

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LANTANİT VE ALKALİ TOPRAK METALLERİ İÇEREN
BOROSİLİKAT CAMLARIN (BG-LAAE) GAMA RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS

Bashar ALBAYOUSH

Fizik Anabilim Dalı

NİSAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LANTANİT VE ALKALİ TOPRAK METALLERİ İÇEREN
BOROSİLİKAT CAMLARIN (BG-LAAE) GAMA RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS

Bashar ALBAYOUSH

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr.Üyesi Mohammed Sultan Abdulghaffar ALBURIAHI

NİSAN 2025

BasharALBAYOUSH tarafından hazırlanan “Lantanit ve Alkali Toprak Metalleri İçeren Borosilikat Camların (Bg-Laae) Gama Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 08.04.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim **Dalı Yüksek Lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “LANTANİT VE ALKALİ TOPRAK METALLERİ İÇEREN BOROSİLİKAT CAMLARIN (BG-LAAE) GAMA RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../03/2025).

Bashar ALBAYOUSH



TEŞEKKÜR

Bu tezi gerçekleştirmem süresince bana destek olan herkese en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Öncelikle, bilgi ve deneyimlerini her zaman benimle paylaşarak bana rehberlik eden değerli danışmanlarım Prof. Dr. Hakan Yakut, Dr. Öğr. Üyesi Mohammed Sultan Abdulghaffar Al-BURIAHI ve Dr. Elif Kemah’a teşekkürü borç bilirim.

Bu sürecin maddi yükünü hafifletmekte bana destek olan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na (YTB), Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'ndeki tüm öğretim elemanlarına teşekkür ederim. Ayrıca her konuda yanımda olup beni destekleyen sevgili babama ve sabrıyla, anlayışıyla bana güç veren sevgili eşime gönülden minnettarım.

Son olarak, bu çalışmamda moral kaynağım olan arkadaşlarım Razan Araydah ve Khalid Hani Abushahla başta olmak üzere tüm dostlarıma da içten teşekkürlerimi sunarım.

Ad Soyad

Bashar ALBAYOUSH



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.2. Hipotez	4
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Radyasyonların Sınıflandırılması Ve Tanımlar.....	5
2.2. Elektromanyetik Spektrum.....	6
2.3. Nükleer Enerji Seviyeleri	7
2.4. Gama (γ) Işınları.....	7
2.5. Zırhlama Parametrelerinin Formülleri	8
2.5.1. Foton demeti zayıflaması	8
2.5.2. Ortalama serbest yol.....	10
2.5.3. Kütle zayıflama katsayısı	10
2.5.4. Toplam atomik tesir kesiti.....	11
2.5.5. Toplam elektronik tesir kesitleri	11
2.5.6. Yarı değer kalınlığı	12
2.5.7. Onda bir değer kalınlığı	12
2.5.8. Etkin atom numarası	12
2.5.9. Etkin elektron yoğunluğu	13
2.6. Fotonların Madde İle Etkileşimleri	13
2.6.1. Fotoelektrik etkileşme.....	15
2.6.2. Compton etkileşimleri.....	16
2.6.3. Çift oluşumu.....	18
2.7. Nadir Toprak Oksitlerinin Radyasyon Zırhlama Özellikleri.....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Deney	23
3.1.1. Deney düzeneği ve ölçüm yöntemi	23
3.1.2. Deneysel veriler ve materyal performansının analizi	27
3.2. Simülasyon	35
3.3. NIST XCOM Veritabanı	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1. ABS-Ce0 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı	37
4.2. ABS-Ce2.5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı	39
4.3. ABS-Ce5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı	41

4.4. ABS-Ce7.5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı	43
4.5. ABS-Ce10 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı	44
4.6. ABS Kompozitlerde CeO ₂ Katkısının Kütle Zayıflama Katsayısına Etkisi	47
4.7. ABS-CeO ₂ Kompozitlerinin Lineer Zayıflama Katsayıları.....	48
4.8. Yarı Değer Kalınlığı, On Değer Kalınlığı Ve Ortalama Serbest Yol Analizi .	49
4.9. Kütle ve Elektrik Tesir Kesiti Analizi	52
4.10. Efektif Atom Numarası Ve Efektif Elektron Yoğunluğu Analizi	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	81



KISALTMALAR

ACS	: Toplam Atomik Tesir Kesiti (Total Atomic Cross Section)
EBF	: Maruziyet Birikim Faktörü (Exposure Buildup Factor)
ECS	: Toplam Elektronik Tesir Kesiti (Total Electronic Cross Section)
HVL	: Yarı Değer Kalınlığı (Half Value Layer)
LAC	: Liner Zayıflama Katsayısı (Linear Attenuation Coefficient)
MAC	: Kütle Zayıflama Katsayısı (Mass Attenuation Coefficient)
MC	: Monte Carlo Simülasyonları (Monte Carlo (MC) Simulations)
MFP	: Ortalama Serbest Yol (Mean Free Path)
TVL	: Onda Bir Değer Kalınlığı (Tenth Value Layer)
N_{eff}	: Etkin Elektron Yoğunluğu (Effective Electron Density)
Z_{eff}	: Etkin Atom Numarası (Effective Atomic Number)
Z_{eq}	: Eşdeğer Atom Numarası (Equivalent Atomic Number)



SİMGELER

I_0	: Soğurucuya gelen foton demetinin başlangıç yoğunluğu
m_0	: Elektronun durgun kütlesi [kg]
t_m	: Numunenin kütle kalınlığı [$\frac{g}{cm^2}$]
μ_m	: Kütle zayıflama katsayısı [cm^2/g]
$\sigma_{t,a}$	: Toplam atomik tesir kesiti [barn]
$\sigma_{t,e}$	: Elektronik tesir kesiti [barn]
E	: Fotonun enerjisi [Joule (J)]
E'	: Saçılan fotonun enerjisi [J]
$I(x)$	: x kalınlığından geçen foton demetinin yoğunluğu
K	: Saçıldıktan sonra geri tepen elektronun kinetik enerjisi [J]
h	: Planck sabiti [$6,625 \times 10^{-34}$ J · s (Joule.saniye)]
x	: Malzeme kalınlığı [cm]
$\Delta\lambda$	: Saçılan ve gelen foton dalga boyları arasındaki fark [m]
θ	: Gelen foton yönü ile geri tepen elektron yönü arasındaki açı [radyan]
μ	: Lineer zayıflama katsayısı [cm^{-1}]
ν	: Fotonun frekansı [Hertz (Hz)]
ϕ	: Saçılma açısı [radyan]
c	: Işık hızı $2,99 \times 10^8 m.s^{-1}$
N_A	: Avogadro sayısı [$6,022 \times 10^{23} mol^{-1}$]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Camların kimyasal bileşimi.	21
Tablo 3.2. Numunelerin atomik fraksiyonları.	22
Tablo 3.3. Kullanılan gama ışını kaynakları (^{22}Na , ^{60}Co ve ^{137}Cs).	27
Tablo 3.4. Zırhlama parametre formülleri.	28
Tablo 3.5. ABS-Ce0 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.	29
Tablo 3.6. ABS-Ce2.5 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.	29
Tablo 3.7. ABS-Ce5 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.	29
Tablo 3.8. ABS-Ce7.5 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.	29
Tablo 3.9. ABS-Ce10 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.	29
Tablo 3.10. ABS-Ce0 MAC deneysel ve teorik değerleri.	30
Tablo 3.11. ABS-Ce0 için LAC, HVL ve TVL değerleri.	30
Tablo 3.12. ABS-Ce0 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.	31
Tablo 3.13. ABS-Ce2.5 MAC deneysel ve teorik değerleri.	31
Tablo 3.14. ABS-Ce2.5 için LAC, HVL ve TVL değerleri.	31
Tablo 3.15. ABS-Ce2.5 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.	32
Tablo 3.16. ABS-Ce5 MAC deneysel ve teorik değerleri.	32
Tablo 3.17. ABS-Ce5 için LAC, HVL ve TVL değerleri.	32
Tablo 3.18. ABS-Ce5 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.	33
Tablo 3.19. ABS-Ce7.5 MAC deneysel ve teorik değerleri.	33
Tablo 3.20. ABS-Ce7.5 için LAC, HVL ve TVL değerleri.	33
Tablo 3.21. ABS-Ce7.5 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.	34
Tablo 3.22. ABS-Ce10 MAC deneysel ve teorik değerleri.	34
Tablo 3.23. ABS-Ce10 için LAC, HVL ve TVL değerleri.	34
Tablo 3.24. ABS-Ce10 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.	35
Tablo 4.1. ABS-Ce0 için kütle zayıflama katsayısı.	37
Tablo 4.2. ABS-Ce2.5 için kütle zayıflama katsayısı.	39
Tablo 4.3. ABS-Ce5 için kütle zayıflama katsayısı.	41
Tablo 4.4. ABS-Ce7.5 için Kütle Zayıflama Katsayısı.	43
Tablo 4.5. ABS-Ce10 için kütle zayıflama katsayısı.	45
Tablo 5.1. Sonuçların özeti.	57
Tablo 5.2. Öneriler özeti.	58
Tablo 5.3. TNY-W/Bi2, BNCP-5, Gd-4 ve GN2'nin MAC ve yoğunlukları.	59
Tablo 5.4. BCZLM1, SiBBSZ1, ABS-Ce10 ve S2'nin MAC ve yoğunlukları.	59



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Radyasyon çeşitleri (XRD XRF, n.d.).	5
Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum (Vedantu, n.d.).	6
Şekil 2.3. Gama bozunumu (SlidePlayer, n.d.).	7
Şekil 2.4. ^{60}Co ve ^{137}Cs radyoizotoplarının bozunum şeması (Wikimedia Commons)	8
Şekil 2.5. Dar demet zayıflama düzeneği (Radiology Associates of Richmond, n.d.).	9
Şekil 2.6. Madde ile foton etkileşimi türleri ve etkileşimin sonucu.	14
Şekil 2.7. Fotoelektrik, compton ve çift oluşum olaylarının baskın olduğu bölgeler.	15
Şekil 2.8. Fotoelektrik etkileşme (Radiology Key, n.d.).	16
Şekil 2.9. Compton saçılması (Medical Treatment, n.d.).	17
Şekil 2.10. Çift oluşumu (Stack Exchange, n.d.).	18
Şekil 2.11. Sodyum ^{22}Na 'nın radyoaktif çekirdeğinin radyasyon spektrumu.	19
Şekil 2.12. Sodyum çekirdeği ^{22}Na spektrumu.	19
Şekil 3.1. Gama ışını testlerine tabi tutulan numunelerin geometrik şekli	22
Şekil 3.2. NaI(Tl) Dedektörü.	24
Şekil 3.3. Radyasyon kaynakları: ^{22}Na , ^{60}Co ve ^{137}Cs .	25
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan ekipman ve demirbaşların tasarım	25
Şekil 3.5. Sodyum spektrumu	26
Şekil 3.6. Kobalt spektrumu	26
Şekil 3.7. Sezyum spektrumu	27
Şekil 4.1. ABS-Ce0 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.	38
Şekil 4.2. ABS-Ce2.5 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 4.3. ABS-Ce5 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.	42
Şekil 4.4. ABS-Ce7.5 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.	44
Şekil 4.5. ABS-Ce10 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.	46
Şekil 4.6. Gama ışığı enerjisi ve kütle zayıflatma katsayısı Geant4 karşılaştırması..	47
Şekil 4.7. Geant4 ile Enerji-Lineer zayıflatma katsayısı ilişkisi.	48
Şekil 4.8. Geant4 ile gama enerjisi–HVL ilişkisi.	50
Şekil 4.9. Geant4 ile gama enerjisi–TVL ilişkisi.	50
Şekil 4.10. Geant4 ile gama enerjisi–MFP ilişkisi.	51
Şekil 4.11. Gama foton enerjisi ile kütle tesir kesiti (ACS) ilişkisi.	52
Şekil 4.12. Gama foton enerjisi ile elektronik tesir kesiti (ECS) ilişkisi.	53
Şekil 4.13. Gama foton enerjisi ile efektif atom numarası (Z_{eff}) ilişkisi.	54
Şekil 4.14. Gama foton enerjisi ile etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) ilişkisi.	55
Şekil 5.1. 1 MeV'de farklı malzemelerin MAC değerleri ve yoğunlukları.	60
Şekil 5.2. 1,5 MeV'de farklı malzemelerin MAC değerleri ve yoğunlukları.	60



LANTANİT VE ALKALİ TOPRAK METALLERİ İÇEREN BOROSİLİKAT CAMLARIN (BG-LAAE) GAMA RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, alternatif bir gamma ışını zırhlama malzemesi olarak seryum oksit (CeO_2) içeren borosilikat camların potansiyelini incelemektedir. Gamma radyasyonunun tıp, sanayi, tarım ve araştırma tesisleri gibi birçok alanda giderek daha fazla kullanılması, güvenlik endişelerini artırmaktadır. Gamma ışınları, yüksek geçirgenlik özellikleri nedeniyle uzun süreli maruziyet durumunda ciddi doku hasarına ve kansere yol açabilmektedir. Kurşun gibi geleneksel zırhlama malzemeleri etkili olmakla birlikte, yüksek yoğunlukları, maliyetleri, toksik yapıları ve çevresel etkileri, hafif, uygun maliyetli ve çevre dostu yeni malzemelere olan ihtiyacı artırmaktadır.

Bu tezde, farklı CeO_2 katkı seviyelerinin borosilikat cam kompozitlerinin gamma zırhlama performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. %0, 2.5, 5, 7.5 ve 10 ağırlık oranlarında CeO_2 içeren bileşimler test edilmiştir. CeO_2 oranı arttıkça, camların yoğunluğu 2.43 g/cm^3 'ten 2.87 g/cm^3 'e yükselmiştir. Gamma zayıflatma özellikleri, 0,02 MeV ile 15 MeV aralığında enerji kaynakları kullanılarak bir gamma spektrometresi ile test edilmiştir. Deneysel doğrusal zayıflama katsayıları (LAC) ve kütle zayıflama katsayıları (MAC), NIST XCOM verileri ve Geant4 simülasyonlarından elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. Özellikle düşük enerji seviyelerinde fotoelektrik absorpsiyonun etkisiyle daha yüksek CeO_2 içeriklerinde zırhlama performansı iyileşmiştir. Yarı değer katmanı (HVL), onuncu değer katmanı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) gibi zırhlama parametreleri analiz edilmiştir. CeO_2 konsantrasyonunun artması, HVL ve TVL değerlerini önemli ölçüde azaltarak daha ince ve etkili zırhlama sağlayabilecek malzemelere işaret etmiştir. Atomik kesit (ACS), elektronik kesit (ECS), efektif atom numarası (Z_{eff}) ve efektif elektron yoğunluğu (N_{eff}) gibi hesaplanan değerler de CeO_2 'nin zırhlama performansını özellikle düşük enerji seviyelerinde artırdığını doğrulamıştır. Deneysel sonuçlar, teorik ve simülasyon bulguları ile uyumlu bulunmuştur. BNCP-5, Gd-4, GN2, BCZLM1, SiBBSZ1 ve S2 gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, CeO_2 katkılı borosilikat camların rekabetçi ya da üstün performans sergilediği görülmüştür. 1 MeV enerji seviyesinde, ABS-Ce10, çoğu malzemeden daha yüksek MAC değerleri göstermiştir. SiBBSZ1 daha yüksek bir MAC gösterse de, düşük yoğunluğu nedeniyle genel etkinliği azalmıştır. ABS-Ce10, yoğunluk ve zırhlama verimliliği arasında dengeli bir kombinasyon sunarak, gamma ışını zırhlama uygulamaları için güçlü bir aday olarak öne çıkmıştır. Özellikle tıbbi, endüstriyel ve sterilizasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan enerji seviyelerinde bu malzeme oldukça uygun bulunmuştur. Gelecekteki araştırmalar için, CeO_2 oranının %10'un üzerine çıkarılması, zırhlama verimliliği ve mekanik özellikler arasındaki dengenin daha iyi anlaşılmasına olanak tanıyabilir. Ayrıca, yüksek enerjili gamma foton seviyelerinde daha ayrıntılı performans analizleri yapılması, malzemenin nükleer ve tıbbi ortamlardaki uygunluğunu daha iyi anlamaya katkı sağlayabilir. CeO_2 katkılı kompozitlerin uzun

vadeli dayanıklılığının incelenmesi de ekonomik ve teknik ömürleri açısından değerlendirilmelidir. Bunun yanı sıra, CeO_2 'nin diğer nadir toprak elementleri veya metal oksitlerle birleştirilmesi, belirli uygulamalara uygun optimize edilmiş malzemeler elde edilmesini sağlayabilir. Sonuç olarak, CeO_2 katkılı borosilikat camlar, etkili, hafif ve çevre dostu gamma ışını zırhlama malzemeleri olarak güçlü bir potansiyel sergilemektedir. Üstün zayıflatma özellikleri, yapısal kararlılığı ve maliyet etkinliği ile geleneksel ağır metal bazlı zırhlama malzemelerine sürdürülebilir bir alternatif sunabilir.

.



THE GAMMA RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF BOROSILICATE GLASSES CONTAINING LANTHANIDES AND ALKALINE EARTH ELEMENTS

SUMMARY

The increasing reliance on gamma radiation across a wide spectrum of fields including medicine, industry, agriculture, nuclear energy, and advanced research facilities such as particle accelerators has led to heightened concerns about the safety and health implications of prolonged exposure. Gamma rays, known for their highly penetrating nature, can easily pass through conventional materials, making them particularly challenging to block or absorb. While they serve critical functions, such as sterilizing medical equipment, imaging internal structures in the body, or testing the integrity of industrial components, their use also amplifies the risk of harmful effects on human health. Prolonged exposure to gamma radiation can cause severe tissue damage, compromise the immune system, and significantly increase the risk of developing cancers. As these applications become more prevalent, the demand for more effective and efficient radiation shielding materials has grown. Traditional shielding solutions, such as lead-based materials, often present additional challenges, including high density, toxicity, and environmental concerns. As a result, researchers have intensified their efforts to develop innovative shielding materials that not only offer superior radiation attenuation but also address other key criteria. Low density, cost-effectiveness, sustainability, and environmental friendliness are increasingly regarded as essential characteristics. Developing novel materials that meet these requirements is critical for enhancing safety standards and ensuring sustainable, long-term use of gamma radiation in a wide range of applications.

In this thesis, the gamma radiation shielding properties of borosilicate glasses containing cerium oxide (CeO_2) were investigated. The principal objective was to determine how different CeO_2 doping ratios influence the gamma shielding capabilities of borosilicate glass composites, thereby providing a potential alternative to conventional lead-based shielding materials, which are often limited due to toxicity, high density, high cost, and environmental concerns. CeO_2 was chosen for its favorable properties, including high atomic number ($Z = 58$), considerable density, excellent chemical stability, thermal resistance, and environmental safety.

The glass compositions studied were systematically prepared with a borosilicate base and varying concentrations of CeO_2 . The compositions were labeled ABS-Ce0, ABS-Ce2.5, ABS-Ce5, ABS-Ce7.5, and ABS-Ce10, corresponding to CeO_2 concentrations of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% by weight. Other components of the glasses remained constant: Na_2O , Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , and B_2O_3 . As CeO_2 content increased, the concentration of SiO_2 decreased accordingly to maintain the overall composition. The densities of the glass samples ranged from 2.43 g/cm³ for ABS-Ce0 to 2.87 g/cm³ for ABS-Ce10, reflecting the progressive addition of CeO_2 .

Gamma attenuation performance was evaluated using a gamma spectrometer equipped with a sodium iodide activated with thallium $\text{NaI}(\text{Tl})$ scintillation detector. Gamma-

ray energies of 511 keV and 1274 keV from a ^{22}Na source, 663 keV from a ^{137}Cs source, and 1173 keV and 1332 keV from a ^{60}Co source were selected, providing a comprehensive energy spectrum typical in medical imaging, industrial gamma radiography, sterilization, and nuclear applications. Each sample was irradiated multiple times, and the average counts were calculated to ensure statistical reliability. The linear attenuation coefficients (LAC) and mass attenuation coefficients (MAC) were then determined experimentally and compared to theoretical values obtained from the widely accepted NIST XCOM database and simulations performed using the Geant4 Monte Carlo toolkit.

The results showed significant improvements in gamma shielding properties with increasing CeO_2 concentrations, especially notable at lower photon energies. At energies below 0.2 MeV, the presence of CeO_2 significantly increased the MAC values due to the dominance of the photoelectric absorption process, which is heavily dependent on atomic number (Z^3 – Z^4). At intermediate energies (0.2–1 MeV), Compton scattering became dominant, and the MAC values gradually decreased with increasing photon energy. At higher energies (above 1 MeV), although MAC values decreased further, CeO_2 still maintained better shielding performance compared to pure borosilicate glass due to its higher electron density and atomic number.

Detailed analyses of shielding parameters such as half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), and mean free path (MFP) were conducted. The HVL and TVL represent the thickness of material required to reduce radiation intensity by half and by a factor of ten, respectively. Results indicated that higher CeO_2 concentrations considerably reduced both HVL and TVL values, suggesting thinner and thus lighter material can be effectively utilized for radiation protection. Specifically, the ABS-Ce10 glass exhibited the lowest HVL and TVL values, highlighting its superior performance in practical radiation shielding applications.

Moreover, calculated values of the atomic cross-section (ACS), electronic cross-section (ECS), effective atomic number (Z_{eff}), and effective electron density (N_{eff}) were obtained and analyzed. Increasing CeO_2 content systematically enhanced these parameters, particularly evident in the low-energy region dominated by photoelectric interactions. The effective atomic number, an essential parameter reflecting a material's ability to attenuate radiation, demonstrated a strong positive correlation with CeO_2 content, further confirming the composite's enhanced shielding capability.

The study also included comprehensive comparisons of experimental and theoretical data, validating the reliability and accuracy of both Geant4 simulations and NIST XCOM theoretical predictions. While minor discrepancies were observed at low photon energies, attributed mainly to variations in simulation physics models and inherent assumptions within the theoretical calculations, overall agreement was high. Experimental measurements consistently supported theoretical and simulation results, emphasizing the effectiveness of CeO_2 -doped borosilicate glasses as a reliable radiation shielding material.

A comparison of borosilicate glasses containing cerium oxide with various shielding materials reported in the literature, such as other rare-earth-doped glasses and high-Z metal oxides, revealed that ABS-Ce10 demonstrates competitive or superior shielding performance in certain energy regions, particularly at photon energies around 1 MeV and above. At 1 MeV gamma photon energy, ABSCe10 exhibited MAC values that outperformed several previously studied materials, including Gd-based glasses and

other polymer-based shielding composites, underscoring its potential as a lightweight, cost-effective alternative to conventional shielding materials.

Additionally, the structural integrity, mechanical strength, thermal stability, and environmental advantages of these borosilicate glasses contribute significantly to their practical applicability. Their relatively low density, recyclability, and ease of fabrication present a significant advantage, making these glasses suitable for a wide range of applications, including medical radiology rooms, nuclear facilities, portable shielding equipment, aerospace radiation protection, and safety applications in industrial environments.

The research carried out in this thesis clearly demonstrates the potential of borosilicate glasses containing cerium oxide as novel and efficient gamma-ray shielding materials. In particular, the findings highlight that increasing the CeO_2 content within the borosilicate matrix significantly improves the shielding efficiency, especially in the lower energy photon range, where photoelectric absorption plays a dominant role. At concentrations up to 10% CeO_2 , the glasses exhibit superior attenuation capabilities, enhanced structural stability, thermal resistance, and cost-effectiveness compared to conventional heavy-metal-based shielding materials, such as lead or tungsten alloys. Moreover, their relatively low density, recyclability, and environmental friendliness underline their suitability for diverse applications, spanning medical radiology, industrial safety, portable shielding devices, nuclear facilities, aerospace, and various radiation-intensive environments. By addressing these advantages, this study provides a clear pathway toward developing lightweight, sustainable, and highly effective gamma-ray shielding materials for both current and emerging applications.

The comparative analysis of the performance of CeO_2 -doped borosilicate glass (ABS-Ce10) against other materials, highlighting its significant potential as a gamma shielding material. ABS-Ce10 demonstrated superior mass attenuation coefficients (MAC) at key energies such as 1 MeV and 1.5 MeV, surpassing materials like BNCP-5, Gd-4, GN2, and BCZLM1, which have lower MAC values around $0.060 \text{ cm}^2/\text{g}$. Although SiBBSZ1 showed a notably higher MAC, its lower density (2.27 g/cm^3) limited its overall shielding effectiveness. ABS-Ce10 achieved a competitive balance of density (2.879 g/cm^3) and attenuation performance, providing enhanced shielding efficiency within a smaller volume. Even though its density is slightly lower than S2 and GN2, ABS-Ce10 offers a well-balanced combination of properties, making it a strong candidate for gamma shielding applications.

Recommendations for future research include increasing CeO_2 content above 10% to further explore the relationship between radiation shielding efficiency and mechanical strength, while considering economic and density implications. Detailed studies on the performance of ABS- CeO_2 composites at high-energy gamma photon levels ($\geq 1 \text{ MeV}$) were suggested to improve their suitability for nuclear facilities and medical radiology. Additionally, long-term durability under environmental conditions should be assessed to better understand the material's economic and technical lifespan. Finally, combining ABS with other rare-earth elements or metal oxides could provide optimized materials tailored to specific applications.



1. GİRİŞ

Gama radyasyonu; endüstri, tıp, tarım, nükleer reaktörler ve parçacık hızlandırıcılar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak uzun süreli maruziyet, insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturur. Bu nedenle, radyasyonun güvenli kullanımı için etkili zırhlama yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşır (Gurler ve Akar Tarım, 2016). Özellikle yüksek enerjili radyasyon türleri, canlı dokularda kalıcı hasarlara yol açabilir. Bu bağlamda, radyasyona maruz kalan çalışanların korunmasında uygun malzeme seçimi ve tasarımı kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışma, gama radyasyonunun zararlı etkilerini en aza indirmek amacıyla kullanılan malzemelerin seçiminde dikkate alınması gereken faktörleri ve bu malzemelerin performanslarının değerlendirme yöntemlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Yüksek zayıflatma kapasitesine sahip yeni malzemelerin geliştirilmesi ve etkinliklerinin ölçülmesi, bu alandaki bilimsel araştırmalar açısından önem arz etmektedir. Elde edilen veriler, özellikle sağlık sektörü ve nükleer enerji gibi alanlarda çalışanların güvenliğini artırmaya yönelik karar süreçlerine katkı sağlayacaktır.

Tez kapsamında, farklı oranlarda nadir toprak elementleri (lantanitler) ve alkali metaller ile katkılандırılmış camlar üretilmiştir. Bu camlar, gama spektroskopisi yöntemiyle farklı enerjilerdeki gama ışınlarına maruz bırakılmış; lineer ve kütle zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, XCOM teorik verileri ve Monte Carlo simülasyonları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Camların homojen yapıda olması için eriyik, ergitme sıcaklığında 2 saat bekletilmiş; ardından granit potalara dökülerek tavlanmış ve numuneler hazırlanmıştır.

Gama geçirgenlik ölçümleri, NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ile gerçekleştirilmiş; ^{22}Na (511 ve 1274 keV), ^{60}Co (1173 ve 1332 keV) ve ^{137}Cs (663 keV) kaynakları kullanılmıştır. Ölçümler üç kez tekrarlanarak ortalama değerler hata paylarıyla birlikte sunulmuştur. Sonuçlar, lantanit ve alkali metallerle katkılандırılmış camların radyasyon zırhlama açısından etkili ve avantajlı olduğunu ortaya koymuştur.

1.1. Literatür Araştırması

Gama radyasyonuna karşı koruyucu malzemelerin geliştirilmesi, hem sağlık hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda, borosilikat camlar, radyasyonu azaltma potansiyelleri ve kolay işlenebilirlikleri nedeniyle giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu tezde, lantanitler ile alkali ve alkali toprak metalleri içeren borosilikat camların (BG-LAAE) gama radyasyonu zırhlama özellikleri incelenerek literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Bu bağlamda, Coşkun ve ark. (2024), gama radyasyonuna karşı koruma ve antimikrobiyal özellikleri bir arada bulunduran cam kaplamalar geliştirmiştir. Coşkun'un çalışmasında, %50 ZnO + %50 PbO (ZnPb) ve %50 TiO₂ + %50 PbO (TiPb) katkılı cam kaplamalar incelenmiştir. Bu malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırhlama özellikleri kütle zayıflatma katsayısı (MAC) değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve yüksek etkinlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlara benzer şekilde, tezimizde incelenen lantanit katkılı borosilikat camların da gama radyasyonuna karşı etkili olması beklenmektedir. Böylece farklı metal oksitlerin camlar üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılacak ve zırhlama uygulamaları için yeni malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlanacaktır.

Alomari (2024), (26-x)Na₂O-xBaO-29CaO-45P₂O₅ sistemindeki biyoaktif camların gama radyasyonuna karşı zırhlama özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada, farklı mol oranlarında (0,5, 10, 15 mol%) BaO içeren camlar Phy-X/PSD ve WinXCOM programlarıyla analiz edilmiştir. Kütle ve lineer zayıflatma katsayıları (MAC, LAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP), etkili atom numarası (Z_{eff}) ve iletim faktörü (TF) gibi birçok parametre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek BaO içeriğine sahip (BNCP-15) camın zırhlama performansı en yüksek bulunmuştur.

