



ZnO Katkılı Bazı Cam Örneklerinin Kütle Zayıflama Katsayılarının Monte Carlo ile Hesaplanması

Monte Carlo Estimation of Mass Attenuation Coefficients of Some ZnO-doped Glass Samples

Aycan Şengül ^{1*}

¹ Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri, Antalya, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: aycansahin@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 03.01.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 08.03.2023

DOI:10.21205/deufmd.2023257518

Atıf şekli/How to cite: ŞENGÜL, A. (2023). ZnO Katkılı Bazı Cam Örneklerinin Kütle Zayıflama Katsayılarının Monte Carlo ile Hesaplanması. DEUFMD, 25(75), 751-759.

Öz

Bu çalışma, Monte Carlo yöntemi kullanılarak ZnO katkılı bazı cam örneklerinin toplam kütle zayıflama katsayılarını hesaplamayı amaçlamaktadır. Simülasyonlar basitçe, silindirik şekilde soğurucu bir malzeme, NaI(Tl) detektörü, kolimatör ve soğurucuya doğru paralel bir ışın olarak yönlendirilen mono-enerjik fotonlar yayan nokta kaynaktan oluşmaktadır. Problem geometrisindeki tüm bileşenler, numune dışındaki malzemelerde herhangi bir etkileşimi önlemek için vakum bir küre ile çevrelenmiştir. Simülasyon düzeneği bu şekliyle, saçılan fotonların dedektördeki toplam akıya katkı yapması engellenmiştir. Simülasyonlar, 10 keV-20 MeV enerji aralığında 39 farklı foton enerjisinde GAMOS 6.2 paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma çinko oksitin cam örneklerine ilave edilmesinin cam örneklerinin radyasyon soğurma özelliklerini artırdığını göstermiştir. Çalışmanın sonuçları XCOM değerleri ile karşılaştırıldığında iyi bir uyum görülmektedir. Monte Carlo tekniğinin, basit bir model geometrisi kullanarak, geniş bir enerji aralığında, kütleli zayıflama katsayılarının hesaplanması için bir alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Monte Carlo, Foton, Kütle zayıflama katsayısı, Cam, GAMOS

Abstract

This study aims to calculate the total mass attenuation coefficients of some ZnO-doped glass samples using the Monte Carlo method. The simulations simply consist of a cylindrical absorber material, a NaI(Tl) detector, a collimator, and a point source emitting mono-energetic photons directed as a parallel beam towards the absorber. All components in the problem geometry are surrounded by a vacuum sphere to prevent any interference with materials other than the sample. In this way, the simulation setup prevented the scattered photons from contributing to the total flux in the detector. The simulations were carried out using the GAMOS 6.2 package with 39 different photon energies in the energy range of 10 keV-20 MeV. In this study, it was shown that the addition of zinc oxide to glass samples increased their radiation absorption properties. A good agreement is seen when the results of the study are compared with the XCOM values. The results revealed that the Monte Carlo technique can be used as an alternative for calculating mass attenuation coefficients over a wide energy range using a simple model geometry.

Keywords: Monte Carlo, Photon, Mass Attenuation Coefficients, Glass, GAMOS

1. Giriş

Radyasyon, tıbbi uygulamalardan, endüstriyel ve nükleer tesislere kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonlar, malzeme ortamında iyonlaşma ve uyarılma etkileşimlerine neden olur ve bu süreçte enerji aktarırlar. İyonlaştırıcı radyasyonun neden olduğu zarar radyasyonun enerjisine, türüne ve ortam ile etkileşimine bağlıdır [1].

Bu etkileşimler soğurucunun bileşimine ve gelen fotonun enerjisine bağlı olarak değişir ve genellikle zayıflama katsayısı olarak bilinen bir parametre kullanılarak ele alınır. Bu, lineer zayıflama katsayısı olarak tanımlandığında (μ olarak gösterilir ve cm^{-1} birimi cinsinden ifade edilir) [1]. Lineer zayıflama katsayısı, fotoelektrik absorpsiyon, Compton saçılması ve çift üretim mekanizmalarının etkilerine ve ayrıca foton enerjisi ile birlikte malzemenin elementel bileşimine ve yoğunluğuna bağlıdır. Alternatif olarak, malzemenin yoğunluğuna veya fiziksel durumuna bağlı herhangi bir bağımlılığı ortadan kaldırmak için kütleli zayıflama katsayısı (μ/ρ olarak gösterilir ve cm^2/g cinsinden ifade edilir) tercih edilebilir. Soğurucu ortamın birim kütlesi başına etkileşime giren fotonların olasılığını temsil eder [2].

Kütleli zayıflama katsayısı için deneysel verilere dayalı [3-8] veya hesaplamalı [9-15] literatür çalışmaları olmasına rağmen bunlar genellikle belirli enerji noktalarında tahmin edilen sınırlı sayıda malzeme içindir. Ek olarak, Berger ve Hubbel, birçok element, bileşik veya karışım için teorik hesaplamalarda oldukça başarılı bir yaklaşım olan XCOM programını geliştirmiştir[8].

