



Monte Carlo simulation of gamma shielding properties of Lanthanum hexaboride (LaB₆) and Cerium hexaboride (CeB₆) materials synthesized by magnesiothermic reduction

Aynur Özcan^{1*}, Nureddin Türkan², Mecit Aksu³, Hasan Gülbiçim⁴, Esra Kurt¹

¹Department of Physics, Gazi University, Faculty of Science, Ankara, Türkiye

²Department of Physics Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul Medeniyet University, 34720 Istanbul, Türkiye

³Department of Chemistry, Faculty of Science and Arts, Düzce University, 81620 Düzce, Türkiye

⁴Department of Nuclear Medicine, Faculty of Medicine, Ondokuz Mayıs University, 55139 Samsun, Türkiye

Highlights:

- Synthesis of Lanthanum and Cerium hexaborides (LaB₆ and CeB₆) using magnesiothermic reduction technique.
- X-ray diffractometry (XRD) and Energy Dispersive X-ray (EDX) spectroscopy of samples.
- Investigation of Gamma ray absorption properties of samples by Monte Carlo method.

Keywords:

- Gama rays
- Monte Carlo
- Shielding
- Hexaboride

Article Info:

Research Article

Received: 19.01.2022

Accepted: 23.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1059970

Correspondence:

Author: Aynur Özcan
e-mail: aynur@gazi.edu.tr
phone: +90 507 379 0471

Graphical/Tabular Abstract

The gamma ray shielding properties of the presented samples which were synthesized by magnesiothermic reduction method are investigated by the help of Monte Carlo technique. Implemented process in this study was schematically illustrated in Figure A.

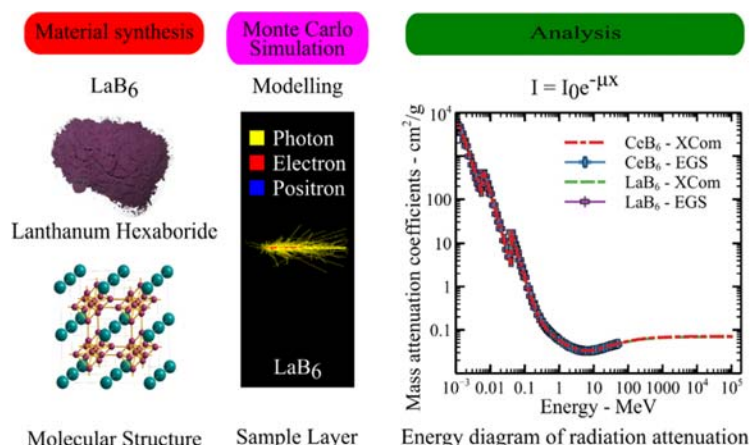


Figure A. Schematic representation of the research process

Purpose: The purpose of this study is to synthesize the lanthanum hexaboride and cerium hexaboride materials within the optimum durability conditions and also investigate their gamma ray absorption features by using Monte Carlo method.

Theory and Methods: Magnesiothermic reduction technique was used to synthesize materials by convenient experimental set up. Molecular structure and contents of the materials were determined using XRD and EDX spectroscopy for using the results in the Monte Carlo simulations. Beer-Lambert law was applied to calculate transmitted, absorbed and reflected quantity of incident photons directed onto material longitudinally. Atomic cross-section data of the related media were calculated by PEGS4 code of EGSnrc with broad photon energy range including low and high energy regions. After that, radiation absorption parameters such as μ/ρ , HVL, TVL and MFP were calculated by using the developed code. Similar calculations were carried out by XCOM program to compare consistency of the obtained results. The calculated results were also compared with the previously investigated results for vermiculite, concrete, borosilicate, granite and lead.

Results: The authors were succeeded desired purity level of the synthesized materials within the optimum conditions experimentally. It was observed from the calculated results that the lanthanum and the cerium hexaborides have higher absorption capability of gamma rays according to the aforementioned materials. It was also observed that they were more comparable with lead which is the standard shielding material.

Conclusion: The results obtained from this study have showed that the synthesized materials are more promising than some previously investigated materials for radiation shielding. By thinking in terms of advantages and disadvantages, these materials may play an important role for protection of the people from hazardous effects of radiations used in medicine, industry, agriculture, nuclear power plants, research reactors, etc.



Magnezyotermik indirgeme ile sentezlenen Lantanyum hekzaborür (LaB₆) ve Seryum hekzaborür (CeB₆) malzemelerinin gama zırhlama özelliklerinin Monte Carlo Simülasyonu

Aynur Özcan^{1*}, Nureddin Türkan², Mecit Aksu³, Hasan Gülbiçim⁴, Esra Kurt¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500 Ankara, Türkiye

²İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri ve Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, 34720 İstanbul, Türkiye

³Düzce Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 81620 Düzce, Türkiye

⁴Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Bölümü, 55139 Samsun, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Lantan ve Seryum hekzaboritler (LaB₆ ve CeB₆) magnezyotermik indirgeme tekniği kullanılarak sentezlenmesi
- Numunelerin, X-ray difraktometri (XRD) ve Energy Dispersive X-ray (EDX) spektroskopileri
- Numunelerin Gama ışını absorpsiyon özelliklerinin Monte Carlo yöntemi ile incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.01.2022

Kabul: 23.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1059970

Anahtar Kelimeler:

Gama ışınları,
Monte Carlo,
zırhlama,
heksaborür

ÖZ

Radyasyon kullanımı tıp, sanayi, tarım ve nükleer santraller alanında günden güne artarak gelişmeye devam etmektedir. Bu alanlardaki iş kollarında çalışanların ve halkın radyasyonun zararlı etkilerinden korunması, nükleer teknolojilerin gelişiminin yanı sıra oldukça önemli başka bir konudur. Bu çalışmada, kimya laboratuvarımızda sentezlenen bazı hekzaborürler (LaB₆ ve CeB₆) X-ışını kırınımı (XRD) ile analiz edilerek bunların ortalama kristal boyutları Debye Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Nano boyutta oldukları gözlenen bu numunelerin daha sonra gama ışını zırhlama özellikleri incelenmiştir. Numunelerin gama ışını zırhlama özelliklerinin tespiti için Monte Carlo yöntemi kullanılarak kütle zayıflatma katsayıları, yarı değer kalınlığı, orta bir değer kalınlığı, ortalama serbest yol değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemde 10⁻³ MeV – 10⁶ MeV foton enerji aralığında hesaplamalar yapılmış olup, sonuçta elde edilen veriler XCom programı tarafından hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada MC ve XCom kullanılarak, incelenen bileşikler için elde edilen bu sonuçlar, radyasyon koruyucu standart malzemeler olan kurşun, vermiculit, borosilikat, beton ve granit için elde edilmiş sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Sonuçta başarılı bir tutarlılık gözlenmiş ve üretilmiş hekzaborürlerin literatürde daha önce araştırılan malzemelere kıyasla oldukça umut verici gama koruma özelliklerine sahip olduğu kanısına varılmıştır.

