



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Bizmut Tabanlı Bazı Alaşımların Radyasyon Zırhlama Kapasitelerinin İncelenmesi

Meryem YILMAZ^{*1}, İlhami ERKOYUNCU¹, Hatice GÜREL ÖZDEMİR², İskender DEMİRKOL¹, Mustafa RECEP KAÇAL³, Ferdi AKMAN^{4,5}

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 12000, Bingöl, Türkiye

² İstinye Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Optisyenlik Programı, 34010, İstanbul, Türkiye

³ Giresun Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 28100, Giresun, Türkiye

⁴ Bingöl Üniversitesi, Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, 12000, Bingöl, Türkiye

⁵ Bingöl Üniversitesi, Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi, 12000, Bingöl, Türkiye

Meryem YILMAZ, [ORCID No: 0000-0001-7513-4001](https://orcid.org/0000-0001-7513-4001), İlhami ERKOYUNCU, [ORCID No: 0000-0003-1639-5062](https://orcid.org/0000-0003-1639-5062), Hatice GÜREL ÖZDEMİR, [ORCID No: 0000-0002-6590-2334](https://orcid.org/0000-0002-6590-2334), İskender DEMİRKOL, [ORCID No: 0000-0002-8065-6717](https://orcid.org/0000-0002-8065-6717), Mustafa Recep KAÇAL, [ORCID No: 0000-0002-3183-5516](https://orcid.org/0000-0002-3183-5516), Ferdi AKMAN, [ORCID No: 0000-0002-8838-1762](https://orcid.org/0000-0002-8838-1762)

*Sorumlu yazar e-posta: meryilmz157@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 06.07.2022
Kabul: 27.09.2022
Online Nisan 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1140507

Anahtar Kelimeler

FLUKA,
Gama radyasyonu,
GEANT4,
WinXCOM,
Zırhlama

Öz: Sunulan çalışmada, 0.060 MeV ila 2.614 MeV foton enerjileri aralığında 18 farklı enerjide bizmut tabanlı bazı alaşımların gama radyasyonu zırhlama kapasiteleri incelenmiştir. Farklı oranlarda bizmut içeren Bi50/Pb25/Cd12.5/Sn12.5, Bi50/Pb28/Sn22, Bi55.5/Pb44.5, Bi58/Sn42 alaşımlarının gama radyasyonu azaltma kapasiteleri belirtilen enerjilerde WinXCOM programı, GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları yardımı ile incelenmiştir. Gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemek için BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn olarak kodlanan alaşımların kütle ve lineer azaltma katsayıları, yarı ve onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yolları ve etkin atom numaraları parametreleri belirtilen enerji aralığında hesaplanmıştır. μ/ρ değerlerinin düşük enerjilerde daha yüksek olduğu görülmüştür ve WinXCOM'a göre BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn için 0.060 MeV enerjideki μ/ρ değerleri sırasıyla 5.4663, 5.4392, 5.1380 ve 5.7924 şeklindedir. BiPb kodlu alaşımın çalışılan diğer alaşımlara göre gama radyasyonu zırhlama kapasitesinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Investigation of Radiation Shielding Capacities of Some Bismuth-Based Alloys

Article Info

Received: 06.07.2022
Accepted: 27.09.2022
Online April 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1140507

Keywords

FLUKA,
Gamma radiation,
GEANT4,
Shielding,
WinXCOM

Abstract: In the present study, gamma radiation shielding capacities of some bismuth-based alloys in the photon energies range of 0.060 MeV to 2.614 MeV at 18 different energies were investigated. Gamma radiation attenuation capacities of Bi50/Pb25/Cd12.5/Sn12.5, Bi50/Pb28/Sn22, Bi55.5/Pb44.5, Bi58/Sn42 alloys containing different amounts of bismuth were investigated with the help of WinXCOM program, GEANT4 and FLUKA simulation programs at the specified energies. In order to investigate the gamma radiation shielding properties, the mass and linear attenuation coefficients, half and tenth value layers, mean free paths and effective atomic numbers parameters of the alloys coded as BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb and BiSn were calculated in the specified energy range. μ/ρ values were found to be higher at low energies and according to WinXCOM, μ/ρ values at 0.060 MeV energies for BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb and BiSn are 5.4663, 5.4392, 5.1380 and 5.7924, respectively. It has been

observed that the gamma radiation shielding capacity of the BiPb coded alloy is better than the other studied alloys.

1. Giriş

Tüm canlılar yaşamları boyunca bir şekilde radyasyona maruz kalır ve bu gayet doğal bir süreçtir. Gıdalarımıza bile toprak yoluyla radyoaktif maddeler taşınmaktadır. Doğal veya yapay radyoaktivitenin keşfiyle iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları yaşamın çoğu alanında karşımıza çıkmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon tıp, nükleer santraller, araştırma laboratuvarları, ziraat, astronomi ve arkeoloji gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Al-Hadeethi, 2020; Mhareb, 2020). Teknolojinin sürekli gelişmesi ile radyasyon kullanım alanlarının da hızla büyümesi beklenmektedir. Radyasyonun kullanım alanlarının artması, canlıların ve radyasyondan etkilenme ihtimali olan cihazların daha fazla iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalacağına bir göstergesidir. İyonlaştırıcı radyasyonun renksiz ve kokusuz oluşu duyu organlarımız tarafından kolaylıkla ayırt edilmesini engeller, bu durum tehlikenin boyutunun anlaşılmasının ve uygun müdahalelerde bulunulmasının büyük oranda önüne geçmektedir. Bu tür bir radyasyonun şiddeti, enerjisi veya türü ancak geliştirilmiş özel detektörlerle algılanıp ölçülebilir. İyonlaştırıcı radyasyonun canlı dokuların kimyasal yapısına, fiziksel ve biyolojik özelliklerine hasar verme ihtimali vardır. Bu hasar radyasyon tipine ve soğurulan radyasyon dozuna bağlı olarak canlı dokularda sıklıkla hastalığa ve ölüme neden olabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, insan dokusu ile temas ettiğinde son derece tehlikelidir (Aygün, 2020) ve bu tür bir radyasyona uzun süre maruz kalınması durumunda cilt hücrelerinde ve dokularda kalıcı hasara ve hatta kansere de neden olabilir (Akleyev, 2016).

Radyasyona maruz kalmanın önüne geçmek için zırhlamada kullanılan malzemenin radyasyon zırhlama özelliklerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır. Radyasyon zırhlama yeteneği iyi olan malzemelerin tercih edilmesi, radyasyon yayan bazı elektronik cihazların ve radyoaktif kaynakların güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Kurşun gibi yüksek atom numarası ve yoğunluğa sahip malzemeler gama radyasyonuna karşı etkili zırhlama sağlamaktadır. Ancak kurşunun sahip olduğu bazı dezavantajlar vardır. Bu yüzden yapılan araştırmalarda hâlihazırda sıklıkla kullanılan kurşuna alternatif olabilecek veya kurşun miktarı düşük yeni malzeme arayışları devam etmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalarda kurşuna alternatif veya düşük miktarda kurşun içeren kompozit çeşitleri (AlMisned ve ark., 2021; Prabhu ve ark., 2022; Gilys ve ark., 2022; Özkalaycı ve ark., 2022), beton (Makarious ve ark., 1996; Azeez ve ark., 2019), cam (Al-Hadeethi ve ark., 2021 ve 2022; Al-Ghamdi ve ark., 2022; Chinthakayala ve ark., 2022; Elias ve ark., 2022), mineral (McCaffrey ve ark., 2007; Agar, 2018; Mansour ve ark., 2020; Öztürk ve ark., 2022) ve alaşım (Singh ve ark., 2018; Akman ve ark., 2019a, 2019b ve 2022; Levet ve ark., 2020; Abdel-latif & Kassab, 2022; Hamad ve ark., 2022a ve 2022b; Özkalaycı ve ark., 2022; Reda & El-Daly, 2022; Saad ve ark., 2022; Turhan ve ark., 2022) gibi malzemelerin araştırmaları devam etmektedir.