1950'den beri Monte Carlo hesaplamaları, radyasyon taşınım problemlerinde pek çok alanda kullanılabilen bir teknik haline gelmiştir [16]. Basit bir model geometrisi, radyasyon kaynağı ve bileşiklerin elementel ağırlıklarına bağlı olarak herhangi bir element, bileşik veya karışım için kütleli zayıflama katsayılarının geniş bir enerji aralığında değerlendirilmesine izin verir. Bu nedenle bu çalışmada, çinko oksit katkılı bazı cam örnekleri için 10 keV-20 MeV enerji aralığında kütleli zayıflama katsayılarının verilerinin Monte Carlo yöntemi ile hesaplanmasını ve XCOM sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmak, diğer uygulamalarda olduğu gibi, beraberinde belli bir risk seviyesi getirir [17, 18]. Radyasyondan korunma, bu risk seviyesini mümkün olan en düşük seviyede tutmayı amaçlar. Radyasyondan korunmada zaman, mesafe ve zırhlama olmak üzere üç temel prensipten yararlanılır. Zırhlama, gelen fotonların yoğunluğunu azaltmak için radyasyon kaynağı ve radyasyona maruz kalan kişi arasında bir bariyer görevi gören malzeme ile sağlanır. Bu nedenle malzeme seçimi önemlidir. Kurşun ve kurşun bazlı malzemeler, yüksek yoğunluğu ve düşük maliyeti nedeniyle zırhlama amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Kütle soğurma katsayısının yüksek olması nedeniyle kurşun tercih edilebilir. Ancak, ağır olması, kimyasal özellikleri ve kurşunun bazı izotoplarının da radyoaktif olması, son zamanlarda kurşun ve kurşun esaslı malzemelere alternatif olarak yeni malzeme arama çalışmalarına yol açmıştır [7, 19-23]. Radyasyondan korunmanın taşınabilirliği ve esnekliği büyük ölçüde artırılabilir olduğundan, hem yüksek lineer zayıflama katsayısına hem de düşük yoğunluğa sahip radyasyon koruyucu malzemeler daha uygundur[24, 25].

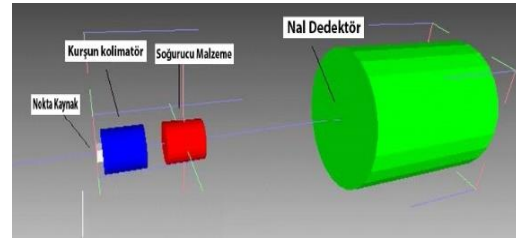
Bu çalışmada, zırhlama malzemesi olarak kullanılmak üzere çinko oksit katkılı cam malzemelerin kütleli zayıflama katsayıları hesaplanmıştır. Bu amaçla 5 farklı cam örneği kullanılmıştır. Cam örneklerinde ZnO katkı oranları %0, %5, %10, %15, %20 şeklindedir

Tablo 1'de çalışmada kullanılan malzemelerin element ağırlık oranları verilmiştir. [26].

Tablo 1. Bu çalışmada incelenen örneklerin bazı özellikleri.**Table 1.** Some features of the samples examined in this study.

Malzeme	ρ (g/cm ³)	Na	O	Mg	Al	K	Si	Ca	Ti	Fe	Zn
ZnO %0	2,53	10,749	45,890	1,393	1,398	0,490	32,280	7,313	0,060	0,428	
ZnO %5	2,62	10,216	44,572	1,321	1,329	0,465	30,667	6,948	0,060	0,405	4,017
ZnO %10	2,68	9,674	43,261	1,255	1,260	0,440	29,053	6,583	0,054	0,385	8,035
ZnO %15	2,75	9,140	41,948	1,182	1,186	0,415	27,440	6,219	0,054	0,364	12,052
ZnO %20	2,82	8,598	40,424	1,116	1,117	0,614	25,822	5,847	0,048	0,343	16,070

Monte Carlo yöntemi, bilim ve mühendisliğin birçok farklı alanında olduğu gibi radyasyon taşıma problemlerinde de yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. İyonlaştırıcı radyasyon uygulamalarında, akı, enerji birikimi, doz vb. gibi dozimetrik nicelikleri hesaplamak için Monte Carlo kodu kullanılabilir [18]. Bu çalışmada simülasyonlar, silindirik şeklindeki soğurucu malzemeye (silindir yarı çapı; $r=0.5$ cm; z eksenindeki yüksekliği $h=1$ ortalama serbest yol) doğru paralel olarak yönlendirilmiş mono-enerjik fotonlar yayan nokta kaynak içermektedir. Dedektör, kaynaktan 50 cm ve soğurucu malzemeden 100 cm uzağa yerleştirilmiş ve literatürdeki deneysel çalışmalar göz önünde bulundurularak NaI(Tl) şeklinde modellenmiştir. Problem geometrisinin tüm bileşenleri, numune dışındaki malzemelerde etkileşimi önlemek için bir vakum küresi ($r=100$ cm) ile çevrelenmiştir. Bu çalışmada, Tablo 1'de elementel ağırlık oranları verilen ZnO katkılı camlar için Monte Carlo GAMOS 6.2 simülasyonu kullanılarak kütesel zayıflama katsayıları hesaplanmıştır. CERN tarafından geliştirilen GAMOS (Geant4-based Architecture for Medicine-Oriented Simulations) tıbbi fizikçiler tarafından klinik ortamlarda radyasyon kaynaklarını modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır [27-29]. Farklı parçacık türlerini, geniş bir enerji aralığında, probleme uygun bir fizik paketi ile çalıştırarak doz ya da akı toplayabilmektedir. Simülasyonda, Şekil 1'de görüldüğü gibi, zayıflama katsayısı ölçümlerinde kullanılan dar ışın geometrisi gereksinimine uygundur ve bu nedenle saçılan fotonlardan herhangi bir katkı gelmez. Diğer yandan geniş ışın geometrisi, tüm fotonların dedektöre ulaşmasına izin verir. Ancak bu durumda, dedektör foton yoğunluğunu olduğundan fazla tahmin edecektir.