Monte Carlo Simulation of gamma shielding properties of Lanthanum hexaboride (LaB₆) and Cerium hexaboride (CeB₆) materials synthesized by magnesiothermic reduction

H I G H L I G H T S

- Synthesis of Lanthanum and Cerium hexaborides (LaB₆ and CeB₆) using magnesiothermic reduction technique
- X-ray diffractometry (XRD) and Energy Dispersive X-ray (EDX) spectroscopy of samples
- Investigation of Gamma ray absorption properties of samples by Monte Carlo method

Article Info

Research Article

Received: 19.01.2022

Accepted: 23.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1059970

Keywords:

Gamma rays,
Monte Carlo,
shielding,
hexaboride

ABSTRACT

The use of radiation continues to develop day by day in the fields of medicine, industry, agriculture and nuclear power plants. The protection of the employees and the public from the harmful effects of radiation is another important issue besides the development of nuclear technologies. In this study, some hexaborides (LaB₆ and CeB₆) synthesized in our chemistry laboratory were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and their average crystal sizes were calculated using the Debye Scherrer equation. The gamma ray shielding properties of these samples, which were observed to be nano-sized, were then investigated. In order to determine the gamma ray shielding properties of the samples, the mass attenuation coefficients, half value thickness, one-tenth value thickness, mean free path values were calculated using the Monte Carlo method. In this method, calculations were made in the photon energy range of 10⁻³ MeV – 10⁶ MeV, and the resulting data were compared with the ones calculated by the XCom program. Here, using MC and XCom, these results obtained for the investigated compounds were compared with the results obtained for the radiation shielding standard materials such as lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite too. As a result, a successful consistency was observed and it was concluded that the produced hexaborides had very promising gamma protection properties compared to the materials previously investigated in the literature.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *aynur@gazi.edu.tr, nturkan@hotmail.com, hasanglbcm@gmail.com, mecitaksu@gmail.com, esra.kurt@gmail.com / Tel: +90 507 379 0471

1. Giriş (Introduction)

Radyoizotoplar, endüstriyel ve tıbbi alanlardaki yeni teknolojilerde, birçok uygulama için kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda madde-foton etkileşimlerinin araştırılmasına ilgi yeniden artarak, bu radyoaktif kaynakların birçok alanda (radyasyon biyofiziği ve koruyucu malzemeler, nükleer endüstri ve uzay araştırma uygulamaları vb.) kullanımı kritik bir önem kazanmıştır. Bununla birlikte tedbir alınmadığı takdirde radyoizotoplar, radyasyon yayınladıklarından dolayı doğaya yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar ve parçacıklar salarak çevre kirliliğine ve ölümcül sonuçlara yol açabilmektedirler. Bu nedenle günümüzde, uygun radyasyon zırhlama malzemelerinin tasarımı ve geliştirilmesi için yoğun çabalar sarf edilmekte olup, bu konuda deneysel ve teorik birçok önemli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan malzemeler ve elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir; Gülbiçim vd., alternatif bir gama zırhlama malzemesi olarak vermikülit [1] ve bazı metal bor bileşiklerini [2] incelemişlerdir. İçkecan vd. [3] aktif karbonlu yapıdaki malzemelerin gama zırhlama özelliklerini çalıştılar. Chen vd., yaptıkları bir çalışmada [4] açık ve kapalı uçlu metal köpüklerin radyasyon zırhlama özelliklerini ve diğer bir çalışmada ise [5] kompozit metal köpüklerde X-ışınının zayıflama verimliliğinin gama-ışını ve nötronlarınkilerle karşılaştırılmasını çalışmışlardır.

Bir başka çalışmada Sayyed vd.[6], gama ışınlarına karşı koruma amaçlı farklı tuğlaların enerji soğurma ve maruz kalma faktörlerinin kapsamlı bir araştırması yapılmıştır. Diğer bir çalışmada Mann vd. [7] düşük Z atom numaralı soğurucu kalınlığının gama ışıını koruma parametreleri üzerindeki etkisini, diğer bir çalışmada ise [8] bazı nükleer mühendislik malzemelerinin γ -ışınları koruma davranışlarını gözden geçirmişlerdir. MCNP-4C kodu, XCOM programı ve mevcut deneysel veriler kullanarak şeffaf koruyucu malzemeler olarak baryum-bizmut-borosilikat camların gama ışıını zırhlama özelliklerini incelediler [9]. İlerleyen süreçte Petrol-toprak örneklerinin gama zayıflatması davranışı araştırıldı [10]. Lakshminarayana vd. [11], gama ve nötron radyasyon zırhlama uygulamaları için çok bileşenli borat camların yapısal, termal özellikleri ve ekranlama parametrelerini çalışmışlardır. Zorla vd. [12], doğal ve zenginleştirilmiş bor ile aşılınmış bazalt liflerle güçlendirilmiş yüksek performanslı betonun radyasyon koruma özelliklerini çalıştılar. Salgado vd. [13], yapay sinir ağı ile petrol ve türevleri için yoğunluk tahmini yaparak gama ışıını zayıflamasını incelediler. Oto vd. [14], çeşitli cevherlerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerinin çalıştılar. Waly vd. [15], çok katmanlı PWR kuru fiçilerde özel cam ve betonun gama zırhlama üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Büyükyıldız vd [16], çeşitli gama ışıını kaynaklarının fotonları için kaynak alanındaki 304L paslanmaz çelik numunelerin radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesini çalıştılar. Akman vd. [17] bazı silisit, borür ve oksit türleri seramikler için radyasyon zırhlama özelliklerini, Cherkashina vd. [18] poliamid kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerini ele almışlardır. El-Agawany vd. [19], TeO_2 -ZnO cam sistemlerinin kütle durdurma gücü, öngörülen menzili ve nükleer zırhlama özellikleri üzerindeki Sm_2O_3 etkilerini incelemişlerdir. Rammah vd. [20], gama radyasyonu zırhlaması için kullanılan çevre dostu La^{3+} iyonlarla katkılı fosfat camlar /cam seramiklerin nükleer güvenlik uygulamalarındaki potansiyellerini ortaya koymuşlardır. Rammah ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada [21], Bizmut borat camların optik ve gama zırhlama özelliklerini çalıştılar. Abouhaswa vd. [22] B_2O_3 - Pb_3O_4 -ZnO camlarının nükleer zırhlama özelliklerini, Athanasakis vd. [23] Füzyon reaktör zırhlama malzemesi olarak yüksek sıcaklıklı W2BeW kompozitin özelliklerini çalışmışlardır. Song vd. [24], nükleer reaktörlerin radyasyona karşı zırhlaması için çok amaçlı optimizasyon yöntemi üzerine araştırma yapmışlardır. Abbasova ve arkadaşları [25] dental uygulamalarda kullanılan bazı materyallerin gama ışıını

zayıflama parametrelerini incelemiş, Agar vd. [26], Pd/Ag bazı alaşımların gama ışıını zırhlama özellikleri üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Olukotun vd. [27], EGS5, XCOM ve Phy-X/PSD kullanılarak üretilmiş kil-polietilen kompozitlerin gama ışıını zırhlama kapasitelerini çalışmışlardır. Singh vd. [28], yaptıkları bir çalışmada gama ışınlarına karşı bir zırhlama tasarımı için potansiyel bir aday olarak eriyebilir alaşımları incelemişler, diğer bir çalışmada ise [29] Phy-X/PSD kullanarak Al_2O_3 - PbO - B_2O_3 camlarına WO_3 eklenmesi sonucunda gama ışıını zırhlama yeterliliği analiz etmişlerdir. Gaikwad vd. [30] araştırmasında, WO_3 - TeO_2 - PbO cam sisteminin gama ışıını zırhlama yeterliliğinin farklı cam ve betonlarla karşılaştırması yapılmıştır. Mahmoud vd. [31], MCNP-5 kodunu kullanarak bazı doğal kayalar için WO_3 -Gama ışıını zırhlama özelliklerini ve maruziyet faktörünü karşılaştırmalı olarak çalışmışlardır. Obaid vd. [32], gama ışıını zırhlama uygulamaları açısından bazı kayalar için zayıflama katsayıları ve maruziyet faktörü üzerinde durmuşlardır. Han vd. [33], bazı doğal mineraller için kütle zayıflama katsayılarının, etkin atom ve elektron sayılarının belirlenmesi ile ilgili çalışmışlardır.

