

Alüminyum Bazlı Alaşımlarda Radyasyon Zayıflama Parametrelerinin Phy-X/PSD ile İncelenmesi

Reyhan ÖZAYDIN ÖZKARA^{1*} 

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 07070, Antalya, Türkiye

(Alınış / Received: 28.10.2025, Kabul / Accepted: 03.12.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.12.2025)

Anahtar Kelimeler

Alaşımlar,
Radyasyon zırhlama,
Phy-X/PSD,
Radyasyon zayıflama
parametreleri

Öz: Bu çalışmada, farklı ağırlık oranlarına ve $2,66-2,76 \text{ g cm}^{-3}$ yoğunluk aralığına sahip yüksek alüminyum içerikli ETİAL serisi alaşımların gama fotonlarıyla etkileşimleri, $10^{-3}-10^5 \text{ MeV}$ enerji aralığı boyunca ve seçili foton enerjilerinde (0.059, 0.081, 0.356, 0.662, 1.173 ve 1.332 MeV) Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Kütle ve doğrusal zayıflama katsayıları (MAC, LAC), yarı ve ondalık değer kalınlıkları (HVL, TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) hesaplanmıştır.

Düşük enerji aralığında fotoelektrik etkinin baskın hale gelmesi, MAC, LAC ve Z_{eff} değerlerinin artmasına; buna karşın HVL, TVL ve MFP değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Orta enerjilerde Compton saçılması hâkim olup, MAC ve LAC azalmış, HVL, TVL ve MFP artmıştır. Yüksek enerjilerde Compton ve çift oluşum süreçleri belirginleşmiş ve parametreler sabitlenmiştir. Seçili enerjilerde yapılan değerlendirmeler, düşük enerjilerde S5 alaşımının (0,059 MeV'de $\text{MAC} = 0,3489 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, $\text{LAC} = 93,1595 \text{ cm}^{-1}$) en yüksek zırhlama performansına sahip olduğunu, orta ve yüksek enerjilerde ise S2 alaşımının daha dengeli soğurma kapasitesi sunduğunu göstermektedir. Alaşımların bileşimi ve yoğunluğu, gama ışını zayıflatma performansında belirleyici rol oynamaktadır. Bu çalışma, söz konusu alaşımların zayıflatma parametrelerini literatürde sistematik olarak ortaya koyan ilk araştırmadır.

Investigation of Radiation Attenuation Parameters in Aluminum-Based Alloys by Means of Phy-X/PSD

Keywords

Alloys,
Radiation shielding,
Phy-X/PSD,
Radiation attenuation
parameters

Abstract: In this study, the interactions of high-aluminum ETIAL series alloys, which possess different weight ratios and a density range of $2.66-2.76 \text{ g cm}^{-3}$, with gamma photons were examined using the Phy-X/PSD software over the $10^{-3}-10^5 \text{ MeV}$ energy range as well as at selected photon energies (0.059, 0.081, 0.356, 0.662, 1.173, and 1.332 MeV). The mass and linear attenuation coefficients (MAC, LAC), half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), mean free path (MFP), and effective atomic number (Z_{eff}) were calculated.

At lower photon energies, the dominance of the photoelectric effect led to an increase in MAC, LAC, and Z_{eff} values, while HVL, TVL, and MFP values decreased accordingly. In the intermediate energy region, Compton scattering became the predominant interaction, resulting in decreased MAC and LAC values and increased HVL, TVL, and MFP. At higher photon energies, both Compton scattering and pair production processes became significant, leading to the stabilization of these parameters. Evaluations at selected energies indicate that at low energies, the S5 alloy (0.059 MeV, $\text{MAC} = 0.3489 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, $\text{LAC} = 93.1595 \text{ cm}^{-1}$) exhibits the highest shielding performance, whereas at medium and high energies, the S2 alloy demonstrates a more balanced absorption capability. The alloy composition and density were found to play a crucial role in determining the gamma-ray attenuation performance. This work represents the first systematic investigation in the literature to comprehensively present the attenuation parameters of these alloys.

