

Bi₂O₃ katkısının emaye frit malzemelerinin fiziksel, yapısal ve Gama/X-Işını koruma performansı üzerindeki etkisi

Ebru YILMAZ^{1*}, Tuğçe Nazlı KAYA², Orhan ŞAHİN², Dilay PAR²,
Fatih ÇALIŞKAN¹

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Serdivan, Sakarya.

²Algortrio Kimya San. ve Tic. A.Ş., Sakarya.

Geliş Tarihi (Received Date): 26.09.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 14.04.2026

Öz

Bizmut, kurşun gibi yüksek atom numarasına ve yüksek yoğunluğa sahip elementler radyasyon zırhlama için en etkili ajanlar arasında yer alır. Bu çalışmanın amacı, emaye uygulamalarında kullanılmak üzere bizmut oksit (Bi₂O₃)–katkısı ile geliştirilen frit malzemesinin fiziksel, yapısal ve radyasyon (gama ve x-ışınlarına) özelliklerinin incelenmesidir. Radyasyon özelliklerini göstermek için radyasyon zırhlama parametreleri belirlenmiş, nihai ürününün fiziksel ve yapısal özellikleri ise konvansiyonel analiz ve inceleme yöntemleriyle incelenmiştir. Frit numunelerinin kütle zayıflama katsayısı (μm) ve yarı değer kalınlığı parametreleri XCOM ile 1,5 keV-5 MeV enerji aralığında hesaplanmıştır. Artan katkı miktarı ile kütle azaltma katsayı değerinde artış meydana gelmiştir. Bizmutun K kenarından elektron koparılması sonucu fotoelektrik olay meydana gelmiştir. Farklı bizmut oksit katkı oranlarına (ağ. % 0,9,18 ve 27) sahip emaye kompozisyonunun sinterlenmesi sonucunda ağırlıklı olarak yapı amorfliğini korumuş olup α- Bi₂O₃ fazı elde edilmiştir. Artan katkı miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri ise sırasıyla 2.456, 2.786, 2.856 ve 3.218 gr/cm³ tür.

Anahtar kelimeler: Frit, emaye, bizmut oksit, radyasyon zırhlama

*Ebru YILMAZ, ebruyilmaz@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7598-1171>
Tuğçe Nazlı KAYA, tugce.nazli@algortrio.com, <https://orcid.org/0000-0003-0460-1949>
Orhan ŞAHİN, orhan.sahin@algortrio.com, <https://orcid.org/0000-0001-6999-2974>
Dilay PAR, dilay.par@algortrio.com, <https://orcid.org/0009-0000-6447-8095>
Fatih ÇALIŞKAN, fcaliskan@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-9568-7049>

The effect of Bi₂O₃ addition on the physical, structural and Gamma/X-Ray protection performance of enamel frit materials

Abstract

The most effective agents for radiation shielding are elements with high atomic numbers and high densities such as bismuth and lead. The aim of this study is to investigate the physical, structural, and radiation shielding properties of a frit material developed with bismuth oxide (Bi₂O₃) additive for potential use in enamel applications. To evaluate its radiation attenuation capabilities, key shielding parameters against gamma and X-rays were determined. The physical and structural characteristics of the final product were analyzed using conventional characterization and examination techniques. The mass attenuation coefficient (μ/ρ) and half-value layer (HVL) parameters of the frit samples were calculated using the XCOM database over the energy range of 1.5 keV to 5 MeV. An increase in the Bi₂O₃ content resulted in a corresponding increase in the mass attenuation coefficient. Photoelectric interactions were observed due to electron ejection from the K-edge of bismuth. Upon sintering of enamel compositions containing varying Bi₂O₃ contents (0, 9, 18, and 27 wt.%), the structure largely retained its amorphous structure, while the minor α - Bi₂O₃ crystalline phase was also detected. The density values of samples are determined as 2.456, 2.786, 2.856, and 3.218 g/cm³, respectively depending on the increasing additive amount.

Keywords: Frit, enamel, bismuth oxide, radiation shielding.

1. Giriş

Emayelerin teknolojik ve estetik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik gereksinimlerde sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji maliyetlerini düşürmeye yönelik endüstrideki ekonomik baskılar, daha düşük sıcaklıklarında uygulanmalarına imkan sağlayan, düşük sıcaklıkta elde edilen fritlerin piyasaya sürülmesini teşvik etmiştir. Her "yeni" frit malzemesi, geniş bir pişirme sıcaklık aralığına sahip olmalıdır. Bu malzemeler yapısında mukavemet, kimyasal kararlılık, termal genleşme ve estetik özellikleri bulundurmanın yanı sıra kimyasal bileşimleri ekolojik döngüye katkı sağlamalıdır. Frit bileşimi, kaplamanın özelliklerini belirlediği için dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Fritler, ağır metallerin toksik özelliklerini cam yapısından uzaklaştırmak için kullanılmaktadır [1-3].

Fritler, neredeyse tüm seramik sırlarının ana bileşenidir. Camsı bir faza ihtiyaç duyulan birçok farklı malzeme bileşiminde fritler bağlayıcı olarak yerini almaktadır. Frit üretimi, ergitme fırınlarında 1350-1550 °C arasında değişen fırın sıcaklıklarında gerçekleştirilmektedir. Frit bileşimini oluşturan hammadde karışımı ergitildikten sonra, yüksek soğutma hızında su içerisinde soğutulmaktadır. Böylece ergiyik küçük cam parçaları halinde katılaşmaktadır. Bu ergitme işlemi, önemli bir enerji tüketimi ve düşük verimlilik ve üretkenlik sağlamaktadır [4]

Günümüzde, radyasyon zırlama uygulamalarında camlar ve cam-seramik malzemeler kullanılmaktadır. Camları etkili bir radyasyon zırlama malzemesi haline getirmek için cam bileşimine Bi₂O₃, PbO, WO₃ ve MoO₃ gibi önemli miktarda ağır metaller

katkılandırılmaktadır [5]. Kurşun, yüksek yoğunluk, düşük ergime noktası, korozyona dayanıklılık, gama ve x-ışınlarına karşı opaklık gibi özelliklerinden dolayı çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Fakat son yıllarda, kurşun gibi toksik elementlerin yerine titanyum dioksit, demir trioksit ve bizmut oksit gibi daha sürdürülebilir oksitler ilave edilerek çevre dostu fritlerin üretimine önem verilmiştir [3]. Bi_2O_3 katkılı camlar yüksek polarize, düşük alan şiddeti ve yüksek değerlikli oksite sahip olmasından dolayı optik alanında ve cam-seramik sektöründe tercih edilmektedir [7]. Bizmut oksit camlar, kurşunsuz, düşük yumuşama noktalı, yüksek kırılma indisli, yüksek yoğunluklu ve radyoaktif ışınlar karşı zırhlayıcı camlar olarak cam ve cam-seramik sektörüne katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla bu tür camların üretilip frit malzemesi olarak kullanımına dair ilgi gün geçtikçe artmaktadır [8].

