T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 CAMLARIN OPTİK, FİZİKSEL VE RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Burak Berke SOLAK

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2023

Prof. Dr. Bülent AKTAŞ danışmanlığında, Burak Berke SOLAK'ın hazırladığı "**B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 camların optik, fiziksel ve radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenmesi**" konulu bu çalışma 03/03/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

□ Oybirliğiyle / □ Oy çokluğu ile

İmza

Danışman	: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ	……..
Üye	: Prof. Dr. Şerife YALÇIN	……..
Üye	: Prof. Dr. Demet YILMAZ	……..

Bu tezin Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yapıldığını ve enstitümüz kurallarına göre düzenlendiğini onaylarım.

Prof. Dr. İsmail HİLALİ

Enstitü Müdürü

Bu çalışma: ……. 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 Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1.GİRİŞ 1
2.KURAMSAL TEMELLER 9
2.1.Camlar 9
2.2. Camların Yapısı 11
2.3. Camın Ergitilme işlemi 13
2.3.1. Ergitmeyi hızlandırma yöntemleri 15
2.3.2. Eriyiğin homojenleştirilmesi 15
2.4. Camı Oluşturan Temel Oksitler 16
2.4.1. Silisyum dioksit (SiO_2) 16
2.4.2. Alüminyum oksit (Al_2O_3) 17
2.4.3. Sodyum oksit (Na_2O) 18
2.4.4. Kalsiyum oksit (CaO) 19
2.4.5. Potasyum oksit (K_2O) 19
2.4.6. Magnezyum oksit (MgO) 20
2.4.7. Baryum oksit (BaO) 20
2.4.8. Demir oksit (Fe_2O_3) 20
2.5. Cam Türleri ve Kullanım Alanları 21
2.5.1. Sodakalsik camı ve kullanım alanları 21
2.5.2. Kurşun camı (kristal cam) ve kullanım alanları 21
2.5.3. Borosilikat cam ve kullanım alanları 21
2.5.4. Alüminosilikat camı ve kullanım alanları 22
2.5.5. Silis camı (%96 SiO_2) ve kullanım alanları 23
2.5.6. Silis camı (%99 SiO_2) ve kullanım alanları 23
2.6. Camların Mekanik Özellikleri 23
2.6.1. Elastiklik modülü (E) 24
2.6.2. Sertlik 25
2.6.3. Gevrek kırılma teorisi (Griffith teorisi) 25
2.6.4. Kırılma tokluğu 26
3. MATERYAL ve YÖNTEM 27
3.1. Materyal 27
3.1.1. Kurşun oksit (PbO) 27
3.1.2. Bor oksit (B_2O_3) 27
3.1.3 Tungsten oksit (WO_3) 28
3.1.4. Seryum oksit (CeO_2) 28
3.1.5. Tellür oksit (TeO_2) 28
3.2. Yöntem 29
3.2.1. Cam kompozisyonların sentezlenmesi ve üretimi 29
3.2.2. Mikroyapı incelemeleri 34
3.2.3. Numunelerin yoğunluk ölçümleri 36
3.3. Numunelerin Yapısal ve Optik İncelemeleri 38

3.4. Numunelerin Elastik Özelliklerinin Belirlenmesi 38
3.5. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi 39
3.6. Numunelerin Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi 43
3.6.1. Kütle soğurma katsayısı (MAC) 45
3.6.2. Yarı değer kalınlığı (HVL) 45
3.6.3. Ortalama serbest yol (MFP) 45
3.6.4. Etkin atom numarası (Z_{et}) 46
3.6.5. Maruz kalma faktörü (EBF) 46
3.6.6. Hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti 46
3.6.7. Kütle durdurma gücü (MSP) ve menzil (PR) 47
3.7. Nötron eşdeğer doz ölçümleri 47
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 49
4.1. Camların Yapısal ve Optik Özellikleri 49
4.2. Camların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri 56
4.2.1. Camların yoğunlukları 56
4.2.2.Elastik özellikler 58
4.2.3. Fiziksel, yapısal ve mekanik özellikler 60
4.3. Radyasyon zırhlama parametreleri sonuçları 65
4.3.1. Kütle soğurma katsayısı (MAC) 65
4.3.2. Yarım değer kalınlığı (HVL) 67
4.3.3. Ortalama serbest yol (MFP) 68
4.3.4. Etkin atom numarası (Z_{et}) 70
4.3.5. Maruz kalma buildup faktörü (EBF) 71
4.3.6. Hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti 75
4.4.Nötron eşdeğer doz ölçüm sonuçları 78
5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER 80
5.1. Sonuçlar 80
5.2.Öneriler 81
KAYNAKLAR 82
ÖZGEÇMİŞ 86

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 CAMLARIN OPTİK, FİZİKSEL ve RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Burak Berke SOLAK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Yıl: 2023, Sayfa: 86

Bu çalışmada B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camlara farklı oranlarda (x=1, 3, 5, 10, 20 mol %) WO_3 ilave edilerek fiziksel özellikleri yüksek radyasyon zırhlayıcı cam malzeme üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç için $45B_2O_3$-(20-x)PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$-xWO_3 camlar; B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 tozları kullanılarak ergitme döküm yöntemi ile üretilmiştir. Hazırlanan camların kütle soğurma katsayıları (MAC), ortalama serbest yol (MFP), yarı değer kalınlığı (HVL) ve etkin atom sayıları (Z_{et}) 59.54-661.62 keV enerji bölgesinde deneysel olarak ölçülmüş ve bu parametreler teorik olarak hesaplanmıştır. Sentezlenen camların temel yapısal özellikleri XRD, UV-Vis ve FT-IR spektroskopik teknikleri kullanılarak incelenmiştir. XRD sonuçları hazırlanan tüm cam kompozisyonlarında camsı amorf yapının oluştuğunu göstermiştir. Camsı amorf yapı oluşturan numunelerin sertlikleri Mikro-Vickers yöntemi ile ölçülmüştür. Numunelerin sertlik değerleri %0-5 WO_3 katkı aralığında 3,53'ten 4,14 GPa'a kadar çıktığı ve %10-20 WO_3 katkı aralığında ise 3,76 GPa'a kadar azaldığı görülmüştür. Camların kırılma tokluğu Half-Penny-Crack yöntemi ile belirlenmiş %0-5 WO_3 katkı aralığında 1,07' den 1,14 MPa.$m^{0.5}$ yükselmiş ve %10-20 katkı aralığında 1,09 MPa.$m^{0.5}$'a düşmüştür. Numunelerin yoğunlukları arşimet prensibine göre belirlenmiştir ve WO_3 katkı miktarı arttıkça yoğunluğun 4.93 gr/cm^3 ten 4.63 gr/cm^3'e düşmüş ve elastisite modülü 77'den 91 GPa'a artış göstermiştir. Araştırma bulguları sonucunda üretilmiş olan bu camların WO_3 katkısı ile mekanik özelliklerinin iyileştiği ve kütle soğurma katsayısı değerlerine bakıldığında WO_3 katkısının numunelerin radyasyon soğurma kabiliyetini artırdığını söyleyebiliriz.

ANAHTAR KELİMELER: Boro tellürit camlar, radyasyon zırhlama, elastik özellikler, mekanik özellikler, optik özellikler

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF OPTIC, PHYSICAL, AND RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF B_2O_3-PBO-TeO_2-CeO_2-WO_3 GLASSES

Burak Berke SOLAK

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year: 2023, Page: 86

This study is aimed to produce radiation-shielding glass materials with high physical properties by adding WO_3 at different amounts (x=1, 3, 5, 10, 20 mol%) to B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 glasses. For this purpose, $45B_2O_3$-(20-x) PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$ glasses were produced by melt casting method using B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 powders. The mass attenuation coefficients (MAC), mean free path (MFP), half value layer (HVL) and effective atomic numbers (Z_{eff}) of the prepared glasses were experimentally measured in the 59.54-661.62 keV energy region and these parameters were calculated theoretically. The basic structural properties of the synthesized glasses were investigated using XRD, UV-Vis and FT-IR spectroscopic techniques XRD results showed that all prepared glass compositions formed a glassy amorphous structure. The hardness of the samples forming a glassy amorphous structure was measured by the Micro-Vickers method. It was observed that the hardness values of the samples increased from 3,53 to 4,14 GPa in the 0-5% WO_3 additive range and decreased up to 3,76 GPa in the 10-20% WO_3 additive range. The fracture toughness of the glasses increased from 1.07 to 1.14 $MPa.m^{0.5}$ in the 0-5% WO_3 additive range determined by the Half-Penny-Crack method and decreased to 1.09 $MPa.m^{0.5}$ in the 10-20% additive range. The densities of the samples were determined according to the Archimedes principle and as the amount of WO_3 additive increased, the density decreased from 4.93 to 4.63 gr/cm^3, and the modulus of elasticity increased from 77 to 91 GPa. As a result of the research findings, it was concluded that the mechanical properties of these glasses were improved with WO_3 additive. Also, considering the mass attenuation coefficient values, we can say that WO_3 additive increases the radiation shielding ability of the prepared glass samples.

KEYWORDS: Boro telluride glasses, radiation shielding, elastic properties, mechanical properties, optical properties

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sürecinde konu seçimi ve tez yazma aşamasına kadar tecrübeleri ile beni yönlendiren, değerli bilgi birikimini benden esirgemeyen, danışman hocam, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Bülent AKTAŞ'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca değerli bilgilerini benden esirgemeyen Harran Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Şerife YALÇIN'a ve Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Demet YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca özellikle laboratuvar çalışmalarımda ve tez yazım aşamasında sahip olduğu tecrübeleri ve bilgileri ile beni yönlendiren saygıdeğer hocam, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Abuzer AÇIKGÖZ'e verdiği emeklerinden dolayı en içten duygularımla minnettarım.

Emekleriyle beni bugünlere getiren Anneme, Babama ve Kız kardeşime teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi olarak yanımda olan çalışmakta olduğum SİMORA MÜHENDİSLİK Genel Koordinatörü Haluk SÖZER abime teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca tecrübeleri ve bilgisi ile hep yanımda olan bir abi gibi davranan çalışmakta olduğum SİMORA MÜHENDİSLİK Fabrika Müdürü Ali ŞANLI'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca sürekli olarak yanımda olan bir abi gibi davranan çalışmakta olduğum SİMORA MÜHENDİSLİK İdari İşler Müdürü Özkan SÜER'e ve bütün çalışma arkadaşlarıma teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kardeşim Kenan GEZER'e en içten duygularım ile teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen İbrahim ÖZÜPAK'a teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. (a) kristal yapılı SiO_2 ve (b) amorf yapılı SiO_2…….. 10
Şekil 2.2. SiO_4 düzgün dörtyüzlüleri (a) köşelerinden birbirine bağlanarak (b) camın ağ yapısını 11
Şekil 2.3. Silika camlarının viskozite-sıcaklık grafiği 13
Şekil 2.4. Camın katı-sıvı hal değişimi 14
Şekil 2.5.Aliminyum oksitin cam ağına bağlanması 17
Şekil 2.6. Camın ağ yapısına katılan sodyum oksitin cam ağına bağlanması 19
Şekil 3.1. Tozların manyetik karıştıcıda karıştırılması 30
Şekil 3.2. Alümina seramik ergitme potası ve yüksek sıcaklık kül fırını 31
Şekil 3.3. Grafit kalıp ve şekillendirme aparatı 32
Şekil 3.4. Üretilen cam numuneler a) P ve b) PW1 c) PW3 d) PW5 e) PW10 f) PW20 33
Şekil 3.5. Ters metal mikroskobu 34
Şekil 3.6. Kalıplanan numuneler a) P b) PW1 c) PW3 d) PW5 e) PW10 f) PW20 35
Şekil 3.7. Zımparalama ve parlatma ünitesi 36
Şekil 3.8. Hassas terazi ve yoğunluk kiti 37
Şekil 3.9. Mikro Vickers sertlik cihazı 40
Şekil 3.10. Gama ışını soğurma deney sistemi 44
Şekil 3.11. Gama ışını soğurma deney sistemi 44
Şekil 3.12. ^{241}Am–Be nötron kaynağı ve BF_3 gazlı orantılı sayaç (Canberra NP-100B) 48
Şekil 4.1. Cam örneklerin XRD desenleri 49
Şekil 4.2. WO_3 katkılı camların FT-IR spektrumları 50
Şekil 4.3. WO_3 katkılı camların UV-vis absorpsiyon spektrumları 52
Şekil 4.4. Üretilen camların foton enerjisine ($h\upsilon$) karşı $(\alpha h\upsilon)^2$ grafiği 54
Şekil 4.5. Camların yoğunluk-molar hacim grafiği 57
Şekil 4.6. WO_3 katkısı ile cam numunelerin Em, Gm ve Km'deki değişim 59
Şekil 4.7. WO3 katkısı ile cam numunelerin poisson oranındaki değişim 60
Şekil 4.8. WO3 katkısı ile cam numunelerin sertlik ve kırılma tokluklarındaki değişim 62
Şekil 4.9. Cam örneklerin oksijen molar hacmi (MOV) ve oksijen paketleme yoğunluğu 63
Şekil 4.10. Cam numunelere 1N kuvvet uygulandığında Vickers çentik izleri ve oluşan çatlaklar; (a) P (b) PW1 (c) PW3 (d) PW5 (e) PW10 ve (f) PW20 64
Şekil 4.11. Üretilen camların MAC (cm^2/g) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi 66
Şekil 4.12. Üretilen camların HVL (cm) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi 67
Şekil 4.13. Üretilen camların MFP (cm) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi 69
Şekil 4.14. Üretilen camların Zet değerlerinin foton enerjisi ile değişimi 70
Şekil 4.21. Üretilen camların hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti değerleri 75
Şekil 4.22. Üretilen camların protonlar için kütle durdurma gücü ve menzilin kinetik enerji ile değişimi 76
Şekil 4.23. Üretilen camların alpha parçacıkları için kütle durdurma gücü ve menzilin kinetik enerji ile değişimi 77
Şekil 4.24. Üretilen camların nötron eşdeğer doz ölçüm değerleri 78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Bazı cam örnekleri 22
Çizelge 3.1. Sentezlenen camların kompozisyonları, kısaltmaları ve bileşenlerin ağırlıkça miktarları 30
Çizelge 4.1. Üretilen camların FT-IR spektrumundan elde edilen titreşim pikleri. 51
Çizelge 4.2. Üretilen camların optiksel bandgap (Eg), kırılma indisi (n), Molar kırılma (Rm) ve Elektronik Polarize Edilebilirlik değerleri (αm) 56
Çizelge 4.3. WO_3 katkılı camların yoğunlukları ve molar hacimleri (V_M). 57
Çizelge 4.4. WO_3 katkılı cam örneklerinin ayrışma enerjisi (Gi), atomik paketlenme yoğunluğu (Vt) elastisite modülü (Em), kesme modülü (Gm), hacim modülü (Km) ve poisson oranı (σm) 58
Çizelge 4.5. WO_3 katkılı cam numunelerin fiziksel, yapısal ve mekanik özellikleri. 61
Çizelge 4.6. Cam numunelerinin 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki MAC (cm^2/g) değerleri 65
Çizelge 4.7. Üretilen camların 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki HVL (cm) değerleri. 67
Çizelge 4.8. Üretilen camların 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki MFP (cm) değerleri. 68
Çizelge 4.9. Nötron eşdeğer doz ölçüm değerleri. 78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

B	Gevreklik
E	Elastiklik
FTIR	Fourier dönüşümlü infrared
GPa	Giga paskal
G_t	Ayrışma enerjisi
Hv	Vickers sertliği
KeV	Kilo elektron volt
Kıc	Kırılma Tokluğu
MeV	Mega elektron volt
N	Avogadro sayısı
N_{BO}	Köprülü Oksijen Sayısı
UV	Ultraviyole
Vm	Molar Hacim
V_t	Atomik paketleme yoğunluğu
Rpm	Dakika başına devir
XRD	X-ışını kırınımı
Å	Angström
γ	Gama
ρ	Yoğunluk (gr/cm^3)
ε	Birim Şekil Deşiğimi
σ	Gerilme

1.GİRİŞ

İyonlaştırıcı radyasyonun nükleer enerji santralleri, reaktör tasarımı, nükleer mühendislik ve uzay teknolojisi uygulamaları gibi çeşitli alanların yanı sıra tıbbi fizik, radyasyon tedavisi ve görüntülemede artan bir kullanımı vardır (Kurudirek, 2017). X ve gama fotonları için radyasyon kalkanları tasarlarken, kütle zayıflama katsayıları (μ/ρ), etkin atom numaraları (Z_{eff}), etkin elektron yoğunlukları (N_E), ortalama serbest yol (MFP), etkin iletkenlikler (σ) gibi çeşitli parametreler), yarı değer katmanı (HVL), onuncu değer katmanı (TVL) ve çeyrek değer katmanı (QVL), radyasyon koruma özelliklerini tahmin etmek için hesaplanır (Akman ve ark., 2019).

Geçtiğimiz yüzyılda, radyasyon fiziği anlayışı hem nükleer silahların hem de nükleer reaktörlerin çok daha belirgin hale geldiği bir noktaya kadar çok hızlı bir şekilde genişledi. Nükleer teknolojinin gelişimi, bu cihazların ve reaktörlerin kullanımından kaynaklanan iyonlaştırıcı radyasyona karşı yetersiz koruma önlemlerinden kaynaklanan riskleri de beraberinde getirmiştir (Sayyed ve ark., 2019).

Camlar görünür ışığa karşı şeffaftır ve hem nötronları hem de gama radyasyonunu emen işlevlere sahiptir (Kavaz ve ark., 2019). İmalat kolaylığı, iyi homojenlik camların avantajları arasındadır ve cam formülüne oksit eklenerek radyasyondan korunma özellikleri iyileştirilebilir ve geliştirilebilir (Chanthima ve ark., 2012).

Günümüzde, optik duyarlılıkları, yüksek kırılma indeksleri, yüksek kızılötesi şeffaflıkları, gama ışınları için mükemmel radyasyon koruması ve yoğunlukları nedeniyle ağır metal oksit camların yapısının ve fiziksel özelliklerinin sentezine ve karakterizasyonuna artan bir ilgi vardır (Yasaka ve ark., 2014a).

Cam matrisine kurşun gibi ağır metal oksitlerin eklenmesi, ağır metallerin üstün radyasyon koruma özelliklerini camların mükemmel özellikleriyle birleştirir (Kaundal ve ark., 2010). PbO, camların erime sıcaklığını düşürmek için yaygın olarak kullanılır, ancak toksik olduğu için kullanımı sakıncalıdır (Yasaka ve ark., 2014) .

Aşağıda Tungsten oksit içeren camların mekanik özellikleri ve radyasyon kalkanlama özelliklerini ile ilgili literatürde yapılmış bazı çalışmaların özetleri verilmiştir.

Shi ve ark. (2023) farklı WO_3 ve B_2O_3 içeriklerinin fosfat camın yapısı ve termal mekanik korozyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hazırlamış oldukları cam kompozisyonu $20P_2O_5$-$50SnF_2$-(30-x-y)SnO-xWO_3-yB_2O_3 (x = 0 y = 0, 5, 10, 15; x = 0, 5, 10, 15 y = 0; x = 10, 5 y = 5, 10 mol %) şeklinde olup XRD, FTIR, Raman gibi spektroskopik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. XRD sonuçlarında cam numunelerdeki amorf yapıyı FT-IR ve Raman sonuçlarında bileşikler arasındaki bağlar hakkında bilgi edinilmiştir. Yoğunluk değeri bi noktaya kadar yükselmiş sonra düşüşe geçmiştir. Sertlik değerinde ise WO_3 oranın artması ile artış göstermiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda düşük sıcaklıkta sızdırmazlık alanında kullanım için bir miktar potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Milanova ve ark. (2023) 50ZnO-40B_2O_3-10WO_3-Eu_2O_3 $0<x<10$ mol % bileşimi camların yapısı ve lüminesans özellikleri kızılötesi, Raman ve fotolüminesans spektroskopik teknikleri kullanılarak incelenmiş ayrıca camların yoğunluk molar hacim ve oksijen paketleme yoğunluğu gibi fiziksel özelliklerini de incelemişlerdir. Elde etmiş oldukları sonuçlarda Raman ve kızıl ötesi spektrumların analizi, dört köprülü ve iki köprülü bileşimlerin olduğunu gösterdi. Emisyon bantlarının yoğunluklarının mol olarak % 5'e kadar Eu_2O_3 konsantrasyonundaki artışla arttığı bulunmuştur.WO_3'ün eklenmesi borat camının yüksek nadir toprak katkılara konsantrasyonlarında faz ayrılmasını bastırır ve Eu^{3+} lüminesans emisyonunu iyileştirir.

Aktaş ve ark. (2022) (100-x) [79.5SiO_2–13B_2O_3–5Na_2O–2.5Al_2O_3] cam sistemine değişen miktarlarda (x= 0,0.5,1,3 ve 5 mol %) içeren xEr2O3 içeren borosilikat camlar (BS) eriterek söndürme yöntemiyle üretmişler ve yapısal, lüminesans ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Cam ağ yapısında artan köprü oksijen sayısı nedeniyle Er_2O_3 ilavesi ile BS camlarının yoğunluğu, hacmi, elastikliği ve kayma

modülü iyileştirilmiştir. Ayrıca Er_2O_3, BS camının ağ yapısında depolimerizasyona neden olduğundan, Er_2O_3 ilavesiyle BS camlarının sertliği ve kırılma tokluğu artmıştır. Sonuçlar, Er_2O_3 katkılı BS camlarının BS camından daha yüksek mekanik ve optik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bu camlar radyasyon kalkanı ve fotonik alanı gibi birçok uygulamada kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Fidan ve ark. (2022) kimyasal formülü $34TeO_2$-$xBaO$-$35B_2O_3$-$(30-x)PbO$-$1V_2O_5$ (x=0, 5, 10, 15, 20, 30 mol%) olan camları imal etmişler ve camların gama, nötron, proton ve alfa koruma özellikleri nükleer güvenlik uygulamaları için değerlendirmişlerdir. Analiz sonuçlarında amorf yapı gözlemlenmiştir. FTIR spektrumları, örneklerdeki yapısal ağların TeO_4, TeO_3, BO_3 ve BO_4 gibi yapısal birimleri içerdiğini doğruladı. BO_3 ve BO_4 yapısal gruplarının FTIR ile tespiti, bu yapıların camlarda ağ oluşturabileceğini gösterdi. Bu bulgular, TeBaBPbV1 camının gama, nötron, proton ve alfa korumada kullanım için umut verici bir seçenek olduğunu düşündürmektedir. Albedo parametrelerine göre BaO, incelenen camlar arasında en yansıtıcı bileşik olmuştur.

Aktaş ve ark. (2022) kimyasal formülü $(79.5-x)SiO_2$-$2.5Al_2O_3$-$5Na_2O$-$13B_2O_3$-$xTeO_2$ (x = 2,4,6,8,10,15 ve 20 mol %) olan borosilikat camları üretmişler ve radyasyon zırhlama, yapısal ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. XRD analizi sonucunda amorf yapı gözlemlenmiştir. UV-vis spektrumundaki enerji geçişlerinin sayısı TeO_2 konsantrasyonuna bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca üretilen camların fiziksel ve mekanik özellikleri bağ kuvveti, dolgu yoğunluğu, köprülü oksijen sayıları ve molar oksijen hacmi hesaplanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca camların gama ışını koruma parametreleri, yüksek çözünürlüklü U-LEGe detektör kullanılarak 53.16-661.62 keV aralığındaki foton enerjilerinde ölçülmüştür. Elde edilen değerler XCOM verileri ile karşılaştırılmış ve MCNP5 ile XCOM arasında çok iyi bir uyum sağlandığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlar, mol olarak %0,2 TeO_2 içeren numunenin, diğer numuneler arasında en iyi foton zayıflatma yeteneği olduğunu göstermiştir.

Agti ve ark. (2022) $60Sb_2O_3$-(40-x)$NaPO_3$-xWO_3 (0<x<40 mol.%) bileşimindeki camları eriyik söndürme yöntemi kullanarak hazırlamışlardır. $NaPO_3$'ün WO_3 ile değiştirilmesinin etkilerini açıklamak için farklı fiziksel özelliklerini ölçmüşlerdir. Artan WO_3 oranı ile camsı geçiş sıcaklığında artış görülmüş aynı zamanda bu tür bir artış ile sertlik, yoğunluk, elastik modül, kayma modülü ve Young modülü içinde gözlemlemişlerdir. WO_3 eklenmesi optik bant aralığını azaltır ve kırılma indiğini arttırır. Bunlara ek olarak Abbe sayısı 65-30 aralığına düşer. Bu farklı sonuçların ardından, incelenen camların optik cihazlar için potansiyel adaylar olduğunu kanıtlamışlardır.

Linganna ve ark. (2022) kimyasal formülü (100-y-x) TeO_2-yLa_2O_3-xWO_3 (y = 5-10 mol %, x = 10-25 mol%) olan cam kompozisyonu eriyik söndürme yöntemi ile üretmişlerdir. WO_3 ve La_2O_3'ün camların fiziksel, optik ve manyeto-optik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. WO_3'ün eklenmesi, cam oluşturma kabiliyetini, atomlar arasındaki kovalent bağ kuvvetini ve termal ve mekanik özelliklerdeki değişikliklere yansıyan ağ bağlantısını arttırdı. Sonuçlar, düşük La_2O_3 içeriğine sahip cam sisteminin, 1550 nm'de çalışan MO cihazlarında uygulama için MO malzemesi olabileceğini göstermektedir .

Ali ve ark. (2022) kimyasal formülü xWO_3–(30–x)Bi_2O_3–15Li_2O–15CaO–40 B_2O_3 (0<x<10) cam sistemini eriterek söndürme yöntemi ile üretmişler ve fiziksel, optik özellikler ve foton zayıflama yetkinliğini incelemişlerdir. XRD sonuçlarında amorf yapı görülmüş, artan WO_3 içeriği ile molar hacim ve yoğunlukta azalma görülmüştür. Oksijen paketleme yoğunluğu, kütle ve doğrusal zayıflama katsayıları ve etkin atom numarası artan WO_3 içeriği ile artış göstermiştir. Elde edilen veriler sonucunda üretilen camların optik ve gama radyasyon koruma uygulamalarının çeşitli alanlarında uygulanabileceği sonucuna varmışlardır .

Zenganeh (2022), kimyasal bileşimi (100-x) [0.1B_2O_3-0.4 P_2O_5-0.5PbO]-xWO_3 olan x = %10-60 mol WO_3 oranda ekleyerek camlar üretmiş ve WO_3'ün mekanik, yapısal, optik ve radyasyon kalkanı etkisini incelemiştir. Sonuç olarak yaptıkları

birtakım testlerle mekanik, yapısal, optik ve radyasyon kalkanı özellikleri olumlu yönde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Alzahrani ve ark. (2022) kimyasal bileşimi $75TeO_2$- $5Na_2O_2$- (20-x) BaO – xWO_3; olan x= %0, 3, 10 mol WO_3 oranda ekleyerek eriyik söndürme yöntemi ile üretmişler ve cam sisteminin optik ve radyasyon kalkanlama özellikleri incelemişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda yoğunluk ve WO_3 içeriği arttıkça optik ve radyasyon kalkanlama özelliklerinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Ravangvong ve ark. (2022) kimyasal bilemişimi (70-x) TeO_2-$30B_2O_3$-xWO_3 olan x = %10, 20, 30, 40 ve 50 mol WO_3 ekleyerek camlar üretmişler ve ürettikleri bu camların Foton, proton ve alfa parçacıkları kalkanlama özelliklerini incelemişlerdir. Elde etmiş olduğu sonuçlar $20TeO_2$-$30B_2O_3$-$50WO_3$ cam numunesinin kütle zayıflama katsayısı, etkin atom numarası ve etkin atom yoğunluğu değerlerinin en yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlar bu cam örneğinin radyasyondan koruyucu malzeme olarak kullanılabilirliğini ispatlamıştır.

Cheewasukhanont ve ark. (2022) kimyasal bileşimi xWO_3: (70-x) Gd_2O_3: $30B_2O_3$ olan x = %40, 45, 50, 55 ve 60 mol WO_3 ekleyerek eriyik söndürme yöntemi ile cam numuneleri üretmişlerdir. Sonuçlar daha yüksek WO_3 içerikleri ile yoğunluğun azaldığını gösterdi çünkü Gd_2O_3, daha düşük moleküler ağırlığa sahip olan WO_3 eklenerek değiştirildi. Bulmuş oldukları sonuçta, kütle zayıflama katsayılarının artan WO_3 içeriği ile biraz arttığını ve gama ışını enerjilerindeki artışla azaldığını bulmuşlardır. Bu nedenle, bu araştırmada WGB cam numunelerinin geliştirilmesi, Pb içermeyen çevre dostu olma ve daha yüksek optik özellikler gibi alternatif malzemeler olabilen daha yüksek koruma potansiyellerini göstermiştir.