**Şekil 1.** GAMOS model geometrisi**Figure 1.** GAMOS model geometry

Simulasyonda, elektromanyetik fizik (GmEMPhysics) paketi kullanılmıştır. Yüzeysel akı (surface flux) dedektörü ile yüzeye ulaşan tüm parçacıklar sayılmıştır. Skorlamaya tüm fizik prosesleri dahil edilirken, varyans azaltma teknikleri ve paralel hesaplama yöntemi kullanılmamıştır. Simülasyon elementer ağırlıkları ve yoğunluk bilgileri bilinen her bir cam malzeme için, soğurucu malzeme varken ve yokken tekrarlanmış ve böylece denklem 1' de verilen I ve I_0 değerleri elde edilmiştir. Simülasyonun doğruluğunu arttırmak ve istatistiksel hatayı düşürmek için 10^7 foton sayısı kullanılmıştır.

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

Simülasyon verilerini kullanarak, kütle zayıflama katsayısını hesaplamak için Beer-Lambert denklemi kullanıldı.

Burada ρ ; g/cm^3 cinsinden yoğunluk, x ; cm cinsinden soğurucu kalınlığı, I_0 soğurucu malzeme yokken kaydedilen ve $I(x)$; soğurucu malzeme varken kaydedilen toplam foton akısını temsil etmektedir. μ/ρ değeri her bir numune ve foton enerjisi için cm^2/g olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular

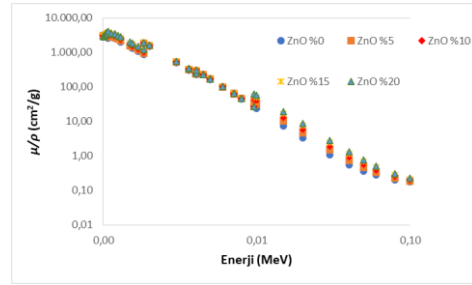
Çalışma kapsamında ele alınan cam numuneler için kütleli enerji soğurma katsayılarına ilişkin Monte Carlo değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Simülasyonlarda, Denklem (1) kullanılarak μ/ρ değerlerini elde etmek için her bir soğurucunun foton akısı değerleri GAMOS 6.2 ile hesaplanmıştır.

Tablo 2. Cam numuneler için kütle soğurma katsayıları (cm^2/g)

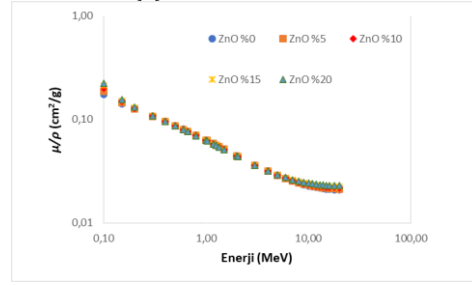
Table 2. Mass attenuation coefficients for glass samples (cm^2/g)

Enerji (MeV)	μ/ρ (cm^2/g)	μ/ρ (cm^2/g)	μ/ρ (cm^2/g)	μ/ρ (cm^2/g)	μ/ρ (cm^2/g)
Numune	ZnO_0	ZnO_5	ZnO_10	ZnO_15	ZnO_20
0,01	24,0100	32,2400	40,4600	48,6800	57,0600
0,015	7,4490	10,3600	13,2600	16,1700	19,1300
0,02	3,2730	4,6130	5,9520	7,2910	8,6520
0,03	1,0960	1,5300	1,9640	2,3970	2,8370
0,04	0,5605	0,7514	0,9422	1,1330	1,3270
0,05	0,3672	0,4671	0,5671	0,6670	0,7684
0,06	0,2794	0,3380	0,3966	0,4553	0,5147
0,08	0,2049	0,2299	0,2549	0,2799	0,3053
0,1	0,1739	0,1867	0,1995	0,2123	0,2253
0,15	0,1414	0,1450	0,1487	0,1524	0,1561
0,2	0,1257	0,1271	0,1285	0,1300	0,1314
0,3	0,1072	0,1075	0,1078	0,1081	0,1083
0,4	0,0955	0,0955	0,0955	0,0955	0,0955
0,5	0,0870	0,0869	0,0868	0,0867	0,0866
0,6	0,0804	0,0802	0,0801	0,0800	0,0798
0,662	0,0769	0,0768	0,0766	0,0765	0,0763
0,8	0,0705	0,0703	0,0702	0,0700	0,0699
1	0,0633	0,0632	0,0630	0,0629	0,0627
1,022	0,0627	0,0625	0,0624	0,0622	0,0620
1,173	0,0585	0,0583	0,0582	0,0580	0,0579
1,25	0,0566	0,0565	0,0563	0,0562	0,0561
1,332	0,0548	0,0547	0,0545	0,0544	0,0543
1,5	0,0516	0,0515	0,0513	0,0512	0,0511
2	0,0445	0,0444	0,0443	0,0442	0,0441
3	0,0363	0,0363	0,0363	0,0363	0,0363
4	0,0316	0,0317	0,0318	0,0319	0,0319
5	0,0287	0,0288	0,0290	0,0291	0,0292
6	0,0267	0,0269	0,0271	0,0273	0,0275
7	0,0253	0,0255	0,0258	0,0260	0,0262
8	0,0243	0,0245	0,0248	0,0251	0,0254
9	0,0235	0,0238	0,0241	0,0244	0,0247