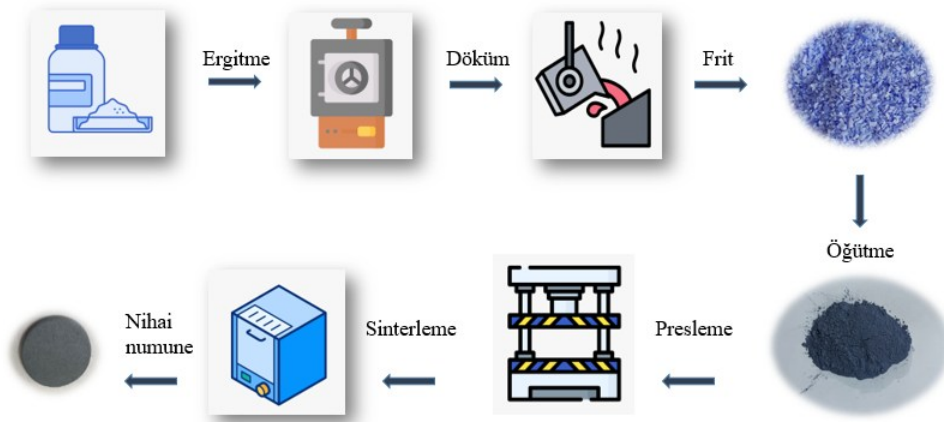
Emaye kaplama genellikle 425 °C'den yüksek bir sıcaklıkta çeşitli metal alt tabakalara uygulanan bir prodestir [9]. Pişirme sıcaklığı esas olarak alt tabakanın türüne ve geometrisine bağlıdır. Düşük karbonlu emaye çeliklerinde levha kalınlığına bağlı olarak 750-890 °C aralığında ve 2-8 dakika (dk) süreyle pişirme uygulanırken, dökme demir parçalarında yaklaşık 730-770 °C sıcaklıkta ve 40 dk'dan daha uzun sürelerde pişirme işlemi gerçekleştirilmektedir [10]. Emaye kaplama özelliklerinin belirlenmesinde kimyasal bileşim önemli bir rol oynamaktadır [11]. Bu çalışma kapsamında bizmut oksit katkılı frit üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu fritler, toz haline getirilerek sinterleme işlemi ile yoğunlaştırılmıştır. Üretilen bu numunelerin radyasyon zırhlama parametreleri XCOM hesaplama programı ile hesaplanmıştır. Hesaplamaların doğruluğunu artırmak, analiz sürecini hızlandırmak ve deneysel aşamada kullanılan sarf malzemesi miktarını azaltmak amacıyla araştırmacılar XCOM gibi bilgisayar tabanlı teorik yazılımlardan yararlanmaktadır [12]. Radyasyon zırhlama parametrelerinin yanı sıra fiziksel ve yapısal özellikleri de incelenmiştir. Bu çalışmada farklı oranlarda ağırlıkça Bi_2O_3 kullanılarak 4 farklı frit reçetesi oluşturulmuştur. Frit reçeteleri seger formülasyonunda değişiklik yapılarak belirlenmiştir. Frit kompozisyonu, ağırlıkça % 0, % 9, % 18 ve % 27 oranlarında Bi_2O_3 katkısı ile katkılandırılmıştır. Bu katkı oranlarına sahip Bi0, Bi9, Bi18 ve Bi27 kodlu dört farklı frit, laboratuvar tipi fırında ergitme yöntemi ile elde edilmiştir. Kırkbınar'ın çalışmasında ise ağırlıkça % 5-20 oranlarında bizmut oksit kullanılarak cam-seramik üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri araştırılmıştır [13]. Elde edilen bu fritler emaye üretiminde kullanılmak üzere Li_2O içermeyen sert bir frit ve pigment ile karıştırılarak silikon bazlı yağ içerisinde 15 dk öğütülerek 45 mikron altı toz boyutuna indirilmiştir. Değirmen formülasyonu Tablo 1'de gösterilmiştir. Toz halindeki frit numuneler sinterleme işlemi sonrasında yoğunlaştırılmıştır.

Tablo 1. Frit bileşiminin değirmen formülasyonu

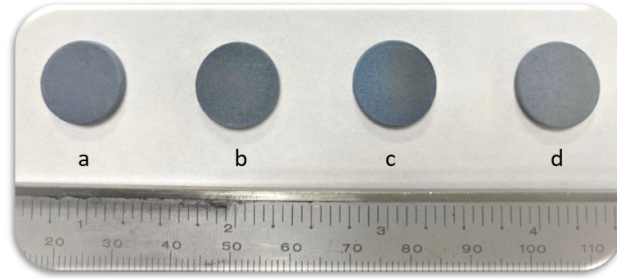
	Bi0	Bi9	Bi18	Bi27
A Friti (%0 Bi_2O_3)	80			
B Friti (%9 Bi_2O_3)		80		
C Friti (%18 Bi_2O_3)			80	
D Friti (%27 Bi_2O_3)				80
Sert frit	20	20	20	20
Siyah pigment	0,5	0,5	0,5	0,5

2. Deneysel çalışmalar

$\text{SiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-ZrO}_2\text{-K}_2\text{O-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiO-CoO-Fe}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ bileşenlerinden oluşan frit reçeteleri hazırlanıp hassas terazide toz tartımları yapılmıştır. 1 saat boyunca laboratuvar tipi pota fırında platin kroze içerisinde $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ergitilmiştir. Ergitilen frit kompozisyonu hızla su içerisine dökülmüştür. Elde edilen fritler etüvde kurutulmuştur. Kurutulduktan sonra belirlenen değirmen formülü, toz boyutu 45 mikron olacak şekilde öğütülmüştür. Öğütülen tozlar 1 cm çapında peletler elde etmek için hidrolik pres yardımı ile şekillendirilmiştir. Şekillendirilen peletler soğuk izostatik pres yardımı ile daha yoğun (sıkıştırılmış) hale getirilmiştir. Yoğunlaştırılan peletler $550\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika tutularak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bunun sonucunda elde edilen nihai sinter numuneler artan bizmut oksit katkı miktarına göre Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney akış şeması



Şekil 2. Bizmut oksit numunelerin sinterlenmiş görüntüleri; ağırlıkça oranları %0-Bi0 (a), %9- Bi9 (b), %18 –Bi18 (c) ve %27-Bi27 (d)

Üretilen frit numunelerin karakterizasyon işlemlerde oksidik kompozisyonu belirlemek için X-Ray Floresanı (XRF), faz analizleri için X-ışını difraksiyonu (XRD) ve numunelerin morfolojik yapısını ortaya çıkarmak için ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları kullanılmıştır. Ayrıca XCOM (foton kesitleri veri tabanı) hesaplama programı kullanılarak farklı enerji aralıklarında radyasyon zırlama parametreleri belirlenmiştir. XCOM, malzemenin fotonla tüm etkileşimlerini teorik olarak dikkate alan ve 1 keV'den 100 GeV'ye kadar herhangi bir element, bileşik veya karışımın toplam kütle azaltma katsayılarını veren bir yazılım programıdır. Farklı kompozit malzemelerin zırlama performanslarının belirlenmesinde basit, ucuz ve temel bir yazılım aracıdır. Tutarlı saçılma, tutarlı saçılma, fotoelektrik soğurma ve çift oluşumu süreçleri

gösterilmektedir. Ayrıca radyasyon zırlama parametrelerinden biri olan kütle azaltma katsayısı hesaplanmaktadır. Bileşikler veya karışımlar için kütle azaltma katsayıları, atomik bileşenlere karşılık gelen miktarların toplamı ile elde edilmektedir. Bileşiklerin kimyasal formülleri ile ağırlıkları girilerek XCOM tarafından hesaplanmaktadır [14].

Frit üretimi için reçeteye göre kullanılan hammaddelerin (% ağırlıkça) oksidik kimyasal bileşimleri dört farklı kompozisyondan oluşmaktadır (Tablo 2). Yapıya bizmut oksit girmesi ile kompozisyonda bulunan silika ve bor miktarlarında azalma söz konusudur. Düşük ergime sıcaklığına ve dar ergime aralığına sahip Bi_2O_3 bileşiği ile katkılanmış frit, yumuşama noktasının artışı (yüksek sıcaklıkta yumuşama) ve fritin ergime aralığının daralmasına neden olmaktadır. Yani bizmut oksit miktarı arttıkça ergime sıcaklığı azalmaktadır. Çünkü Bi_2O_3 cam ağının boşluklarını dolduran ve bağlanmayı zayıflatan bir cam ağı değiştiricisidir [1].