Alomari ve Al-Qahtani (2024), 40SiO₂-40B₂O₃-10V₂O₅-(10-x)Fe₂O₃-xGd₂O₃ camlarında Gd₂O₃ katkısının zırhlama performansını teorik olarak incelemiştir. MAC, HVL, TVL ve Z_{eff} gibi parametreleri Phy-X/PSD ve XCOM programları kullanarak belirlemiş ve Gd₂O₃ miktarı arttıkça camların zırhlama özelliklerinin belirgin olarak iyileştiğini göstermiştir.

Alzahrani ve arkadaşları (2024), %99[60GeO₂ + (40-y)Ga₂O₃ + yGd₂O₃] + %1Nd₂O₃ formülüne sahip şeffaf cam seramiklerin gama zayıflatma özelliklerini WinXCOM

yazılımıyla teorik olarak değerlendirmiştir. Gd_2O_3 oranı arttıkça camların radyasyon zayıflatma kapasitesinin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

Alzahrani ve arkadaşları (2024), TeO_2 - Na_2O - BaO - Bi_2O_3 - WO_3 - Yb_2O_3 camlarının gama zırlama ve optik özelliklerini değerlendirmiştir. Bi_2O_3 oranındaki artışın, camların foton emilim kapasitelerini yükselttiği bulunmuştur.

Al-Buriahi ve arkadaşları (2024), MoO_3 katkılı kadmiyum çinko lityum-borat camlarının gama zırlama kapasitelerini teorik olarak incelemiştir. Bu çalışmada, BCZLM5 camının zırlama açısından en stabil ve verimli olduğu bulunmuştur.

Al Huwayz ve arkadaşları (2024), SiO_2 - B_2O_3 - SrO - ZrO_2 cam sistemlerine BaO eklenmesinin gama zayıflatma üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymuştur. BaO eklenmesinin, camların zırlama yeteneğini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Sayyed ve arkadaşları (2024), PbO ve BaO katkılı borosilikat camların MAC ve Z_{eff} değerlerini, interpolasyon teknikleri kullanarak teorik olarak belirlemiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler, camların gama radyasyonu zırlama özelliklerini değerlendirmek için yararlı olmuştur.

Sukara ve Rimjeam (2017), radyasyon zırlama sistemlerinin performansını Monte Carlo (Geant4) simülasyonları ile deneysel sonuçları karşılaştırarak değerlendirmiş ve iyi uyum elde etmiştir. Bu çalışma, radyasyon zırlama malzemelerinin tasarımında simülasyonların önemini göstermektedir.

Rammah ve ark. (2021), Pb - Sn , Pb - Zn ve Zn - Sn alaşımlarının gama radyasyonuna karşı zırlama kapasitelerini MCNP-5 simülasyon kodu ve WinXCOM programıyla değerlendirmiştir. Bu alaşımların geleneksel malzemelerden daha etkili olduğunu göstermiştir.

Bootjomchai ve ark. (2012), baryum-bismut-borosilikat camların gama radyasyonunu zayıflatma performansının beton gibi standart zırlama malzemelerine göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Stalin ve ark. (2021), Bi_2O_3 ve WO_3 katkılı camların gama radyasyonu zırlama özelliklerini incelemiş ve özellikle HVL değerlerinde iyileşme gözlemlemiştir.

Khattari ve Al-Buriahi (2022), BaO - ZnO - La_2O_3 - Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 camlarının mekanik ve radyasyon zırlama özelliklerini incelemiş ve bu camların üstün performans sergilediğini belirlemiştir.

Kurt (2022), sentezlenen lantanyum hekzaborür (LaB_6) ve seryum hekzaborür (CeB_6) malzemelerinin, Monte Carlo simülasyonları ve deneysel yöntemlerle gama zırhlama açısından etkili olduğunu göstermiştir.

Al-Buriah ve ark. (2020), TeO_2 bazlı camların gama zırhlama kapasitelerini ve ağır metal oksitlerin olumlu etkilerini vurgulamıştır.

Hegazy ve ark. (2021), boro-çinko-tellürit camlarının gama ve nötron radyasyonu zayıflatma kapasitesini, Monte Carlo yöntemleriyle değerlendirmiştir.

Humaid ve arkadaşları (2023), atık kaynaklardan elde edilen PbO katkılı borosilikat camların gama radyasyonuna karşı etkin zırhlama sağladığını göstermiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar, gama radyasyonuna karşı etkili koruma sağlayabilen cam esaslı malzemelerin geliştirilebileceğini göstermektedir. Özellikle borosilikat camlara lantanit, alkali metaller ve yüksek atom numarasına sahip katkılar (örneğin Gd_2O_3 , Bi_2O_3 , PbO) eklendiğinde, kütle ve lineer zayıflatma katsayıları (MAC, LAC), yarı değer tabakası (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) gibi parametrelerde önemli iyileşmeler sağlanmaktadır. Ayrıca, etkili atom numarası (Z_{eff}) ve elektron yoğunluğundaki artış, foton soğurma kapasitesini artırmaktadır. Bu tür çalışmaların çoğunda WinXCOM, Phy-X/PSD gibi teorik yazılımlar ve Geant4, MCNP-5 gibi Monte Carlo simülasyonları kullanılmaktadır. Geri dönüştürülmüş camların da zırhlama amacıyla değerlendirilebilmesi, çevresel ve ekonomik avantajlar sunmaktadır.

1.2. Hipotez

Lantanit ve alkali metallerle katkılanmış camların, farklı gama enerjilerine maruz kaldıklarında gösterdikleri zayıflatma katsayılarının katkı oranıyla doğru orantılı artacağı öngörülmektedir. Bu hipotez, katkılarının radyasyon zırhlama performansına etkisini değerlendirmeyi amaçlar.

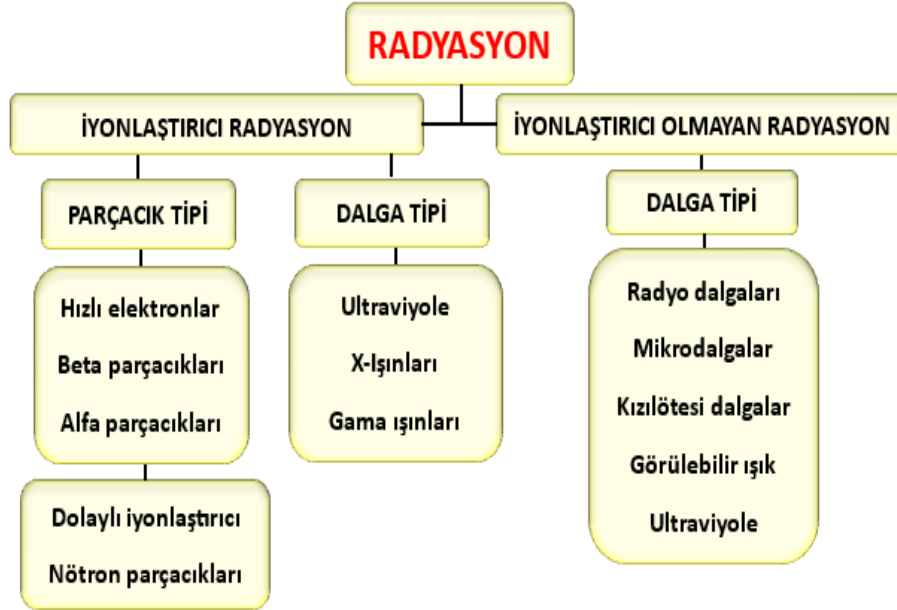
Deneysel verilerin teorik modellemelerle karşılaştırılması, katkılarının geçirgenlik, yapısal kararlılık ve termal dayanım üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, önerilen cam bileşimlerinin pratik uygulamalardaki potansiyelini belirleyecektir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyasyonların Sınıflandırılması Ve Tanımlar

Radyasyon, parçacık ya da elektromanyetik dalgalar biçiminde enerji yayımıdır. Başka bir ifadeyle radyasyon, bu yayılan parçacıklar veya ışınımın kendisini ifade eder. Radyasyon türlerinden bazıları, içinden geçtikleri ortam ile etkileşime girerek iyon çiftleri oluşturabilir. Bu tür radyasyonlara iyonlaştırıcı radyasyon denir ve X ışını, gama ışını gibi elektromanyetik ışınlar ile kinetik enerjiye sahip yüklü parçacıklar (örneğin alfa ve beta parçacıkları), ağır iyonlar ve serbest nötronlar gibi tanecik karakterli radyasyonları içerir (Çobano, 1994).

Radyasyon temel olarak iki ana gruba ayrılır: iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (Şekil 2.1.) (Arpaç, 2023).



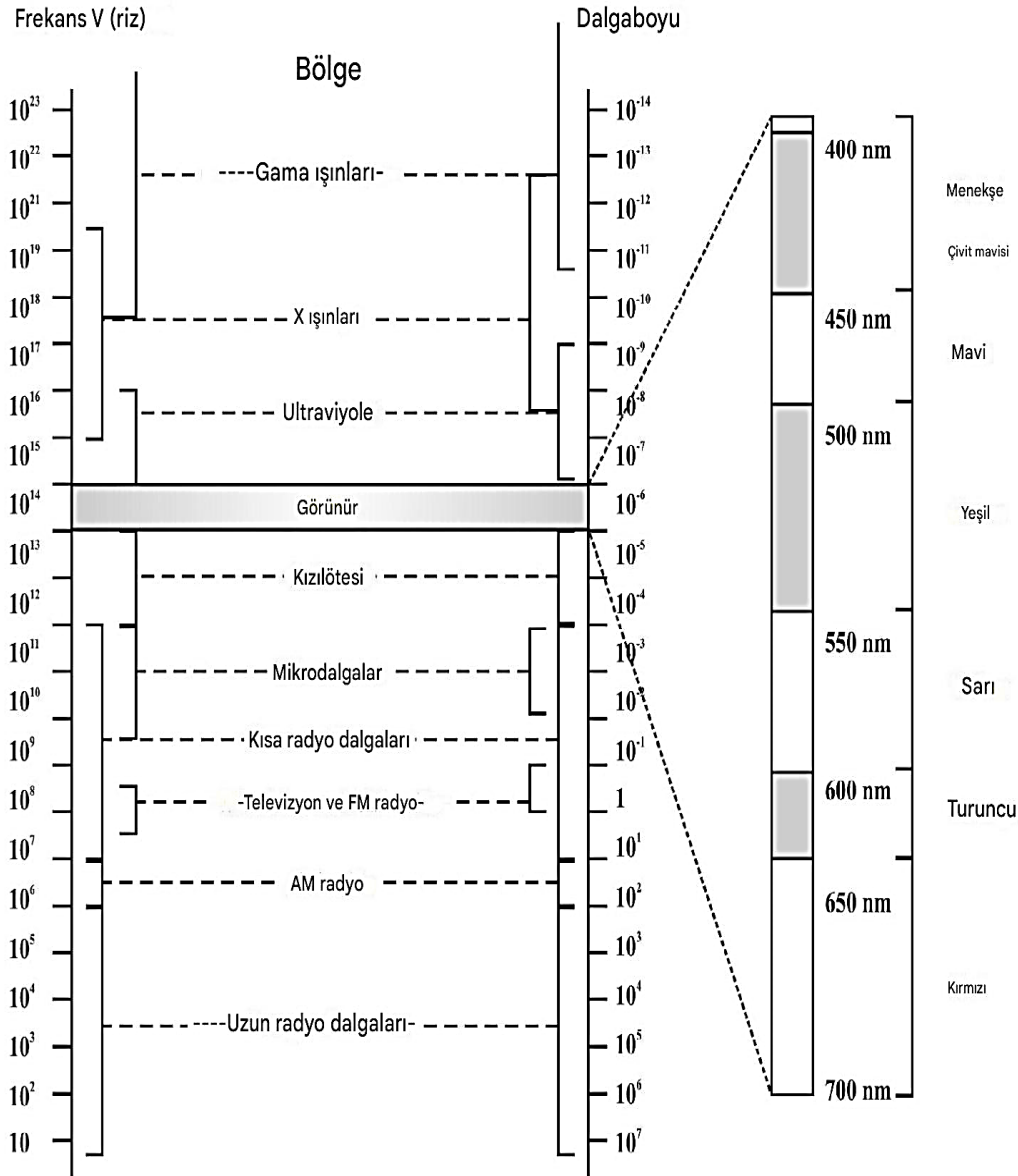
Şekil 2.1. Radyasyon çeşitleri (XRD XRF, n.d.).

Radyoaktivite (Radyoaktiflik): Kararsız atom çekirdeklerinin, daha kararlı bir hâle geçebilmek için kendiliğinden parçacık ya da elektromanyetik ışınım (foton) yayarak enerji ve kütle kaybetmesi olayıdır. Bu süreçte, çekirdeklerde bulunan fazla enerji dışarıya yayılır ve sonuç olarak çekirdekler kararlı hâle yaklaşır.

2.2. Elektromanyetik Spektrum

Foton veya kuantum hipotezi başlangıçta kara cisim ışımasını açıklamak için geliştirilmiş, ancak daha sonra diğer tüm elektromanyetik radyasyon türlerine de genelleştirilmiştir. Elektromanyetik spektrumun alt sınırını, Hertz tarafından keşfedilen düşük frekanslı radyo dalgaları oluştururken, üst sınırı ise Roentgen tarafından bulunan X-ışınlarıyla genişletilmiştir. Elektromanyetik radyasyonun enerjisi için basit bir bağıntı olan $E = h\nu$, elektromanyetik spektrumun tamamı için geçerlidir (Martin, 2008a).

Elektromanyetik spektrum, Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum (Vedantu, n.d.).

Bir fotonun enerjisi, aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$E = h \nu \quad (2.1)$$

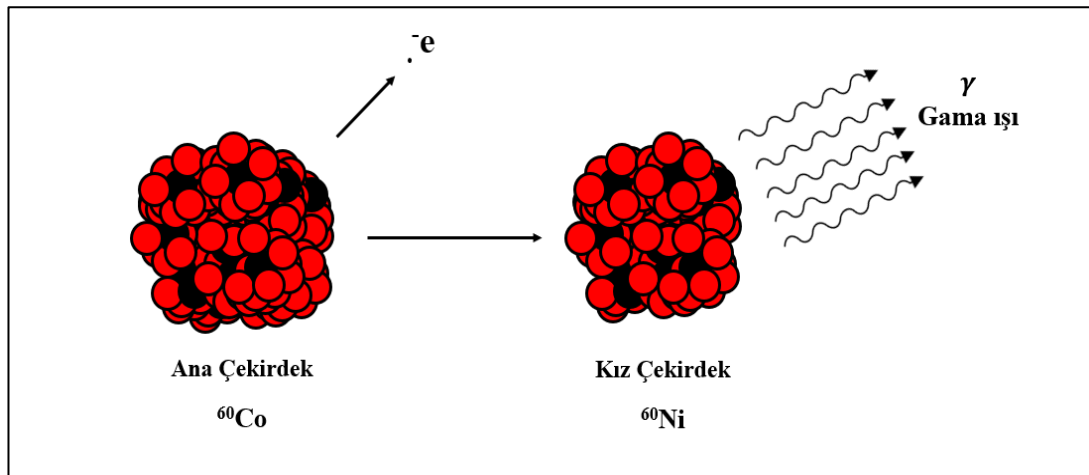
Burada, E enerji, h Planck sabiti ($6,6256 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) ve ν frekansı ifade etmektedir. Foton enerjisi, frekansla doğru orantılı, dalga boyu ile ise ters orantılıdır. Elektromanyetik radyasyon türleri, frekanslarına ve enerjilerine göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflamada enerjisi en yüksek olan radyasyon gama ışınları, enerjisi en düşük olan ise radyo dalgalarıdır.

2.3. Nükleer Enerji Seviyeleri

Çekirdekteki nükleonların (proton ve nötronlar) dizilimi, atomlarda elektronların kabuk modelindeki enerji seviyelerine yerleşimine benzer bir yapı gösterir. Nükleonlar, çekirdek içinde farklı enerji seviyelerindeki kabuklara yerleşirler. Çekirdeğe dışarıdan enerji uygulandığında, çekirdek daha yüksek enerji seviyelerine çıkarak uyarılmış hâle geçebilir. Daha sonra çekirdek, kararlı veya temel durumuna geri döndüğünde, bu iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit miktarda enerji serbest kalır. Bu enerji, bazen tek seferde değil, çekirdeğin ara enerji seviyelerinden geçiş yaptığı durumlarda adım adım yayılır (Khan, 2003).

2.4. Gama (γ) Işınları

Gama ışınları, kütleye sahip olmadıkları için parçacık olarak değil, elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılırlar. Temsili bir gama ışıması (bozunumu) Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



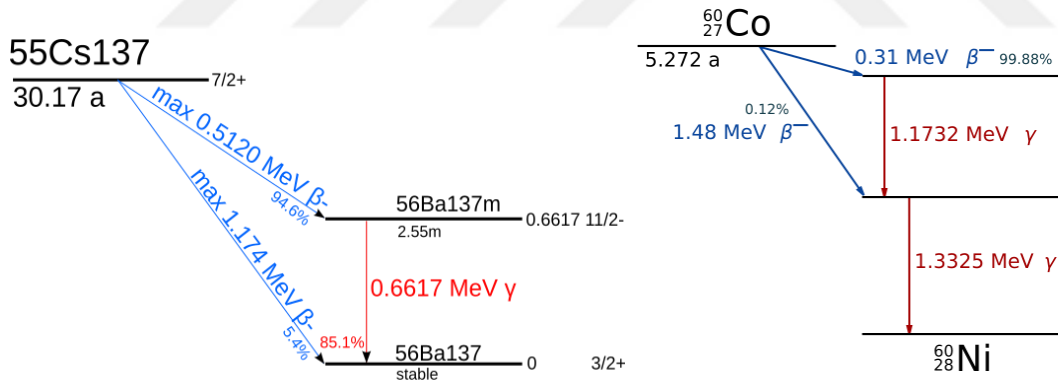
Şekil 2.3. Gama bozunumu (SlidePlayer, n.d.).

Gama ışıması sırasında atomun kütle numarası, proton sayısı ve nötron sayısında herhangi bir değişiklik olmaz (Denklem 2.2):



Gamma emisyonu, radyasyondan korunma açısından önemli olmakla birlikte, tek başına gerçekleşmez. Gamma ışıması, alfa parçacığı emisyonu, negatif beta parçacığı (negatron) emisyonu, pozitif beta parçacığı (pozitron) emisyonu veya elektron yakalama gibi radyoaktif dönüşümlerden sonra meydana gelir. Bu dönüşümler kararsız atomu başka bir atoma dönüştürür. Bu nedenle, gamma ışını yayılması sürecini “gamma bozunması” olarak adlandırmak teknik olarak doğru değildir. Çünkü gama ışınları, yalnızca çekirdeğin uyarılmış enerji durumundan daha kararlı bir enerji durumuna geçerken serbest bırakılır; yani gamma emisyonundan sonra atom türünde değişiklik olmaz. Bu durum Şekil 2.4’te verilen örnekte açıkça görülmektedir.

Şekil 2.4, ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ve ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ radyoizotoplarının negatif beta emisyonundan sonra gerçekleşen gama emisyonlarıyla nasıl kararlı hâle geldiklerini göstermektedir (Martin, 2008b).



Şekil 2.4. ${}^{60}\text{Co}$ ve ${}^{137}\text{Cs}$ radyoizotoplarının bozunum şeması (Wikimedia Commons).

2.5. Zırlama Parametrelerinin Formülleri

2.5.1. Foton demeti zayıflaması

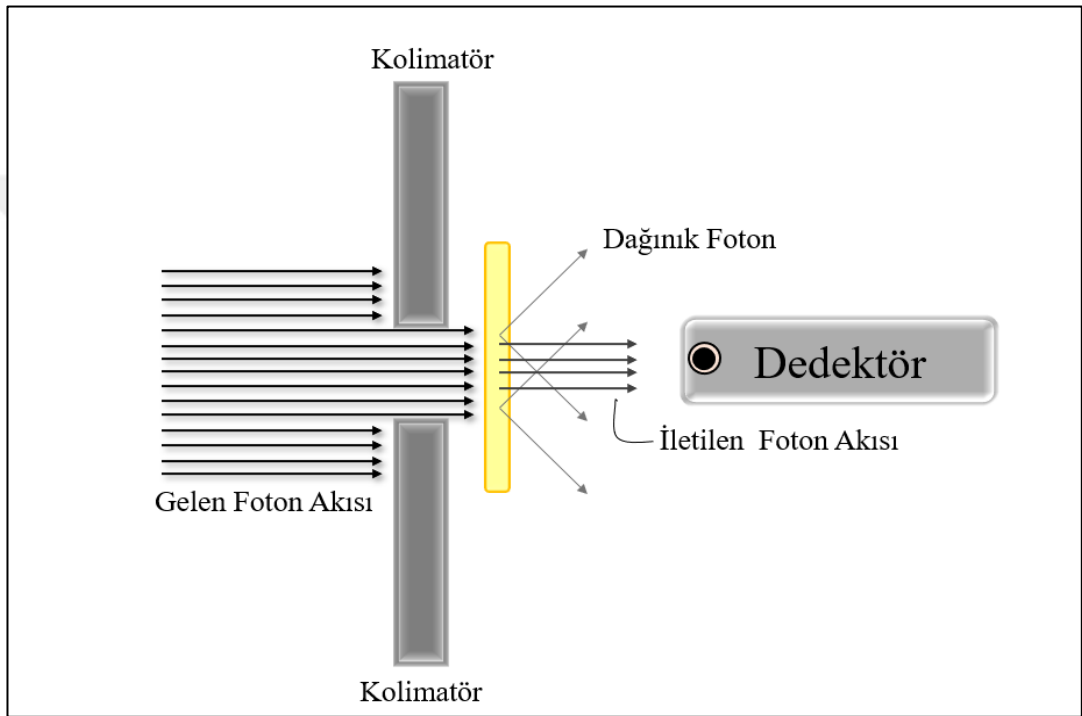
Bir foton demetinin zayıflama özelliklerini ölçmek için tasarlanmış deneysel bir düzenek Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Monoenerjik fotonlardan oluşan dar bir demet, kalınlığı değiştirilebilen bir soğurucuya çarpar. Bu durumda, bir foton bir atomla etkileşirse ya tamamen soğurulur ya da dedektörden uzağa saçılır. Bu şartlar altında,

foton sayısındaki azalma (dN), gelen foton sayısı (N) ve soğurucunun kalınlığı (dx) ile orantılıdır. Matematiksel olarak

$$dN \propto N dx$$

ya da

$$dN = -\mu dx \quad (2.3)$$



Şekil 2.5. Dar demet zayıflama düzeneği (Radiology Associates of Richmond, n.d).

Burada (μ), zayıflama katsayısı olarak adlandırılan orantı sabitidir. Eksi işareti, soğurucu kalınlığı arttıkça foton sayısının azaldığını gösterir.

Yukarıdaki denklem, şiddet (I) cinsinden de yazılabilir:

$$dI = -\mu I dx$$

ya da

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (2.4)$$

Zayıflama için diferansiyel denklem çözülerek aşağıdaki denklem elde edilebilir:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.5)$$

Burada $I(x)$, x kalınlığındaki malzemeden geçen foton yoğunluğunu ve I_0 ise ortamda malzeme yokken ($x=0$) dedektöre gelen foton yoğunluğunu temsil eder (Khan, 2003). $\mu(h\nu, Z)$, foton enerjisi $h\nu$ ve soğurucu atom numarası Z 'ye bağlı olan lineer zayıflama katsayısıdır (Podgorsak, 2005).

2.5.2. Ortalama serbest yol

Foton veya elektron gibi bir parçacığın bir ortamda hareket ederken iki ardışık etkileşim (çarpışma) arasında kat ettiği ortalama mesafedir. Bu kavram, radyasyonun maddeyle olan etkileşimini açıklamak açısından önemlidir. Özellikle, radyasyonun ortam içinde önemli ölçüde emilmeden veya saçılmadan önce ne kadar derine nüfuz edebileceğinin belirlenmesinde kullanılır. Ortalama serbest yol, ortamın yoğunluğu ve radyasyonla etkileşim kesit alanı ile ters orantılıdır (Attix, 2008). Ortalama serbest yol (MFP) matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir (M. Aygün vd., 2023):

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (2.6)$$

Burada, μ , lineer zayıflama katsayısını temsil etmektedir.

2.5.3. Kütle zayıflama katsayısı

Genel olarak, bu katsayı fotonların enerjisine ve malzemenin doğasına bağlıdır. Bir kalınlık (x) tarafından üretilen zayıflama, o kalınlıkta bulunan elektron sayısına bağlı olduğundan, μ malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, μ 'yu yoğunluğa (ρ) bölerek elde edilen katsayı (μ/ρ), yoğunluktan bağımsız hale gelir; μ/ρ , kütle zayıflama katsayısı olarak bilinir. Bu katsayı, yoğunluk faktörü çıkarıldığından ve malzemenin doğasına olan bağımlılığı yoğunluk yerine atomik bileşimle ilişkili olduğundan, doğrusal katsayıdan daha temel bir katsayıdır (Khan, 2003). Denklem (2.5) kullanılarak, kütle zayıflama katsayısı (MAC) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln(\frac{I_0}{I})}{\rho t} = \frac{\ln(\frac{I_0}{I})}{t_m} \quad (2.7)$$

Burada, I_0 ve I , gelen ve zayıflatılmış foton yoğunluklarını, ρ (g/cm^3) malzemenin yoğunluğunu, μ_m (cm^2/g) ve μ (cm^{-1}) ise sırasıyla kütle ve liner zayıflama katsayılarını ifade eder. t_m (g/cm^2) ve t (cm) sırasıyla numunenin kütle kalınlığı (birim alan başına kütle) ve kalınlığıdır. Numune çeşitli elementler içeriyorsa, herhangi bir bileşik için toplam kütle zayıflama katsayısını şu şekilde yazabiliriz:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.8)$$

burada w_i ve $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$, sırasıyla inci bileşen elementin ağırlık fraksiyonu ve kütle zayıflama katsayısıdır (Aygün ve Aygün.2021).

2.5.4. Toplam atomik tesir kesiti

Toplam atomik kesit, gelen radyasyon ile bir malzemedeki atomlar arasındaki etkileşim olasılığının bir ölçüsüdür ve saçılma ve soğurma gibi tüm etkileşim türlerini kapsar (Al-Buriahi, Abouhaswa, vd., 2020). Belirli bir malzeme için μ/ρ değerleri kullanılarak, toplam atomik tesir kesitleri (σ_t, a) aşağıdaki ilişki ile hesaplanabilir:

$$\sigma_{t,a} = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.9)$$

burada f_i , i elementinin atom sayısına göre kısmi bolluğunu ifade eder (Obaid vd., 2018), daha basit bir şekilde, toplam atomik tesir kesiti şu şekilde ifade edilebilir:

$$ACS = \sigma_{t,a} = \frac{M}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \quad (2.10)$$

burada N_A ve M sırasıyla Avogadro sayısı ve malzemelerin atomik kütlesidir (Aygün ve Aygün.2021).

2.5.5. Toplam elektronik tesir kesitleri

Toplam elektronik kesit, gelen radyasyon ile bir malzemedeki elektronlar arasındaki etkileşim olasılığını temsil eder ve fotoelektrik absorpsiyon ve Compton saçılması gibi süreçleri hesaba katar (Lozano vd., 2023). Ortalama elektronik tesir kesiti, $\sigma_{t,e}$ ($barn/atom$) aşağıdaki ifadeyle verilir:

$$ECS = \sigma_{t,e} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i (\mu_m)_i}{Z_i} \quad (2.11)$$

Burada $f_i = n_i / \sum n_i$, i elementindeki atom sayısının alaştaki toplam atom sayısına oranını ifade eder ve Z_i , elementin atom numarasını belirtir (Saleh vd., 2022).

2.5.6. Yarı değer kalınlığı

Yarı değer tabakası (HVL veya $x_{1/2}$), foton demeti yoğunluğunu başlangıç değerinin %50'sine düşüren soğurucu kalınlığı olarak tanımlanır:

$$x_{1/2} = HVL = \ln(2) / \mu \quad (2.12)$$

Bu, $x = HVL$ olduğunda, tanım gereği $I/I_0 = 1/2$ olduğu anlamına gelir (Khan, 2003).

2.5.7. Onda bir değer kalınlığı

Benzer şekilde, onda bir değer tabakası (TVL veya $x_{1/10}$), foton demeti yoğunluğunu başlangıç değerinin %10'una düşüren soğurucu kalınlığı olarak tanımlanır:

$$x_{1/10} = TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (2.13)$$

HVL ve TVL aşağıdaki gibi bir ilişkiye sahiptir:

$$x_{1/10} = x_{1/2} \frac{\ln(10)}{\ln(2)} = 3,3 x_{1/2} \quad (2.14)$$

Bu değerler, belirli bir radyasyon türünün belirli bir malzemeye nüfuz etme yeteneği hakkında önemli bilgiler sağlar (Manjunatha vd., 2019).

