3848.
- Rammah Y, Tekin H O, Issa S, El-Agawany F, Mahmoud K, Abdel-hafez S, Abouhaswa A, 2021, On $\text{B}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}/\text{Gd}_2\text{O}_3$ Glasses: Synthesis, Structure, Physical Characteristics, and Gamma-Ray Attenuation Competence, Applied Physics A, 127, Article number 851.
- Salavadi S, Edukondalu A, Boukhris I, Alrowaili Z, AL-Baradi A, Olarinoye O, Gaikwad D, Al-Buriah M, 2021, Effects of $\text{TeO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ Substitution on Synthesis, Physical, Optical and Radiation Shielding Properties of $\text{ZnO-Li}_2\text{O-GeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ Glasses, Ceramics International, 47, 30137-30146.

- Sayyed M I, Kumar A, El-bashir B O, Mahmoud K A, Zaid M H M, Sidek H A A, Matori K, 2022, Investigation of the Mechanical and Radiation Shielding Features for BaO-WO₃-P₂O₅ Glass Systems, Optik, 258, Article number 168810.
- Sayyed M I, Mahmoud K, Lacomme E, Alshammari M, Dwaikat N, Alajerami Y, Alqahtani M, El-bashir B, Abu M, 2021, Development of a Novel MoO₃-Doped Borate Glass Network for Gamma-Ray Shielding Applications, European Physical Journal Plus, 136, 108-120.
- Shelby J E, 2005, Introduction to Glass Science and Technology, The Royal Society and Chemistry, 308p, Cambridge.
- Shoua P, Zhenkun K, Xin C, Chuanli S, Fengyang Z, Min G, Lifen S, Yangshan S, Yong Y, Liyun M, 2019, A Novel Type of Borosilicate Glass with Excellent Chemical Stability and High Ultraviolet Transmission, Journal of Non-Crystalline Solids, 528, 119-735.
- Suresh A A, Vinothkumar P, Mohapatra M, Dhavamurthy M, Murugasen P, 2023, The Effect of Rare Earth on the Radiation Shielding Properties of Transparent Lead-Free Alumino-Borophosphate Glass System, Radiation Physics and Chemistry, 193, Article number 109941.
- Sürücü A, Subaşı S, 2021, Nanomateryallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 182-194.
- Tekin H, Kassab L, Issa S, Bordon C, Guclu E, Silva Mattos D, Kilicoglu O, 2019, Synthesis and Nuclear Radiation Shielding Characterization of Newly Developed Germanium Oxide and Bismuth Oxide Glasses, Ceramics International, 45, 24664-24674.
- Zaid M H M, Matori K A, Nazrin S N, Azlan M N, Hisam R, Iskandar S M, Yusof N N, Hila F C, Sayyed M I, 2021, Synthesis, Mechanical Characterization And Photon Radiation Shielding Properties of ZnO-Al₂O₃-Bi₂O₃-B₂O₃ Glass System, Optical Materials, 122, Article number 111640.