Tablo 2. Frit üretimi için reçeteye göre kullanılan hammaddelerin oksidik kimyasal bileşimi

Kullanılan Hammadde	(% ağı.)			
	Bi0	Bi9	Bi18	Bi27
Na_2O	7,611	7,611	7,611	7,611
K_2O	2,376	2,376	2,376	2,376
Li_2O	3,038	3,038	3,038	3,038
CaO	2,448	2,448	2,448	2,448
B_2O_3	16,395	11,595	6,795	1,995
SiO_2	55,490	53,090	50,690	48,290
Al_2O_3	1,529	1,529	1,529	1,529
F	1,431	1,431	1,431	1,431
ZrO_2	4,480	4,480	4,480	4,480
TiO_2	1,800	1,800	1,800	1,800
P_2O_5	0,280	0,280	0,280	0,280
NiO	1,073	1,073	1,073	1,073
CoO	1,042	1,042	1,042	1,042
Fe_2O_3	0,552	0,552	0,552	0,552
Bi_2O_3	0,000	7,200	14,400	21,600
BaO	0,216	0,216	0,216	0,216
MnO	0,089	0,089	0,089	0,089
CuO	0,012	0,012	0,012	0,012
Cr_2O_3	0,137	0,137	0,137	0,137

3. Sonuçlar ve tartışma

3.1 XRF analiz sonuçları

Özellikle yapı içerisinde bulunan oksit bileşenlerin tayini için X-ışını floresan spektroskopisi (XRF) ile analiz yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. XRF spektrometresi, seramiklerin ve camların kantitatif element tayini için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Frit üretimi sonrası öğütülmüş toz numuneler kullanılarak kimyasal kompozisyonları XRF ile analiz edilmiştir (Tablo 3). Yapılan XRF analizleri, döküm yöntemi ile elde edilen frit bileşimlerinin baştaki cam kimyasal kompozisyonları ile örtüşmektedir. Frit kimyasal bileşimine modifiye edici olarak ilave edilen bizmut oksit

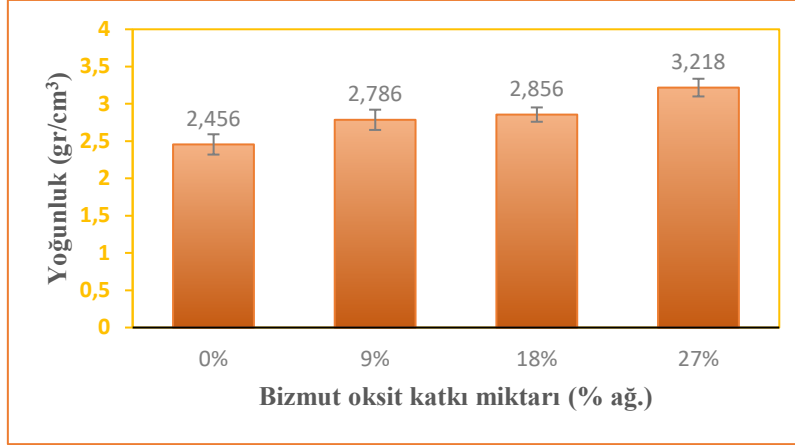
miktarının etkisi, Tablo 3'te belirtilen Bi9 kodlu numune ile görülmektedir. Katkı miktarının artışı sırasıyla % ağırlıkça Bi9 (7,2), Bi18 (14,40) ve Bi27 (21,60) kodlu numunelerde açıkça gözlenmektedir. Tablo 3'deki gösterilen XRF analiz sonuçlarının, değirmen formülünde (Tablo 1.) kullanılan katkı miktarları ile birebir aynı çıkmamasının sebebi frit dışında kullanılan katkı miktarlarının yüzdesel hesaba dahil edilmemesidir. Ağır bir element olan bizmutun bileşime ilave edilmesiyle, silisyum ve bor gibi hafif elementlerin oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, Tablo 2'de sunulan XRF analiz sonuçları ile doğrulanmıştır. Yapılan araştırmalarda farklı malzeme bileşimlerinde hafif element olan borun tayini için XRF analizi tercih edilmiştir [15-17].

Tablo 3. Üretilen frit numunelerinin XRF analiz sonucu

Bileşen Adı	XRF Analiz Sonuçları (% ağı.)			
	Bi0	Bi9	Bi18	Bi27
Na ₂ O	7,124	7,560	7,164	7,314
K ₂ O	2,251	2,785	2,458	2,785
Li ₂ O	3,475	3,047	3,541	3,142
CaO	2,479	2,654	2,412	2,521
B ₂ O ₃	16,495	10,174	5,415	1,880
SiO ₂	55,410	53,254	51,214	48,351
Al ₂ O ₃	1,314	1,452	1,321	1,562
F	1,414	1,653	1,514	1,631
ZrO ₂	4,990	4,421	4,478	4,524
TiO ₂	1,890	1,864	1,624	1,744
P ₂ O ₅	0,289	0,191	0,278	0,195
NiO	0,954	0,981	1,151	0,991
CoO	0,902	0,995	1,124	1,273
Fe ₂ O ₃	0,597	0,567	0,589	0,612
Bi ₂ O ₃	0	7,854	15,451	21,171
BaO	0,234	0,374	0,123	0,100
MnO	0,032	0,058	0,081	0,092
CuO	0,011	0,005	0,009	0,012
Cr ₂ O ₃	0,139	0,111	0,053	0,100

3.2 Fiziksel ve yapısal özellikler

Sinterlenen peletlerin yoğunluk ölçümü Arşimet prensibi ile gerçekleştirilmiştir. Cam sistemine Bi₂O₃ eklenmesi, Şekil 3'te gösterildiği gibi sinterlenmiş numune yoğunluk değerlerini iyileştirmiştir. Bi0, Bi9, Bi18 ve Bi27 numunelerinin yoğunluk değerleri sırasıyla 2.456, 2.786, 2.856 ve 3.218 gr/cm³' dür. Bu sonuç, bor gibi düşük bir atom numarasının bizmut gibi yüksek bir atom numarası ile yer değiştirmesi sonucunda oluşmuştur [18]. Fakat yapıya bizmut oksidin girmesi sonucu silika miktarında azalma meydana gelmiştir. Bu yüzden sinterleme sırasında cam oluşumu yeterince gerçekleşmemiş olup yapıda gözenekler kalmıştır. Yapıya bizmut oksitin girmesi yoğunluk artışına sebep olsa da gözenek artışı olması yoğunluk değerlerinin literatüre göre az çıkmasına sebep olmuştur. Tablo 3' te yer alan XRF sonuçlarına da bakıldığında SiO₂ ve Bi₂O₃ miktarlarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum cam ağ yapısında Bi-O bağ oluşumuna teşvik etmektedir. Bu bağ yapısında bulunan oksijen atomları, bizmut atomuna daha zayıf bağ ile bağlanmış olup cam yapının bozulmasına ve bağ sıklığının azalmasına sebep olmaktadır [18].