Kozlovskiy ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada kimyasal formülü $0.5TeO_2$-(0.5-x)WO_3-xBi_2O_3 ($0<x<0.25$) tellür camlarının yapısındaki Bi_2O_3 konsantrasyonundaki değişikliklerin optik, radyasyon kalkanı ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisini

incelemişlerdir. Artan Bi_2O_3 içeriği ile camın dış etkilere karşı direncinde artış olduğunu görülmüştür. Optik özelliklerin analizi, Bi_2O_3'ün cam bileşimine eklenmesinin, görünür ışık bölgesindeki iletimde hafif bir azalmaya ve ayrıca bant aralığında bir artış olmuştur. Elde edilen sonuçlar ayrıca endüstriyel ölçekte koruyucu camlar oluşturmak için kullanılabilir. Ayrıca, Bi_2O_3 tellür camlarının doping etkisinin sonuçları, radyasyon kalkanı malzemeleri oluşturmanın temel teorisine önemli bir katkı sağlayabilir.

Stalin ve ark. (2021) kimyasal bileşimi $20Li_2O$-(20-x) Bi_2O_3-xWO_3-60B_2O_3 x=% 0, 1, 2, 3, 4 ve 5 mol WO_3 ekleyerek su verme yöntemi ile lityum bizmut boro-tungstat camı üretmişlerdir ve optik, mekanik, kimyasal dayanıklılık ve gama ışını koruma özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucunda yüksek enerjili nükleer radyasyon maruziyetinde ve radyasyon kalkanı uygulamaları için birçok yerde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Boukhris ve ark. (2021) kimyasal bileşimi (80-x) TeO_2-20PbO-xWO_3 x=%0, 5, 10, 15 ve 20 mol WO_3 ekleyerek camlar üretmişler ve ürettikleri bu camların gama ve beta radyasyonlarına karşı radyasyon koruyucu özelliklerini incelemişlerdir. Buldukları sonuçlar WO_3 ilavesinin yoğunluk üzerinde ve sonuç olarak camın gama ve beta radyasyonlarına karşı koruma kabiliyetinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca düşük konsantrasyonlarda WO_3 içeriğine sahip camlar, ticari camlar ve betonlarla aynı gama kalkanlama özelliklerini göstermiştir.

Al-Hadeethi ve ark. (2021) kimyasal bileşimi xWO_3–(20-x) ZnO-20PbO–60B_2O_3 x=%0, 2, 4, 6, 8, 10 mol oranda WO_3 ekleyerek ürettikleri cam numunelerin radyasyon zırhlama kabiliyetini incelemişlerdir.WO_3 oranı ve cam kalınlığı arttıkça radyasyondan koruma oranının arttığı gözlemlenmiştir.

Mahmoud ve ark. (2021) kimyasal bileşimi (60-x) Bi_2O_3–20B_2O_3–10SiO_2–10CaO-xWO_3 x = % 0, 2.5, 5, 10 mol oranda WO_3 ekleyerek eriterek söndürme yöntemi ile ürettikleri cam numunelerinin foton koruma ve yapısal özelliklerini

incelemişlerdir. Cam kompozisyonunda artan WO_3 içeriği ile elastik parametreler ve radyasyondan korunma özelliklerini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Malge ve ark. (2020) kimyasal formülü $(B_2O_3)0.2–(TeO_2)0.3\text{-}x–(ZnO)0.28–(Li_2CO_3)0.2–(Dy_2O_3)0.02–(WO_3)x$ $(0.02<x<0.12)$ olan camlar imal etmişlerdir ve numunelerin XRD, molar hacim, oksijen paketlenme yoğunluğunu incelemişlerdir. Araştırmalar sonucunda camların yoğunluğu, molar hacmi, oksijen paketleme yoğunluğu, alan kuvveti, WO3 içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. İlk kez, WO_3'ün çinko-lityum disprosyum-borotellürit camlarının optik özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir .

Buriahi ve ark. (2020) kimyasal bileşimi $(100–2x)\ TeO_2+xAg_2O + xWO_3$ x = %7.5-15-22.5-30 oranda ekleyerek ürettikleri cam numunelerin mekanik ve radyasyon kalkanlama özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlarda cam sistemine WO_3 ve Ag_2O ilavesi mekanik özellikler üzerinde önemsiz bir etkisi olduğunu fakat WO_3 ve Ag_2O içeriğinin artması gama, elektron, ağır yüklü x partiküller ve nötron radyasyonlarına karşı koruma performansını artırdığını sonucu bulmuşlardır.

Issa ve ark. (2020) kimyasal bileşimi $xWO_3–70TeO_2–(30–x)\ B_2O_3$ x= %0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranında ekleyerek eriterek söndürme yöntemi ile yedi farklı tungsten boro-tellürit cam numuneleri üretmişlerdir ve bu numunelerin elastik ve radyasyon kalkanlama özellikleri incelenmiştir. Cam kompozisyonundaki WO_3 oranındaki artış ile radyasyon kalkanlama özelliği artış göstermiştir.

Laariedh ve ark. (2019) kimyasal formülü $(50–x)PbO–10WO_3–10Na_2O–10\ MgO –(20+x)\ B_2O_3$(x = 0, 5, 10, 15 ve 20 mol %) olan camları eriterek söndürme yöntemi ile üretmişler ve yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda XRD analizleri sonucunda amorf yapıyı elde etmişlerdir. Yoğunluk ve moleküler ağırlıkta düşüş görülmüştür. FTIR, Uv-Vis analizleri optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda kurşun oranı en yüksek cam

kompozisyonu en iyi radyasyon kalkanlama özelliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Lordanova ve ark. (2018) kimyasal formülü (100 −(x −y)) ($0.6B_2O_3$-$0.4Bi_2O_3$)-xLa_2O_3-yWO_3 (x= 0, 10 y= 0-40 mol %) camları eriterek söndürme yöntemi ile üretmişler ve yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. XRD analizi sonucunda cam örneklerinde amorf yapı gözlemlenmiştir. Spektral sonuçlar, La_2O_3'ün borat konfigürasyonlarını koruduğunu göstermektedir. La_2O_3'ün varlığı, çeşitli yapısal birimler arasında daha iyi bağlantı sağlayarak, bizmut-borat ağına WO_3'ün dahil edilmesini kolaylaştırır .

Khanna ve ark. (2018) kimyasal formülü xWO_3-(100-x)TeO_2 olan (x= 15, 20 ve 25 mol %) olan camları üretmişler ve XRD, X-ışını Absorpsiyon Yakın Kenar spektroskopisi (XANES) ve nötron kırınımı (ND) analizleri yapılmıştır. XRD analizleri sonucunda amorf yapı gözlemlenmiştir. Te-O ve W-O bağ uzunlukları, koordinasyon sayıları ve bağ açısı dağılımları RMC simülasyonları ile belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda WO_3 içeriği olumlu yönde fayda göstermiştir.

Literatürde farklı kompozisyonlarda boro tellürit camlar ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı; yüksek kütle soğurma katsayısına sahip, elastik ve mekanik özellikleri yüksek radyasyon zırhlamaya yönelik şeffaf camlar üretmektir. Bu amaç için B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 kompozisyonu seçilmiş ve katkı elemanı olarak da yüksek atom numaralı ve kütlesine sahip WO_3 belirlenmiştir. Bu çalışmada; B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camlara farklı oranlarda WO_3 ilaveli ederek yeni camlar sentezlenmiş ve sentezlenen camların radyasyon zırhlama parametreleri, nötron etkileşim parametreleri, elastik ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

2.KURAMSAL TEMELLER

2.1.Camlar

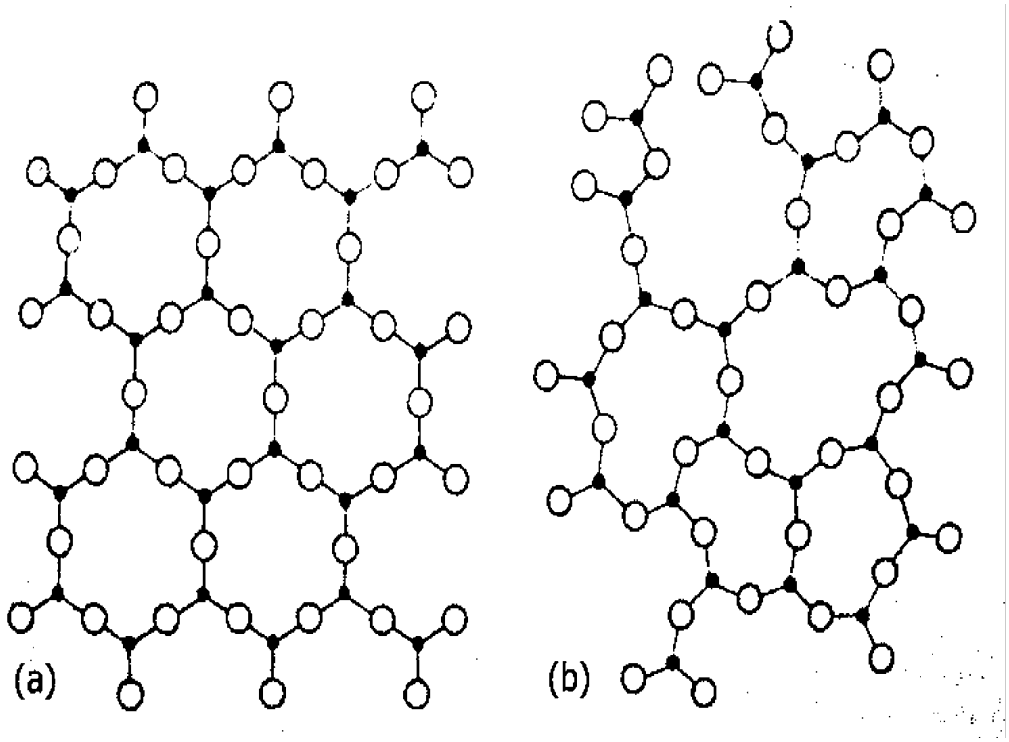
Cam, direk olarak tanımlanması kolay olmayan bir malzemedir ve camın tanımı gelişen teknoloji ile geçmişten şu anki tarihe kadar sürekli olarak değişim göstermiştir. G.O. Jones için cam, sıvı halde iken soğutulma işlemi yapılarak şekil verme işlemi yapılan ve herhangi bir sıcaklık değerinde kesintili değişim göstermeyen fakat viskozite değerinin artması ile rijitliğinde artış olan bir malzemedir (Methuen, 1956).

ASTM'ye göre cam, kristalleşme olmadan rijit koşullara soğutulma işlemi yapılan bir organik olmayan ergimiş malzemedir. Camların en güzel açıklaması amorf yapısı olan malzemelerdir (Doremus, 1994).

Cam, saydam ya da yarı oranda saydam, genel olarak sert, kırılmaya yatkın ve sıvıları muhafaza etmeye olanak sağlayan, organik olmayan amorf yapıya sahip katı halde olan malzemedir. Eski çağlardan itibaren inşaat malzemesi, süs eşyası gibi malzemeler camlar kullanılmıştır. Günümüzde halen çoğu eşyadan iletişime ve uzay teknolojileri dahil olmak üzere birçok alanda kullanıma sahiptir.

Cam hızlı olarak soğutma işlemi yapılmış alkali ve toprak alkali metal oksitleri ile, diğer bazı metal oksitler ile çözülmesi ile oluşan akışkan yapıya sahip malzeme olup, ana maddesi silisyum oksittir (SiO_2). Amorf yapısını koruyan cam katılaşma gösterir. Üretim işlemi esnasında çabuk soğumadan kaynaklı olarak amorf yapı oluşur. Bu amorf yapı cama dayanıklılık ve saydamlık gibi katkı sağlar. Katı malzemelerde görülmekte olan kristallenme özelliğini göstermediği için çoğu zaman sıvı malzeme olarak tanımlanır. Bu tanımlama camın amorf yapısından kaynaklıdır. Amorf yapı molekülerin düzensiz olması durumudur. Örnek olarak silikada bulunmakta olan silikon atomları birbirilerine olan ortalama mesafeleri ortalama 3.6 Angströmdür, silikat yapının içinde 10 Å'dan daha uzun mesafede herhangi moleküler düzen görülmemiştir. (Doremus,1994).

Yukarıda bahsedilmiş olan cam tanımının zorluğu gelişen teknoloji ile beraber camların sadece sıvı eriyiğin soğutulma işlemi ile değil, çok farklı yöntemler yardımı ile üretilmesidir. Örnek olarak buhar veya sıvı çözelti çöktürme yapılarak cam kaplama veya kimyasal yöntemler yardımı ile cam imalatı yapılabilir. Bu durumdan anlaşıldığı gibi malzemelerin moleküler yapısı benzer ise hangi yöntem ile üretilmesinin bir farkı yoktur. Bu neden ile camlar için en kapsamlı tanım şu şekilde olabilir. Bütün camların esas olarak iki özelliği amorf yapıları olmaları ve camsı bir dönüşüm göstermesidir. Herhangi bir malzeme camsı dönüşüm özelliği gösteriyor ise bu malzemeler camdır. Şekil 2.1.'de kristal ve amorf yapıya sahip olan SiO_2'in yapısı gösterilmektedir. (Shelby, 2005)



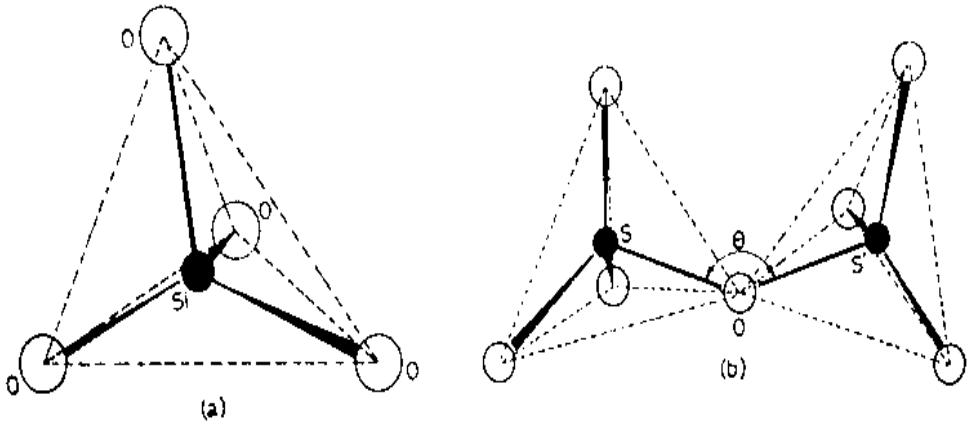
O: Oksijen Atomu •: Silikon Atomu

Şekil 2.1. (a) kristal yapılı SiO_2 ve (b) amorf yapılı SiO_2.

2.2. Camların Yapısı

İlk insanların kullanmış oldukları cam doğal ortamda bulunmakta olan camdır. Natürel cam olarak bilinen obsidyen camının keskin olan kenarı bıçak, ok başları ve farklı kesici aletler için uygun bir malzeme olmuştur. Doğal yollarla oluşmuş olan bu camların ortak noktası silikat içermeleridir. 1900'lü tarihlerden itibaren ise farklı içerisinde silikat olmayan cam çeşitleri imal edilmiştir. Günümüzde ise metal ve polimer malzemeler camlaşma özelliğini gösterebilmektedir.

Cam malzeme için kolay ve kılavuz teoriyi Goldschimidt öne sürmüştür. Bu teoriye göre genel formülü R_nO_m olan ve katyon iyonik yarıçapın oksijen iyonun yarıçapa oranı ve bu oranın 0.21-0,41 arasındaki bileşik çeşitleri cam oluşumu gösterebilir. Goldschimidt'e göre silikatın yapısında bulunan silikon iyonlarının çevresinde bulunan oksijen iyonlarının tetrahedral düzeni camın oluşumundaki etkendir (Şekil 2.2.) (Shelby, 2005).



Şekil 2.2. SiO_4 düzgün dörtyüzlüleri (a) köşelerinden birbirine bağlanarak (b) camın ağ yapısını oluştururlar

Zachariasen, Goldschmidt'in teorisini daha da ileri götürerek camların sıkı paket kristal yapılı olmadığı, tekrarsız bir ağsı yapıya sahip olduğu diğer anlam olarak amorf yapısı olduğunu göstermiştir. Bu ağlar üç boyutlu ve düzgün dört yüzlülerin

köşelerinden birleşerek bu şekilde bir yapı oluşturduklarını farketti. Bu kaynaklı olarak camlar izotropik özellik göstermektedirler. (Doremus, 1994).

Zachariasen, üç boyutu olan tekrar etmeyen ağ oluşturan ve kristal ağla karşılaştırılma yapıldığı zaman enerjiye sahip olan bir maddenin cam oluşturabileceği sonucuna ulaşmıştır. Böylelikle dört kural belirlemiş oldu. (Doremus, 1994):

1. Bir O atomu ikiden çok cam yapıcı atom ile bağlanması uygun değildir.
2. Katyon atomlarının koordinasyon sayıları düşük olması uygundur.
3. Oksijen çok yüzlüleri köşelerini paylaşmalıdır.
4. Çok yüzlüler üç boyutu olan bir ağa bağlanmalıdır.

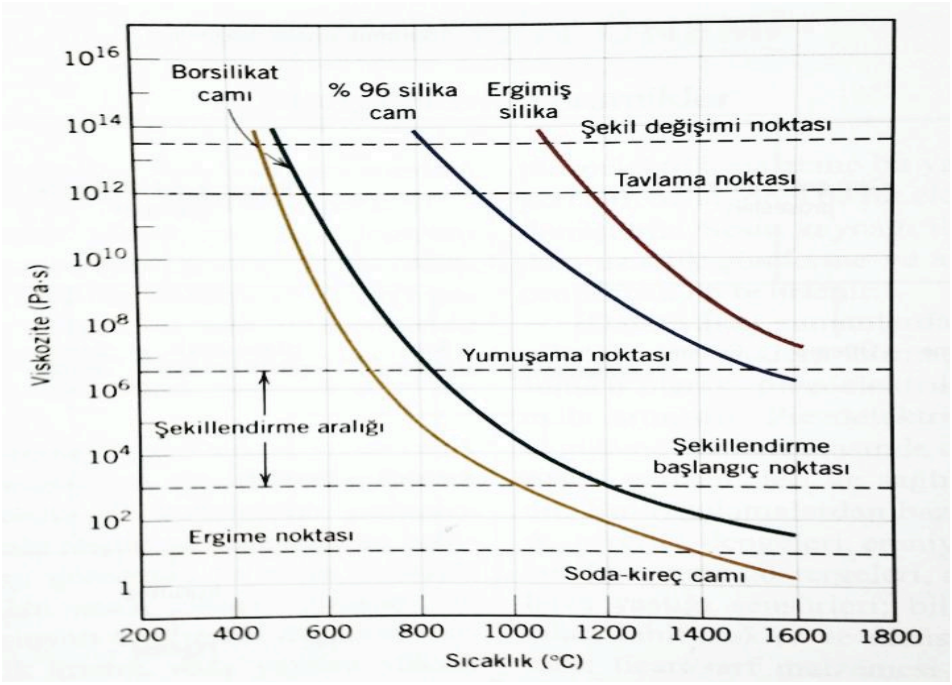
Camların bağ dayanımı cam oluşturmadaki kriterleri kolay olmasını sağlar. Sun'a göre camlardaki kuvvetli olan bağ yapısı, cam eriyik soğuma sırasında kristal bir yapı oluşmasını önler ve bundan dolayı camsı bir yapı meydana gelir. Bağ gücü, bir oksitin gaz durumunda olan bileşik atomlarını koparmak için gerekli olan enerjidir.

Rawson'a göre bağ imhası için alçak erime sıcaklıkları düşük miktarda enerji gerekli iken, yüksek erime sıcaklıkları ve yüksek miktarda enerji gerekir ve bunlar neticesinde ise bağ yapısı aynı olan malzemelerden ergime sıcaklığı düşük olan malzemenin daha iyi bir camlaştırıcı olma ihtimalini öngörmüştür (Shelby, 2005).

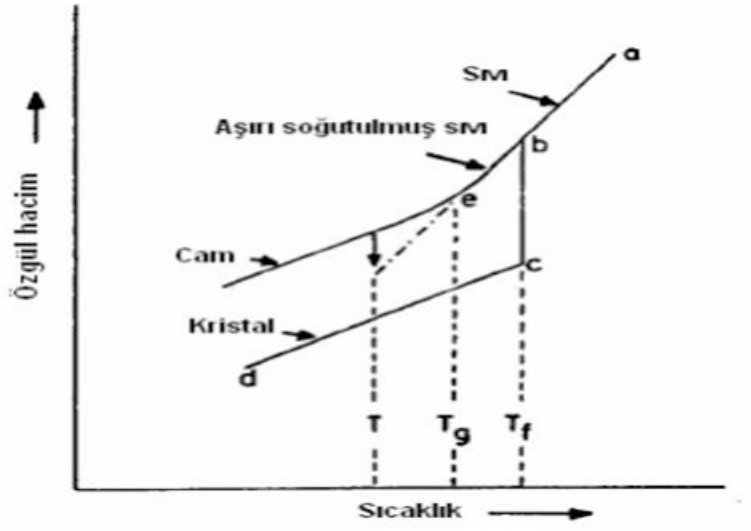
Sun, yapmış olduğu çalışmalarda bir oksidin camlaşma eğilimi göstermesi direk olarak oksidin oksijen atomları ile metal atomları arasında olan bağ kuvveti ile bir bağlantısı olduğunu göstermiştir. Camlaştırıcılar ortalama 82 kcal/mol bağ dayanımına sahip ve oksit ağı ile bağlantıya sahip olmayan iyonlar belirtilen değerin altında oksijen-metal bağına sahiptir. Bundan dolayı camlar için gereken füzyon ısısı benzer kimyasal yapıya sahip olan malzemelerden daha alçaktır (Doremus, 1994).

2.3. Camın Ergitilme işlemi

Camlar, birçok üretim yöntemi ile imal edilmektedir. Ergitme yöntemi ise çok yaygın olarak halen kullanılmaktadır. Ergitme işlemi sırasında camın viskozitesi çok alçak değerlere gelmektedir. Sonuç olarak cam akışkan bir hale gelir. Eritme işlemi olurken ham maddeler fazla sayıda fiziksel ve kimyasal değişime uğrarlar. Ergitme işleminden sonra ısı kaybederek cam oluşumu gösteren maddelerin cam dönüşümü Şekil 2.3.'de verilmiştir (Callister, 2011). Eriyiği gözeneklerden, ergimemiş olan ham maddelerden, hava boşluklarından kurtarmak ve homojen yapıyı bir yapı oluşturmak için olarak ısıl işlem uygulamak gerekli olabilir.



Şekil 2.3. Silika camlarının viskozite-sıcaklık grafiği



Şekil 2.4. Camın katı-sıvı hal değişimi

Cam, cam oluşturacak ham maddeler ve yardımcı malzemeler yardımı ile meydana gelen bir bileşendir. Camlaştırıcılar, erimeyi kolaylaştırıcılar, özellik geliştiriciler, renklendiriciler ve iyileştiriciler bunlardan en az iki veya daha fazlası cam imal etmek için şarttır. Ergitme işlemi olacak her cam bileşeninin öz malzemesi camlaştırıcı malzemelerdir. Ticari camlarda genel olarak camlaştırıcı madde silika (SiO_2) dır. Silika (SiO_2) yalnız başına bir camlaştırıcı bir malzeme olmasına karşın yüksek erime sıcaklığından dolayı (>1705 ºC) eriticiler ekleme yapılarak erime sıcaklığı 1600 ºC'nin altındaki sıcaklığa düşürülür ve böylece üretim yapılacak duruma gelir. Ancak eriticiler özellikle de Na_2O_3 (soda) camın kimyasal ve fiziksel özellikleri üzerine olumlu olmayan bir etki yapar. Bundan dolayı Al_2O_3 gibi özellik geliştiriciler ilave edilerek bu olumlu olmayan etkiler ortadan kaldırılmaya çalışılır.

Renklendirici malzemeler, camın son rengini kontrol etmede yardım sağlar. Renklendiriciler cama renk verilmek istendiği zaman az oranda kullanılır. İyileştiriciler, cam ergitme işlemi esnasında ergimiş malzemede oluşabilecek hava boşluklarının ergimiş malzemeden uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Arsenik ve antimon oksit gibi bileşikler kimyasal olarak camda bulunan oksijen ile tepkimeye girerek hava kabarcıklarının oluşmasını engellemeye yardımcı olur.

Camları ergitmek için yüksek sıcaklık değerlerine çabuk bir şekilde çıkmak ilk olarak toz parçacıkları arasında bulunan sıkışmış hava boşluklarının camdan çıkışını engeller. Bundan dolayı, hızlı bir şekilde ısıtma işlemi içinde bulunan kabarcıkların büyümesine ve camda gözenek oluşumuna sebep olur. Bu problemin olmaması için numunelerin erime sıcaklığına çıkma işlemi yavaş bir hız ile olmalıdır (Shelby, 2005).

2.3.1. Ergitmeyi hızlandırma yöntemleri

Erime işleminin zamanını düşürmek için farklı yöntemler uygulanabilir. En fazla tercih edilen çözüm ham maddeler yardımı ile erime zamanını düşürmektir. Silikat miktarı çoğaldığı zaman sülfat silikat oranının yüksek olduğu bölgeden ayrılır. Sıcaklık yükseldikçe bu sülfat ayrışma gösterir ve silikat partikülleri ile tepkime meydana gelir ve sodyum meta silikat meydana gelir. Böylece ergimiş malzeme basit bir şekilde sıvı faza geçer. Sülfatın ayrışması kuvvetli bir karıştırma sağlar ve bu şekilde homojenleşmesine yardımcı olur. Diğer ergitmeyi hızlandırıcılar sodyum karbonat, sodyum hidroksit, sodyum klorür gibi bileşikler de erimeyi hızlandırır. Oksijen atmosferinde yapılan erime işlemi, oksijenler hallidler ile yer değişecektir. Bu şekilde istenilen oksit kompozisyonu sağlanmış olacak ve viskozite azalacaktır. H_2O içeren bileşikler viskozite değerini azalttıklarından dolayı erime sıcaklığında azaltıcı etkisi olur. Cam oluşumunda bulunan toz partikül temasını arttıran mekanik yöntemler de camın ergime işlemini kolaylaştırır. (Shelby, 2005).

2.3.2. Eriyiğin homojenleştirilmesi

Cam yığını akışkan hal alırken oldukça heterojendir durumdadır. Bu heterojenlik camda bulunan hava boşluklarının dışarı çıkarken oluşturmuş olduğu karıştırma hareketinden kaynaklı yavaş bir şekilde azalma gösterir. Uygun olan şekilde homojenliği iyi olan cam imal edebilmek için gerekli olan difüzyon işlemleri fazladan zamana ihtiyaç olabilir. Camın homojenliği kullanılacak yere göre değişiklik gösterebilir. Örnek olarak pencere camı ile optik lenslerin homojenlik ölçüsünde farklılık olabilir. Hava boşlukları,

taneler ve çözülmemiş olan malzeme partikülleri camın içinde genel olarak görülebilme ihtimali vardır ve bundan kaynaklı olarak birden fazla ticari cam kabul edilmez.

Striae ve cord camların asıl bileşiminden farklı olan yapılardır. Striae'in iki boyutlu ince tabakaları vardır. Cord ise tek boyutu olan ince çizgileri vardır. Bu birbiri ile aynı olmayan cam kompozisyonları farklı refraktif indekslerinden kaynaklı olarak bir dalga görülürler ve çıplak göz ile de görülebilirler. Renkli camlarda ise renk yoğunluğu olmasından kaynaklı fark edilir. Düşük homojenlik genellikle cam yığınının kötü karıştırma işleminden dolayı meydana gelir. Karıştırma işlemi genel olarak laboratuvar ortamındaki ergiyikler için daha önemlidir. Çünkü bu karışımlarda genel olarak karıştırılma işlemi olmaz ve erime sıcaklığında ticari karışımlardan daha düşük sürede bekler. Tane boyutunu küçültme işlemi homojenlikte artış sağlar. Mekanik karıştırıcı yardımı ile karıştırma işlemi yapmak, ergiyikte konveksiyon akımı oluşturulması ve hava kabarcıklarının ergiyikten uzaklaşması homojenlikte artış sağlar (Shelby, 2005).