Bu araştırmanın amacı, XCom yazılımı ve EGSnc Monte Carlo kodunu kullanarak sentezlenmiş metal borür (LaB_6 ve CeB_6) malzemelerin gama ışıını absorpsiyonu için koruyucu özelliklerini analiz etmek ve bunların foton absorpsiyonu açısından uygulanabilirliğini araştırmaktır. Bu çalışmaya benzer çalışmalar; Gülbiçim ve arkadaşları tarafından Vermikülit için [1] ve NdB_6 , SmB_6 , GdB_6 metal boridleri için [2] Monte Carlo simülasyonu yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar ile, İçkecan ve arkadaşları tarafından [3] emprenye edilmiş aktif karbonların (AC1 ve AC2) gama ışınlarına karşı zırhlama özelliklerinin yine Monte Carlo tekniği (XCom yazılımı ve EGSnc simülasyonu) kullanılarak yapılan inceleme çalışmasıdır. Bu çalışmalardan Gülbiçim vd. yaptığı ilk çalışmada [1] malzemenin bu özellikleri kalite ve verimlilik açısından, hem deney yapılarak hem de teorik simülasyonla incelenmiştir.

Buradaki çalışmada hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları (μ_m) ile yarı-değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri, kurşun, borosilikat, beton, vermikülit ve diğer bazı bor bileşiklerinkilerle karşılaştırılmış ve bunun sonucunda, incelenen metal borürlerin (LaB_6 ve CeB_6) gama ışıını soğurma yeteneği açısından iyi birer koruyucu malzeme olma karakteristiği gösterdiği belirlenmiştir. Böylece, burada incelenen metal borürlerin endüstri, tıp ve ilgili sahalarda gama radyasyonunu tutucu ve zırhlama özelliğine sahip koruyucu birer malzeme olarak kullanılmaları açısından iyi seçenekler olabilecekleri gözlenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. La_2O_3 'in İndirgenmesi (Reduction of La_2O_3)

1 mmol La_2O_3 , 6 mmol B_2O_3 ve 25 mmol toz Mg bir porselen kroze içerisinde homojen dağılım oluşuncaya kadar karıştırıldı. Kroze muhteviyatı kül fırınında 900°C 'ye kadar ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 4 saat bekletildi ve oda sıcaklığına kadar hızlıca soğutuldu. Soğutulan numune bir behere aktarıldı ve önce 1M HCl içerisinde 24 saat karıştırıldı. Daha sonra derişik asitte 24 saat bekletildi. Elde edilen siyah renkli çökelek süzülerek iki kez saf su ile yıkandı. 120°C 'de etüvde kurutulularak akabinde 450°C 'de 2 saat tavlandı.

2.2. CeO_2 'in İndirgenmesi (Reduction of CeO_2)

1mmol CeO_2 3mmol B_2O_3 ve 13mmol toz Mg Fbir porselen kroze içerisinde iyice karıştırıldı. Kroze muhteviyatı kül fırınında 800°C 'ye kadar ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 2 saat bekletildi ve hızlıca soğutuldu.

Soğutulan numune bir behere aktarıldı ve önce 1 M HCl içerisinde bir gün süre ile karıştırıldı. Daha sonra derişik asitte bir gün süre ile bekletildi. Elde edilen gri renkli çökelek süzülerek iki kez saf su ile yıkandı. 120°C’de etüvde kurutularak akabinde 450°C’de 2 saat tavlandı.

2.3. Radyasyon Zırhlama Parametreleri (Radiation Shielding Parameters)

Akısı I_0 olan bir gama ışını foton demetinin x (cm) kalınlığındaki bir cisim ile etkileşme olasılığı, gama ışını lineer zayıflatma katsayısı μ olmak üzere, Eş. 1 ile verilir [25].

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

Lineer zayıflatma katsayısı μ , belli bir foton enerjisinde aynı materyalin değişik yoğunluklarında farklı değerler almaktadır. Örneğin foton enerjisi değiştirilmeden yapılan incelemede 11,34 g/cm³ yoğunluklu kurşun materyali için elde edilen lineer zayıflatma katsayısı ile 8,63 g/cm³ yoğunluğa sahip kurşun materyali için elde edilen lineer zayıflatma katsayısı birbirinden farklı sonuçlar verirler. Bu nedenle radyasyon zırhlama çalışmalarında, yoğunluktan bağımsız bir karakteristik olması nedeni ile kütle zayıflatma katsayısı kullanılır. Kütle zayıflatma katsayısı μ_m (cm²/g), μ ’nin ρ ’ye bölünmesi ile hesaplanır (Eş. 2) [1].

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho t} \quad (2)$$

Burada ρ , g/cm³ cinsinden olup, foton soğurucu malzemenin yoğunluğudur. Radyasyonun madde ile etkileşiminde önemli diğer bir parametre, malzeme içinde ilerleyen radyasyonu tanımlayan ortalama serbest yol (MFP) ifadesidir [1]. Bu ifade Eş. 3 ile verilir.

$$X_m = \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

Bazı uygulamalarda, kalınlık değeri ile ilgili olarak bilinen HVL (yarı değer kalınlığı) parametresi, herhangi bir malzemeye gelen fotonların sayısını yarıya indiren tabaka kalınlığı olarak bilinir. Benzer bir parametre olan TVL (Onda bir değer kalınlığı) ise, standart bir malzemeye gelen foton yoğunluğunu %10’ una indiren tabaka kalınlığı olarak bilinir. Bu parametreler aşağıdaki Eş.4 ve Eş. 5 eşitlikleri kullanılarak hesaplanır [29].

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (4)$$

$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (5)$$

2.4. Monte Carlo (MC) Simulasyonu (Monte Carlo (MC) Simulation)

Monte Carlo (MC) tekniği, genellikle fiziksel problemlerin simülasyon yardımıyla çözümlenmesinde uygulanmaktadır. EGSncr adı verilen kod, enerjileri birkaç keV’den yüzlerce GeV’ a kadar değişen rastgele üç boyutlu bir geometrideki elektron ve fotonların tümünün Monte Carlo simülasyonu için kullanılan çok amaçlı bir yazılım aracıdır [34]. Bu çalışmada incelenen LaB₆ ve CeB₆ malzemelerinin radyasyon zırhlama özellikleri ile ilgili sonuçlara ulaşmak için, daha önce çalışılmış olan aktif karbon, kurşun ve vermikülit malzemelerinin μ/ρ hesaplanmasında EGSncr program kodu kullanılmıştır [1-3].

Bu çalışma yapılırken MC hesaplamaları için foton enerjileri, malzemeler ve geometri tanımları ile ilgili temel parametreler açıklanmış ve ardından belirsizliği %1’in altına düşürmek için 2×10^8

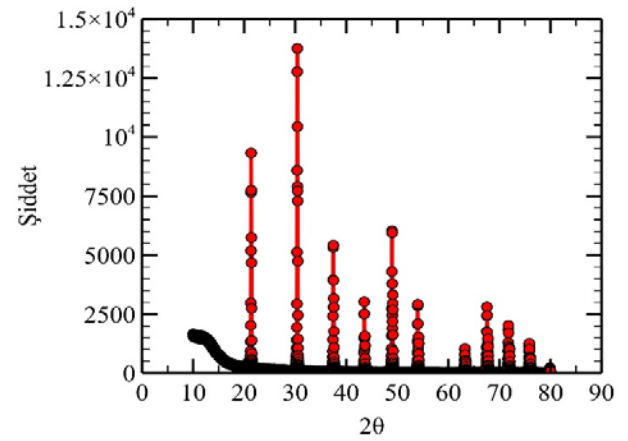
foton öyküsü kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Fotoelektrik etki, Rayleigh saçılması, Compton saçılması ve çift oluşum ile elektron etkileşimi ve Bremsstrahlung fotonları, foton geçişine göre irdelenerek simülasyondaki ana fiziksel süreç içine dahil edilmiştir.