*Sorumlu yazar: reyhanozaydin@akdeniz.edu.tr

1. Giriş

Radyasyon ve radyoaktif maddelerin kullanımı; tıp, tarım, endüstri ve araştırma alanlarına sağladığı önemli katkılar nedeniyle giderek artış göstermektedir [1]. Bu kapsamda iyonlaştırıcı radyasyon türlerinden X ve gama ışınları, özellikle sanayi, enerji sektörü ve tıbbi uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır [2]. Ancak bu geniş kullanım alanları, beraberinde insanların X-ışınları ve gama ışınları gibi tehlikeli iyonlaştırıcı radyasyona daha sık ve sürekli olarak maruz kalmasına yol açmaktadır [3]. Söz konusu X-ışınları ve gama ışınları; atom çekirdeği veya elektronların uyarılmış enerji düzeylerinden daha düşük enerji düzeylerine geçişi sırasında yayılan, yüksek frekansları, kısa dalga boyları ve güçlü penetrasyon yetenekleri ile karakterize edilen iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyon türleridir. Bu radyasyonların madde ile etkileşimi, ortamın biyolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişimlere yol açarak ciddi sağlık sorunlarına ve hatta ölüme neden olabilecek etkiler ortaya çıkarabilir [4].

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma düzeyi ya da emilen doz; kaynaktan uzaklık, maruz kalma süresi ve kullanılan radyasyon zırhı olmak üzere üç temel faktöre bağlıdır. Radyoaktif kaynaklarla çalışırken maruziyeti en aza indirmenin en etkili yolu ise, iyonlaştırıcı radyasyona karşı koruma sağlayan fiziksel bariyerlerin kullanılmasıdır [5].

Araştırmacılar, gama ve X ışınlarının zırhlama malzemeleri tarafından ne ölçüde zayıflatıldığını tespit etmek için çeşitli göstergeler kullanır. Bir malzemenin radyasyon zayıflatma kapasitesi, etkileşim olasılığını belirleyen toplam MAC üzerinden hesaplanmaktadır [6]. Bunun yanı sıra LAC, HVL ve Z_{eff} gibi parametreler de malzemelerin zırhlama performansını ortaya koymada önemli kriterlerdir [7]. Son yıllarda zırhlama malzemelerinin etkinliğini değerlendirmek ve farklı parametrelerin etkilerini incelemek için, deneysel uygulamaların yanında teorik ve simülasyon tabanlı yazılımlar sıklıkla kullanılmaktadır [8-11]. Bu yazılımlar, malzemelerin radyasyon zırhlama performansını değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır ve elde edilen sonuçlar, genellikle deneysel verilerle de yüksek derecede uyum göstermektedir [12].

Şakar ve arkadaşları (2020) tarafından geliştirilmiş Phy-X/PSD yazılımı ile MAC, Z_{eff} , ve HVL, gibi diğer dozimetri ve radyasyon koruma parametrelerini geniş bir enerji aralığında belirleyebilmektedir [13]. Bu yazılım, malzemelerin radyasyon zayıflatma yeteneklerini ve zırhlama performansını değerlendirmek amacıyla literatürdeki çeşitli çalışmalarda uygulanmıştır [14-17].