10	0,0229	0,0232	0,0236	0,0239	0,0242
11	0,0224	0,0228	0,0231	0,0235	0,0239
12	0,0220	0,0224	0,0228	0,0232	0,0236
13	0,0217	0,0221	0,0226	0,0230	0,0234
14	0,0215	0,0219	0,0224	0,0228	0,0233
15	0,0213	0,0218	0,0222	0,0227	0,0232
18	0,0209	0,0214	0,0220	0,0225	0,0230
20	0,0208	0,0213	0,0219	0,0224	0,0230



(a) 1 keV – 0.1 MeV

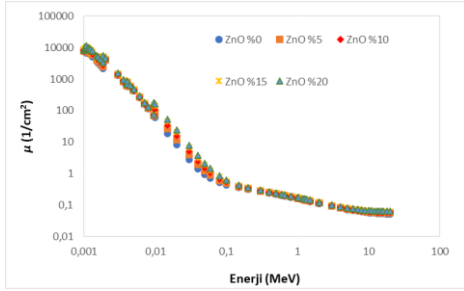


(b) 0.1 MeV – 20 MeV

Şekil 2. GAMOS ile hesaplanan kütleli zayıflama katsayısı değerleri

Figure 2. Mass attenuation coefficient values calculated with GAMOS

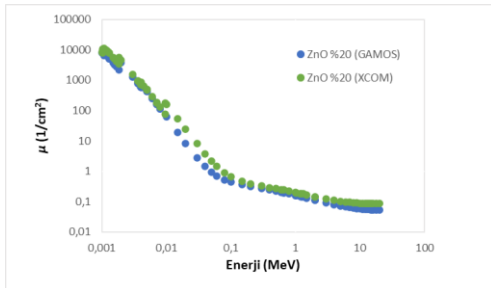
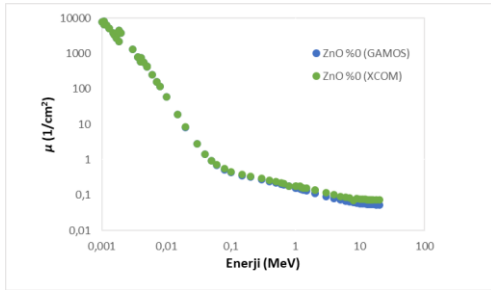
Beklendiği gibi kütleli zayıflama katsayısı değerleri, Şekil 2(a-b)’de gösterildiği gibi ilk önce tüm malzemeler için yaklaşık 50 keV’a kadar fotoelektrik etkinin bir sonucu olarak keskin bir düşüş gösterir. Bu düşüşün ardından, kütleli zayıflama katsayısı değerleri atom numarasına bağlılığının ortadan kalkması sonucunda benzer bir eğilimle düşer. Bu ikinci davranış, Compton saçılmasının orta ve yüksek enerjilerde daha baskın olmasına bağlanabilir. 5 farklı cam numunenin doğrusal zayıflama katsayıları elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 3’te gama ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Cam numunelere çinko eklenmesinin, tüm gama ışını enerjileri için doğrusal zayıflama katsayılarını arttırdığı görülmektedir.



Şekil 3. Enerjinin bir fonksiyonu olarak lineer zayıflama katsayısı değerleri

Figure 3. Linear attenuation coefficient values as a function of energy

1 keV ile 20 MeV arasında değişen gama enerjilerinde, XCOM algoritması kullanılarak lineer zayıflama katsayısı değerleri elde edildi. XCOM sonuçları ile GAMOS hesaplamaları Şekil 4' te ZnO%0 ve ZnO%20 için gösterilmektedir. Tüm malzemeler için benzer eğilimler göstermektedir.