2.5. XCom Hesaplamaları (XCom Calculations)

XCom yazılımı, 1.0 keV – 10.0 MeV [35] foton enerjileri arasındaki fotonlara maruziyete bırakılan kurşun, beton, borosilikat ile vermikülit ve aktif karbon [1-3] için elde edilen sonuçların yanında aynı enerjilerle bu çalışmada incelenen LaB₆ ve CeB₆ malzemelerinin özelliklerinin de daha iyi anlaşılabilmesi için kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

LaB₆ molekülüne ait X-ışını kırınımı desenleri Şekil 1’de görülmekte olup pik şiddet değerlerinden de görüldüğü gibi kristalinitesi yüksektir. Ayrıca ICDD kart numarası 06-0401 ile uyumlu olup Debye Scherrer eşitliğine göre ortalama kristal boyutu 29,41 nm olarak hesaplanmıştır. Derişik HCl ile muamele edilmesi sonucunda, numune içerisinde bulunması muhtemel safsızlıkların (MgO, B₂O₃ vs.) bertaraf edildiği anlaşılmaktadır.

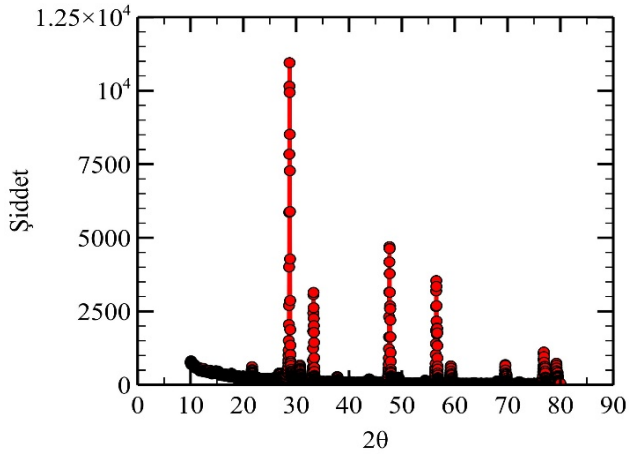


Şekil 1. LaB₆’ün X-ışını toz kırınımı (XRD) desenleri.
(X-ray diffraction (XRD) patterns of LaB₆)

CeB₆ molekülüne ait X-ışını kırınımı desenleri ise Şekil 2’de görülmekte olup ICDD kart numarası 11-0670 ile uyumludur. Debye Scherrer eşitliğine göre ortalama kristal boyutu 29,11 nm olarak hesaplanmıştır. Sentez esnasında %20 oranında daha fazla Mg kullanılmasının sebebi, yüksek sıcaklıkta sıvı hale geçerek buharlaşan Mg’un buharlaşarak miktarının azalmasını önlemek ve böylece verimin arttırılmasını sağlamaktır.

Bu çalışmada, LaB₆ ve CeB₆ bileşikleri için toplam kütle zayıflama katsayıları (μ_m), XCOM ve EGS kodları kullanılarak, 10 keV – 10⁴ MeV foton enerji aralığında hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granit değerleri ile karşılaştırmalı olarak yukarıdaki tabloda (Tablo 1) ve şekilde (Şekil 3) verilmiştir. Buna göre, elde edilen kütle zayıflama katsayılarının kıyaslanabilir olduğu ve hatta gama zırhlama malzemesi olma potansiyeli açısından daha iyi özellikler sergilediği, bu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte ilgili tablo ve şekilde verilen düşük enerji bölgesinde (1-100 keV) CeB₆, LaB₆ ve Pb materyali için soğurma katsayılarında ani değişim gösteren bazı pikler gözükmemektedir.



Şekil 2. CeB₆'ün X-ışını toz kırınımı (XRD) desenleri.
(X-ray diffraction (XRD) patterns of CeB₆)

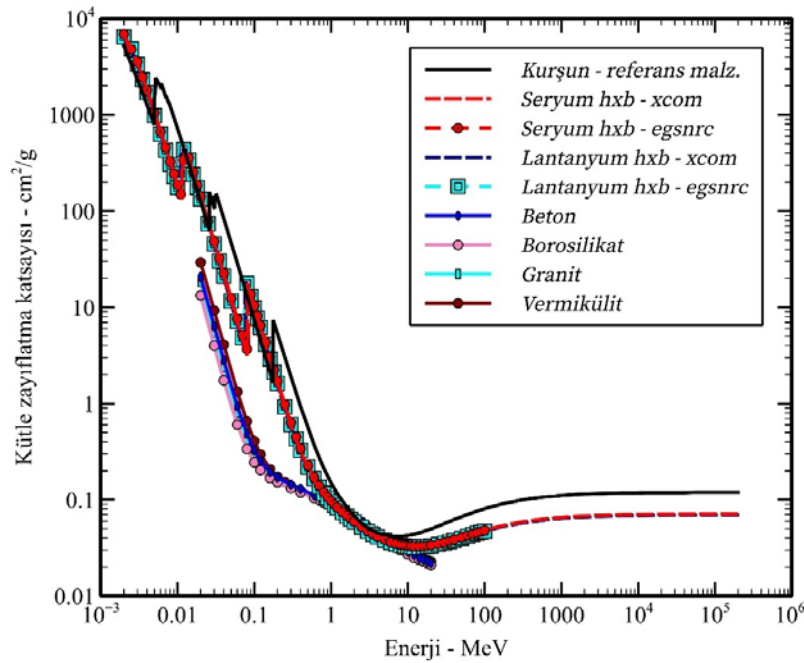
Bu pikler, elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesinde özellikle yüksek atom numaralı elementlerin kabuk olarak

adlandırılan (K, L, M, ... kabukları) atomik yörüngelerdeki elektron bulutlarının olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Bu değişimler foton-madde etkileşiminde atom orbitallerine bağlı olarak en iç kabuk olan K kabuğunda tek pik, L kabuğunda 3 ve M kabuğunda 5 pik şeklinde ortaya çıkarak enerji-kütle zayıflatma katsayısı grafiklerinde göze çarpmaktadır. K kabuğunda tek bir yörünge olduğundan pik grafikte net ayırt edilebilirken, L kabuğunda enerji düzeyleri birbirine çok yakın 3 yörünge ve M kabuğunda da neredeyse aynı enerji düzeyinde 5 elektron yörüngesi yer aldığından bu pikleri grafikte ayırt etmek oldukça zordur. Ancak kurşun gibi yüksek atom numaralı bir element için L kabuğundaki yörüngelerden kaynaklı foton soğurulmaları 3'lü pik şeklinde Şekil 3'te görülebilmektedir.

Aşağıda verilen Tablo 2'de ise, LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan yarıdeğer kalınlık değerleri (HVL), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitin değerleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan yarıdeğer kalınlık değerleri (HVL) aşağıda Şekil 4'de, alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitin değerleri ile karşılaştırmalı olarak grafik halinde sunulmuştur.

Tablo 1. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan kütle zayıflatma katsayılarının (μ_m), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırılması.
(Comparison of mass attenuation coefficients (μ_m) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