Malzemenin zayıflatma parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi, o malzemenin potansiyel uygulama alanlarının saptanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, farklı malzemelerin ve alaşımların zayıflatma parametreleri üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Almuqrin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, $B_2O_3 + ZnO + BaO + PbO$, $B_2O_3 + ZnO + BaO + Fe_2O_3$, $B_2O_3 + ZnO + BaO + MgO$ ve $B_2O_3 + ZnO + BaO + Al_2O_3$ bileşimlerinden oluşan camların radyasyon koruma özellikleri Monte Carlo simülasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, metal oksit katkılı camların iyonlaştırıcı radyasyona karşı etkili koruma sağladığını ve bu malzemelerin gelecekte radyasyon zırhlama uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir [18]. Issa ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, lantanit oksitlerinden Lu_2O_3 , Yb_2O_3 , Er_2O_3 , Sm_2O_3 , Dy_2O_3 , Eu_2O_3 , Nd_2O_3 , Pr_6O_{11} , La_2O_3 ve Ce_2O_3 'ün gama fotonlarıyla etkileşimini temsil eden MAC değerleri 1 keV ile 100 GeV arasındaki geniş enerji aralığında WinXCom yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada Lutesyum oksit (Lu_2O_3) en yüksek MAC, Z_{eff} değerlerine sahip olurken, HVL, TVL ve MFP değerlerinde en düşük değerleri sergilediği ifade edilmiştir [19]. Obaid ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, çeşitli kayaçlar ve beton için MAC, Z_{eff} gibi gama ışını zayıflatma parametreleri 122–1330 keV enerji aralığında; belirlenmiştir. Çalışmada, feldispatlı bazalt, kompakt bazalt, volkanik kaya, dolerit ve pembe granitin gama ışını zırhlama açısından kumtaşı ve betondan daha etkili olduğu bildirilmiştir [20]. El-Agawany ve arkadaşları tarafından, yapılarında ağırlıklı olarak B_4C , Cr, Fe, Cu, W, Re ve Ni metallerini içeren altı farklı alaşım numunesi üretilmiş ve bunları yeni gama ışını zırh malzemeleri olarak tanıtılmıştır. Numunelerin, gama ışınlarına karşı zırhlama performansları MCNP-5 Monte Carlo simülasyon kodu ve XCOM teorik programı ile incelenmiş ve bu alaşımların nükleer reaktörler ve tıbbi merkezlerde çalışanların radyasyona maruz kalmasını azaltmada etkili adaylar olabileceği bildirilmiştir [21]. Gaylan ve Çağlar tarafından yapılan çalışmada, $(100-x)Al$ 6061- $x\%Sm_2O_3$ ($x = 5, 10, 20, 30, 40$) kompozitleri toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş, pelet haline getirilip sinterlenmiştir. Radyasyon zayıflatma analizleri MCNP 6.2 simülasyon kodu ve Phy-X/PSD programı ile yapılmış; Sm_2O_3 katkısının termal nötron makroskobik tesir kesitiini ve zayıflatma oranını yükselttiği raporlanmıştır [22].

Bu çalışmada, endüstri ve ticari uygulamalar için uygun olan, Eti Alüminyum Tesisleri'nde üretilmiş standart element içerikli ve belirli yoğunluğa sahip ETİAL serisi alaşımlar incelenmiştir. Bu alaşımlar; iyi döküm, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve yüzey kalitesi gibi özellikleri sayesinde otomotiv, denizcilik, mutfak eşyaları, havacılık ve mühendislik

uygulamaları gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır.

Alaşım, metallerin ve diğer metaller, ametaller, metaloidler gibi malzemelerle karışımıdır ve metallerin belirli özellikleri alaşımlama yolu ile değiştirilebilir. Alışılmış koruyucu malzemelerin dezavantajlarını göz önünde bulunduran araştırmacılar, alternatif gama ışınları koruyucu malzemesi olarak metalik alaşımların kullanımını öngörmüşlerdir [23]. Radyasyon korumada tercih edilecek malzemenin; yüksek yoğunluk, yüksek erime sıcaklığı, yüksek mekanik mukavemet, yüksek korozyon direnci, ucuz maliyet ve üretim sürecinde düşük toksisite göstermesi gibi özelliklere sahip olması önemlidir [24, 25].

Bu çalışmada Phy - X/PSD yazılımı kullanılarak, 10^{-3} – 10^5 MeV enerji aralığı boyunca ve seçili foton enerjilerinde (0.059, 0.081, 0.356, 0.662, 1.173 ve 1.332 MeV), ETİAL serisi alaşımlar için MAC, LAC, HVL, TVL, MFP ve Z_{eff} temel radyasyon zayıflama parametreleri teorik olarak belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, ETİAL-110, ETİAL-120, ETİAL-140, ETİAL-145 ve ETİAL-150 alaşımları sırasıyla S1, S2, S3, S4 ve S5 olarak kodlanmış, radyasyon zayıflama özellikleri ise temel etkileşim parametreleri üzerinden incelenmiştir. Alaşımların kimyasal bileşimlerinin belirlenmesinde minimum limit değerler esas alınmış olup, bileşim ve yoğunluklara ilişkin veriler ETİAL [26] kaynağından elde edilmiştir. Söz konusu alaşımların yoğunluk ve minimum bileşim değerleri Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Alaşımların yoğunluk ve kimyasal içerik değerleri (% ağırlık)

Numune No	S1	S2	S3	S4	S5
Yoğunluk (g cm ⁻³)	2,76	2,68	2,66	2,69	2,67
Fe	0,70	0,50	0,60	0,60	1,00
Si	4,00	4,50	11,50	11,00	11,00
Cu	2,00	0,10	0,10	0,80	1,75
Mn	0,20	0,20	0,40	0,20	0,50
Mg	0,15	0,10	0,10	0,80	0,40
Zn	0,20	0,10	0,10	0,20	0,70
Ni	0,30	0,10	0,10	0,80	0,30
Ti	0,20	0,20	0,15	0,10	0,15
Pb	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Sn	0,05	0,10	0,05	0,05	0,10
Al	92,10	94,00	86,80	85,35	84,00

