

Bazı Minerallerin Radyasyon Zırhlama Kapasitelerinin Araştırılması

İlhami ERKOYUNCU^{1*}

^{1*} Bingöl Üniversitesi, Fizik Bölümü, Bingöl, Türkiye,
ORCID No: 0000-0003-1639-5062, e-mail: ierkoyuncu@bingol.edu.tr

(Alınış/Arrival: 03.11.2023, Kabul/Acceptance: 25.11.2023, Yayınlanma/Published: 15.12.2023)

Özet

Bu çalışmada, yeryüzünde volkanik dağlar etrafındaki volkanik kayalarda, bazı kaya ve toprak çeşitlerinde, madenlerde vs. görülebilen belledoite, berndite, dilithium, cadmoselite, eskebornite ve altaite mineralinin kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma katsayısı (μ), yarı kalınlık değeri (YKD), onda bir kalınlık değeri (OKD) ve ortalama serbest yol (OSY) parametreleri teorik WinXCOM programı kullanılarak 59,5 – 1332,5 keV enerji aralığında altı adet mineralin gamma radyasyonu azaltma etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre çalışılan 6 adet mineral içinde radyasyon zırhlamada en etkili olan mineralin altaite minerali olduğu görülmüştür. Bu mineralin yüksek enerjili gamma radyasyonlarına karşı zırhlama kapasitesinin, geleneksel beton ve bazı alternatif alaşımların zırhlama yeteneğinden daha iyi bir performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Kütle azaltma katsayısı incelendiğinde çalışılan enerji aralığında dilithiumun gamma radyasyonunu azaltma etkisinin diğer minerallerin gamma radyasyonunu azaltma etkisinden çok daha az olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular altaite mineralinin gamma radyasyonunu zırhlama etkisinin diğer minerallerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu bakımdan altaite minerali nükleer laboratuvarlarda, nükleer santrallerde, sağlık fizikinde vb. alanlarda radyasyona karşı koruyucu zırh malzemesi olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Mineral, gamma radyasyonu, WinXCOM

Investigating the Radiation Shielding Capacities of Certain Minerals

Abstract

In this study, the mass attenuation coefficient (μ/ρ), linear attenuation coefficient (μ), half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), and mean free path (MFP) parameters of belledoite, berndite, dilithium, cadmoselite, eskebornite, and altaite minerals, which can be found in volcanic rocks around volcanic mountains, various rock and soil types, mines, etc., have been theoretically examined within the energy range of 59.5 – 1332.5 keV using WinXCOM.

According to the obtained results, among the six minerals investigated, altaite mineral has been identified as the most effective material for radiation shielding. It has been determined that this mineral exhibits superior shielding capacity against high-energy photon radiations when compared to traditional concrete and some alternative alloys. In terms of mass attenuation coefficients, it was observed that dilithium mineral yielded the least efficient results within the studied energy range. Consequently, the findings of this research suggest that utilizing altaite mineral as a protective shielding material against radiation could be advantageous, particularly in nuclear laboratories, medical applications, and nuclear power plants.

Keywords: Mineral, gamma radiation, WinXCOM

1. GİRİŞ

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunma, birleştirilmiş nükleer sistemlerde (hızlandırıcı fiziği), nötron kaynaklarının zırhlanmasında, nükleer reaktörlerde, tıbbi sağlık uygulamalarında, uzay ve plazma fiziği gibi radyasyona neden olan teknolojik nükleer çalışmalarda son derece önemli ve gereklidir. Radyasyondan koruyucu malzemelerin etkili bileşimlerinin biraraya getirilmesi ile bu alanlarda etkin bir radyolojik koruma sağlanabilmektedir. Araştırmacılar radyasyon zırhlama malzemesi olarak sıklıkla tercih edilen geleneksel standart betona ve kurşun bazlı malzemelere alternatif olabilecek seramik, cam, alaşım veya mineral katkılı malzemelerle nükleer teknolojideki potansiyel uygulamaları nedeni ile ilgilenmeye başlamışlardır [1- 4].

Kurşun (Pb) ve türevlerinin insan sağlığı ve çevre üzerinde tehlikeli etkileri (toksik olması) bulunmaktadır. Ayrıca Pb'nin iyonlaştırıcı radyasyon üretmesi nedeni ile bazı nükleer uygulamalarda kullanımı yasaklanmıştır [5]. Pb elementi inert madde olmadığından toksik etki ortadan kaldırılamamaktadır [6-9]. Beton ise çeşitli avantajlarından (imalat kolaylığı ve düşük maliyet) dolayı radyasyon güvenliği amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde beton ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Yüksek yoğunluklu agregalar kullanılarak hazırlanan ağır beton, gamma radyasyonunun zararlı etkilerini azaltmak için uygun maliyetli ve pratik bir çözüm sunabilmektedir [10]. Yoğun ve ağır özellikleri nedeniyle ağır agrega, radyasyonla çok yoğun etkileşim sergileyerek gamma radyasyonunu etkili bir şekilde zayıflatabilmektedir. Sonuç olarak beton, gamma radyasyonundan korunmak için en uygun malzeme olarak kabul edilmektedir [11]. Örneğin 3 m kalınlığındaki normal beton ile 2,4 m kalınlığındaki manyetit betonun zırhlama kapasiteleri eşdeğerdir [9]. Ancak geleneksel betonun radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılmasının uygun olmadığı birçok uygulama da bulunmaktadır. Bu durum araştırmacıları farklı türdeki malzemelerin radyasyondan korunma özelliklerini araştırmaya yöneltmiştir [12]. Beton malzemeler dışında cam, seramik, polyester, epoksi, mermer, kil, polimer, çeşitli alaşım ve mineraller alternatif olarak sıklıkla kullanılmaktadır [13-20].