Enerji	CeB ₆	CeB ₆	LaB ₆	LaB ₆	Kurşun	Vermikülit	Borosilikat	Beton	Granit
	XCOM	EGS	XCOM	EGS					
MeV	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
0,010	140,600	141,859	132,400	133,441	125,700	29,220	13,250	20,650	18,250
0,015	47,570	48,654	44,690	45,633	108,300	9,283	3,990	6,436	5,561
0,020	21,730	22,554	20,380	21,141	84,040	4,092	1,737	2,826	2,413
0,030	7,131	7,621	6,679	7,164	28,940	1,333	0,603	0,945	0,804
0,040	17,690	3,673	17,270	17,740	13,440	0,650	0,337	0,489	0,421
0,050	10,180	10,461	9,659	9,861	7,387	0,406	0,245	0,327	0,287
0,060	6,306	6,510	5,965	6,155	4,530	0,297	0,204	0,255	0,228
0,080	2,935	3,067	2,774	2,898	2,112	0,209	0,168	0,195	0,179
0,100	1,631	1,718	1,541	1,617	5,336	0,174	0,152	0,171	0,158
0,150	0,592	0,634	0,562	0,603	1,910	0,140	0,132	0,144	0,135
0,200	0,316	0,341	0,302	0,325	0,936	0,125	0,120	0,130	0,120
0,300	0,159	0,172	0,154	0,166	0,373	0,107	0,104	0,112	0,105
0,400	0,113	0,120	0,111	0,117	0,215	0,096	0,093	0,100	0,094
0,500	0,092	0,097	0,091	0,095	0,150	0,087	0,085	0,091	0,086
0,600	0,080	0,083	0,079	0,082	0,117	0,081	0,079	0,084	0,080
0,800	0,067	0,068	0,066	0,067	0,084	0,071	0,069	0,074	0,070
1,000	0,058	0,059	0,058	0,059	0,068	0,064	0,062	0,067	0,063
1,250	0,051	0,052	0,051	0,052	0,057	0,057	0,056	0,059	0,056
1,500	0,047	0,047	0,046	0,047	0,051	0,052	0,051	0,054	0,051
2,000	0,041	0,041	0,041	0,041	0,045	0,045	0,044	0,047	0,044
3,000	0,036	0,036	0,036	0,036	0,042	0,037	0,035	0,038	0,036
4,000	0,034	0,034	0,034	0,034	0,042	0,032	0,030	0,032	0,031
5,000	0,033	0,033	0,033	0,033	0,043	0,029	0,027	0,029	0,028
6,000	0,033	0,033	0,033	0,032	0,044	0,027	0,025	0,027	0,026
7,000	0,033	0,033	0,033	0,032	0,045	0,025	0,024	0,025	0,024
8,000	0,033	0,033	0,033	0,032	0,047	0,024	0,023	0,024	0,023
9,000	0,034	0,033	0,033	0,033	0,048	0,024	0,022	0,023	0,022
10,000	0,034	0,034	0,034	0,033	0,050	0,023	0,021	0,022	0,022



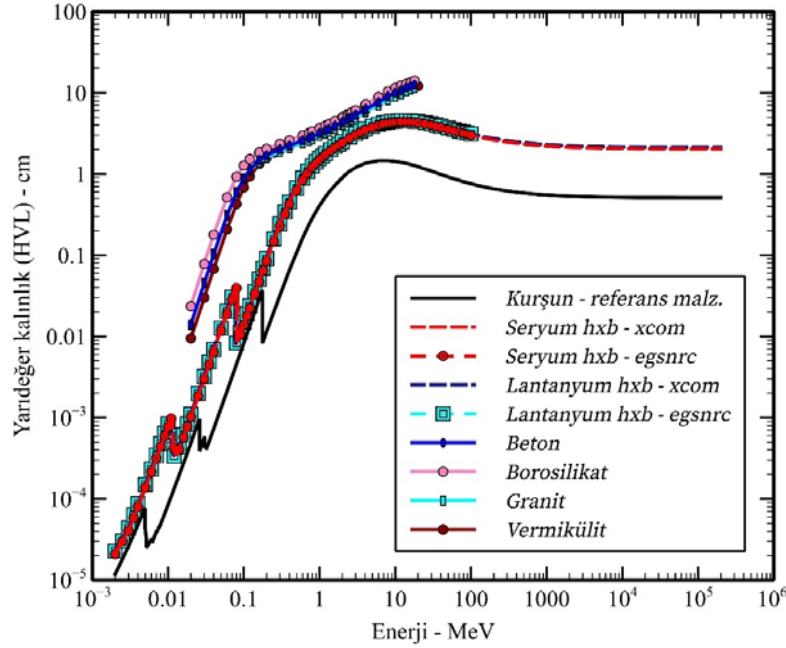
Şekil 3. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan kütle zayıflatma katsayılarının (μ_m), alternatif radyasyon zırlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırma diyagramı.
(Comparison diagram of mass attenuation coefficients (μ_m) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

Tablo 2. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan yarıdeğer kalınlık değerlerinin (HVL), alternatif radyasyon zırlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırılması.
(Comparison of half value layers (HVL) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

Enerji	CeB ₆	CeB ₆	LaB ₆	LaB ₆	Kurşun	Vermikülit	Borosilikat	Beton	Granit
	XCOM	EGS	XCOM	EGS					
MeV	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0,010	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,009	0,023	0,014	0,014
0,015	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,030	0,078	0,045	0,045
0,020	0,007	0,006	0,007	0,007	0,001	0,068	0,179	0,102	0,104
0,030	0,020	0,019	0,022	0,020	0,002	0,208	0,515	0,306	0,313
0,040	0,008	0,039	0,009	0,008	0,005	0,426	0,922	0,590	0,599
0,050	0,014	0,014	0,015	0,015	0,008	0,683	1,268	0,883	0,878
0,060	0,023	0,022	0,025	0,024	0,013	0,933	1,523	1,132	1,105
0,080	0,049	0,047	0,053	0,051	0,029	1,329	1,850	1,481	1,408
0,100	0,089	0,084	0,095	0,091	0,011	1,594	2,044	1,689	1,595
0,150	0,244	0,228	0,261	0,244	0,032	1,974	2,354	2,005	1,867
0,200	0,457	0,424	0,487	0,451	0,065	2,216	2,590	2,221	2,100
0,300	0,907	0,841	0,953	0,886	0,164	2,583	2,988	2,578	2,400
0,400	1,277	1,205	1,329	1,256	0,285	2,892	3,342	2,888	2,681
0,500	1,563	1,492	1,618	1,545	0,408	3,169	3,656	3,173	2,930
0,600	1,795	1,731	1,852	1,788	0,524	3,428	3,934	3,438	3,150
0,800	2,168	2,116	2,230	2,179	0,727	3,903	4,504	3,902	3,600
1,000	2,477	2,434	2,542	2,501	0,898	4,340	5,012	4,310	4,000
1,250	2,810	2,764	2,883	2,837	1,076	4,852	5,549	4,894	4,500
1,500	3,085	3,059	3,164	3,138	1,201	5,326	6,093	5,347	4,941
2,000	3,498	3,488	3,589	3,579	1,349	6,174	7,063	6,144	5,727
3,000	3,989	3,995	4,100	4,105	1,455	7,580	8,879	7,599	7,000
4,000	4,233	4,247	4,357	4,371	1,463	8,695	10,359	9,023	8,129
5,000	4,339	4,355	4,474	4,490	1,435	9,588	11,510	9,957	9,000
6,000	4,375	4,405	4,513	4,542	1,395	10,309	12,430	10,694	9,692
7,000	4,364	4,400	4,508	4,540	1,351	10,896	12,948	11,550	10,500
8,000	4,329	4,376	4,475	4,518	1,309	11,375	13,511	12,031	10,957
9,000	4,278	4,336	4,426	4,480	1,268	11,761	14,126	12,554	11,455
10,000	4,220	4,290	4,368	4,436	1,230	12,084	14,798	13,125	11,455

LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan onda bir kalınlık değerleri (TVL), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granit

değerleri ile karşılaştırmalı olarak aşağıda Tablo 3 ve Şekil 5'te verilmiştir. XCOM ve EGS kodları kullanılarak LaB₆ ve CeB₆ bileşikleri için hesaplanan ortalama serbest yol (MFP) değerleri,



Şekil 4. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan yarıdeğer kalınlık değerlerinin (HVL), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırma diyagramı.