Çalışmada, alaşımların radyasyon zayıflama parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Phy-X/PSD yazılımı, <https://phy-x.net/PSD> adresine kayıt olup e-posta doğrulamasını tamamlayan kullanıcılara; metal, alaşım, bileşik ve kompozitlerin çeşitli zayıflama özelliklerini hesaplama imkânı sunmaktadır [13]. Phy-X/PSD, 1 GB yüklü belleğe sahip Intel® Core™ i7-2600 CPU @ 3,40 GHz işlemcili ve Ubuntu 14.04.3 LTS işletim sistemi üzerinde çalışan bir sunucu üzerinden çalıştırılmakta olup, 0,015–15 MeV enerji aralığında foton etkileşim parametrelerini hesaplamak üzere tasarlanmıştır [25].

Phy-X/PSD yazılımı üzerinden alaşımların kimyasal bileşimleri ve yoğunlukları programa tanıtılmış, ilgili foton enerjileri (0,059; 0,081; 0,356; 0,662; 1,173; 1,332 MeV) seçilmiş ve hesaplama yöntemi belirlenmiştir. Bu doğrultuda MAC, LAC, HVL, TVL, MFP ve Z_{eff} parametreleri hesaplanmıştır. Tablo 2’de çalışmada belirlenen radyasyon zırhlama parametrelerinin hesaplamasında kullanılan ifadeler verilmiştir.

Tablo 2. Radyasyon zayıflama parametrelerinin hesaplanmasında uygulanan matematiksel ifadeler

Parameter	Formül	Birim	Ref.
MAC	$\mu_m = \sigma_T \frac{N_A}{\sum f_i A_i}$ <p>N_A: Avogadro sayısı, A_i: i'inci elementin karşılık gelen atom kütlesi f_i: elementin tesir kesiti σ: Çok elemanlı bir malzemedeki tesir kesiti alanı σ_T: Toplam tesir kesiti $\sigma_T = \frac{1}{N_A} \sum_i^n \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i$ $(\mu_m)_i$: i. bileşen elemanı için kütle zayıflaması</p>	cm ² g ⁻¹	[5,27]
LAC	$\mu = \mu_m \rho$	cm ⁻¹	[13,28]
HVL	$\frac{\ln(2)}{\mu}$	cm	[29,30]
TVL	$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu}$	cm	[31]
MFP	$\frac{1}{\mu}$	cm	[32,33]

Z_{eff}	$Z_{eff} = \frac{\sigma_T}{\sigma_e}$	σ_e : Toplam elektronik tesir kesiti $\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i^n \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i$ Z_i : Toplam tesir kesiti	[27,34]
-----------	---------------------------------------	---	---------

3. Bulgular

Phy-X/PSD verilerinden elde edilen sonuçlar, alaşımlar arasında oldukça tutarlı bir dağılım göstermekte olup, düşük enerjilerde dahi farkların sınırlı kaldığı görülmektedir. 0,059 MeV'de MAC değerleri S1 için 0,3335 cm² g⁻¹, S2 için 0,3054 cm² g⁻¹, S3 için 0,3076 cm² g⁻¹, S4 için 0,3251 cm² g⁻¹ ve S5 için 0,3489 cm² g⁻¹ olarak bulunmuştur. 0,081 MeV'de bu değerler sırasıyla 0,2212, 0,2100, 0,2109, 0,2180 ve 0,2276 cm² g⁻¹ seviyesindedir. Yükselen enerjiyle birlikte MAC değerlerindeki farklılıklar azalmış; 0,356 MeV'de 0,0977-0,0981 cm² g⁻¹ aralığında yer almış, 1,332 MeV'de ise S1, S2, S3, S4 ve S5 numuneleri için sırasıyla, 0,0532 cm² g⁻¹, 0,0532 cm² g⁻¹, 0,0534 cm² g⁻¹, 0,0534 cm² g⁻¹ ve 0,0533 cm² g⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Alaşımların geneline bakıldığında S2 en düşük MAC değerine sahiptir. 0,059 MeV'de S2 alaşımı için MAC değeri 0,3054 cm² g⁻¹ iken, S5 alaşımının MAC değeri aynı enerji için 0,3489 cm² g⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Bu fark, S2'nin yüksek Al içeriği (%94) ve ağır element katkısının görece düşük olmasına bağlanmıştır. Genel olarak, MAC değerlerinin enerjiye bağlı değişimi örnekler arasında benzer bir eğilim göstermektedir. Artan gama enerjisi ile MAC değerleri düzenli bir şekilde azalmaktadır; bu durum, düşük enerjili fotonlarla etkileşimin daha yoğun gerçekleştiğini ve alaşımların bu bölgelerde daha etkin zırhlama sağladığını göstermektedir. Fotoelektrik etkinin olasılığı düşük enerjilerde baskın olup yüksek enerjilerde giderek azalır; ayrıca fotoelektrik kesit, atom numarasının artması ile artarken (Z), foton enerjisinin (E) artması ile azalır [35]. Çalışmada, 0,059; 0,081; 0,356; 0,662; 1,173 ve 1,332 MeV enerji değerleri için 5 farklı alaşımın MAC ve LAC değerleri hesaplanmış ve Tablo 3'de özetlenmiştir.