Alaşım, bir metalin diğer metallerle uygun oranlarda karıştırılması ile elde edilen bir materyaldir. Alaşımlar genellikle doğaları gereği metalik olarak kabul edilir, yani iyi bir termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Alaşımların üretimi için çeşitli metotlar mevcuttur. En yaygın olarak kullanılan üretim metodu, bileşenleri bir arada eritmek ve elde edilen karışımı tek veya çok fazlı bir katı oluşturmak üzere soğutmaktır. Çeşitli radyasyon koruyucu malzemeler arasında alaşımlar, mükemmel kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Ayrıca genellikle yüksek yoğunluğa sahip oldukları için iyonlaştırıcı radyasyonları zırhlama kapasitelerinin de yüksek olması beklenmektedir. Genel olarak, iyi bir iyonlaştırıcı radyasyon zırh malzemesi yüksek bir yoğunluğa sahip olmalı ve yüksek atom numaralı elementler içermelidir. Alaşımlar, yüksek yoğunluklu ve yüksek atom numaralı elementlerin kullanımı ile üretilebildikleri için bu alaşımlar çeşitli nükleer tesislerde radyasyondan korunmada yaygın olarak kullanılabilir. Literatürde alaşımlar üzerine yapılan bazı çalışmalarda mevcuttur. Örneğin bazı Pb-Cu ikili alaşımları için gama radyasyonu zırhlama parametreleri incelenmiştir (Singh ve ark., 2018). Bu alaşımların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemek için kütle azaltma katsayıları (μ/ρ), yarı kalınlık değerleri (YKD), onda-bir kalınlık değerleri (OKD), ortalama serbest yolları (OSY), etkin atom numaraları ($Z_{\text{etk.}}$), etkin elektron yoğunlukları ($N_{\text{etk.}}$) ve radyasyon koruma verimleri (RKV) parametrelerini belirlemişlerdir. Bizmut bazlı (%40 Bi, %20 Pb, %40 Sn ve %40 Bi, %10 Pb, %10 Sn, %40 Cd) ve düşük erime sıcaklığına sahip olduğu bilinen iki farklı bizmut alaşımlarının radyasyon zırhlama parametreleri Saad

ve ark. (2022) tarafından incelenmiştir. Cd içermeyen alaşım örneğinin diğerine göre radyasyon zırhlama özelliğinin daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir. Hamad ve ark. (2022b) tarafından hazırlanan $Fe(x)Se_{0.5}Te_{0.5}$ ($0.95 \leq x \leq 1.05$) polikristal numunelerin radyasyon zırhlama özellikleri araştırılmıştır. Numunelerin kütle azaltma katsayıları deneysel olarak ölçülmüş ve elde edilen deneysel sonuçlar XCOM sonuçları ile karşılaştırılmıştır. $Fe_{0.95}Se_{0.5}Te_{0.5}$ örneğinin diğer numunelere kıyasla daha iyi zırhlama özelliğine sahip olduğunu not etmişlerdir. Akman ve ark., (2019b) $Ag_{92.5}/Cu_{7.5}$, Ag_{72}/Cu_{28} , Pd_{94}/Cr_6 ve Pd_{60}/Cu_{40} alaşımlarının radyasyon zırhlama özelliklerini ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Cu , ^{60}Cu , ^{133}Ba ve ^{137}Cs nokta kaynaklarını kullanarak deneysel olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçları WinXCOM programı ve MCNPX simülasyon kodu sonuçları ile karşılaştırmışlardır. $Ag_{92.5}/Cu_{7.5}$ alaşımının çalışılan diğer alaşımlardan daha iyi bir iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama malzemesi olduğunu not etmişlerdir.

Bu çalışmada ise kurşun miktarı düşük olan $BiPbCdSn$, $BiPbSn$, $BiPb$ ve $BiSn$ olarak kodlanan $Bi_{50}/Pb_{25}/Cd_{12.5}/Sn_{12.5}$, $Bi_{50}/Pb_{28}/Sn_{22}$, $Bi_{55.5}/Pb_{44.5}$, Bi_{58}/Sn_{42} (Goodfellow, 2023) alaşımlarının gama radyasyonu zırhlama özellikleri WinXCOM (Gerward ve ark., 2004) programı, GEANT4 (Agostinelli ve ark., 2003) ve FLUKA (Böhlen ve ark., 2014) simülasyon kodları ile incelenmiştir. Gama radyasyonu zırhlama kapasitelerini incelemek için μ/ρ , lineer azaltma katsayısı (μ), YKD, OKD, OSY ve Z_{etk} parametreleri 0.060 MeV ila 2.614 MeV foton enerjisi aralığında 18 farklı enerji değerinde hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile bizmut tabanlı ikili, üçlü ve dörtlü alaşımların sunulan enerjilerde ilk kez iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama kapasiteleri incelenmiştir. Ayrıca GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodlarının belirtilen enerjilerde radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenmesi için hassasiyetleri test edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Gama radyasyonu zırhlama parametrelerinin belirlenmesi

Çalışılan numune birden fazla elementi içeren bir materyal ise, kütle azaltma katsayısı karışım kuralı kullanılarak belirlenebilir. Seçilen alaşımlar için teorik μ/ρ değerleri denklem (1) kullanılarak elde edilmiştir (Yorgun, 2019a).

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum W_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (1)$$

Burada μ/ρ malzemenin toplam kütle azaltma katsayısı (cm^2/g), $(\mu/\rho)_i$ malzeme içindeki i . elementin kütle azaltma katsayısı ve W_i malzeme içindeki i . elementin ağırlıklı kesridir. Malzeme içindeki elementlerin toplam ağırlıklı kesri 1'dir, yani $\sum W_i = 1$ 'dir. Lineer azaltma katsayısı (μ , cm^{-1}), dikkate alınan malzemenin kütle azaltma katsayısı ile yoğunluğunun çarpımından elde edilebilir (Eke ve ark., 2017):

Yarı kalınlık değeri (YKD, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin %50'sinin azaltıldığı numune kalınlığını tanımlar. Onda-bir kalınlık değeri ise (OKD, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin %10'nun geçebileceği numune kalınlığı olarak tanımlanır, yani başlangıç radyasyon şiddetinin %90'nın soğurulduğu numune kalınlığıdır. YKD ve OKD parametreleri lineer azaltma katsayısı yardımıyla denklem (2-3) kullanılarak belirlenebilir (Akkaş, 2016).

$$YKD = \ln 2 / \mu = 0,693 / \mu \quad (2)$$

$$OKD = \ln 10 / \mu = 2,303 / \mu \quad (3)$$

Fotonların madde içindeki ortalama serbest yolu (OSY), başlangıç radyasyon şiddetinin %36.8'sinin geçebileceği numune kalınlığı olarak tanımlanır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Manjunatha ve ark., 2017).

$$OSY = 1 / \mu \quad (4)$$

Herhangi bir materyalin radyasyon zırlama özelliğinin incelenmesinde etkin atom numarası parametresinin de hesaplanması önemlidir. Belirtilen enerji değerlerinde sunulan alaşımların etkin atom numarası parametreleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Z_{etk.} = \frac{\sum f_i A_i (\mu/\rho)_i}{\sum \frac{f_j A_j}{Z_j} (\mu/\rho)_j} \quad (5)$$

burada, f_i , A_i ve Z_i sırasıyla, i . elementin alaşım içindeki bolluğunu, atom ağırlığını ve atom numarasını ifade eder (Manohara ve ark., 2008; Yorgun, 2019b).