Radyasyondan korunma için kullanılan malzemelerin ağırlığı, alanı, maliyeti ve zayıflatma veya emme yetenekleri, araştırmacıları uygun koruyucu malzemeleri sentezleme ve geliştirme konusunda zorlayan kilit noktalarlardır. İyi bir zırhlama malzemesi gelen gamma radyasyonunun maksimum kısmını zayıflatabilen, emebilen veya bloke edebilen bir malzemedir. Gamma ışınları ve malzemeler arasındaki etkileşimin doğası ve mekanizması, etkileşim mekanizmasına göre daha uygulanabilir radyasyon zırh malzemesinin seçilmesine yardımcı olan, bu radyasyonların ortamda yayılma yeteneğini belirlemek kritik bir konudur. Gamma fotonlarına karşı zırhlama malzemesi olarak kullanılması beklenen malzemelerin atom numarası ve yoğunluğu yüksek olmalıdır. Çünkü bu tür malzemeler, gamma ışınlarıyla daha büyük enerji aktarımı anlamına gelen daha yüksek etkileşim olasılığına neden olmaktadır [21]. Bu nedenle bu çalışmada yoğunluğu geleneksel betondan daha yüksek olan mineraller seçilmiştir. Seçilen minerallerin radyasyon zırhlamada kullanılan geleneksel betona katkı maddesi olarak ikame edilmesinin radyasyon zırhlama için faydalı olma olasılığı araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada WinXCOM bilgisayar programı 59,5 – 1332,5 keV enerji aralığındaki 11 adet enerji değeri kullanılmıştır (bkz Tablo 2). WinXCOM programı 1,0 keV ile 100,0 GeV arasındaki foton enerji seviyeleri için fotonların herhangi bir element, bileşik veya karışımla etkileşimini hesaplar. Bileşikler ve karışımlar için etkileşim katsayıları ve toplam zayıflatma katsayıları, atomik bileşenler için karşılık gelen miktarların toplamı olarak elde edilir. Atom numaralarına veya kimyasal sembollere göre seçilen elementlerin gamma radyasyonu zırhlama

yeteneği WinXCOM'da öngörülebilmektedir. Hesaplamalar için element, bileşik veya karışım ($Z \leq 100$) programdaki atom numaralarına göre tanımlanır. Daha sonra program belirlenen enerjilerde çalışır [22].

Bu çalışma için belirlenen 6 adet mineralin ağırlıkça yüzde oranları ayrı ayrı WinXCOM programına girilerek belirlenen enerji değerlerinde öncelikle kütle azaltma katsayıları belirlendi. (μ/ρ), referans alınarak her bir mineral için YDK, ODK, μ ve OSY parametreleri belirlendi. Kullanılan minerallerin bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Minerallerin yoğunlukları ve kimyasal bileşimindeki elementlerin ağırlıkça yüzde oranları

Mineral Adı	Element (%)			Yoğunluk (g/cm ³)
Belleoite	Cu	Se		7,03
	61,68	31,32		
Berndite	Sn	S		4,50
	64,92	35,08		
Altaite	Pb	Te		8,14
	38,11	68,89		
Cadmoselite	Cd	Se		5,66
	58,74	41,26		
Dilithium	Li	Te		3,30
	90,19	9,81		
Eskebornite	Cu	Fe	Se	5,25
	22,91	20,14	56,95	

2.1 Radyasyon zırlama parametrelerinin belirlenmesi

Eşitlik (1) malzemelerin kütle zayıflama katsayısının belirlenmesine yardımcı olan Lambert-Beer yasasını temsil eder. Bu eşitlikte I ve I_0 sırasıyla başlangıçtaki ve zırlama malzemesinden geçtikten sonraki (zayıflatılmış) foton yoğunluklarını ifade etmektedir. μ , μ/ρ ve ρ sırasıyla malzemenin lineer zayıflatma katsayısını, kütle zayıflama katsayısını ve yoğunluğunu ifade etmektedir.