Tablo 3. Alaşımların foton enerjisine bağlı MAC ve LAC değerleri

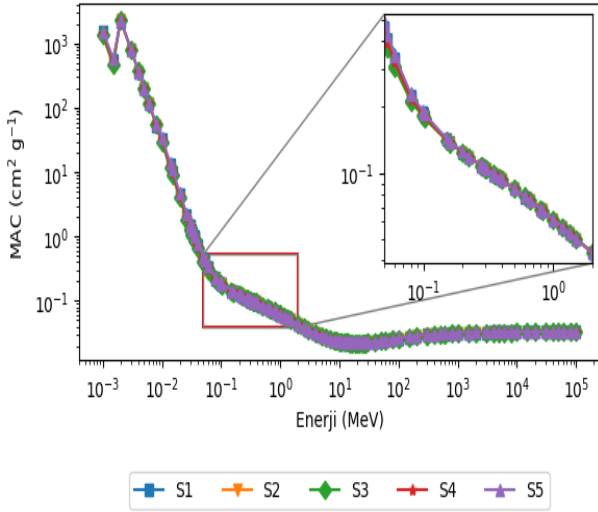
Numune No	Enerji (MeV)	MAC (cm ² g ⁻¹)	LAC (cm ⁻¹)
S1	0,059	0,3335	92,0400
	0,081	0,2212	61,0370
	0,356	0,0978	26,9830
	0,662	0,0748	20,6330
	1,173	0,0568	15,6680
	1,332	0,0532	14,6820
S2	0,059	0,3054	81,8551
	0,081	0,2100	56,2673
	0,356	0,0977	26,1868
	0,662	0,0748	20,0493

S3	1,173	0,0568	15,2294
	1,332	0,0532	14,2709
	0,059	0,3076	81,8160
	0,081	0,2109	56,1080
	0,356	0,0980	26,0540
	0,662	0,0750	19,9470
S4	1,173	0,0567	15,1520
	1,332	0,0534	14,1980
	0,059	0,3251	87,4575
	0,081	0,2180	58,6475
	0,356	0,0980	26,3681
	0,662	0,0750	20,1714
S5	1,173	0,0569	15,3193
	1,332	0,0534	14,3551
	0,059	0,3489	93,1595
	0,081	0,2276	60,7753
	0,356	0,0981	26,1823
	0,662	0,0749	20,0071
	1,173	0,0569	15,1904
	1,332	0,0533	14,2343