2.5.8. Etkin atom numarası

Etkin atom numarası, bir bileşikteki elementlerin atom numaralarının ağırlıklı ortalamasıdır ve radyasyonla genel etkileşime katkılarını yansıtır (M. Aygun vd., 2023). Foton etkileşimleri için bileşiklerin etkin atom numarasını (Z_{eff}) hesaplamak için kullanılan formül aşağıdaki pratik formüle dayanmaktadır (Büyükyıldız, 2016):

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i f_i A_i (\frac{\mu}{\rho})_i}{\sum_j f_j \frac{A_j}{Z_j} (\frac{\mu}{\rho})_j} \quad (2.15)$$

Bu formülde, f_i , her elementin mol kesrini ifade eder (tüm mol kesirleri toplamı 1 olmalıdır). A_i elementin atom ağırlığını, Z_j atom numarasını ve $(\mu/\rho)_i$ kütle zayıflama katsayısını gösterir. Bu yöntem, bileşiklerin etkin atom numarasını (Z_{eff}) hesaplamak için kullanılan "doğrudan yöntem" olarak adlandırılır. Z_{Reff} ise Z_{eff} in havanın atom numarasına (Z_{air}) oranıdır. Daha basit bir şekilde, (Çelen vd., 2021) kaynakçada belirtildiği gibi Etkin Atom Numarası (Z_{eff}) olarak ifade edilebilir (Çelen vd., 2021).

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}} \quad (2.16)$$

2.5.9. Etkin elektron yoğunluğu

Etkin elektron yoğunluğu, bir malzemenin birim hacmi başına düşen elektron sayısıdır ve malzemenin elektromanyetik radyasyonla etkileşimini ölçmek için kullanılır (Huse vd., 2020). Etkin elektron yoğunluğu, aşağıdaki ilişkiyle etkin atomik yoğunlukla yakından ilişkilidir;

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_A}{M} Z_{\text{eff}} \sum_i n_i \quad (2.17)$$

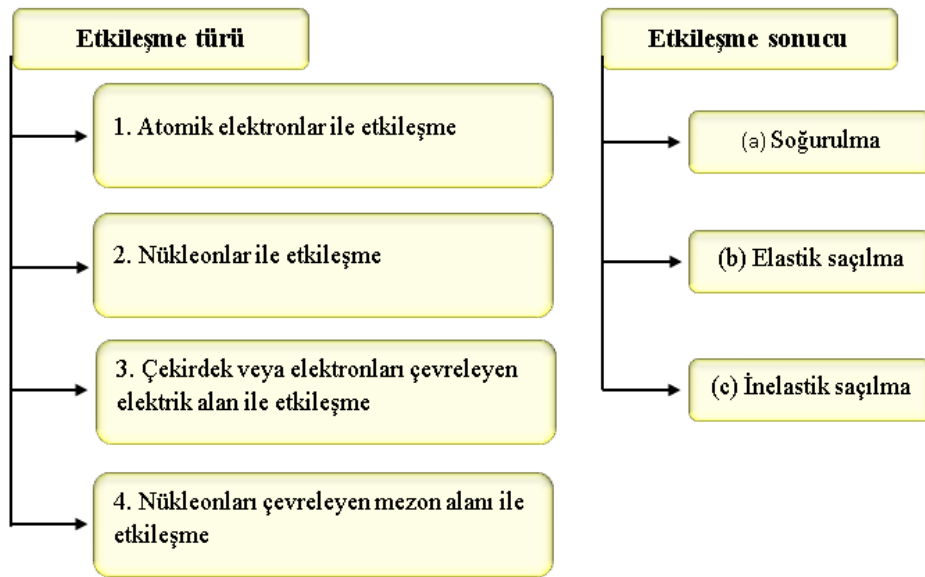
Burada M, malzemelerin atomik kütlesidir (Obaid vd., 2018). Etkin elektron sayısını, N_{eff} , aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz (Aygün ve Aygün.2021);

$$N_{\text{eff}} = \frac{\mu_m}{\sigma_{t,e}} \quad (2.18)$$

2.6. Fotonların Madde İle Etkileşimleri

Gamma ışınları ilk olarak 1900 yılında Becquerel ve Villard tarafından, uranyum ve radyumun yaydığı radyasyonun bir bileşeni olarak tanımlanmıştır. Bu bileşenin alfa ve beta parçacıklarından çok daha yüksek geçiş yeteneğine sahip olduğu anlaşılmıştır. 1909 yılında, Soddy ve Russell, gamma ışını zayıflamasının üstel bir yasaya uyduğunu ve zayıflatıcı maddenin yoğunluğuna göre zayıflama katsayısı oranının tüm maddeler için neredeyse sabit olduğunu bulmuşlardır (Nelson, 2019). Gamma ışınlarının madde

ile etkileşimleri, gamma ışını enerjisinin yanı sıra etkileşimin gerçekleşeceği ortamın atom numarasının, etkileşim olasılıkları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu etkileşimler, üç temel süreç üzerinden gerçekleşir: fotoelektrik etki, Compton etkisi ve çift oluşum, Fotoelektrik etki, düşük enerjili gamma ışınlarının atom ile etkileşiminde sıkça görülürken, Compton etkisi, orta enerjili gamma ışınları için baskın bir süreçtir. Çift oluşum ise yüksek enerjili gamma ışınları için geçerli bir etkileşimdir. Gamma ışınlarının saçılması veya soğurulmasına yol açan bu süreçlerin detayları, atomların yapısı ve enerji düzeyleri ile ilişkilidir (Radioactivity.eu.com).



Şekil 2.6. Madde ile foton etkileşimi türleri ve etkileşimin sonucu.

Şekil 2.6’da birinci ve ikinci sütunlar kombine edildiğinde on iki farklı süreç oluşmaktadır; yani teoride gamma ışınlarının soğurulabileceği veya saçılabilceği on iki farklı süreç vardır. Bu süreçlerin birçoğu nadiren gözlenir ve bazıları henüz gözlenmemiştir. Nükleer geçişlerde en sık karşılaşılan enerji aralığında, 0,01’den 10 MeV’e, çok küçük etkileri birkaçı dışında yukarıdaki on iki sürecin hepsi sadece üçü üzerinden açıklanabilir (Tarim, 2014).

Bunlar:

1)- Atomik elektronlar ile etkileşme:

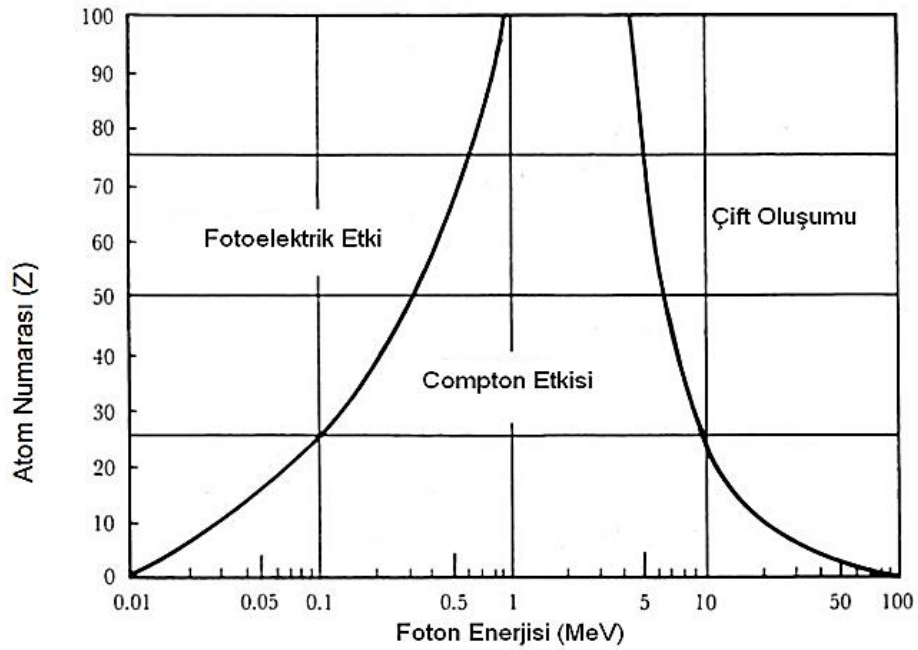
(1.a) Soğurulma (Fotoelektrik etkileşme)

(1.c) İnelastik saçılma (Compton saçılması)

2)- Çekirdek veya elektronları çevreleyen elektrik alan ile etkileşme:

(3.a) Soğurulma (Çift oluşumu)

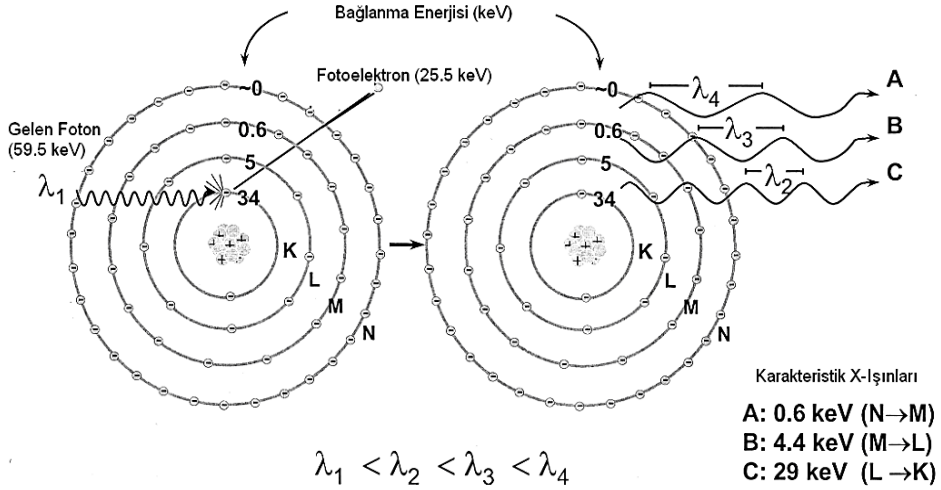
Şekil 2.7 bu etkileri ve bu etkilerin hem atom numarası hem de foton enerjisiyle olan ilişkisini göstermektedir.



Şekil 2.7. Fotoelektrik, compton ve çift oluşum olaylarının baskın olduğu bölgeler.

2.6.1. Fotoelektrik etkileşme

Fotoelektrik etkinin şematik bir çizimi Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Gelen foton, etkileşen ortamı oluşturan atomun hem çekirdeği hem de yörüngesindeki bir elektron ile etkileşir. Momentum ağır çekirdek tarafından soğurulur ve enerji, elektrona kinetik enerjisi olarak aktarılır. Elektronun atomdaki bağlı durumundan kurtulması için belirli bir enerji gereklidir, bu nedenle etkileşen elektronun kinetik enerjisi, fotonun enerjisinden daha küçüktür. Ancak, atomdaki boşalan durum daha yüksek enerji seviyelerindeki elektronlarla doldurulduğundan, depolanan enerji gelen fotonun enerjisine eşittir. Etkileşimin sonucu, çevresindeki maddeyi iyonize eden hızlı bir elektron olup, atomun de-uyarılması sırasında oluşan karakteristik X-ışınlarıyla birlikte görülür (Cantone ve Hoeschen, 2011).



Şekil 2.8. Fotoelektrik etkileşme (Radiology Key, n.d).

Bu süreçte, fotonun tüm enerjisi ($h\nu$) önce atom tarafından emilir ve ardından atomun elektronuna aktarılır. Çıkarılan elektronun (fotoelektron olarak adlandırılır) kinetik enerjisi, $h\nu - EB$ 'ye eşittir; burada EB , elektronun bağlanma enerjisidir. Bu tür etkileşimler K, L, M veya N kabuklarındaki elektronlarla gerçekleşebilir. Elektron atomdan çıkarıldıktan sonra kabukta bir boşluk oluşur ve atom uyarılmış bir duruma geçer. Bu boşluk, dış yörüngedeki bir elektron tarafından doldurulabilir ve bu sırada karakteristik X-ışınları yayılır (Khan, 2003).

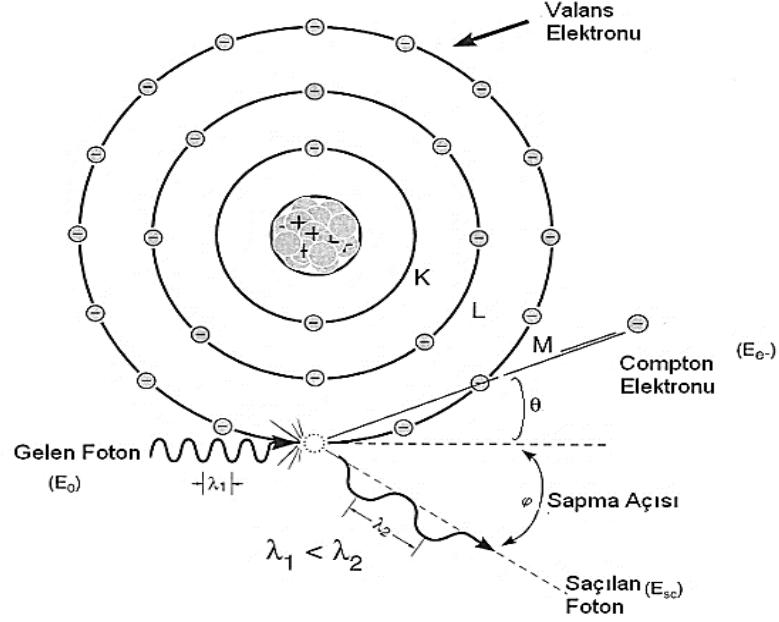
2.6.2. Compton etkileşimleri

1920 yılında A.H. Compton, çeşitli malzemelerden tek renkli X-ışınlarının saçılmasını araştırdı ve saçılmadan sonra X-ışınlarının frekansının azaldığını gözlemledi. Bu frekans değişimi, klasik elektromanyetik teori ile açıklanamaz çünkü frekans, gelen elektromanyetik alanın bir özelliğidir ve yalnızca elektromanyetik alanın yönünü değiştiren saçılma ile değiştirilemez (Buckley, M. 2002) . Compton saçılması süreci, bir atomik veya moleküler sistemde bağlı bir elektron (e) ile elektromanyetik alandaki bir gelen foton (γ) arasındaki saçılmadır (Qiao vd., 2021).

$$e + \gamma \rightarrow e + \gamma \quad (2.19)$$

Compton sürecinde, foton atomik bir elektronla, sanki o “serbest” bir elektronmuş gibi etkileşime girer. Buradaki “serbest” terimi, elektronun bağlanma enerjisinin, bombalanan fotonun enerjisinden çok daha düşük olduğunu ifade eder. Bu etkileşimde elektron, fotondan bir miktar enerji alır ve θ açısında yayılır (Şekil 2.9). Azalmış

enerjiye sahip foton ise φ açısında saçılır. Compton süreci, iki parçacık, yani bir foton ve bir elektron arasındaki bir çarpışma olarak analiz edilebilir.



Şekil 2.9. Compton saçılması (Medical Treatment, n.d).

Enerji ve momentumun korunumu yasalarını uygulayarak, aşağıdaki ilişkiler türetilir:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \varphi) \quad (2.20)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ saçılan ve gelen fotonun dalga boyları arasındaki farktır. h Planck sabiti, m_0 elektronun kütlesi, c ışık hızı ve φ ise fotonun saçılma açısıdır. $\frac{h}{m_0 c} = 2,43 \times 10^{-13} m$ ise Compton dalgaboyu olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik (2.21) kullanılarak saçılan fotonun enerjisi,

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)} \quad (2.21)$$

ifadesiyle verilir. Geri tepen elektronun kinetik enerjisi ise;

$$K = \frac{\alpha E (1 - \cos \varphi)}{1 + \alpha (1 - \cos \varphi)} \quad (2.22)$$

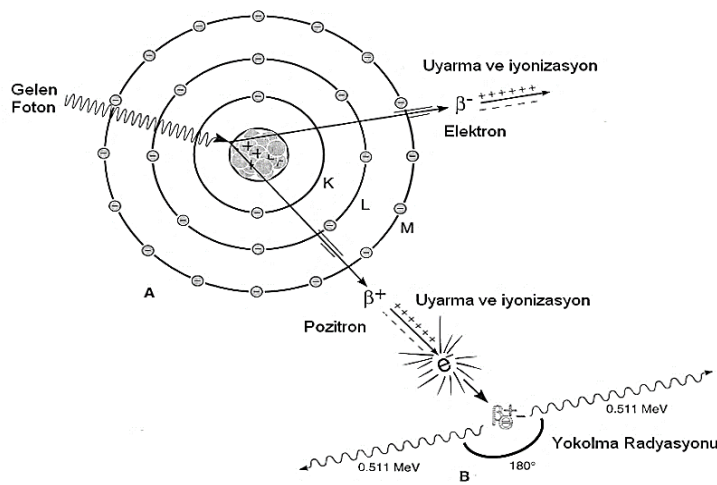
ile verilir. Burada E gelen foton enerjisi, $\alpha = \frac{E}{m_0 c^2}$ olup ince yapı sabitidir. Gelen foton, saçılan foton ve geri tepen elektron daima bir düzlemde olduğundan θ ve φ arasındaki bağıntı ise;

$$\cot \varphi = (1 + \alpha) \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.23)$$

ifadesi ile verilir. Burada θ , geri tepen elektronla gelen fotonun yönü arasındaki açıdır (Khan, 2003).

2.6.3. Çift oluşumu

Yüksek enerjili ($> 1.022 \text{ MeV}$) bir foton, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi bir çekirdeğin etrafındaki güçlü elektromanyetik alanla etkileşime girdiğinde, enerjisi bir çift elektron kütesine dönüşebilir. Bu kütlelerden biri negatif yüklü (elektron) ve diğeri, pozitron olarak adlandırılan, pozitif yüklüdür. Çift oluşumu, Einstein'ın özel görelilik teorisinin klasik bir örneğidir. Bu süreçte, fotonun saf enerjisi iki elektron kütesine dönüştürülür ve enerji korunduğu için, elektron kütleleri oluşuktan sonra kalan enerji ($h\nu - 1.022$) pozitron ve elektron arasında paylaşılır (Martin, 2008b). Kütle, bir elektron-pozitron çifti şeklinde foton enerjisinden üretildiği için, çift oluşumu için bir enerji eşiği (etkinin gerçekleşmesi için gereken minimum foton enerjisi) vardır ve bu eşik $2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ 'dir (Podgorsak, 2005). Çift oluşumu, bir çekirdeğin elektromanyetik alanıyla etkileşim sonucunda gerçekleştiği için, bu sürecin olasılığı atom numarasıyla birlikte hızla artar (Khan, 2003).



Şekil 2.10. Çift oluşumu (Stack Exchange, n.d).

2.7. Nadir Toprak Oksitlerinin Radyasyon Zırhlama Özellikleri

Bu tezde, gamma ve X-ışınlarına karşı koruma sağlamak amacıyla CeO_2 seçilmiştir. Yüksek atom numarası ve yoğunluğu sayesinde CeO_2 , radyasyon zırhlama özelliklerini artıran önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Nadir toprak elementleri (RE'ler), “endüstriyel vitamin” ve “yeni malzemelerin hazinesi” olarak adlandırılmakta ve özellikle yüksek teknoloji sektörlerinin, bilgi ve biyoteknoloji gibi alanların gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır (Xu ve Qu, 2014). Son yıllarda, nadir toprak oksitleri talebin arttığı malzemelerdir. Bu artış, REO'ların yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılığı, aktif yüzey alanları ve kimyasal ile optik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle CeO_2 gibi malzemeler, görünür ışık yayma verimliliği ile dikkat çekmektedir (Ramjeyanthi vd., 2018). CeO_2 , çok işlevli özellikleri ve Dünya'nın kabuğunda bol bulunmasıyla artan bir ilgi görmektedir (Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS of Ukraine vd., 2023). En kararlı (+4) oksidasyon durumuna sahip olan seryum, florit yapısına sahip stekiyometrik CeO_2 oluşturur ve mikroelektronik alanında dikkat çekmektedir. CeO_2 , orta bant aralığı (3–3.6 eV), yüksek dielektrik sabiti (K: 23–26), yüksek kırılma indisi (n: 2.2–2.8) ve yüksek dielektrik dayanımı ($\sim 2.6 \text{ MV/cm}$) nedeniyle yüksek κ -kapı oksit malzemesi olarak değerlendirilmektedir (Vangelista vd., 2017). Nadir toprak elementlerinin kimyası, 4f orbitallerinin doğası gereği farklıdır. 4f orbitalleri, 4d ve 5p elektronları tarafından korunur, bu da nadir toprak elementlerine, özellikle seryuma, benzersiz katalitik, manyetik ve elektronik özellikler kazandırır. Bu nedenle CeO_2 , fizik, kimya, biyoloji ve malzeme bilimi gibi disiplinlerde yoğun olarak incelenmektedir (Vangelista vd., 2017; Pedrielli vd., 2021).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu tezde, laboratuvarda pratik olarak gerçekleştirilen deneyler kapsamında, 3.1' numaralı tabloda belirtilen bileşimlere sahip ABS-Ce0, ABS-Ce2.5, ABS-Ce5, ABS-Ce7.5, ABS-Ce10 cam örnekleri üzerinde ^{22}Na , ^{60}Co ^{137}Cs gibi gama ışını bozunma kaynaklarına göre 511keV, 663keV, 1173keV ve 1332keV enerjilerinde zırhlama ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Na(Tl) dedektörü ile alınan spektrumdan elde edilmiş ve bu bölümde tartışılmıştır. Ardından, bu malzemelerin gama ışınlarını zayıflatmadaki etkinliği, Monte Carlo simülasyonu kullanılarak 0.02MeV'den 15MeV'e kadar çeşitli enerjilerde (0.02MeV, 0.03MeV, 0.04MeV, 0.05MeV, 0.06MeV, 0.08MeV, 0.1MeV, 0.15MeV, 0.2MeV, 0.3MeV, 0.4MeV, 0.5MeV, 0.6MeV, 0.8MeV, 1.0MeV, 1.5MeV, 2MeV, 3MeV, 4MeV, 5MeV, 6MeV, 8MeV, 10MeV, 15MeV) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar XCOM verileri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. Camların kimyasal bileşimi.

Örnek K.	Na ₂ O	Li ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	B ₂ O ₃	CeO ₂	Y. g/cm ³
ABSCe0	12,70	1,85	4,95	56,0	9,35	2,4	12,75	0,0	2,43
ABSCe2.5	12,70	1,85	4,95	53,5	9,35	2,4	12,75	2,5	2,54
ABSCe5	12,70	1,85	4,95	51,0	9,35	2,4	12,75	5,0	2,65
ABSCe7.5	12,70	1,85	4,95	48,5	9,35	2,4	12,75	7,5	2,75
ABSCe10	12,70	1,85	4,95	46,0	9,35	2,4	12,75	10,0	2,87

Şekil 3.1'de, Tablo 3.1'de kompozisyonu tanımlanan tüm numuneler yerleştirilmiştir



Şekil 3.1. Gama ışını testlerine tabi tutulan numunelerin geometrik şekli

Şekil 3.1, bu bölümde açıklanan radyasyon kaynaklarının gama ışını davranışlarının test edildiği numuneleri göstermektedir.

Tablo 3.2. Numunelerin atomik fraksiyonları.

ABS-Ce0		ABS-Ce2.5		ABS-Ce5		ABS-Ce7.5		ABS-Ce10	
Atomik F.		Atomik F.		Atomik F.		Atomik F.		Atomik F.	
Na	0,0939	Na	0,0898	Na	0,0861	Na	0,0827	Na	0,0795

Tablo 3.2.(Devamı) Numunelerin atomik fraksiyonları

O	0,4923	O	0,4711	O	0,4516	O	0,4337	O	0,4172
Li	0,0041	Li	0,0040	Li	0,0038	Li	0,0036	Li	0,0035
Al	0,0429	Al	0,0411	Al	0,0394	Al	0,0378	Al	0,0364
Si	0,2528	Si	0,2311	Si	0,2112	Si	0,1929	Si	0,1760
Ca	0,0602	Ca	0,0576	Ca	0,0553	Ca	0,0531	Ca	0,0510
Mg	0,0094	Mg	0,0090	Mg	0,0086	Mg	0,0084	Mg	0,0079
B	0,0444	B	0,0424	B	0,0407	B	0,0390	B	0,0376
Ce	0,0000	Ce	0,0539	Ce	0,1033	Ce	0,1488	Ce	0,1909

Tablo 3.2’de ise numunelerin atomik fraksiyonları bulunmaktadır.

Bu tabloda yer alan bilgiler, simülasyon kod prosedüründe kullanılarak numunelerin toplam tesir kesiti, elektron tesir kesiti ve etkin atom numarası gibi kalkanlama parametrelerinin hesaplanmasında değerlendirilmiştir.

3.1. Deney

Bu bölümde, gama ışını spektrumları üzerinde deneysel veri elde etmek için kullanılan ekipmanlar ve uygulanan deneysel teknikler açıklanmaktadır. Deneysel olarak elde edilen sonuçları karşılaştırmak ve teorik sonuçlarla doğruluklarını değerlendirmek için, laboratuvarında bulunan orta enerjili gama ışını kaynakları kullanılarak gama ışını tespiti gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Deney düzeneği ve ölçüm yöntemi

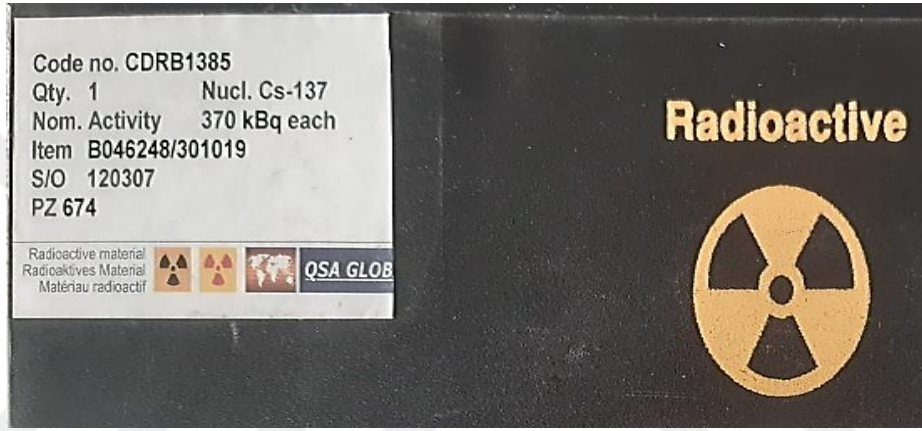
Bu tezde, laboratuvarımızda mevcut olan NaI(Tl) dedektör sistemi ile her bir radyoaktif kaynaktan (^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs) yayılan gama ışınlarının zayıflatılması incelenmiştir. Gama algılama teknikleri, nükleer fizik alanında gama spektroskopisi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Wagenaar vd., 2003). Gama spektrometrisi için en yaygın kullanılan algılama sistemleri NaI(Tl) dedektörleridir. Talyum ile aktifleştirilmiş sodyum iyodür kristali, NaI(Tl), 1948 yılında icat edilmiştir. Bu

dedektör, özellikle endüstriyel radyolojik koruma alanlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu dedektör tipi, oda sıcaklığında yüksek algılama verimliliğiyle çalışabilme avantajına sahiptir. NaI(Tl) dedektörü, dedektörün hassas hacminde üretilen görünür ışığı toplayarak bir fotomultiplier (PMT) aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürerek çalışır. Dedektörün verimliliğini artırmak için, sintilasyon kristalini çevreleyen bir yansımaya katmanı olarak genellikle Al_2O_3 veya MgO tozu kullanılır (Duc Tam vd., 2017). NaI(Tl) dedektörlerinin en büyük avantajı, yüksek verimliliği ve daha düşük maliyetli olmalarıdır. Algılama verimliliği tanımı; (i) mutlak verimlilik, (ii) içsel verimlilik ve (iii) tam-enerji tepe verimliliği gibi bazı parametreleri kapsar (El-Haseib vd., 2018). Hem yerel hem de uluslararası birçok çalışma, NaI(Tl) dedektörünü kullanarak doğal ya da yersel radyoizotoplar veya gama arka plan radyasyonunu cihazın doğruluğu ve verimliliğindeki farklılıklarla değerlendirmiştir, bir yazılım programı ile donatılmıştır (A. Al-Asadi, 2019). Şekil 3.2’de Radyoaktif kaynak, dedektörden değişen mesafelerde (bir ile beş cm arasında) yerleştirilmiş ve bu mesafelerde ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.2. NaI(Tl) Dedektörü.

Belirtilen radyoaktif kaynaklar (^{22}Na , ^{60}Co ^{137}Cs) Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

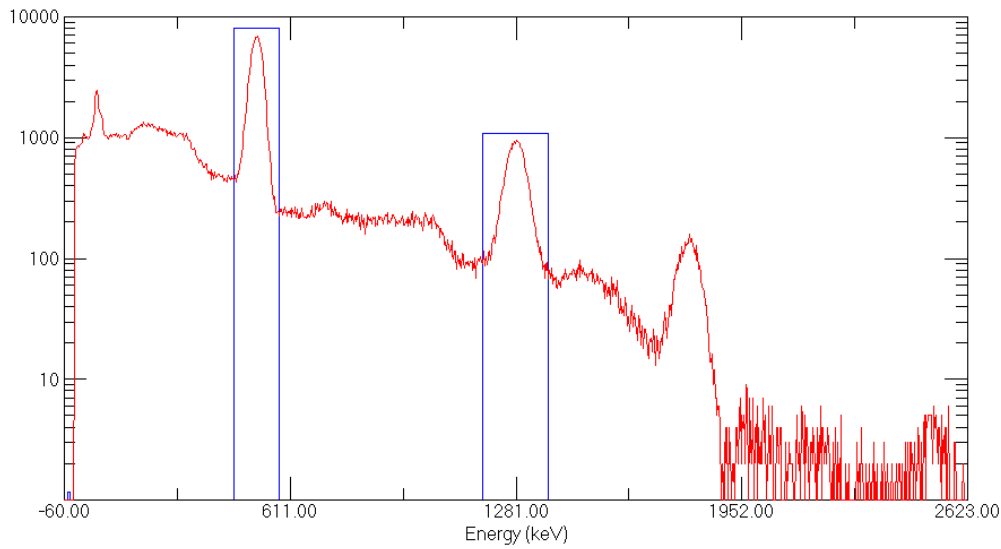


Şekil 3.3. Radyasyon kaynakları: ^{22}Na , ^{60}Co ve ^{137}Cs .