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

Kütle azaltma katsayısı malzemenin yoğunluğundan etkilenmezken, lineer azaltma katsayısı malzemenin yoğunluğundan etkilenmektedir. Dolayısı ile malzemenin fiziksel yapısından etkilenmeyen kütle azaltma katsayısı daha kullanışlıdır [23-25]. Kütle zayıflama katsayısı referans alınarak radyasyon azaltma parametreleri hesaplanabilmektedir. Bu parametrelerin birincisi olan lineer zayıflama katsayısı, kütle zayıflama katsayısının malzeme yoğunluğuna bölünmesiyle (eşitlik 1) elde edilebilir. Kütle zayıflama katsayısı zırlama malzemesi ile etkileşime giren fotonların sayısının ölçüsünü ifade etmektedir. Radyasyon zırlamada önemli olan bir diğer parametre olan yarı değer kalınlığı, gelen fotonun başlangıçtaki yoğunluğunun

yarısının zayıflatıldığı malzemenin kalınlığının bir ölçüsüdür. Başlangıçtaki radyasyon yoğunluğunun % 10 oranında geçtiği zırlama malzemesinin kalınlığını cm cinsinden ifade eden ölçüsüne onda_bir değer kalınlık ile ifade edilebilir. Ortalama serbest yol parametresi ise bir fotonun etkileşim gerçekleşmeden önce ortam içinde kat ettiği ortalama mesafedir. Bu parametreler zırlama malzemesinin seçilmesinde etkindir [26-29]. Lineer azaltma katsayısı belirlendikten sonra, yarı değer kalınlık, onda_bir değer kalınlık ve ortalama serbest yol değerleri sırası ile eşitlik (2), (3) ve (4) aracılığı belirlenebilmektedir.

$$YDK = \ln 2 / \mu \quad (2)$$

$$ODK = \ln 10 / \mu \quad (3)$$

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

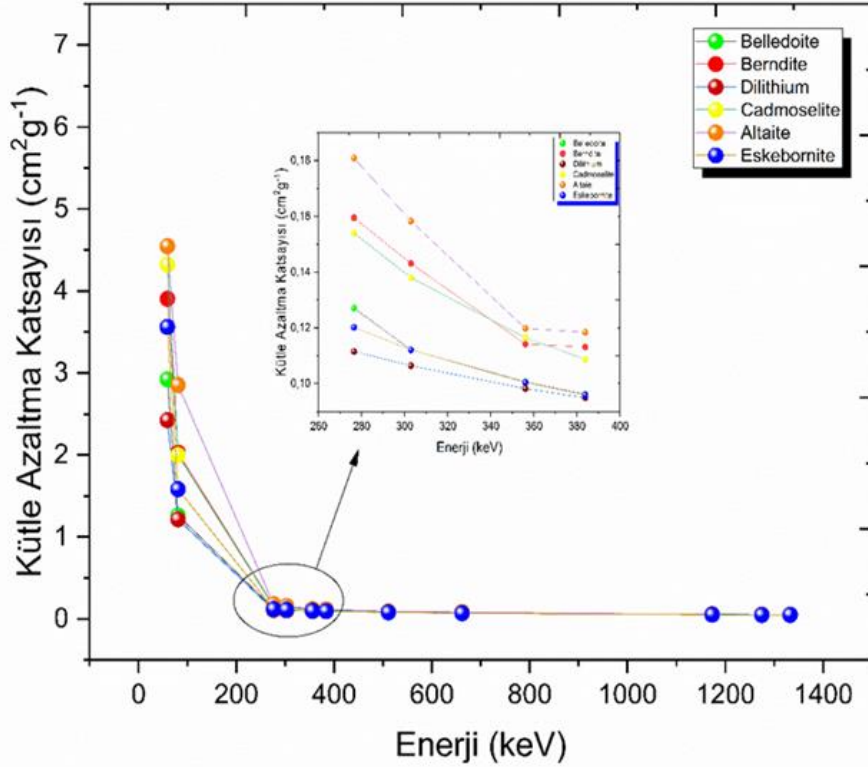
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada belledoite, berndite, altaite, cadmoselite, dilithium ve eskebornite minerallerinin 59,5-1332,5 keV gamma enerjisi aralığında kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, YDK, ODK ve OSY parametreleri incelenmiştir. Kütle azaltma katsayıları bakımından 6 adet mineral ayrı ayrı incelendiğinde 59,5 keV enerji değerinde en düşük kütle azaltma katsayısına $2,4250 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ ile dilithium sahip olurken en yüksek kütle azaltma katsayısı $4,5462 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ altaite mineraline ait olduğu gözlemlenmiştir.