Enerji yükseldikçe MAC değerlerindeki düşüş, malzeme boyunca daha fazla fotonun iletimine ve dolayısıyla materyalin geçirgenliğinin artmasına işaret eder. Şekil 1'de, 10⁻³-10⁵ MeV enerji aralığındaki MAC değerlerindeki değişim verilmiştir. Düşük gama ışını enerjilerinde (0,01<Enerji (E)<0,1 MeV), MAC değerleri keskin bir azalma göstermektedir. Bu enerji aralığında fotoelektrik süreç baskındır ve bu süreç toplam MAC değerlerini doğrudan etkiler. Fotoelektrik etki, düşük foton enerjilerinde (E) en yaygın etkileşim olup, etkileşim olasılığı E^{-3,5} ile orantılıdır [36]. Orta enerji bölgesinde (0,1 MeV<E<5 MeV), tüm örnekler için MAC değerlerinde benzer bir azalan eğilim gözlemlenmiştir. Bu eğilim, bu enerji aralığında MAC değerlerinin yakınsamasına yol açmaktadır. Bu yakınsamaya katkıda bulunan temel faktör Compton saçılmasıdır. Compton saçılmasında, foton enerjisinin yalnızca bir kısmı malzemedeki bir elektrona aktarılır ve kalan enerji saçılan foton tarafından taşınır [37]. Compton saçılması orta enerjilerde baskın etkileşim olmakla birlikte, etkileşim olasılığı E⁻¹ ile orantılıdır. Yüksek enerjilerde (E>5 MeV) MAC değerleri neredeyse sabit kalmaktadır. Çift oluşumu, etkileşim olasılığının E² ile orantılı olduğu 1,022 MeV'nin üzerindeki çok yüksek foton enerjilerinde baskın hale gelir [36].

Elde edilen MAC değerleri, literatürde bildirilen bazı metalik alaşımlarla karşılaştırıldığında benzer eğilimler göstermektedir. Örneğin, Singh ve arkadaşları tarafından Pb %10, Cu %90 alaşımı için 0,662 MeV enerji değerinde MAC 0,0900 cm² g⁻¹ olarak

belirlenmişken, bu çalışmada S1-S5 alaşımları aynı enerji düzeyinde 0,0748-0,0750 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ aralığında MAC değerleri göstermiştir [38]. Benzer şekilde, Abdulazez ve Sheekhoo tarafından Cu70Zn28Al2 alaşımı için 1,173 MeV'de 0,05449 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ olarak raporlanan MAC değeri, bu çalışmada incelenen alaşımlarda 0,0567-0,0569 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [39]. Hossain ve ., Barman tarafından yapılan çalışmada Fe-bazlı alaşımı için 1,332 MeV'de 0,0519 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ olarak belirlediği MAC değeri de S1-S5'in 0,0532-0,0534 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ aralığıyla uyumludur [40]. Ayrıca, Almuqrin ve arkadaşları tarafından Fe/Cr18/Ni10 alaşımı için 0,081 MeV'de 0,5756 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ olarak elde edilen değer, bu çalışmadaki 0,2100-0,2276 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ aralığı ile enerji bağımlı trendi göstermesi açısından karşılaştırılabilir niteliktedir [41]. Bu kıyaslamalar, çalışmadaki alaşımların düşük ve orta enerjilerde MAC değerlerinin literatürdeki bazı metalik alaşımlarla tutarlı olduğunu göstermektedir.



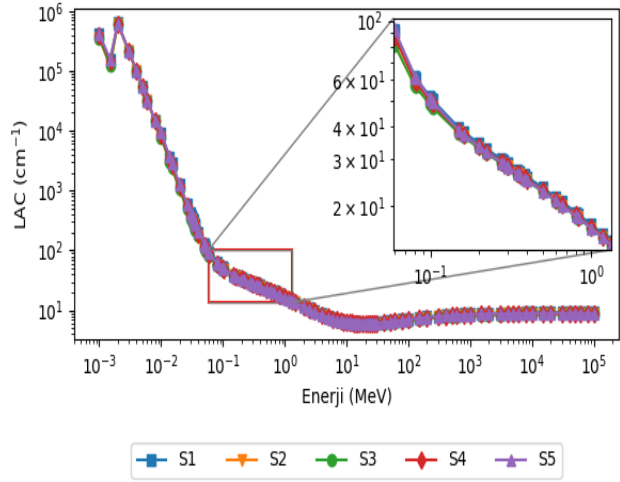
Şekil 1. 10^{-3} - 10^5 MeV Enerji Aralığında ve Seçili Enerjilerde MAC Değerleri

LAC, bir malzemenin gama fotonlarına karşı zırlama kapasitesini doğrudan tanımlayan kritik bir parametredir. LAC değerinin yüksek olması, fotonların malzeme içerisinde daha kısa mesafede soğurulduğunu ve dolayısıyla daha etkin bir zayıflatma performansı sağlandığını göstermektedir [14]. Tablo 3'te görüldüğü üzere, tüm alaşımlar için LAC değerleri artan gama enerjisi ile birlikte üstel olarak azalmaktadır. S5 numunesinde 0,059 MeV'de 93,1595 cm^{-1} olarak hesaplanan LAC, 1,332 MeV'de 14,2343 cm^{-1} 'e düşmüştür. Benzer şekilde, S1alaşımında aynı enerji aralığında LAC değeri 92,0400 cm^{-1} 'den 14,6820 cm^{-1} 'e gerilemiştir.