2.2. WinXCOM ve Monte Carlo simülasyon kodları

XCOM, materyalin standart bir enerji aralığında (1 keV-100 GeV) veya seçilen enerjilerde tesir kesitlerini ve azaltma katsayılarını belirlemek için kullanılan bir arayüzdür. İnkoherent, koherent, fotoelektrik olay ve çift oluşumu gibi olayların tesir kesitlerini de sunmaktadır. Bileşikler için de belirtilen tesir kesitleri ve azaltma katsayılarının hesabını gerçekleştirir. Toplam azaltma katsayısına koherent saçılmanın etkisi olmadan da sonuçlar sunabilmektedir. Bu ara yüzün Windows versiyonu WinXCOM (Gerward ve ark., 2004) programı olarak kullanılmaktadır.

Monte Carlo simülasyonları hem deneysel hem de teorik araştırmalara önemli katkılar sunmaktadır. Deneysel ve teorik çalışmaları desteklemek için çeşitli simülasyon kodları kullanılmaktadır. Çalışmanın amacına göre Monte Carlo simülasyonları farklılık göstermekte ve yapılacak uygulamaya göre simülasyon kodlarının seçilmesi gerekmektedir. Gama radyasyonu zırlama özelliklerinin belirlenmesinde GEANT4 (Agostinelli ve ark., 2003) ve FLUKA (Böhlen ve ark., 2014) en tercih edilen simülasyon kodları arasındadır. FLUKA ve GEANT4 simülasyon kodları, termal nötronlardan ultra rölativistik hadron çarpışmalarına kadar uzanan çok geniş bir enerji aralığında çalışabilen, anlaşılması güç geometrilere sahip sistemlerin herhangi bir parçacık ve çekirdek tipinin taşınmasını ve etkileşimini tanımlama amacı ile kullanılan Monte Carlo kodlarıdır. Sunulan çalışmada, bu simülasyon kodları ile seçilen alaşımların yoğunlukları ve elementel içerikleri (Çizelge 1) kullanılarak simüle çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için hedef malzeme üzerine 18 farklı enerjide 10 milyon foton gönderilerek kütle azaltma katsayıları hesaplanmıştır. Simülasyonların gerçekleştirildiği geometri Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Simülasyon geometrisi ve kesitsel görüntüsü.

Çizelge 1. Seçilen alaşımların kimyasal içerikleri ve yoğunlukları

Numune Kodu	Bileşimi (% Ağırlık)				ρ (g/cm ³)
	Bi	Pb	Cd	Sn	
BiPbCdSn	50	25	12.5	12.5	9.67
BiPbSn	50	28	22	-	9.85
BiPb	55.5	44.5	-	-	10.44
BiSn	58	42	-	-	8.56

3. Bulgular ve Tartışma

BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn ile kodlanan alaşımların radyasyon zırhlama özelliklerinin incelemek için μ , μ/ρ , OKD, YKD, OSY, Z_{etk} gibi farklı parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler arasında μ/ρ , hedef malzeme ile radyasyon etkileşiminin (soğurulan veya saçılan) olasılığı hakkında bilgi veren en temel parametredir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir. μ/ρ ’daki değişimi daha iyi gözlemlemek için WinXCOM, GEANT4 ve FLUKA’dan elde edilen sonuçlar Şekil 2.’de sunulmuştur. Şekil 2. ve Çizelge 2’den de görüldüğü gibi μ/ρ değerleri seçilen alaşımlar için artan enerji ile eksponansiyel olarak azalmaktadır. Düşük enerji bölgesinde keskin bir azalış gözlemlenirken orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise gözlemlenen azalış daha düşüktür. Bu düşüşlerin sebebi, düşük enerji bölgesinde fotoelektrik tesir kesitinin, orta ve yüksek enerji bölgelerinde Compton saçılması ve çift oluşum tesir kesitlerinin daha baskın olmasıdır. Fotoelektrik tesir kesiti Z^{4-5} (Z, atom numarası) ve $E^{-3.5}$ (E, foton enerjisi) ile Compton saçılması tesir kesiti Z ve E^{-1} ile ve çift oluşum tesir kesiti Z^2 ve E ile orantılıdır. Sonuçlar değerlendirildiğinde düşük enerjilerde bir sıçrama olduğu görülmektedir. Bu sıçramanın sebebi bizmut veya kurşun elementlerinin K tabakası soğurma enerjisinin (Bi için 0.09053 MeV ve Pb için 0.08800 MeV) bu enerji bölgesinde bulunmasıdır. (Skuld, 2023)