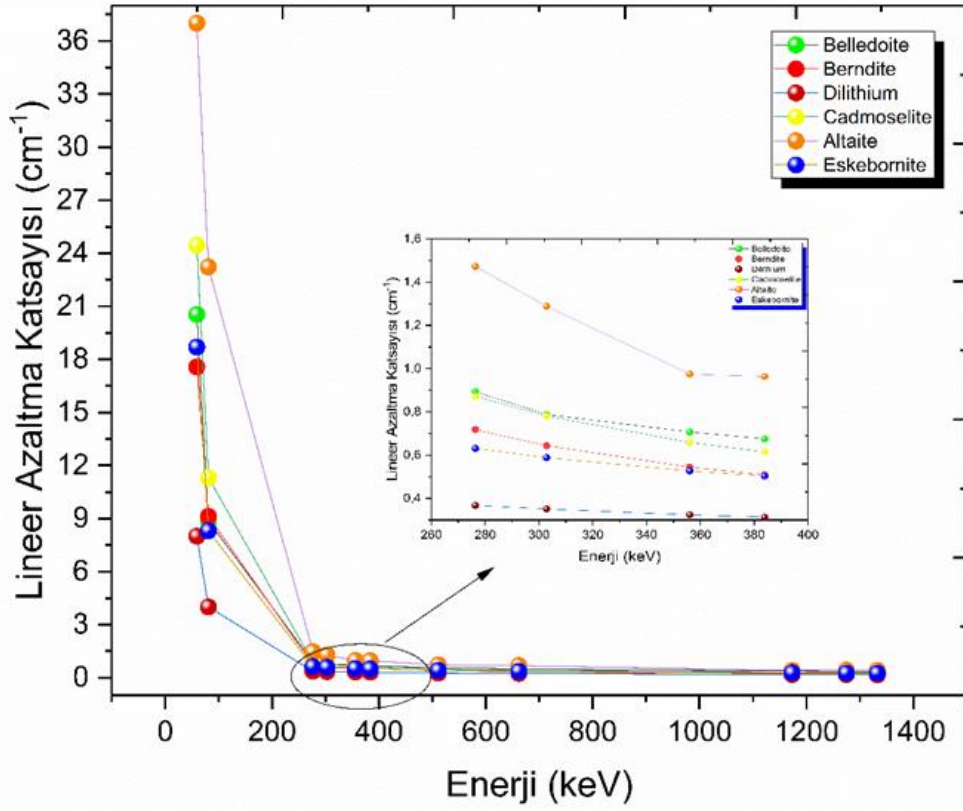
Kütle azaltma katsayıları bakımından Tablo 2’de verilen 6 adet minerali küçükten büyüğe doğru sıralarsak dilithium < belledoite < eskebornite < berndite < cadmoselite < altaite sonucu görülmektedir. En yüksek değer ile en düşük değer arasında % 87,47 oranında fark vardır. Düşük enerjide kütle azaltma katsayısı değerleri, çalışılan minerallerin kimyasal bileşimine önemli bir bağımlılık göstermiştir. Gamma enerjisi artıkça kütle azaltma katsayılarında düşüş gerçekleşmektedir. Kütle azaltma katsayılarında gerçekleşen azalmaya düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkinin neden olduğu söylenebilir. Bu bölgede kütle azaltma katsayıları fotoelektrik etki neden olduğu $E^{-3,5}$ ile orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca düşük enerji bölgesinde Z^{4-5} orantılı bir fotoelektrik etkiden bahsebeiliriz. Orta enerji bölgesinde ise compton saçılımı etkilidir ve E^{-1} orantılı olarak kütle azaltma katsayılarında hızlı olan bir düşüş gözlenmiştir. Yüksek enerji bölgelerinde ise çift oluşumu baskın süreçtir ve bu bölgede Z^2 ile orantılıdır. Bu bağımlılık bu bölgede de kütle azaltma katsayılarındaki değişimi hızlandırmaktadır. Çalışılan bütün minerallerin kütle azaltma katsayıları sırasıyla bizmitli betonlarla karşılaştırıldığında radyasyon zırlama bakımından daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir [30-34]. Çalışılan belledoite (B1), berndite (B2), dilithium (D1), cadmoselite (C1), altaite (A1) ve eskebornite (E1) minerallerinin teorik olarak incelenen kütle azaltma katsayısı değerleri Tablo 2’de ve Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 2. Seçilen minerallerin enerjiye göre değişen kütle azaltma katsayıları (cm^2g^{-1})

Mineral Adı						
Enerji	B1	B2	D1	C1	A1	E1
59,54	2,9220	3,9060	2,4250	4,3210	4,5462	3,5610
81,00	1,2613	2,0291	1,2160	1,9990	2,8530	1,5830
276,40	0,1271	0,1595	0,1115	0,1540	0,1809	0,1202
302,85	0,1121	0,1431	0,1064	0,1380	0,1583	0,1121
356,02	0,1006	0,1210	0,0982	0,1164	0,1198	0,1004
383,85	0,0961	0,1131	0,0949	0,1087	0,1184	0,0959
511,00	0,0817	0,0903	0,0829	0,0865	0,0899	0,0815
661,66	0,0715	0,0763	0,0736	0,0731	0,0839	0,0712
1173,24	0,0533	0,0549	0,0559	0,0525	0,0514	0,0530
1274,53	0,0511	0,0525	0,0533	0,0502	0,0531	0,0505
1332,50	0,0496	0,0513	0,0521	0,0491	0,0518	0,0497