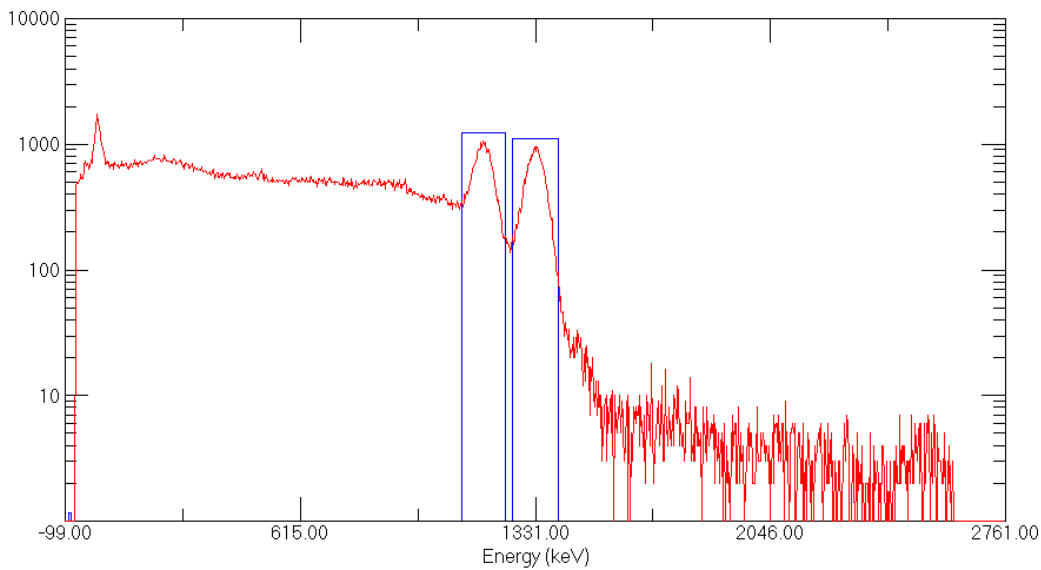


Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan ekipman ve demirbaşların tasarımı

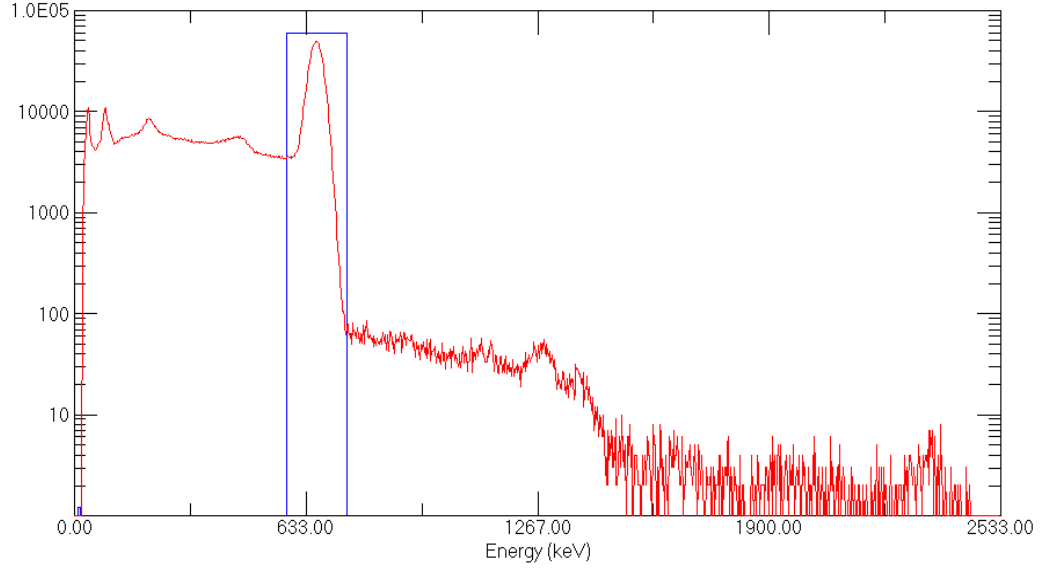
Şekil 3.4, deneyde kullanılan ve genelleştirilen düzenlemeleri göstermektedir. Çalışma boyunca tüm değerlendirmeler ve hesaplamalar, ^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co nokta kaynaklarına ait spektrumlar üzerinden yapılmıştır. Bu spektrumlar, NaI(Tl) dedektörü ile 1200 saniyelik ölçüm süresi boyunca elde edilmiştir ve çalışma için bir referans niteliği taşımaktadır. Bu seçim, rastgele değil, bu kaynakların spektrumlarının bilinen ve iyi tanımlanmış özellikleri nedeniyle bilinçli olarak yapılmıştır. Dedektörü çalıştıran MAESTRO yazılımı kullanılarak, elimizde bulunan radyasyon kaynakları için gama ışıını spektrumu, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Sodyum spektrumu



Şekil 3.6. Kobalt spektrumu



Şekil 3.7. Sezyum spektrumu

Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7, laboratuvar ortamında kullanımımıza sunulan doğal radyasyon kaynaklarına ait gama ışını spektrumlarını göstermektedir. Bu kaynakların en önemli özellikleri Tablo 3.3’de özetlenebilir (Calin vd., 2011).

Tablo 3.3. Kullanılan gama ışını kaynakları (^{22}Na , ^{60}Co ve ^{137}Cs).

İzotop	Emisyon Pikleri (keV)	Yarı Ömür
(^{22}Na)	511,1274.54	Yaklaşık 2,6 yıl
(^{60}Co)	1173,23;1332,51	5,27 yıl
(^{137}Cs)	661.62	30,17 yıl

3.1.2. Deneysel veriler ve materyal performansının analizi

Tablo 3.1’de listelenen numuneler, laboratuvarımızda mevcut olan gamma ışını kaynaklarına ve Tablo 3.3’de belirtilen enerjilere maruz bırakılmıştır. Ölçümler dört farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir: 511 keV, 1173.23 keV, 1332.51 keV ve 661.62 keV. 1274.54 keV enerji seviyesine ait sonuçlar, teorik tahminler ve simülasyonlarla önemli farklılıklar gösterdiği için hariç tutulmuştur. Bunun nedeni, kullanılan sodyum kaynağının eski olmasıdır. Tablo 3.3’te gösterildiği gibi, sodyumun yarı ömrü 2,6 yıldır. Teorik ve simülasyon konuları sonraki bölümlerde ele alınacaktır. Her bir ölçüm, önceki çalışmaların literatürüne uygun olarak 1200 saniye süreyle

yapılmıştır. Deney üç kez tekrarlanmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu tezden bölüm 2.5.1’de tanımlanan tüm parametreler hesaplanmıştır. Zırlama parametrelerinin formülleri kullanılarak veriler analiz edilmiştir. Deneysel bulgular, NİST XCOM sitesinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu konu sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Tablo 3.4. Zırlama parametre formülleri.

Parametre	Formül	Birim
LAC	$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$	cm^{-1}
MAC	$\mu/\rho = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i$	cm^2/g
MFP	$MFP = \frac{1}{\mu}$	cm
HVL	$HVL = \ln(2)/\mu$	cm
TVL	$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu}$	cm
ACS	$\sigma_{t,a} = \frac{N}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)$	cm^2/g
ECS	$\sigma_{t,e} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i (\mu_m)_i}{Z_i}$	cm^2/g
N _{eff}	$N_{eff} = \frac{\mu_m}{\sigma_{t,e}}$	$electrons/g$
Z _{eff}	$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}}$	–

Şekil 3.2’deki deney düzeneği kullanılarak her bir malzemenin 20 dakika süreyle I_0 ve I : gelen ve zayıflatılmış gama (γ) foton yoğunluklarının ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçları ve hesaplanan zırlama parametreleri Tablo 3.5’ten başlayarak Tablo 3.24’te dahil olmak üzere tablolarda sunulmuştur. Tablo 3.5, Tablo 3.6, Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da yer alan 1, 2 ve 3 sayıları, deney numaralarını ifade etmekte olup her bir deney birden fazla kez tekrarlanmıştır.

Tablo 3.5. ABS-Ce0 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.

Enerji (keV)		511	661,62	1173,23	1332,51
I_0	1	144541	1095000	31757	27109
	1	125200	984031	29597	993088
I	2	127369	987429	28735	28850
	3	128358	993088	24300	24230

Tablo 3.6. ABS-Ce2.5 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.

Enerji (keV)		511	661,62	1173,23	1332,51
I_0	1	97390	989700	142000	119238
	1	84415	872289	128636	107400
I	2	84150	869592	128800	106100
	3	83800	868585	128250	106776

Tablo 3.7. ABS-Ce5 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.

Enerji (keV)		511	661,62	1173,23	1332,51
I_0	1	97390	125200	136300	115580
	1	83837	106531	123654	104943
I	2	83853	108098	124526	1053383
	3	83673	108141	124100	105023

Tablo 3.8. ABS-Ce7.5 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.

Enerji (keV)		511	661,62	1173,23	1332,51
I_0	1	97390	989700	137000	116000
	1	82270	874126	124721	106087
I	2	84295	874762	124385	105575
	3	83115	869882	124658	105600

Tablo 3.9. ABS-Ce10 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.

Enerji (keV)		511	661,62	1173,23	1332,51
I_0	1	97390	989700	137000	116000

Tablo 3.9.(Devamı) ABS-Ce10 Numunesinin farklı enerjilerdeki gama sayım sonuçları.

<i>I</i>	1	82091	864430	123800	105600
	2	82982	866726	124300	105800
	3	82884	870802	123937	105500

Bu ölçümlere göre zırlama parametreleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 3.5 ve Tablo 3.9 tabloları ve bunların arasındaki diğer tablolarda sunulan deneysel ölçümlere göre belirlenen deneysel zırlama parametreleri ve teorik olarak hesaplanan parametreler (MAC, LAC, HVL, TVL, MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff}) aşağıdaki Tablo 3.10., Tablo 3.11, Tablo 3.12, Tablo 3.13, Tablo 3.14, Tablo 3.15, Tablo 3.16, Tablo 3.17, Tablo 3.18, Tablo 3.19, Tablo 3.20, Tablo 3.21, Tablo 3.22, Tablo 3.23 ve Tablo 3.24. arasındaki tablolarda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 3.10. ABS-Ce0 MAC deneysel ve teorik değerleri.

Enerji (keV)	I_0	<i>I</i>	MAC cm^2/g		
			Deney	Teorik	Hata%
511	144541	126976	0,093	0,085	9,25
661,62	1095000	988183	0,074	0,076	3,10
1173,23	31312	29061	0,054	0,058	7,69
1332,51	26410	24504	0,054	0,055	1,16

Tablo 3.11. ABS-Ce0 için LAC, HVL ve TVL değerleri.

Enerji (keV))	LAC cm^{-1}			HVL <i>cm</i>		TVL <i>cm</i>	
	Deney	Teorik	Hata%	Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	0,227	0,208	9,25	3,05	3,33	10,13	11,07
661,62	0,180	0,186	3,10	3,85	3,73	12,79	12,39
1173,23	0,131	0,142	7,69	5,29	4,89	17,59	16,24
1332,51	0,131	0,133	1,16	5,27	5,21	17,52	17,32

Tablo 3.12. ABS-Ce0 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.

Enerji (keV)	MFP cm		ACS $\times$ 10^{-24}	ECS $\times$ 10^{-25}	$N_{eff} \times 10^{+23} e/g$		Z_{eff}	
	Deney	Teorik			Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	4,40	4,81	2,74	2,88	2,983	2,981	9,52	9,51
661,62	5,55	5,38	2,44	2,57	2,982	2,980	9,51	9,51
1173,23	7,64	7,05	1,86	1,95	2,980	2,980	9,51	9,51
1332,51	7,61	7,52	1,74	1,83	2,981	2,981	9,51	9,51

Tablo 3.13. ABS-Ce2.5 MAC deneysel ve teorik değerleri.

Enerji (keV)	I_0	I	MAC cm^2/g		
			Deney	Teorik	Hata%
511	97390	84122	0,085	0,086	1,22
661,62	142000	128562	0,074	0,076	2,57
1173,23	119238	106759	0,057	0,058	1,20
1332,51	989700	870155	0,064	0,055	17,20

Tablo 3.14. ABS-Ce2.5 için LAC, HVL ve TVL değerleri.

Enerji (keV))	LAC cm^{-1}			HVL cm		TVL cm	
	Deney	Teorik	Hata%	Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	0,215	0,218	1,22	3,22	3,18	10,69	10,56
661,62	0,189	0,194	2,57	3,66	3,57	12,16	11,85
1173,23	0,146	0,148	1,20	4,74	4,68	15,75	15,56
1332,51	0,163	0,139	17,20	4,26	5,00	14,16	16,60

Tablo 3.15. ABS-Ce2.5 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.

Enerji (keV)	MFP cm		ACS× 10^{-24}	ECS× 10^{-25}	$N_{eff} \times 10^{+23}$		Z_{eff}	
	Deney	Teorik			Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	4,64	4,59	2,89	2,89	3,00	2,98	10,01	9,98
661,62	5,28	5,15	2,56	2,57	2,98	2,98	9,95	9,93
1173,23	6,84	6,76	1,94	1,96	2,97	2,97	9,89	9,88
1332,51	6,15	7,21	1,81	1,83	2,96	2,97	9,89	9,88

Tablo 3.16. ABS-Ce5 MAC deneysel ve teorik değerleri.

Enerji (keV)	I_0	I	MAC cm^2/g		
			Deney	Teorik	Hata%
511	97390	83788	0,084	0,086	2,74
661,62	125200	107590	0,084	0,076	10,22
1173,23	136300	124093	0,052	0,058	10,23
1332,51	115580	105116	0,053	0,054	3,13

Tablo 3.17. ABS-Ce5 için LAC, HVL ve TVL değerleri.

Enerji (keV))	LAC cm^{-1}			HVL cm		TVL cm	
	Deney	Teorik	Hata%	Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	0,221	0,228	2,74	3,13	3,05	10,41	0,76
661,62	0,223	0,202	10,22	3,11	3,43	10,33	0,67
1173,23	0,138	0,154	10,23	5,02	4,51	16,69	0,51
1332,51	0,140	0,144	3,13	4,97	4,81	16,50	0,48

Tablo 3.18. ABS-Ce5 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.

Enerji (keV)	MFP cm		ACS× 10^{-24}	ECS× 10^{-25}	$N_{eff} \times 10^{+23}$		Z_{eff}	
	Deney	Teorik			Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	4,29	4,39	3,04	2,90	3,02	2,98	10,51	10,44
661,62	5,37	4,94	2,68	2,58	2,99	2,97	10,39	10,34
1173,23	7,10	6,52	2,01	1,96	2,95	2,96	10,27	10,25
1332,51	7,29	6,96	1,88	1,83	2,95	2,96	10,26	10,25

Tablo 3.19. ABS-Ce7.5 MAC deneysel ve teorik değerleri.

Enerji (keV)	I_0	I	MAC cm^2/g		
			Deney	Teorik	Hata%
511	97390	83227	0,088	0,086	2,27
661,62	989700	872923	0,070	0,076	7,90
1173,23	137000	124588	0,053	0,058	8,14
1332,51	116000	105754	0,052	0,054	4,55

Tablo 3.20. ABS-Ce7.5 için LAC, HVL ve TVL değerleri.

Enerji (keV))	LAC cm^{-1}			HVL cm		TVL cm	
	Deney	Teorik	Hata%	Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	0,233	0,228	2,27	2,97	3,04	9,88	10,10
661,62	0,186	0,202	7,90	3,72	3,43	12,36	11,39
1173,23	0,141	0,153	8,14	4,92	4,52	16,34	15,01
1332,51	0,137	0,144	4,55	5,05	4,82	16,78	16,02

Tablo 3.21. ABS-Ce7.5 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.

Enerji (keV)	MFP cm		ACS× 10^{-24}	ECS× 10^{-25}	$N_{eff} \times 10^{+23}$		Z_{eff}	
	Deney	Teorik			Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	4,29	4,39	3,19	2,90	3,04	2,98	11,00	10,90
661,62	5,37	4,94	2,80	2,58	2,99	2,973	10,82	10,75
1173,23	7,10	6,52	2,09	1,96	2,94	2,96	10,65	10,62
1332,51	7,29	6,96	1,95	1,84	2,94	2,96	10,64	10,61

Tablo 3.22. ABS-Ce10 MAC deneysel ve teorik değerleri.

Enerji (keV)	I_0	I	MAC cm^2/g		
			Deney	Teorik	Hata%
511	97390	82652	0,087	0,086	0,42
661,62	989700	867319	0,070	0,076	8,72
1173,23	137000	124012	0,053	0,058	8,98
1332,51	116000	105633	0,049	0,054	8,69

Tablo 3.23. ABS-Ce10 için LAC, HVL ve TVL değerleri.

Enerji (keV)	LAC cm^{-1}			HVL cm		TVL cm	
	Deney	Teorik	Hata%	Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	0,238	0,237	0,42	2,91	2,93	9,68	9,72
661,62	0,191	0,210	8,72	3,62	3,31	12,03	10,98
1173,23	0,144	0,159	8,98	4,80	4,37	15,94	14,51
1332,51	0,136	0,149	8,69	5,11	4,66	16,96	15,49

Tablo 3.24. ABS-Ce10 için MFP, ACS, ECS, N_{eff} ve Z_{eff} değerleri.

Enerji (keV)	MFP <i>cm</i>		ACS× 10⁻²⁴	ECS× 10⁻²⁵	$N_{eff} \times 10^{+23}$		Z_{eff}	
	Deney	Teorik			Deney	Teorik	Deney	Teorik
511	4,20	4,22	3,35	2,91	3,05	2,98	11,48	11,36
661,62	5,22	4,77	2,91	2,59	2,99	2,96	11,25	11,17
1173,2	6,92	6,30	2,16	1,96	2,93	2,95	11,02	10,99
1332,5	7,37	6,73	2,02	1,84	2,92	2,95	11,01	10,98

3.2. Simülasyon

Bu tezde, radyasyon alanında Monte Carlo uygulamaları ile bir simülasyon gerçekleştirilmiştir; özellikle tüm örnekler için Geant-4 programı kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, deneysel veriler ve Nist-XCOM web sitesinden elde edilen teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, Tablo 3.4'te belirtilen tüm parametreler üzerinde yapılmış, sonuçlar kaydedilmiş ve aynı veya ilgili alanlardaki araştırmacılar tarafından onaylanmış protokoller ve akademik çalışmalar doğrultusunda yürütülmüştür. Radyasyon taşınımı, parçacık fiziği, medikal fizik, kozmofizik, radyoterapi ve radyasyon biyolojisi gibi alanlarda çalışmalara olanak tanıyan çeşitli Monte Carlo simülasyon kodları bulunmaktadır. Bu kapsamda en çok kullanılan programlar arasında MCNP, GEANT4 ve FLUKA öne çıkmaktadır (Bhalerao vd., 2020). Bu çalışma, Geant-4 Monte Carlo kodunun elektromanyetik etkileşim süreci (Compton saçılması, fotoelektrik soğurma ve çift üretimi) için, deneyde incelenen ve Tablo 3.1'de belirtilen örneklerle doğrulanmasına odaklanmıştır. Gerekli karşılaştırmalar ve hesaplamalar, önceki literatür incelemelerine göre yapılmıştır. Geant-4; Bu Monte Carlo simülasyonu, araştırmacıların test edilen örneklerin radyasyon zırlama özelliklerini yüksek doğrulukla belirlemelerine olanak tanır ve bu örnekleri deneysel çalışmalar için potansiyel adaylar haline getirir. Geant4 (Geometry and Tracking), Monte Carlo yöntemlerini kullanarak parçacıkların maddeden geçişini simüle eden bir platformdur. Bu yöntem, belirli bir simülasyonda doğru bir olasılık modeli elde etmek amacıyla rastgele sayılar üretilmesini içerir (Sayyed vd., 2021). Kullanıcının kendisi tarafından uygulanması gereken bir araç seti olan GEANT4, nesne yönelimli C++ dilinde geliştirilmiş bir Monte Carlo parçacık fiziği simülasyon

araç takımıdır (Hurtado vd., 2004). Üst düzeyde, kullanıcıların karmaşık geometriler oluşturmalarını ve ardından parçacıkların madde içindeki hareketini ve etkileşimlerini izlemesini sağlar. Geant4, birçok fiziksel süreç ve malzeme tanımı içermekte olup, yüksek enerjili fizik deneylerinden düşük enerjili tıbbi uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Henderson vd., 2014). Geant4'ün geniş kesit veritabanı ile, bu parçacıkların 1 keV'den 100 MeV'ye kadar olan enerjilerle etkileşimlerini simüle edebilir (Alabsy vd., 2021). Bu çalışmada, deneysel olarak gerçekleştirilen foton zırlama parametrelerinin ölçümlerinin doğrulanması ve doğru bir şekilde modellenmesi amacıyla üretilen katkılı camların GEANT4 simülasyonları da yapılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar tezi son iki bölümünde ayrıntılı olarak tartışılacaktır ve karşılaştırmalı olarak değerlendirmeler yapılacaktır.

3.3. NIST XCOM Veritabanı

En yaygın kullanılan μ/ρ veri kümelerinden biri NIST XCOM veritabanıdır (Ali vd., 2015). Elementlerin kütle zayıflatma katsayıları (veya soğuk opaklıkları), 1920'lerden 1980'lere kadar kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve birkaç ünlü X-ışını veritabanında tablo haline getirilmiştir: NIST XCOM (Hubbell ve diğerleri tarafından geliştirilen NIST XCOM programı), NIST-FFAST (Chantler ve diğerleri tarafından oluşturulan X-ışını Form Faktörü, Zayıflatma ve Saçılma Tabloları), LBNL/CXRO (Henke ve diğerleri tarafından Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı/X-Işını Optik Merkezi), SNL (Biggs ve diğerleri tarafından Sandia Ulusal Laboratuvarları) ve LLNL (McMaster ve diğerleri tarafından Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı) (Huang vd., 2021). XCOM foton zayıflatma veritabanı aracı, kullanıcının ilgilendiği kimyasal bileşimi (element, bileşik ve karışım) seçmesine olanak tanır ve 1 keV ile 100 GeV enerji aralığında geniş bir gama foton zayıflatma verisi sağlar. Bu araç, fotoelektrik soğurma, saçılma (koherent ve inkoherent) ve çift oluşumu (nükleer ve elektronik alanlarda) gibi foton-madde etkileşimi fenomenlerini içeren kütle zayıflatma katsayısı değerlerini sağlar. Ancak, bir bileşikten diğerine elde edilen veri noktalarının sayısı farklıdır (Arun Kumar vd., 2023). Bu çalışmada Tablo 3.1'de belirtilen numuneler NIST XCOM web sitesinde bu bölümün başında belirtilen enerjilere maruz bırakılmış ve Geant4 simülasyonundan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar ve çizimler yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmada elde edilen sonuçlar sunularak tartışılmıştır. Kullanılan malzemelerin üretim süreçlerinde benimsenebilmesi için gerekli karşılaştırmalar, çizimler ve hesaplamalar yapılmıştır.

İlk olarak, Geant4 simülasyonlarıyla hesaplanan kütle zayıflama katsayıları (MAC), her bir numune için ayrı ayrı NIST XCOM veri tabanından alınan teorik değerlerle ve laboratuvar ortamında elde edilen deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmaları desteklemek üzere grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca, lineer zayıflama katsayısı (LAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) gibi parametreler de incelenmiştir. Bunların yanında, Etkin Atom Numarası (Z_{eff}) ve Etkili Elektron Yoğunluğu (N_{eff}) değerleri de hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Bu tezde sunulan sonuçlar, özellikle radyasyon koruma uygulamalarında etkili zırhlama sağlayan malzeme kalınlıklarının belirlenmesi konusunda önemli bilgiler içermektedir. Böylece, cam malzeme üretimi ve uygulaması alanındaki profesyoneller için faydalı referanslar oluşturulmuştur. Ayrıca, atomik kesit alanı (ACS) ve elektronik kesit alanı (ECS) değerleri ayrıntılı şekilde karşılaştırılarak, fizikçilerin malzeme ve radyasyon arasındaki etkileşimleri daha iyi anlamalarına katkı sağlanmıştır. Tüm bulgular, hazırlanan kapsamlı tablolar ve grafiklerle desteklenmiştir.

4.1. ABS-Ce0 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı

ABS-Ce0 numunesi için deney, Geant4 simülasyonu ve NIST XCOM'dan elde edilen değerler Tablo 4.1'de karşılaştırılmıştır.

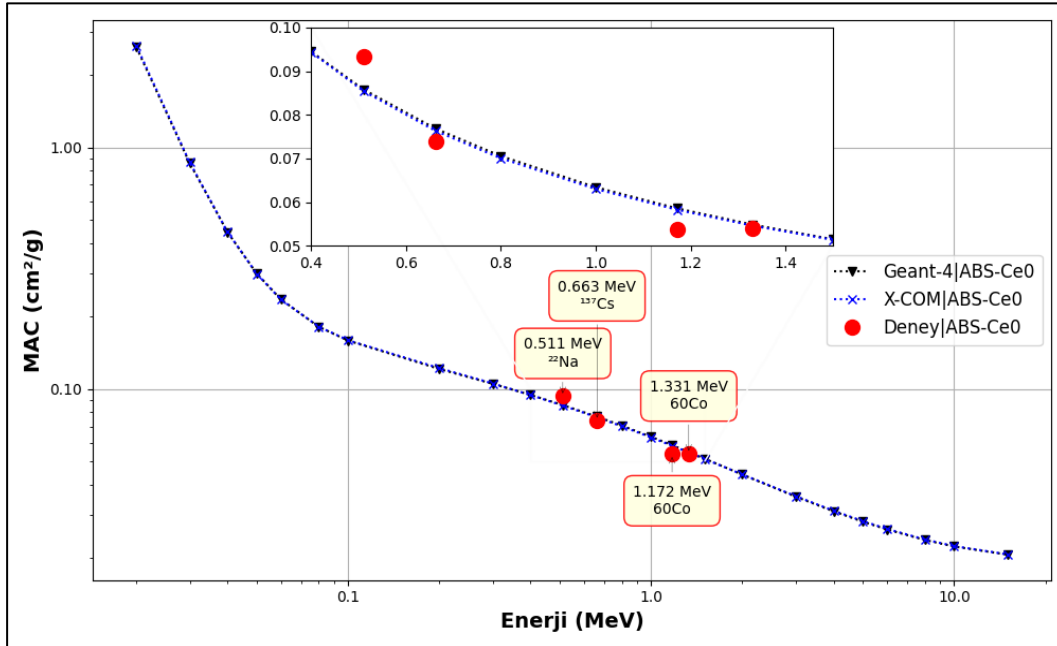
Tablo 4.1. ABS-Ce0 İçin kütle zayıflama katsayısı.

Enerji (MeV)	MAC cm^2/g			Deney
	Geant-4	XCOM	Hata%	
0,02	2,60	2,64	1,51	
0,03	0,86	0,87	0,79	

Tablo 4.1.(Devamı) ABS-Ce0 İçin kütle zayıflama katsayısı.

0,04	0,45	0,45	0,11	
0,05	0,30	0,30	0,21	
0,06	0,24	0,23	0,24	
0,08	0,18	0,18	0,10	
0,1	0,16	0,16	0,33	
0,2	0,12	0,12	0,84	
0,3	0,11	0,11	0,31	
0,4	0,09	0,09	0,11	
0,511	0,09	0,09	0,43	0,09
0,663	0,08	0,08	0,67	0,07
0,8	0,07	0,07	0,71	
1	0,06	0,06	0,63	
1,172	0,06	0,06	0,55	0,054
1,331	0,05	0,05	0,44	0,054
1,5	0,05	0,05	0,27	
2	0,04	0,04	0,11	
3	0,04	0,04	0,46	
4	0,03	0,03	0,56	
5	0,03	0,03	0,56	
6	0,03	0,03	0,54	
8	0,02	0,02	0,47	
10	0,02	0,02	0,38	
15	0,02	0,02	0,20	

Tablo 4.1'deki sonuçlara göre, bu sonuçlar için Şekil 4.1'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. ABS-Ce0 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.1, ABS-Ce0 numunesi için foton enerjisi (MeV) ile kütle zayıflatma katsayısı (MAC) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu şekil, deneysel verileri (kırmızı noktalar) Geant4 simülasyonları ve NIST XCOM teorik sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Genel olarak enerji ve MAC arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir: foton enerjisi arttıkça kütle zayıflatma katsayısı azalmakta ve bu durum özellikle yüksek enerji bölgesinde belirginleşmektedir. Bu eğilim, düşük enerjili fotonların maddeyle daha güçlü etkileşime girdiğini ve dolayısıyla daha yüksek zayıflatma sağladığını belirten teorik beklentilerle tutarlıdır. Orta enerji bölgesinde (^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co izotoplarıyla işaretlenen enerjilerde), deneysel sonuçlar teorik modellerle iyi bir uyum içindedir. Bu durum, simülasyon ve teorik hesapların güvenilirliğini göstermektedir. Enerji artmaya devam ettikçe MAC değerindeki düşüş hızı yavaşlamakta, ancak bu bölgede hâlen Compton saçılması baskın mekanizma olmaya devam etmekte, aynı zamanda yüksek enerjilerde çift oluşumu gibi etkileşimlerin rolü giderek artmaktadır. Bu veri seti, ABS-Ce0 numunesinin geniş bir enerji aralığındaki zayıflatma davranışını açıkça ortaya koymaktadır. Bu da gelecekte CeO_2 ilavesinin zırhlama performansına olan etkisini değerlendiren çalışmalar için önemli bir referans oluşturmaktadır.