2.4. Camı Oluşturan Temel Oksitler

2.4.1. Silisyum dioksit (SiO_2)

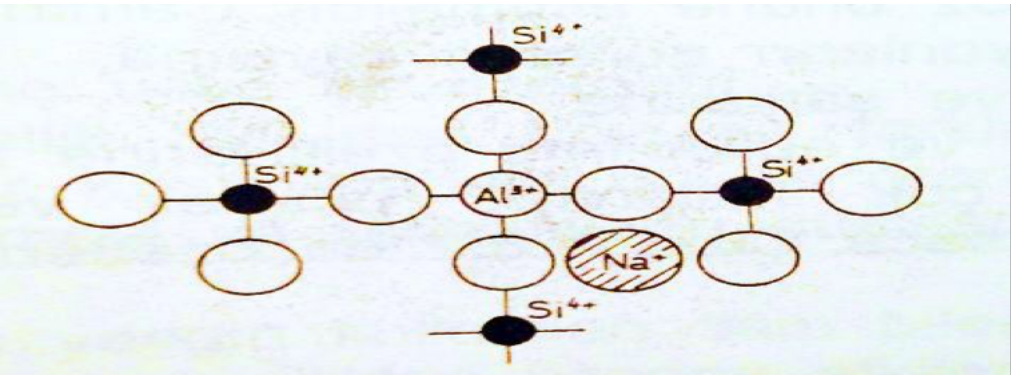
Silisyum dioksit fazla tercih edilen cam oluşturucu oksitlerden biridir. Camlara direnç ve kimyasal dayanıklılık özelliğinde artış sağlar. 1705 ˚C'nin üzerindeki sıcaklıklarda erir. Bu erime derecesinin azaltmak için diğer oksitlerin eklenmesi camın direncinde ve kimyasal dayanıklılığında azalma meydana getirir. Silika yerkabuğunda en fazla bulunan maddelerden bir tanesidir. Kum ve kumtaşı, cam imalatında fazla tercih edilen silisyum oksit kaynaklarındandır ve en önemli cam yapıcı oksitlerden biridir. Cama SiO_2 veren hammaddeler silis kumu, feldspat ve yüksek fırın cüruflarıdır. Burada bahsi geçen son iki madde ayrıca alüminanın ana kaynaklarındandır ve bunlar erime ve/veya afinasyonu kolaylaştıran hammaddeler olarak bilinirler.

Cam üretiminde silisyum dioksit (SiO_2) kullanılmasının nedenleri özetlenecek olursa;

- Camın temel hammaddesidir.
- Erimiş hâlde olan camın akışkanlık miktarını düşürür.
- Camın termik şoka, yani anlık ısı değişimlerine karşı direncinin artmasına yardımcı olur.
- Asitlerin etkisine karşı camın direncinde artış sağlar.
- Viskozite seviyesini artırır. Camın sıcaktan dolayı genleşmesini düşürür.
- Camın çalışma sıcaklık aralığında artış sağlar.
- Camın mekanik mukavemetinin artmasını sağlar.
- Soğumuş olan cama camsı özelliğini kazandırır.

2.4.2. Alüminyum oksit (Al_2O_3)

Alümina birçok camda düşük oranlarda kullanılır. Ergitme sıcaklığını arttırır, camın çalışma aralığında artış sağlar, kimyasal dayanıklılıkta artış, devitrifikasyon olayını engellemeye yardımcı olur. Aracı olan oksit çeşitlerinden biridir. Ticari camların pek çoğunda alüminanın (Al_2O_3) fazla oranlarda bulunmasına gerek yoktur. Cam türleri temel kompozisyonunda bunulan en fazla Al_2O_3 oranı %4 kadardır. Alüminyum oksit camda genel olarak düşük miktarlarda bulunur. %4'ten fazla olduğu durumlar çok nadir bir durumdur. Şekil 2.5'da alüminanın cam ağına bağlanması gösterilmiştir.



Şekil 2.5.Aliminyum oksitin cam ağına bağlanması

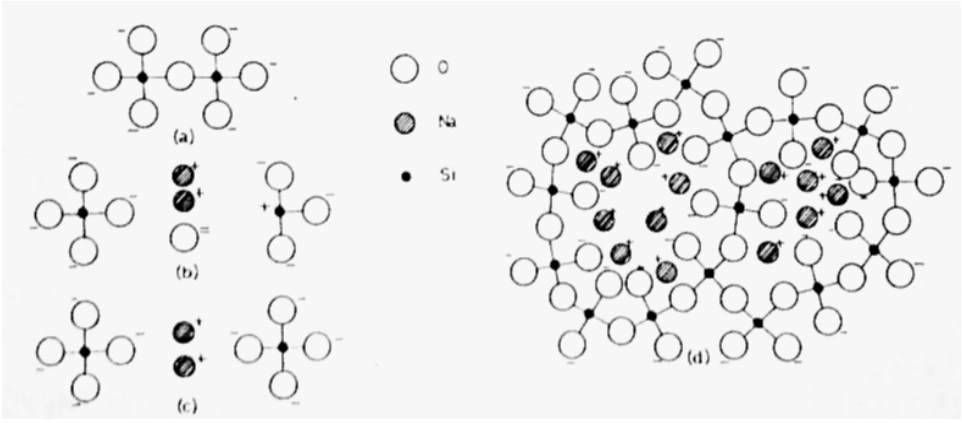
Cam üretiminde alümina kullanımının sebeplerini özetleyecek olursak;

- Kalsiyum oksit veya SiO_2 yerine az miktarlarda kullanıldığında ergimeyi işlemini basitleştirir.
- Kompozisyonda direk olarak kullanılırsa viskozite artışı sağlar.
- Kristallenmeyi engelleyici bir özelliği vardır.
- Isı ve mekanik şoklar ve suyun etkilerine karşı cama mukavemet verir.
- Camın kimyasal direncinde artış sağlar.
- Camın mukavemetinde artış sağlar.
- Camın çalışma aralığında bir artış sağlar.
- Fırın içerisinde iken akışkanlıkta artış sağladığı için afinasyona yardımcı olur.
- Camın refrakter malzemedeki aşındırıcı etkiyi düşürür.

2.4.3. Sodyum oksit (Na_2O)

Erime sıcaklığını azaltmak için en çok tercih edilen tadil edici oksitten biridir. Sahip olduğu akışkanlık edindirme özelliğine "flask oluşturucu" denilir. Bundan dolayı soda (Na_2O) bir "flask" maddesi olarak anılır. Erime sıcaklığını azaltmasının yanı sıra soda, camın kimyasal dayanımını düşürür, ısıl genleşme katsayısında artış sağlar.

Sodyum karbonat (Na_2CO_3) çoğunlukla soda olarak isimlendirilir. Bu ham madde soda-kireç-silis 'den oluşmuş olan camın ana ham maddesinden birisidir. İmal edilen 1000 kilogram başına cam içerisinde en yüksek ücrete sahip hammaddelerden biridir. Camın yapısına katılan sodyum oksitin camdaki yapısı Şekil 2.6'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Camın ağ yapısına katılan sodyum oksitin cam ağına bağlanması

2.4.4. Kalsiyum oksit (CaO)

Tadil edici bir oksittir, erime sıcaklık derecesinde artış sağlar, çalıştığı aralıkta azalma sağlar, kimyasal dayanıklılıkta artış sağlar, suya karşı direnci artırır, camın mukavemetinde artış sağladığı gibi makine yardımı ile şekil vermede pozitif etki yapar. Fakat genel olarak camın camlaşma yatkınlığını arttırır. Cama CaO vermek üzere kullanılan temel ham madde kireç taşıdır ($CaCO_3$). Kireç taşından kalsiyum oksit elde etmesi basit olmayan ve maaliyeti yüksek bir işlem olmasından dolayı pek kullanılmaz. Kalsiyum oksit temin etmek için genellikle mermer tercih edilir. Dolomit kalsiyum oksidinin yanı sıra MgO elde etmek için de kullanımı tercih edilir.

2.4.5. Potasyum oksit (K_2O)

Sodaya benzer şekilde tadil edici bir oksittir, soda gibi etkili değildir fakat flaks oluşturmak için kullanılan bir oksit çeşididir, camın viskozitesinde artış sağlar ve genel olarak kristal camın imalatında tercih edilir. Potasyum iyonunun çapı, sodyum iyon çapına göre yüksek olduğu için cam içerisinde olan hareketlilikte azalma olur. Bundan kaynaklı potasyum içeren camlarda çalışma aralığında artış olur fakat elektrik iletkenliği azalır. Sodyum oksit yerine sadece potasyum oksit tercih edildiği zaman camın ergitilme işlemi zorlaşır. En güzel sonuç sodyum oksit ve potasyum oksitin birlikte kullanıldığı durumlarda görülmüştür.

2.4.6. Magnezyum oksit (MgO)

Magnezyum oksit (MgO) ergime noktası yaklaşık 2750-2800 ºC olan bir oksit türüdür. Asit içerisinde tamamen çözünürken suda kısmen çözünür. MgO'nun cama etkisi CaO gibiyken devitrifikasyon yatkınlığı yoktur. Ancak camın viskozitesini artırırarak çabuk katılaşmasını sağlar. Camın kristallenme yatkınlığından ötürü bileşim içerisine belli miktarda MgO eklenir. MgO camın sıvılaşma sıcaklığını düşürür ancak kristal büyüme hızını önemli ölçüde azaltır. Buna ek olarak atmosferik etkilere karşı göstermiş olduğu direnci kayda değer oranda artırır. Şişelerin imalatında hızlı katılaşma özelliğine sahip MgO'li cam tercih edilir. MgO, ürünlere parlaklık verir ve harmanının ergime sıcaklığında azalma sağlar.

2.4.7. Baryum oksit (BaO)

BaO camın kırılma indisini ve yoğunluğunu artırıcı özelliğe sahiptir. Bu özellikler sebebiyle kurşun oksite benzemektedir. Alkalilerin haricinde, kurşun oksit dışında akışkanlaştırıcı özelliğe sahip olan ucuz ve tek olan bazik asittir. Genleşme kat sayısı yönünden kurşun oksitle yakın, elektriğin iletimi konusunda da benzerdir. BaO camlara parlaklık kazandırır. Camın kimyasal dayanım olarak artmasında CaO kadar etkin değildir. Camların bileşimine katıldığında camın kimyasal dayanımı yükseltir. Baryumlu camların sertliği kurşunlu camlara göre daha azdır. BaO oranı %40'ı geçtiği durumlarda, renkte sararma meydana gelse de ergitme anından redoks koşulundan etkilenmemektedir.

2.4.8. Demir oksit (Fe_2O_3)

Demir, demir iyonunu oksit iki ve üç değerlikli formlarını içerebilen bir oksittir. Ferro oksit iki değerlikli demir iyonu ile oluşur. Ferrikoksit (hematit) ise üç değerlikli demir iyonuyla oluşur. Cam ham maddesinde demir oksit miktarı olabildiğince alçak oranda olması tercih edilir, çünkü demir oksit, iki veya üç değerlikli iyonlarının

oranlarına göre camın sarı renginden yeşil, mavi renklerine kadar farklı renklerde olasını neden olur.

2.5. Cam Türleri ve Kullanım Alanları

2.5.1. Sodakalsik camı ve kullanım alanları

Yeryüzünde üretilmekte olan camın yaklaşık %90'ı Sodakalsik camıdır denilebilir. Bahse konu cam kolaylıkla eritilebilir, fiyatı makuldür ve neredeyse her yerde kullanılabilir. Klasik aydınlatma ampulü, fluoresan, pencere camı gibi malzemelerin üretiminde kullanılır. İçeriğinde yaklaşık %5 oranında CaO bulunmaktadır.

2.5.2. Kurşun camı (kristal cam) ve kullanım alanları

Soda kalsik camı içeriğinde kireç yerine PbO geçtiğinde kristal camına ulaşılmış olur. Yapısal olarak yaklaşık %80 oranında farklı durumlarda yüksek oranda kurşun oksit bulunabilir. Kurşun oksit, cam ergime noktasını azaltarak onun yumuşama noktasını CaO'li camlardaki miktarın altına indirir. Diğer yandan cam için basitçe işlenebilme, ışık yansıtabilme ve yayabilme özellikler kazandırır. %80'nin üzerine çıkan kurşun oksit miktarı ihtiva eden camlarda x ve ϒ zararlı ışınlarından korunabilmek maksadıyla kullanılmaktadır.

2.5.3. Borosilikat cam ve kullanım alanları

Borosilikat camları oldukça yüksek yumuşama noktasına sahiptir. Ancak bu özelliğine rağmen, ısıl şoklara karşı direnç sağlayan yüksek bir genleşme katsayısı, asitlere ve suya karşı oldukça güzel bir direnç gösterebilmesi ve oldukça iyi elektriksel özelliğe sahiptir. Bu özelliklerden ötürü laboratuvar ortamında kullanılan cam olarak tercih edilmektedir. Mutfak araç gereçleri ve ayrıca büyük boyuta sahip aynalar da üretilmektedir.

Bu camlar oldukça fazla özelliklere sahiptirler. Fakat termal kimyasal kararlılıkları, şok dirençleri ve seviyesi fazla elektrik dirençlerinin soda-kireç-silikat camlarına göre çok daha iyi olması sebebiyle tercih edilmektedir. En çok duyulan borosilikat cam adı aynı zamanda bir marka da olan Pyrex'dir. Pyrex cam %81 SiO_2, %13 B_2O_3, %4 Na_2O ve %2 oranında Al_2O_3 ihtiva eder. Fakat birçok değişik türde borosilikat camı kompozisyonları mevcuttur (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Bazı cam örnekleri.

Bileşenler	Düşük genleşmeli	Molibden Bağlantısı	Tungsten Bağlantısı	Kovar Bağlantısı	Düşük Elektrik Kayıplı
SiO_2	80.5	72.2	75.3	65.5	70.0
Na_2O	3.8	3.5	4.0	4.1	
K_2O	0.4	3.0	1.8	4.1	0.5
Li_2O					1.2
CaO		3.0			
MgO					
B_2O_3	12.9	15.0	16.9	24.1	28.0
Al_2O_3	2.2	3.0	2.0	2.2	1.1

Borosilikat laboratuvar cam malzemeleri:

- Kantitatif ve kalitatif kimyasal analizlerde
- Mikro analitik ve mikrobiyolojik analizlerde
- Sulu, asidik ve alkali ortamda yapılan deneylerde emniyetli olarak kullanılabilir.

2.5.4. Alüminosilikat camı ve kullanım alanları

%18 oranından yüksek Al_2O_3, düşük oranda B_2O_3, biraz kireç ve manyezi ile eser miktarda alkali içermektedirler. Fakat alkali bulunamadığı durumda camın ergitilme ve işlenme durumu zorlaşır. Yumuşama noktası yüksekliği ve dilatasyon katsayısının küçüklüğü, yanma tüpleri, termometre, alevle doğrudan temasa girecek tüm parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

2.5.5. Silis camı (%96 SiO_2) ve kullanım alanları

İçerisinde %96 miktarında silis olan bu cam, presleme ve üfleme gibi yöntemler ile şekil verme teknikleri bu cam çeşitlerinde tercih edilir. Dilatasyon katsayısı düşüktür. Bu cam çeşidi, fazla saydam olmasından kaynaklı ultra viyole ışınlarını iyi derece geçirirler. Bundan kaynaklı UV lambaları yardımı ile mikrop öldürebilen özel lamba imalatında tercih edilir. Silisyum Camı, yüksek saflıktaki kuvars kumunun ergitici madde olmadan eritilme işlemi ile elde edilir. Bu cam çeşidinin imal edilmesi ve şekil verilmesi yüksek sıcaklık değerlerinde (1755˚C'de) olur. Bu sebepten imal edilecek malzemenin şekli ve boyutlarında çeşitlilik sınırlıdır.

2.5.6. Silis camı (%99 SiO_2) ve kullanım alanları

Yüksek saflıktaki kuvars kumunun eritici madde kullanmadan eritilme işlemi ile üretilir. Bu camın üretiminin yapılması ve şekil verilmesi çok yüksek sıcaklık değerlerinde (1760 ˚C) 'de olur. Bu nedenle üretimi yapılacak olan malzemenin şekli ve boyutları sınırlıdır. Genleşme katsayı düşük, yumuşama noktası yüksek olmasından ve ultra viyole ışınını iyi geçirmesi gibi pozitif özelliği mevcuttur. Dielektrik özellikleri iyidir. Fakat maliyetin yüksek olması elektro teknik ile olan uygulamalarda sınır vardır. Isıl şoklara karşı direnci fazla olan cam türüdür.

2.6. Camların Mekanik Özellikleri

Cam malzemeler gevrek oldukları için kırılma davranışı camsı bir ağ oluşturan bağın doğal dayanımından kaynaklı değil, çoğunlukla çevreden kaynaklı faktörlerin yardımı ile tespit edilir. Camların kırılma dirençlerini öncül yüzeydeki işlemler, kimyasal çevre ve dayanımın seviyesini ölçmek için tercih edilen yönteme göre değişiklik gösterir. Gevrek bir malzeme olan cam türleri termal şoktan kaynaklanan kırılmalara bir yatkınlığı vardır.

Camların sahip olduğu farklı mekanik özellikler malzemenin doğasından kaynaklıdır. Elastisite modülü (E), malzemede bulunan bağların ve ağların yapısıyla belirlenir. Camların sertlik değeri bağlardaki dayanım ve yapıda bulunan atom yoğunluklarının bir fonksiyonudur (Shelby, 2005).

2.6.1. Elastiklik modülü (E)

Gevrek malzeme olan camlar üzerinde bir gerilme oluşturulduğunda harika Hook davranışı sergilerler. Hook yasası; elastik deformasyon bölgesi içerisinde bulunan gerilme (σ) ile birim şekil değiştirme (ε) arasında olan bağlantıdır, aşağıda bulunan denklemde gösterilmiştir.

$$\sigma=E.\varepsilon \tag{2.1}$$

Camlarda elastiklik 40 GPa ile 100 GPa aralığında değişim göstermektedir. Numune x ekseninde çekme kuvvetine maruz bırakıldığında zaman numune uygulanan kuvvet yönünde uzayacaktır. Bu uzama –y ve –z yönlerinde ise daralma olacaktır. Enine doğru gerinme oranının boyuna gerinme oranına poisson oranı denir.

Kayma modülü (G), kesme gerilmesi (γ), ve kesme gerilmesi (τ), aşağıda bulunan denklem ile ifade edilmiştir.

$$\tau=G.\gamma \tag{2.2}$$

Elastiklik modülü, kayma modülü ve Poisson oranı aşağıdaki bulunan denklem yardımı ile birbirine bağlıdır.

$$G = \frac{\mathrm{E}}{2(1+\vartheta)} \tag{2.3}$$

ϑ, malzemelerdeki poisson oranını ifade eder ve ifade edilen oran cam malzemelerde 0,20-0,25 aralığındadır(Shelby, 2005).

2.6.2. Sertlik

Sertlik, malzemenin batıcı, sert bir cisme karşı sergilediği mukavemettir. Sertlik farklı bir tanım olarak malzemenin plastik şekil değişimine karşı gösterdiği mukavemettir ve bundan kaynaklı akma mukavemetiyle bağlantılıdır.

Sertlik eski zamanlarda iki taşı birbirine üzerinde sürtme işlemi yapılarak ölçülmeye çalışılmıştır. Çizen cisim, çizilenden yüksek bir sertliği olduğu anlamına gelir. Mohs sertliği bu yönteme dayanır (Onaran, 2014).

Cam malzemelerin sertlik ölçümleri genel olarak Vickers sertlik yöntemi yardımı ile hesaplanır. Vickers yönteminde batıcı uç piramit bir şekil olup elmastan imal edilmiştir. Belirli bir yük ile malzemenin yüzeyine bastırılan batıcı uç eşkenar dörtgen bir şekil meydana getirir. Eşkenar dörtgenin iki köşegeninin ortalama değeri alınır. Vickers sertlik metodu yardımı ile ölçüm yapmak uzun bir süre alması ile hassasiyeti yüksek olan bir yöntemdir. Aşağıdaki Denklem 2.4'te değerler yerine yerleştirilerek Vickers sertlik değeri hesabı yapılır.

$$H_V = \frac{1.854P}{d^2} \tag{2.4}$$

2.6.3. Gevrek kırılma teorisi (Griffith teorisi)

Gevrek kırılma malzemelere kuvvet uygulandığı zaman plastik şekil değiştirme olmadan iki, üç ya da daha çok parçaya ayrılmasına denir. Gevrek malzemelerdeki teorik olan mukavemet ile gerçek kırılma mukavemeti arasında olan fark ilk defa Griffith (1921) tarafından açıklanmaya çalışılmıştır.

Yüzeyde ya da içinde çatlak bulunan malzemelerde çatlağın ucunda yüksek gerilme yığılmaları meydana gelir. Camların dayanabileceği en yüksek gerilme, ortalama gerilmelerinin yaklaşık olarak 10^2-10^3 katı kadardır. (Onaran, 2014).

2.6.4. Kırılma tokluğu

Kırılma, malzemenin kuvvet etkisi altında iki, üç ve daha fazla parçalara ayrılma durumudur. Kırılma oluş şekline göre sünek veya gevrek kırılmalar olmak üzere iki çeşidi vardır. Seramik ve cam malzemeler gevrek birer malzeme olmalarından kaynaklı bu malzemelerde gevrek kırılma meydana gelir (Onaran, 2014).

Camdaki kırılma tokluğu birden fazla yöntem ile iyi duruma getirilebilir. İlk olarak, camda meydana gelen kusur ve çatlakları önlemeye çalışılarak camın kırılma tokluğunda artış sağlayarak olur. Diğer yöntem ise termal temperleme yöntemi yardımı ile camlarda iç gerilme meydana getirilir ve böylelikle camlar darbeye karşın daha dirençli hale gelir. Bu yöntem büyük ölçüdeki camlar için uygundur (Shelby, 2005).

Camların kırılma tokluğu birden fazla yöntem yardımı ile hesaplanabilir. Bu yöntemden birisi Half-Penny-Crack metodudur ve Aşağıdaki Denklem 2.5 ile hesaplanabilir (Anstis ve ark., 1981).

Kıc: Kırılma tokluğu ($MPa.m^{0.5}$)
E: Malzeme elastisite modülü (GPa)
Hv: Malzemedeki Vickers sertlik değeri (kgf/mm^2)
P: Malzemeye uygulanan yük ($kg.m/s^2$)
c: Çatlağın mesafesi (m)

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H_V}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{C^{3/2}}\right) \tag{2.5}$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kurşun oksit (PbO)

Kurşun oksit, optik camlar, elektrik endüstrisi camlarda ve mutfak gereçleri gibi geniş bir alanda kullanımı mevcuttur. Kurşun oksit, camların kırılma indislerini arttırır. Buda kristal camların pırıltılı olma sebeplerinden biridir. Ayrıca camların el ile şekil verilmesini kolay bir şekle getirir, ergitme sıcaklığında azalma sağlar, çalışma aralığını arttırır ve kesme, parlatma gibi işlemleri kolaylaştırır. Bunun sonucunda; kristal cam denilen ve ışık yansıtma özelliği iyi olan parlak cam elde edilir.

Yalnızca kurşun oksit ve silisyum oksit 'ten meydana gelen sistemlerde çok yüksek miktarlarda kurşun içeren camlar basit bir şekilde meydana getirilebilir. Kurşun iyonlarının silis tetrahedralarının köşe oksijenleri ile köprü oluşturarak camın ağ yapısına katılabileceği düşünülmektedir. Buda, camın düşük sıcaklık değerlerinde eritilmesini ve kolay işlenebilmesine imkân tanır(Megep,2012).

3.1.2. Bor oksit (B_2O_3)

Bor oksit, ısıl genleşme katsayısı düşük olması arzu edilen cam numunelerinde tercih edilir. Bu özellikte fırın kaplarında ve farklı özel cam ürünlerinde tercih edilen özelliktir. Bor, işlem esnasında ergime işlemini ve camlaşmayı basitleştirdiği gibi katılaşma olmuş camda rengi de kararlı hale getirir. Parlaklık, yansıma ve çizilmeye karşı direncinde artış sağlar. Camı asitlere karşı duyarsız hâle getirir. Soda kireç camlarına az oranda bor oksit eklemek camda ergitme işlemine ve işlenebilirliği ciddi olarak katkısı olur. Cam yünü bileşimine bor oksit; erime sıcaklığında ve kristalleşme eğiliminde düşüş sağlar, daha uzun süre yün boyu eldesi sağlar ve suya karşı mukavemeti güçlendirir. B_2O_3 diğer en önemli cam yapabilme özelliği oksittir. Borosilikat camların üretiminde kullanılan bor oksitin ana maddesi borik asittir. Cam

laboratuvar malzemesi veya sıcaklığa karşı dirençli ev eşyası imalatında tercih edilen borosilikat cam çeşitleri için bor oksit ve sodyum oksiti uygun miktarlarda elde edilmesi için borik asit ve boraks bileşimi kullanımı uygundur (Megep,2012).

3.1.3 Tungsten oksit (WO_3)

Oksijen ve geçiş metali tungsten içeren kimyasal bir bileşiktir. Tungsten trioksit gündelik yaşamda farklı amaç için kullanılmaktadır. Endüstride x-ray ekran fosforları alev almaz kumaşlar ve gaz algılayıcıları için tungsten üretiminde sıklıkla kullanılır. Zengin sarı renginden dolayı WO_3 seramik ve boyalarda renk verici pigment olarak da kullanılır.

Son zamanlarda, elektrokromik pencerelerin veya akıllı pencerelerin imalatında tungsten trioksit kullanılmıştır. Üretilen bu pencereler, uygulanan bir voltajla ışık iletim özelliklerini değiştiren elektriksel olarak değiştirilebilen camlardandır. Bu, kullanıcıların pencereleri renklendirmesine, geçen ısı veya ışık miktarını değiştirmesine olanak tanır.

3.1.4. Seryum oksit (CeO_2)

1803 yılında keşfedilen seryum elementi atom numarası 58 olan periyodik tabloda NT iyonları topluluğunda bulunan Ce simgesi ile ifade edilmektedir. Seryumun en bilinen bileşiği CeO_2'dir ve farklı alanlarda kullanımı vardır. Saf CeO_2 Ce^{+3} katkılı camlar çabuk cevap, az oranda maliyet ve basit şekil verilebilme gibi özelliğinden kaynaklı tıbbi görüntüleme, katıhal aydınlatma, güvenlik, ve birçok uygulama için uygun oksitlerdendir (Koçyiğit,2023).

3.1.5. Tellür oksit (TeO_2)

Tellür elementinin en kararlı oksit hali olan tellür oksit (TeO_2) beyaz renkte ve kristalin halde olup; ergime sıcaklığı 733 °C'dir (Dutton ve Cooper, 1966). Bu çalışmada X-ışınları analizi yöntemiyle tetragonal kristal yapıdaki α-TeO_2 (paratellürit) hakkında ilk bilgi verilmiştir. 1967 yılında ise Beyer, α-TeO_2 ve ortorombik kristal

yapıdaki β-TeO2 (tellürit) hakkında detaylı incelemeler gerçekleştirmiş ve bu yapıları karşılaştırmıştır. Lindqvist (1968) yaptığı X-ışını analizleriyle α-TeO_2 hakkında daha detaylı bilgiler sunmuştur. 1968 ve 1969 yıllarında, Arlt ve Schweppe, Uchida ve Ohmachi, α-TeO_2 yapısının piezoelektrik ve fotoelastik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarda bu bileşiğin ultrasonik ışık deflektörlerinde kullanım potansiyelinin bulunduğunu saptamışlardır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Cam kompozisyonların sentezlenmesi ve üretimi

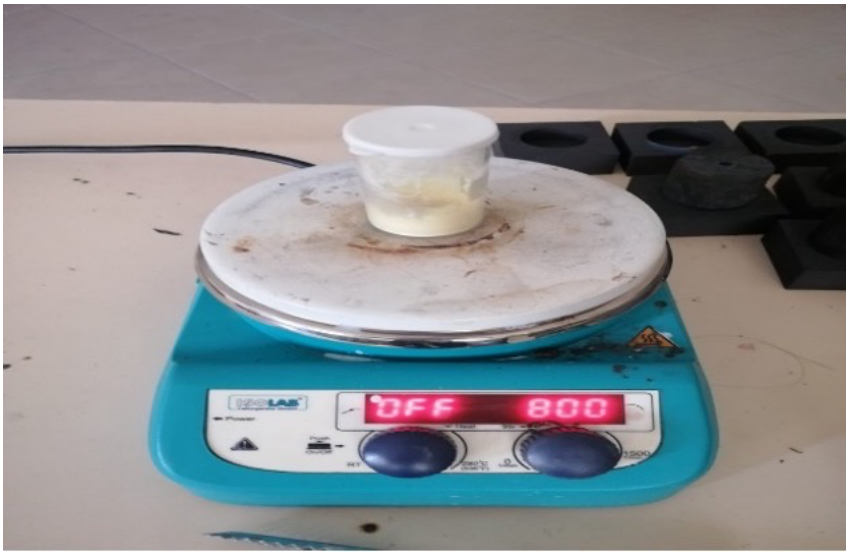
B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camların sentezlenmesinde başlangıç malzemeleri olarak yüksek saflıkta B_2O_3 (%99,9, Nanografi Türkiye), PbO (%99,9 saflıkta, Nanografi, Türkiye), TeO_2 (%99,9 saflıkta, Nanografi, Türkiye) ve CeO_2 (%99,9 saflıkta, Nanografi, Türkiye) tozlar kullanılmıştır. B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camlar için katkı maddesi olarak ise WO_3 (%99,9 saflıkta, Nanografi, Türkiye) seçilmiştir. $45B_2O_3$-(20-x)PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$-xWO_3 kimyasal formülüne sahip cam sistemine x= %0, 1, 3, 5, 10 ve 20 mol WO_3 ilave edilerek camlar üretilmiştir. Bu çalışmada üretilen farklı oranlarda WO_3 katkılı B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camların kompozisyonları, kısaltmaları ve toz oranları Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Cam kompozisyonları için Çizelge 4.1'de belirtilen miktarlarda her bir cam örnek için 12 gram'lık tozlar hassas terazide (0,00001 gr hassasiyette) tartılarak referans örnek kompozisyonda dahil olmak üzere toplam 6 farklı cam kompozisyonu hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. Sentezlenen camların kompozisyonları, kısaltmaları ve bileşenlerin ağırlıkça miktarları.