(Comparison diagram of half value layer (HVL) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

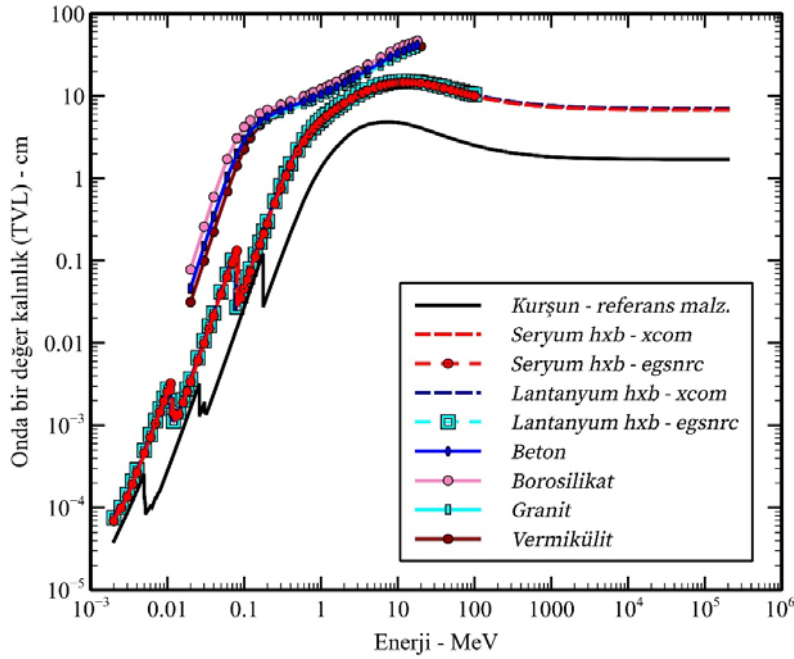
Tablo 3. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan onda bir kalınlık değerlerinin (TVL), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırılması.

(Comparison of tenth value layers (TVL) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

Enerji	CeB ₆	CeB ₆	LaB ₆	LaB ₆	Kurşun	Vermikülit	Borosilikat	Beton	Granit
MeV	XCOM	EGS	XCOM	EGS	cm	cm	cm	cm	cm
0,010	0,003	0,003	0,004	0,004	0,002	0,032	0,078	0,046	0,046
0,015	0,010	0,010	0,011	0,011	0,002	0,099	0,259	0,149	0,151
0,020	0,022	0,021	0,024	0,023	0,002	0,225	0,594	0,339	0,347
0,030	0,067	0,063	0,073	0,068	0,007	0,691	1,712	1,015	1,041
0,040	0,027	0,131	0,028	0,027	0,015	1,417	3,064	1,962	1,989
0,050	0,047	0,046	0,051	0,049	0,027	2,270	4,215	2,934	2,917
0,060	0,076	0,074	0,082	0,079	0,045	3,099	5,062	3,762	3,672
0,080	0,163	0,156	0,176	0,168	0,096	4,417	6,146	4,920	4,678
0,100	0,294	0,279	0,317	0,302	0,038	5,296	6,793	5,611	5,299
0,150	0,810	0,756	0,869	0,809	0,106	6,560	7,822	6,663	6,202
0,200	1,519	1,409	1,618	1,499	0,217	7,362	8,605	7,380	6,978
0,300	3,015	2,793	3,166	2,944	0,544	8,584	9,928	8,566	7,974
0,400	4,241	4,005	4,415	4,172	0,945	9,608	11,103	9,594	8,908
0,500	5,192	4,956	5,376	5,135	1,355	10,531	12,148	10,543	9,736
0,600	5,963	5,753	6,153	5,942	1,740	11,389	13,070	11,422	10,466
0,800	7,203	7,032	7,408	7,239	2,415	12,967	14,965	12,965	11,962
1,000	8,231	8,087	8,447	8,309	2,985	14,421	16,654	14,320	13,291
1,250	9,338	9,183	9,580	9,426	3,574	16,122	18,439	16,261	14,952
1,500	10,250	10,164	10,512	10,428	3,991	17,695	20,246	17,767	16,418
2,000	11,624	11,590	11,925	11,893	4,482	20,513	23,467	20,413	19,030
3,000	13,255	13,272	13,623	13,640	4,835	25,186	29,502	25,248	23,259
4,000	14,064	14,111	14,476	14,525	4,860	28,891	34,419	29,982	27,010
5,000	14,419	14,469	14,864	14,919	4,766	31,859	38,243	33,083	29,904
6,000	14,537	14,636	14,997	15,093	4,634	34,252	41,302	35,534	32,204
7,000	14,501	14,618	14,978	15,085	4,490	36,204	43,023	38,377	34,888
8,000	14,384	14,540	14,869	15,012	4,348	37,794	44,894	39,976	36,405
9,000	14,214	14,405	14,707	14,884	4,214	39,077	46,934	41,714	38,060
10,000	14,022	14,255	14,515	14,738	4,086	40,150	49,169	43,610	38,060

alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırmalı olarak aşağıda Tablo 4 ve Şekil 6'da verilmiştir. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin, gama

radyasyonu açısından iyi birer soğurucu oldukları ve bu bileşiklerin endüstriyel alanda alternatif bir koruyucu malzeme olarak düşünülebileceği anlaşılmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'deki verilerden



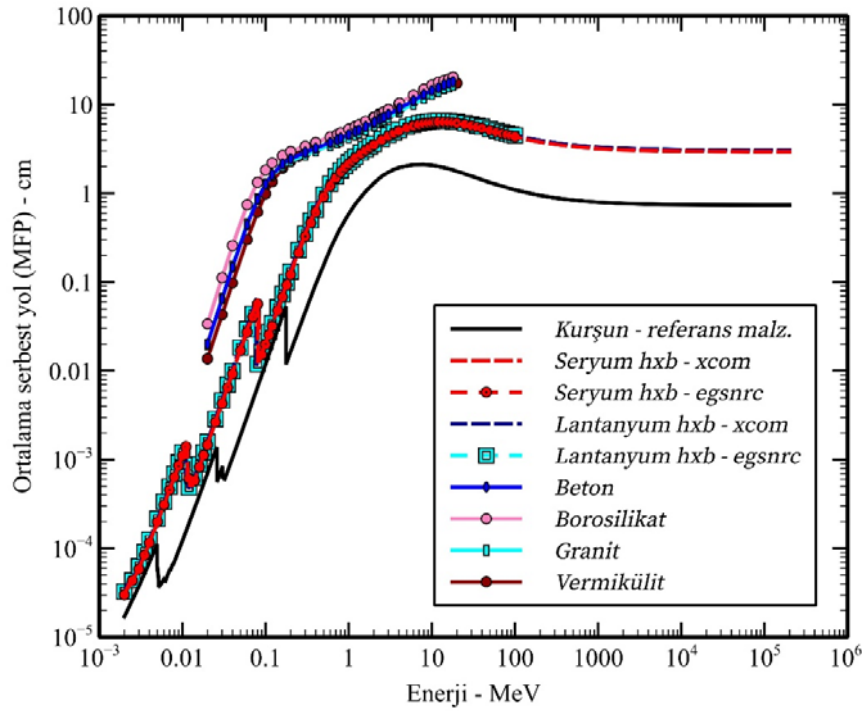
Şekil 5. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan onda bir kalınlık değerlerinin (TVL), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırılması.

(Comparison diagram of tenth value layer (TVL) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

Tablo 4. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan ortalama serbest yol değerlerinin (MFP), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırılması.