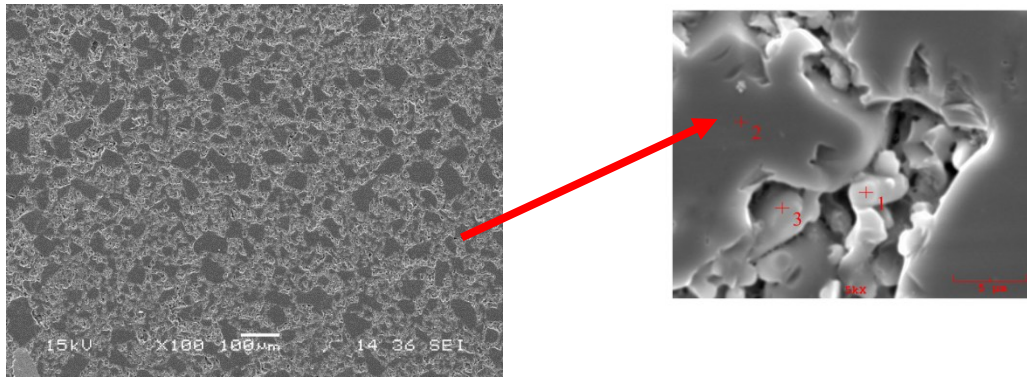


Şekil 3. Bizmut oksit katkılı numunelerin yoğunluk değerleri

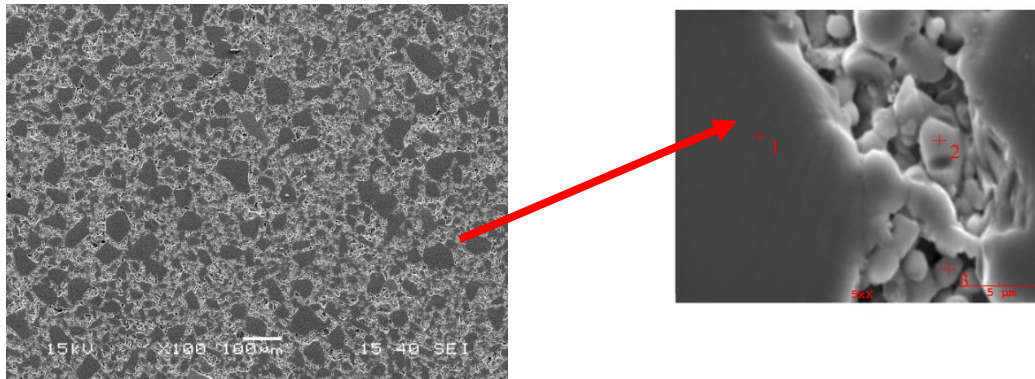
Sinterlenmiş numunelerin morfolojik yapısı, taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazında 15 kV ivme voltajı ile incelenmiştir. Mikroyapı görüntüsünden anlaşıldığı üzere, yapıya giren ağırlıkça bizmut oksit miktarı arttıkça mikro yapıda net bir değişim meydana gelmektedir (Şekil 4). Düşük sıcaklıklarda sıvı faz oluşturabilen Bi_2O_3 , sinterleme sırasında yoğunlaşmayı hızlandırması nedeniyle sinterleme ajanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Artan bizmut oksit katkı miktarı ile yapının camlaşma eğilimi artmış olup yoğun bir mikroyapı görüntüsü elde edilmiştir. Elde edilen yoğunluk değerleri ile bu durum örtüşmektedir. Yapıda ağır metal oksitlerden bizmut oksidin bulunmasının numunenin yoğunluğuna olumlu yönde etkisi olmuştur. %27 katkılı bizmut oksit numunesi, mikroyapı ve yoğunluk değerlerinden anlaşılabileceği üzere, daha yoğun bir yapıdadır (Şekil 4d). %18 katkılı bizmut oksit numunesinin morfolojik yapısında ise daha ağırsı bir yapı meydana gelmiştir (Şekil 4c). Frit bileşimindeki ağırlıkça Bi_2O_3 bileşenin artışı Bi-O-Bi çapraz bağlarının kopmasına sebep olup köprü oluşturamayan oksijen atomları oluşturmaktadır. Bu da B-O ve Si-O bağlarından daha zayıf olan Bi-O bağlarının sayısında artışa ve cam geçiş sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, Bi_2O_3 içeriğinin artmasının camlaşma kabiliyetini olumsuz etkilediği sonucuna ulaşılabilir. [20,21]. Ayrıca yüksek Bi_2O_3 oranına sahip camların kristalleşme sıcaklığı da azalmaktadır [22]. Sinterleme işlemi ile birbirine temas eden noktalardan difüzyon başlayarak partiküller yoğunlaşma davranışı sergilemektedir. Yoğunlaşma ilerledikçe açık gözenekler küçülerek elimine olmaktadır. Bu süreci sıcaklık, sıvı faz miktarı ve türü etkilemektedir. Bi_2O_3 - SiO_2 faz diyagramında SiO_2 miktarı azalıp Bi_2O_3 miktarı arttıkça, sıvı faza geçiş sıcaklığının düştüğü görülmektedir [23].

Aynı şartlarda katkısız olan referans numunenin (BiO) sinterlenme sonrası yoğunlaşmasına bakıldığında, genel olarak yoğunlaşmanın gerçekleştiği (2.456 g/cm^3) ancak tanelerin birleşme bölgelerinde (triple point) gözenekli, açık kalan, kuru bölgelerin olduğu görülmektedir. Bi_9 numunesinin yoğunlaşmasına bakıldığında bizmutun sisteme girmesiyle yoğunlaşma davranışında bir miktar iyileşme olduğu (2.786 g/cm^3) ancak gözeneklerin halen belirgin olduğu görülmektedir. Bi_{18} numunesinde artan bizmut oranıyla yoğunlaşmanın desteklendiği (2.856 g/cm^3) ve gözeneklerin belirgin şekilde küçüldüğü ve porozitelerin gittikçe izole olduğu görülmektedir. Çalışmadaki en yüksek bizmut oranı olan Bi_{27} kompozisyonunun mikroyapısının önemli ölçüde yoğun olduğu (3.218 g/cm^3) görülmektedir. Düşük seviyelere düşen gözeneklerin yoğun bölgelerde tamamen izole edildiği görülmüştür. Cam sistemine %27 civarında bizmut oksit girişiyle

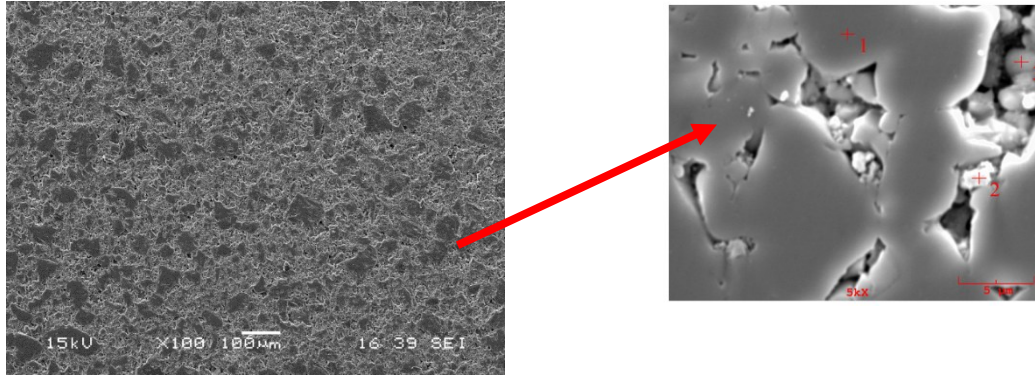
yoğunluk miktarında meydana gelen %31'lik belirgin artış SEM resimleri ile de net şekilde doğrulanmıştır. Kırmızı okla işaretlenmiş bölgeler ise yoğunlaşmanın daha büyük büyütmedeki görselidir. Katkı oranının artışı ile malzemenin yoğunlaşma davranışında net bir artış gözlenmekte olup daha yoğun bir numune (Bi27) elde edilmiştir. Bu eğilimi anlamak için en önemli noktası, $465,96 \text{ g.mol}^{-1}$ bir mol kütlesine sahip olan bizmut oksidin (Bi_2O_3) özelliklerinde yatmaktadır. Friti oluşturan bileşenler ile bizmut oksidin atom kütlesi karşılaştırıldığında, bizmut oksidin daha yüksek atom kütlesine sahip olduğu görülmektedir. Bu da birim hacim başına kütle artışına neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü bizmut oksit miktarı arttıkça yoğunluk da yükselmektedir [21]. Ancak buradaki yoğunluk farklılığına katkı sağlayan bir husus da, sistemde daha düşük yoğunluklu SiO_2 (2.65 g/cm^3) yerine daha yüksek yoğunluğa sahip Bi_2O_3 (8.9 g/cm^3) girişidir. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere yapıda farklı renkte bölgeler (siyah-gri) oluşmaktadır. Siyah bölgeler silika oluşumunun bir görüntüsüdür [24].