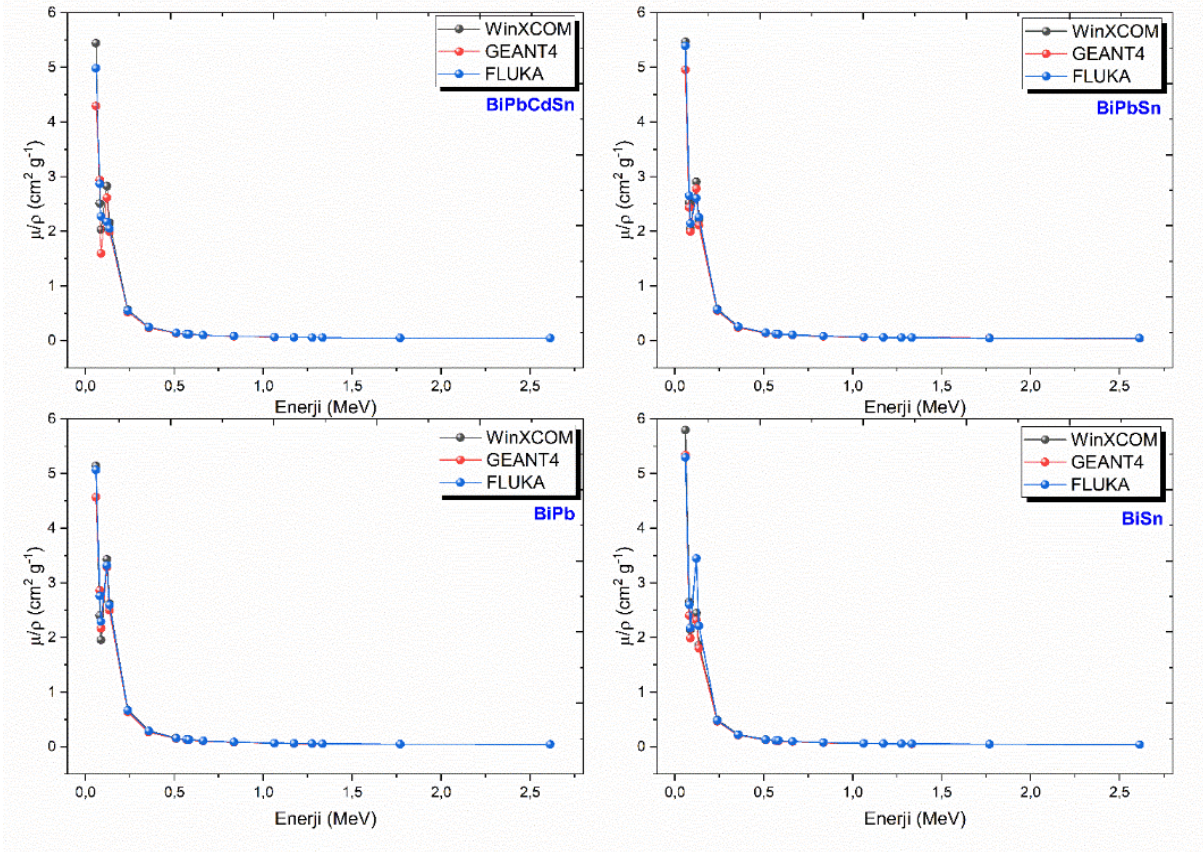
Çizelge 2 incelendiğinde, BiPbCdSn kodlu alaşım için WinXCOM değerlerinde 0.136 ile 0.239 MeV arasındaki μ/ρ ’daki düşüş %73.85 iken, 1.275 ile 1.333 MeV arasında %3.00 kadardır. BiPbSn alaşımı için belirtilen enerji aralığında μ/ρ ’daki düşüş %73.93 iken, bu düşüş 1.275 ile 1.333 MeV arasında %2.82 civarındadır. BiPb alaşımı için belirtilen enerji aralığında μ/ρ ’daki düşüş %74.29 iken, bu düşüş 1.275 ile 1.333 MeV arasında %3.08 civarındadır. BiSn alaşımı için aynı enerji aralığında μ/ρ ’daki düşüş %74.35 iken, bu düşüş 1.275 ile 1.333 MeV arasında %4.91 civarındadır. Ayrıca WinXCOM sonuçlarına göre 0.060 MeV foton enerjisinde BiSn numunesinin μ/ρ değeri BiPb numunesininkinden %11.3, BiPbSn numunesininkinden %5.6 ve BiPbCdSn numunesininkinden %6.1 daha yüksektir. 0.662 MeV foton enerjisinde ise BiPb kodlu numunenin μ/ρ değeri BiSn numunesininkinden %13.0, BiPbSn numunesininkinden %7.0 ve BiPbCdSn numunesininkinden %7.9 daha yüksektir. 1.333 MeV foton enerjisinde ise BiPb numunesinin μ/ρ değeri BiSn numunesininkinden %5.1, BiPbSn numunesininkinden %2.7 ve BiPbCdSn numunesininkinden %3.0 daha yüksektir. Bu yüzde farklılıklara göre BiSn numunesinin kütle azaltma katsayı değerinin düşük enerjilerde diğer alaşımlara göre daha yüksek ve BiPb numunesinin kütle azaltma katsayısı değerlerinin orta ve yüksek enerjilerde diğer alaşımlara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

WinXCOM ve GEANT4 μ/ρ sonuçları arasındaki yüzde farklılıklar %0 ila %9.31 arasında değişmektedir (BiPbCdSn ve BiPb kodlu numuneler için 0.060 MeV, 0.081 MeV, ve 0.088 MeV enerji değerleri hariç). WinXCOM ve FLUKA μ/ρ sonuçları arasındaki yüzde farklılıklar ise %0 ila %10.31 arasında değişmektedir (BiPbCdSn kodlu numune için 0.081 MeV, 0.088 MeV, ve 0.122 MeV; BiPb kodlu numune için 0.081 MeV, 0.088 MeV enerjileri; BiSn kodlu numune için 0.122 MeV ve 0.136 MeV enerjileri hariç). Bu yüzde farklılıklara göre iki simülasyon kodunun da WinXCOM’a göre güvenilir sonuçlar verdiğini söyleyebiliriz.

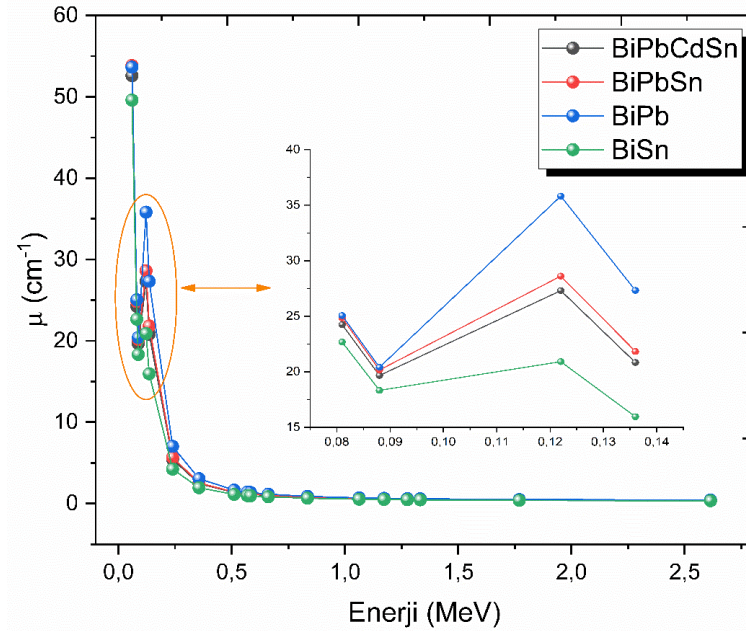
Lineer azaltma katsayısı numunenin yoğunluğuna bağlı olup, kütle azaltma katsayısı ile numune yoğunluğunun çarpımından belirlenebilen bir parametredir. Lineer azaltma katsayısının foton enerjisi ile değişimi belirtilen alaşımlar için Şekil 3.’te verilmiştir. Kütle azaltma katsayısı sonuçlarında olduğu gibi lineer azaltma katsayısı sonuçlarında da enerji ile değişim eksponansiyel bir azalmadır. Kütle azaltma katsayılarında da bahsedildiği gibi bu azalmalar ilgili bölgeye göre fotoelektrik, Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitlerinin baskınlığına göre değişmektedir. Şekil 3.’ten de görüldüğü gibi BiPb ile kodlanmış numunenin lineer azaltma katsayıları diğerlerinininkine göre daha yüksektir, yani lineer azaltma katsayısı dikkate alındığında BiPb kodlu numune diğerlerine göre daha iyi bir gama radyasyonu zırh malzemesidir.