(Comparison of mean free paths (MFP) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

Enerji	CeB ₆	CeB ₆	LaB ₆	LaB ₆	Kurşun	Vermikülit	Borosilikat	Beton	Granit
	XCOM	EGS	XCOM	EGS					
MeV	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0,010	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,014	0,034	0,020	0,020
0,015	0,004	0,004	0,005	0,005	0,001	0,043	0,112	0,065	0,065
0,020	0,010	0,009	0,010	0,010	0,001	0,098	0,258	0,147	0,151
0,030	0,029	0,027	0,032	0,030	0,003	0,300	0,744	0,441	0,452
0,040	0,012	0,057	0,012	0,012	0,007	0,615	1,331	0,852	0,864
0,050	0,020	0,020	0,022	0,021	0,012	0,986	1,830	1,274	1,267
0,060	0,033	0,032	0,036	0,034	0,019	1,346	2,198	1,634	1,595
0,080	0,071	0,068	0,076	0,073	0,042	1,918	2,669	2,137	2,031
0,100	0,128	0,121	0,137	0,131	0,017	2,300	2,950	2,437	2,301
0,150	0,352	0,328	0,377	0,352	0,046	2,849	3,397	2,894	2,694
0,200	0,660	0,612	0,702	0,651	0,094	3,197	3,737	3,205	3,030
0,300	1,309	1,213	1,375	1,279	0,236	3,728	4,312	3,720	3,463
0,400	1,842	1,740	1,917	1,812	0,411	4,173	4,822	4,167	3,868
0,500	2,255	2,152	2,335	2,230	0,588	4,574	5,276	4,579	4,228
0,600	2,590	2,498	2,672	2,581	0,756	4,946	5,676	4,960	4,545
0,800	3,128	3,054	3,217	3,144	1,049	5,631	6,499	5,631	5,195
1,000	3,575	3,512	3,669	3,609	1,296	6,263	7,233	6,219	5,772
1,250	4,056	3,988	4,161	4,094	1,552	7,002	8,008	7,062	6,494
1,500	4,452	4,414	4,565	4,529	1,733	7,685	8,793	7,716	7,130
2,000	5,048	5,033	5,179	5,165	1,947	8,909	10,192	8,865	8,264
3,000	5,757	5,764	5,916	5,924	2,100	10,938	12,812	10,965	10,101
4,000	6,108	6,128	6,287	6,308	2,111	12,547	14,948	13,021	11,730
5,000	6,262	6,284	6,455	6,479	2,070	13,836	16,609	14,368	12,987
6,000	6,313	6,356	6,513	6,555	2,012	14,875	17,937	15,432	13,986
7,000	6,298	6,349	6,505	6,551	1,950	15,723	18,685	16,667	15,152
8,000	6,247	6,315	6,457	6,520	1,888	16,414	19,497	17,361	15,810
9,000	6,173	6,256	6,387	6,464	1,830	16,971	20,383	18,116	16,529
10,000	6,090	6,191	6,304	6,401	1,775	17,437	21,354	18,939	16,529



Şekil 6. LaB₆ ve CeB₆ bileşiklerinin XCOM ve EGS kodlarında hesaplanan ortalama serbest yollarının (MFP), alternatif radyasyon zırhlama malzemeleri olan kurşun, vermikülit, borosilikat, beton ve granitinkilerle karşılaştırılması.

(Comparison diagram of mean free path (MFP) of LaB₆ and CeB₆ compounds calculated by XCOM and EGS with lead, vermiculite, borosilicate, concrete and granite which are alternative radiation shielding materials)

ve Şekil 3-Şekil 6 'daki grafiklerden de anlaşıldığı gibi, foton enerjisi arttıkça HVL, TVL ve MFP değerlerinin arttığı görülmektedir. Burada, kurşun için verilen bu değerler, yüksek yoğunluk ve yüksek atom numarası nedeniyle beton, granit, borosilikat, LaB₆ ve CeB₆ için olan değerlerden daha düşüktür. İlgili tablolar ve şekiller incelendiğinde, simülasyonlardan elde edilen sonuçlarda %0,1'den daha az istatistiksel sapmalar olduğunu gözlenmektedir. Sentezlenen LaB₆ ve CeB₆ malzemelerinin Kurşuna göre ağırlıkça yaklaşık %60 kadar daha hafif olmasına rağmen, kurşunla karşılaştırıldığında hemen hemen aynı radyasyon zırhlama özelliğine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Buradan yola çıkılarak, üretilen bu heksaboridlerin kurşun, borosilikat, beton, granit ve vermikülit gibi daha önce incelenmiş olan malzemelerden daha verimli gama koruyucu özelliklere sahip olma potansiyelleri olduğu söylenebilir. Bu özellikler temel alınarak, çalışılan bu malzemelerin iyi birer gama radyasyonu tutucusu oldukları, bu yönleri ile inşaat sektöründe, endüstride, tıpta, nükleer reaktörlerin inşasında ve uzay sanayisinde kullanılacak malzemeler arasında yer alabilecekleri düşüncesi ağırlık kazanmıştır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, birer bor bileşiği olan Lantanyum Heksaborür (LaB₆) ve Seryum Heksaborür (CeB₆) malzemelerinin gama zırhlama özelliklerinin Monte Carlo yöntemi ile incelenerek sentezleri manyeziyotermik indirgeme ile gerçekleştirilmiştir. Gama ışını zırhlama parametreleri olarak; kütle zayıflama katsayıları, yarı değer kalınlığı, onda bir değer kalınlığı, ortalama serbest yol, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, toplam atomik kesit ve toplam elektronik kesit baz alınarak Monte Carlo yöntemi ile, 10⁻³ MeV - 10⁵ MeV foton enerji aralığında HVL, TVL ve (MFP) değerleri belirlendi. Elde edilen bu veriler daha sonra, aynı aralıkta değişen foton enerjilerinde, XCom programı kullanılarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırıldı. Simülasyon sürecinde elde edilen sonuçlara göre

değerlerde, %0,1'den daha az istatistiksel sapmalar olduğunu gözlemlendi. Kurşundan ağırlıkça yaklaşık %60 kadar hafif olmalarına rağmen, sentezlenen LaB₆ ve CeB₆ malzemelerinin, kurşunla kıyaslandıklarında, 5,0 MeV'in altındaki foton enerjilerinde oldukça iyi bir radyasyon zırhlama özelliğine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Daha yüksek foton enerjilerinde ise yoğunluk faktöründen dolayı kurşunun daha iyi bir soğurucu olduğu görülmektedir. Ancak, sentezlenen bu malzemelerin sanayi, tıp, endüstri, nükleer güç reaktörleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan radyasyon kaynaklarından yayınlanan foton enerjileri için kurşuna yakın radyasyon zırhlama özelliği göstermeleri kullanım alanı açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca üretilen heksaboridlerin kurşun, borosilikat, beton, granit ve vermikülit gibi daha önce araştırılan malzemelere kıyasla daha umut verici gama koruma özelliklerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. MC ve XCom ile hesaplanan sonuçlar başarılı bir tutarlılık gösterdiğinden, standart radyasyon zırh malzemesi olan kurşuna göre hafif kütleye sahip bu tür numuneler için zırhlama etkileri açısından önerilen metodolojinin uygulanabilirliği sağlıklı ve olumludur. Bunun yanı sıra radyasyondan korunma stratejileri açısından da izlenen metodoloji ve önerilen zırhlama aday malzemelerin (LaB₆ ve CeB₆) elde edilen sonuçları ikna edicidir. Bu nedenle endüstri ve tıp alanında kullanılacak yeni nesil radyasyondan koruyucu malzemeler olma konusunda, tartışmalı birçok adayın yanında çok uygun özellik gösteren malzemeler olarak durmaktadırlar. Sonuç olarak, hesaplama sonuçları oldukça tatmin edici olup bu durumda, incelenen bu malzemelerin (LaB₆ ve CeB₆) gama ışınlarını tutucu ve zararlı radyasyondan koruyucu malzeme olma özelliğini taşıdıkları belirlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmayı, GÜ-BAP-2021/7015 nolu proje çerçevesinde destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