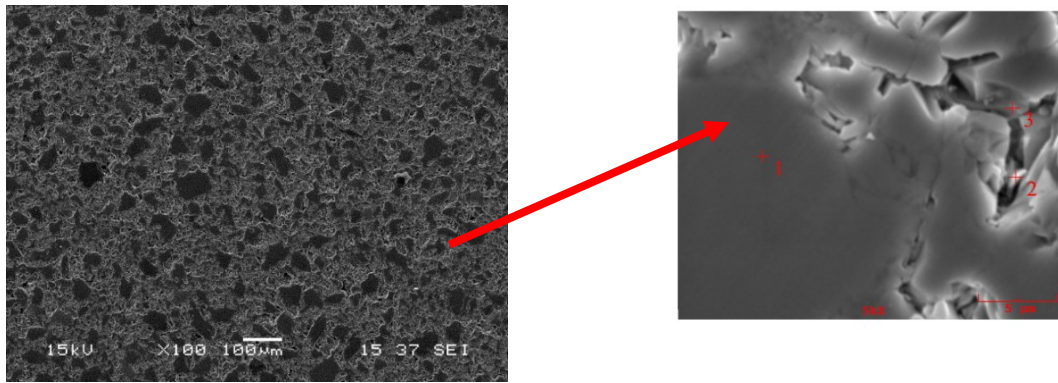
(a) - Bi0



(b) - Bi9



(c) - Bi18



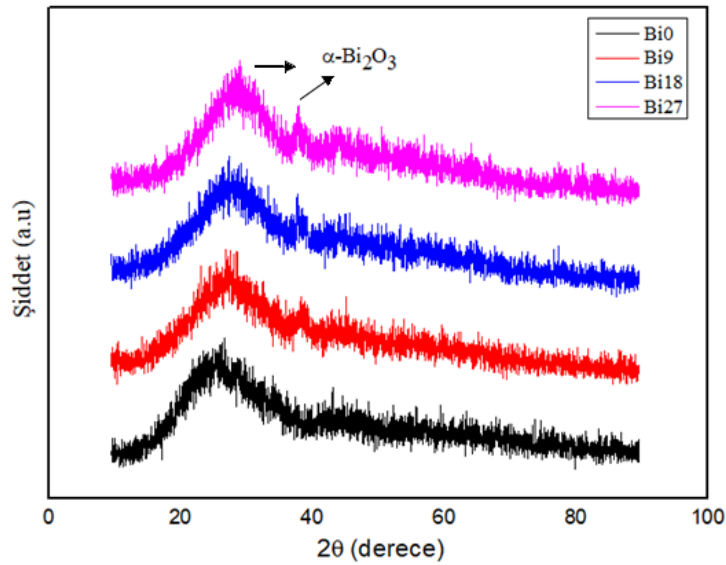
(d) - Bi27

Şekil 4. Bizmut oksit katkılı numunelerin SEM sonuçları; ağırlıkça oranları %0 (a), %9 (b), %18 (c) ve %27 (d)

3.3 XRD analizi sonuçları

Üretilen numunelerdeki (X-ışını 20 μm civarına kadar sızar) fazları belirlemek için 10° ile 90° arasındaki 2θ aralığında X-ışını kırınımı (XRD) analizi kullanılmıştır. Şekil 5'te gösterilen numunelerin 20° ile 40° aralığındaki X-ışını kırınımı incelendiğinde genel olarak kristalin piklerin olmadığını gösteren geniş bant aralığı yani amorf bir yapı gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, bu geniş bantta herhangi bir keskin pik gözlemlenmemesinden dolayı ürünün çoğunlukla amorf bir yapı sergilediği doğrulanmaktadır. Kaky ve arkadaşları [18], Bi_2O_3 katkısının cam yapısı üzerindeki etkisini incelemek için numuneleri geleneksel cam döküm yöntemi ile üretmişlerdir. Elde edilen numunelerin XRD analiz sonuçlarında geniş bir amorf tepe gözlenmiş olup herhangi bir kristal pike rastlanmamıştır. Bu durum, hazırlanan camların amorf yapıya sahip olduğunu ve uzun menzilli kristalin düzen içermediğini göstermektedir. Effendy ve arkadaşları [25], $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2$ bileşimine sahip cam numunelerin XRD analizinde kristal faz oluşmadığını ve numunelerin amorf yapısını koruduğunu rapor etmişlerdir. Kim ve arkadaşları [22], ürettikleri $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ bileşimine sahip camlarda bizmut oksidin etkisini incelemiştir. %40 oranında Bi_2O_3 , cam bileşimine ilave edildiğinde 480°C sıcaklıkta 2 saat sinterleme işlemi yapılmasına rağmen yapı amorf durumunu korumaktadır. Katkı artışı ile daha düşük sıcaklıklarda kristalleşme başlamaktadır. Bu çalışmada ise en yüksek (ağırlıkça %27) bizmut oksit oranına sahip yapının büyük

kısımının cam olarak kaldığı Şekil 5'teki XRD sonuçları ile desteklenmektedir. 550 °C'de 30 dakika sinterlenen tüm numuneler artan bizmut oksit miktarına bağlı olarak kristalleşmeye başlamıştır. Aynı şartlar altında ağırlıkça %27'den daha az bizmut oksit oranına sahip numuneler sinterlendiğinde ise XRD analizinde pik şiddetlerinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bizmut oksit miktarı arttıkça kristalleşmenin başladığı sıcaklık azalmaktadır [26]. Ayrıca bizmut oksidin en yüksek pikleri 20° ile 40° aralığında yer almaktadır [27]. Bizmut oksidin karakteristik amorf tepe noktası, artan bizmut oksit miktarı ile daha da keskinleşmiştir. Ayrıca yapıya bizmut oksit girmesi ile XRD paterninde 28° [28] ve 39°'de bizmut oksidin varlığı tespit edilmiştir. Simona ve arkadaşlarının çalışmasında [29], bizmut oksidin farklı sıcaklıklarda (300-400-500-600°C) gerçekleşen polimorf dönüşümü XRD paterninde belirtilmektedir. 600 °C'de oluşan Bi₂O₃'ün monoklinik alfa polimorfu 39°'de gözlenmektedir. Numunelerin elde edilen XRD sonuçları ile yapılan çalışmalar birbirini desteklemektedir.



Şekil 5. Bizmut oksit katkılı numunelerin XRD sonuçları

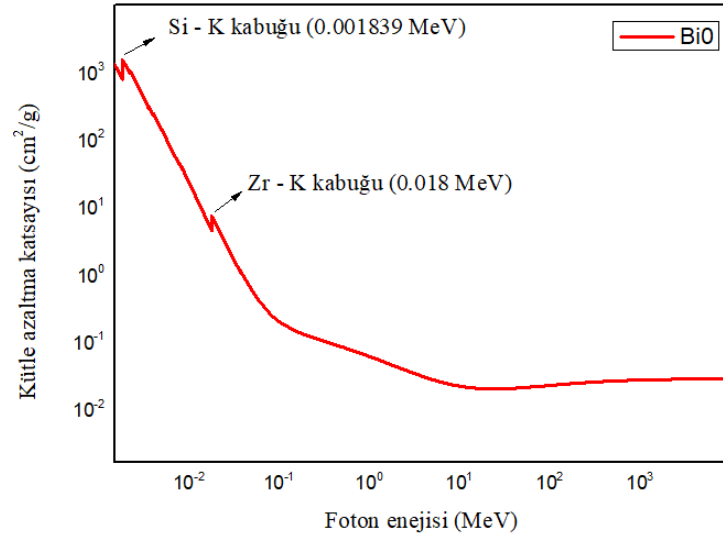
3.4 Radyasyon zırlama özellikleri

Sinterlenmiş numunelerin 1,5 keV-5 MeV foton enerji aralığında kütle zayıflama katsayısı değerleri elde edilmiş olup logaritmik bir ölçekte Şekil 6'da gösterilmektedir. Daha düşük enerji seviyelerinde, foton-madde etkileşim mekanizması olarak fotoelektrik olay gerçekleşmektedir. Foton enerjisi, K-kabuğunun bağlanma enerjisine yakın olduğunda sapma daha büyük olur ve foton K-kabuğunun bağlanma enerjisinden uzaklaştıkça sapma azalır. Düşük enerji aralığında foton-madde etkileşimi sonucu fotoelektrik olay gerçekleşmiş olup kütle azaltma katsayı değerleri elde edilmiştir (Tablo 4). Katkısız üretilen numunede sırasıyla Si ve Zr elementlerinin K kabuklarından 1839 ve 18000 eV foton enerjisi ile elektron kopmuştur. Bu enerjilerde kütle azaltma katsayıları sırası ile 1542 cm²/g ve 7,54 cm²/g olarak elde edilmiştir. Si ve Zr elementlerinin K kabuklarının bağlanma enerjileri sırasıyla 1840 ve 17996 eV'dur. NIST XCOM'dan elde edilen standart teorik değerlere bakıldığında bu değerler görülmektedir [30,31]. BiO numunesinin kimyasal kompozisyonunda ağırlıkça %55 silisyum oksit bulunmasından dolayı silisyumun K kabuğundan elektron koparılması sonucu bir pik açığa çıkmıştır. Yani silisyum atomundan elektron kopması sonucu bir pik oluşmuştur. Frit numunesinin bileşiminde yüksek atom numarasına sahip Zr elementinin bulunmasının radyasyonun absorbe edilmesi için önemli bir faktör oynadığı Şekil 6a'da gösterilmiştir. Zirkonya ,