Çizelge 2. Bizmut tabanlı bazı alaşımların karşılaştırmalı kütle azaltma katsayı (μ/ρ , cm^2/g) değerleri

Enerji (MeV)	Kütle azaltma katsayısı (cm^2/g)											
	BiPbCdSn			BiPbSn			BiPb			BiSn		
	XCOM	GEANT	FLUKA	XCOM	GEANT	FLUKA	XCOM	GEANT	FLUKA	XCOM	GEANT	FLUKA
0.060	5.4392	4.2912	4.9832	5.4663	4.9574	5.389	5.1380	4.5677	5.0651	5.7924	5.3400	5.2941
0.081	2.5076	2.9422	2.8654	2.5236	2.4301	2.6537	2.4005	2.8637	2.7631	2.6484	2.4018	2.5982
0.088	2.0329	1.5951	2.2714	2.0467	1.9947	2.1448	1.9546	2.1667	2.2926	2.1409	1.9883	2.1765
0.122	2.8230	2.6158	2.1765	2.9049	2.7822	2.6054	3.4304	3.2851	3.3217	2.4422	2.3192	3.4462
0.136	2.1540	1.9889	2.0521	2.2162	2.1091	2.258	2.6168	2.4974	2.5923	1.8634	1.8020	2.2088
0.239	0.5632	0.5226	0.5482	0.5777	0.5477	0.5689	0.6727	0.6383	0.6648	0.4943	0.4655	0.4835
0.356	0.2523	0.2309	0.2495	0.2575	0.2380	0.2563	0.2923	0.2700	0.2865	0.2271	0.2095	0.2216
0.511	0.1420	0.1332	0.1412	0.1441	0.1351	0.1435	0.1584	0.1480	0.1581	0.1316	0.1235	0.1297
0.569	0.1231	0.1164	0.1231	0.1247	0.1175	0.1238	0.1358	0.1275	0.1351	0.1151	0.1088	0.1129
0.583	0.1194	0.1130	0.1189	0.1209	0.1140	0.1205	0.1313	0.1234	0.1302	0.1118	0.1058	0.1116
0.662	0.1027	0.0982	0.1030	0.1037	0.0986	0.1038	0.1115	0.1056	0.1109	0.0970	0.0927	0.0966
0.835	0.0806	0.0783	0.0813	0.0812	0.0781	0.0810	0.0856	0.0821	0.0856	0.0773	0.0747	0.0768
1.063	0.0649	0.0639	0.0654	0.0652	0.0634	0.0651	0.0677	0.0656	0.0677	0.0630	0.0615	0.0630
1.173	0.0600	0.0593	0.0610	0.0602	0.0587	0.0602	0.0622	0.0605	0.0622	0.0585	0.0572	0.0585
1.275	0.0565	0.0561	0.0571	0.0566	0.0554	0.0566	0.0583	0.0569	0.0590	0.0552	0.0543	0.0552
1.333	0.0548	0.0545	0.0555	0.0550	0.0538	0.0550	0.0565	0.0552	0.0561	0.0536	0.0527	0.0536
1.770	0.0472	0.0472	0.0478	0.0474	0.0467	0.0435	0.0485	0.0476	0.0485	0.0464	0.0459	0.0463
2.614	0.0421	0.0418	0.0423	0.0422	0.0417	0.0422	0.0434	0.0427	0.0434	0.0412	0.0408	0.0412



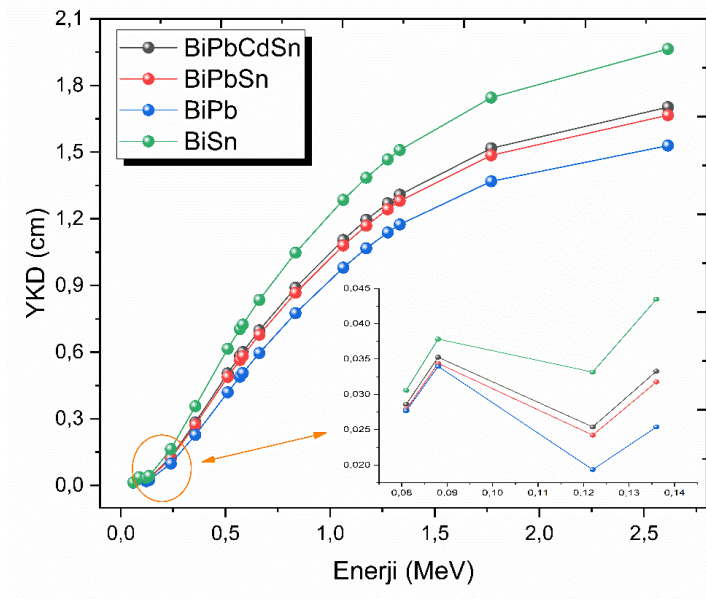
Şekil 2. Bizmut tabanlı bazı alaşımların karşılaştırmalı kütle azaltma katsayı (μ/ρ , cm^2/g) değerleri grafiği.



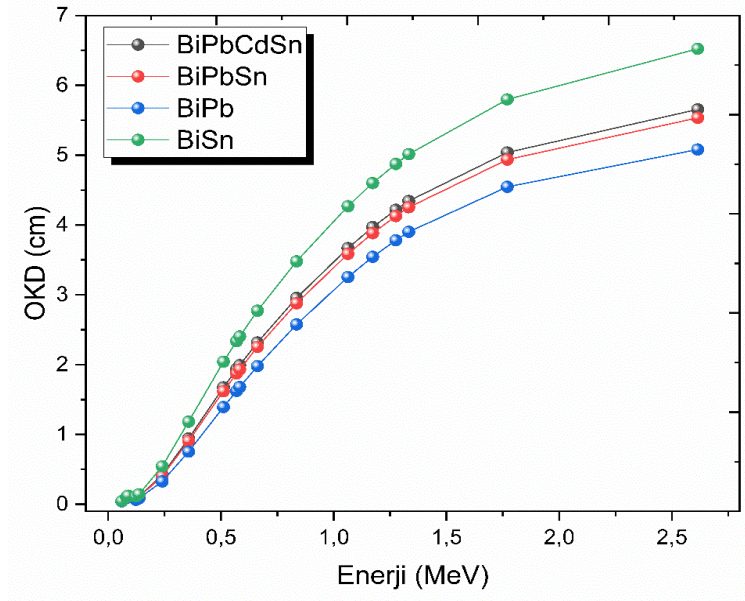
Şekil 3. Bizmut tabanlı bazı alaşımların karşılaştırmalı lineer azaltma katsayı (μ , cm^{-1}) değerleri grafiği.

YKD, OKD ve OSY parametreleri gama zırhlama özelliklerinin belirlenmesinde önemli parametrelerdir. Bu üç parametre lineer azaltma katsayıları kullanılarak hesaplanabilir. 0.060 MeV ve 2.614 MeV enerji aralığındaki 18 farklı enerjide seçilen bizmut tabanlı alaşımların yarı kalınlık değerlerinin foton enerjisi ile değişimi Şekil 4.'te, onda-bir kalınlık değerlerinin foton enerjisi ile

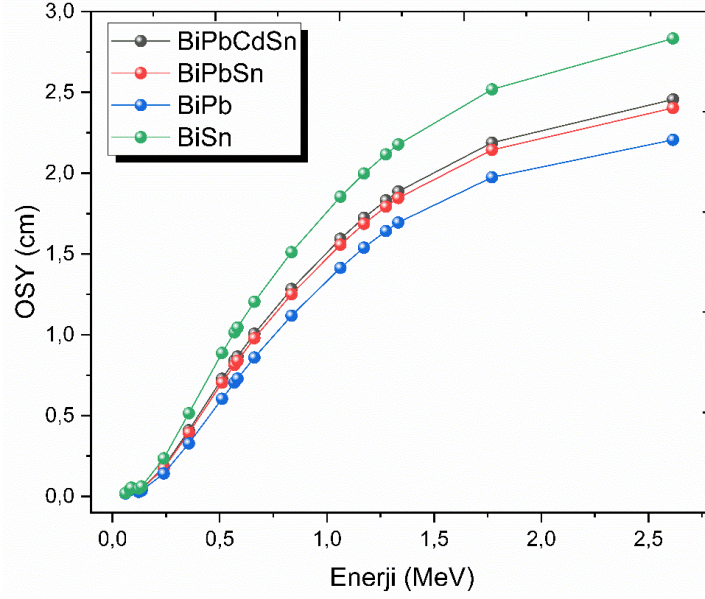
değişimi Şekil 5.'te ve ortalama serbest yol değerlerinin foton enerjisi ile değişimi Şekil 6.'da sunulmuştur.