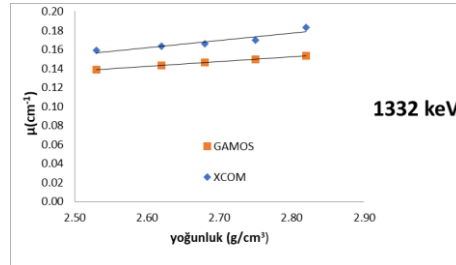
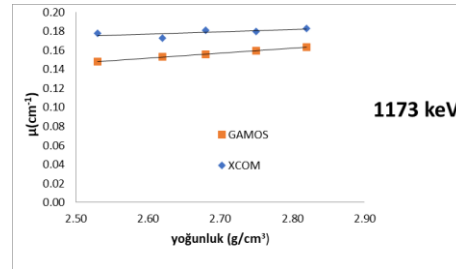
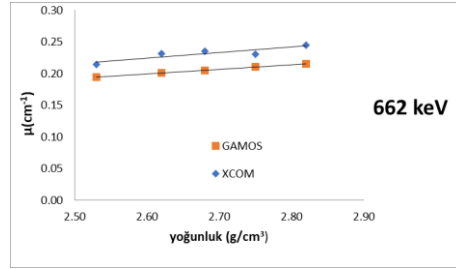


Şekil 4. XCOM ve GAMOS için, enerjinin bir fonksiyonu olarak lineer zayıflama katsayısı değerleri

Figure 4. Linear attenuation coefficient values as a function of energy for XCOM and GAMOS

GAMOS ve XCOM'dan elde edilen lineer zayıflama katsayıları, malzeme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda sıklıkla kullanılan ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co radyoaktif kaynaklarından yayılan,

şirısıyla 662 keV, 1173 ve 1332 keV için bu grafikler elde edilmiştir. Bu şekillerden açıkça görülmektedir ki, cam yoğunluğunun artmasıyla lineer zayıflama katsayıları artmıştır. Bu durum literatürdeki deneysel ve hesaplamalı çalışmalarla uyumludur [7, 30-32]. GAMOS sonuçları ve XCOM karşılaştırıldığında sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür [8].



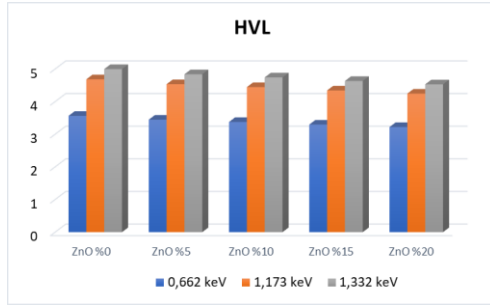
Şekil 5. XCOM ve GAMOS için, lineer zayıflama katsayısı değerlerinin malzeme yoğunluğu ile değişimi

Figure 5. Linear attenuation coefficient values as a function of energy for XCOM and GAMOS

Camların radyasyon koruma özelliklerini belirlemek için yarı değer uzunluğu (HVL) gibi başka parametreler de kullanılabilir. Denklem 2'de verilen HVL kavramı, soğurucu malzemeyi geçen zayıflatılmış radyasyon yoğunluğunun, gelen radyasyon yoğunluğunu yarı değerine indirmek için gerekli malzeme kalınlığıdır[33].

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

HVL değerleri, 5 farklı cam için enerjinin bir fonksiyonu olarak Şekil 6'da gösterilmektedir. Artan gama enerjisi ile HVL'nin arttığı görülmektedir.



Şekil 6. Cam numuneler için HVL değerleri

Figure 6. HVL values for glass samples

4. Tartışma ve Sonuç

5 farklı cam malzemenin radyasyondan korunma özellikleri 39 gama enerjisinde Monte Carlo hesaplamaları kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar XCOM verileri ile karşılaştırılmıştır. Lineer zayıflama katsayılarının gelen gama enerjisi arttıkça düştüğü gösterilmiştir. Diğer taraftan camlar üzerindeki çinko oksit konsantrasyonu arttıkça, malzeme yoğunluğu artmış ve lineer azalma katsayısı yükselmiştir.

Liteartürde ZnO katkılı bazı cam örnekleri için yapılan bazı simülasyon çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelenmiş ve artan ZnO katkısının malzemenin yoğunluk artışına sebep olduğu ve radyasyon zayıflatma yeteneğini arttırdığı görülmüştür. Radyasyon soğurma açısından yüksek performanslı ancak düşük maliyetli malzemelerin gelecekte daha çok tercih edileceğini göstermiştir. Ayrıca, hazırlandığı gibi eritilerek bükülmüş alaşımlar, radyoizotop depolamada ve gama ışınlarına veya nükleer radyasyona karşı koruma gerektiren tıbbi alanlarda koruyucu giysilerin imalatında kullanım için güçlü adaylar olduğu gösterilmiştir [24, 34-36]. Liteartürde bulunan deneysel çalışmalar da ise ZnO oranının artmasıyla cam malzemenin lineer soğurma katsayısının arttığını yönünde benzer sonuçları ortaya koymuştur [7, 12, 37-45].

Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan, cam numunelere çinko oksit ilave edilmesi ile, camların radyasyon koruma özelliklerinin iyileştirildiği GAMOS simülasyonu kullanılarak gösterilmiştir. Kütle zayıflama katsayılarının sonuçları, fotoelektrik absorpsiyonun baskın olduğu enerji aralığında, soğurucunun atom numarasına bağlı olarak keskin bir düşüş gösterir. Bu ilk yüksek değerlerin ardından, tüm biyomalzemeler, kütsel zayıflama katsayısı değerlerinde atom numarası bağımlılığının azalmasıyla, neredeyse aynı eğilimle kademeli bir düşüş gösterir. Bu ikinci model, Compton saçılmasının orta ve yüksek enerjide daha yaygın olduğu gerçeğiyle açıklanmaktadır. HVL değerinin gama enerjisi ile lineer olarak arttığı gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları ile XCOM'dan alınan teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlemlenmiştir [46, 47].

GAMOS Monte Carlo simülasyonunun çeşitli malzeme ve enerjiler için kütle zayıflama kat sayısını tahmin etmek için uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, GAMOS'un deneysel karşılaştırma için uygun olduğunu ve malzemenin fiziksel olarak üretiminin zor olduğu durumlarda farklı enerjiler ve kalınlıklar için kullanılabilirliğini göstermektedir.

5. Discussion and Conclusion

The radiation protection properties of 5 different glass materials have been investigated using Monte Carlo calculations at 39 gamma energies and the results compared with XCOM data. It was shown that the linear attenuation coefficients decrease as the incoming gamma energy increases. On the other hand, as the zinc oxide concentration on the glasses increased, the material density increased and the linear attenuation coefficient increased.

In the literature there are some simulation studies for some ZnO doped glass samples. These studies were reviewed and it was found that increasing the ZnO additive resulted in an increase in the density of the material as well as an increase in its radiation attenuation capability. It has been shown that high performance but low cost radiation absorbing materials will be preferred in the future. In addition, melt-spun alloys have been shown to be strong candidates for use in the storage of radioisotopes and the production of protective clothing in medical fields requiring protection against gamma or nuclear radiation [25, 35-37].

Experimental studies in the literature have also shown that the linear absorption coefficient of the glass material increases with increasing ZnO ratio [7, 12, 38-46].

From the results obtained in this study, it has been shown using GAMOS simulation that the radiation shielding properties of the glasses are improved by adding zinc oxide to the glass samples. The results of the mass attenuation coefficients show a sharp decrease in the energy range where photoelectric absorption predominates, depending on the atomic number of the absorber. Following these initial high values, all biomaterials show a gradual decrease in mass attenuation coefficient values, with a nearly identical trend, with decreasing atomic number dependence. The fact that Compton scattering is more common at medium and high energies explains the second pattern. The HVL value has been shown to increase linearly with gamma energy. The simulation and theoretical results from XCOM were compared, and there was good agreement [47, 48].

The GAMOS Monte Carlo simulation, it is concluded, can be used to estimate the mass attenuation coefficient for various materials and energies. The results demonstrate that GAMOS is suitable for experimental comparison and can be used for a variety of energies and thicknesses where the material is physically difficult to manufacture.

6. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Kaynakça

- [1] Johnson, T.E., 2017. Introduction to Health Physics, Fifth Edition. McGraw-Hill Education,
- [2] Shultis, J.K. Faw, R.E., 2016. Fundamentals of Nuclear Science and Engineering. CRC Press.
- [3] Gunoglu, K. Akkurt, İ. 2021. Radiation shielding properties of concrete containing magnetite, Progress in Nuclear Energy, 137, s. 103776. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103776
- [4] Akkurt, İ., Waheed, F., Akyildirim, H. Gunoglu, K. 2021. Performance of NaI (TI) detector for gamma-ray spectroscopy, Indian Journal of Physics, s. 1-7. DOI: 10.1007/s12648-021-02210-1
- [5] Al-Buriah, M.S., Arslan, H. Tonguç, B.T. 2019. Mass attenuation coefficients, water and tissue equivalence

properties of some tissues by Geant4, XCOM and experimental data, Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP), 57(6), s. 433-437. DOI: 10.56042/ijpap.v57i6.22878

[6] Phelps, M.E., Hoffman, E.J. Ter-Pogossian, M.M. 1975. Attenuation coefficients of various body tissues, fluids, and lesions at photon energies of 18 to 136 keV, Radiology, 117(3), s. 573-583. DOI: 10.1148/117.3.573

[7] Akkurt, I., Malidarre, R.B. Kavas, T. 2021. Monte Carlo simulation of radiation shielding properties of the glass system containing Bi 2 O 3, The European Physical Journal Plus, 136(3), s. 1-10. DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01260-y

[8] Berger, M., Hubbell, J., Seltzer, S., Chang, J., Coursey, J., Sukumar, R., Zucker, D. Olsen, K. 2019. XCOM: Photon Cross Sections Database. NIST, PML, Radiation Physics Division, s. DOI: 10.18434/T48G6X

[9] Akkurt, I., Calik, A. Akyıldırım, H. 2011. The boronizing effect on the radiation shielding and magnetization properties of AISI 316L austenitic stainless steel, Nuclear engineering and design, 241(1), s. 55-58. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.10.009

[10] Ermis, E., Pilicer, F., Pilicer, E. Celiktas, C. 2016. A comprehensive study for mass attenuation coefficients of different parts of the human body through Monte Carlo methods, Nuclear Science and Techniques, 27(3), s. 54. DOI: 10.1007/s41365-016-0053-2