Kompozisyon	Kısaltma	B_2O_3 (gr)	PbO (gr)	TeO_2 (gr)	CeO_2 (gr)	WO_3 (gr)
$45B_2O_3$-20PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$ (Referans)	P	2.839	4.044	4.338	0.780	0.000
$45B_2O_3$-19PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$-$1WO_3$	PW1	2.837	3.839	4.335	0.779	0.210
$45B_2O_3$-17PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$-$3WO_3$	PW3	2.833	3.431	4.329	0.778	0.629
$45B_2O_3$-15PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$-$5WO_3$	PW5	2.829	3.023	4.324	0.777	1.047
$45B_2O_3$-10PbO-$30TeO_2$-$5CeO_2$-$10WO_3$	PW10	2.820	2.009	4.310	0.775	2.087
$45B_2O_3$-$30TeO_2$-$5CeO_2$-$20WO_3$	PW20	2.802	0.000	4.282	0.770	4.147

Homojen bir toz karışımı elde edebilmek amacıyla her bir kompozisyon için tartılan tozlar, Şekil 3.1'de gösterilen bir bardak içerisinde manyetik karıştırıcıda 800 dev/dak hızda 10 dakika süre ile karıştırma yapılmıştır.



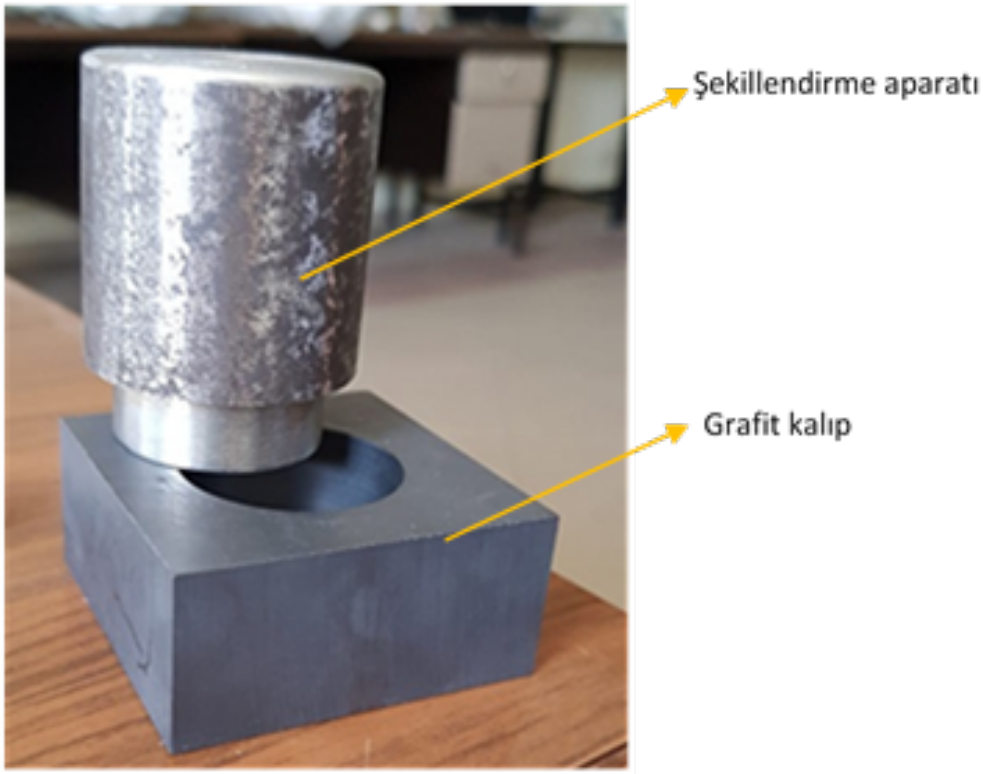
Şekil 3.1. Tozların manyetik karıştıcıda karıştırılması

Ardından, her bir cam kompozisyonu için hazırlanmış toz karışımı Şekil 3.2'de gösterilen bir alümina pota içerisinde yüksek sıcaklık kül fırınında 200-1000 °C sıcaklık aralığında ilk olarak 30 dakika sürede 20 °C'den 200 °C sıcaklığa çıkıldı ve ardından 200 °C'de 30 dakika bekletildi ve sonra 600 °C sıcaklığa 70 dakikada ulaşıldıktan sonra

600 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletilerek sentezleme işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra sentezlenen cam kompozisyonları 60 dakikada sıcaklık 600 °C'den 1000 °C çıkarılarak ergitme işlemi yapılmıştır. Daha sonra 1000 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra fırından uzun bir maşa yardımı ile alınan alümina potadaki sıvı eriyik karışımı bir alümina seramik çubuk ile karıştırdıktan sonra Şekil 3.3'te gösterilen 50 mm çapındaki bir grafit kalıba dikkatli bir şekilde hızlıca döküldü. Eriyik dolu grafit kalıplar camsı geçiş sıcaklığı göz önünde bulundurularak, önceden 200 °C'ye ısıtılmış olan etüve yerleştirilerek, camlaşma süreci için 1 saat bekletildi. Daha sonra sentezlenen camlardaki artık gerilimleri gidermek için fırında 500 ˚C'de 3 saat tavlama yapıldı ve yavaşça oda sıcaklığına soğutuldu.

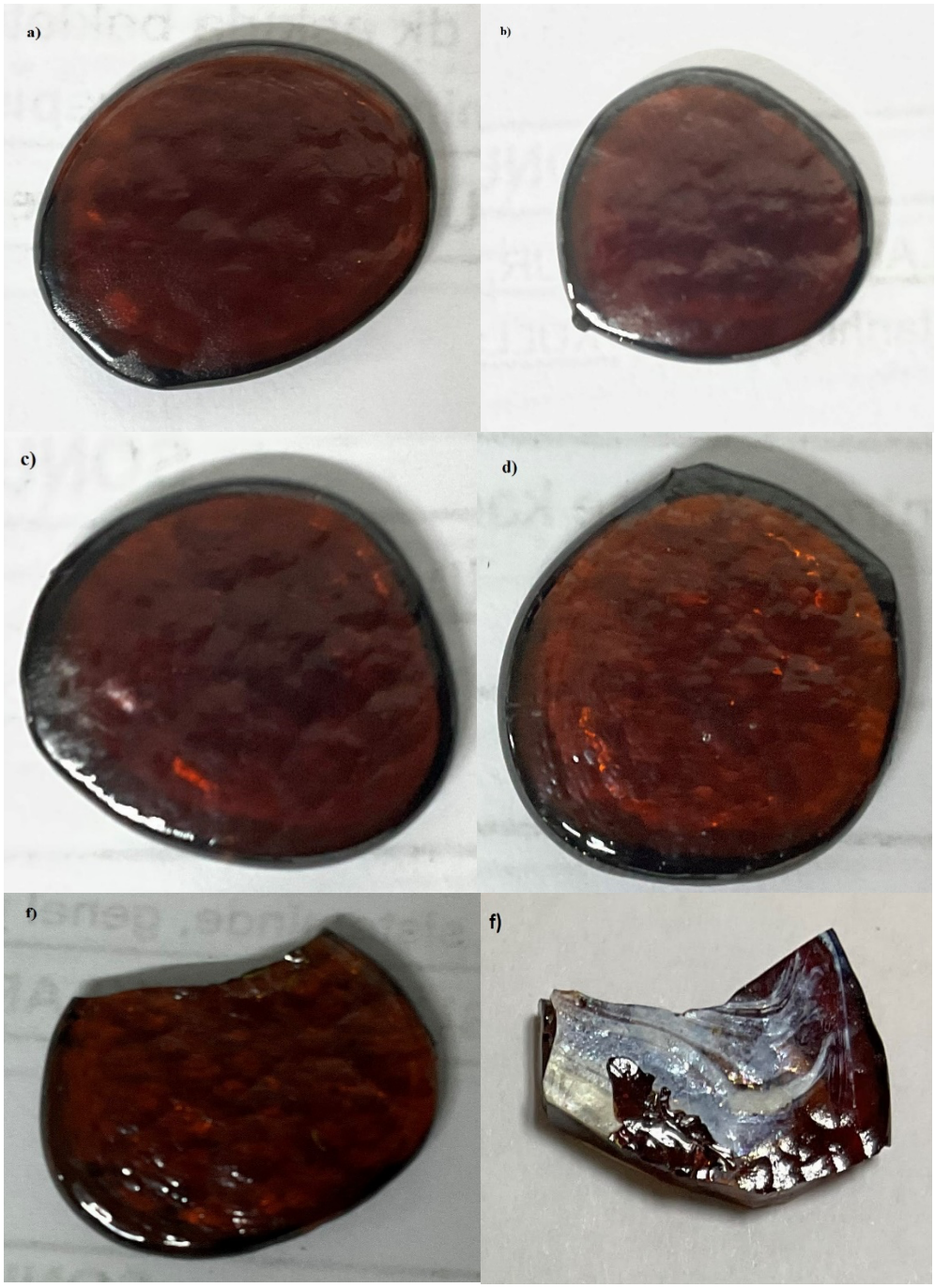


Şekil 3.2. Alümina seramik ergitme potası ve yüksek sıcaklık kül fırını



Şekil 3.3. Grafit kalıp ve şekillendirme aparatı

Cam örneklerin, ışığı en iyi bir biçimde geçirebilmeleri, saçılmaların en aza indirgenebilmesi ve camların mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi amacıyla zımparalama ve parlatma ünitesi kullanılarak camların yüzeyleri zımpara ile pürüzsüz ve paralel hale getirildi. Zımpara ve parlatma işlemlerinin bitiminde önce içinde etanol bulunan kaba sonrasında içerisinde saf su bulunan kaba, numuneler bırakılıp bir süre bekletilerek numuneler üzerinde bulunan kalıntılar giderildi. Sentezleme ve ergitme ile üretilen WO_3 katkılı B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camların resimleri Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



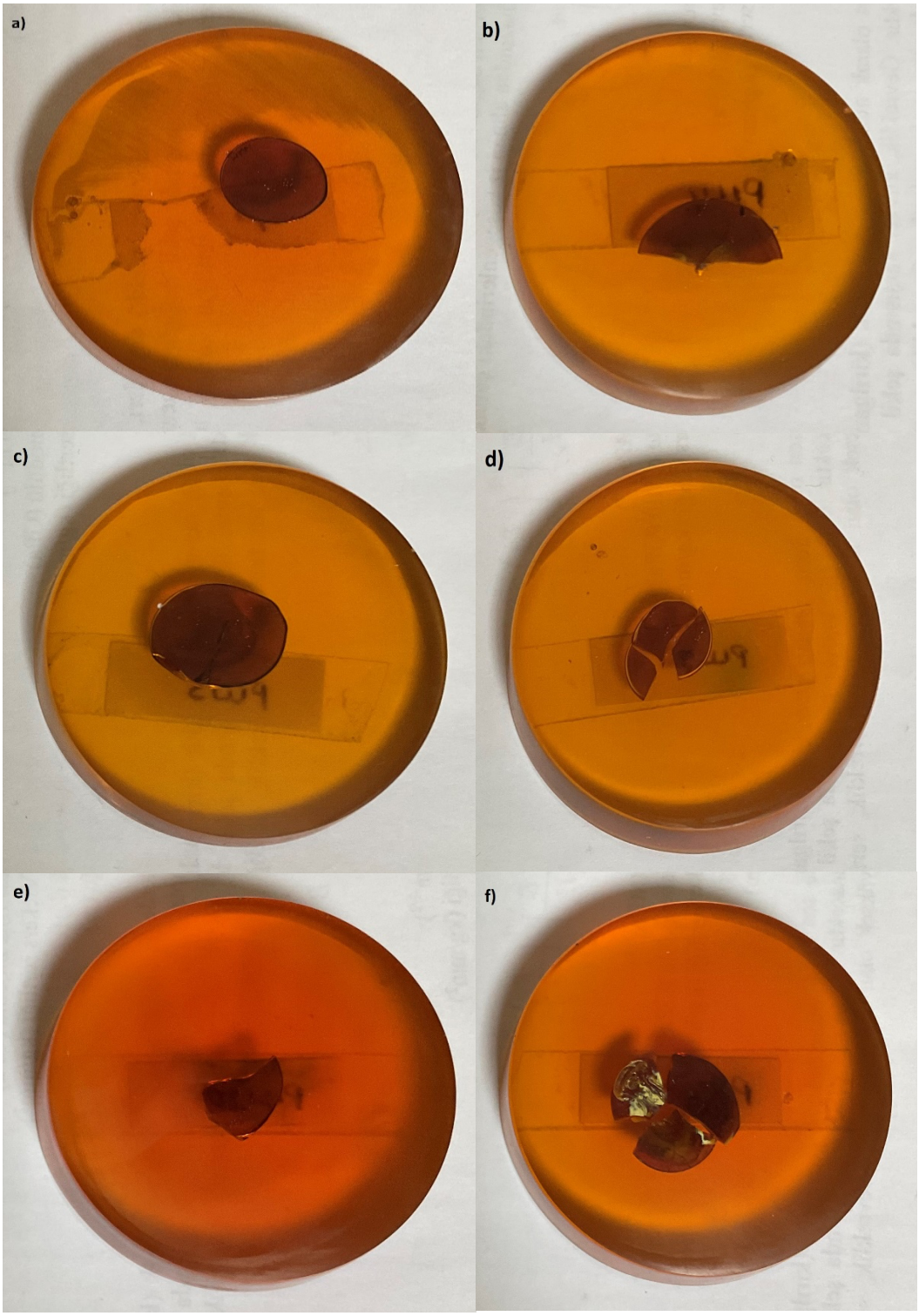
Şekil 3.4. Üretilen cam numuneler a) P ve b) PW1 c) PW3 d) PW5 e) PW10 f) PW20

3.2.2. Mikroyapı incelemeleri

Mikroyapı incelemeleri için Harran Üniv. Makine Müh. Bölümü malzeme laboratuvarında bulunan Şekil 3.5'te verilen ters metal mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Mikroyapıyı incelemesi için cam örnekler ilk önce soğuk gömme metodu ile polyester reçine yardımı ile kalıplama işlemi yapılmıştır (Şekil 3.6). Daha sonra üretilen cam örnekler sırası ile 80, 180, 200, 320, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 gridlik SiC zımparalar yardımı yüzeyinde bulunan tüm çizikler giderilene kadar zımparalama işlemine yapıldı. Zımparalama sonrası cam örneklerin yüzeyi 1 ve 3 mikronluk elmas pasta ve solüsyon yardımı ile parlatma işlemi yapılmıştır (Şekil 3.7) ve mikroyapı incelemesine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.5. Ters metal mikroskobu



Şekil 3.6. Kalıplanan numuneler a) P b) PW1 c) PW3 d) PW5 e) PW10 f) PW20



Şekil 3.7. Zımparalama ve parlatma ünitesi

3.2.3. Numunelerin yoğunluk ölçümleri

Hazırlanan cam numunelerin yoğunluk ölçümleri, Harran Üniv. Makine Müh. Bölümü malz. laboratuvarındaki Şekil 3.8'de görüldüğü gibi terazi ve yoğunluk ölçüm kiti yardımı ile hesaplanmıştır. Cam numunelerin yoğunluğu Arşimed prensibi kullanılarak ilk olarak örneklerin havada ortamındaki ağırlık miktarı daha sonra saf su içindeki ağırlığı ölçülerek yapılmıştır. Yoğunlukların hesabı için aşağıda bulunan Denklem 3.1 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m_h}{m_h - m_s} x \rho_s \tag{3.1}$$

Burada;

ρ: Numune yoğunluğu (gr/cm^3)

m_h: Numunenin havadaki ağırlığı (gr)

m_s: Numunenin sıvı içindeki ağırlığı (gr)

ρ_s: Saf su yoğunluğu (gr/cm^3)

Cam numunelerin molar hacimlerinin hesabı (V_M) ise aşağıdaki Denklem 3.2 kullanılarak hesaplandı.

$$V_M = \frac{M_T}{\rho} \quad (3.2)$$

Burada;

M_T: Çok komponentli cam sistemindeki toplam molekül ağırlığı (gr/mol)

ρ: Numune yoğunluğu (gr/cm^3)



Şekil 3.8. Hassas terazi ve yoğunluk kiti

3.3. Numunelerin Yapısal ve Optik İncelemeleri

X-ışınları kırınımı yöntemi yardımı ile numunelerde oluşabilecek kristal fazları ve oluşan yapıları tespit edebilmek için Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Bruker D-8 Advence X-Ray cihazı 10 ile 80° açı limitinde 2°/dakika tarama hızı ile kırınım desenleri çekilmiştir. X-ısınları kırınımı ile üretilen cam numunelerinin yapısal olarak analizi yapılmıştır.

Cam kompozisyonun bileşenleri arasındaki bağ yapılarını belirlemek için Harran Üniversitesi HÜBTAM'da bulunan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Shimadzu IR Tracer 100 cihazı kullanılarak 400-4000 cm^{-1} aralığında ölçüm yapılmıştır.

Cam numunelerin optik özelliklerini belirlemek için Harran Üniversitesi HÜBTAM'da bulunan Shimadzu UV-1700 cihazı UV-Vis cihazı kullanılarak 200-1000 nm aralığında analiz yapılmıştır.

3.4. Numunelerin Elastik Özelliklerinin Belirlenmesi

Numunelerin elastik özelliklerin belirlenmesinde Makishima-mackenzie metodu kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır (Makishima and Mackenzie, 1973; Makishima and Mackenzie, 1975). Denklem 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8 kullanılarak üretilen camların Young modülü (E_m), hacim modülü (K_m), kesme modülü (G_m) ve poisson oranı (σ_m) gibi elastik özellikleri teorik olarak hesaplanmıştır.

$$Em = 2Vt\Sigma iGixi \; = \; 2Vt\; Gt \tag{3.3}$$

V_t: Atomik paketleme yoğunluğu
G_i: Ayrışma enerjisi

$$Vt = (\rho/M)\; \Sigma Vixi \tag{3.4}$$

M: Camın moleküler ağırlığı

ρ: Yoğunluk

Formülü A_xB_y olan bileşikler için V_i aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_i=N_A(4\pi/3)(xR_A^3+yR_O^3) \quad (3.5)$$

N: Avagadro Sayısı

R_A ve R_O: İyonik yarı çaplar

$$K_m=1.2V_tE_m \quad (3.6)$$

$$G_m = \frac{3.K_mE_m}{9.K_m-E_m} \quad (3.7)$$

$$\sigma_m = 0.5 - \left(\frac{1}{7.2.V_t}\right) \quad (3.8)$$

3.5. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camların mekanik özelliklerine WO_3 ilave edilmesinin etkisini belirlemek için Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü malzeme laboratuvarında Şekil 3.9'daki mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikro Vickers sertlik cihazı ile camların sertlik ve kırılma toklukları deneysel olarak ölçülmüştür. Cam numunelerin sertlik ölçümleri 1000 gr yük 5 sn uygulanarak ölçüm yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinden sonra cam örnekler üzerinde oluşmuş olan izler üzerindeki köşegenlerin uzunluğunun ölçümü yapılmış ve Denklem 3.9 kullanılarak sertlikler hesaplanmıştır. Her numune üzerinden 5 farklı noktadan sertlik ölçümü yapılıp ortalama değer bulunmuştur.

$$H_v = \frac{1.854\mathrm{P}}{d^2} \quad (3.9)$$

Burada;

H_v: Vickers sertlik değeri (kg/mm^2)

P: Uygulanan yük (kg)

d: İzin köşegen uzunluğu (mm)



Şekil 3.9. Mikro Vickers sertlik cihazı

Cam numunelerin kırılma toklukları ise Half-Penny-Crack metodu ile Vickers sertlik izin köşegenlerindeki oluşturulan çatlakların boyu ölçülerek aşağıda Denklem 3.10 yardımı ile hesaplanmıştır (Anstis ve ark., 1981; Aktas ve ark., 2016).

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H_v}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{3/2}}\right) \quad (3.10)$$

Burada;

K_{IC}: Kırılma tokluğu (Mpa.m$^{0.5}$)

E: Malzemenin elastisite modülü (Gpa)

P: Uygulanan yük (kg)

c: Çatlak uzunluğu (m)

Gevreklik indeksi (B), sertlik değerinin kırılma tokluğu değerine bölünme işlemi ile hesaplanır. Cam numunelerin gevreklik indeksi (B) değerleri Denklem 3.11 yardımı ile hesaplanmıştır (Aktas ve ark., 2022).

$$B = H / K_{IC} \tag{3.11}$$

Burada;
B: Gevreklik
H: Sertlik
K_{IC}: Kırılma Tokluğu

Ayrıca üretilen cam numunelerin teorik olarak sertlikleri (H) aşağıdaki Denklem 3.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$H = \frac{(1-2\sigma_m)E_m}{6(1+\sigma_m)} \tag{3.12}$$

Burada;
E_m : camın Young modülü
σ_m : camın Poisson oranıdır.

Sentezlenen cam örneklerinin birim formül başına ortalama çapraz bağ yoğunluğu ve birim hacim başına bağ sayısı değerleri hesaplandı. Sentezlenen camların ortalama çapraz bağ yoğunluğu ($\bar{n}_c$), Denklem 3.13 kullanılarak hesaplandı (Aktas vd., 2022; Acikgoz vd., 2022).

$$\bar{n}_c = \frac{1}{\eta}\sum_i x_i \, (n_c)_i (N_c)_i \tag{3.13}$$

Burada n_c, bağ sayısı eksi 2'ye eşit olan birim katyon başına çapraz bağ sayısıdır, N_c, birim cam formül birimi başına katyon sayısıdır ve η ise Denklem 3.14 ile verilen, birim cam formül birimi başına katyonların toplam sayısıdır.

$$\eta = \sum_i x_i (N_c)_i \tag{3.14}$$

Camların birim hacim değerleri başına bağ sayısı (n_b), aşağıdaki Denklem 3.15 kullanılarak hesaplandı.

$$n_b = \frac{N_A}{V_M} \sum_i (n_f x)_i \tag{3.15}$$

Burada; N_A Avogadro sayısı, cam örneğinin V_M molar hacmi, katyonların n_f koordinasyon sayısı, x her oksit bileşeninin molar fraksiyonu ve i oksit bileşenini temsil eder. Sentezlenen camların oksijen molar hacimleri (MOV) Denklem 3.16 kullanılarak hesaplandı.

$$MOV = \left(\sum \frac{x_i M_i}{\rho}\right)\left(\frac{1}{\sum x_i n_i}\right) \tag{3.16}$$

Burada x_i, her i bileşeninin molar fraksiyonu, M_i molekül ağırlığı, ρ sentezlenen camın yoğunluğu ve n_i ise her oksit bileşenindeki oksijen atomlarının sayısıdır. Cam numunelerin oksijen paketleme yoğunluğu (OPD) ise aşağıdaki Denklem 3.17 kullanılarak hesaplandı. OPD'ye bağlı olarak yoğunluk ve bileşim değerleri ile cam ağının sıkılığı hakkında bilgi elde edilmiştir.

$$OPD = 1000C(\rho/M) \tag{3.17}$$

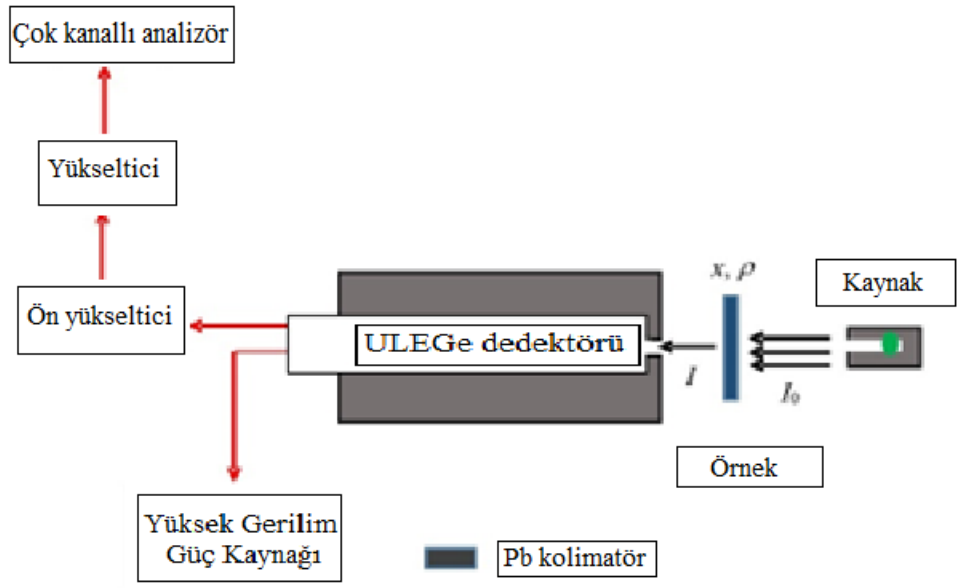
Burada C her bir bileşimdeki oksijen atomu sayısı, ρ camın yoğunluğu ve M camın moleküler ağırlığıdır.

Üretilen camların köprülü oksijen sayıları (n_{BO}) aşağıdaki Denklem 3.18 kullanılarak hesaplanmıştır. Camların n_{BO} değerlerinin hesaplanmasında cam kompozisyonundaki B_2O_3, PbO ve WO_3'in camsı ağ yapıcı, TeO_2 şartlı cam yapıcı ve CeO_2'in ise ara yapıcı olarak varsayılarak hesaplanmıştır.

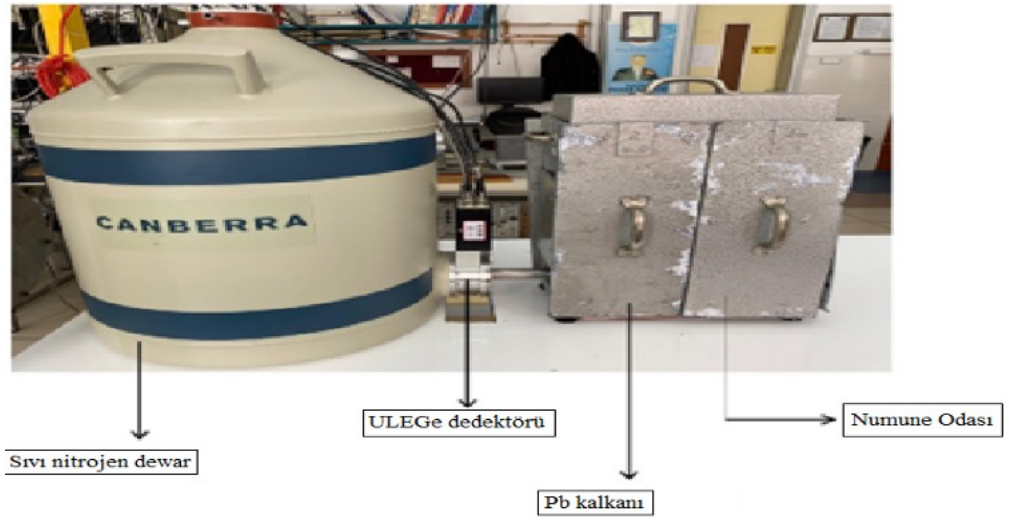
$$n_{BO} = \frac{4[B+Pb+Te+W]-(Te-Ce)}{\mathrm{B+Te+Pb+W}} \tag{3.18}$$

3.6. Numunelerin Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi

Numunelerin radyasyon zırhlama parametreleri Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Prof. Dr. Wolf Weyrich Yüksek Enerji Spektroskopisi Araştırma Laboratuarı ve Nötron Doz Ölçüm Laboratuvarında ölçülmüştür. Üretilen camların gama ışını soğurma parametreleri (MAC, MFP, HVL ve Zet) ULEGe dedektörü kullanılarak 59.54 keV 80.99 keV, 276.39 keV, 302.85 keV, 356.01 keV, 383.85 keV ve 661.62 keV enerji fotonlar deneysel olarak ölçülmüştür. Bu parametreler ayrıca teorik olarak da belirlenmiştir. Numunelerin radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan gama spektroskopisinin şematik düzeni ve gama ışını soğurma deney sistemi Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Gama ışını soğurma deney sistemi



Şekil 3.11. Gama ışını soğurma deney sistemi

3.6.1. Kütle soğurma katsayısı (MAC)

Bir malzemenin kütle soğurma katsayısı (μ_m, cm^2/g) birim alanda birim kütle başına düşen soğurmayı verir. Lambert-Beer kanununa göre lineer soğurma katsayısı ve malzemenin yoğunluğu ile belirlenir (Denklem 3.19). Üretilen cam örneklerin teorik kütle soğurma katsayısı değerleri EpiXS programı kullanılarak hesaplanmıştır (Hila ve ark, 2021).