**Şekil 1.** Seçilen minerallerin enerjiye göre değişen karşılaştırmalı kütle azaltma katsayıları (cm^2g^{-1})

İncelenen mineral türlerinin lineer azaltma katsayısı arasındaki farklılığın minerallerin yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. Bütün minerallerin yoğunluğu ortalama değer alınarak hesaplanabilmektedir. Lineer azaltma katsayısını belirleme çalışmalarında 59,5 keV gamma enerjisinde $37,0061 \text{ cm}^{-1}$ ile altaite mineralin en yüksek lineer azaltma katsayısına sahip olduğu gözlenmiştir. Geri kalan mineraller arasında yine 59,5 keV gamma enerjisinde $8,0025 \text{ cm}^{-1}$ ile dilithium mineralinin en düşük lineer azaltma katsayısına sahip olduğu gözlenmiştir. Lineer azaltma katsayıları arasındaki farkın, minerallerin yoğunluklarından ve mineral bileşimindeki elementlerin radyasyonu soğurabilme kapasiteleri ilgili olduğu söylenebilir. Elde edilen lineer azaltma katsayısı sonuçları şekil 2’de gösterilmiştir.

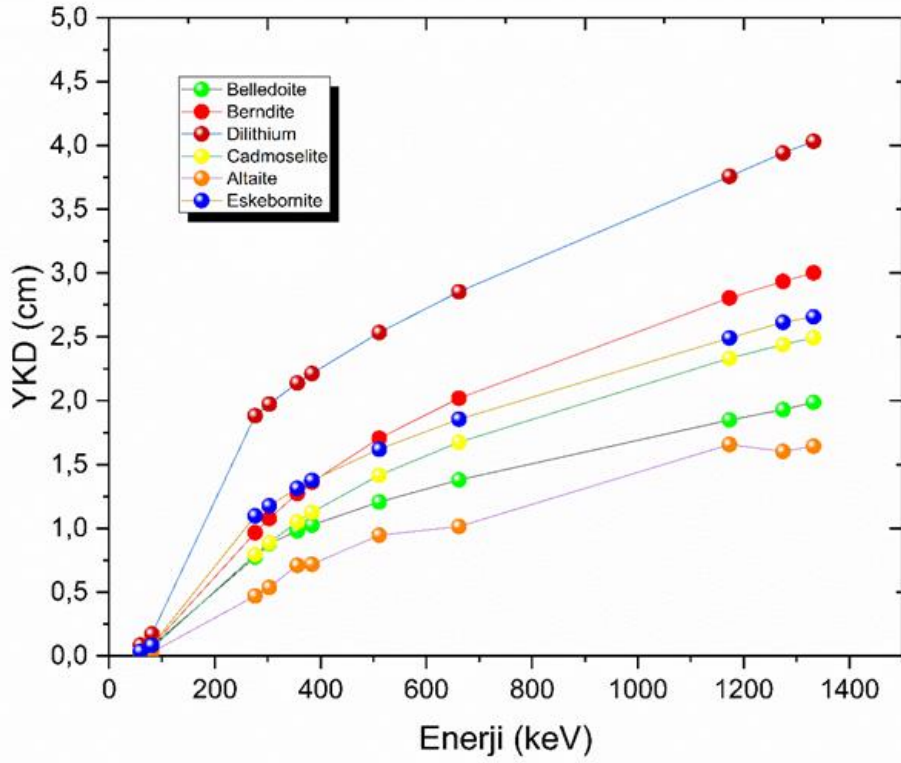


Şekil 2. Seçilen minerallerin enerjiye göre değişen karşılaştırmalı lineer azaltma katsayıları (cm^{-1})

İncelenen minerallerin zırlama yeteneklerinin yarı değer kalınlığı (YDK) açısından analizinin de yapılması önemlidir. Etkin bir zırlama malzemesinin küçük YDK'ya sahip olması gereklidir. İncelenen mineral türlerinin YDK'sı $59,0 \text{ keV} < E < 1,333 \text{ MeV}$ enerji aralığında hesaplanmıştır. Gamma enerjisinin artması ile birlikte YDK'nın da arttığı gözlemlenmiştir.