[11] Jawad, A., Demirkol, N., Gunoğlu, K. Akkurt, I. 2019. Radiation shielding properties of some ceramic wasted samples, International Journal of Environmental Science and Technology, 16(9), s. 5039-5042. DOI: 10.1007/s13762-019-02240-7

[12] Kurtulus, R., Kavas, T., Mahmoud, K., Akkurt, I., Gunoglu, K. Sayyed, M. 2021. The effect of Nb 2 O 5 on waste soda-lime glass in gamma-rays shielding applications, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32(4), s. 4903-4915. DOI: 10.1007/s10854-020-05230-5

[13] Sengul, A. Bozkurt, A. 2021. Monte Carlo Estimation of Mass Energy Absorption Coefficients of Some Biological Compounds, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 16(2), s. 416-423. DOI: 10.1016/j.net.2021.04.004

[14] Şengül Aycan, A.K., Akkurt Iskender. 2022. Gamma-ray shielding properties of some dosimetric materials, Journal of the Australian Ceramic Society, s. 1-10. DOI: 10.1007/s41779-022-00817-z

[15] A. Şengül, I.A., K. Gunoglu, K. Akgüngör, Ermis, R Banu. 2023. Experimental evaluation of gamma-rays shielding properties of ceramic materials used in dentistry, Radiation Physics and Chemistry, 204, s. 110701. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110701

[16] Rogers, D. 2006. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics, Physics in Medicine & Biology, 51(13), s. R287. DOI: 10.1088/0031-9155/51/13/R17

[17] Martin, A., Harbison, S., Beach, K. Cole, P., 2018. An introduction to radiation protection. CRC Press.

- [18] Cousins, C., Miller, D., Bernardi, G., Rehani, M., Schofield, P., Vañó, E., Einstein, A., Geiger, B., Heintz, P. Padovani, R. 2011. International commission on radiological protection, ICRP publication, 120, s. 1-125. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.07.008
- [19] Akkurt, I., Malidarre, R.B., Kartal, I. Gunoglu, K. 2021. Monte Carlo simulations study on gamma ray-neutron shielding characteristics for vinyl ester composites, *Polymer Composites*, 42(9), s. 4764-4774. DOI: 10.1002/pc.26185
- [20] Malidarre, R.B., Akkurt, İ., Gunoglu, K. Akyildirim, H. 2021. Fast neutrons shielding properties for HAP-Fe2O3 composite materials, *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 7(3), s. 143-145. DOI: 10.22399/ijcesen.1012039
- [21] Sengul, A., Akhtar, M.S., Akkurt, I., Malidarre, R.B., Er, Z. Ekmekci, I. 2023. Gamma-neutron shielding parameters of (S3Sb2) x (S2Ge) 100- x chalcogenide glasses nanocomposite, *Radiation Physics and Chemistry*, 204, s. 110675. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110675
- [22] Baykal, D.Ş., Tekin, H.O. Mutlu, R.B.Ç. 2021. An investigation on radiation shielding properties of borosilicate glass systems, *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 7(2), s. 99-108. DOI: 10.22399/ijcesen.960151
- [23] Tekin, H.O., Almisned, G., Susoy, G., Zakaly, H.M., Issa, S.A., Kilic, G., Rammah, Y.S., Lakshminarayana, G. Ene, A. 2022. A detailed investigation on highly dense CuZr bulk metallic glasses for shielding purposes, *Open Chemistry*, 20(1), s. 69-80. DOI: 10.1515/chem-2022-0127
- [24] Dong, Q. Fang, Y. 2023. Metal-halide perovskites for high-efficiency radiation shielding applications, *Light: Science & Applications*, 12(1), s. 8. DOI: 10.1038/s41377-022-01060-8
- [25] More, C.V., Alsayed, Z., Badawi, M.S., Thabet, A.A. Pawar, P.P. 2021. Polymeric composite materials for radiation shielding: A review, *Environmental chemistry letters*, 19, s. 2057-2090.
- [26] Sharqi, I.H.S. 2022. Investigation Of Radiation Dosimetric Parameters For ZnO Doped Some Glass Samples. Suleyman Demirel University, Yüksek lisans.149, ISPARTA,
- [27] Arce, P., Lagares, J.I., Harkness, L., Pérez-Astudillo, D., Cañadas, M., Rato, P., De Prado, M., Abreu, Y., De Lorenzo, G. Kolstein, M. 2014. Gamos: A framework to do Geant4 simulations in different physics fields with an user-friendly interface, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 735, s. 304-313. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.07.008
- [28] Arce, P., Rato, P., Canadas, M. Lagares, J.I. 2008. GAMOS: A Geant4-based easy and flexible framework for nuclear medicine applications. 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 3162-3168.
- [29] Glaser, A.K., Kanick, S.C., Zhang, R., Arce, P. Pogue, B.W. 2013. A GAMOS plug-in for GEANT4 based Monte Carlo simulation of radiation-induced light transport in biological media, *Biomedical optics express*, 4(5), s. 741-759. DOI: 10.1364/BOE.4.000741
- [30] Akkurt, I. Akyıldırım, H. 2012. Radiation transmission of concrete including pumice for 662, 1173 and 1332 keV gamma rays, *Nuclear Engineering and Design*, 252, s. 163-166. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.07.008
- [31] Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S. Basyigit, C. 2010. Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate, *Annals of Nuclear Energy*, 37(7), s. 910-914. DOI: 10.1016/j.anucene.2010.04.001
- [32] Akyildirim, H., Kavaz, E., El-Agawany, F.I., Yousef, E. Rammah, Y.S. 2020. Radiation shielding features of zirconolite silicate glasses using XCOM and FLUKA simulation code, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 545, s. 120245. DOI: https://DOI.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120245
- [33] Akman, F., Kaçal, M.R., Sayyed, M.I. Karataş, H.A. 2019. Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 782, s. 315-322. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.221
- [34] Saad, M., Almohiy, H., Alshihri, A.A., Alelyani, M. Shalaby, R.M. 2023. Fabrication, microstructural modifications, elastic properties and radiation attenuation performance of ZnO nano-sized particles-reinforced Pb-based alloys for radiation shielding applications, *Radiation Effects and Defects in Solids*, s. 1-17. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.221
- [35] Alsaif, N.A., Ahmmad, S.K., Khattari, Z., Abdelghany, A., El-Refaey, A.M., Rammah, Y., Shams, M. Elsad, R. 2023. Synthesis, structure, radiation attenuation efficacy as well as prediction of density using artificial intelligence techniques of lead borate lithium zinc strontium glasses, *Optical Materials*, 137, s. 113599. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.221
- [36] Singh, R.U., Sekhar, K.C., Alzahrani, J.S., Alrowaili, Z., Shareefuddin, M., Purushotham, Y., Olariño, I. Al-Buriah, M. 2023. Effect of MoO3 on Na2O-B2O3-CdO-ZnO glasses: Applications in optoelectronics, communication devices, and radiation shielding, *Ceramics International*, 49(7), s. 11600-11611. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.12.007
- [37] Kurtulus, R., Kavas, T., Akkurt, I., Gunoglu, K., Tekin, H.O. Kurtulus, C. 2021. A comprehensive study on novel aluminoborosilicate glass reinforced with Bi2O3 for radiation shielding applications: synthesis, spectrometer, XCOM, and MCNP-X works, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(10), s. 13882-13896. DOI: 10.1007/s10854-021-05964-w
- [38] Al-Buriah, M., Bakhsh, E.M., Tonguc, B. Khan, S.B. 2020. Mechanical and radiation shielding properties of tellurite glasses doped with ZnO and NiO, *Ceramics International*, 46(11), s. 19078-19083. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.04.240
- [39] Alzahrani, J.S., Kavas, T., Kurtulus, R., Olariño, I. Al-Buriah, M. 2021. Physical, structural, mechanical, and radiation shielding properties of the PbO-B2O3-Bi2O3-ZnO glass system, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(14), s. 18994-19009.
- [40] Kilic, G., Ilik, E., Issa, S.A., Almisned, G. Tekin, H. 2022. ZnO/CdO translocation in P2O5-TeO2-ZnO ternary glass systems: A reformative enhancement tool for physical, optical, and heavy-charged particles attenuation properties, *Optik*, 268, s. 169807.