4.2. ABS-Ce2.5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı

ABS-Ce2.5 numunesi için deney, Geant4 simülasyonu ve NIST XCOM'dan elde edilen değerler Tablo 4.2'de düzenlenmiştir.

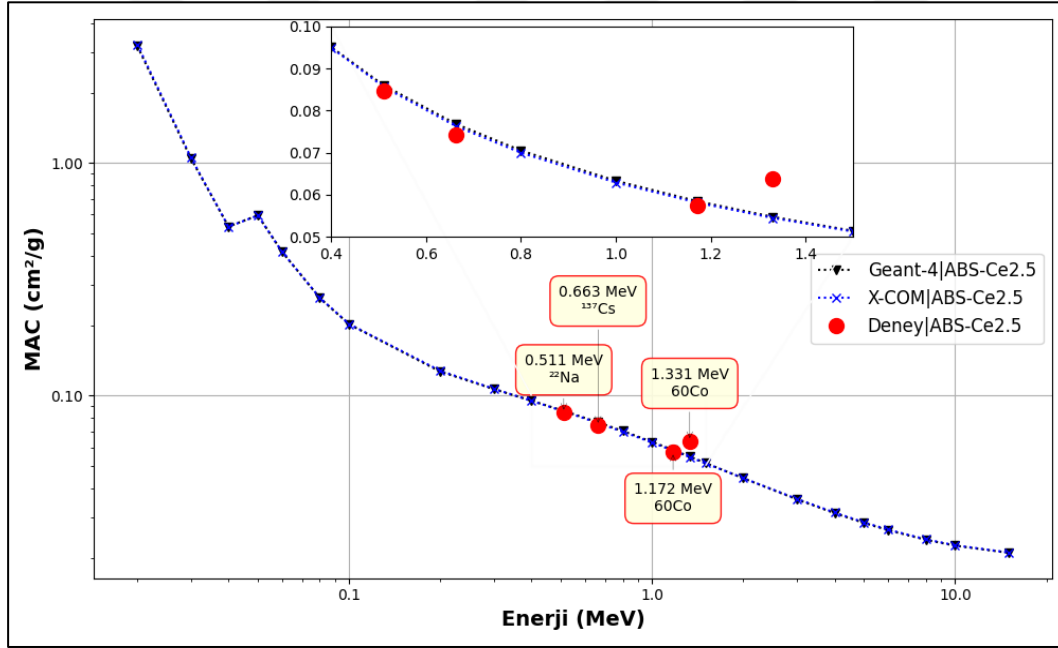
Tablo 4.2. ABS-Ce2.5 İçin kütle zayıflama katsayısı.

Enerji (MeV)	MAC cm^2/g			Deney
	Geant-4	XCOM	Hata%	
0,02	3,18	3,23	1,52	
0,03	1,05	1,06	0,88	
0,04	0,53	0,53	0,13	
0,05	0,60	0,59	0,13	
0,06	0,42	0,42	0,01	
0,08	0,26	0,26	0,18	
0,1	0,20	0,20	0,29	
0,2	0,13	0,13	0,74	
0,3	0,11	0,11	0,34	
0,4	0,10	0,09	0,12	
0,511	0,09	0,09	0,43	0,085
0,663	0,08	0,08	0,68	0,074
0,8	0,07	0,07	0,71	

Tablo 4.2. (Devamı) ABS-Ce2.5 İçin kütle zayıflama katsayısı.

1	0,06	0,06	0,65	
1,172	0,06	0,06	0,55	0,057
1,331	0,05	0,05	0,45	0,064
1,5	0,05	0,05	0,32	
2	0,04	0,04	0,10	
3	0,04	0,04	0,45	
4	0,03	0,03	0,56	
5	0,03	0,03	0,54	
6	0,03	0,03	0,51	
8	0,02	0,02	0,44	
10	0,02	0,02	0,39	
15	0,02	0,02	0,25	

Tablo 4.2'deki sonuçlara göre, bu sonuçlar için Şekil 4.2'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. ABS-Ce2.5 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.2, %2.5 seryum oksit (CeO_2) katkılı numune için enerji (MeV) ile kütle zayıflatma katsayısı (MAC, cm^2/g) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Düşük enerji bölgesinde, fotoelektrik etkileşim mekanizması baskın olup yüksek MAC değerlerine neden olmaktadır. Bu bölgede, Geant4 simülasyonu (siyah üçgenler) ve XCOM verileri (mavi çarpılar) benzer davranış sergilemektedir. Deneysel sonuçlar (kırmızı noktalar) ise her iki teorik veri seti ile genel olarak iyi bir uyum içindedir; ancak bazı küçük farklılıklar görülmüş ve maksimum %1 oranında hata tespit edilmiştir. Özellikle düşük enerjili fotonların zayıflatılmasında %2.5 CeO_2 ilavesinin olumlu etkisi belirgin

şekilde gözlenmiştir. Ancak foton enerjisi arttıkça CeO_2 katkısının etkisi azalmış, yüksek enerjilerde MAC değerleri arasındaki farklılıklar küçülmüştür. CeO_2 'nin sahip olduğu yüksek atom numarası (Z) ve yoğunluğu, özellikle düşük enerjili fotonların daha etkili bir şekilde soğurulmasına yardımcı olmaktadır. 0.1 MeV'nin altındaki düşük enerji bölgesinde MAC değerleri yüksek olup keskin bir düşüş göstermiştir. Bu bölge, fotoelektrik etkinin baskın olduğu ve seryumun katkısının açıkça hissedildiği bir enerji aralığıdır. 1 MeV'nin üzerindeki yüksek enerji bölgesinde, MAC değerleri daha kararlı hâle gelerek daha yavaş bir düşüş sergilemektedir. Bu enerji aralığında Compton saçılması baskın etkileşim mekanizmasıdır. Geant4 ve XCOM verilerinin birbirleriyle uyumu, simülasyon sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Deneysel sonuçlar ise genel eğilimi doğrulamakta ve yaklaşık %5 gibi küçük farklılıklarla desteklemektedir..

4.3. ABS-Ce5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı

ABS-Ce5 numunesi için deney, Geant4 simülasyonu ve NIST XCOM'dan elde edilen değerler Tablo 4.3'te düzenlenmiştir.

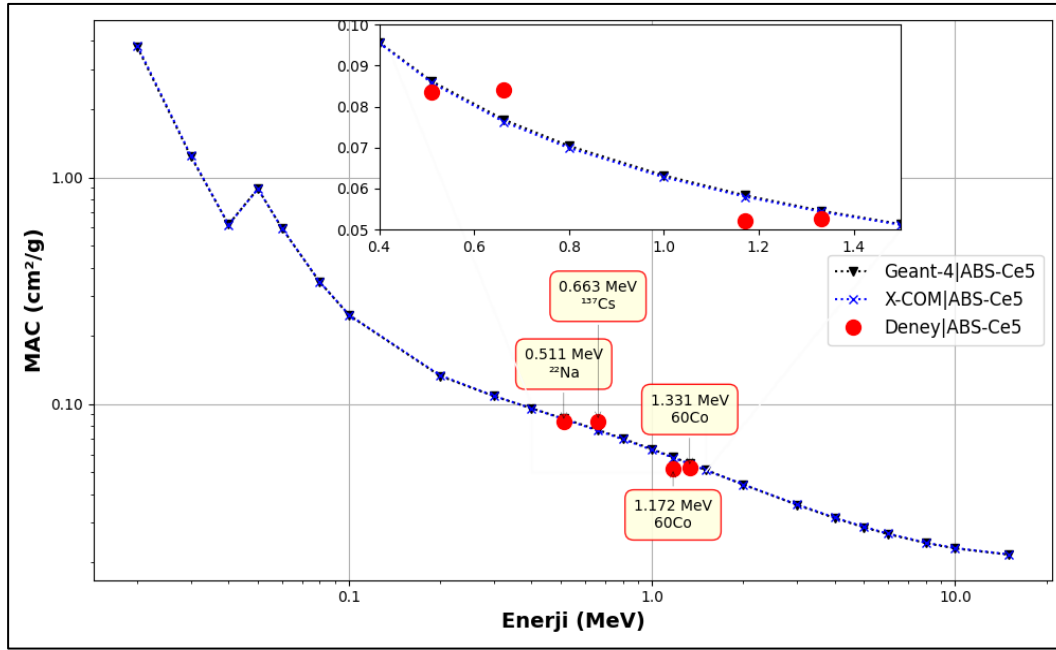
Tablo 4.3. ABS-Ce5 İçin kütle zayıflama katsayısı.

Enerji (MeV)	MAC cm^2/g			Deney
	Geant-4	XCOM	Hata%	
0,02	3,76	3,82	1,56	
0,03	1,24	1,25	1,01	
0,04	0,62	0,62	0,29	
0,05	0,89	0,89	0,12	
0,06	0,60	0,60	0,09	
0,08	0,35	0,35	0,19	
0,1	0,25	0,25	0,26	
0,2	0,13	0,13	0,65	
0,3	0,11	0,11	0,27	
0,4	0,10	0,10	0,12	
0,511	0,09	0,09	0,45	0,083
0,663	0,08	0,08	0,68	0,084
0,8	0,07	0,07	0,72	
1	0,06	0,06	0,65	
1,172	0,06	0,06	0,55	0,052
1,331	0,05	0,05	0,45	0,052
1,5	0,05	0,05	0,32	
2	0,04	0,04	0,08	

Tablo 4.3.(Devamı) ABS-Ce5 İçin kütle zayıflama katsayısı.

3	0,04	0,04	0,45
4	0,03	0,03	0,54
5	0,03	0,03	0,53
6	0,03	0,03	0,48
8	0,02	0,02	0,41
10	0,02	0,02	0,36
15	0,02	0,02	0,27

Tablo 4.3'deki sonuçlara göre, bu sonuçlar için Şekil 4.3'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.3. ABS-Ce5 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.3, %5 seryum oksit (CeO_2) katkılı numunenin foton enerjisine bağlı olarak değişen kütle zayıflatma katsayısı (MAC) değerlerini göstermektedir. Enerji arttıkça MAC değerlerinin azalması, düşük enerjili fotonların fotoelektrik etkileşim nedeniyle daha güçlü bir şekilde zayıflatıldığını, yüksek enerjili fotonların ise Compton saçılmasının baskın hâle gelmesiyle daha az zayıflatıldığını ortaya koymaktadır. Geant4 simülasyonları (siyah üçgenler) ve XCOM verileri (mavi çarpılar) genel olarak yüksek bir uyum göstermekte, ancak düşük enerji bölgesinde kullanılan fiziksel modellerin varsayımlarına bağlı olarak bazı küçük sapmalar gözlenmektedir. Deneysel sonuçlar (kırmızı noktalar), her iki teorik veri setiyle de genel olarak tutarlıdır, ancak belirli enerji noktalarında küçük farklılıklar bulunmaktadır. %5 CeO_2 ilavesi,

seryumun yüksek atom numarası sayesinde düşük enerjili bölgede MAC değerlerini artırmakta, ancak enerji yükseldikçe bu etki giderek azalmaktadır.

4.4. ABS-Ce7.5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı

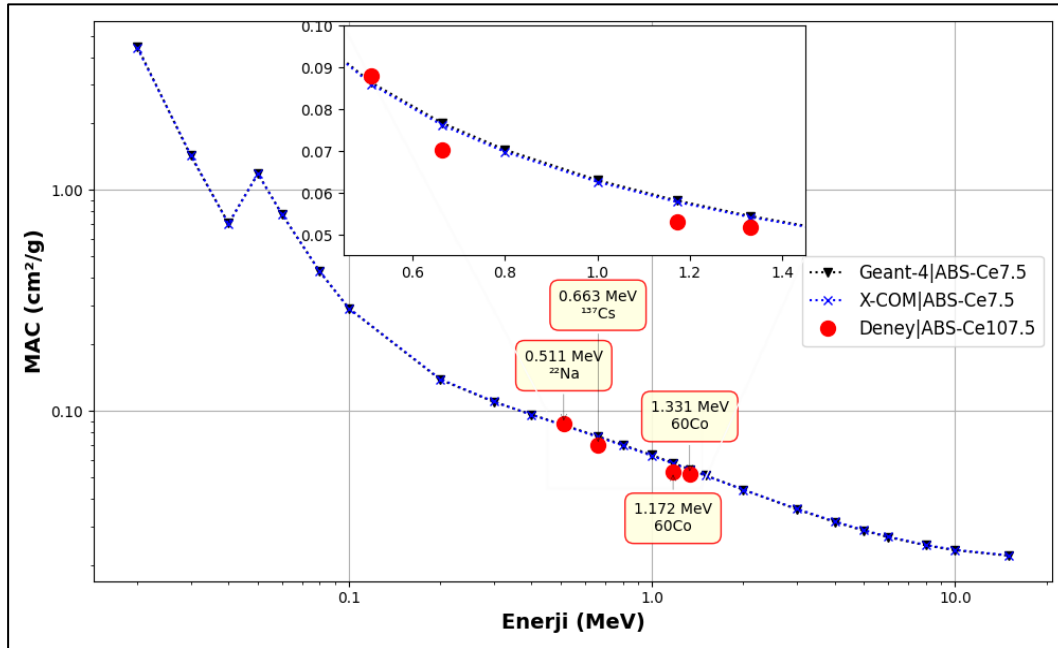
ABS-Ce7.5 numunesi için deney, Geant4 simülasyonu ve NIST XCOM'dan elde edilen değerler Tablo 4.4'te düzenlenmiştir.

Tablo 4.4. ABS-Ce7.5 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı.

Enerji (MeV)	MAC cm^2/g			Deney
	Geant-4	XCOM	Hata%	
0,02	4,46	4,41	1,29	
0,03	1,43	1,45	1,03	
0,04	0,71	0,70	0,43	
0,05	1,19	1,19	0,14	
0,06	0,78	0,78	0,14	
0,08	0,43	0,43	0,20	
0,1	0,29	0,29	0,24	
0,2	0,14	0,14	0,64	
0,3	0,11	0,11	0,29	
0,4	0,10	0,10	0,13	
0,511	0,09	0,09	0,45	0,088
0,663	0,08	0,08	0,68	0,071
0,8	0,07	0,07	0,72	
1	0,06	0,06	0,66	
1,172	0,06	0,06	0,55	0,054
1,331	0,05	0,05	0,46	0,052
1,5	0,05	0,05	0,33	
2	0,04	0,04	0,06	
3	0,04	0,04	0,42	
4	0,03	0,03	0,54	
5	0,03	0,03	0,52	
6	0,03	0,03	0,49	
8	0,02	0,02	0,38	
10	0,02	0,02	0,37	
15	0,02	0,02	0,30	

Deney verileri, teorik hesaplamalar ve simülasyon sonuçları arasındaki uyum derecesini ortaya koymaktadır. Bu uyum, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümlerin doğruluğu ve kullanılan cihazların hassasiyetine ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen sonuçların tutarlılığı, deney düzeneği ve ölçüm cihazlarının güvenilirliğini desteklemekte ve uygulanan yöntemlerin doğruluğunu pekiştirmektedir.

Tablo 4.4'teki sonuçlar kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. ABS-Ce7.5 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, %7.5 seryum oksit (CeO_2) içeren numunede foton enerjisi arttıkça MAC değerleri azalmaktadır. Düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkileşimin baskın olması nedeniyle fotonlar daha güçlü şekilde soğurulmakta ve MAC değerleri yüksek olmaktadır. Enerji yükseldikçe, Compton saçılmasının baskın hâle gelmesi nedeniyle zayıflatma katsayısı azalmaktadır. Geant4 simülasyonları (siyah üçgenler) ve XCOM teorik değerleri (mavi çarpılar) genel olarak yakın bir uyum içindedir; ancak düşük enerji aralığında, Geant4 fizik modellerinin varsayımlarından kaynaklanan hafif sapmalar gözlenebilmektedir. Deneysel sonuçlar (kırmızı noktalar) büyük ölçüde teorik ve simülasyon verilerini takip etmekte, fakat bazı küçük farklılıklar göstermektedir. %7.5 CeO_2 eklenmesi özellikle düşük enerji bölgesinde MAC değerlerini belirgin bir şekilde artırmaktadır; ancak bu etkinin yüksek enerjilere doğru azaldığı gözlenmektedir. Daha yüksek enerjilerde Compton saçılmasının baskın mekanizma hâline gelmesi, MAC değerlerinin düşmesine neden olmaktadır.

4.5. ABS-Ce10 İçin Kütle Zayıflama Katsayısı

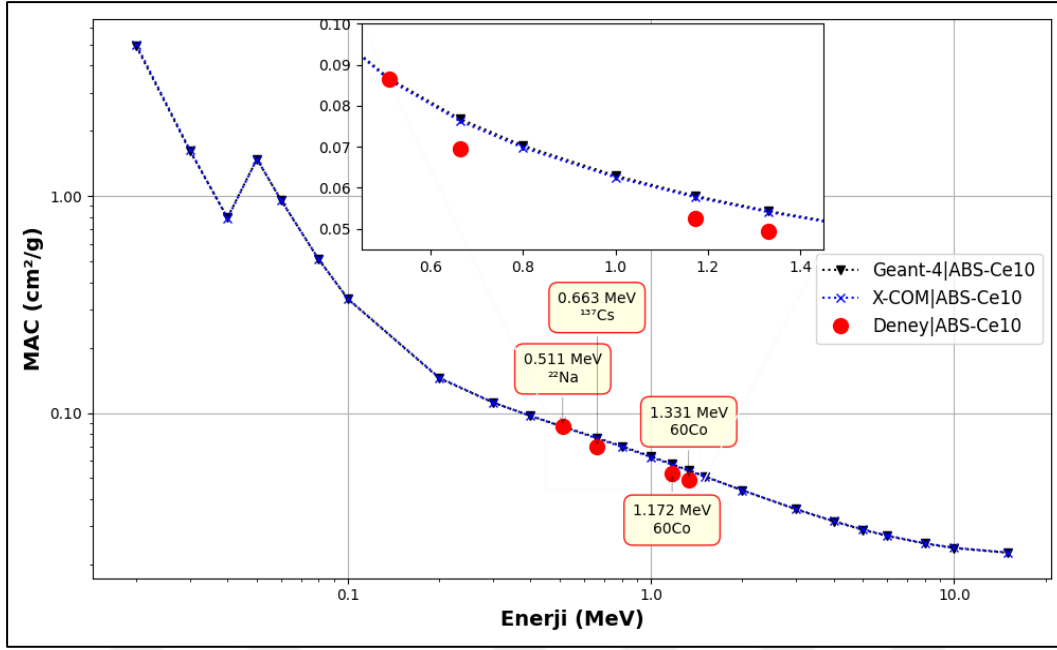
ABS-Ce10 numunesi için deney, Geant4 simülasyonu ve NIST XCOM'dan elde edilen değerler Tablo 4.5'te düzenlenmiştir.

Tablo 4.5. ABS-Ce10 İçin kütle zayıflama katsayısı.

Enerji (MeV)	MAC cm^2/g			Deney
	Geant-4	XCOM	Hata%	
0,02	4,90	5,00	1,97	
0,03	1,62	1,64	1,12	
0,04	0,79	0,79	0,53	
0,05	1,48	1,48	0,08	
0,06	0,96	0,96	0,17	
0,08	0,51	0,51	0,22	
0,1	0,33	0,34	0,25	
0,2	0,14	0,15	0,56	
0,3	0,11	0,11	0,22	
0,4	0,10	0,10	0,14	
0,511	0,09	0,09	0,45	0,087
0,663	0,08	0,08	0,69	0,070
0,8	0,07	0,07	0,74	
1	0,06	0,06	0,66	
1,172	0,06	0,06	0,57	0,053
1,331	0,05	0,05	0,48	0,050
1,5	0,05	0,05	0,34	
2	0,04	0,04	0,05	
3	0,04	0,04	0,42	
4	0,03	0,03	0,52	
5	0,03	0,03	0,51	
6	0,03	0,03	0,46	
8	0,02	0,03	0,39	
10	0,02	0,02	0,35	
15	0,02	0,02	0,33	

Tablo 4.5'te sunulan deney verileri, teorik hesaplamalar ve simülasyon sonuçları arasındaki uyum düzeyini göstermektedir. Bu uyum, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerin güvenilirliği ile ölçüm cihazlarının hassasiyetine ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Verilerin genel olarak uyumlu olması, kullanılan deney düzeneklerinin ve ölçüm cihazlarının doğruluğunu destekleyerek, uygulanan yöntemlerin güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4.5'teki sonuçlar kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 4.5'te sunulmuştur. Bu grafikte, artan CeO₂ konsantrasyonu ile gama foton enerjisine bağlı olarak kütle zayıflatma katsayılarında (MAC) belirgin bir artış olduğu gözlenmektedir. Bu durum, CeO₂'nin radyasyon zayıflatma üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

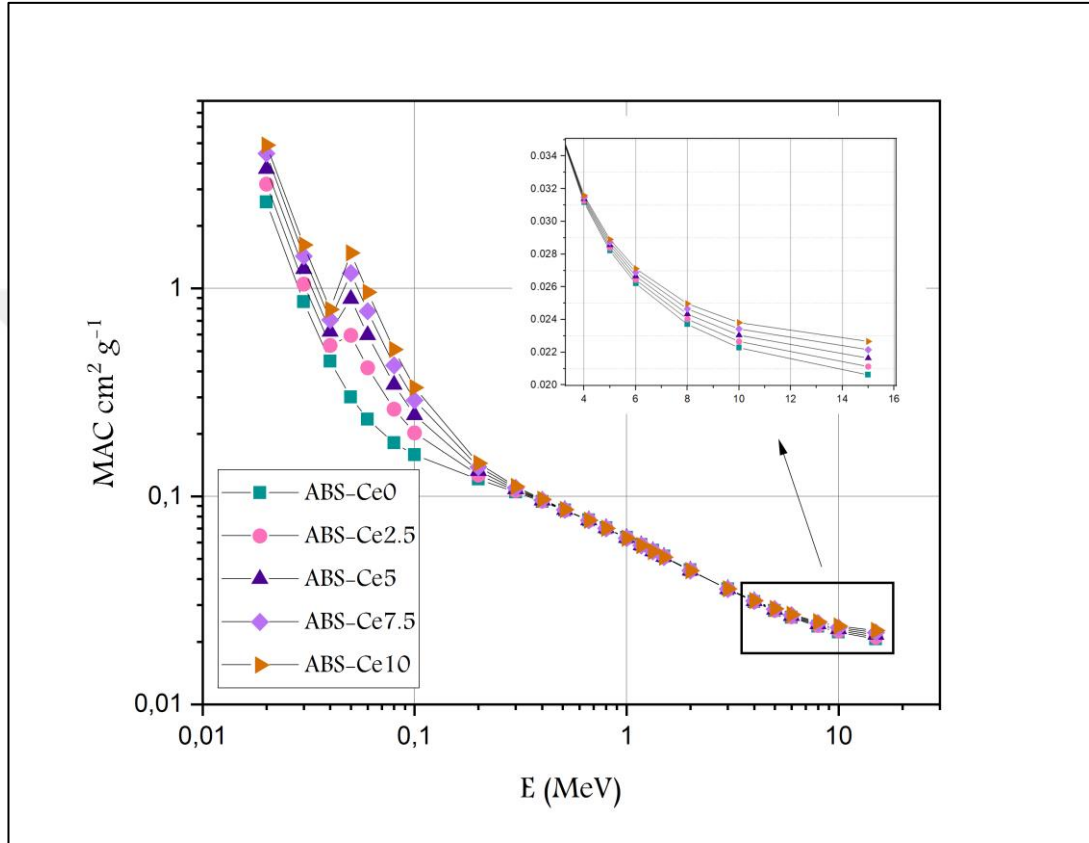


Şekil 4.5. ABS-Ce10 İçin MAC değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, beklendiği gibi MAC değerleri foton enerjisindeki artışla birlikte genel olarak azalmaktadır. Bu durum, foton enerjisi arttıkça maddeyle etkileşim olasılığının azaldığını göstermektedir. Bu eğilim, yüksek atom numarasına (yüksek-Z) sahip benzer malzeme bileşiklerinde gözlenen davranışlarla tutarlıdır: düşük enerji bölgesinde fotoelektrik soğurma baskın mekanizmadır ve yüksek MAC değerleri elde edilirken, enerji yükseldikçe Compton saçılması ön plana çıkmaktadır. Düşük enerji bölgesinde (0.1 MeV'nin altında) yüksek MAC değerleri görülmektedir ve bu durum, fotoelektrik etkinin güçlü soğurucu karakterini yansıtmaktadır. Bu bölgede, Geant4 simülasyonu ve XCOM teorik verileri benzer eğilimleri paylaşmaktadır. Yüksek enerji bölgesinde (1 MeV'nin üzerinde) ise Compton saçılması baskınlaşmakta ve MAC değerlerinde kademeli bir düşüş meydana gelmektedir. Bu aralıkta deneysel veriler, XCOM sonuçlarıyla iyi bir uyum sergilerken, Geant4 simülasyonlarıyla bazı farklılıklar gözlenmektedir. Bu durumun, yüksek foton enerjilerinde kullanılan simülasyon modellerindeki kısıtlamalardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Orta enerji aralığında (0.1-1 MeV), MAC değerlerinde düzenli bir düşüş gözlenmiştir. Bu aralıkta hem Geant4 hem de XCOM verileri birbirine yakın eğilimler göstermekte olup, deneysel ölçümler özellikle XCOM verileriyle güçlü bir uyum içindedir. Bu uyum, teorik modellerin ve özellikle XCOM veritabanının seryum oksit (CeO_2) içeren malzemelerin radyasyon zayıflatma özelliklerini doğru bir şekilde öngörmedeki başarısını ortaya koymaktadır.

4.6. ABS Kompozitlerde CeO₂ Katkısının Kütle Zayıflama Katsayısına Etkisi

Çalışmanın sonuçlarını göstermek amacıyla hazırlanan Tablo 4.1–4.5 ve Şekil 4.1–4.5’te sunulan veriler ışığında, radyasyon zırlama özelliklerine CeO₂ katkı konsantrasyonunun etkisi, Geant4 simülasyon sonuçları kullanılarak Şekil 4.6’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



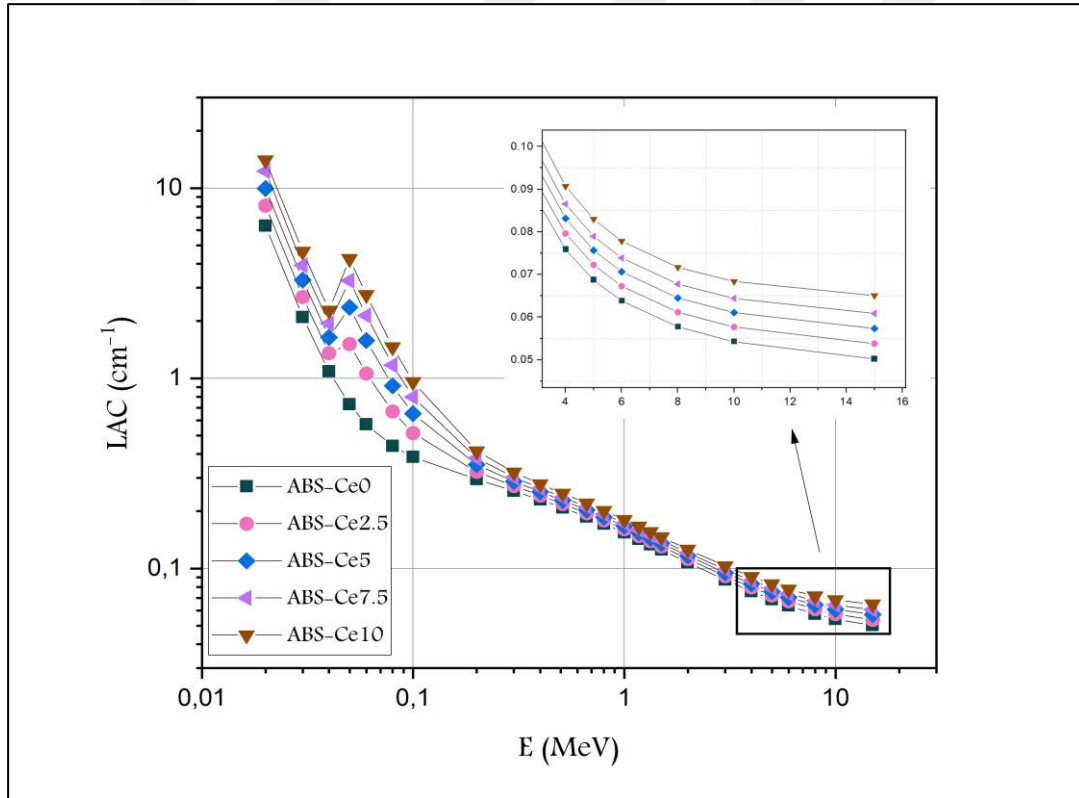
Şekil 4.6. Gama ışığı enerjisi ve kütle zayıflama katsayısı Geant4 karşılaştırması.