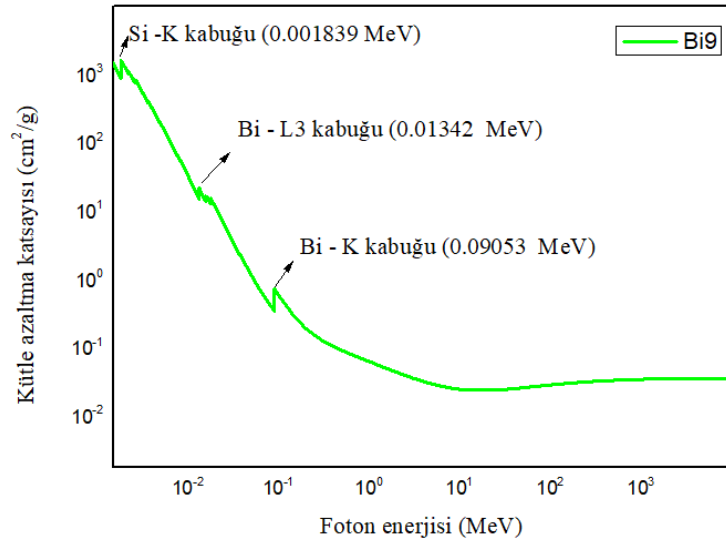
cam esaslı sistemlerde kullanılmak üzere potansiyel radyasyon zırhlama malzemelerinden biridir. Bunun nedeni, nispeten yüksek atom numarasına (40) ve kütle numarasına (91,22) sahip olmasıdır. Bu sayede x-ışınları ve gama ışınları gibi yüksek enerjili radyasyonu absorbe edebilmektedir. Yüksek yoğunluğu sayesinde ZrO_2 , daha düşük atom numaralarına sahip diğer malzemelere göre radyasyonu daha etkili bir şekilde engelleyebilmektedir [32]. Daha sonra yapıya bizmut oksit bileşeninin girmesi ile bizmutun K ve L3 kabuğundan elektron kopması sonucunda kütle azaltma katsayısındaki değişiklik Şekil 6b'de gösterilmektedir. Ağırlıkça artan bizmut katkı miktarı ile kütle azaltma katsayısı değerlerinde artış meydana gelmiştir. Bizmut oksit miktarının artışına bağlı olarak 90,53 keV (0,09053 MeV) enerjisinde Bi-K kenarında keskin bir absorpsiyon kenarı gözlenmiştir [33]. Şekil 6c ve Şekil 6d'de bu pik şiddeti net bir şekilde görülmektedir. Bi_2O_3 içeriği arttıkça, düşük enerjili fotonların bizmut atomlarıyla etkileşime girme ve fotoelektrik absorpsiyona uğrama olasılığı da artmaktadır [34]. Bootjomchai ve arkadaşlarının ürettiği baryum-bizmut-borosilikat camlarının kütle zayıflama katsayılarının sonuçları, yüksek atom numaralı bizmut elementinin ağırlık oranındaki artışından dolayı artmıştır [35]. Bu çalışmada ise düşük enerji aralığında, bizmut oksit katkı oranının artışına bağlı olarak kütle azaltma katsayısı değerleri artmıştır. Bi0, Bi9, Bi18 ve Bi27 numuneleri maksimum ve minimum kütle azaltma katsayı değerleri sırasıyla 1542-0,03 cm^2/g , 1593-0,03 cm^2/g , 1623-0,03 cm^2/g ve 1642-0,03 cm^2/g 'dir. Bagheri ve arkadaşların çalışmasında elde edilen kütle azaltma katsayı değerleri yapılan çalışmayla birebir uyumlu çıkmıştır [36].

Tablo 4. Frit numunelerinin kütle azaltma katsayı değerleri(cm^2/g)

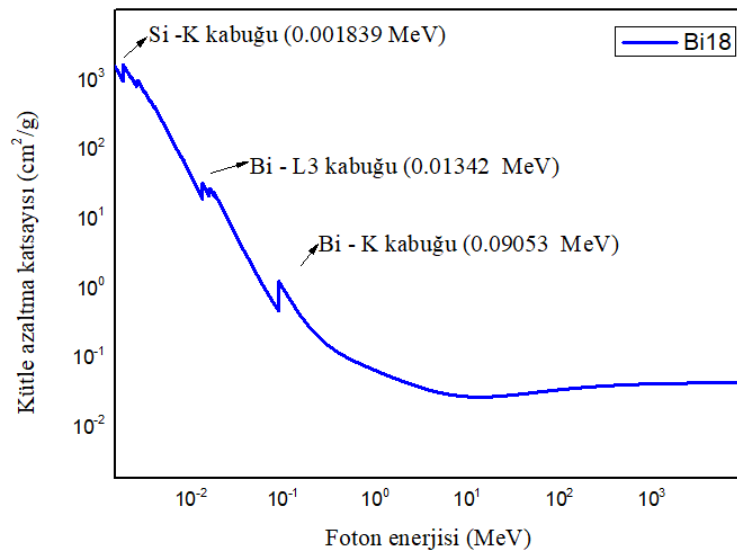
Enerji (MeV)	Bi0	Bi9	Bi18	Bi27
0,0015	1347,00	1458,00	1538,00	1615,00
0,001839	1542,00	1593,00	1623,00	1642,00
0,003	492,90	614,10	733,00	820,70
0,006	89,39	96,95	118,70	138,00
0,008	42,94	53,21	65,63	76,61
0,01	24,23	15,08	19,04	22,28
0,01342	10,53	15,83	23,40	29,28
0,015	7,68	13,95	20,66	25,87
0,018	7,54	11,72	17,70	22,28
0,03	1,94	2,30	3,48	4,38
0,05	0,60	0,77	1,10	1,36
0,09053	0,23	0,60	0,97	1,26
0,1	0,21	0,29	0,42	0,52
0,2	0,13	0,13	0,15	0,17
0,6	0,08	0,07	0,07	0,07
0,8	0,07	0,06	0,06	0,06
1	0,06	0,06	0,06	0,06
2	0,04	0,04	0,04	0,04
3	0,04	0,03	0,03	0,03
4	0,03	0,03	0,03	0,03
5	0,03	0,03	0,03	0,03



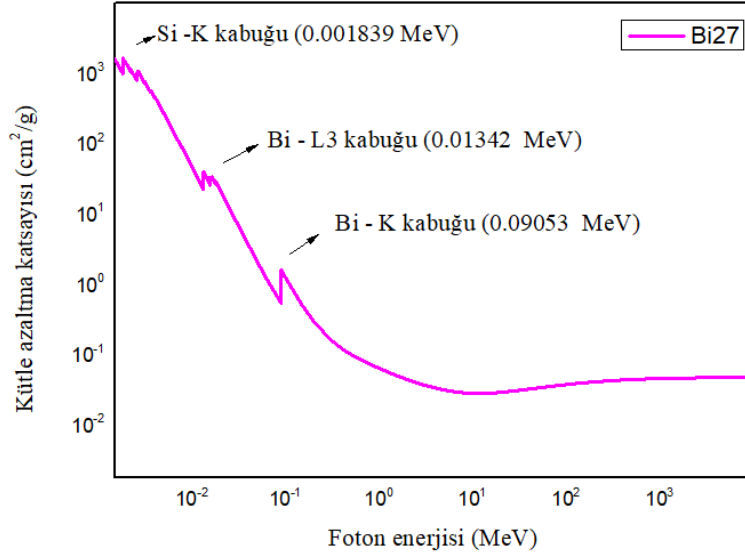
Şekil 6a. Bi0 numunesinin kütle azaltma katsayısı