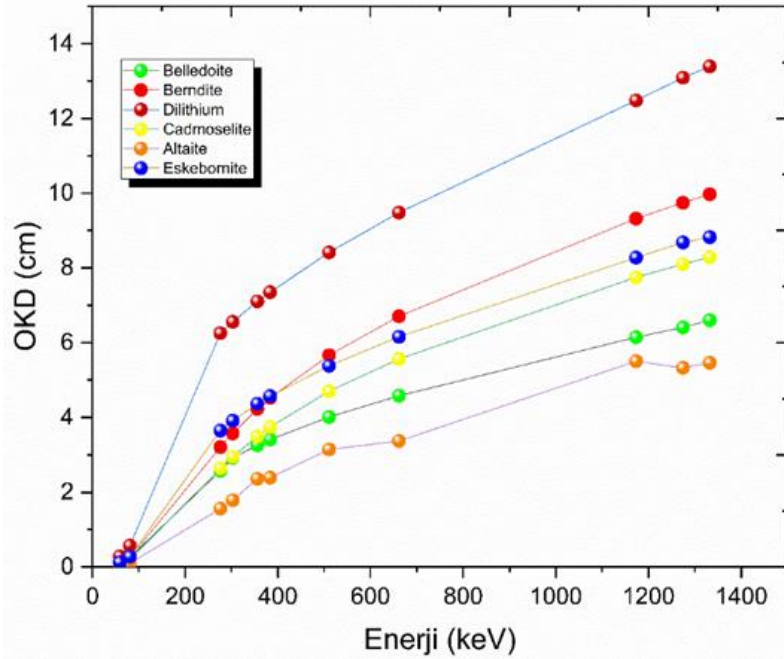
Elde edilen sonuçlara göre, çalışılan enerji aralığında altaite ve cadmoselite minerallerinin sahip olduğu YDK'nın, bizmit ve karışık manyetit-bizmit beton agregaları ile manyetit-bazalt agregalarının sahip olduğu YDK'dan [34] daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen minerallerin YDK'ları 0,0187 ile 4,0316 arasında değişmektedir. Örneğin 59,5 keV gamma enerjisinde altaite için YDK 0,0187 cm olurken cadmoselite için 0,0283 cm olarak gözlemlenmiştir. Bu diğer mineraller için de benzer düşük YDK değerleri görülmüştür.

YDK açısından en iyi sonucu veren altaite mineralinin değişimi 0,0187 ile 1,6439 cm arasındadır. Bu sonuca göre altaite mineralinin radyasyon tutuculuğunun yüksek olduğu söylenebilir. Sonuçlar grafiksel olarak şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Enerji değerlerine göre incelenen minerallerin YKD'larına ait araştırma bulguları

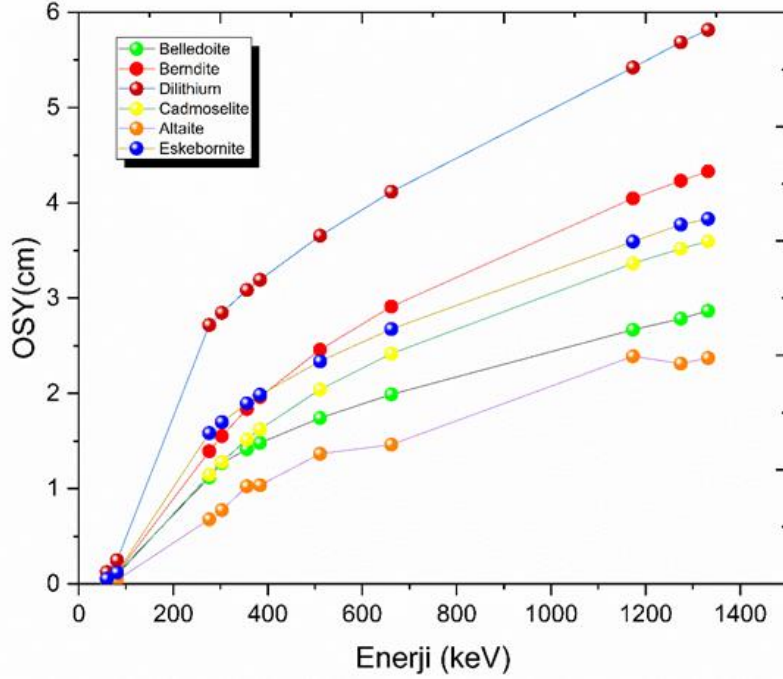
ODK parametresinde de YKD parametresine benzer olarak altaite mineralinin en iyi sonuçlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Altaite'nin 0,0622 ile 5,4609 cm arasında değişen sonuçlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çizilen grafikler şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Enerji değerlerine göre incelenen minerallerin OKD'larına ait araştırma bulguları

Şekil 3.5 ise incelenen minerallerin OSY değerlerindeki değişimi göstermektedir. Şekil 5 altaite ve dilithium minerallerinin ve 0,0595 MeV ila 1,333 MeV enerji aralığında sırasıyla 0,0270 ila 2,3716 cm ve 0,1250 ila 5,8163 cm arasında değişen en yüksek ve en düşük OSY'ye sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

100 keV'den düşük foton enerjilerinde, incelenen tüm mineraller için OSY parametresi, fotoelektrik etkileşim nedeni ile foton enerjilerinin artmasıyla hızla artmaktadır. 0,1 MeV < E < 1,4 MeV arasında ise compton etkileşimi ve çift oluşumu süreçlerinin daha çok baskın olması nedeniyle, OSY parametresi gamma gamma enerjisinin artmasıyla birlikte kademeli olarak artış göstermiştir.