Şekil 4.6’daki Geant4 simülasyon sonuçları incelendiğinde, özellikle 0,04–0,2 MeV enerji aralığında belirgin bir zayıflatma tepe noktası (maksimum değer yaklaşık 0,05 MeV) gözlenmektedir. Bu durumun, fotoelektrik etkinin düşük enerjili fotonlara karşı duyarlılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, fotoelektrik etkileşimin tesir kesiti, atom numarasına (Z) bağlı olarak yaklaşık Z^3 – Z^4 arasında değişen bir oranda arttığı için bu tepeler, yüksek atom numarasına sahip malzemelerde daha belirgin hâle gelmektedir. Bu bağlamda, seryum (Ce, Z=58) gibi yüksek atom numarasına sahip elementlerin, düşük enerjili fotonları daha hafif elementlere göre daha etkin bir şekilde soğurduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, CeO₂ katkılı ABS kompozitlerin düşük enerjili gama ışınlarını zayıflatmada üstün bir performans gösterebileceğini desteklemektedir.

4.7. ABS-CeO₂ Kompozitlerinin Lineer Zayıflama Katsayıları

Lineer zayıflama katsayısı (LAC), radyasyondan korunma ve malzeme bilimindeki pratik uygulamalar açısından önem taşır. LAC, kütle zayıflama katsayısını (MAC) malzeme yoğunluğu ile ilişkilendirerek, gerçek uygulamalarda malzemenin fiziksel kalınlığı cinsinden foton zayıflatmasını doğrudan belirlemeyi mümkün kılar. Özellikle tıbbi görüntüleme, radyasyon zırhlama ve koruyucu bariyerlerin tasarımı gibi alanlarda, radyasyonun birim uzunluk (cm) başına ne kadar zayıfladığı bilgisini sunması açısından çok faydalıdır.

Bu çalışmada, ABS-CeO₂ kompozitleri için %0'dan %10'a kadar değişen CeO₂ katkı oranlarında lineer zayıflama katsayıları Geant4 simülasyonları ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiştir.



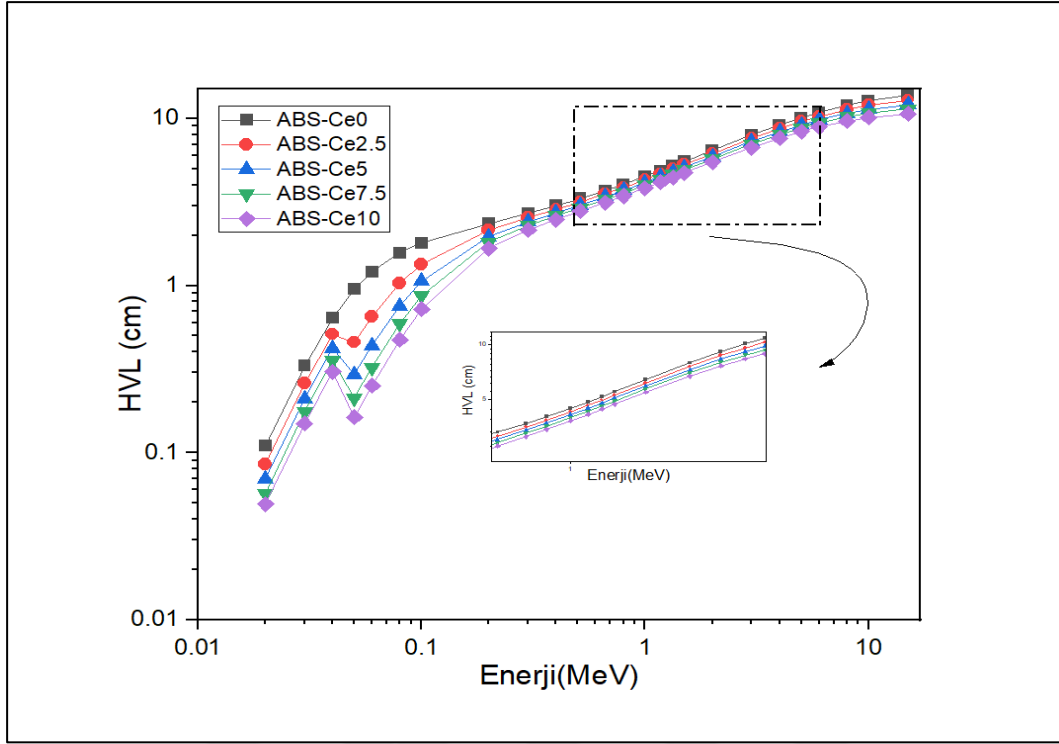
Şekil 4.7. Geant4 ile Enerji-Lineer zayıflatma katsayısı ilişkisi.

Şekil 4.7 incelendiğinde, foton enerjisi arttıkça lineer zayıflama katsayılarının (LAC) azaldığı gözlenmektedir. Bu durum, farklı enerji seviyelerinde baskın olan foton etkileşim mekanizmalarına bağlı beklenen bir davranıştır. Simülasyon sonuçları, 0,04–0,2 MeV enerji aralığında belirgin tepeler olduğunu göstermiş ve bu tepeler özellikle ~0,05 MeV civarında daha net olarak ortaya çıkmıştır. CeO₂ katkı oranının %0'dan

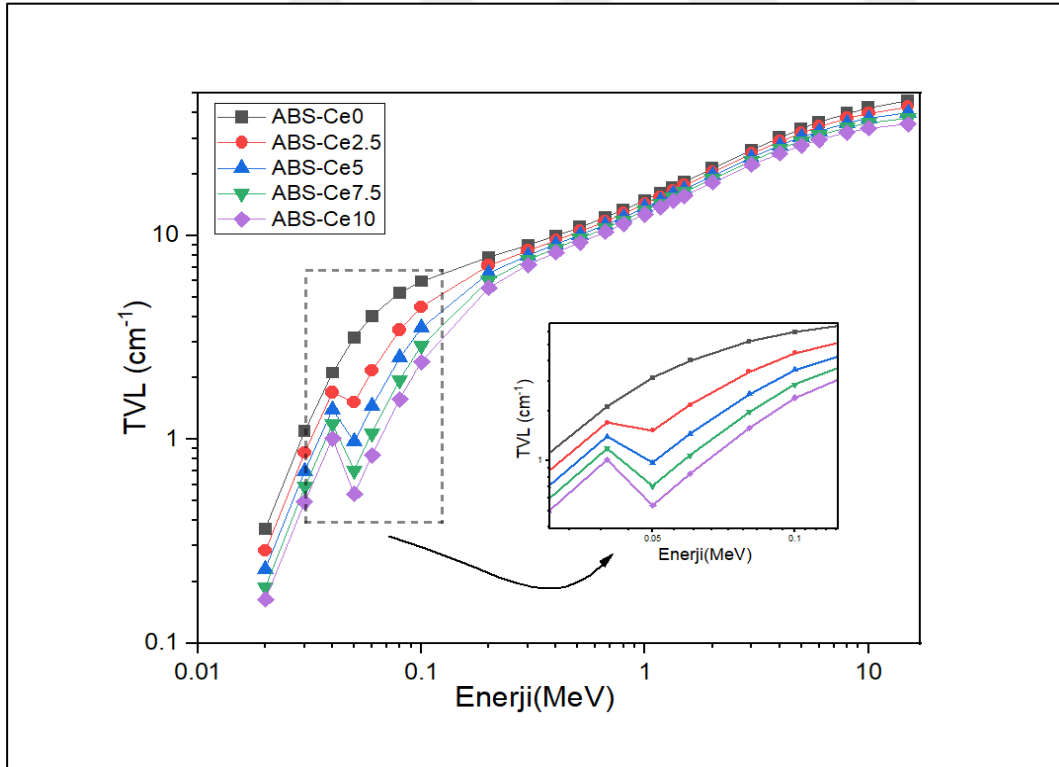
%10'a çıkarılması, incelenen tüm enerji aralığında LAC değerlerini yükseltmiştir. Bu artışın nedeni, CeO₂'nin saf ABS malzemesine göre çok daha yüksek atom numarasına (Z) sahip olması ve özellikle düşük enerjili fotonlar için fotoelektrik soğurmayı önemli ölçüde artırmasıdır. CeO₂ konsantrasyonundaki artış, malzemenin radyasyon zayıflatma performansını etkili biçimde iyileştirmekte, düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkinin baskın olduğu durumlarda üstün bir koruma sağlamaktadır. Bu bulgular, ABS-CeO₂ malzemelerinin radyasyon zırhlama özelliklerinin belirli enerji aralıklarına ve uygulama ihtiyaçlarına göre optimize edilebileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

4.8. Yarı Değer Kalınlığı, On Değer Kalınlığı Ve Ortalama Serbest Yol Analizi

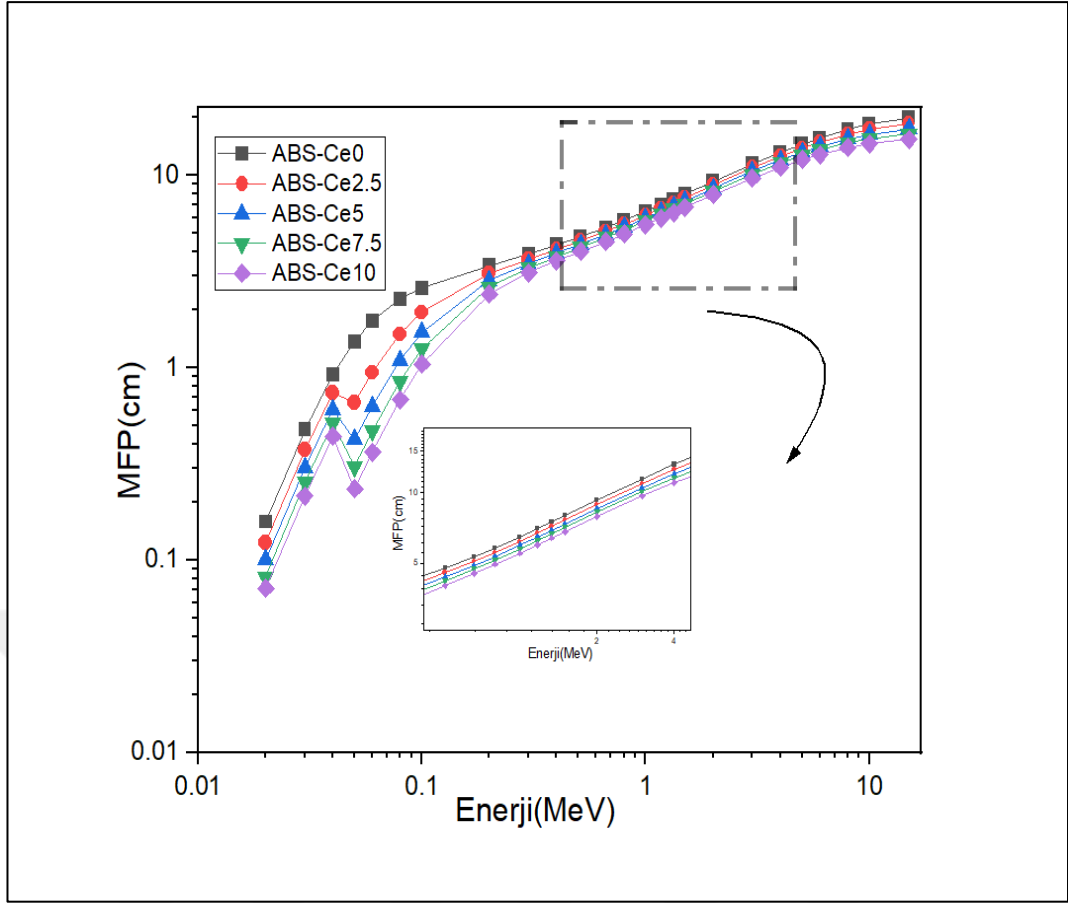
Lineer zayıflama katsayısı (LAC), bir malzemenin radyasyonla etkileşim kapasitesini tanımlayan önemli bir parametredir ve malzemenin atomik bileşimi ile yapısının etkilerini birlikte yansıtır. LAC değerlerinden hesaplanan yarı değer kalınlığı (HVL), radyasyon zayıflatma özelliklerini malzemenin fiziksel kalınlığı cinsinden ifade ederek, özellikle radyasyondan korunma ve tıbbi görüntüleme alanlarında pratik bir değerlendirme sunar. HVL, belirli bir radyasyon seviyesini yarıya düşürmek için gereken malzeme kalınlığını belirlemek açısından kritik bir ölçüttür. Şekil 4.8, Geant4 simülasyon sonuçlarına dayanarak, CeO₂ içeriği %0'dan %10'a kadar değişen ABS-CeO₂ numunelerinin farklı enerjilerde hesaplanan HVL değerlerini göstermektedir. Sonuçlar, radyasyon enerjisi arttıkça HVL'nin arttığını ortaya koymaktadır. Bu durum tipik bir radyasyon zırhlama davranışdır; çünkü yüksek enerjili fotonlar malzemelere daha derin nüfuz eder ve aynı oranda zayıflama sağlamak için daha kalın malzeme gerektirir. Şekil 4.9'da, Geant4 simülasyonlarıyla hesaplanan, malzemede radyasyon yoğunluğunu onda bire düşürmek için gerekli kalınlık (TVL) enerjiye bağlı olarak sunulmaktadır. TVL, HVL'ye benzer bir yaklaşımla kullanılır, ancak daha yüksek oranda zayıflama elde etmek için gerekli kalınlığı ifade eder. Şekil 4.10, Geant4 simülasyon sonuçlarıyla elde edilen ortalama serbest yol (MFP) değerlerini göstermektedir. MFP, fotonların bir malzemede etkileşime girmeden önce kat ettikleri ortalama mesafeyi belirtir ve malzemenin atomik yapısı ile ilişkilidir. Daha yüksek MFP değerleri, fotonların malzeme içinde daha az etkileşimle ilerlediğini göstermektedir.



Şekil 4.8. Geant4 ile gama enerjisi–HVL ilişkisi.



Şekil 4.9. Geant4 ile gama enerjisi–TVL ilişkisi.

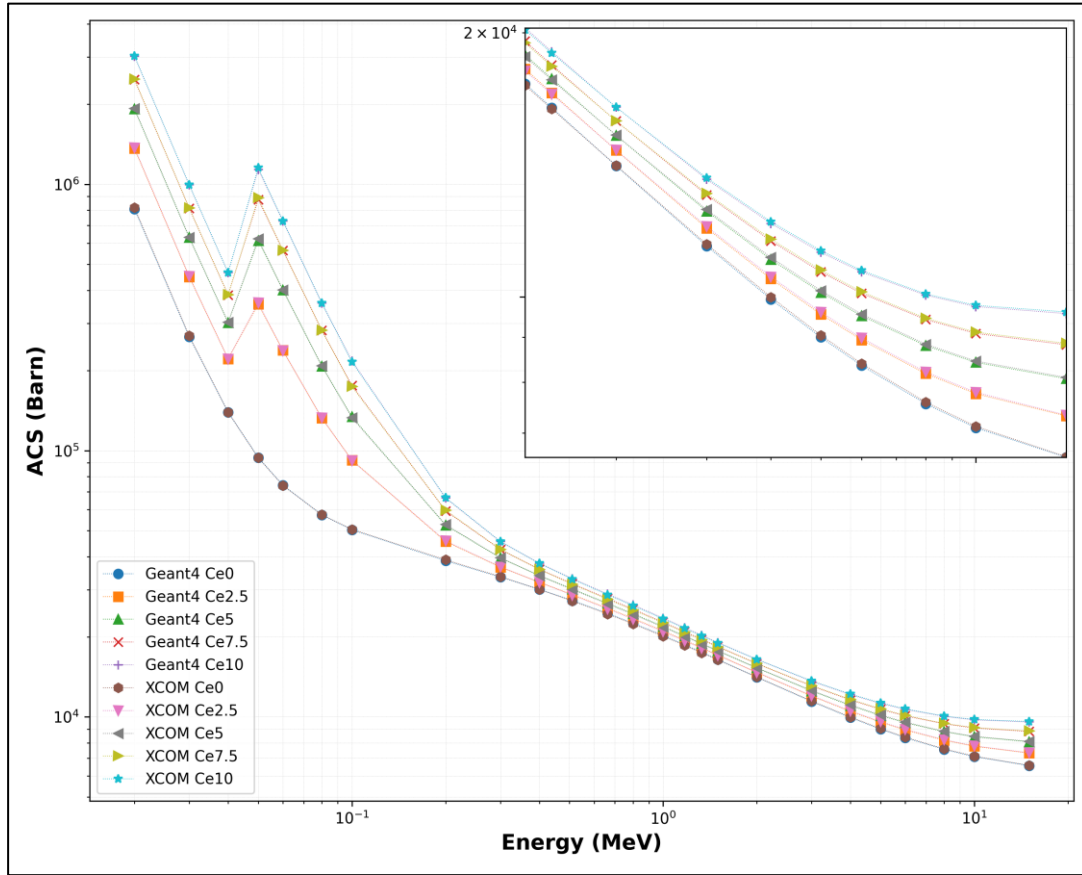


Şekil 4.10. Geant4 ile gama enerjisi–MFP ilişkisi.

Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10’da gösterilen HVL, TVL ve MFP parametreleri benzer davranışlar sergilemektedir, çünkü bu üç parametre de temel olarak lineer zayıflama katsayısından (LAC) türetilmiştir. CeO₂ içeriği arttıkça (%0’dan %10’a kadar), enerji aralığı boyunca HVL, TVL ve MFP değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma, CeO₂’nin saf ABS’ye kıyasla daha yüksek atom numarasına (Z) sahip olması nedeniyle, özellikle düşük enerji aralığında (0.04–0.2 MeV) fotoelektrik soğurmayı artırmasından kaynaklanmaktadır. Artan CeO₂ konsantrasyonu, fotonlarla etkileşimleri güçlendirerek malzemenin radyasyon zayıflatma kapasitesini etkili şekilde artırmakta, özellikle fotoelektrik etkinin baskın olduğu düşük enerjili radyasyon bölgelerinde üstün koruma sağlamaktadır. Sonuç olarak, HVL, TVL ve MFP parametrelerinin LAC değerlerinden türetilmesi, radyasyon zayıflatma verilerini pratik tasarım bilgilerine dönüştürmektedir. Bu yöntem, belirli enerji aralıkları için radyasyon koruma verimliliğinin optimize edilmesini kolaylaştırmaktadır. CeO₂ katkısının artırılması, özellikle düşük enerji bölgelerinde ABS kompozitlerinin radyasyon zırhlama kapasitesini önemli ölçüde geliştirmektedir.

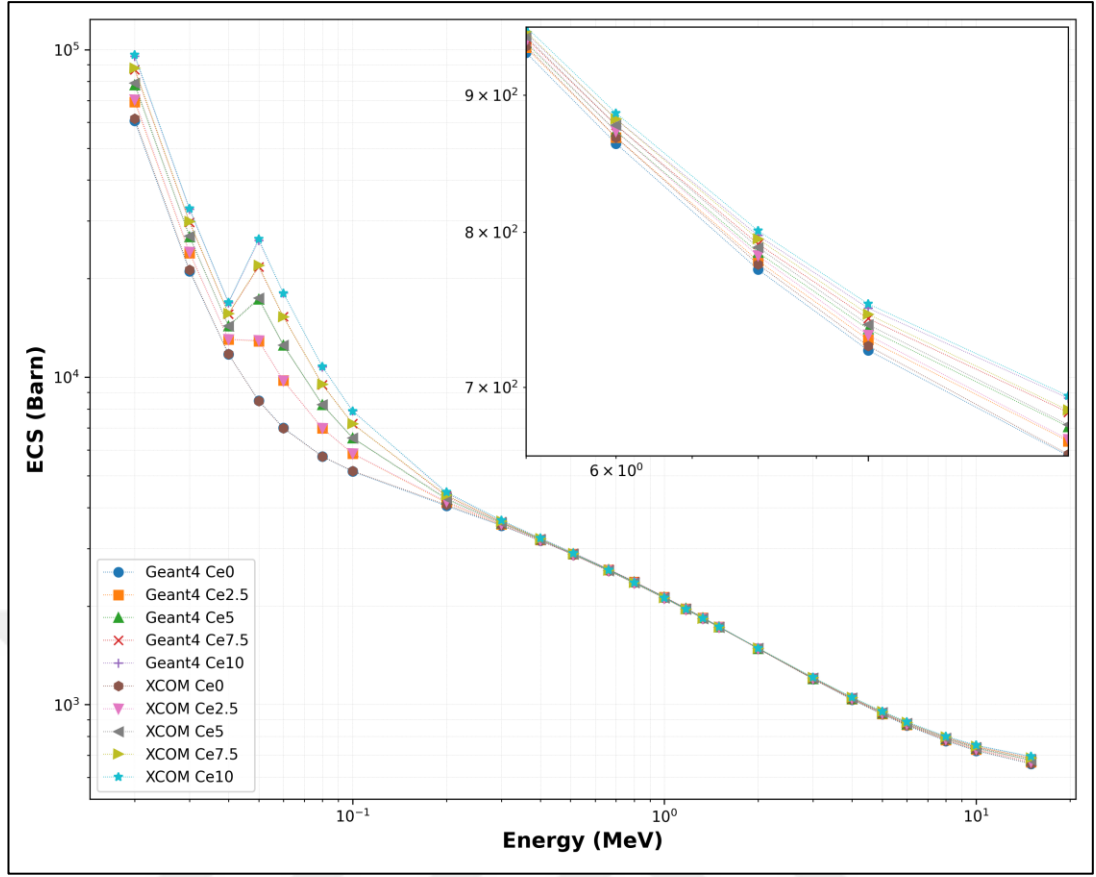
4.9. Kütle ve Elektrik Tesir Kesiti Analizi

Bu tezde, Ek 1–Ek 5’te sunulan verilere dayanılarak, kütle tesir kesiti (ACS) ve elektronik tesir kesitinin (ECS) foton enerjisiyle değişimi incelenmiştir. Bu analizlerin sonuçları sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Gama foton enerjisi ile kütle tesir kesiti (ACS) ilişkisi.

Şekil 4.11’de gösterildiği gibi, CeO₂ eklenmesi, özellikle 0.04–0.2 MeV düşük enerji aralığında ACS değerlerini artırmaktadır. Bu durum, düşük enerjilerde fotoelektrik etkinin baskın olmasından kaynaklanmakta ve CeO₂’nin yüksek atom numarasına (Z) bağlı olarak daha fazla foton etkileşimini teşvik etmesiyle açıklanmaktadır. Foton enerjisi yükseldikçe ACS değerlerindeki düşüş, fotoelektrik etkinin azalması ve Compton saçılmasının ön plana çıkmasıyla ilişkilidir. Sonuçlar, daha yüksek CeO₂ konsantrasyonuna sahip kompozitlerin (%10’a kadar) düşük enerji bölgesinde üstün bir radyasyon koruma performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu da bu malzemelerin özellikle düşük enerjili fotonları etkili bir şekilde soğurması gereken uygulamalarda kullanım potansiyelini desteklemektedir.



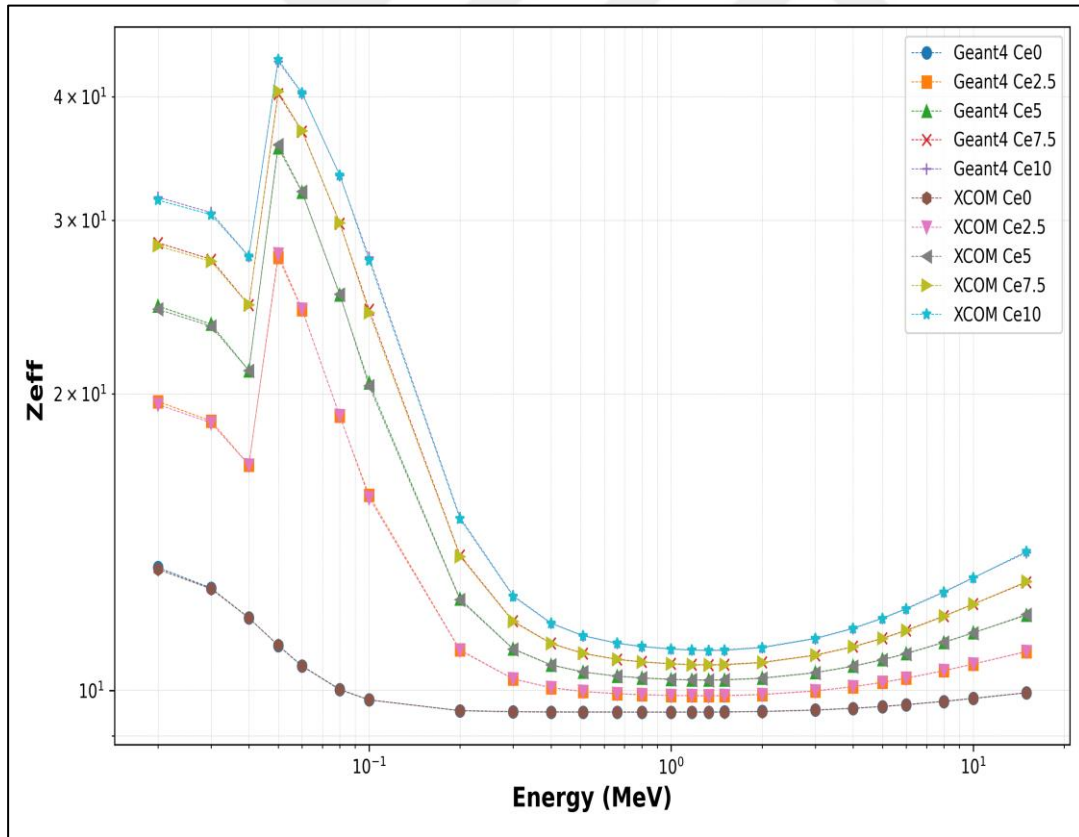
Şekil 4.12 Gama foton enerjisi ile elektronik tesir kesiti (ECS) ilişkisi.

Şekil 4.12’de sunulan elektronik tesir kesiti (ECS) değerleri, artan foton enerjisi ile azalmaktadır ve fotoelektrik etkileşimden Compton saçılmasına geçişi yansıtan tipik bir eğilim sergilemektedir. CeO₂ katkılı ABS kompozitlerindeki ECS değerleri de benzer bir davranış göstermekte olup, CeO₂ ilavesinin esas olarak düşük enerji aralığındaki etkileşimleri artırdığı gözlenmektedir. Yüksek enerji bölgesinde (>1 MeV) ise ECS değerleri arasındaki farklar azalmaktadır. Bu durum, yüksek enerjilerde malzemenin radyasyon zayıflatma verimliliğinin CeO₂ içeriğine daha az duyarlı olduğunu göstermektedir. ACS ve ECS değerlerindeki bu sistematik değişim, artan CeO₂ konsantrasyonunun özellikle düşük foton enerjilerinde malzemenin radyasyon soğurma performansını iyileştirdiğini doğrulamaktadır. Bu bulgu, yüksek atom numarasına sahip olan CeO₂’nin düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşimleri artıracak yönündeki teorik beklentiyle uyumludur. Sonuçlar, ABS kompozitlerde CeO₂ oranının değiştirilmesinin, malzemenin radyasyon zırlama özelliklerinin belirli enerji aralıklarına yönelik olarak optimize edilmesi açısından etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, ABS-CeO₂ kompozitlerinin radyasyon zırlama açısından en etkili olduğu enerji aralığı, 0.04–0.2 MeV gibi düşük foton enerjileridir.

Bu aralıkta, kompozitlerin ACS ve ECS değerleri belirgin biçimde yüksektir. Ancak medikal veya endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan daha yüksek enerji aralıklarında (>1 MeV), CeO_2 ilavesinin sağladığı ek avantaj azalmaktadır; çünkü bu yüksek enerjilerde fotoelektrik etkinin rolü sınırlı kalmaktadır. Özetle, Geant4 simülasyonları ve NIST XCOM verileri, ABS kompozitlerin radyasyon koruma performansını artırmada CeO_2 konsantrasyonunun önemini açıkça göstermektedir. Özellikle düşük enerjili gama ışınlarına karşı koruma gerektiren uygulamalarda ABS- CeO_2 kompozitleri, potansiyel aday malzemeler olarak öne çıkmaktadır.

4.10. Efektif Atom Numarası Ve Efektif Elektron Yoğunluğu Analizi

Bu tezde, Ek 1'den Ek 5'e kadar olan verilere dayanarak, efektif atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) değerlerinin foton enerjisine göre değişimi incelenmiştir. Bu analizlerin sonuçları sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur.