Şekil 6b. Bi9 numunesinin kütle azaltma katsayısı



Şekil 6c. Bi18 numunesinin kütle azaltma katsayısı



Şekil 6d. Bi27 numunesinin kütle azaltma katsayısı

Radyasyon zırhlama parametrelerinden bir diğeri ise yarı değer kalınlık değeridir. Bu parametre, gelen radyasyon şiddetini yarıya indiren malzeme kalınlığının belirlenmesi ile elde edilmektedir. Ağırlıkça % 0, 9, 18 ve 27 bizmut oksit oranına sahip malzemenin en düşük ve en yüksek yarı değer kalınlık değerleri sırasıyla 0.00020-9.86 cm, 0.00016- 8.87 cm, 0.00015-8.28 cm ve 0.00013-7.10 cm'dir (Tablo 5).

Artan foton enerjisine bağlı olarak bizmut oksit katkılı numunelerin kalınlığında artış söz konusu olmaktadır. Fakat aynı enerji seviyesinde, bizmut oksit miktarının ağırlıkça artışı malzeme kalınlığında azalmaya neden olmuştur [34]. En yüksek bizmut oksit oranına sahip Bi27 kodlu numune, aynı enerji seviyelerinde daha az malzeme kalınlığına sahiptir. Hendi ve arkadaşları [37], $\text{TeO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3$ cam bileşimine sahip numunelerin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek amacıyla Geant4 Monte Carlo simülasyonu kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, cam yapısındaki Bi_2O_3 miktarının artmasıyla yarı değer kalınlığı (HVL) değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Bu durum, Bi_2O_3 'ün yüksek atom numarası ve yoğunluğundan dolayı gama fotonları ile etkileşim olasılığını artırmaktadır. Ratep ve arkadaşlarının çalışmasında [38] Bi_2O_3 oranının artışı, camın kalınlığını ve üretim maliyetini azaltmıştır. Bi_2O_3 konsantrasyonu % 0'dan % 10'a arttığında, üretilen camların yarı kalınlık değeri, 3,99 cm'den 3,73 cm'ye düşmüştür. Sonuç olarak artan bizmut oksit katkı miktarı ile malzemenin radyasyon zırhlama performansı iyileşmiştir.

Tablo 5. Frit numunelerinin yarı değer kalınlık değerleri(cm)

Enerji (MeV)	Bi0	Bi9	Bi18	Bi27
0,0015	0,00020	0,00016	0,00015	0,00013
0,001839	0,00018	0,00015	0,00014	0,00013
0,003	0,00056	0,00040	0,00033	0,00026
0,006	0,00314	0,00255	0,00203	0,00155
0,008	0,00654	0,00465	0,00368	0,00279
0,01	0,01159	0,01642	0,01268	0,00962
0,01342	0,02668	0,01564	0,01032	0,00732
0,015	0,03659	0,01775	0,01169	0,00828
0,018	0,03727	0,02113	0,01364	0,00962
0,030	0,14474	0,10758	0,06940	0,04892
0,050	0,46863	0,32097	0,22023	0,15812
0,090	1,23113	0,41381	0,24789	0,17003
0,10	1,36845	0,86145	0,57674	0,41329
0,20	2,17955	1,91248	1,60529	1,28780
0,60	3,52414	3,47212	3,32137	2,90540
0,80	4,02268	3,90518	3,77082	3,32174
1	4,47934	3,95066	3,81729	3,36448
2	6,37930	5,65837	5,49457	4,85990
3	7,82357	7,68674	7,32111	6,37771
4	8,95869	8,36429	7,88243	6,81343
5	9,86809	8,87695	8,28520	7,10937

4. Genel sonuçlar

Bu çalışma kapsamında elde edilen bizmut oksit katkılı frit numunelerin radyasyon zırlama parametreleri 1,5 keV -5 MeV foton enerji aralığında belirlenmiştir. Elde edilen maksimum ve minimum kütle azaltma katsayıları değerleri sırasıyla 1542-0,03 cm²/g, 1593-0,03 cm²/g, 1623-0,03 cm²/g ve 1642-0,03 cm²/g'dır. Düşük enerjilerde radyasyon zırlama performansı daha etkili olup fotoelektrik olay gerçekleşmiştir. Yarı kalınlık değerleri ise katkı miktarının artışına bağlı olarak aynı foton enerji seviyelerinde azalmıştır. Tüm bileşimlerde elde edilen yarı kalınlık değerleri artan foton enerjisi ile artış göstermiştir. Frit bileşiminden elde edilen emaye yapısı ağırlıklı olarak amorf yapıya olup α - Bi₂O₃ fazı ortaya çıkmıştır. XRD analiz sonucunda oluşan pik şiddeti, artan katkı miktarı ile artış göstermiştir. Bizmut oksit katkılı fritlerin yoğunlaşma davranışı katkı miktarının artışı ile artmıştır. Numunelerin yoğunlaşma davranışı ile elde edilen yoğunluk değerleri örtüşmektedir. Bi0, Bi9, Bi18 ve Bi27 numunelerinin yoğunluk değerleri sırasıyla 2.456, 2.786, 2.856 ve 3.218 gr/cm³' dür. Sonuç olarak, artan bizmut oksit miktarı numunelerin radyasyon zırlama performansına, yapısal ve fiziksel özelliklerine olumlu yönde etkisi olup emaye uygulama alanında kullanımına olanak sağlamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Litwinek, E., Izak, P., Wójcik, Ł., Gajek, M., Leśniak, M., & Mastalska-Popławska, J. (2020). The effect of the addition of bismuth (III) oxide on the properties of low-melting boron frits: part 1. **Journal of the Australian Ceramic Society**, 56, 363-369.
- [2] Garland, B. T. (1986). The designing of products utilising the special properties of vitreous enamel. **Materials & Design**, 7(1), 44-48.
- [3] Rossi, S., Russo, F., & Calovi, M. (2021). Durability of vitreous enamel coatings and their resistance to abrasion, chemicals, and corrosion: a review. **Journal of Coatings Technology and Research**, 18, 39-52.
- [4] Romero, M., Robla, J. I., Padilla, I., García-Hierro, J., & López-Delgado, A. (2018). Eco-efficient melting of glass frits by concentrated solar energy. **Solar Energy**, 174, 321-327.
- [5] AbuAlRoos, N. J., Amin, N. A. B., & Zainon, R. (2019). Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. **Radiation Physics and Chemistry**, 165, 108439.
- [6] Ogawa, M., Nakajima, Y., Kubota, R., & Endo, Y. (2008). Two cases of acute lead poisoning due to occupational exposure to lead. **Clinical toxicology**, 46(4), 332-335.
- [7] Mahamuda, S., Swapna, K., Rao, A. S., Jayasimhadri, M., Sasikala, T., Pavani, K., & Moorthy, L. R. (2013). Spectroscopic properties and luminescence behavior of Nd³⁺ doped zinc alumino bismuth borate glasses. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 74(9), 1308-1315.
- [8] Singh, S. P., & Karmakar, B. (2012). Bismuth oxide and bismuth oxide doped glasses for optical and photonic applications.
- [9] Faust, W. D. (2009). Enamels, porcelain or vitreous. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**.
- [10] Russo, F., Rossi, S., & Compagnoni, A. M. (2021). Porcelain enamel coatings. **Encyclopedia**, 1(2), 388-400.
- [11] Lejeune, A., Benedetto, A., Steyer, P., Trillaud, V., Jamart, J., Meille, S., ... & Chevalier, J. (2025). Role of crystallization on the thermomechanical behavior of enamels used for automotive application. **Journal of the European Ceramic Society**, 45(5), 117106.
- [12] Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., & Kurudirek, 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.
- [13] Kirkbınar, M. (2025). Physical, chemical, mechanical and radiation shielding properties of ZrO₂-B₂O₃-SiO₂ based waste glass ceramics containing different Bi₂O₃ concentrations. **Radiation Physics and Chemistry**, 113176.
- [14] Marzban, H., Soleimani, B., Dastjerdi, M. C., & Mokhtari, J. (2025). Development and characterization of polyethylene containing bismuth oxide powder as gamma ray shielding. **Radiation Physics and Chemistry**, 112866.
- [15] Sanchez-Ramos, S., Bosch-Reig, F., Gimeno-Adelantado, J. V., Yusa-Marco, D. J., Domenech-Carbo, A., & Berja-Perez, J. A. (2000). Validation of a method for the determination of boron in ceramic materials by X-ray fluorescence spectrometry. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, 55(11), 1669-1677.