Şekil 5. Enerji değerlerine göre incelenen minerallerin OSY parametrelerine ait araştırma bulguları

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kütle azaltma katsayısı değerleri, bellodoite, berndite, dilithium, cadmoselite, altaite ve eskebornite olmak üzere 6 adet mineral için WinXCOM programı kullanılarak 59,5 keV ila 1333 keV enerji aralığında incelendi. Elde edilen sonuçlara göre, kütle azaltma katsayısı üzerinde gamma enerjisinin belirleyici olduğu sonucu varılmıştır. Altaite ve cadmoselite minerallerinin incelenen bütün parametreler için en yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. İncelenen diğer parametrelerde de gamma enerjisindeki artıştan olumsuz etkilenmiştir. Radyasyon koruma kapasitesinin en yüksek altaite, en düşük dilithium mineraline ait olduğu açıktır. İncelenen minerallerden dilithium dışındaki minerallerin betona katkı maddesi olarak sıklıkla tercih edilen bizmutit, manyetit, limonit gibi katkı maddelerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Altaite başta olmak üzere incelenen minerallerin radyasyondan korunma için radyasyon barındıran tesislerde zırhlama malzemesi olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Mikhailova, A. F., & Tashlykov, O. L. (2020). The ways of implementation of the optimization principle in the personnel radiological protection, *Physics of Atomic Nuclei*, 83, 1718-1726.
- [2] Tashlykov, O. L., Shcheklein, S. E., Russkikh, I. M., Seleznev, E. N., & Kozlov, A. V. (2017). Composition optimization of homogeneous radiation-protective materials for planned irradiation conditions, *Atomic Energy*, 121, 303-307.
- [3] Russkikh, I. M., Seleznev, E. N., Tashlykov, O. L., & Shcheklein, S. E. (2015). Experimental and theoretical study of organometallic radiation-protective materials adapted to radiation sources with a complex isotopic composition, *Physics of Atomic Nuclei*, 78, 1451-1456.
- [4] Elmahroug, Y., Almatari, M., Sayyed, MI, Dong, MG ve Tekin, HO (2018). Bi₂O₃-V₂O₅-TeO₂ cam sisteminin radyasyondan korunma özelliklerinin MCNP5 kodu kullanılarak araştırılması, *Kristal Olmayan Katılar Dergisi* , 499 , 32-40.
- [5] Kouhara, Y., Yoshida, M., Takei, T., Iwasaki, H., Takemiya, T., Hatate, Y., ... & Mizuta, K. (2008). Application of lead-free vanadium sealing glasses to the flat fluorescence lump, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 34(2), 287-290.
- [6] Zakaly, H. M., Saudi, H. A., Issa, S. A., Rashad, M., Elazaka, A. I., Tekin, H. O., & Saddeek, Y. B. (2021). Alteration of optical, structural, mechanical durability and nuclear radiation attenuation properties of barium borosilicate glasses through BaO reinforcement: Experimental and numerical analyses, *Ceramics International*, 47(4), 5587-5596.
- [7] Issa, S. A., Zakaly, H. M., Tekin, H. O., Saudi, H. A., Badawi, A., Pyshkina, M., ... & Ene, A. (2021). Exploring the FTIR, optical and nuclear radiation shielding properties of samarium-borate glass: a characterization through experimental and simulation methods, *Nanomaterials*, 11(7), 1713.
- [8] El-Nahal, M. A., Elsafi, M., Sayyed, M. I., Khandaker, M. U., Osman, H., Elesawy, B. H., ... & Abbas, M. I. (2021). Understanding the effect of introducing micro-and nanoparticle bismuth oxide (Bi₂O₃) on the gamma ray shielding performance of novel concrete. *Materials*, 14(21), 6487.
- [9] Aktas, B., Acikgoz, A., Yilmaz, D., Yalcin, S., Dogru, K., & Yorulmaz, N. (2022). The role of TeO₂ insertion on the radiation shielding, structural and physical properties of borosilicate glasses. *Journal of Nuclear Materials*, 563, 153619.
- [10] Al-Ghamdi, H., Elsafi, M., Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., & Tamayo, P. (2022). Performance of newly developed concretes incorporating WO₃ and barite as radiation shielding material. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 4103-4114.