- [41] Shams, M., Marzouk, S.Y., El-Refaey, A.M., Abdel-Hafez, S.H., Olarinoeye, I. Rammah, Y. 2021. Fabrication, linear/nonlinear optical properties, Judd-Ofelt parameters and gamma-ray attenuation capacity of Er2O3 doped P2O5-ZnO-CdO glasses, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, s. 5540-5553.
- [42] Rammah, Y., Özpolat, Ö., Alım, B., Şakar, E., El-Mallawany, R. El-Agawany, F. 2020. Assessment of gamma-ray attenuation features for La³⁺ co-doped zinc borotellurite glasses, *Radiation Physics and Chemistry*, 176, s. 109069.
- [43] Abouhaswa, A., Perişanoğlu, U., Tekin, H., Kavaz, E. Henaish, A. 2020. Nuclear shielding properties of B2O3-Pb3O4-ZnO glasses: multiple impacts of Er2O3 additive, *Ceramics International*, 46(17), s. 27849-27859. DOI:
- [44] Azooz, M. Elbatal, H. 2020. Preparation and characterization of invert ZnO-B2O3 glasses and its shielding behavior towards gamma irradiation, *Materials Chemistry and Physics*, 240, s. 122129. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122129
- [45] Alzahrani, J.S., Kavas, T., Kurtulus, R. Al-Buriahi, M. 2021. Evaluations of physical and mechanical properties, and photon attenuation characteristics on lithium-germanate glass containing ZnO, *Optik*, 248, s. 168078. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.168078
- [46] Medhat, M.E. Wang, Y. 2013. Geant4 code for simulation attenuation of gamma rays through scintillation detectors, *Annals of Nuclear Energy*, 62, s. 316-320. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.06.034
- [47] Singh, V.P., Medhat, M.E. Shirmardi, S.P. 2015. Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM and experimental results, *Radiation Physics and Chemistry*, 106, s. 255-260. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2014.07.002