Şekil 4. Bizmut tabanlı bazı alaşımlar için YKD'nin enerji ile değişimi.



Şekil 5. Bizmut tabanlı bazı alaşımlar için OKD'nin enerji ile değişimi.



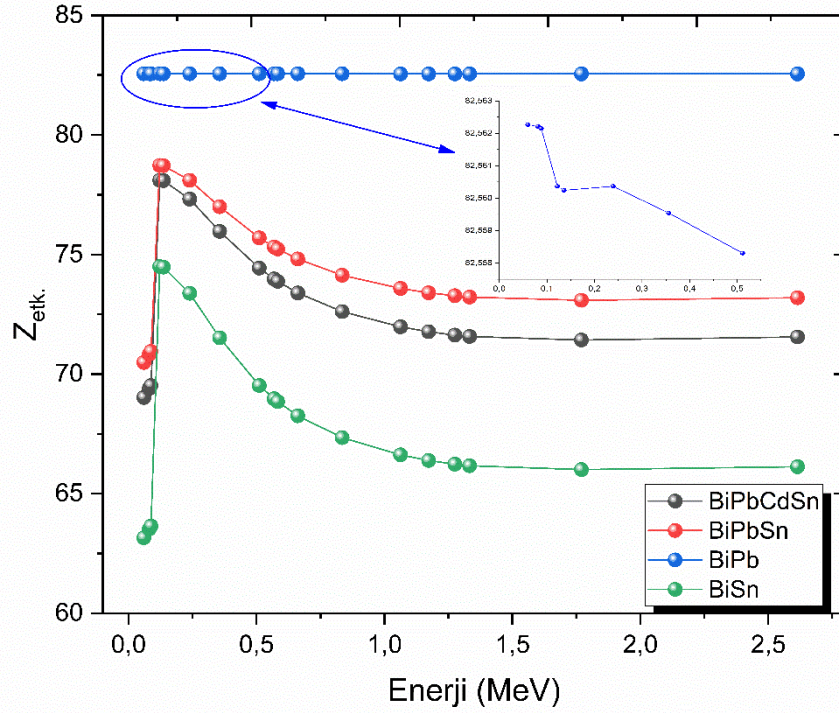
Şekil 6. Bizmut tabanlı bazı alaşımlar için OSY'nin enerji ile değişimi.

Şekil 4-6'dan de görüldüğü gibi artan foton enerjisi ile YKD, OKD ve OSY parametreleri hızla artmaktadır. Hızlı artışlar YKD, OKD ve OSY parametrelerinin lineer azaltma katsayısı ile ters orantılı olarak değişmesi ile açıklanabilir. 0.662 MeV enerjide YKD değerleri incelendiğinde, BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn kodlu numuneler için sırasıyla; 0.6982, 0.6784, 0.5957 ve 0.8347 sonuçları WinXCOM programı yardımı ile elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en küçük değere sahip olan BiPb kodlu numunenin radyasyon zırh malzemesi olma özelliğinin diğer numunelerden daha iyi olduğu söylenebilir. 1.333 MeV enerjide OKD değerleri incelendiğinde, BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn kodlu numuneler için sırasıyla; 4.3448, 4.2526, 3.9016 ve 5.0143 sonuçları WinXCOM programı yardımı ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde en küçük değere sahip olan BiPb kodlu numunenin daha iyi bir zırhlama malzemesi olduğu görülür. 0.081 MeV enerjide ise OSY değerleri incelendiğinde, BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn kodlu numuneler için sırasıyla; 0.0412, 0.0402, 0.0399 ve 0.0441 sonuçları WinXCOM programı yardımı ile elde edilmiştir. Yine bu numuneler içerisinde en küçük OSY değerine sahip olan BiPb kodlu numunenin diğer numuneler ile kıyaslandığında daha iyi bir zırhlama malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. Bu üç parametre de dikkate alındığında BiPb kodlu alaşımın diğer seçilen alaşımlara göre daha iyi gama radyasyonu zırhlama özelliğine sahip olduğu görülmüştür.

Sunulan çalışmada dikkate alınan son parametre Z_{etk} değeridir. Bu parametre aynı zamanda radyasyon azaltmanın iyi bir göstergesidir. Bu parametre ne kadar yüksek değerlere sahip olursa ilgili malzeme de o derecede gama radyasyonu zırhlama açısından elverişli olacaktır. Z_{etk} 'nin fotoelektrik etkinin baskın olduğu düşük enerji bölgesinde en yüksek değerlerini aldığı Şekil 7.'den görülmektedir. Alaşımlardaki bizmutun ağırlık kesri arttıkça Z_{etk} değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca etkin atom numarasının foton enerjisine bağlı olduğu da Çizelge 3.'te görülmektedir ve bu bağlılık artan enerji ile eksponensiyel azalma şeklindedir (Bi veya Pb K tabakaları soğurma kıyıları hariç). 0.081 MeV enerjide BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb ve BiSn numunelerinin Z_{etk} değerleri karşılaştırıldığında sıralamanın BiPb > BiPbSn > BiPbCdSn > BiSn şeklinde olduğu görülmektedir. En büyük Z_{etk} değerine sahip olan BiPb kodlu numunenin en iyi gama radyasyonu zırhlama özelliğine sahip materyal olduğunu görülmüştür.