- [11] Gashti, M. F., Mousavinejad, S. H. G., & Khaleghi, S. J. (2023). Evaluation of gamma and neutron radiation shielding properties of the GGBFS based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 367, 130308.
- [12] Khan, M. N. A., Yaqub, M., & Malik, A. H. (2022). High density concrete incorporating grit scale aggregates for 4th generation nuclear power plants. *Construction and Building Materials*, 337, 127578.
- [13] Alzahrani, J.S., Alrowaili, Z.A., Alqahtani, M.S. et al. Influence of Alkaline Earth Metals on the Optical Properties and Radiation-Shielding Effectiveness of Sm³⁺-Doped Zinc Borophosphate Glasses. *J. Electron. Mater.* 52, 7794–7806 (2023).
- [14] UmashankaraRaja, R., Manjunatha, H.C., Vidya, Y.S. et al. Effect of chromium substitution on the gamma and neutron radiation shielding properties of calcium hexaferrite nanoparticles. *Appl. Phys. A* 129, 709 (2023).
- [15] Hesham M.H. Zakaly, Islam M. Nabil, Shams A.M. Issa, N. Almousa, Z.Y. Khattari, Y.S. Rammah, Probing the elasticity and radiation protection potential of neodymium(III) doped zinc and niobium tellurite glasses: An integrated simulated and applied physics perspective, *Materials Today Communications*, Volume 37, 2023.
- [16] M.S. AlBuriahi, H.H. Hegazy, Faisal Alresheedi, I.O. Olarinoye, H. Algarni, H.O. Tekin, H.A. Saudi, Effect of CdO addition on photon, electron, and neutron attenuation properties of boro-tellurite glasses, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 5, 2021.
- [17] Alsaab, A. H., & Zeghib, S. (2023). Study of Prepared Lead-Free Polymer Nanocomposites for X-and Gamma-ray Shielding in Healthcare Applications. *Polymers*, 15(9), 2142.
- [18] 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, 2057-2090.
- [19] Alshahri, S., Alsuhybani, M., Alosime, E., Almurayshid, M., Alrwais, A., & Alotaibi, S. (2021). LDPE/bismuth oxide nanocomposite: Preparation, characterization and application in X-ray shielding. *Polymers*, 13(18), 3081.
- [20] Kumar, K., & Davim, J. P. (Eds.). (2018). *Composites and advanced materials for industrial applications*. IGI Global.
- [21] Chang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., Luan, W., Yang, X., & Zhang, W. (2015). Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 356, 88-93.
- [22] Mohamed A. Saafan, Zeinab A. Etman, Abdelrahman S. Jaballah, Mohamed A. Abdelati, Strength and nuclear shielding performance of heavyweight concrete experimental and theoretical analysis using WinXCOM program, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 160, 2023.
- [23] Basha, B., Alsufyani, S. J., Olarinoye, I. O., Alrowaili, Z. A., Sadeq, M. S., Misbah, M. H., ... & Al-Buriahi, M. S. (2023). Synthesis, physical, optical, and radiation attenuation

- efficiency of Bi₂O₃+ SrF₂+ Li₂O glass system. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4), 100676.
- [24] Khan, S. U. D., Khan, S. U. D., Almutairi, Z., Haider, S., & Ali, S. M. (2020). Development of theoretical-computational model for radiation shielding. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 606-615.
- [25] Knoll, G.F. (2010) Radiation Detection and Measurement. 4th Edition, Wiley, Hoboken, 217.
- [26] Muhammad, N. A., Armynah, B., & Tahir, D. (2022). High transparent wood composite for effective X-ray shielding applications. *Materials Research Bulletin*, 154, 111930.
- [27] Sayyed, M. I. (2017). Half value layer, mean free path and exposure buildup factor for tellurite glasses with different oxide compositions. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 3191-3197.
- [28] El-Sayed A. Waly, Michael A. Fusco, Mohamed A. Bourham, Gamma-ray mass attenuation coefficient and half value layer factor of some oxide glass shielding materials, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 96, 2016, Pages 26-30.
- [29] Almurayshid, M., Alsagabi, S., Alssalim, Y., Alotaibi, Z., & Almsalam, R. (2021). Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield. *Radiation Physics and Chemistry*, 183, 109425.
- [30] Islam, S., Mahmoud, K. A., Sayyed, M. I., Alim, B., Rahman, M. M., & Mollah, A. S. (2020). Study on the radiation attenuation properties of locally available bees-wax as a tissue equivalent bolus material in radiotherapy. *Radiation Physics and Chemistry*, 172, 108559.
- [31] Al-Hadeethi, Y., Sayyed, M. I., Mohammed, H., & Rimondini, L. (2020). X-ray photons attenuation characteristics for two tellurite based glass systems at dental diagnostic energies. *Ceramics International*, 46(1), 251-257.
- [32] Akman F., Durak R., Turhan MF., Kaçal M.R., 2015. Studies on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients near the K edge in some samarium compounds. *Applied Radiation and Isotopes*, 101: 10.
- [33] Mahmoud, K. A., Tashlykov, O. L., El Wakil, A. F., Zakaly, H. M., & El Aassy, I. E. (2019, December). Investigation of radiation shielding properties for some building materials reinforced by basalt powder. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2174, No. 1).
- [34] Application of the MCNP5 code to simulate the shielding features of concrete samples with different aggregates, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 174, 2020.