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\rho t} \tag{3.19}$$

Burada I_o gelen foton şiddeti, I geçen foton şiddeti, μ (cm-1) lineer soğurma katsayısı, ρ (gr/cm3) yoğunluk ve t (cm) malzemenin kalınlığıdır.

3.6.2. Yarı değer kalınlığı (HVL)

Bir malzemenin yarı değer kalınlığı (HVL), malzemenin içine giren radyasyon şiddetinin yarıya düştüğü malzeme kalınlığıdır ve aşağıdaki Denklem 3.20 ile verilir:

$$\text{HVL}=\frac{\ln 2}{\mu} \tag{3.20}$$

3.6.3. Ortalama serbest yol (MFP)

Ortalama serbest yol iki etkileşim arasında bir fotonun kat ettiği ortalama fiziksel mesafeyi ifade eder ve aşağıdaki Denklem 3.21 ile verilir:

$$\text{MFP}=\frac{1}{\mu} \tag{3.21}$$

3.6.4. Etkin atom numarası (Z_{et})

Numune bir karışım, bileşik ya da alaşım formunda ise etkin atom numarası (Z_{et}) olarak bilinen bir parametrenin tayin edilmesi gereklidir. Kompozit bir malzeme içerisindeki ortalama atom numarasını temsil eder. Etkin atom numarası Denklem 3.22 ile hesaplanır.

$$Z_{et} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}} \tag{3.22}$$

Burada $\sigma_{t,a}$ toplam atomik tesir kesiti ve $\sigma_{t,e}$ toplam elektronik tesir kesitidir.

3.6.5. Maruz kalma faktörü (EBF)

Yığılma veya yapı faktörü (buildup) iyi bilinen Lambert-Beer yasasına getirilen bir düzeltme faktörüdür. Etkileşen malzemede foton akısının dağılımını tarif etmede önemli bir parametredir. Başlıca foton etkileşimleri; fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumudur. Bu etkileşim süreçlerinden, fotoelektrik etki ve çift üretimi, fotonun tamamen (absorbe edilmesine / yok olmasına) neden olurken, Compton saçılması yalnızca enerji bozulmasına yol açar. Bu nedenle, Compton saçılması, ortada daha düşük enerjili fotonların birikmesine neden olur ve bu da "buildup faktörü" olarak da adlandırılan bir faktörle tahmin edilebilir ($I = BI_0e^{-\mu t}$). Maruz kalma buildup faktörü, foton enerjisine ve nüfuz etme derinliğine bağlıdır. Bu çalışmada EBF, 0.015-15MeV enerji bölgesinde 40 mfp'ye kadar GP uyum parametrelerini sağlayan Phy-X/PSD programından hesaplanmıştır (Şakar ve ark., 2020).

3.6.6. Hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti

Hızlı nötronlar atom çekirdeği ile etkileşime girerek iyonlaşmalara neden olur. Maddeye nüfuz etme yetenekleri de yüksektir. Hızlı nötronlara karşı mükemmel koruma sağlayan malzemeler için büyük makroskopik tesir kesitleri arzu edilir. Makroskobik

tesir kesiti (Σ) ise bir nötronun N adet atomla reaksiyon yapma ihtimali olup birimi 1/cm'dir. Etkin nötron yakalama tesir kesiti ($\sum R$) aşağıdaki Denklem 3.23 ile verilir:

$$\sum R = \sum_i W_i \left(\sum_{R/\rho}\right)_i \tag{3.23}$$

Burada W_i ve $\left(\sum_{R/\rho}\right)_i$ sırasıyla kısmi yoğunluk (gr/cm^3) ve i. elementin soğurma tesir kesitidir.

3.6.7. Kütle durdurma gücü (MSP) ve menzil (PR)

Yüklü bir parçacığın kütle durdurma gücü (MSP), yüklü parçacıklar tarafından bir ortam içinde harcanan ortalama enerji'' olarak tanımlamıştır. Durdurma gücü yüklü parçacığın içinden geçtiği ortamın bir özelliğidir. Enerjiye sahip yüklü parçacıkların madde içindeki ortalama yol uzunluğu olan menzil ve kütle durdurma gücü Denklem 3.24 ile hesaplanabilir.

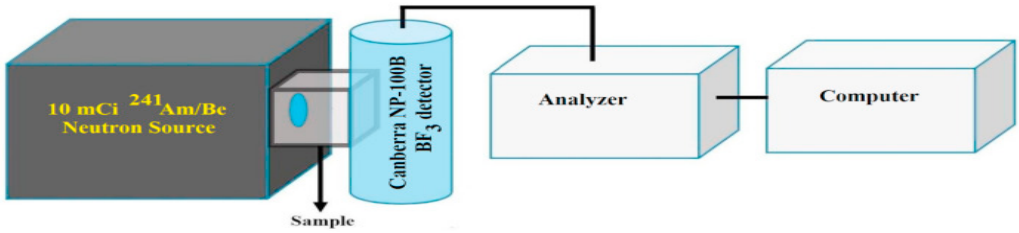
$$R = \int_0^R dx = \int_E^0 \frac{dx}{dE} dE = \int_0^E \frac{dE}{S(E)} \tag{3.24}$$

Bu çalışmada üretilen cam numunelerin MSP ve PR değerleri proton ve alfa parçacıkları için SRIM bilgisayar programı kullanılarak hesaplandı (Ziegler & Biersack, 1985).

3.7. Nötron eşdeğer doz ölçümleri

Üretilen cam numuneler tarafından absorbe edilen eşdeğer doz oranları, nötron eşdeğer doz ölçüm deneyleri ile belirlenmiştir. Nötron eşdeğeri doz ölçümleri için, 10 mCi aktiviteli ortalama 4,5 MeV enerjili 241Am–Be nötron kaynağı ve BF3 gazlı orantılı sayaç (Canberra NP-100B) kullanıldı ve tüm ölçümler RADACS programı ile kaydedildi (Şekil 3.12).

Sırasıyla kaynak ve dedektör arasına cam numuneler yerleştirildi, ardından hızlı nötron parçacıklarıyla bombardıman edildi. Deneysel hatayı en aza indirmek için ölçüm sayısı artırılarak ve her örnek için 10 defa olmak üzere 100'er sn'lik ölçümler alınmıştır.

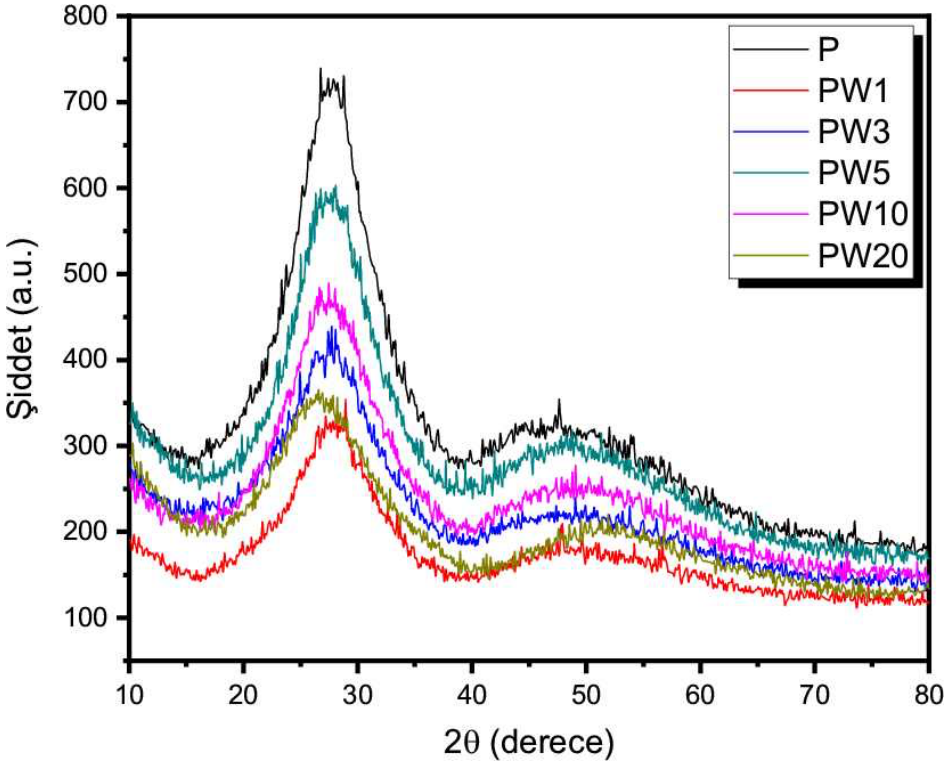


Şekil 3.12. ^{241}Am–Be nötron kaynağı ve BF_3 gazlı orantılı sayaç (Canberra NP-100B)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Camların Yapısal ve Optik Özellikleri

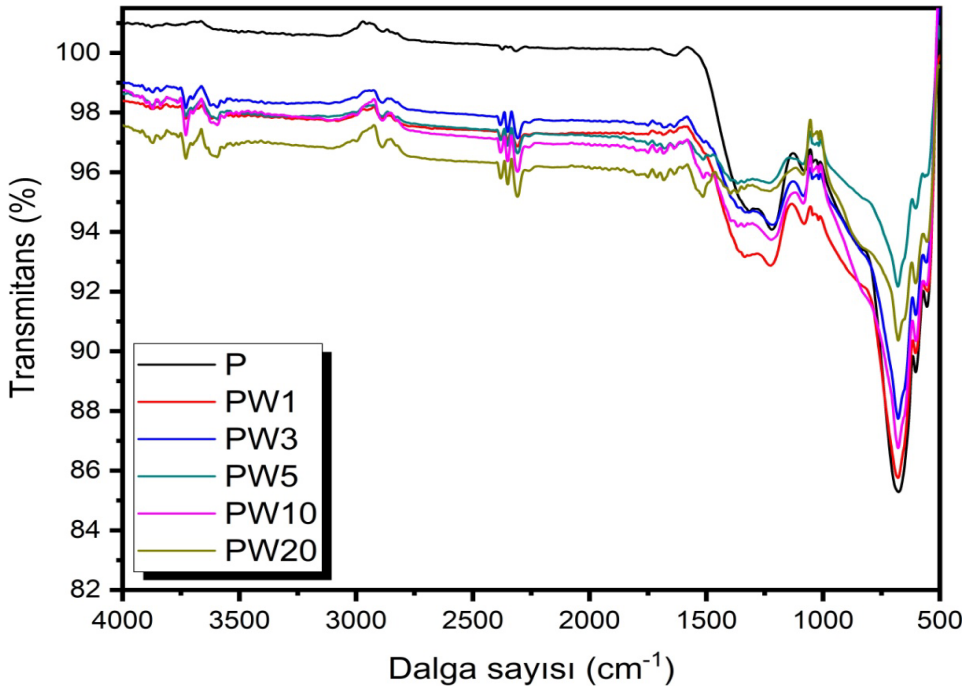
Yapmış olduğumuz çalışmada üretimi yapılan farklı oranlarda WO_3 ilaveli B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 cam örneklerinin X ışını kırınımı sonuçları incelenmiştir. Üretilen camların XRD desenleri Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Cam örneklerin XRD desenleri

Üretilen camların XRD spektrumlarından yaklaşık 15 ile 40° ve 40 ve 60° arasında iki ayrı geniş tepe noktası olduğu görülmektedir. Bu kırınım desenleri, camların amorf doğasını göstermiştir. XRD deseninde iki ayrı amorf tepesini oluşturan pikler katkı oranına bağlı olarak daha yüksek açıya doğru kayma göstermişlerdir. Bu kaymanın nedeni cam kompozisyonu içerisine dahil edilen tungsten oksitin (WO_3) oksijen boşluğu oluşumuna katkı sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üretilen camlara ait FT-IR spektrumları Şekil 4.2'de verilmektedir. B_2O_3 camında bulunan bor atomlarının yaklaşık %80'inin B_3O_6 boroksol halkalarında, bağımsız [BO_3] grupları ile birbirine bağlı olduğu ve Borat camlarının genellikle [BO_3], [BO_4], triborat, diborat birimleri vb. boroksol halkaları gibi birkaç yapısal gruptan oluştuğu bilinmektedir. TeO_2 yapısı TeO_4 trigonal bipiramit, TeO_3^{+1} polyhedral ve TeO_3 trigonal piramit şeklinde üç birim halinde bulunabilir.



Şekil 4.2. WO_3 katkılı camların FT-IR spektrumları

Bu çalışmada elde edilen FTIR spektrumuna ait titreşim pikleri ise Çizelge 4.1'de verilmektedir. Çizelge 4.1 incelendiğinde elde edilen titreşimlerin 400-700, 800-1200, 1200-1600 ve 1600-3000 cm^{-1} olmak üzere dört ayrı bölgede yer aldığı dikkati çekmektedir.

Çizelge 4.1. Üretilen camların FT-IR spektrumundan elde edilen titreşim pikleri

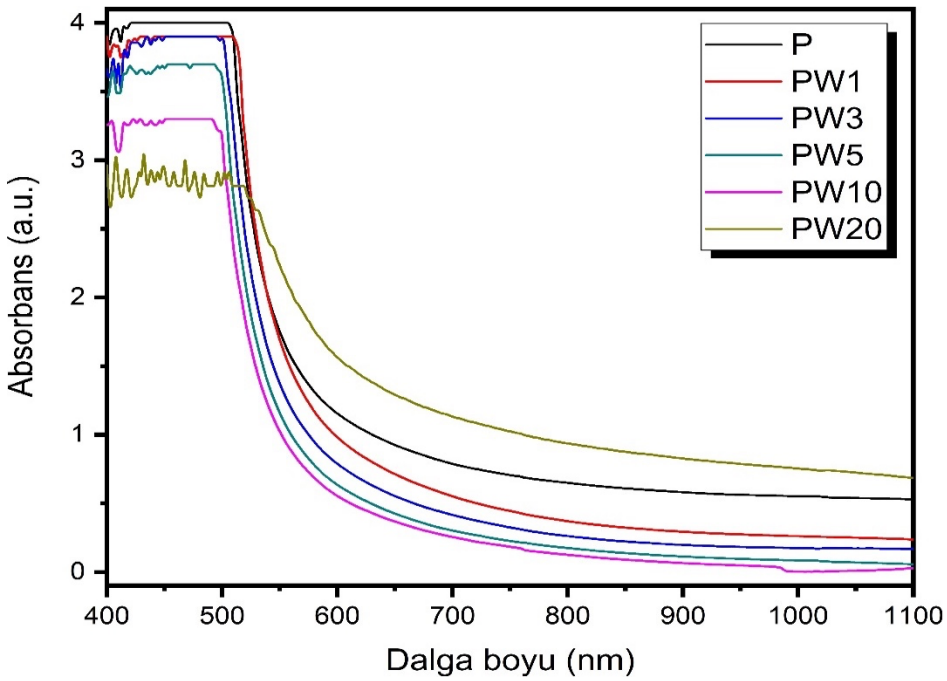
Cam numune kodları						Atanmış bağlar
P	**PW1**	**PW3**	**PW5**	**PW10**	**PW20**	
Pik pozisyonları (cm^{-1})						
	412,87	414,44	412,77	412,56		BO_3 ve BO_4 ünitelerinde veya Te-O bağlarının varlığından dolayı çeşitli B-O-B bükme modları
422,41	422,41	422,41	422,41	420,94	422,41	
	455,20	457,13			460,99	Te-O-Te veya O-Te-O bağlantılarının simetrik gerilme veya eğilme titreşimi
	478,35			480,28	491,85	BO_3 ve BO_4 ünitelerinde veya Te-O bağlarının varlığından dolayı çeşitli B-O-B bükme modları
555,50	551,64	557,43			555,50	
603,72	605,65	603,72	603,72	601,79	603,72	Trigonal bipiramidal TeO_4 oluşumu
677,01	678,94	678,94	680,87	678,94	678,94	Trigonal piramidal TeO_3 oluşumu
			1018,41	1018,41	1018,41	B—O bağları, BO_4 tetrahedral birimlerinde esneme titreşimleri
				1047,35		
1080,14	1082,07	1083,99	1085,92	1085,92	1085,92	
1220,94	1224,80	1217,08		1222,87	1247,94	$[BO_3]$ birimlerinde piro ve orto borat gruplarından B—O bağlarının asimetrik gerilme titreşimleri
	1334,74			1336,67		Çeşitli gruplar nedeniyle $[BO_3]$ birimlerinde $B—O^-$ bağının gerilmesi
			1367,53	1365,60	1367,53	
			1514,12	1512,19	1514,12	
1639,49	1687,71				1680,00	–OH grubunun varlığı

Spektrumda 400–700 cm^{-1} IR bölgesinde yer alan bantların Te–O bağlarının varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. 460 cm^{-1} civarındaki titreşim bandı Te–O–Te veya O–Te–O bağlantılarının bükülme titreşimlerine atanmıştır.

600–650 cm^{-1} merkezli iletim bandı, trigonal bipiramidal TeO_4 oluşumundan kaynaklanırken, 650–700 cm^{-1} deki bant, trigonal piramidal TeO_3 oluşumuna karşılık

gelir. Ayrıca borat camlarda IR bantlarının genel olarak tanımlanması 800 ile 1200 cm^{-1} arasında kalan titreşimler, tetrahedral BO_4 birimlerinin B-O bağ gerilmesine ve 1200–1600 cm^{-1} arasında kalan titreşimler ise trigonal BO_3 birimlerinin BO bağının asimetrik gerilme gevşemesi nedeniyle oluştuğu bilinmektedir. 1600 ile 3000 cm^{-1} arasındaki bölgede oluşan IR pikleri, ise camlarda –OH grubunun varlığına atfedilmektedir.

Katkısız (P) ve tungsten oksit (WO_3) katkılı borat camların optik özellikleri UV-Vis ile incelenmiştir. Şekil 4.3 300–900 nm aralığında alınarak elde edilen farklı miktarlarda WO_3 katkılı B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2 camların UV-vis absorpsiyon spektrumlarını göstermektedir. Tüm camların 550 nm civarında geniş bir absorpsiyon bandına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, saf camın (P) soğurma kenarı 550 nm civarında gözlenmiştir. Üretilen camların Uv-vis spektrumlarında keskin bir soğurma kenarı (soğurma başlangıcı) görülmemiştir. Bu üretilen camların amorf yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir.

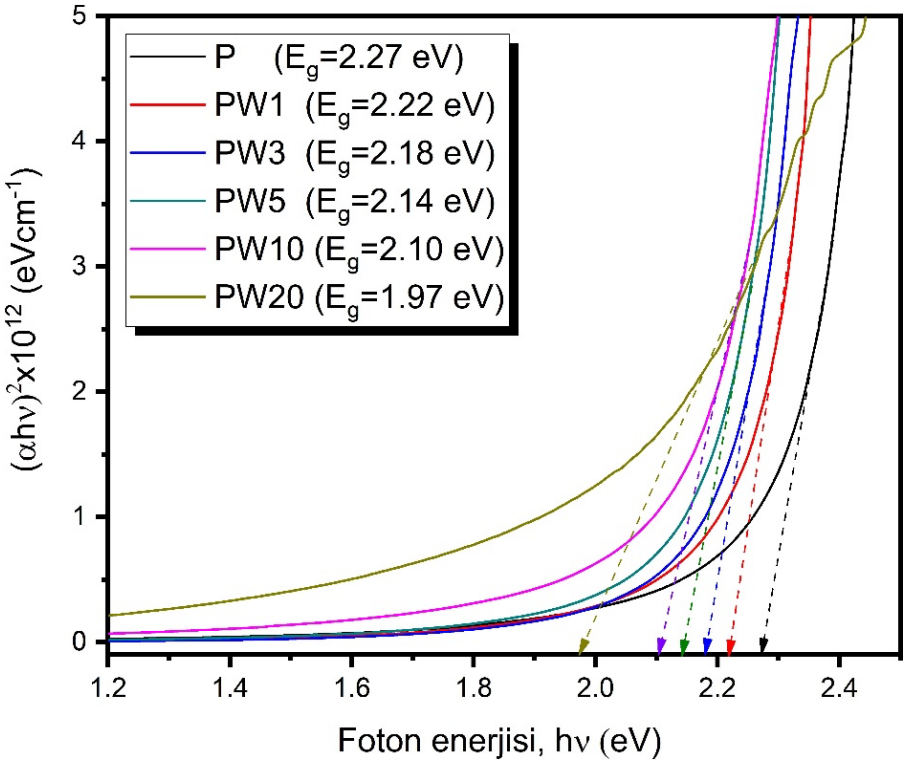


Şekil 4.3. WO_3 katkılı camların UV-vis absorpsiyon spektrumları

Bant aralığı, bir katının elektriksel iletkenliğinde önemli bir faktördür ve esas olarak film kalınlığına, kristal boyutuna ve sıcaklığa bağlıdır. Bu çalışmada üretilen camların optik bant boşlukları, Tauc eşitliği ile Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$(Ah\upsilon)^2 = A\,(h\upsilon - Eg) \tag{4.1}$$

Burada A bir sabittir; hυ foton enerjisi ve α soğurma katsayısıdır. Saf ve artan (W) konsantrasyonları ile hazırlanan (%1, 3, 5, 10 ve 20) PW1, PW3, PW5, PW10 ve PW20 kodlu tüm camların foton enerjisine (hυ) karşı $(\alpha h\upsilon)^2$ grafiği Şekil 4.4'te görülebilir. Çeşitli katkı maddesi ve katkı miktarının cam numunelerin optik özelliklerini etkilediği önceki çalışmalardan da bilinmektedir. Temel cam kompozisyonu için optik bant aralığı 2.27 eV olarak elde edilmiştir ve Eg optik bant aralığı değerleri artan tungsten katkısı ile azalmıştır. Bu azalma WO_3'ün enerji aralığı (~2.6–3 eV) ile B_2O_3'ün geniş bant aralığı (~6.20 eV) arasındaki farkla ilişkilendirilebilir (Abouhaswa ve ark., 2020). Ayrıca, bant aralığı değerlerindeki bu azalma, yapısal değişikliklerden ve minimum kusurların varlığına yol açan köprülü oksijen sayıların (NBO) oluşumundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4. Üretilen camların foton enerjisine (hυ) karşı $(\alpha h\upsilon)^2$ grafiği

Üretilen camların kırılma indisi (n) ise aşağıdaki Denklem 4.2 ile hesaplanmıştır (Sadeq ve ark., 2020).

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = 1 - \sqrt{\frac{E_g}{20}} \tag{4.2}$$

Kırılma indisi (n), bant aralığının (E_g) yanı sıra cam ağındaki polarize edilebilirlik, yoğunluk ve daha yüksek cam içeriği ve atom sayıları gibi farklı parametrelere de bağlıdır (Sadeq vd., 2020). Üretilen camların kırılma indisleri 2.98 ile 3.09 arasında değişmektedir ve WO_3 katkı miktarının artmasına bağlı olarak artış göstermiştir (Çizelge 4.2). Mercek olarak düşük dalga boyu dağılımına sahip yüksek kırılma indisli cam kullanılarak, çeşitli dalga boyları için odak noktaları geniş bir dalga boyu bölgesinde yakınlaşır. Böylece renk sapmaları bastırılır. Bu nedenle, yüksek kırılma indisli ve düşük dalga boyu dağılımına sahip olma özelliği optik camlar alanında

istenen bir özellik olmaktadır (Masuno ve ark., 2019). Ayrıca, yüksek kırılma indisine sahip camların optikte kullanılması, eğrilik yarıçaplarının artırılmasına, mercek kalınlığının azaltılmasına ve sonuç olarak daha yüksek dereceli sapmaların azaltılmasına izin verir, bunun yanı sıra alan eğriliği ve kromatizm için iyi bir düzeltme sağlamaktadır (Egorysheva ve ark., 2010). Bu çalışmada bu amaçlar için kullanım potansiyeline sahip yüksek kırılma indisine sahip camlar üretilmiştir. Molar kırılma indisi (R_m) Denklem 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$R_m = \left(\frac{n^2-1}{n^2+1}\right)\left(\frac{m}{\rho}\right) \tag{4.3}$$

Burada, burada n kırılma indisi, ρ yoğunluk ve m cam numunelerin moleküler ağırlığıdır. Buradaki $\left(\frac{m}{\rho}\right)$ oranı aynı zamanda V_m molar hacimle ilişkilidir. Molar kırılma camın yapısıyla ilişkilidir ve malzemenin molar elektronik polarize edilebilirliği (α_m) ile (cm^3x10^{-24}) orantılıdır. Clasius-Mosotti ilişkisi yoluyla yazılabilir.

$$\alpha_m = \left(\frac{3}{4\pi N}\right) R_m \tag{4.4}$$

Burada N, mol başına polarize olabilen iyonların sayısıdır ve N_A avogadro sayısına eşit olduğu varsayılır. Buradan Clasius-Mosotti ilişkisi

$$\alpha_m = 2.52\, R_m \tag{4.5}$$

bağıntısı ile ifade edilebilir (Abdel-Baki ve ark., 2007). Yüksek polarize camlar fotonik ve optoelektronik alanlarda ihtiyaç duyulan malzemeler arasında yer alır. Üretilen camların optiksel bandgap (E_g), kırılma indisi (n), Molar kırılma (R_m) ve Elektronik Polarize Edilebilirlik değerleri (α_m) Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Üretilen camların optiksel bandgap (Eg), kırılma indisi (n), Molar kırılma (Rm) ve Elektronik Polarize Edilebilirlik değerleri (αm)

Numune kodu	E_g (eV)	n	V_m	R_m (cm^3)	α_m ($x10^{25}$)
P	1.97	2.98	26.86	21.42	8.50
PW1	2.10	3.00	26.98	21.58	8.56
PW3	2.14	3.01	27.25	21.83	8.66
PW5	2.18	3.03	27.40	22.02	8.74
PW10	2.22	3.04	28.18	22.68	9.00
PW20	2.27	3.09	28.97	23.48	9.32

Bu çalışmada üretilen camların elde edilen elektronik polarize edilebilirlik değerlerinin 8.50-9.32 ($x10^{25}$) aralığında olduğu görülmektedir. Üretilen camların kırılma indisi ve molar hacim değerleri WO_3 katkı oranı arttıkça artmış ve buna bağlı olarak molar kırılma ve elektronik polarize edilebilirlik değerleri bir artış göstermiştir. Bunun nedeni, Tungsten nano parçacıklarının artan konsantrasyonuyla birlikte köprü oluşturmayan oksijen sayısının artmasıdır. Ayrıca, yüksek atom numaralı atomların köprü oluşturmayan oksijen sayısının artmasına yol açan oksijenden bir elektron yakalama eğilimindedir. Köprü oluşturmayan oksijenler, köprü oluşturan oksijenlere kıyasla yüksek polarizasyon eğilimine sahiptir. Tungsten iyonlarının yüksek polaritesi, cam numunelerin elektronik polarize edilebilirliğine yol açtığı düşünülmektedir (Azlan vd., 2015). Ayrıca, Fajan kuralına göre katyonun polarizasyon gücü, boyutu ve dolu orbital sayısı azaldıkça ve pozitif yükü arttıkça artmaktadır (Fajans ve ark., 1948).