- [16] Finkelshtein, A. L., Dergin, A. A., Nepomnyashchikh, A. I., Amosova, A. A., & Chubarov, V. M. (2022). X-Ray Fluorescence Determination of the Boron Content in Lithium Borate Glasses. **Glass Physics and Chemistry**, 48(1), 6-9.
- [17] Ricardo, P., Wiesmann, J., Nowak, C., Michaelsen, C., & Bormann, R. (2001). Improved analyzer multilayers for aluminium and boron detection with x-ray fluorescence. **Applied Optics**, 40(16), 2747-2754.
- [18] Kaky, K. M., Sayyed, M. I., Hamad, M. K., Biradar, S., Mhareb, M. H. A., Altimari, U., & Taki, M. M. (2024). Bismuth oxide effects on optical, structural, mechanical, and radiation shielding features of borosilicate glasses. **Optical Materials**, 155, 115853.
- [19] Swami, R., Shukla, A. K., Sreenivas, K., Deepa, S., Rathi, P. L., & Kumar, P. S. (2025). Effects of Bi₂O₃ as sintering aid on the microstructure and electrical properties of La₂Ti₂O₇ ceramics. **Applied Physics A**, 131(4), 1-19.
- [20] Gao, G., Hu, L., Fan, H., Wang, G., Li, K., Feng, S., ... & Chen, H. (2009). Effect of Bi₂O₃ on physical, optical and structural properties of boron silicon bismuthate glasses. **Optical Materials**, 32(1), 159-163.
- [21] Biswas, D., Patra, D., Hota, S. B., Das, A., Modak, N., Mondal, R., & Kabi, S. (2025). Influence of bismuth content on the properties of glass-ceramics with composition xBi₂O₃-(0.40-x) B₂O₃-0.15 ZnO-0.45 P₂O₅: Synthesis, structural, thermal analysis, and dielectric relaxation process. **Physica B: Condensed Matter**, 697, 416728.
- [22] Kim, B. S., Lim, E. S., Lee, J. H., & Kim, J. J. (2007). Effect of Bi₂O₃ content on sintering and crystallization behavior of low-temperature firing Bi₂O₃-B₂O₃-SiO₂ glasses. **Journal of the European Ceramic Society**, 27(2-3), 819-824.
- [23] Hongwei Guo, Crystallization Kinetics of Bi₂O₃-SiO₂ Binary System, **Advances in Glass Science and Technology** Edited by Vincenzo M. Sglavo, 2018, DOI: 10.5772/intechopen.74177
- [24] Li, W., Xu, C., Xie, A., Chen, K., Yang, Y., Liu, L., & Zhu, S. (2021). Microstructure Study of Phase Transformation of Quartz in Potassium Silicate Glass at 900 C and 1000 C. **Crystals**, 11(12), 1481.
- [25] Effendy, N., Ab Aziz, S. H., Kamari, H. M., Zaid, M. H. M., Budak, C. E. A., Shabdin, M. K., ... & Wahab, S. A. A. (2020). Artificial neural network prediction on ultrasonic performance of bismuth-tellurite glass compositions. **Journal of Materials Research and Technology**, 9(6), 14082-14092.
- [26] Schwarz, C. M., Kang, M., Altemose, Q., Raichle, K., Schnable, B., Grabill, C., ... & Kuebler, S. M. (2020). Processing and properties of novel ZnO-Bi₂O₃-B₂O₃ glass-ceramic nanocomposites. **Journal of Alloys and Compounds**, 820, 153173.
- [27] Artamonov, D. A., Tsibulnikova, A. V., Slezhkin, V. A., Kozhevnikov, A. S., Samusev, I. G., Lyatun, I. I., & Bryukhanov, V. V. (2023). Nonradiative Energy Transfer in Bi₂O₃/Tm₂O₃ Powders under IR Excitation at Liquid Nitrogen Temperature. **Crystals**, 13(3), 534.
- [28] Rao, L. S., Hussain, S., Navalika, A., & Hila, F. C. (2024). Morphology, structural, and radiation shielding characteristics of Bi₂O₃-B₂O₃-Cr₂O₃: ZrO₂ glass ceramics. **Ceramics International**, 50(6), 9811-9819.
- [29] Condurache-Bota, S., Tigau, N., & Constantinescu, C. (2020). Effect of substrate temperature on bismuth oxide thin films grown by pulsed laser deposition. **SN Applied Sciences**, 2(3), 417.
- [30] Kumar, A. M., Manjula, G., & Rao, A. N. (2021). Measurement of mass attenuation coefficient of ZIRCONIUM (Zr), Zirconium Chloride (ZrCl₄) and

- Zirconium Silicate (ZrSiO_4) near the K-edge using synchrotron Radiation. **Materials Today: Proceedings**, 38, 2927-2934.
- [31] Loisel, G. P. (2016). X-Ray Absorption and Emission Energies of the Elements (No. SAND2016-8603D). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- [32] Putra, O. A., Faniandari, S., & Syamputra, D. N. I. (2024). Effect of ZrO_2 on radiation shielding properties of $x\text{ZrO}_2$ -(55-x) B_2O_3 -15 Bi_2O_3 -10 MgO -20 PbO glass: XCOM and Phy-X/PSD database software. **International journal of research**, 11(11), 79-88.
- [33] Dong, M. G., Sayyed, M. I., Lakshminarayana, G., Ersundu, M. Ç., Ersundu, A. E., Nayar, P., & Mahdi, M. A. (2017). Investigation of gamma radiation shielding properties of lithium zinc bismuth borate glasses using XCOM program and MCNP5 code. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 468, 12-16.
- [34] Alhakami, M. H., Abouhaswa, A. S., Alhubiti, N. A., & Taha, T. A. M. (2025). Investigation of optical and radiation shielding properties in bismuth oxide-doped barium borate glasses. **Nuclear Engineering and Technology**, 57(9), 103633.
- [35] Bootjomchai, C., Laopaiboon, J., Yenchai, C., & Laopaiboon, R. (2012). Gamma-ray shielding and structural properties of barium–bismuth–borosilicate glasses. **Radiation Physics and Chemistry**, 81(7), 785-790.
- [36] Bagheri, R., Moghaddam, A. K., & Yousefnia, H. (2017). Gamma ray shielding study of barium–bismuth–borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCOM program, and available experimental data. **Nuclear Engineering and Technology**, 49(1), 216-223.
- [37] Hendi, A. A., Rashad, M., & Sayyed, M. I. (2020). Gamma radiation shielding study of tellurite glasses containing V_2O_5 and Bi_2O_3 using Geant4 code. **Ceramics International**, 46(18), 28870-28876.
- [38] Ratep, A., Abdelaziem, A., Hanfi, M. Y., Mahmoud, K. A., & Kashif, I. (2024). Enhancing gamma-ray shielding with bismuth oxide-infused boron oxides. **Optical and Quantum Electronics**, 56(2), 143.