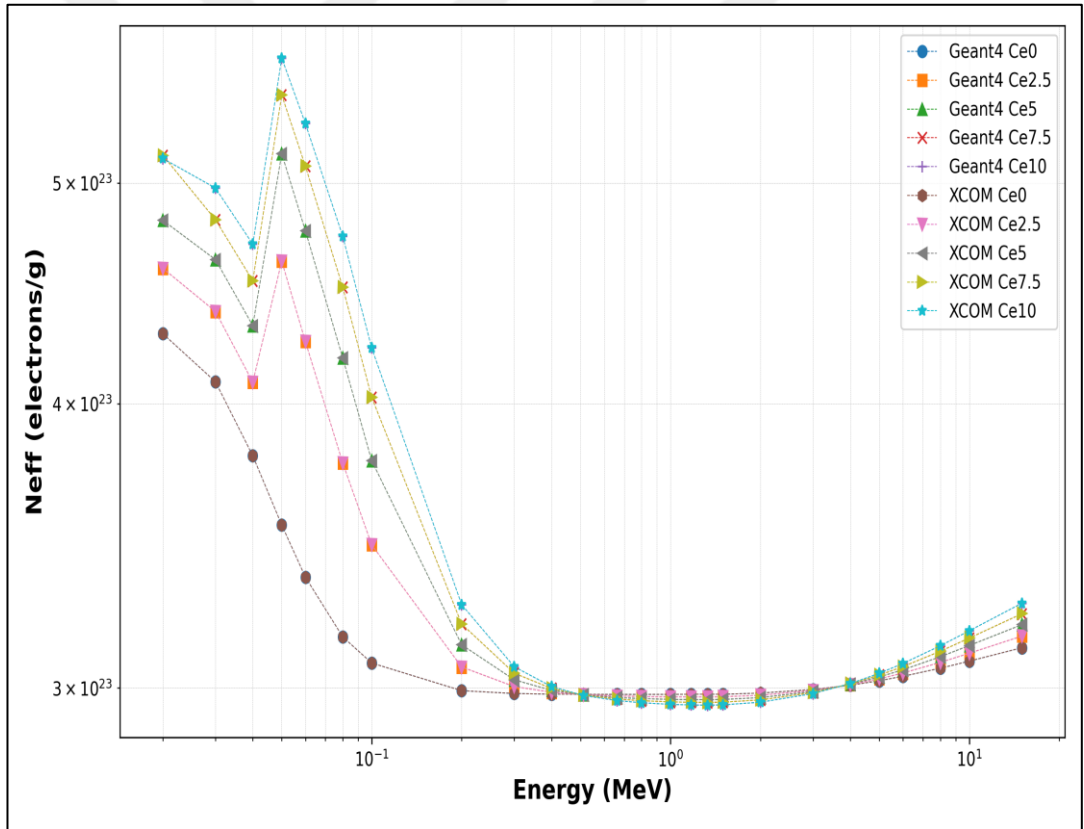


Şekil 4.13. Gama foton enerjisi ile efektif atom numarası (Z_{eff}) ilişkisi.

Şekil 4.13'te, CeO_2 konsantrasyonları %0'dan %10'a kadar değişen ABS- CeO_2 kompozitleri için Geant4 simülasyonu ile hesaplanan Z_{eff} değerlerinin foton enerjisiyle

(MeV) ilişkisi görülmektedir. Grafik, Z_{eff} 'in düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki değişim hassasiyetini açıkça göstermektedir.

Sonuçlar, düşük enerji seviyelerinde (0.04–0.2 MeV) Z_{eff} değerlerinin yüksek olduğunu ve artan CeO_2 konsantrasyonuyla birlikte düzenli olarak arttığını ortaya koymaktadır. Bu durum, düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkinin baskın olmasıyla açıklanabilir. Orta enerji bölgesinde (0.1–1 MeV) Z_{eff} değerleri nispeten sabit kalmakta ve bu bölgede Compton saçılması etkin hâle gelmektedir. Daha yüksek enerji seviyelerinde (1–15 MeV) ise Z_{eff} değerleri yeniden artmaya başlamakta ve bu durum, elektron-pozitron çift oluşumu mekanizmasının etkisinin artmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu bulgular, CeO_2 içeriğinin artırılmasının kompozitlerin radyasyona karşı zırhlama kapasitesini iyileştirdiğini ve bunun Z_{eff} değerleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Gama foton enerjisi ile etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) ilişkisi.

Şekil 4.14'te, CeO_2 konsantrasyonları (%0, %2.5, %5, %7.5, %10) değişen ABS kompozitleri için etkin elektron yoğunluğunun (N_{eff}) foton enerjisiyle değişimi verilmiştir. Grafikte Geant4 simülasyon sonuçları ve XCOM teorik değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Düşük enerji aralığında (~ 0.1 MeV'nin altında),

fotoelektrik etkinin baskın olması nedeniyle N_{eff} değerleri belirgin bir tepe noktasına ulaşmaktadır. CeO_2 konsantrasyonunun artırılması, seryumun yüksek atom numarası sayesinde fotoelektrik etkileşimleri güçlendirerek bu bölgede N_{eff} değerlerini önemli ölçüde yükseltmektedir. Orta enerji aralığında ($\sim 0.1-1$ MeV arası), Compton saçılmasının baskın hâle gelmesiyle N_{eff} değerlerinde keskin bir düşüş yaşanmakta ve malzemenin etkileşim verimliliği azalmakta; yüksek enerji aralığında ise (1 MeV'nin üzerinde) çift oluşumu etkisinin ön plana çıkmasıyla N_{eff} değerleri sabitlenmekte, CeO_2 içeriğinin etkisi sınırlı kalmaktadır. Geant4 simülasyonları ve XCOM teorik değerlerinin karşılaştırılması, tüm konsantrasyonlarda ve enerji aralıklarında güçlü bir uyum sergilemiş ve her iki yöntemin doğruluğunu doğrulamıştır.

Sonuç olarak, CeO_2 katkısının artması, özellikle fotoelektrik etkinin baskın olduğu düşük enerji bölgesinde ABS kompozitlerin radyasyon zırlama kapasitesini belirgin biçimde artırmaktadır. Yüksek enerjilerde ise CeO_2 'nin etkisi daha az belirgin hâle gelmektedir. Bu durum, ABS- CeO_2 kompozitlerini özellikle düşük enerjili gama radyasyonu zırlama gereksinimleri için umut verici bir malzeme seçeneği olarak öne çıkarmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, ABS esaslı kompozitlere farklı oranlarda seryum oksit (CeO_2) eklenerek, malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırlama özellikleri incelenmiştir. Yapılan ölçüm ve analizlerle, CeO_2 katkısının ABS kompozitlerin radyasyon zırlama kapasitesine, şeffaflığına ve mekanik dayanımına etkileri belirlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Tablo 5.1):

Tablo 5.1. Sonuçların özeti.

Sonuçlar	
1. Zayıflatma katsayısı (MAC)	CeO_2 oranı arttıkça MAC değerleri artmış ve radyasyon daha etkili biçimde azaltılmıştır. En iyi performans %10 CeO_2 ile elde edilmiştir.
2. HVL ve TVL (Yarı ve Onda Değer Kalınlığı)	CeO_2 eklenmesiyle HVL ve TVL değerleri düşmüş, böylece daha ince katmanlarda etkin radyasyon zırlaması mümkün hale gelmiştir.
3. Malzeme yoğunluğu	CeO_2 oranı arttıkça kompozitlerin yoğunluğu ve buna bağlı olarak kütle zayıflatma katsayıları (özellikle düşük enerjilerde) belirgin şekilde yükselmiştir.
4. Enerji-Zayıflatma ilişkisi	CeO_2 katkısının düşük enerjili fotonlarda zayıflatmaya etkisi belirgindir; ancak yüksek enerjilere doğru bu etki azalmaktadır. Bu durum, farklı enerjilerde baskın olan fiziksel etkileşim mekanizmalarından kaynaklanmaktadır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekte yapılabilecek araştırmalar ve uygulamalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur (Tablo 5.2):

Tablo 5.2. Öneriler özeti.

Öneriler	
1. Malzeme Geliştirme	CeO ₂ oranının %10'un üzerine çıkarılması önerilir. Böylece radyasyon zırhlama kapasitesi ve mekanik dayanım arasındaki optimum nokta daha iyi anlaşılabilir. Ayrıca, yüksek katkının ekonomik ve yoğunluk üzerindeki etkileri göz önünde tutulmalıdır.
2. Farklı Enerji Aralıkları	Yüksek enerjili gama fotonlarının (≥ 1 MeV) zayıflatılması için ABS-CeO ₂ kompozitlerinin detaylı performans analizi yapılmalıdır. Bu durum, özellikle nükleer tesisler ve tıbbi radyoloji gibi yüksek enerjili radyasyon ortamları için önemlidir.
3. Uzun Vadeli Performans	CeO ₂ katkılı kompozitlerin uzun süreli kullanımı ve çevresel koşullar altındaki dayanıklılığı incelenmelidir. Böylece malzemenin ekonomik ve teknik ömrü daha iyi değerlendirilebilir.
4. Farklı Katkı Malzemeleri ile Kombinasyonlar	Diğer nadir toprak elementleri (praseodim, neodim gibi) ve farklı metal oksitlerin ABS kompozitlere eklenmesi araştırılmalıdır. Böyle kombinasyonlar, özel uygulamalara yönelik optimize edilmiş malzemeler sağlayabilir.

Bu sonuçlar ve öneriler ışığında, CeO₂ katkılı ABS kompozitlerin çevresel ve endüstriyel kullanımına yönelik daha fazla çalışma yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

Bu tezde yapılan çalışmalar, farklı malzemelerin radyasyon zırhlama performanslarının yoğunluklarına ve bileşimlerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Çalışmamızda, ABS-Ce10 malzemesinin radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiş ve literatürde belirtilen diğer malzemelerle karşılaştırılmıştır. Literatürde yer alan TNY-W/Bi2, BNCP-5, Gd-4, GN2, BCZLM1, SiBBSZ1 ve S2 gibi malzemeler, çeşitli metal ve oksit katkılarıyla geliştirilmiş olup, gama radyasyonu karşısında farklı soğurma katsayıları sergilemektedir. Araştırmamızda incelenen ABSCe10 malzemesi, özellikle düşük ve orta enerji seviyelerinde etkin bir zırhlama performansı göstermiştir. Tablo 5.3 ve Tablo 5.4, üç temel fiziksel süreç olan

fotoelektrik etkileşim, Compton etkisi ve çift üretimi bölgelerinde, bu malzemelerin en yaygın enerji seviyelerindeki karşılaştırmalarını sunmaktadır.

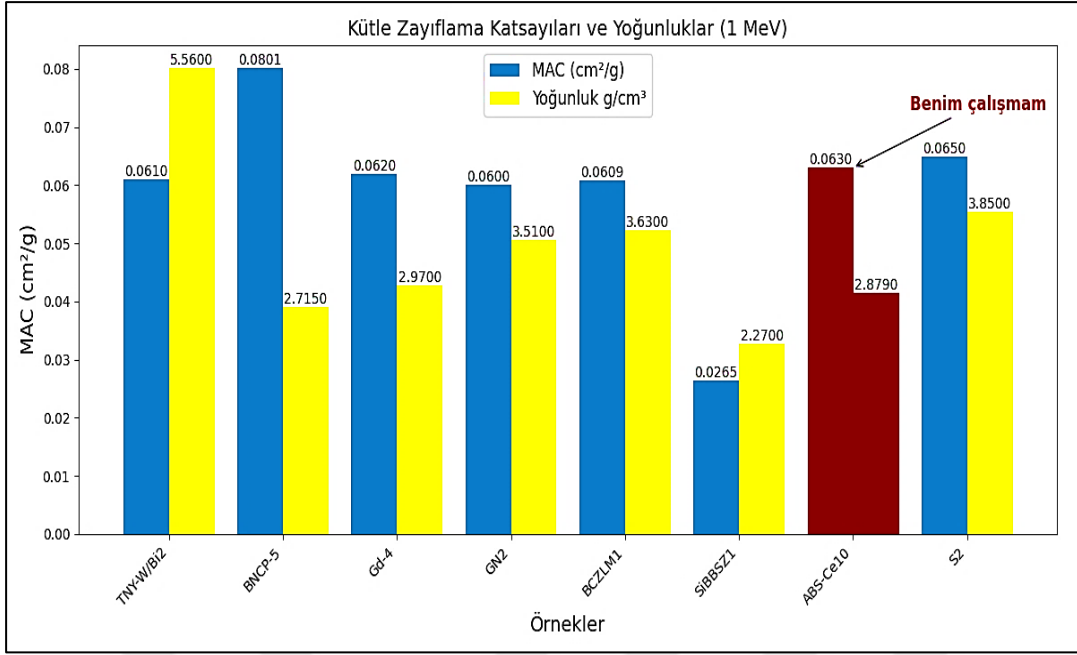
Tablo 5.3. TNY-W/Bi2, BNCP-5, Gd-4 ve GN2'nin MAC ve yoğunlukları.

Energy (MeV)	TNY-W/Bi2	BNCP-5	Gd-4	GN2
0,04	14,19	2,26	1,67	4,92
0,05	7,91	1,31	0,97	2,93
0,06	4,89	0,86	1,89	4,45
0,10	2,26	0,31	0,58	1,21
0,50	0,11	0,19	0,09	0,09
0,60	0,09	0,09	0,08	0,08
1,00	0,06	0,08	0,06	0,06
1,50	0,05	0,06	0,05	0,05
4,00	0,04	0,05	0,03	0,03
8,00	0,04	0,03	0,03	0,03
10,00	0,04	0,02	0,03	0,03
15,00	0,04	0,02	0,03	0,03
Yoğunluk (g/cm ³)	5,56	2,72	2,97	3,51

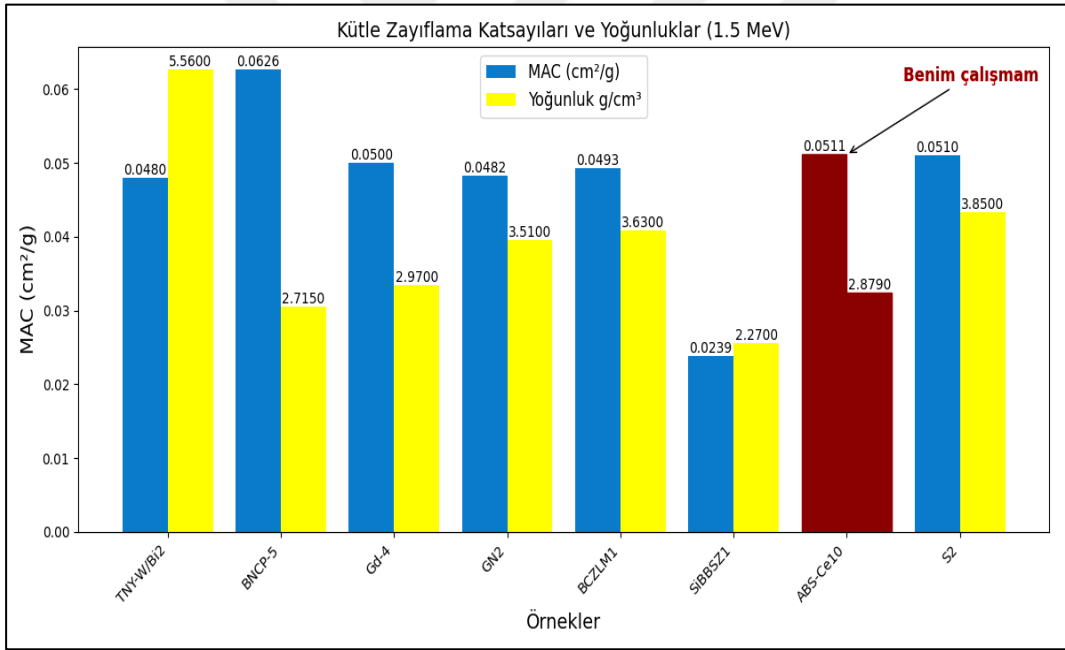
Tablo 5.4. BCZLM1, SiBBSZ1, ABS-Ce10 ve S2'nin MAC ve yoğunlukları.

Energy (MeV)	BCZLM1	SiBBSZ1	ABS-Ce10	S2
0,04	5,68	3,71	0,79	4,54
0,05	3,16	2,07	1,48	1,40
0,06	1,97	1,27	0,96	1,18
0,10	0,57	0,32	0,33	2,12
0,50	0,09	0,03	0,09	0,11
0,60	0,08	0,03	0,08	0,09
1,00	0,06	0,03	0,06	0,07
1,50	0,05	0,02	0,05	0,05
4,00	0,03	0,02	0,03	0,04
8,00	0,03	0,02	0,03	0,03
10,00	0,03	0,02	0,02	0,03
15,00	0,03	0,02	0,02	0,03
Yoğunluk (g/cm ³)	3,63	2,27	2,88	3,85

Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'teki değerler kullanılarak, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de aşağıdaki gibi bir karşılaştırma yapılabilir:



Şekil 5.1. 1 MeV’de farklı malzemelerin MAC değerleri ve yoğunlukları.



Şekil 5.2. 1,5 MeV’de farklı malzemelerin MAC değerleri ve yoğunlukları.

Şekil 5.1 ve 5.2, ABS-Ce10 numunesinin, TNY-W/Bi₂, BNCP-5, Gd-4, GN2, BCZLM1, SiBBSZ1 ve S2 gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, gama radyasyonu zırhlama malzemesi olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde, özellikle 1 MeV ve 1.5 MeV’deki kütle zayıflama katsayılarının ayrıntılı analizi, 1.17 MeV ve 1.33 MeV enerji seviyelerinde gama ışınları yayan Kobalt-60 kaynaklarını içeren ışınlama ve sterilizasyon süreçleri

için uygunluğunu vurgulamaktadır. 1 MeV’de ABS-Ce10, 0.063 cm²/g’lik bir kütle zayıflama katsayısına ulaşarak, BNCP-5, Gd-4, GN2 ve BCZLM1 gibi malzemelerden daha iyi performans göstermektedir; bu malzemeler yaklaşık 0.060 cm²/g değerlerine sahiptir. SiBBSZ1 numunesi önemli ölçüde daha yüksek bir zayıflama katsayısı (0.2645 cm²/g) gösterse de, düşük yoğunluğu (2.27 g/cm³) genel zırhlama etkinliğini sınırlamaktadır. Ek olarak, ABS-Ce10, kütle zayıflama katsayısı 0.061 cm²/g olan S2 numunesinden biraz daha iyi performans sergilemektedir. 1.5 MeV’de ABS-Ce10, 0.051 cm²/g’lik kütle zayıflama katsayısı ile rekabetçi avantajını koruyarak, BNCP-5, Gd-4, GN2 ve BCZLM1’den daha yüksek bir değer sergilemektedir. Ayrıca, kütle zayıflama katsayısı 0.048 cm²/g olan S2 numunesinden de biraz daha iyi performans göstermektedir. SiBBSZ1, en yüksek zayıflama değerini (0.2387 cm²/g) göstermeye devam etse de, yapısal kırılabilirliği ve düşük yoğunluğu, onu bir zırhlama malzemesi olarak daha az pratik hale getirmektedir. ABS-Ce10’un 2.879 g/cm³ olarak ölçülen yoğunluğu, zırhlama verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu değer, BNCP-5 (2.715 g/cm³) ve SiBBSZ1 (2.27 g/cm³) yoğunluklarından belirgin şekilde daha yüksek olup, daha küçük bir hacimle geliştirilmiş bir zırhlama performansı sağlamaktadır. Yoğunluğu S2 numunesinden (3.85 g/cm³) biraz daha düşük olsa da, ABS-Ce10 rekabetçi bir zayıflama performansı sergilemektedir. Gd-4 (2.970 g/cm³) ve GN2 (3.510 g/cm³) gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, ABS-Ce10, yoğunluk ve zayıflama katsayısı arasında iyi dengelenmiş bir kombinasyon sunarak, gama radyasyonu zırhlama uygulamaları için güçlü bir aday haline gelmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ABS-Ce10’un 1 MeV ve 1.5 MeV enerji seviyelerinde toplam kütle zayıflama katsayısının sırasıyla 0.0630 cm²/g ve 0.0511 cm²/g olduğunu ortaya koymaktadır. Bu değerler, bazı yüksek yoğunluklu malzemelerle kıyaslandığında oldukça rekabetçi olup, ABS-Ce10’un hafif ve uygun maliyetli bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Örneğin, 1 MeV’de GN2’nin zayıflama katsayısı 0.060 cm²/g, BCZLM1’in ise 0.0482 cm²/g olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, 1.5 MeV’de GN2’nin 0.048 cm²/g, BCZLM1’in ise 0.0432 cm²/g olduğu görülmektedir. ABS-Ce10’un bu değerlerde sergilediği performans, özellikle hafifliğiyle birleştiğinde, taşınabilir radyasyon kalkanları ve medikal uygulamalar için cazip bir seçenek sunmaktadır.

Sonuç olarak, ABS-Ce10’un belirli enerji aralıklarında gösterdiği yüksek zırhlama kapasitesi ve yapısal avantajları, onu geleneksel ağır metal bazlı malzemelere kıyasla

önemli bir alternatif haline getirmektedir. Bu çalışma, ABS-Ce10'un gama radyasyonu karşısındaki etkinliğini ortaya koyarak, gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için değerli bir referans sağlamaktadır.



KAYNAKLAR

- A. Al-Asadi, L. (2019). Gamma Background Radiations and Measurements with Applications. İçinde B. A. Almayah (Ed.), Use of Gamma Radiation Techniques in Peaceful Applications. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83721>
- Akar Tarım, Ü. (2014). Orta enerjili gamma ışınlarının çoklu saçılmalarının Monte Carlo benzetişimi (Doktora Tezi). T.C. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa. Danışman: Prof. Dr. Orhan Gürler.
- Al Huwayz, M., Basha, B., Alalawi, A., Alrowaili, Z. A., Sriwunkum, C., Alsaieri, N. S., & Al-Buriah, M. S. (2024). Influence of BaO addition on gamma attenuation and radiation shielding performance of SiO₂-B₂O₃-SrO-ZrO₂ glasses. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(4), 101119. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.101119>
- Alabsy, M. T., Alzahrani, J. S., Sayyed, M. I., Abbas, M. I., Tishkevich, D. I., El-Khatib, A. M., & Elsafi, M. (2021). Gamma-Ray Attenuation and Exposure Buildup Factor of Novel Polymers in Shielding Using Geant4 Simulation. *Materials*, 14(17), 5051. <https://doi.org/10.3390/ma14175051>
- Alalawi, A. (n.d.). Influence of lead and zinc oxides on the radiation shielding properties of tellurite glass systems.
- Al-Buriah, M. S., Abouhaswa, A. S., Tekin, H. O., Sriwunkum, C., El-Agawany, F. I., Nutaro, T., Kavaz, E., & Rammah, Y. S. (2020). Structure, optical, gamma-ray and neutron shielding properties of NiO doped B₂O₃-BaCO₃-Li₂O₃ glass systems. *Ceramics International*, 46(2), 1711-1721. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.144>
- Al-Buriah, M. S., Arslan, H., Tekin, H. O., Singh, V. P., & Tonguc, B. T. (2020). MoO₃-TeO₂ glass system for gamma ray shielding applications. *Materials Research Express*, 7(2), 025202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6db4>
- Al-Buriah, M. S., Echeweozo, E. O., Sriwunkum, C., Alomayrah, N., & Alzahrani, J. S. (2024). Gamma radiation shielding and interaction properties of MoO₃-Doped cadmium zinc lithium-borate glasses. *Nuclear Engineering and Technology*, 103313. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.11.015>
- Ali, E. S. M., Spencer, B., McEwen, M. R., & Rogers, D. W. O. (2015). Towards a quantitative, measurement-based estimate of the uncertainty in photon mass attenuation coefficients at radiation therapy energies. *Physics in Medicine and Biology*, 60(4), 1641-1654. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/4/1641>
- Alomari, A. H. (2024). BaO-doped Na₂O-CaO-P₂O₅ bioactive glasses: A closer look at radiation attenuation properties for medical applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 223, 112019. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112019>

- Alomari, A. H., & Al-Qahtani, S. M. (2024). Enhanced gamma shielding properties of borosilicate glasses with Gd₂O₃ addition: A theoretical study using Phy-X/PSD and XCOM programs. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(3), 100996. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100996>
- Alzahrani, F. M. A., Basha, B., Hammoud, A., Tamam, N., Alsufyani, S. J., Kebaili, I., ... Al-Buriahi, M. S. (2024). Gamma attenuation and nuclear shielding ability of TeO₂/Bi₂O₃/WO₃ glass system. *Radiation Physics and Chemistry*, 223, 111985. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111985>
- Alzahrani, J. S., Alalawi, A., Alrowaili, Z. A., Sriwunkum, C., & Al-Buriahi. (2024). Gamma attenuation and buildup factors of GeO₂-Ga₂O₃-Gd₂O₃ transparent glass ceramics for shielding applications. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(4), 101073. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.101073>
- Arpaç, N. (2023). CoCrFeNiTiAlx yüksek entropili alaşımların radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). T.C. Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı. ORCID: 0000-0001-5743-9303.
- Arun Kumar, S., Shashikumar, S. K., Ambika, M. R., Karthik Kumar, M. B., Nagaiah, N., & Khandaker, M. U. (2023). Photon attenuation computational software tools—A comparative study. *Physics Open*, 17, 100175. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2023.100175>
- Attix, F. H. (2008). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Springer.
- Aygun, M., Aygun, Z., & Ercan, E. (2023). Radiation protection efficiency of newly produced W-based alloys: Experimental and computational study. *Radiation Physics and Chemistry*, 212, 111147. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111147>
- Aygun, Z., & Aygün, M. (t.y.). A Theoretical Study on Radiation Shielding Characteristics of Magnetic Shielding Alloys, Ni₈₀Fe₁₅Mo₅ and Ni₇₇Fe₁₄Cu₅Mo₄, by Determining the Photon Attenuation Parameters in the Energy Range of 15keV-100GeV.
- Bhalerao, V. A., Lokhande, R. M., Bhosale, S. B., Khirade, P. P., Mahajan, S. V., Gaikwad, D. K., & Chavan, A. M. (2020). Radiation interaction properties of various polymers, saturated and unsaturated fatty acids: A comparative investigation of Monte carlo simulation and NISTXCOM. *Journal of Physics: Conference Series*, 1644(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1644/1/012024>
- Bootjomchai, C., Laopaiboon, J., Yenchai, C., & Laopaiboon, R. (2012). Gamma-ray shielding and structural properties of barium–bismuth–borosilicate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(7), 785-790. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.01.049>
- Buckley, M. (2002). *The Compton Effect*. MIT Department of Physics, Cambridge, MA.
- Büyükyıldız, M. (2016). Effective atomic numbers and electron densities for some lanthanide oxide compounds using direct method in the energy region of 1 keV - 20 MeV. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.17678/beujst.07046>

- Calin, M. R., Calin, M. A., Done, L., Druker, A. E., & Calin, A. C. (2011). Assessment of calibration parameters for gamma-ray spectrometry systems. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 288(2), 547-552. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0961-2>
- Cantone, M. C., & Hoeschen, C. (Ed.). (2011). *Radiation Physics for Nuclear Medicine*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11327-7>
- Çelen, Y. Y., Akkurt, I., Ceylan, Y., & Atçeken, H. (2021). Application of experiment and simulation to estimate radiation shielding capacity of various rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(15), 1471. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08000-7>
- Coskun, A., Oktay Gultekin, E., Ulger, M., & Cetin, B. (2024). Investigation of gamma radiation shielding and antimicrobial properties of PbO-doped ZnO and TiO₂ composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 222, 111882. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111882>
- Duc Tam, H., Hai Yen, N. T., Tran, L. B., Dinh Chuong, H., & Thien Thanh, T. (2017). Optimization of the Monte Carlo simulation model of NaI(Tl) detector by Geant4 code. *Applied Radiation and Isotopes*, 130, 75-79. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.09.020>
- El-Haseib, A. Y., Ahmed, Z., & Saddeek, Y. B. (2018). Determination of gamma ray spectrometry efficiency for the attenuation coefficients of some bismuth borate glasses by MCNP and (ISOCS) techniques. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2(2), 40. <https://doi.org/10.1007/s41605-018-0069-8>
- Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS of Ukraine, Yushkevich, S., Korniienko, O., Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS of Ukraine, Pavlenko, O., Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS of Ukraine, Olifan, O., Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS of Ukraine, Samelyuk, A., Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS of Ukraine, Subbota, I., & National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. (2023). Interaction Cerium Oxide with Lanthanum and Neodmium at 1500°C. *Materials Science and Surface Engineering*, 28-30. <https://doi.org/10.15407/msse2023.028>
- Gamma rays and their interactions with matter. Erişim adresi: https://radioactivity.eu.com/articles/phenomenon/gamma_matter
- Güler, Ç., & Çobanoğlu, Z. (1994). *Elektromanyetik radyasyon* (1st ed.). Ankara: Doç.Dr. Çağatay GÜLER Zakir ÇOBANOĞLU. ISBN: 975-7572-33-0.
- Gurler, O., & Akar Tarim, U. (2016). Determination of Radiation Shielding Properties of Some Polymer and Plastic Materials against Gamma-Rays. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 236-238. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.236>
- Hegazy, H. H., Al-Buriah, M. S., Alresheedi, F., Alraddadi, S., Arslan, H., & Algarni, H. (2021). The Effects of TeO₂ on Polarizability, Optical Transmission, and Photon/Neutron Attenuation Properties of Boro-Zinc-Tellurite Glasses. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(6), 2331-2338. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01933-2>