4.2. Camların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

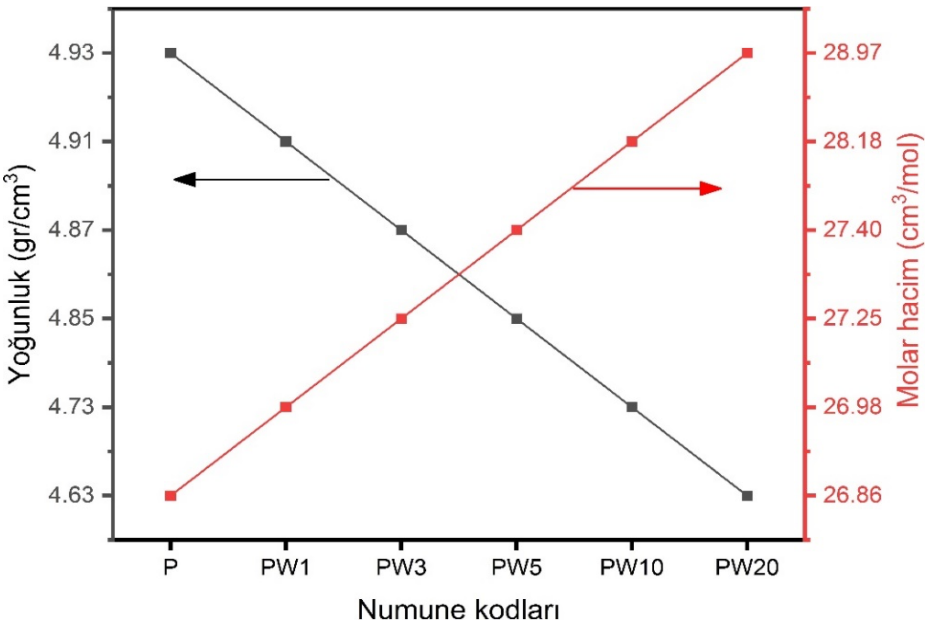
4.2.1. Camların yoğunlukları

Cam numunelerin yoğunlukları Arşimed yöntemi ile ölçülmüş ve Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Cam numunelerin molar hacim değerleri ise Denklem 3.2 ile hesaplandı. Elde edilen yoğunluk ve molar hacim değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. WO_3 katkılı camların yoğunlukları ve molar hacimleri (V_M)

Numune kodu	B_2O_3	PbO	TeO_2	CeO_2	WO_3	Yoğunluk (gr/cm^3)	Molar Hacim (cm^3/mol)
P	45	20	30	5	-	4,93	26,86
PW1	45	19	30	5	1	4,91	26,98
PW3	45	17	30	5	3	4,87	27,25
PW5	45	15	30	5	5	4,85	27,40
PW10	45	10	30	5	10	4,73	28,18
PW20	45	-	30	5	20	4,63	28,97

Şekil 4.5'te WO_3 katkılı camların katkı oranı ile yoğunluk ve molar hacimlerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şekil 4.5 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, WO_3 katkı miktarıyla birlikte camların yoğunluğunda bir azalma meydana gelmektedir. WO_3 katkı miktarındaki artış ile camların yoğunluğundaki azalmanın temel nedeni cam yapısına giren WO_3'nin yoğunluğu (7,16 gr/cm^3) PbO'in yoğunluğundan (9,53 gr/cm^3) düşük olmasıdır. WO_3 katkı oranının artmasıyla birlikte camların molar hacmi, yoğunluk ile ters orantılı olarak artmıştır. WO_3 katkısı ile camların molar hacimleri 26.86 cm^3/mol değerinden 28.97 cm^3/mol değerine yükselmiştir. Camın yapısına PbO'in yerine WO_3'in katılması ile atomlar arası bağ mesafesinin artmasının bir sonucu olarak molar hacimde bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.5. Camların yoğunluk-molar hacim grafiği

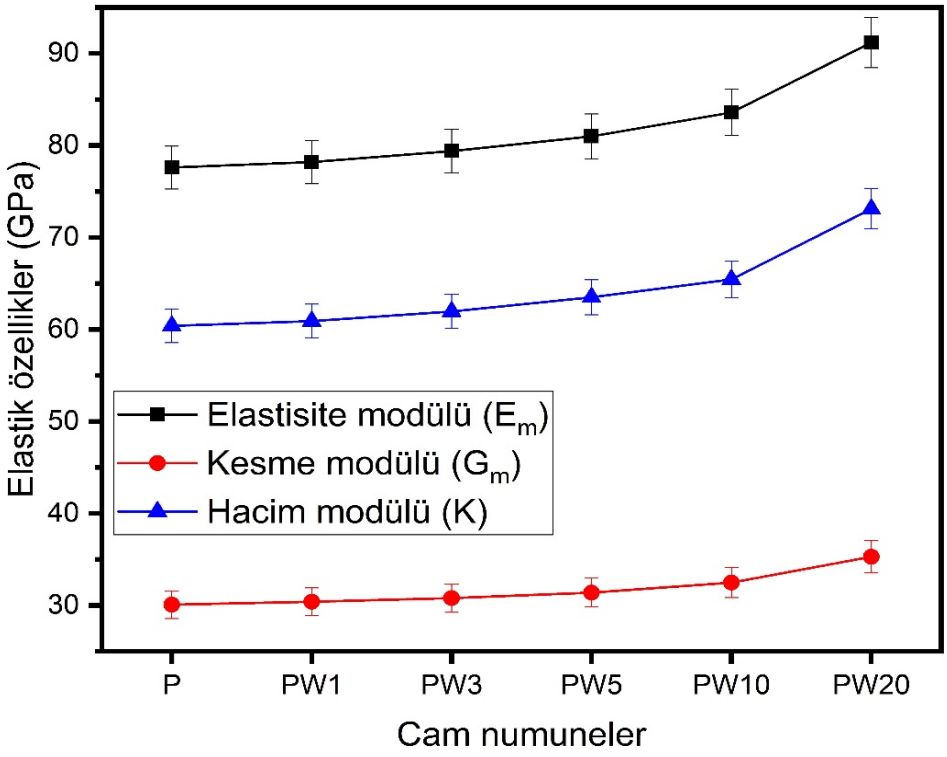
4.2.2.Elastik özellikler

Sentezlenen cam numunelerin Young modülü (E_m), hacim modülü (K_m), kesme modülü (G_m) ve poisson oranı (σ_m) için Denklem 3.3 – 3.8 kullanılarak Makishima-mackenzie metodu ile teorik olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak hesaplanan WO_3 katkılı cam numunelerin elastik özellikleri Çizelge 4.4'te verilmektedir. WO_3 katkısı ile tüm cam kompozisyonlarında elastik özelliklerde bir artış meydana gelmiştir. WO_3 katkısı ve katkı miktarındaki artış ile boro tellürit camların E_m, G_m, K_m ve σ_m değerlerinde bir artış meydana gelmiştir.

Çizelge 4.4. WO_3 katkılı cam örneklerinin elastik özellikler

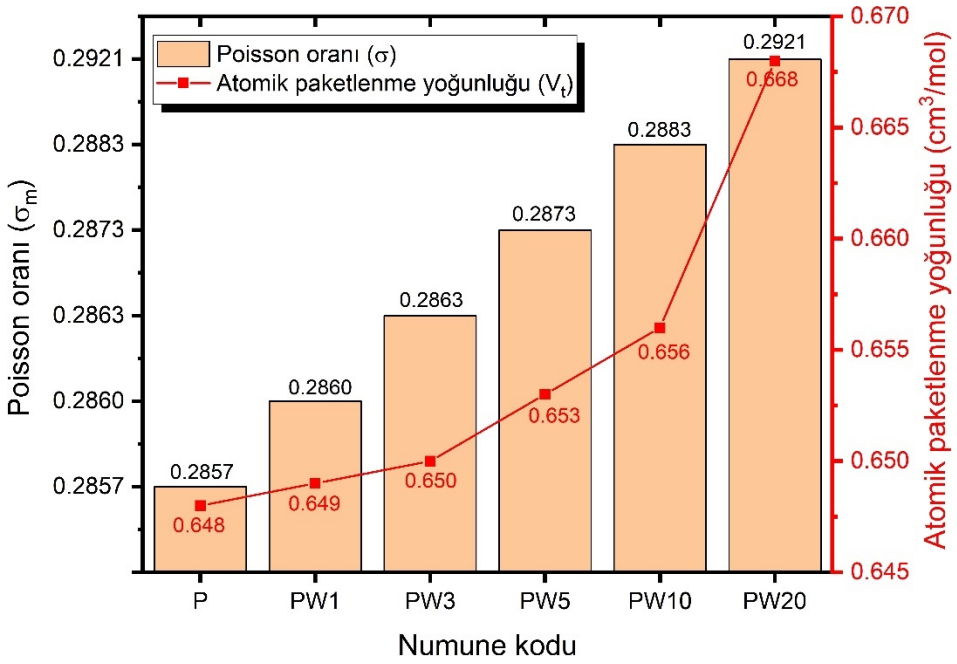
Cam kodu	G_i (kj/cm^3)	V_t (cm^3/mol)	E_m (GPa)	G_m (GPa)	K_m (GPa)	σ_m
P (Referans)	59,870	0,648	77,6	30,1	60,39	0,2857
PW1	60,295	0,649	78,2	30,4	60,92	0,2860
PW3	61,145	0,650	79,4	30,8	61,96	0,2863
PW5	61,995	0,653	81	31,4	63,50	0,2873
PW10	64,120	0,656	83,6	32,49	65,45	0,2883
PW20	68,370	0,668	91,2	35,3	73,12	0,2921

Şekil 4.6'da WO_3 katkı miktarı ile camların elastik özelliklerindeki değişim gösterilmektedir. WO_3 katkısı ile boro tellürit camların elastik özelliklerinde bir artış meydana gelmiştir. %20 mol WO_3 katkısı ile boro tellürit camların "E_m" 77,6'dan 91,2 GPa değerine, "G_m" 30,1'den 35,3 GPa değerine ve "K_m" ise 60,39'dan 73,12 GPa değerine yükselmiştir. Boro tellürit camın yapısına daha büyük iyonik yarıçaplı (1,19 Å) PbO'in yerine daha küçük iyonik yarıçaplı (0,6 Å) WO_3'in girmesinin bir sonucu olarak atomik paketlenme yoğunluğunda (V_t) bir artışa sebep olmuştur. Atomik paketlenme yoğunluğundaki bu artış boro tellürit camların elastik özelliklerinde bir iyileşmeye neden olmuştur. Ayrıca WO_3 katkısı ile cam numunelerin köprülü oksijen sayılarında (n_{BO}) ve ortalama çapraz bağ yoğunluğunda ($\overline{n}_c$) meydana gelen artış ile camların elastik özelliklerindeki iyileşmenin sebebi olarak açıklanabilir. n_{BO} ve $\overline{n}_c$ değerlerindeki artış katyon ve anyonlar arasında güçlü bağların oluşması demektir. Camın yapısında oluşan bu güçlü ve çoklu bağlar elastic özelliklerde iyileşmeye neden olmaktadırlar.



Şekil 4.6. WO_3 katkısı ile cam numunelerin Em, Gm ve Km'deki değişim

WO_3 katkısıyla cam numunelerin poisson oranı (σ_m) ile atomik paketlenme yoğunluğu (V_t) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.7'de gösterilmektedir. WO_3 katkı miktarındaki artış ile camın V_t değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu da poisson oranında bir artışa neden olmuştur. Ayrıca camların yapısına PbO'in yerine WO_3'in camın ağ yapısına girmesinin bir sonucu olarak camların çapraz bağ yoğunluğunda ve köprülü oksijen sayılarında bir artışa meydana gelmiştir. WO_3 katkısıyla camların çapraz bağ yoğunluğunda ve köprülü oksijen sayılarındaki bu artışın camların elastik özelliklerinin (E_m, G_m, K_m ve σ_m) artmasına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7. WO3 katkısı ile cam numunelerin poisson oranındaki değişim

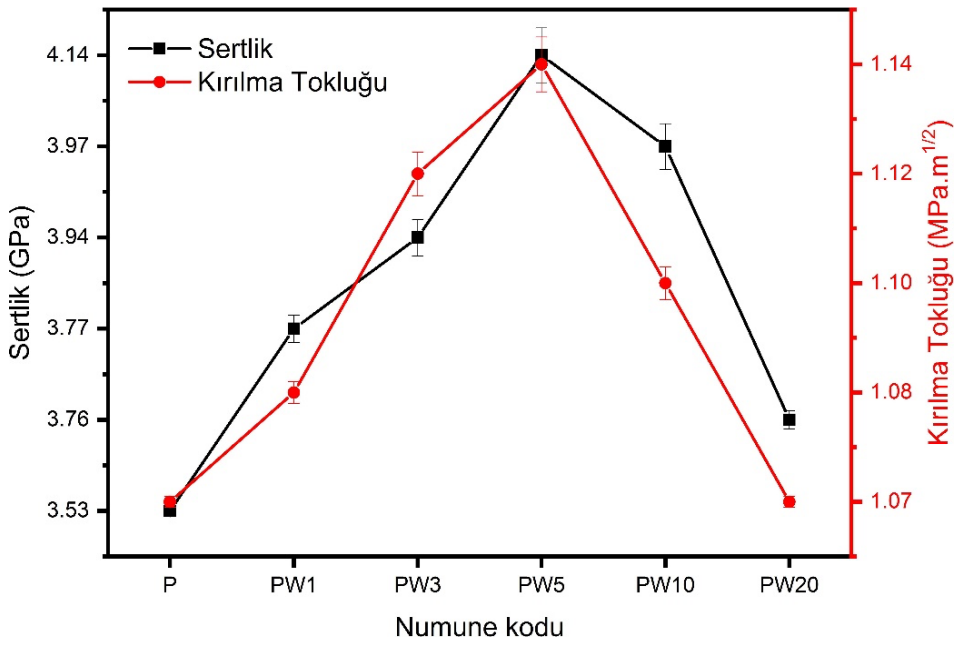
4.2.3. Fiziksel, yapısal ve mekanik özellikler

Sentezlenen camların ortalama çapraz bağ yoğunluğu ($\bar{n}_c$), birim hacim değerleri başına bağ sayısı (n_b), oksijen molar hacimleri (MOV), oksijen paketleme yoğunluğu (OPD), köprülü oksijen sayıları (n_{BO}), Vickers sertlik değerleri (H_V) teorik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sentezlenen cam örneklerinin deneysel olarak sertlikleri (H_v), kırılma toklukları (K_{IC}) ve gevreklik indeksleri (B) Mikro Vickers sertlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen camların fiziksel, yapısal ve mekanik özellik sonuçları Çizelge 4.5'te verilmektedir. Şekil 4.8'de WO_3 katkısı ile cam numunelerin sertlik ve kırılma tokluklarındaki değişim verilmektedir. WO_3 katkılı cam numunelerin sertlikleri ve kırılma tokluk değerlerinde %5 katkı oranına (PW5) kadar bir artış gözlenmiş ve %10-20 oranın 'da (PW10-PW20) ise bir miktar azalma olmuştur. Çizelge 4.5'ten görülebileceği gibi camların teorik olarak hesaplanan sertlik değerleri deneysel olarak hesaplanandan yüksek çıkmıştır. Teorik olarak sertlik değerinin hesaplanmasında malzemede yapısal kusurların olmadığı varsayıldığı için deneysel sertliklerden yüksek çıkmaktadır. Sentezlenen camların gevreklik indeksi (B) ise WO_3 katkı miktarı ile

artmaktadır. Ayrıca WO_3'in cam yapısına girmesi ile cam numunelerin ortalama çapraz bağ yoğunluğu ($\overline{n}_c$) ve köprülü oksijen sayılarında (n_{BO}) bir artış olmuştur. WO_3'in boro-di tellürit cam ağına dahil edilmesi, yeni bir yapısal düzenleme oluşturur. Cam bileşiminde orta düzeyde WO_3 konsantrasyonlarının bulunması bir WO_6 oktahedra oluşumuna yol açar. Böylece, WO_3 içeriğindeki artış, BO_3'ün köprü oluşturmayan oksijenlerini (NBO'lar) köprü oluşturan oksijenlere (n_{BO}) dönüştürerek boro-di tellürit B_2 ağının bağlarını ayıracaktır. Yapıya dahil edilen bu oksijenler, camın ağ bağlantısını artıran Te-O-W köprü bağlarının zenginleştirilmesinin yanı sıra TeO4 ve BO4 yapısal birimleri içerir (Issa ve ark., 2020).

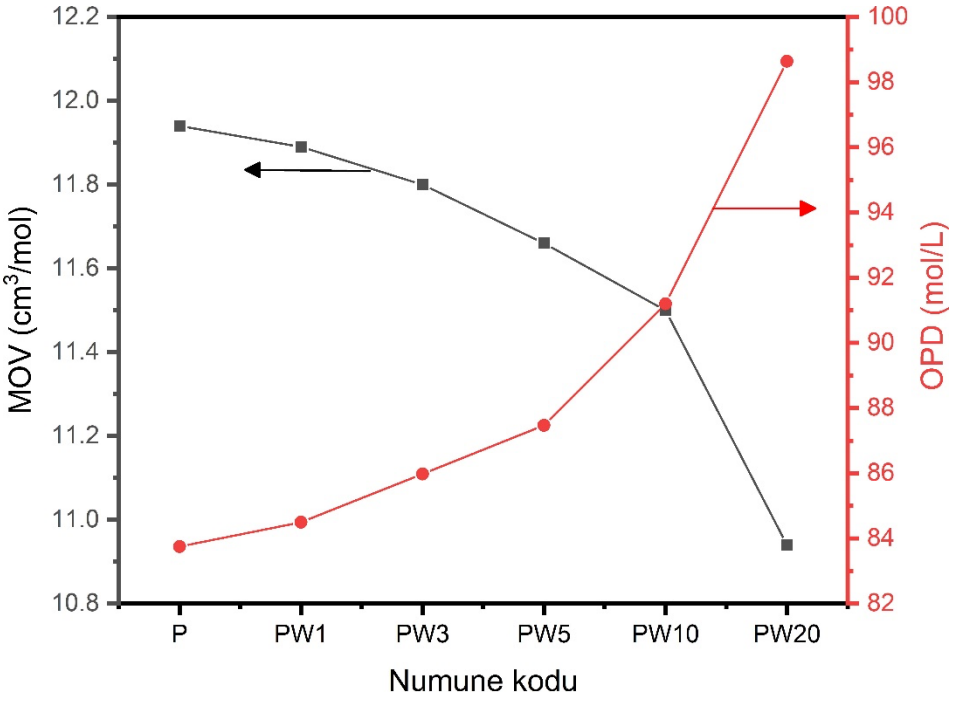
Çizelge 4.5. WO_3 katkılı cam numunelerin fiziksel, yapısal ve mekanik özellikleri

Numunelerin fiziksel özellikleri	**P**	**PW1**	**PW3**	**PW5**	**PW10**	**PW20**
ρ (gr/cm^3)	4,93	4,91	4,87	4,85	4,73	4,63
M (mol/gr)	132,446	132,532	132,705	132,878	133,310	134,174
V_M (cm^3/mol)	26,86	26,98	27,25	27,40	28,18	28,97
MOV (cm^3 /mol)	11,94	11,89	11,80	11,66	11,50	10,94
OPD (mol/L)	83,75	84,50	85,98	87,47	91,20	98,64
$\overline{n}_c$	1,517	1,531	1,558	1,586	1,635	1,793
n_b (x10^{22} cm^{-3})	8,376	8,409	8,416	8,458	8,438	8,623
n_{BO}	3,767	3,769	3,774	3.778	3,787	3,804
Teorik H_v (GPa)	4,31	4,34	4,40	4,46	4,58	4,89
Deneysel H_v (GPa)	3,53	3,77	3,94	4,14	3,97	3,76
K_{IC} (MPa.m$^{0.5}$)	1,07	1,08	1,12	1,14	1,10	1,09
B (μm$^{-1/2}$)	3,29	3,49	3,53	3,64	3,63	3,52



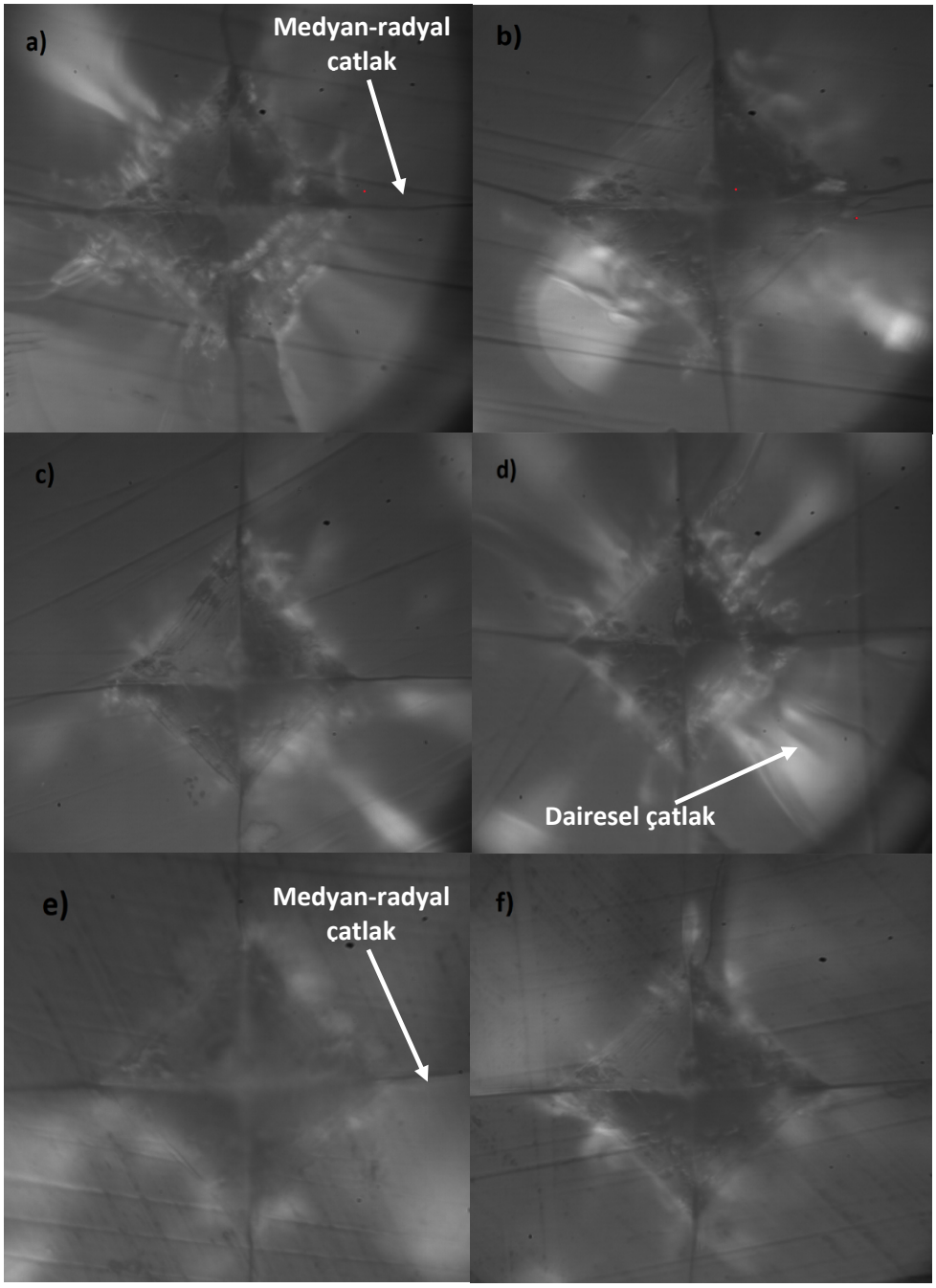
Şekil 4.8. WO3 katkısı ile cam numunelerin sertlik ve kırılma tokluklarındaki değişim

Sentezlenen cam örneklerin oksijen molar hacmi (MOV) ve oksijen paketleme yoğunluğu (OPD) değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.9'da grafiksel olarak gösterilmiştir. WO_3 katkı miktarı ile orantılı olarak cam numunelerin MOV değerleri azalırken OPD değerlerinde ise bir artış olmuştur. WO_3 konsantrasyonu mol olarak %0'dan %20'ye yükseldiğinde camların MOV değerleri, sırasıyla 11,94'ten 10,94 cm3/mol'e azaldı. OPD değeri ise 83,75'ten 98,64'e mol/L'e arttı. Daha büyük iyonik yarıçaplı (1,19 Å) PbO'in yerine daha küçük iyonik yarıçaplı (0,6 Å) WO_3'in camın yapısına girmesi nedeniyle MOV değerlerinde bir azalma olmuştur. OPD'deki artış ise cam yapının daha sıkı bağlandığını gösterir (Issa ve ark., 2018).



Şekil 4.9. Cam örneklerin oksijen molar hacmi (MOV) ve oksijen paketleme yoğunluğu

Şekil 4.10'da cam numunelerin Vickers çentik izleri ve kenarlarındaki çatlakların resimleri gösterilmektedir. Cam numunelere mikro Vickers uç 1000 gr yük 5 sn uygulanarak sertlik ve kırılma toklukları belirlenmiştir. Şekil 4.10'dan da görüleceği gibi tüm cam numunelerin Vickers çentik iz diyagonallerinin dört köşe noktalarında düzgün çatlaklar oluşturulmuştur. İz köşegenlerindeki çatlaklar çoğunlukla radyal ve medyan çatlaklar şeklindedir. Bazı numunelerde kısmen dairesel çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 4.10. Cam numunelere 1N kuvvet uygulandığında Vickers çentik izleri ve oluşan çatlaklar; (a) P (b) PW1 (c) PW3 (d) PW5 (e) PW10 ve (f) PW20

4.3. Radyasyon zırhlama parametreleri sonuçları

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 PW cam sisteminin radyasyon koruma parametreleri (MAC, MFP, HVL, Z_{et}) bir ULEGe detektörü (Canberra) kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir.