- Gülbiçim, H., Tufan, M.Ç., Türkan, M.N., The investigation of vermiculite as an alternating shielding material for gamma-rays. *Radiat. Phys. Chem.* 130, 112-117, 2017.
- Gülbiçim, H., Türkan, M. N., Aksu, M., Durmuş S., 2019. A study on the investigation of gamma shielding properties of some metal borides. *Prog. Nucl. Energy.* 115, 107-114, 2019.
- İkcecan, D., Türkan, N., Gülbiçim, H., 2021. Investigation of Shielding Properties of Impregnated Activated Carbon for Gamma-Rays. *App. Rad. Isot.*, 172, 109687, 2021.
- Chen, S., Bourham, M., Rabiei, A., 2014. Applications of open-cell and closed-cell metal foams for radiation shielding. *Procedia Mater. Sci.* 4, 293-298, 2014.
- Chen, S., Bourham, M., Rabiei, A., 2015. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma-ray and neutrons in composite metal foams. *Radiat. Phys. Chem.*, 117, 12-22, 2015.
- Sayyed, M., Alzaatreh, M.Y., Dong, M.G., Zaid, M.H.M., Matori, K.A., Tekin, H.O., 2017. A comprehensive study of the energy absorption and exposure buildup factors of different bricks for gamma-rays shielding. *Results Phys.* 7, 2528-2533, 2017.
- Mann, K.S., Heer, M.S., Rani, A., 2015. Effect of low-Z absorber's thickness on gamma-ray shielding parameters. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A.*, 797, 19-28, 2015.
- Mann, K.S., 2017. γ -Ray shielding behaviors of some nuclear engineering materials. *Nucl. Eng. Technol.* 49 (4), 792-800, 2016.
- Bagheri, R., Moghaddam, A.K., Yousefnia, H., 2017. Gamma-ray shielding study of barium-bismuth-borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCOM program, and available experimental data. *Nucl. Eng. Technol.* 49 (1), 216-223, 2016.
- Taqi, A.H., Khalil, H.J., 2017. An investigation on gamma attenuation of soil and oil-soil samples, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 10 (3), 252-261, 2017.
- Lakshminarayana, G., Baki, S.O., Kaky, K.M., Sayyed, M.I., Tekin, H.O., Lira, A., Kityk, I.V., Mahdi, M. A., 2017. Investigation of structural, thermal properties and shielding parameters for multicomponent borate glasses for gamma and neutron radiation shielding applications. *J. Non-Cryst. Solids.* 471, 222-237, 2017.
- Zorla, E., İpbükler, C., Biland, A. Kiisci, M., Kovalijov, S., Tkaczyk, A.H., Gulik, V., 2017. Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron. *Nucl. Eng. Des.* 313, 306-318, 2016.
- Salgado, C.M., Brandao, L.E., Conti, C.C., Sagado, W.L., 2016. Density prediction for petroleum and derivatives by gamma-ray attenuation and artificial neural networks. *Appl. Radiat. Isot.* 116, 143-149, 2016.
- Oto, B., Yıldız, N., Akdemir, F., Kavaz, E., 2015. Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores. *Prog. Nucl. Energy.* 85, 391-403, 2015.
- Waly, E.S-A., Fusco, M.A., Bourham, M.A., 2017. Impact of specialty glass and concrete on gamma shielding in multi-layered PWR dry casks. *Prog. Nucl. Energy.* 94, 64-70, 2016.
- Büyükyıldız, M., Kurudirek, M., Ekici, M., O. İçelli, Karabul, Y., 2017. Determination of radiation shielding parameters of 304L stainless steel specimens from welding area for photons of various gamma-ray sources. *Prog. Nucl. Energy.* 100, 245-254, 2017.
- Akman, F., Khattari, Z.Y., Kaçal, M.R., Sayyed, M.I., Afaneh, F., 2019. The radiation shielding features for some silicide, boride and oxide types ceramics. *Radiat. Phys. Chem.* 160, 9-14, 2019.
- Cherkashina, N.I., Pavlenko, V.I., Noskov, A.V., 2019. Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiat. Phys. Chem.* 159, 111-117, 2019.
- El-Agawany, F. I., Kavaz, E., Perişanoğlu, U., Al-Buriah, M., Rammah, Y. S., Sm_2O_3 effects on mass stopping power/projected range and nuclear shielding characteristics of $\text{TeO}_2\text{-ZnO}$ glass systems. *Appl. Phys. A.*, 125, 838, 2019.
- Rammah, Y.S., Olarinoye, I.O., El-Agawany, F.I., El-Adawy, A., El Sayed Y., Environment friendly La^{3+} ions doped phosphate glasses/glass-ceramics for gamma radiation shielding: Their potential in nuclear safety applications. *Ceram., Int.* 46, 27616-27626, 2020.
- Rammah, Y.S., Sayyed, M.I., Ali, A.A., Tekin, H.O., El-Mallawany, R., Optical properties and gamma-shielding features of bismuth borate glasses. *Appl. Phys. A.*, 124, 832, 2018.
- Abouhaswa, A.S., Perişanoğlu, U., Tekin, H.O., Kavaz, E., Henaish, A.M.A., Nuclear shielding properties of $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Pb}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$ glasses: Multiple impacts of Er_2O_3 additive. *Ceram. Int.* 46, 27849-27859, 2020.
- Athanasakis, M., Ivanov, E., Rio, E. del, Humphry-Baker, S.A., A high temperature W2BeW composite for fusion reactor shielding. *J. Nucl. Mater.* 532, 152062, 2020.
- Song, Y., Zhang, Z., Mao, J., Lu, C., Tang, S., Xiao, F., Lyu, H., Research on fast intelligence multi-objective optimization method of nuclear reactor radiation shielding. *Ann. Nucl. Energy.*, 149, 107771, 2020.
- Abbasova, N., Yüksel, Z., Abbasov, E., Gülbiçim H., Tufan, M.Ç., Investigation of gamma-ray attenuation parameters of some materials used in dental applications. *Results Phys.* 12, 2202-2205, 2019.
- Agar, O., Sayyed, M.I., Akman, F., Tekin, H.O., Kaçal, M.R., An extensive investigation on gamma ray shielding features of Pd/Ag-based alloys. *Nucl. Eng. Technol.*, 51 (3), 853-859, 2019.
- Olukotun, S.F., Gbenu, S.T., Oladejo, O.F., Sayyed, M.I., Tajudin, S.M., Amosun, A.A., Fasasi, M.K., 2020. Investigation of gamma ray shielding capability of fabricated clay-polyethylene composites using EGS5, XCOM and Phy-X/PSD. *Radiat. Phys. Chem.* 177, 109079, 2020.
- Singh, J., Singh, H., Sharma, J., Singh, T., Singh, P.S., Fusible alloys: a potential candidate for gamma rays shield design. *Prog. Nucl. Energy.*, 106, 387-395, 2018.
- Singh, G.P., Singh, J., Kaur, P., Kaur, S., Arora, D., Kaur, G.P., Singh, D.P., Analysis of enhancement in gamma ray shielding proficiency by adding WO_3 in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-PbO-B}_2\text{O}_3$ glasses using Phy-X/PSD. *J. Mater. Res. Technol.*, 9 (6), 14425-14442, 2020.
- Gaikwad, D.K., Obaid, S.S., Sayyed, M.I., Bhosale, R.R., Awasarmol, V.V., Kumar, A., Shirsat, M.D., Pawar, P.P., Comparative study of gamma ray shielding competence of $\text{WO}_3\text{-TeO}_2\text{-PbO}$ glass system to different glasses and concretes. *Mater. Chem. Phys.*, 213, 508-517, 2018.
- Mahmoud, K.A., Sayyed, M.I., Tashlykov, O.L., Gamma ray shielding characteristics and exposure buildup factor for some natural rocks using MCNP-5 code. *Nucl. Eng. Technol.* 51, 1835-1841, 2019.
- Obaid, S.S., Sayyed, M.I., Gaikwad, D.K., Pawar, P.P., Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications. *Radiat. Phys. Chem.* 148, 86-94, 2018.
- Han, I., Demir, L., Şahin, M., Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for some natural minerals. *Radiat Phys. Chem.*, 78 (9), 760-764, 2009.
- Kawrakow, I., Rogers, D., The EGSnrc code system. NRC Report PIRS-701, NRC, Ottawa, 2000.
- Berger, M.J., Hubbell, J.H., XCOM: Photon cross sections on a personal computer, National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). Center for Radiation Research, Technical Report NBSIR, 87-3597, 1987.