Çizelge 3. Bizmut tabanlı bazı alaşımların karşılaştırmalı etkin atom numarası ($Z_{\text{etk.}}$) değerleri

Enerji (MeV)	Etkin Atom Numarası ($Z_{\text{etk.}}$)											
	BiPbCdSn			BiPbSn			BiPb			BiSn		
	XCOM	GEANT	FLUKA	XCOM	GEANT	FLUKA	XCOM	GEANT	FLUKA	XCOM	GEANT	FLUKA
0.060	69.0196	54.4525	63.2336	70.4869	63.9248	69.4902	82.5623	73.3980	81.3907	63.1573	58.2242	57.7237
0.081	69.3997	81.4286	79.3031	70.8348	68.2100	74.4862	82.5622	98.4918	95.0319	63.5213	57.6071	62.3178
0.088	69.5234	54.5501	77.6786	70.9505	69.1477	74.3511	82.5621	91.5234	96.8415	63.6435	59.1072	64.7019
0.122	78.1051	72.3719	60.2177	78.7287	75.4036	70.6119	82.5604	79.0628	79.9437	74.4920	70.7404	105.1162
0.136	78.0892	72.1030	74.3942	78.7203	74.9167	80.2057	82.5602	78.7945	81.7886	74.4758	72.0235	88.2828
0.239	77.3151	71.7336	75.2462	78.1037	74.0492	76.9155	82.5604	78.3360	81.5908	73.3752	69.1041	71.7762
0.356	75.9691	69.5107	75.1165	76.9961	71.1498	76.6367	82.5595	76.2781	80.9305	71.5162	65.9992	69.7978
0.511	74.4288	69.7903	73.9985	75.6987	70.9510	75.3903	82.5583	77.1283	82.3917	69.5202	65.2501	68.5258
0.569	73.9800	69.9443	73.9640	75.3169	70.9522	74.7755	82.5579	77.5490	82.1522	68.9669	65.1941	67.6757
0.583	73.8817	69.9276	73.5656	75.2331	70.9604	74.9932	82.5578	77.5963	81.8458	68.8472	65.1397	68.7302
0.662	73.3921	70.2154	73.6341	74.8138	71.1397	74.8680	82.5573	78.1957	82.1436	68.2586	65.1988	67.9592
0.835	72.6114	70.5962	73.2580	74.1354	71.3685	73.9744	82.5565	79.1657	82.5129	67.3414	65.0870	66.9268
1.063	71.9782	70.9205	72.5498	73.5834	71.5560	73.4544	82.5555	79.9381	82.4596	66.6219	65.0665	66.5617
1.173	71.7713	71.0247	73.0508	73.4007	71.5946	73.4285	82.5553	80.2762	82.5809	66.3908	65.0079	66.3717
1.275	71.6318	71.1700	72.4681	73.2760	71.7321	73.1942	82.5553	80.5055	83.5656	66.2352	65.1145	66.2545
1.333	71.5737	71.1638	72.4554	73.2244	71.7321	73.2387	82.5552	80.5708	81.8560	66.1705	64.9958	66.1269
1.770	71.4248	71.3159	72.2456	73.0907	72.0882	67.1313	82.5551	81.0593	82.5142	66.0061	65.2361	65.9304
2.614	71.5489	70.9846	71.8649	73.1947	72.1890	73.0763	82.5544	81.2848	82.5723	66.1254	65.4000	66.1138



Şekil 7. Bizmut tabanlı bazı alaşımların etkin atom numarasının enerjiye karşı grafiği.

4. Sonuç

Bu çalışmada, 0,060 MeV ila 2,614 MeV foton enerjileri aralığında 18 farklı enerjide bizmut tabanlı BiPbCdSn, BiPbSn, BiPb, BiSn kodlu alaşımların gama radyasyonu zırhlama kapasiteleri incelenmiştir. Bu alaşımların μ/ρ , μ , YKD, OKD, OSY ve Z_{etk} radyasyon zırhlama parametreleri WinXCOM programı ve GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodlarıyla hesaplanarak elde edilmiştir. Üç farklı yolla elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. WinXCOM, FLUKA ve GEANT4 sonuçlarının genel olarak birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Belirlenen bu parametrelere göre BiPb kodlu alaşımın diğerlerine göre daha iyi bir gama radyasyonu zırh malzemesi olduğu görülmüştür. Bazı enerji değerleri hariç, Monte Carlo simülasyon kodlarından elde edilen sonuçlar ile WinXCOM değerleri arasında tutarlılık görülmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile bizmut tabanlı seçilen alaşımların sunulan enerjilerde ilk kez iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama kapasiteleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları ile elde edilen sonuçların WinXCOM ile karşılaştırılması bu simülasyon kodlarının güvenilirliğini doğrulamıştır. Belirlenen bu parametrelerden elde edilen sonuçlara göre BiPb kodlu numunenin günümüzde sıklıkla gama radyasyonu zırh malzemesi olarak kullanılan kurşun veya türevlerinden üretilmiş zırh malzemelerine alternatif olma potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut sonuçlara göre BiPb kodlu numune hastanelerde ve tıp merkezlerinde, radyasyon yayan ekipman bulunan odalarda, radyoaktif atık ürünlerin depolanmasında ve nükleer santrallerde çevre ve insan sağlığını korumak için gama radyasyonu zırh malzemesi olarak kullanılabilir.

Kaynakça

- Abdel-latif M. A., & Kassab, M. M. (2022). Effect of chromium contents on radiation shielding and macroscopic cross-section in steel alloys. *Applied Radiation Isotopes*, 186, 110263. doi:10.1016/j.apradiso.2022.110263
- Agar, O. (2018). Study on gamma ray shielding performance of concretes doped with natural sepiolite mineral. *Radiochimica Acta*, 106, 12. doi:10.1515/ract-2018-2981
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... & Geant4 Collaboration. (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in*

- Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 506(3), 250-303. doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- Akkaş, A. (2016). Determination of the tenth and half value layer thickness of concretes with different densities. *Acta Physica Polonica A*, 129(4), 770-772. doi:10.12693/APhysPolA.129.770
- Akleyev, A. V. (2016). Normal tissue reactions to chronic radiation exposure in man. *Radiation Protection Dosimetry*, 171(1), 107–116. doi:10.1093/rpd/ncw207
- Akman, F., Kaçal, M. R., Sayyed, M. I., Karataş, H. A. (2019a). Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 782(25), 315-322. doi:10.1016/j.jallcom.2018.12.221
- Akman, F., Sayyed, M. I., Kaçal, M. R., Tekin, H. O. (2019b). Investigation of photon shielding performances of some selected alloys by experimental data, theoretical and MCNPX code in the energy range of 81 keV–1333 keV. *Journal of Alloys and Compounds*, 772, 516-524. doi:10.1016/j.jallcom.2018.09.177
- Akman, F., Ogul, H., Ozkan, I., Kaçal, M. R., Agar, O., Polat, H., Kamuran Dilsiz, K. (2022). Study on gamma radiation attenuation and non-ionizing shielding effectiveness of niobium-reinforced novel polymer composite. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(1), 283-29. doi:10.1016/j.net.2021.07.006
- Al-Ghamdi, H., AshokKumar, A. Jecong, J. F. M., Almuqrina, H. A., Tishkevich, D. I., Sayyed, M. I. (2022). Optical and gamma ray shielding behavior of PbO–B₂O₃–CuO–CaO glasses. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2494-2505. doi:10.1016/j.jmrt.2022.03.120
- Al-Hadeethi, Y., Sayyed, M. I., Raffah, B. M., Kumar, A. (2022). Physical, structural and gamma ray shielding behaviour of PbO–CuO–CaO–B₂O₃ glasses. *Optik*, 258, 168881. doi:10.1016/j.ijleo.2022.168881
- Al-Hadeethi, Y., Sayyed, M. I., Rahman, Y. S. (2020). Fabrication, optical, structural and gamma radiation shielding characterizations of GeO₂–PbO–Al₂O₃–CaO glasses. *Ceramics International*, 46(2), 2055-2062. doi:10.1016/j.ceramint.2019.09.185
- ALMised, G., Akman, F., AbuShanab, W. S., Tekin, H. O., Kaçal M. R., Issa, A. M. S., Polat, H., Oltulu, M., Ene, A., Zakaly M. H. H. (2021). Novel Cu/Zn reinforced polymer composites: experimental characterization for radiation protection efficiency (rpe) and shielding properties for alpha, proton, neutron, and gamma radiations. *Polymers*, 13(18), 3157. doi:10.3390/polym13183157
- Aygün, B. (2020). High alloyed new stainless steel shielding material for gamma and fast neutron radiation. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(3), 647-653. doi:10.1016/j.net.2019.08.017
- Azeez, M. O., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin M., Naqvi A. A. (2019). Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures. *Construction and Building Materials*. 224(10) 284-291. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.077
- Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., Fassò, A., Ferrari, A., Ortega, P. G., Mairani, A., Salad, P. R., Smirnov, G., Vlachoudis, V. (2014). The FLUKA code: Developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear Data Sheets*, 120, 211-214. doi:10.1016/j.nds.2014.07.049
- Chinthakayala, S. K., Gadige, P., Kollipara, S. V., Ramadurai, G. (2022). Gamma radiation shielding studies on highly dense barium bismuth borate glasses. *Applied Glass Science*, 13(2), 211-222. doi:10.1111/ijag.16554
- Eke, C., Agar, O., Segebade, C., Boztosun, I. (2017). Attenuation properties of radiation shielding materials such as granite and marble against γ -ray energies between 80 and 1350 keV. *Radiochimica Acta*, 105 (10), 851-863. doi:10.1515/ract-2016-2690
- Elias, J. A., Montes, E., Torres-Castro, A., Wiechers, C., Gomez-Solis, C., Vega-Carrillo, H. R., Sosa, M. A., & Vallejo, M. A. (2022). Mn, Cu and Cr nanoparticles in Li₂B₄O₇ glass: Radiation shielding and optical properties. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110037. doi:10.1016/j.radphyschem.2022.110037
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Leving, H. (2004). WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry*, 71(3-4), 653-654. doi:10.1016/j.radphyschem.2004.04.040
- Gilys, L., Griškonis, E., Griškevičius, P., & Adliene, D. (2022). Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding. *Polymers*, 14(9), 1696. doi:10.3390/polym14091696