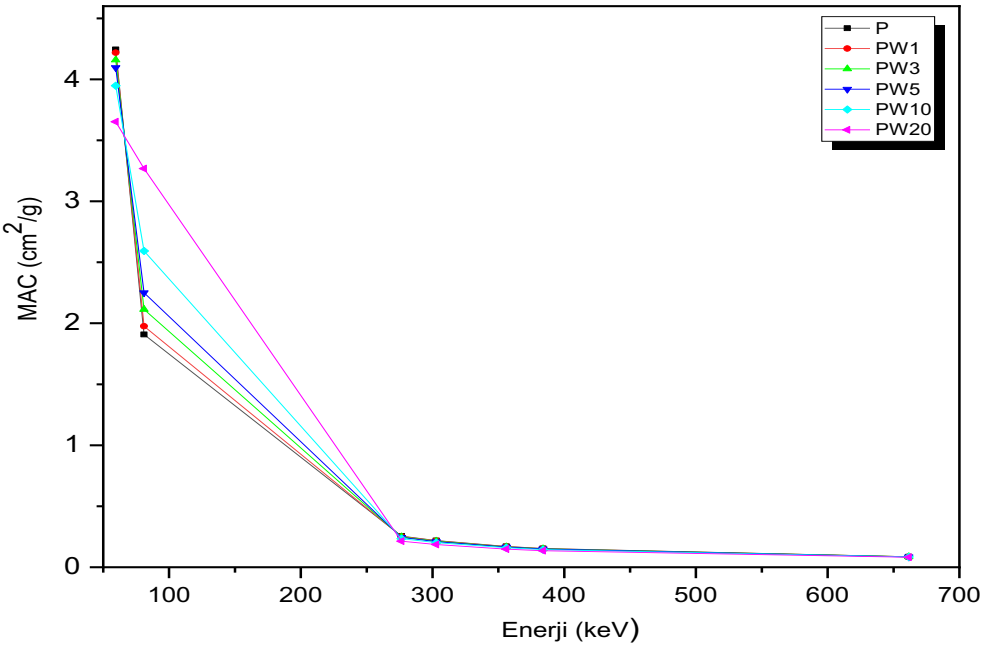
4.3.1. Kütle soğurma katsayısı (MAC)

Deneysel ve teorik MAC değerleri Denkleme 3.19 kullanılarak hesaplanmıştır ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Cam numunelerinin 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki MAC (cm^2/g) değerleri

Enerji (keV)	P		PW1		PW3	
	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
59,54	4,244	4,251±0,264	4,219	4,201±0.227	4,158	4,143±0,178
80,99	1,908	1,895±0,117	1,976	1,976±0.106	2,114	2,102±0,090
276,39	0,255	0,262±0,016	0,253	0,249±0.013	0,249	0,244±0,011
302,85	0,218	0,209±0,013	0,217	0,207±0.011	0,213	0,207±0,009
356,01	0,171	0,177±0,011	0,169	0,175±0.009	0,167	0,172±0,007
383,85	0,154	0,157±0,010	0,153	0,153±0.008	0,151	0,115±0,007
661,62	0,086	0,087±0,005	0,086	0,086±0.005	0,086	0,085±0,004
Enerji (keV)	**PW5**		**PW10**		**PW20**	
	Teorik	**Deneysel**	**Teorik**	**Deneysel**	**Teorik**	**Deneysel**
59,54	4,096	4,063±0,240	3,948	3,931±0.126	3,653	3,641±0,177
80,99	2,250	2,242±0,132	2,593	2,585±0.083	3,268	3,137±0,116
276,39	0,244	0,241±0,014	0,234	0,221±0.007	0,214	0,202±0,010
302,85	0,210	0,202±0,012	0,202	0,201±0.006	0,186	0,175±0,009
356,01	0,165	0,170±0,010	0,160	0,155±0.005	0,149	0,141±0,007
383,85	0,149	0,148±0,009	0,145	0,141±0.005	0,136	0,138±0,006
661,62	0,085	0,084±0,005	0,084	0,084±0.003	0,082	0,082±0,004

Şekil 4.11 ve Çizelge 4.6'den görüldüğü üzere MAC değerleri foton enerjisine bağlıdır ve artan foton enerjisi ile azalma eğilimindedir. Bununla birlikte MAC değerlerinin cam örneklerin kimyasal kompozisyonuna da bağlı olduğu görülmektedir. PbO konsantrasyonunun azalması ile soğurma katsayılarında azalma eğilimi mevcuttur. Düşük enerji bölgesinde MAC değerlerinin en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Düşük foton enerjilerinde ($E < 0.8$ MeV) fotonların madde ile temel etkileşim yolu fotoelektrik soğurmadır. Şekil 4.11 ve Çizelge 4.6'dan görüldüğü üzere 276.39 keV'e kadar MAC değerleri hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu hızlı azalma düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkinin baskın olması ile açıklanır Buna ek olarak cam içeriğinde bulunan yüksek atom numaralı Pb elementinin K tabakası soğurma kıyısı (88,001 keV) civarında azalan PbO konsantrasyonuna ve artan WO_3 konsantrasyonuna bağlı olarak MAC değerlerinde küçük ani artışların olduğu gözlemlenmektedir. 276 keV'den sonra MAC değerlerinin artan foton enerjisine karşı azalmasının daha yavaş olduğu görülmektedir. Bu durum, orta enerjilerde Compton saçılmasının baskın olması ve Compton tesir kesitinin bu bölgede Z/E ile değişimiyle açıklanmaktadır. 80.99 keV'de B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 cam sisteminin MAC değerlerine bakıldığında WO_3 katkısının numunelerin foton soğurma kabiliyetini artırdığını söyleyebiliriz



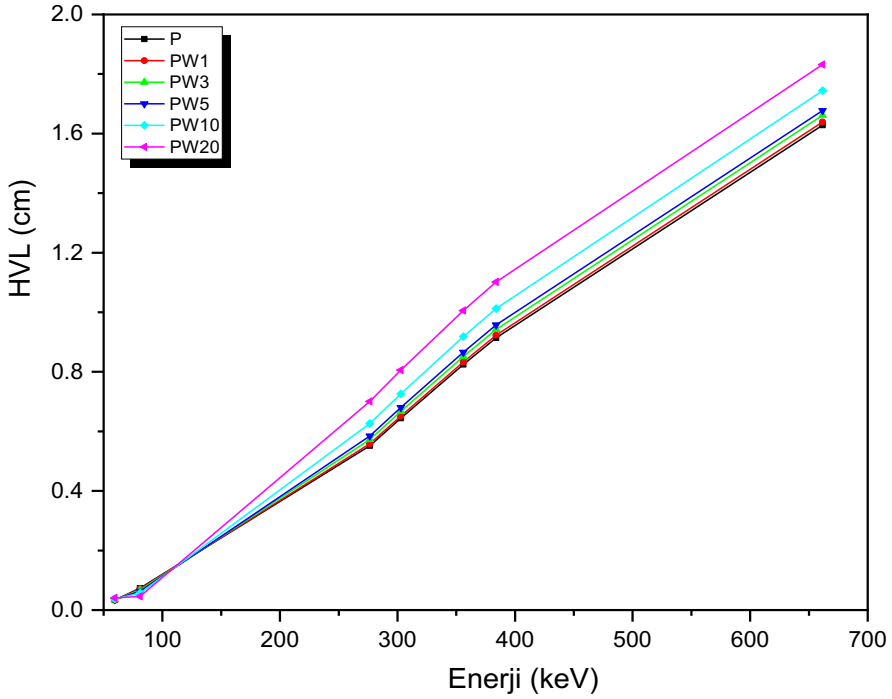
Şekil 4.11. Üretilen camların MAC (cm^2/g) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi

4.3.2. Yarım değer kalınlığı (HVL)

Cam numunelerin 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki HVL değerleri Denklem 3.20 yardımı ile hesaplanmıştır ve Çizelge 4.7 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Üretilen camların 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki HVL (cm) değerleri

Enerji (keV)	P	PW1	PW3	PW5	PW10	PW20
59,54	0,0331	0,033	0,034	0,034	0,037	0,041
80,99	0,0737	0,071	0,067	0,063	0,057	0,046
276,39	0,5512	0,558	0,571	0,586	0,626	0,699
302,85	0,6448	0,650	0,668	0,680	0,725	0,805
356,01	0,8220	0,835	0,852	0,866	0,916	1,005
383,85	0,9128	0,922	0,942	0,959	1,010	1,101
661,62	1,6345	1,641	1,655	1,681	1,744	1,825



Şekil 4.12. Üretilen camların HVL (cm) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi

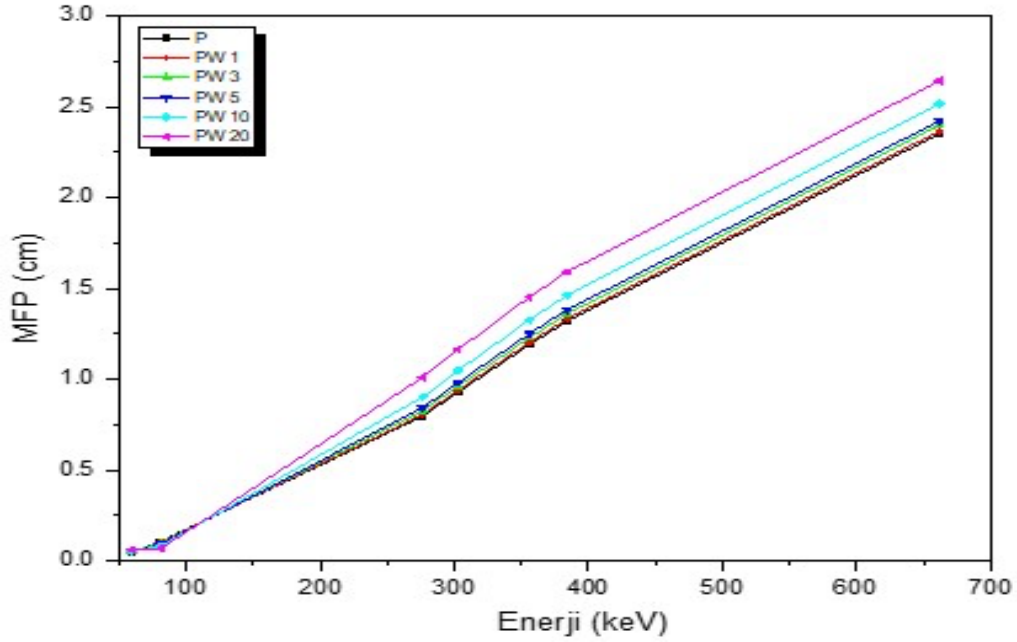
Cam örneklerinin HVL değerlerinin enerji ile değişimi sırasıyla Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12'den görülebileceği gibi, HVL değerleri, %20 PbO katkılı cam numune için çalışılan foton enerjileri aralığında en düşüktür. PbO konsantrasyonunun azalmasıyla HVL değerlerinin arttığını söyleyebiliriz. Daha düşük HVL değerleri üstün radyasyon kalkanı sağlar. Sonuç olarak, üretilen camlara WO_3 katkısının en düşük olduğu P numunesinin HVL değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. WO_3 ile katkılanmasının radyasyon kalkanının etkinliğini azalttığı söylenebilir. HVL değerlerinin bilinmesi radyasyon şiddetini azaltmak için gerekli malzeme kalınlığının belirlenmesinde çok önemlidir. Bu, sonsuz kalınlık ile belirlenen farklı kalınlıktaki cam numunelerinden absorpsiyon deneyleri ile deneysel olarak belirlenebilir.

4.3.3. Ortalama serbest yol (MFP)

Hazırlanan camların 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki MFP değerleri Denklem 3.21 kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.8 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Üretilen camların 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki MFP (cm) değerleri

Enerji (keV)	P	PW1	PW3	PW5	PW10	PW20
59,54	0,047	0,048	0,049384	0,050	0,053	0,0591
80,99	0,106	0,103	0,097133	0,091	0,081	0,066
276,39	0,795	0,805	0,824654	0,845	0,903	1,009
302,85	0,930	0,938	0,964032	0,981	1,046	1,161
356,01	1,186	1,205	1,229	1,249	1,321	1,450
383,85	1,317	1,331	1,356	1,383	1,458	1,588
661,62	2,358	2,368	2,387	2,425	2,516	2,633

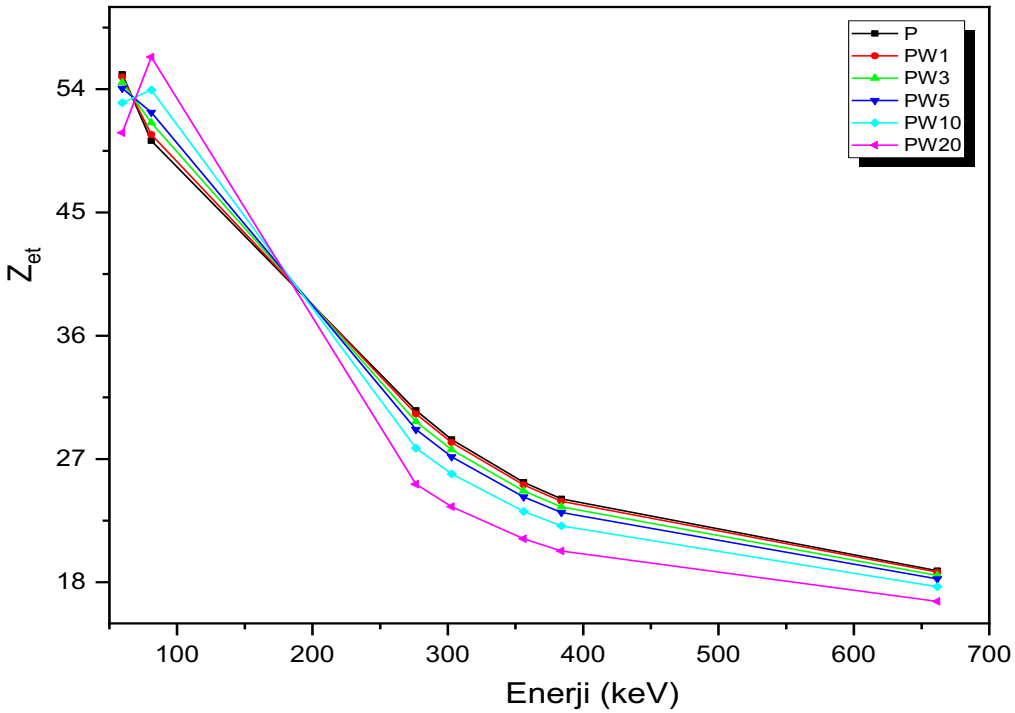


Şekil 4.13. Üretilen camların MFP (cm) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi

Cam örneklerinin MFP değerlerinin enerji ile değişimi sırasıyla Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.13'ten görülebileceği gibi, MFP değerleri, %20 PbO katkılı cam numune (PW20) için çalışılan foton enerjileri aralığında en düşüktür. PbO konsantrasyonunun azalmasıyla MFP değerlerinin arttığını söyleyebiliriz. Daha düşük MFP değerleri üstün radyasyon kalkanı sağlar. Sonuç olarak, üretilen camlara WO_3 katkısının en düşük olduğu P numunesinin MFP değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. WO_3 ile katkılanmasının radyasyon kalkanının etkinliğini azalttığı söylenebilir. MFP değerlerinin bilinmesi radyasyon şiddetini azaltmak için gerekli malzeme kalınlığının belirlenmesinde çok önemlidir. Bu, sonsuz kalınlık ile belirlenen farklı kalınlıktaki cam numunelerinden absorpsiyon deneyleri ile deneysel olarak belirlenebilir.

4.3.4. Etkin atom numarası (Z_{et})

Cam numunelerin 59.54-661.62 keV foton enerji bölgesindeki Z_{et} değerleri Denklem 3.22 kullanılarak hesaplanmıştır ve Şekil 4.14'te verilmiştir.



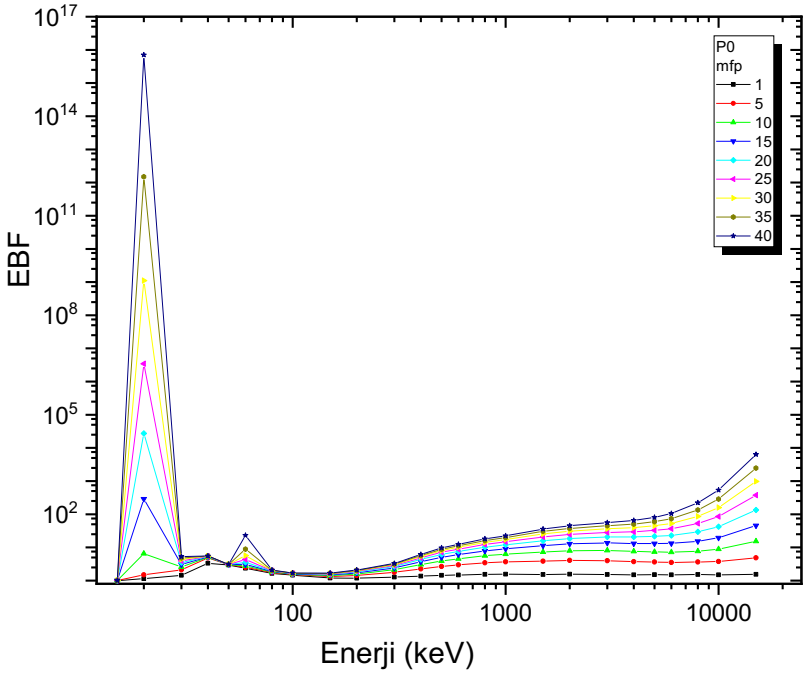
Şekil 4.14. Üretilen camların Zet değerlerinin foton enerjisi ile değişimi

Üretilen cam örneklerin etkin atom numarasının (Z_{et}) foton enerjisi ile değişimi Şekil 4.14'te verilmiştir. Etkin atom numarasının deneysel değerlerinin düşük enerji bölgesinde en yüksek olduğu ve genel olarak camların Z_{et} değerlerinin artan foton enerjisi ile azaldığı Şekil 4.14'ten görülmektedir. Ayrıca Z_{et} değerleri cam numunelerdeki katkı konsantrasyonuna da bağlıdır. Z_{et} PbO konsantrasyonunun azalması ve WO_3 konsantrasyonun artması ile azalmaktadır. Z_{et} değerleri 276.39 keV'e kadar en büyük değerlerini almaktadır. Fotoelektrik etkileşim tesir kesitinin Z^{4-5} ile orantılı olması bu enerjilerde daha yüksek Z_{et} değerlerine sebep olmaktadır. 80.99 keV civarında Pb'nun K tabakası soğurma kıyısı sebebiyle Z_{et} değerlerinde ufak tepeler olduğu görülmektedir. 276.39 keV'den sonra Z_{et} değerlerinin hızlıca düştüğü

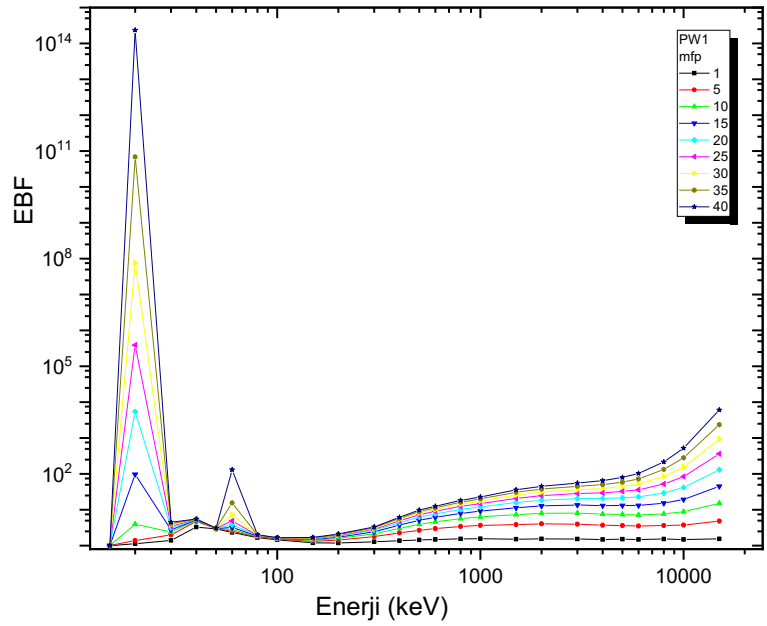
görülmektedir. Compton saçılmasının baskın olduğu orta enerjilerde tüm numuneler için Z_{et} değerleri birbirine çok yakındır.

4.3.5. Maruz kalma buildup faktörü (EBF)

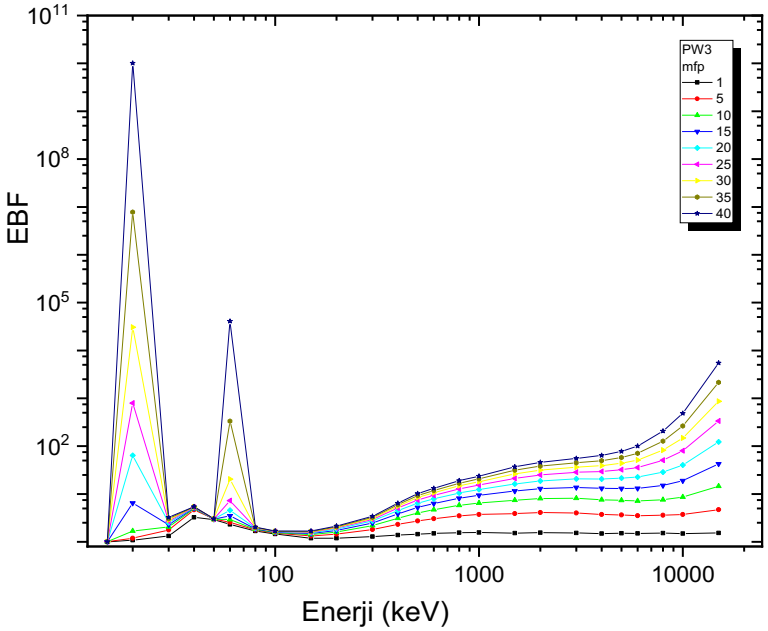
Maruz kalma buildup faktörü (EBF), 0.015-15 MeV enerji bölgesinde her bir cam kompozisyonu için Phy-X/PSD programı kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.15-4.21'de gösterilmiştir.



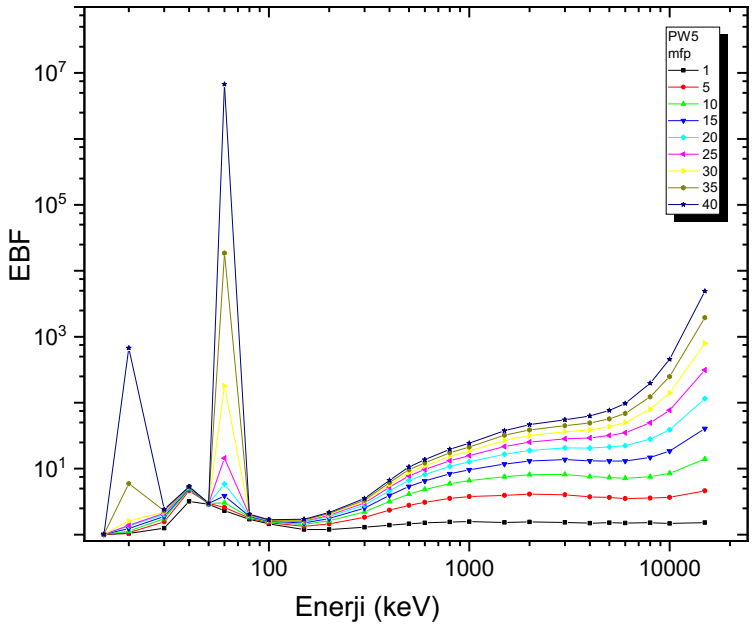
Şekil 4.15. P cam numunesi için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV foton enerji aralığında değişimi.



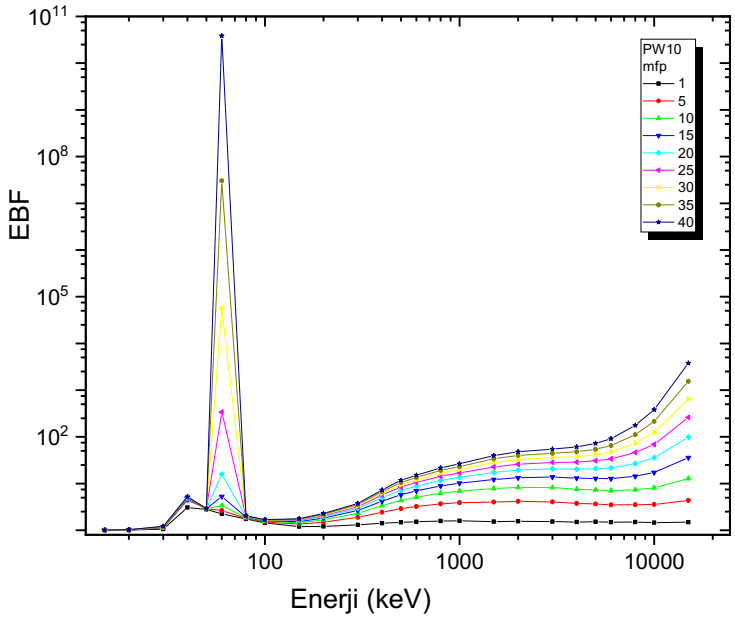
Şekil 4.16. PW1 cam numunesi için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV foton enerji aralığında değişimi



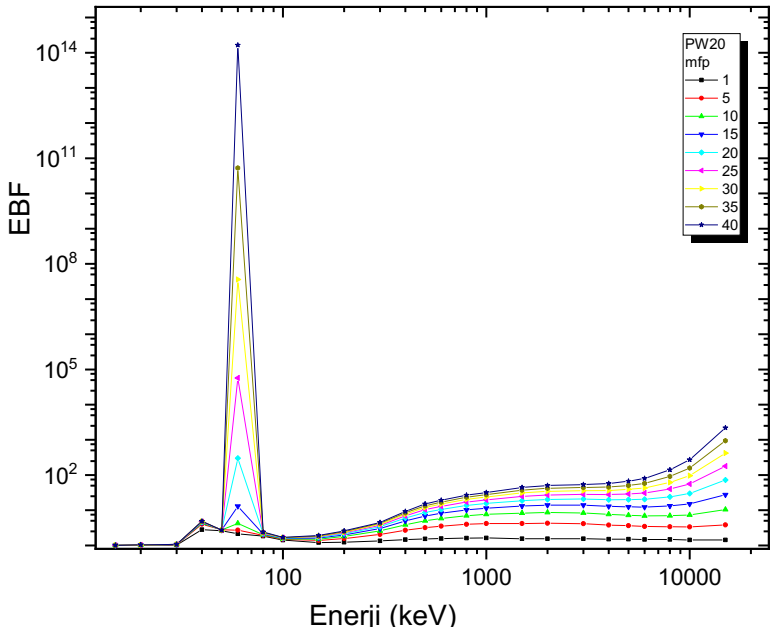
Şekil 4.17. PW3 cam numunesi için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV foton enerji aralığında değişimi



Şekil 4.18. PW5 cam numunesi için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV foton enerji aralığında değişimi



Şekil 4.19. PW10 cam numunesi için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV foton enerji aralığında değişimi.



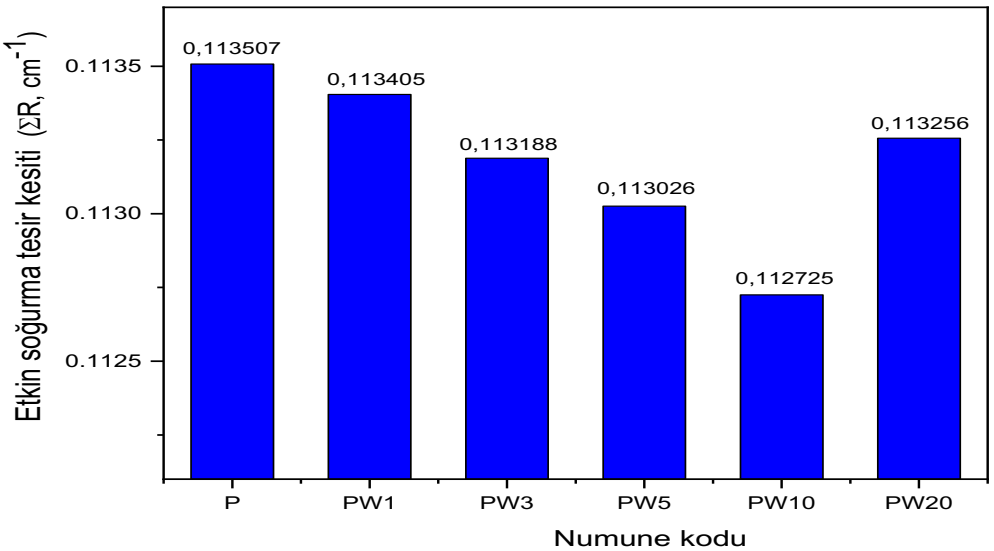
Şekil 4.20. PW20 cam numunesi için EBF değerlerinin 1-40 mfp nüfuz etme derinliklerinde 0,015-15 MeV foton enerji aralığında değişimi.

Üretilen cam numuneler için enerji maruziyet faktörleri (EBF) 0,015-15 MeV enerji aralığında ve 1-40 ortalama serbest yol (MFP) için hesaplanmış ve Şekil 4.15-4.20'de verilmiştir. Şekil 4.15-4.20'den görüldüğü gibi düşük enerji bölgesinde EBF değerleri en küçüktür. Pb elementlerinin K-X ışını soğurma kıyıları nedeniyle ani artışlar olduğu görülmektedir. Bu durum, fotoelektrik etkinin hüküm sürdüğü düşük enerjilerde fotonların ya tamamen yok olması ya da enerjilerinin çoğunu kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bölgede çoğu foton numune içinde soğrulur ve bu EBF değerlerinin küçük olmasına neden olur. Foton enerjisi ve nüfuz etme derinliğinin artmasıyla EBF artmaktadır. Bu artışların şiddetinin cam kompozit içerisindeki oksidin numune içindeki konsantrasyonunun artmasıyla arttığı dikkat çekmektedir. 0,1 MeV'den sonra Compton saçılmasının baskın olması nedeniyle ikincil saçılmalar artmaya başlar. Fotonlar enerjisini çok az kaybeder ya da ikincil saçılmalardan dolayı numune içinden kuvvetlenerek çıkar. Bu durum EBF değerlerinin bu çalışmada üretilen cam sistemlerdeki en yüksek değerleri almasına sebep olur. 1 MeV'in ötesinde EBF değerleri azalmaya başlamaktadır. Bu enerji bölgesinde çift oluşum süreci etkili olmaktadır. Tıpkı fotoelektrik etkide olduğu gibi bu süreçte de fotonlar enerjilerini büyük oranda

kaybederler veya yok olurlar. Numune içeriğine bağlı olarak ikincil saçılmalar meydana gelerek fotonların kuvvetlendirilme durumu da söz konusudur. Genel olarak tüm numunelerde yüksek enerji bölgesinde EBF değerleri azalma eğilimindedir. Şekil 4.15-4.20'den görüldüğü gibi nüfuz etme derinliği arttıkça EBF değerlerinin arttığı görülmektedir. Üretilen cam sistemlerinde %20 PbO (P) ve %19 PbO (PW1) konsantrasyonlu numunelerin en düşük EBF değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Enerji ile EBF değerlerinin numunenin kimyasal kompozisyonuna da bağlı olduğu görülmektedir. Zırhlama çalışmalarında EBF değerlerinin düşük olması istenen bir durumdur. 1,5 MeV'de Compton saçılması baskın olduğundan EBF değerleri nüfuz etme derinliğinin artışıyla hızla artma eğilimindedir. Bu enerjide Compton saçılma tesir kesitinin Z ile değişmesi nedeniyle EBF değerlerinin numunenin kimyasal kompozisyonuna bağlılığı azalmıştır.

4.3.6. Hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti

Hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti Denklem 3.23 kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.21'de verilmiştir.