- Henderson, N., Murakami, K., Amako, K., Asai, M., Aso, T., Dotti, A., Kimura, A., Gerritsen, M., Kurashige, H., Perl, J., & Sasaki, T. (2014). A CUDA Monte Carlo simulator for radiation therapy dosimetry based on Geant4. İçinde D. Caruge, C. Calvin, C. M. Diop, F. Malvagi, & J.-C. Trama (Ed.), SNA + MC 2013—Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo (s. 04204). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/snamc/201404204>
- Huang, H., Sequoia, K., Yamaguchi, M., Boehm, K. J., Engelhorn, K., Walker, J., Elsner, F., Tomlin, J., Farrell, M., Fontes, C. J., & Colgan, J. P. (2021). Improved x-ray mass attenuation coefficient (opacity) measurements for Fe, Ni and Au. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 54(11), 115003. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/abf01c>
- Humaid, M., Asad, J., Aboalatta, A., Shaat, S. K. K., Musleh, H., Ramadan, Kh., Alajerami, Y., & Aldahoudi, N. (2023). Gamma and neutron shielding properties of lead-borosilicate shielded glass; novel technique of solid waste recycling. *Construction and Building Materials*, 375, 130896. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130896>
- Hurtado, S., García-León, M., & García-Tenorio, R. (2004). GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 518(3), 764-774. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.09.057>
- Huse, S. D., Obaid, S. S., Joshi, A. A., Gaikwad, D. K., Pawar, P. P., & Shitre, A. R. (2020). Study on the radiation shielding features of some chemical compounds. *Journal of Physics: Conference Series*, 1644(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1644/1/012061>
- Khan, F. M. (2003). *The physics of radiation therapy* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins. ISBN: 978-0-7817-3065-5
- Khattari, Z. Y., & Al-Buriahi, M. S. (2022). Monte Carlo simulations and Phy-X/PSD study of radiation shielding effectiveness and elastic properties of barium zinc aluminoborosilicate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 195, 110091. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110091>
- Kurt, E. (2022). Sentezlenerek optimize edilen bazı lantanyum hegzaborür ve seryum hegzaborür bileşiklerinin gama zırhlama özelliklerinin Monte Carlo yöntemi ile incelenmesi ve deneysel analizi (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Lozano, A. I., Álvarez, L., García-Abenza, A., Guerra, C., Kossoski, F., Rosado, J., Blanco, F., Oller, J. C., Hasan, M., Centurion, M., Weber, T., Slaughter, D. S., Mootheril, D. M., Dorn, A., Kumar, S., Limão-Vieira, P., Colmenares, R., & García, G. (2023). Electron Scattering from 1-Methyl-5-Nitroimidazole: Cross-Sections for Modeling Electron Transport through Potential Radiosensitizers. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 12182. <https://doi.org/10.3390/ijms241512182>

- Manjunatha, H. C., Sathish, K. V., Seenappa, L., Gupta, D., & Cecil Raj, S. A. (2019). A study of X-ray, gamma and neutron shielding parameters in Si- alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108414. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108414>
- Martin, J. E. (2008a). *Physics for radiation protection: A handbook* (2. ed., completely rev. and enlarged, 1. repr). Wiley-VCH.
- Martin, J. E. (2008b). *Physics for radiation protection: A handbook* (2. ed., completely rev. and enlarged, 1. repr). Wiley-VCH.
- Medikal Fizikçi. (2012, September 10). Lisans tezden notlar: 10. çift oluşumu. <http://www.medikalfizikci.com/2012/09/lisans-tezimden-notlar-10-cift-olusumu.html>
- Nelson, G. (2019). Gamma-ray interactions with matter. Presented at the State IJAS Science Fair, Southern Illinois University, Carbondale, IL. Project title: Shielding nuclear waste: Lead and concrete.
- Obaid, S. S., Sayyed, M. I., Gaikwad, D. K., & Pawar, Pravina. P. (2018). Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 148, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.02.026>
- Pedrielli, A., de Vera, P., Trevisanutto, P. E., Pugno, N. M., Garcia-Molina, R., Abril, I., Taioli, S., & Dapor, M. (2021). Electronic excitation spectra of cerium oxides: From ab initio dielectric response functions to Monte Carlo charge transport simulations. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(35), 19173-19187. <https://doi.org/10.1039/D1CP01810H>
- Podgorsak, E. B. (2008). *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students* (Technical editor). Wiley-VCH. ISBN: 978-3-527-40611-1.
- Qiao, C.-K., Wei, J.-W., & Chen, L. (2021). An Overview of the Compton Scattering Calculation. *Crystals*, 11(5), 525. <https://doi.org/10.3390/cryst11050525>
- Radiology Key. (n.d.). Interactions of ionizing radiation. <https://radiologykey.com/interactions-of-ionizing-radiation-2/>
- Radiology Key. Interaction of radiation with matter. <https://radiologykey.com/interaction-of-radiation-with-matter-3/>
- Ramjeyanthi, N., Alagar, M., & Muthuraman, D. (2018). Synthesis, Structural and Optical Characterization of Uncalcined Lanthanum Oxide Nanoparticles by Co-Precipitation Method. 6(3).
- Rammah, Y. S., Mahmoud, K. A., Mohammed, F. Q., Sayyed, M. I., Tashlykov, O. L., & El-Mallawany, R. (2021). Gamma ray exposure buildup factor and shielding features for some binary alloys using MCNP-5 simulation code. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(8), 2661-2668. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.021>
- ResearchGate . The regions of dominant interaction cross sections for the photoelectric effect, Compton effect, and pair production . https://www.researchgate.net/figure/The-regions-of-dominant-interaction-cross-sections-for-the-photoelectric-effect-Compton_fig3_362729078

- Saleh, A., Shalaby, R. M., & Abdelhakim, N. A. (2022). Comprehensive study on structure, mechanical and nuclear shielding properties of lead free Sn–Zn–Bi alloys as a powerful radiation and neutron shielding material. *Radiation Physics and Chemistry*, 195, 110065. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110065>
- Sayyed, M. I., Olarinoye, O. I., & Elsafi, M. (2021). Assessment of gamma-radiation attenuation characteristics of Bi₂O₃–B₂O₃–SiO₂–Na₂O glasses using Geant4 simulation code. *The European Physical Journal Plus*, 136(5), 535. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01492-y>
- SlidePlayer. Slide 1. <https://slideplayer.biz.tr/slide/1>
- Stack Exchange. (2022, October 4). Understanding the decay of Na-22. Physics Stack Exchange. <https://physics.stackexchange.com/questions/796529/understanding-the-decay-of-na-22>
- Stalin, S., Gaikwad, D. K., Al-Buriahi, M. S., Srinivasu, C., Ahmed, S. A., Tekin, H. O., & Rahman, S. (2021). Influence of Bi₂O₃/WO₃ substitution on the optical, mechanical, chemical durability and gamma ray shielding properties of lithium-borate glasses. *Ceramics International*, 47(4), 5286-5299. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.109>
- Sukara, S., & Rimjeam, S. (2017). Simulation of Gamma Rays Attenuation Through Matters Using the Monte Carlo Program. *Journal of Physics: Conference Series*, 901, 012141. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/901/1/012141>
- Vangelista, S., Piagge, R., Ek, S., Sarnet, T., Ghidini, G., Martella, C., & Lamperti, A. (2017). Structural, chemical and optical properties of cerium dioxide film prepared by atomic layer deposition on TiN and Si substrates. *Thin Solid Films*, 636, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.05.034>
- Vedantu. Modern physics revision notes. <https://www.vedantu.com/jee-advanced/physics-modern-physics-revision-notes>
- Wagenaar, D. J., Chowdhury, S., Engdahl, J. C., & Burckhardt, D. D. (2003). Planar image quality comparison between a CdZnTe prototype and a standard NaI(Tl) gamma camera. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 505(1-2), 586-589. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01153-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01153-7)
- Wikimedia Commons. (n.d.). Cobalt-60 decay scheme [Diagram]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cobalt-60_Decay_Scheme.svg
- Wikimedia Commons. (n.d.). Cs-137 decay [Diagram]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cs-137-decay.svg>
- XRD XRF. İş sağlığı ve güvenliği. <https://xrdxrf.wixsite.com/website/is-sagligi-ve-guevenligi>
- Xu, C., & Qu, X. (2014). Cerium oxide nanoparticle: A remarkably versatile rare earth nanomaterial for biological applications. *NPG Asia Materials*, 6(3), e90-e90. <https://doi.org/10.1038/am.2013.88>

EKLER



EK 1. ABS-Ce0 numunesi için parametrelerin hesaplanması

07

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,02	6,34	6,43	0,11	0,11	0,36	0,36	0,16	0,16	8,08	8,18	60,59	61,62	4,29	4,29	13,33	13,28
0,03	2,10	2,11	0,33	0,33	1,10	1,09	0,48	0,47	2,67	2,70	21,06	21,26	4,09	4,08	12,70	12,68
0,04	1,09	1,09	0,64	0,64	2,12	2,12	0,92	0,92	1,39	1,39	11,75	11,77	3,79	3,79	11,85	11,85
0,05	0,73	0,73	0,95	0,95	3,15	3,16	1,37	1,37	0,94	0,94	8,48	8,45	3,54	3,54	11,11	11,12
0,06	0,57	0,57	1,21	1,21	4,02	4,03	1,75	1,75	0,74	0,74	7,00	6,98	3,36	3,36	10,59	10,59
0,08	0,44	0,44	1,57	1,57	5,22	5,22	2,27	2,27	0,57	0,57	5,73	5,73	3,16	3,16	10,02	10,03
0,1	0,39	0,39	1,79	1,79	5,96	5,94	2,59	2,58	0,50	0,51	5,15	5,17	3,08	3,08	9,78	9,79
0,2	0,29	0,30	2,35	2,33	7,81	7,75	3,39	3,36	0,39	0,39	4,04	4,08	2,99	2,99	9,54	9,54
0,3	0,26	0,26	2,71	2,70	9,00	8,97	3,91	3,89	0,34	0,34	3,52	3,53	2,98	2,98	9,52	9,52
0,4	0,23	0,23	3,01	3,01	10,00	10,01	4,34	4,35	0,30	0,30	3,17	3,17	2,98	2,98	9,51	9,51
0,511	0,21	0,21	3,32	3,33	11,02	11,07	4,79	4,81	0,27	0,27	2,88	2,87	2,98	2,98	9,51	9,51
0,663	0,19	0,19	3,70	3,73	12,31	12,39	5,34	5,38	0,25	0,24	2,58	2,56	2,98	2,98	9,51	9,51



EK 1. (Devamı) ABS-Ce0 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,8	0,17	0,17	4,03	4,06	13,40	13,49	5,82	5,86	0,23	0,22	2,37	2,35	2,98	2,98	9,51	9,51
1	0,15	0,15	4,49	4,52	14,91	15,00	6,48	6,52	0,20	0,20	2,13	2,11	2,98	2,98	9,51	9,51
1,172	0,14	0,14	4,86	4,89	16,15	16,24	7,01	7,05	0,19	0,19	1,96	1,95	2,98	2,98	9,51	9,51
1,331	0,13	0,13	5,19	5,21	17,24	17,32	7,49	7,52	0,17	0,17	1,84	1,83	2,98	2,98	9,51	9,51
1,5	0,13	0,13	5,53	5,54	18,36	18,41	7,97	8,00	0,16	0,16	1,73	1,72	2,98	2,98	9,51	9,51
2	0,11	0,11	6,44	6,43	21,38	21,36	9,29	9,27	0,14	0,14	1,48	1,48	2,98	2,98	9,52	9,52
3	0,09	0,09	7,94	7,90	26,38	26,26	11,46	11,40	0,11	0,11	1,20	1,20	3,00	3,00	9,56	9,56
4	0,08	0,08	9,13	9,08	30,33	30,16	13,17	13,10	0,10	0,10	1,04	1,04	3,01	3,01	9,60	9,59
5	0,07	0,07	10,09	10,03	33,50	33,32	14,55	14,47	0,09	0,09	0,93	0,94	3,02	3,02	9,64	9,64
6	0,06	0,06	10,86	10,80	36,07	35,87	15,66	15,58	0,08	0,08	0,86	0,87	3,04	3,04	9,68	9,68
8	0,06	0,06	12,00	11,95	39,87	39,68	17,32	17,23	0,08	0,08	0,77	0,78	3,06	3,06	9,75	9,75
10	0,05	0,05	12,77	12,73	42,43	42,27	18,43	18,36	0,07	0,07	0,72	0,73	3,08	3,08	9,82	9,82
15	0,05	0,05	13,80	13,77	45,84	45,75	19,91	19,87	0,07	0,07	0,66	0,66	3,12	3,13	9,95	9,95

EK 2. ABS-Ce2.5 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,02	8,10	8,22	0,09	0,08	0,28	0,28	0,12	0,12	13,62	13,72	69,33	70,35	4,59	4,59	19,64	19,50
0,03	2,68	2,70	0,26	0,26	0,86	0,85	0,37	0,37	4,49	4,51	23,93	24,13	4,39	4,39	18,77	18,69
0,04	1,36	1,36	0,51	0,51	1,70	1,70	0,74	0,74	2,21	2,21	13,04	13,05	4,09	4,08	16,94	16,94
0,05	1,52	1,51	0,46	0,46	1,52	1,52	0,66	0,66	3,54	3,59	12,89	12,94	4,62	4,59	27,50	27,72
0,06	1,06	1,06	0,65	0,65	2,17	2,17	0,94	0,94	2,38	2,38	9,77	9,75	4,26	4,27	24,33	24,37
0,08	0,67	0,67	1,03	1,03	3,44	3,43	1,49	1,49	1,33	1,33	6,98	6,99	3,77	3,77	18,98	19,00
0,1	0,52	0,52	1,34	1,34	4,46	4,45	1,94	1,93	0,92	0,92	5,84	5,85	3,47	3,47	15,78	15,69
0,2	0,32	0,33	2,15	2,13	7,13	7,07	3,10	3,07	0,46	0,46	4,14	4,17	3,06	3,06	11,00	10,98
0,3	0,27	0,27	2,55	2,54	8,47	8,44	3,68	3,67	0,37	0,37	3,55	3,57	3,00	3,00	10,28	10,27
0,4	0,24	0,24	2,86	2,86	9,51	9,52	4,13	4,13	0,32	0,32	3,18	3,18	2,99	2,99	10,07	10,07
0,511	0,22	0,22	3,17	3,18	10,51	10,56	4,57	4,59	0,29	0,29	2,89	2,87	2,98	2,98	9,98	9,98
0,663	0,20	0,19	3,54	3,57	11,77	11,85	5,11	5,15	0,26	0,25	2,58	2,56	2,98	2,98	9,93	9,93

EK 2. (Devamı) ABS-Ce2.5 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,8	0,18	0,18	3,86	3,89	12,83	12,92	5,57	5,61	0,23	0,23	2,37	2,35	2,97	2,97	9,91	9,90
1	0,16	0,16	4,30	4,33	14,28	14,38	6,20	6,24	0,21	0,21	2,13	2,12	2,97	2,97	9,89	9,89
1,172	0,15	0,15	4,66	4,68	15,47	15,56	6,72	6,76	0,19	0,19	1,96	1,95	2,97	2,97	9,88	9,88
1,331	0,14	0,14	4,97	5,00	16,53	16,60	7,18	7,21	0,18	0,18	1,84	1,83	2,97	2,97	9,88	9,88
1,5	0,13	0,13	5,30	5,31	17,59	17,65	7,64	7,67	0,17	0,17	1,73	1,72	2,97	2,97	9,88	9,88
2	0,11	0,11	6,16	6,16	20,47	20,45	8,89	8,88	0,15	0,15	1,48	1,48	2,98	2,98	9,91	9,91
3	0,09	0,09	7,59	7,55	25,20	25,09	10,95	10,90	0,12	0,12	1,20	1,20	2,99	2,99	9,99	9,99
4	0,08	0,08	8,70	8,65	28,91	28,75	12,55	12,48	0,10	0,11	1,04	1,04	3,01	3,01	10,09	10,09
5	0,07	0,07	9,59	9,54	31,85	31,68	13,83	13,76	0,10	0,10	0,94	0,94	3,03	3,03	10,19	10,19
6	0,07	0,07	10,30	10,24	34,20	34,02	14,85	14,78	0,09	0,09	0,87	0,87	3,05	3,05	10,29	10,29
8	0,06	0,06	11,33	11,28	37,63	37,47	16,34	16,27	0,08	0,08	0,78	0,78	3,08	3,08	10,48	10,47
10	0,06	0,06	12,01	11,96	39,89	39,74	17,33	17,26	0,08	0,08	0,73	0,73	3,11	3,11	10,64	10,64
15	0,05	0,05	12,88	12,85	42,79	42,68	18,58	18,54	0,07	0,07	0,67	0,67	3,16	3,16	10,95	10,96

EK 3. ABS-Ce5 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,02	9,96	10,12	0,07	0,07	0,23	0,23	0,10	0,10	19,16	19,26	86,80	87,80	4,81	4,83	24,54	24,36
0,03	3,29	3,32	0,21	0,21	0,70	0,69	0,30	0,30	6,31	6,32	29,69	29,87	4,63	4,64	23,53	23,41
0,04	1,64	1,64	0,42	0,42	1,40	1,41	0,61	0,61	3,02	3,03	15,61	15,63	4,33	4,31	21,11	21,11
0,05	2,36	2,36	0,29	0,29	0,97	0,98	0,42	0,42	6,15	6,24	21,71	21,92	5,15	5,10	35,53	35,76
0,06	1,58	1,58	0,44	0,44	1,45	1,45	0,63	0,63	4,01	4,01	15,30	15,28	4,76	4,78	32,02	32,05
0,08	0,91	0,92	0,76	0,76	2,52	2,51	1,09	1,09	2,08	2,08	9,50	9,50	4,19	4,19	25,20	25,23
0,1	0,65	0,66	1,06	1,06	3,52	3,52	1,53	1,53	1,34	1,33	7,21	7,20	3,78	3,79	20,51	20,36
0,2	0,35	0,35	1,97	1,96	6,54	6,50	2,84	2,82	0,52	0,53	4,33	4,36	3,13	3,13	12,39	12,36
0,3	0,29	0,29	2,41	2,41	8,01	7,99	3,48	3,47	0,40	0,40	3,61	3,63	3,02	3,02	11,03	11,02
0,4	0,25	0,25	2,73	2,74	9,08	9,09	3,94	3,95	0,34	0,34	3,21	3,21	2,99	2,99	10,62	10,62
0,511	0,23	0,23	3,03	3,05	10,08	10,12	4,38	4,40	0,30	0,30	2,90	2,89	2,98	2,98	10,44	10,44
0,663	0,20	0,20	3,40	3,43	11,31	11,39	4,91	4,94	0,27	0,27	2,59	2,57	2,97	2,97	10,34	10,34



EK 3. (Devamı) ABS-Ce5 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,8	0,19	0,19	3,71	3,74	12,34	12,42	5,36	5,40	0,24	0,24	2,38	2,36	2,97	2,97	10,30	10,30
1	0,17	0,17	4,14	4,17	13,75	13,84	5,97	6,01	0,22	0,22	2,13	2,12	2,97	2,97	10,27	10,26
1,172	0,15	0,15	4,48	4,51	14,90	14,98	6,47	6,51	0,20	0,20	1,97	1,96	2,97	2,96	10,25	10,25
1,331	0,14	0,14	4,79	4,81	15,91	15,98	6,91	6,94	0,19	0,19	1,84	1,83	2,96	2,96	10,25	10,25
1,5	0,14	0,14	5,10	5,12	16,94	16,99	7,36	7,38	0,18	0,18	1,73	1,73	2,97	2,96	10,26	10,25
2	0,12	0,12	5,93	5,92	19,70	19,68	8,55	8,55	0,15	0,15	1,49	1,49	2,97	2,97	10,30	10,29
3	0,10	0,10	7,28	7,25	24,19	24,09	10,51	10,46	0,13	0,13	1,20	1,21	2,99	2,99	10,43	10,42
4	0,08	0,08	8,33	8,29	27,68	27,53	12,02	11,96	0,11	0,11	1,05	1,05	3,01	3,01	10,59	10,58
5	0,08	0,08	9,16	9,11	30,41	30,25	13,21	13,14	0,10	0,10	0,95	0,95	3,03	3,03	10,75	10,74
6	0,07	0,07	9,81	9,76	32,58	32,42	14,15	14,08	0,10	0,10	0,88	0,88	3,06	3,05	10,91	10,90
8	0,06	0,06	10,74	10,70	35,68	35,54	15,50	15,43	0,09	0,09	0,79	0,80	3,10	3,10	11,20	11,19
10	0,06	0,06	11,34	11,30	37,69	37,55	16,37	16,31	0,08	0,08	0,74	0,75	3,13	3,13	11,45	11,44
15	0,06	0,06	12,08	12,05	40,13	40,03	17,43	17,38	0,08	0,08	0,69	0,69	3,20	3,20	11,93	11,94

EK 4. ABS-Ce7.5 numunesi için parametrelerin hesaplanması

76

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} \text{ (e/g)}$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,02	12,27	12,11	0,06	0,06	0,19	0,19	0,08	0,08	24,70	24,80	86,80	87,80	5,14	5,02	28,46	28,25
0,03	3,93	3,97	0,18	0,17	0,59	0,58	0,25	0,25	8,12	8,13	29,69	29,87	4,82	4,84	27,37	27,23
0,04	1,94	1,93	0,36	0,36	1,19	1,19	0,51	0,52	3,84	3,84	15,61	15,63	4,53	4,50	24,60	24,60
0,05	3,26	3,26	0,21	0,21	0,71	0,71	0,31	0,31	8,75	8,88	21,71	21,92	5,46	5,40	40,30	40,52
0,06	2,14	2,14	0,32	0,32	1,08	1,08	0,47	0,47	5,65	5,65	15,30	15,28	5,09	5,10	36,92	36,96
0,08	1,17	1,18	0,59	0,59	1,96	1,96	0,85	0,85	2,83	2,83	9,50	9,50	4,50	4,51	29,78	29,81
0,1	0,80	0,80	0,87	0,87	2,88	2,88	1,25	1,25	1,76	1,74	7,21	7,20	4,03	4,04	24,35	24,16
0,2	0,38	0,38	1,82	1,81	6,04	6,00	2,62	2,61	0,59	0,60	4,33	4,36	3,20	3,20	13,72	13,68
0,3	0,30	0,30	2,29	2,28	7,61	7,59	3,30	3,30	0,43	0,43	3,61	3,63	3,05	3,04	11,76	11,74
0,4	0,26	0,26	2,62	2,62	8,70	8,71	3,78	3,78	0,36	0,36	3,21	3,21	3,00	3,00	11,17	11,16
0,511	0,24	0,24	2,92	2,93	9,70	9,74	4,21	4,23	0,32	0,31	2,90	2,89	2,98	2,98	10,91	10,90
0,663	0,21	0,21	3,28	3,31	10,90	10,98	4,74	4,77	0,28	0,28	2,59	2,57	2,97	2,97	10,76	10,75

EK 4. (Devamı) ABS-Ce7.5 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,8	0,19	0,19	3,58	3,61	11,91	11,99	5,17	5,21	0,25	0,25	2,38	2,36	2,96	2,96	10,69	10,69
1	0,17	0,17	4,00	4,02	13,28	13,37	5,77	5,81	0,23	0,23	2,13	2,12	2,96	2,96	10,65	10,64
1,172	0,16	0,16	4,33	4,36	14,40	14,48	6,25	6,29	0,21	0,21	1,97	1,96	2,96	2,96	10,63	10,62
1,331	0,15	0,15	4,63	4,65	15,38	15,45	6,68	6,71	0,20	0,19	1,84	1,83	2,96	2,96	10,62	10,61
1,5	0,14	0,14	4,93	4,94	16,37	16,42	7,11	7,13	0,18	0,18	1,73	1,73	2,96	2,96	10,63	10,62
2	0,12	0,12	5,73	5,72	19,02	19,01	8,26	8,26	0,16	0,16	1,49	1,49	2,96	2,96	10,68	10,67
3	0,10	0,10	7,02	6,99	23,31	23,22	10,12	10,08	0,13	0,13	1,20	1,21	2,99	2,99	10,86	10,86
4	0,09	0,09	8,01	7,96	26,60	26,46	11,55	11,49	0,12	0,12	1,05	1,05	3,01	3,01	11,08	11,07
5	0,08	0,08	8,78	8,73	29,15	29,00	12,66	12,60	0,11	0,11	0,95	0,95	3,04	3,04	11,30	11,29
6	0,07	0,07	9,38	9,33	31,15	31,00	13,53	13,46	0,10	0,10	0,88	0,88	3,07	3,07	11,51	11,50
8	0,07	0,07	10,23	10,19	33,97	33,84	14,75	14,70	0,09	0,09	0,79	0,80	3,11	3,11	11,90	11,89
10	0,06	0,06	10,76	10,72	35,75	35,61	15,52	15,47	0,09	0,09	0,74	0,75	3,16	3,16	12,24	12,23
15	0,06	0,06	11,38	11,35	37,81	37,70	16,42	16,37	0,09	0,09	0,69	0,69	3,23	3,24	12,88	12,90

EK 5. ABS-Ce10 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,02	14,06	14,35	0,05	0,05	0,16	0,16	0,07	0,07	30,24	30,34	95,54	96,52	5,12	5,17	31,65	31,43
0,03	4,65	4,70	0,15	0,15	0,49	0,49	0,21	0,21	9,94	9,95	32,56	32,74	4,97	5,00	30,53	30,38
0,04	2,28	2,27	0,30	0,31	1,01	1,02	0,44	0,44	4,65	4,66	16,89	16,91	4,70	4,67	27,56	27,56
0,05	4,26	4,25	0,16	0,16	0,54	0,54	0,23	0,24	11,35	11,53	26,13	26,42	5,67	5,61	43,45	43,65
0,06	2,75	2,76	0,25	0,25	0,84	0,83	0,36	0,36	7,28	7,28	18,06	18,04	5,31	5,33	40,33	40,36
0,08	1,46	1,47	0,47	0,47	1,57	1,57	0,68	0,68	3,58	3,59	10,75	10,76	4,74	4,74	33,29	33,31
0,1	0,96	0,96	0,72	0,72	2,40	2,39	1,04	1,04	2,17	2,15	7,90	7,88	4,23	4,26	27,51	27,31
0,2	0,41	0,42	1,67	1,66	5,55	5,52	2,41	2,40	0,66	0,67	4,43	4,46	3,26	3,26	14,99	14,94
0,3	0,32	0,32	2,16	2,15	7,17	7,16	3,12	3,11	0,46	0,46	3,65	3,66	3,07	3,06	12,48	12,46
0,4	0,28	0,28	2,49	2,49	8,27	8,28	3,59	3,60	0,38	0,38	3,23	3,22	3,00	3,00	11,71	11,70
0,511	0,25	0,25	2,79	2,80	9,26	9,30	4,02	4,04	0,33	0,33	2,91	2,90	2,98	2,98	11,37	11,36
0,663	0,22	0,22	3,14	3,16	10,44	10,51	4,53	4,56	0,29	0,29	2,59	2,58	2,96	2,96	11,17	11,17

EK 5. (Devamı) ABS-Ce10 numunesi için parametrelerin hesaplanması

E	LAC (cm ⁻¹)		HVL (cm)		TVL (cm)		MFP (cm)		$\sigma_a \times 10^{-24}(\text{cm}^2/\text{g})$		$\sigma_e \times 10^{-25}(\text{cm}^2/\text{g})$		$N_{\text{eff}} \times 10^{+23} (\text{e/g})$		Z_{eff}	
MeV	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM	G-4	XCOM
0,8	0,20	0,20	3,43	3,46	11,41	11,49	4,95	4,99	0,26	0,26	2,38	2,36	2,96	2,95	11,09	11,08
1	0,18	0,18	3,83	3,86	12,73	12,82	5,53	5,57	0,24	0,23	2,13	2,12	2,95	2,95	11,02	11,02
1,172	0,17	0,17	4,16	4,18	13,81	13,89	6,00	6,03	0,22	0,22	1,97	1,96	2,95	2,95	11,00	10,99
1,331	0,16	0,16	4,44	4,46	14,75	14,82	6,41	6,44	0,20	0,20	1,84	1,84	2,95	2,95	10,99	10,98
1,5	0,15	0,15	4,73	4,74	15,70	15,75	6,82	6,84	0,19	0,19	1,73	1,73	2,95	2,95	10,99	10,99
2	0,13	0,13	5,49	5,49	18,23	18,23	7,92	7,92	0,16	0,16	1,49	1,49	2,96	2,96	11,07	11,05
3	0,10	0,10	6,71	6,68	22,30	22,20	9,68	9,64	0,14	0,14	1,21	1,21	2,98	2,98	11,30	11,29
4	0,09	0,09	7,64	7,60	25,38	25,24	11,02	10,96	0,12	0,12	1,05	1,05	3,01	3,01	11,57	11,56
5	0,08	0,08	8,35	8,31	27,74	27,60	12,05	11,99	0,11	0,11	0,95	0,95	3,04	3,04	11,84	11,83
6	0,08	0,08	8,90	8,86	29,57	29,43	12,84	12,78	0,11	0,11	0,88	0,89	3,08	3,07	12,11	12,10
8	0,07	0,07	9,66	9,63	32,11	31,98	13,94	13,89	0,10	0,10	0,80	0,80	3,13	3,13	12,60	12,58
10	0,07	0,07	10,13	10,10	33,66	33,55	14,62	14,57	0,10	0,10	0,75	0,75	3,18	3,18	13,02	13,01
15	0,07	0,07	10,65	10,61	35,37	35,26	15,36	15,31	0,10	0,10	0,69	0,69	3,27	3,27	13,81	13,84



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bashar ALABAYOUSH

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2022, İdlib Üniversitesi, Fizik
- Yükseklisans** : 2025 ,Sakarya Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2024 yılında Bingöl 3. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Konferansı'na katılarak sunum ve makale gönderimi gerçekleştirdi.
- 2024 yılında 8. Uluslararası Öğrenci Bilimleri Kongresi'nde, Fen ve Mühendislik Bölümü'nde En İyi Makale Ödülü'nü kazandı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Albayoush, B., Al-Buraihi, M. S. (2024, 22-24, November). Gamma Radiation Shielding Properties of Lanthanide and Alkaline Earth-Containing Borosilicate Glasses. Bingol 3rd International Conference on Applied Sciences, Bingol, Turkey.