- GoodFellow. (2023). <https://www.goodfellow.com/uk/en-gb/alloy> Erişim tarihi : 15.09.2022
- Hamad, Kh., M., Mhareb, M. H. A., Sayyed, M. I., Alajerami, Y. S. M., Alsharhan, R., Khandaker, M. U. (2022a). Novel efficient alloys for ionizing radiation shielding applications: A theoretical investigation. *Radiation Physics and Chemistry*, 110181. doi:10.1016/j.radphyschem.2022.110181
- Hamad, R. M., Hamad, Kh. M., Dwaikat, N., & Ziq, Kh., A. (2022b). Assessment of FexSe0.5Te0.5 alloy properties for ionizing radiation shielding applications: An experimental study. *Applied Physics A*, 128:574. doi:10.1007/s00339-022-05721-8
- Levet, A., Kavaz, E., & Özdemir, Y. (2020). An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152946. doi:10.1016/j.jallcom.2019.152946
- Makarious, A. S., Bashter, I. I., Abdo, A. E. S., Azim, M. S. A., Kansouh, W. A. (1996). On the utilization of heavy concrete for radiation shielding. *Annals of Nuclear Energy*, 23(3), 195-206. doi:10.1016/0306-4549(95)00021-1
- Manjunatha, H. C. (2017). A study of gamma attenuation parameters in polymethylmethacrylate and Kapton. *Radiation Physics and Chemistry*, 137, 254–259. doi:10.1016/j.radphyschem.2016.01.024
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., Gerward, L. (2008). On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(18), 3906–3912. doi:10.1016/j.nimb.2008.06.034
- Mansour, A., Sayyed, M. I., Mahmoud, K. A., Şakar, E., & Kovaleva, E. G. (2020). Modified halloysite minerals for radiation shielding purposes. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 94-101. doi.org/10.1080/16878507.2019.1699680
- McCaffrey, J. P., Shen, H., Downton, B. E., & Mainegra-Hing, E. (2007). Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Medical Physics*, 34(2), 530-537. doi:10.1118/1.2426404
- Mhareb, M. H. A., Slimani, Y., Alajerami, Y. S., Sayyed, M. I., Lacomme, E., Almessiere, M. A. (2020). Structural and radiation shielding properties of BaTiO₃ ceramic with different concentrations of Bismuth and Ytterbium. *Ceramics International*, 46(18), 28877-28886. doi:10.1016/j.ceramint.2020.08.055
- Özkalaycı, F., Kaçal, M. R., Polat, H., Agar, O., Almousa, N., & Akman, F. (2022). Lead-free Sb-based polymer composite for γ -ray shielding purposes. *Radiochimica Acta*, 110, 5. doi:10.1515/ract-2022-0020
- Öztürk, O., Karaburç, Ş. N., Saydan, M., & Keskin, Ü. S. (2022). High rate X-ray radiation shielding ability of cement-based composites incorporating strontium sulfate (SrSO₄) minerals. *Kerntechnik*, 87(1), 115-124. doi:10.1515/kern-2021-0029
- Prabhu, S., Bubbly, G., & Gudennavar, S. B. (2022). X-Ray and γ -Ray Shielding Efficiency of Polymer Composites: Choice of Fillers, Effect of Loading and Filler Size, Photon Energy and Multifunctionality. *Polymer Reviews*, 1-43. doi.org/10.1080/15583724.2022.2067867
- Reda, A. M., & El-Daly, A. A. (2022). Novel metallic Bi-Pb-Cd-Ag alloys for shielding against neutrons and gamma rays. *Physica Scripta*, 97(6), 065304. doi:10.1088/1402-4189/66e9b
- Saad, M., ALMohiy, H., Alqahtani, M. S., Alshihri, A. A., & Shalaby, R. M. (2022). Study of structural, physical, characteristics and radiation shielding parameters of Bi₅₀-Pb₄₀-Sn₁₀ and Bi₄₀-Pb₄₀-Sn₁₀-Cd₁₀ alloys used for radiation therapy. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 177(5-6), 545-555. doi:10.1080/10420150.2022.2063125
- Singh, T., Kaur, A., Sharma, J., & Singh, P. S. (2018). Gamma rays' shielding parameters for some Pb-Cu binary alloys. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1078-1085. doi:10.1016/j.jestch.2018.06.012
- Skuld, (2023). X-ray Absorption Edges. http://skuld.bmsc.washington.edu/scatter/AS_periodic.html Erişim tarihi: 15.09.2022
- Turhan, M. F., Akman, F., Taşer, A., Dilsiz, K., Oğul, H., Kaçal, M. R., & Agar, O. (2022). Gamma radiation shielding performance of CuxAg(1-x)-alloys: Experimental, theoretical and simulation results. *Progress in Nuclear Energy*, 143, 104036. doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104036

- Yorgun, N. Y. (2019a). Gamma-ray shielding parameters of Li₂B₄O₇ glasses: Undoped and doped magnetite, siderite and Zinc-Borate minerals cases. *Radiochimica Acta*, 107(8), 755-765. doi:10.1515/ract-2019-0014
- Yorgun, N. Y. (2019b). Gamma-ray shielding properties of lithium borate glass doped with colemanit mineral. *BEU Journal of Science* 8 (3), 762-771. doi:10.17798/bitlisfen.525527