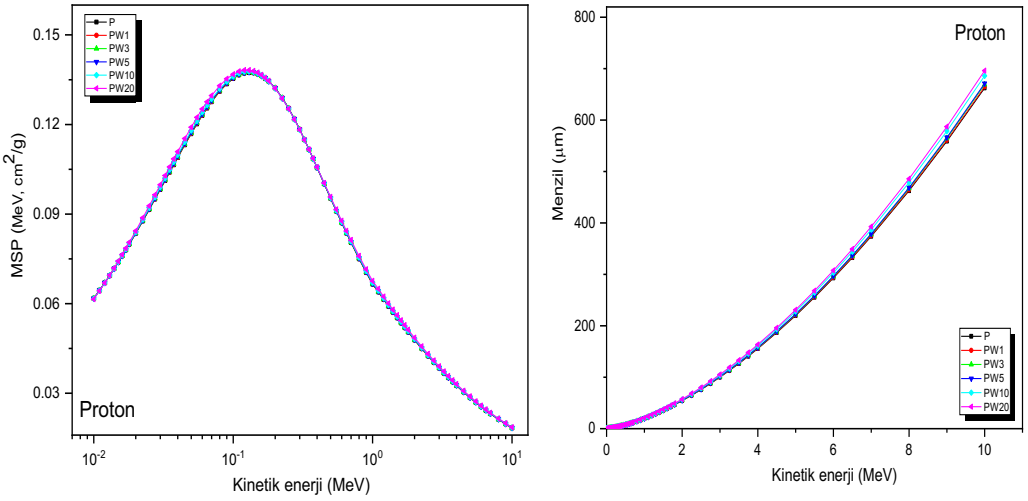
Şekil 4.15. Üretilen camların hızlı nötronlar için etkin soğurma tesir kesiti değerleri

Cam numunelerin nötron azaltma kabiliyetlerini belirlemek için etkin nötron yakalama tesir kesitleri (ΣR) hesaplanmıştır ve sütun grafiği olarak Şekil 4.22'de

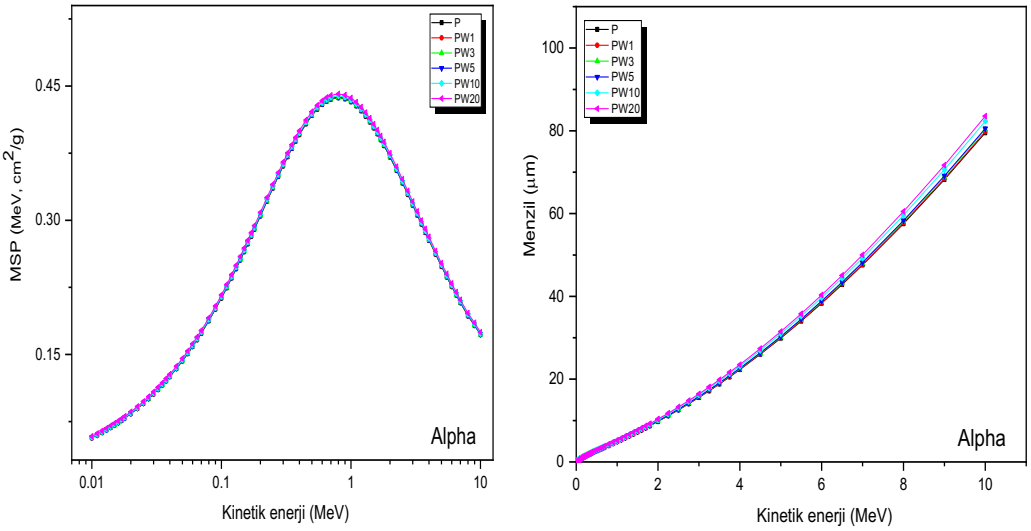
verilmiştir. P, PW1, PW3, PW5 ve PW 10 numunelerinde PbO konsantrasyonu azaldıkça ΣR değerleri azalmıştır. Bu azalmanın sebebi PbO konsantrasyonunun azalmasıyla numune yoğunluğunun da azalmasıdır. PW20 numunesindeki WO_3 konsantrasyonu artmasıyla ΣR değeri artmıştır. Cam kompozitlere %20 PbO'nun (mol) eklenmesiyle ∑R değerlerindeki artış, %20 WO_3'in (mol) eklenmesinden daha fazladır. Ayrıca hazırlanan cam sistemlerin etkin nötron yakalama tesir kesitleri suyun nötron yakalama tesir kesitinden daha yüksektir (∑R=0,1023 cm^{-1}). Elde edilen sonuçlar, hazırlanan cam sistemlerinin gama ışınlarını soğurmasının yanı sıra hızlı nötronları azaltmada da oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

4.6.7. Kütle durdurma gücü ve menzil

Üretilen cam numunelerin kütle durdurma gücü ve menzilleri Denklem 3.24 kullanılarak hesaplanmış ve protonlar için Şekil 4.23 ve alpha parçacıkları için Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.16. Üretilen camların protonlar için kütle durdurma gücü ve menzilin kinetik enerji ile değişimi



Şekil 4.17. Üretilen camların alpha parçacıkları için kütle durdurma gücü ve menzilin kinetik enerji ile değişimi

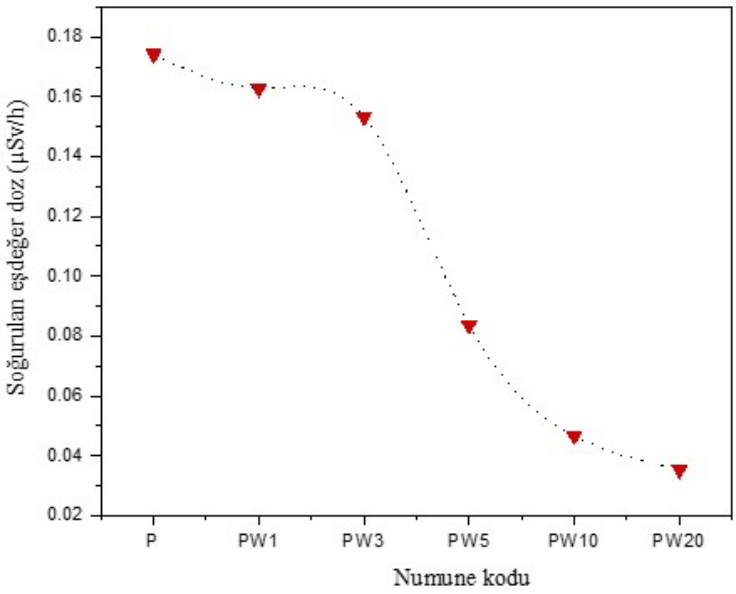
B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 cam sistemleri için SRIM yazılımı kullanılarak MSP ve PR değerleri elde edilmiştir. MSP hesaplamaları, Coulomb etkileşimi yoluyla hedef elektronların iyonlaştırması ve uyarılmalarından dolayı hedef atomların yavaşlama ihtimallerini ortaya koyar. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te proton (H^1) ve alfa (He^{+2}) parçacıkları için 0.01-20 MeV enerjileri aralığında MSP ve PR değerlerinin değişimi verilmiştir. MSP değerleri H^1 için 0,13 MeV ve He^{+2} için 0.81 MeV civarında maksimum olur ve Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'den görüldüğü gibi bu enerjilerden sonra keskin bir şekilde azalmaya başlar. Bununla birlikte H^1 ve He^{+2} için en düşük MSP değeri P0 (%20 PbO) numunesine aittir. Ayrıca MSP değerinin yüksek enerji bölgesinde, cam numunelerin kimyasal içeriklerine bağlı olarak H^1 ve He^{+2} parçacıkları için neredeyse sabit olarak değiştiği görülmüştür. Diğer önemli parametrelerden biri de PR değeridir. PR değerleri parçacığın durmak için girdiği alandan soğurulduğu nokta arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Durdurma gücü (PR) H^1 ve He^{+2} için kinetik enerjinin değişiminden etkilenir. Şekil 23 ve Şekil 24'ten görüldüğü üzere P (%20 PbO) numunesi en düşük PR değerlerine sahiptir.

4.4.Nötron eşdeğer doz ölçüm sonuçları

Üretilen P, PW1, PW3, PW5, PW10 ve PW20 camlarının nötron eşdeğer doz ölçüm değerleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Nötron eşdeğer doz ölçüm değerleri

Numune kodu	**Temel sayma (background) dozu (D_0)**	**Numune mevcutken ölçülen (D_d) eşdeğer doz (µSv/h)**	**Soğurulan eşdeğer doz (µSv/h) ($D_s = D_0 - D_d$)**	**Soğurulan eşdeğer doz yüzdesi ve Deneysel Belirsizlik (%)**
P	0,9669	0,7927	0,1742	18,02±0,0282
PW1	0,9669	0,8041	0,1628	16,84±0,0363
PW3	0,9669	0,8136	0,1533	15,85±0,0381
PW5	0,9669	0,8832	0,0837	8,66±0,0183
PW10	0,9669	0,9202	0,0467	4,83±0,0089
PW20	0,9669	0,9315	0,0354	3,66±0,0078



Şekil 4.18. Üretilen camların nötron eşdeğer doz ölçüm değerleri

Çizelge 4.9'da listelendiği gibi, kaynak ile dedektör arasında numune olmadığında dedektördeki arka plan doz hızı ile kaynak ve dedektör arasında bir numune olduğunda dedektördeki doz oranı arasındaki fark P için 0,1742'dir, PW1 için 0,1628, PW3 için 0,1533, PW5 için 0,0837, PW10 için 0,0467 ve PW20 için 0,0354'dir.Buna göre, hızlı nötron kaynağından yayılan 0,9669 μSv/h dozu P tarafından %18,02, PW1 tarafından %16,84, PW3 tarafından %15,85, PW5 tarafından %8,66, PW10 tarafından %4,83 ve PW20 tarafından %3,66 absorbe edilmiştir. Sonuçlar, P0, PW1 ve PW3 numuneleri tarafından eşdeğer doz soğurma yüzdelerinin birbirine yakın olmasına rağmen, P cam numunesinin en iyi radyasyondan korunma özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Ek olarak, PW20 cam numunesi en zayıf radyasyon koruma özelliklerine sahiptir.

5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

X ışını kırınımı analizi sonucunda WO_3 katkılı camların yapısal analizi araştırılmıştır. Tüm cam numunelerinde amorf yapı gözlemlenmiştir. FT-IR analizleri sonucunda titreşimlerin 400-700, 800-1200, 1200-1600, ve 1600-3000 cm^{-1} olmak üzere dört ayrı bölgede yer aldığı ve bileşim yapısındaki fonksiyonel grupları, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri belirlenmiştir.

Saf ve tungsten katkılı borat camların optik özellikleri UV-Vis ile incelenmiştir. 300–900 nm aralığında alınarak elde edilen çeşitli (W) katkılı B_2O_3'ün UV-vis absorpsiyon spektrumlarını incelenmiştir. Tüm camların 550 nm civarında geniş bir absorpsiyon bandına sahip olduğu görülmüştür. Üretilen camların Uv-vis spektrumlarında keskin bir soğurma kenarı (soğurma başlangıcı) görülmemiştir. Bu üretilen camların amorf yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir.

Cam numunelerin yoğunlukları Arşimed metodu ile hesaplamalar yapılmıştır ve yoğunluk değerlerinin artan WO_3 katkısı ile azaldığı tespit edilmiştir. Numunelerin elastisite modülü, kesme modülü, poisson oranı ve hacim modülü artan WO_3 oranıyla arttığı gözlenmiştir. Bulunan bütün sonuçlar değerlendirildiğinde WO_3 katkılı cam numunelerinin katkısız cam numunesine göre daha iyi elastik özellikleri olduğu gözlemlenmiştir.

Numunelerin sertlik leri Vickers yöntemi ile 5 sn boyunca 1N yük uygulanarak hesaplanmıştır. %5 katkı oranına kadar artış göstermiş olup diğer katkı oranlarında (%10-%20) düşüş göstermiştir.

Bu tez çalışmasında üretilen B_2O_3-PbO-TeO_2-CeO_2-WO_3 cam sisteminin radyasyon ve nötron zırhlama özellikleri de incelenmiştir. Hazırlanan cam yapıların kütle soğurma

katsayıları (MAC), ortalama serbest yol (MFP), yarı değer kalınlık (HVL) ve etkin atom numaraları (Z_{et}) 59.54-661.62 keV enerji aralığında deneysel olarak ölçülmüş ve bu parametreler teorik olarak da hesaplanmıştır.

En yüksek PbO yüzdesine (% 20, mol) sahip cam en iyi radyasyon zırhlama özelliğine sahiptir. Ayrıca WO_3 ilavesi hazırlanan cam bileşimlerin yoğunluk değerlerini artırarak kompakt ağ yapısı ve daha yüksek mekanik/elastik özellikler sağlar. Buna göre, sentezlenmiş cam bileşimlerimiz, başarılı koruyucu malzemeler olduklarını kanıtlamaya katkıda bulunabilecek ve ticari olarak mevcut koruyucu malzemelere potansiyel olarak büyük bir alternatif olarak kanıtlanmaya katkıda bulunabilecek mükemmel mekanik özelliklere sahip olma ek avantajı ile birlikte, nükleer koruma alanında önemli bir role sahip olabilir.

5.2.Öneriler

Radyasyon zırhlama işlemi, radyasyonun insan sağlığına olumsuz yöndeki etkilerini engellemesi bakımından önem arz eden konulardan biridir. Günümüzde radyasyon zırhlama malzemelerinden olan kurşun içeren camlara alternatif olabilecek çevreye zararı olmayan cam malzemeleri geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir.

Yapılan bu çalışma radyasyon kalkanlayıcı camlar üretilmeye ve mekanik özellikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar WO_3 katkılı camların mekanik özelliklerinin iyi olduğunu göstermiştir. WO_3 katkılı camlar kullanılması durumunda mekanik olarak bir dezavantaj göstermeyecektir.

- ✓ Cam numunelerin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenebilir.
- ✓ Cam kompozisyonundaki bileşenler değiştirilip camın yapısı, fiziksel, optik ve radyasyon zırhlama özellikleri incelenebilir.
- ✓ Üretilen camların termal analizleri (DSC ve DTA) yapılarak camların kritik sıcaklıkları belirlenebilir.

KAYNAKLAR

ABDEL-BAKİ, M., ABDEL-WAHAB, F., RADİ, A., and EL-DİASTY, F., 2007. Factors Affecting Optical Dispersion İn Borate Glass Systems. Journal Of Physics And Chemistry Of Solids, 68(8), 1457-1470.

ABOUHASWA, A., SAYYED, M., ALTOWYAN, A. S., AL-HADEETHİ, Y., and MAHMOUD, K., 2020. Evaluation Of Optical And Gamma Ray Shielding Features For Tungsten-Based Bismuth Borate Glasses. Optical Materials, 106, 109981.

ACİKGOZ, A., DEMİRCAN, G., YILMAZ, D., AKTAS, B., YALCİN, S., ve YORULMAZ, N., 2022. Structural, Mechanical, Radiation Shielding Properties And Albedo Parameters Of Alumina Borate Glasses: Role Of CeO_2 And Er_2O_3. Materials Science And Engineering: B, 276, 115519.

AGTİ, F. Z., SOLTANİ, M. T., SANTOS, L. F., MESSAOUDİ, A., GUESMİA, N., and LİGNY, D. D., 2022. Physical, Mechanical Properties And Optical Dispersion İn Sb_2O_3-$NaPO_3$-WO_3 Glasses. Journal Of Non-Crystalline Solids, 576, 121249.

AKMAN, F., KAÇAL, M. R., SAYYED, M. I., and KARATAŞ, H. A., 2019. Study Of Gamma Radiation Attenuation Properties Of Some Selected Ternary Alloys. Journal Of Alloys And Compounds, 782, 315–322.

AKTAS, B., ACİKGOZ, A., YİLMAZ, D., YALCİN, S., DOGRU, K., ve YORULMAZ, N., 2022. The Role Of Teo2 İnsertion On The Radiation Shielding, Structural And Physical Properties Of Borosilicate Glasses. Journal Of Nuclear Materials, 563, 153619.

AKTAS, B., TEKELİ, S., SALMAN, S., 2016. Improvements İn Microstructural And Mechanical Properties Of ZrO_2 Ceramics After Addition Of BaO. Ceramics International, 42, 3849-3854.

AKTAS, B., YALCİN, S., ALBASKARA, M., AYTAR, E., CEYHAN, G., ve TURHAN, Z. Ş., 2022. Effect Of Er_2O_3 On Structural, Mechanical, And Optical Properties Of Al_2O_3-Na_2O-B_2O_3-SiO_2 Glass. Journal Of Non-Crystalline Solids, 584, 121516.

AL-BURİAHİ, M. S., SİNGH, V. P., ALALAWİ, A., SRİWUNKUM, C., and TONGUC, B. T., 2020. Mechanical Features And Radiation Shielding Properties Of TeO_2–Ag_2O-WO_3 Glasses. Ceramics International, 46(10), 15464–15472.

AL-HADEETHİ, Y., SAYYED, M. I., and NUNE, M., 2021. Radiation Shielding Study Of WO_3–ZnO–PbO–B_2O_3 Glasses Using Geant4 And Phys-X: A Comparative Study. Ceramics International, 47(3), 3988–3993.

ALİ, A. A., IBRAHİM, S., AHMED, E. M., and RAMMAH, Y. S., 2022. Influence Of WO_3 On Gamma Radiation Shielding Efficiency, Physical And Optical Properties Of Newly Developed Li_2O – CaO – Bi_2O_3 – B_2O_3 Glasses. Radiation Physics And Chemistry, 198, 110240.

ALZAHRANİ, J. S., LEBEDEV, A. V., AVANESOV, S. A., HAMMOUD, A., ALROWAİLİ, Z. A., MAHMOUD, Z. M. M., OLARİNOYE, I. O., SRİWUNKUM, C., & AL-BURİAHİ, M. S., 2022. Synthesis, Optical Properties And Radiation Shielding Performance Of Teo_2-Na_2O-BaO-WO_3 Glass System. Optik, 261, 169167.

ANSTİS, G.R., CHANTİKUL, P., LAWN, B.R., MARSHALL, D.B., 1981. A Critical Evaluation Of İndentation Techniques For Measuring Fracture Toughness: I-Direct Crack Measurements And II-Strength Method. J. Am. Ceram. Soc., 64, 533-543.

AZLAN, M.N, HALİMAH, M.K, SHAFİNAS, S.Z, DAUD, W.M, 2015. Electronic Polarizability Of Zinc Borotellurite Glass System Containing Erbium Nanoparticles. Materials Express, 5, 211-218(8).

ALBAŞKARA, M., 2017. ErO2 ve CeO2 Katkılı Borosilikat Camların Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s.

BOUKHRİS, I., KEBAİLİ, I., AL-BURİAHİ, M. S., and SAYYED, M. I. 2021. Radiation Shielding Properties Of Tellurite-Lead-Tungsten Glasses Against Gamma And Beta Radiations. Journal Of Non-Crystalline Solids, 551, 120430.

CALLİSTER, W.D., RETHWISCH, D.G., 2014. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (8. Basım) Nobel Yayıncılık, 974 s.

CHANTHİMA, N., KAEWKHAO, J., and LİMSUWAN, P., 2012. Study Of Photon İnteractions And Shielding Properties Of Silicate Glasses Containing Bi_2O_3, BaO And PbO İn The Energy Region Of 1 KeV To 100 Gev. Annals Of Nuclear Energy, 41, 119–124.

CHEEWASUKHANONT, W., LİMKİTJAROENPORN, P., SAYYED, M. I., KOTHAN, S., KİM, H. J., and KAEWKHAO, J., 2022. High Density Of Tungsten Gadolinium Borate Glasses For Radiation Shielding Material: Effect Of WO_3 Concentration. Radiation Physics And Chemistry, 192, 109926.

DOREMUS, R.H., 1994. Glass Science (2. Edition) John Wiley and Sons Inc., New York, 320p.

EGORYSHEVA, A.V., VOLODİN, V.D., MİLENOV, T., 2010. Glass Formation İn The CaO-Bi_2O_3-B_2O_3 And Sro-Bi_2O_3-B_2O_3 Systems. Russ. J. Inorg. Chem. 55, 1810–1817.

FAJANS, K., KREİDL, N., 1948. Stability Of Lead Glasses And Polarization Of İons. J. Am. Ceram. Soc. 31, 105-114.

HİLA, F. C., ASUNCİON-ASTRONOMO, A., DİNGLE, C. A. M., JECONG, J. F. M., JAVİER-HİLA, A. M. V., GİLİ, M. B. Z., BALDERAS, C. V., LOPEZ, G. E. P., GUİLLERMO, N. R. D., and AMORSOLO, A. V., 2021. EpiXS: A Windows-Based Program For Photon Attenuation, Dosimetry And Shielding Based On EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI.8). Radiation Physics and Chemistry, 182, 109331.

IORDANOVA, R., MİLANOVA, M., ALEKSANDROV, L., and KHANNA, A., 2018. Structural Study Of Glasses İn The System B_2O_3-Bi_2O_3-La_2O_3-WO_3. Journal Of Non-Crystalline Solids, 481, 254–259.

ISSA, S. A., KUMAR, A., SAYYED, M., DONG, M., and ELMAHROUG, Y., 2018. Mechanical And Gamma-Ray Shielding Properties Of Teo_2-Zno-Nio Glasses. Materials Chemistry And Physics, 212, 12-20.

ISSA, S. A., RASHAD, M., HANAFY, T. A., and SADDEEK, Y. B., 2020. Experimental İnvestigations On Elastic And Radiation Shielding Parameters Of WO_3-B_2O_3-TeO_2 Glasses. Journal Of Non-Crystalline Solids, 544, 120207.

KAVAZ, E., EKİNCİ, N., TEKİN, H. O., SAYYED, M. I., AYGÜN, B., and PERİŞANOĞLU, U., 2019. Estimation Of Gamma Radiation Shielding Qualification Of Newly Developed Glasses By Using WinXCOM And MCNPX Code. Progress İn Nuclear Energy, 115, 12–20.

KHANNA, A., FÁBİÁN, M., HİRDESH, KRİSHNA, P. S. R., BENMORE, C. J., KAUR, A., KAUR, A., SHİNDE, A. B., RAJPUT, P., and JHA, S. N., 2018. Structural Analysis Of WO3-Teo2 Glasses By Neutron, High Energy X-Ray Diffraction, Reverse Monte Carlo Simulations And XANES. Journal Of Non-Crystalline Solids, 495, 27–34.

KOCABAĞ, D., 1975. Cam: Kimyası, Özellikleri, Uygulaması, Birsen Yayınevi, İstanbul, 417s.

KOÇYİĞİT, D., 2023.Nanoparçacık ve Nadir Toprak İyonu Katkılı Bor Tabanlı Camlar. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2023, 166s.

KOZLOVSKİY, A., BORGEKOV, D. B., SHLİMAS, D. I., and ZDOROVETS, V., 2021. Study Of The Efficiency Of İncreasing The Bi_2O_3 Concentration On The Optical, Radiation Shielding And Strength Characteristics of $0.5TeO_2$-$(0.5-x)WO_3$-xBi_2O_3 glasses. Optical Materials, 120, 111494.

KURUDİREK, M., 2017. Heavy Metal Borate Glasses: Potential Use For Radiation Shielding. Journal Of Alloys And Compounds, 727, 1227–1236.

LAARİEDH, F., SAYYED, M. I., KUMAR, A., TEKİN, H. O., KAUR, R., and BADECHE, T. B., 2019. Studies On The Structural, Optical And Radiation Shielding Properties of $(50 - x)$ PbO – 10 WO_3–10 Na_2O – 10 MgO – $(20 + x)$ B_2O_3 Glasses. Journal of Non-Crystalline Solids, 513, 159–166.

LİNGANNA, K., JU, S., RYU, Y., NAEEM, K., JEONG, H., and KİM, B. H., 2022. Effect Of WO_3 On Physical And Magneto-Optical Properties Of TeO_2–La_2O_3–WO_3 Glasses For Magneto-Optics Application. Results İn Physics, 43, 106069.

MAHMOUD, I. S., ISSA, S. A. M., ZAKALY, H. M. H., SAUDİ, H. A., ALİ, A. S., SADDEEK, Y. B., ALHARBİ, T., and TEKİN, H. O., 2021. Material Characterization Of WO_3/Bi_2O_3 Substituted Calcium-Borosilicate Glasses: Structural, Physical, Mechanical Properties And Gamma-Ray Resistance Competencies. Journal Of Alloys And Compounds, 888, 161419.

MAKİSHİMA, A., MACKENZİE, J.D., 1973. Direct Calculation Of Young's Modulus Of Glass. Journal Of Non-Crystalline Solids, 12, 35-45.

MAKİSHİMA, A., MACKENZİE, J.D., 1975. Calculation Of Bulk Modulus, Shear Modulus And Poisson's Ratio Of Glass. Journal Of Non-Crystalline Solids, 17, 147-157.

MALGE, A., SANKARAPPA, T., SUJATHA, T., DEVİDAS, G. B., and AZEEM, P. A., 2020. Investigation Of Physical And Spectroscopic Properties Of WO_3 Doped Zinc-Lithium-Dysprosium Borotellurite Glasses. Optical Materials, 109, 110282.

MANN, K. S., 2019. Investigation Of Gamma-Ray Shielding By Double Layered Enclosures. Radiation Physics And Chemistry, 159, 207–221.

MASUNO, A., IWATA, T., YANABA, Y., SASAKİ, S., INOUE, H., WATANABE, Y., 2019. High Refractive İndex La-Rich Lanthanum Borate Glasses Composed Of İsolated BO_3 Units. Dalton Trans., 2019,48, 10804-10811.

MİLANOVA, M., ALEKSANDROV, L., YORDANOVA, A., IORDANOVA, R., TAGİARA, N. S., HERRMANN, A., GAO, G., WONDRACZEK, L., and KAMİTSOS, E. I., 2023. Structural And Luminescence Behavior of Eu3+ ions in ZnO-B2O3-WO3 Glasses. Journal Of Non-Crystalline Solids, 600, 122006.

ONARAN, K., 2014. Malzeme Bilimi (13. Baskı) İstanbul: Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 383s.

RAVANGVONG, S., SRİWONGSA, K., GLUMGLOMCHİT, P., PHAMORNSUT, K., YAMPİCHAİ, N., TANTİWATCHARAKULTORN, A., SANGNGOEN, S., and KAEWKHAO, J., 2022. Behaviors of TeO_2-B_2O_3-WO_3 Glass System For İonizing Radiation Shielding Performance: Photon, Protons And Alpha Particles. Materials Today: Proceedings, 65, 2269–2276.

SADEQ, M., and MORSHİDY, H., 2020. Effect Of Samarium Oxide On Structural, Optical And Electrical Properties Of Some Alumino-Borate Glasses With Constant Copper Chloride. Journal Of Rare Earths, 38(7), 770-775.

SAYYED, M. I., AKMAN, F., KAÇAL, M. R., and KUMAR, A., 2019. Radiation Protective Qualities Of Some Selected Lead And Bismuth Salts İn The Wide Gamma Energy Region. Nuclear Engineering And Technology, 51(3), 860–866.

SHELBY, J.E., 2005. Introduction to Glass Science and Technology (2. Edition) Royal Society of Chemistry, New York, 291p.

SHİ, X. ZHAO, ZHU, M., LİU, L., LİU, T. YONG, BAİ, L. TENG, YANG, X. HUİ, CAO, P., and GU, Y., 2023. Effect Of Different Contents of WO_3 and B_2O_3 On The Structure And Thermal, Mechanical, Corrosion Properties Of Phosphate Glass. Ceramics International.

STALİN, S., GAİKWAD, D. K., AL-BURİAHİ, M. S., SRİNİVASU, C., AHMED, S. A., TEKİN, H. O., and RAHMAN, S., 2021. Influence of Bi_2O_3/WO_3 Substitution On The Optical, Mechanical, Chemical Durability And Gamma Ray Shielding Properties Of Lithium-Borate Glasses. Ceramics International, 47(4), 5286–5299.

ŞAKAR, E., ÖZPOLAT, Ö. F., ALIM, B., SAYYED, M. I., and KURUDİREK, M., 2020. Phy-X / PSD: Development of a User Friendly Online Software For Calculation Of Parameters Relevant To Radiation Shielding And Dosimetry. Radiation Physics And Chemistry, 166, 108496.

YASAKA, P., PATTANABOONMEE, N., KİM, H. J., LİMKİTJAROENPORN, P., and KAEWKHAO, J., 2014. Gamma Radiation Shielding And Optical Properties Measurements Of Zinc Bismuth Borate Glasses. Annals Of Nuclear Energy, 68, 4–9.

ZANGANEH, V., 2022. Effect of WO_3 Addition On Mechanical, Structural, Optical, And Radiation Shielding Properties Of Lead Boro Phosphate Glasses System Using Monte Carlo Simulation. Optik, 269, 169900.

ZİEGLER, J. F., and BİERSACK, J. P., 1985. The Stopping And Range Of Ions İn Matter. Treatise On Heavy-Ion Science, 93–129.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Burak Berke SOLAK

Uyruğu : TC

Doğum Yeri ve Tarihi : OSMANİYE – 10.09.1992

Telefon : 0539 795 51 33

e-mail : bbsolak@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Şemsettin Mursaloğlu Anadolu Lisesi, İskenderun, Hatay	2010
Üniversite	Harran Üniversitesi, Şanlıurfa	2018

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2019-2021	Pürsan Pigment Ürünleri A.Ş	Üretim Şefi
2021-Devam ediyor	Simora Mühendislik	Üretim Müdür Yrd.

YABANCI DİLLER

İngilizce