Düşük enerjilerde alaşımlar arasındaki farklar daha belirgin olmaktadır. 0,059 MeV'de S2'nin LAC değeri 81,8551 cm^{-1} iken, S5'de aynı enerji için değer 93,1595 cm^{-1} olup, S2 yaklaşık %12 daha düşük LAC sergilemektedir. Benzer şekilde, S3 için aynı enerji

seviyesinde LAC değeri 81,8160 cm^{-1} ve S4 için 87,4575 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır.

Orta enerjilerde (0,356 MeV civarı) LAC değerleri birbirine oldukça yakın olup 26,0540 cm^{-1} (S3) ile 26,9830 cm^{-1} (S1) arasında değişmektedir. Enerji yükseldikçe LAC değerlerinde farkların daha da azaldığı görülmektedir. Nitekim 1,332 MeV'de S2 ve S5 için LAC değerleri sırasıyla 14,2709 cm^{-1} ve 14,2343 cm^{-1} olup fark yalnızca %0,26 seviyesine düşmektedir. Benzer şekilde, S1 için 14,6820 cm^{-1} , S3 için 14,1980 cm^{-1} ve S4 için 14,3551 cm^{-1} değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, foton enerjisinin artmasıyla Compton saçılmasının ön plana çıktığını; buna bağlı olarak fotoelektrik etkinin önemini yitirdiğini ve alaşım bileşiminin LAC üzerindeki etkisinin zayıfladığını ortaya koymaktadır. Şekil 2'de, gama ışınlarının 10^{-3} - 10^5 MeV enerji aralığındaki LAC değerlerindeki değişim verilmiştir.



Şekil 2. 10^{-3} - 10^5 MeV Enerji Aralığında ve Seçili Enerjilerde LAC Değerleri

Elde edilen MAC ve LAC değerlerinin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla sonuçlar WinXCom veri tabanı ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler, Phy-X/PSD ile hesaplanan MAC değerlerinin XCOM referanslarıyla -1.524% ile +0.045% aralığında; LAC değerlerinin ise -1.547% ile +0.120% aralığında değişen oldukça düşük bir yüzdesel sapma gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu düşük hata oranları, hesaplanan zayıflatma katsayılarının XCOM verileriyle güçlü bir uyum içinde olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca yapılan χ^2 analizi her bir enerji noktasında hesaplanan ve XCOM değerleri arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı bir uyumsuzluk oluşturmadığını göstermiştir. Sonuç olarak, MAC ve LAC verilerinin XCOM referansları ile hem yüzdesel hata hem de χ^2 istatistiksel değerlendirmeleri açısından yüksek tutarlılık sergilediği ve güvenilir olduğu teyit edilmiştir.

Tablo 4'te sunulan veriler, gama fotonlarının zayıflatılma özelliklerini tanımlayan HVL, TVL, MFP ve Z_{eff} parametrelerinin enerjiye bağlı olarak değişimini göstermektedir. Genel eğilim, tüm alaşımlar için foton enerjisinin artışıyla birlikte HVL, TVL ve MFP değerlerinde sürekli bir artış, buna karşılık Z_{eff} değerlerinde sınırlı ve kararlı azalmalar şeklindedir. Bu durum, düşük enerjili fotonların malzeme içerisinde daha kısa mesafelerde soğurulduğunu, yüksek enerjili fotonların ise daha uzun mesafelerde ilerleyebildiğini ortaya koymaktadır.

Düşük enerjilerde (0,059 MeV) HVL değerleri 0,007 cm (S5) ile 0,009 cm (S2) arasında değişmektedir. Benzer şekilde MFP değerleri aynı enerji için 0,011 cm (S5) ile 0,012 cm (S3) aralığındadır. Bu değerler, düşük enerjilerde alaşım bileşiminin zayıflatma özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yüksek enerjilerde (1,332 MeV) ise HVL değerleri 0,047 cm (S1) ile 0,049 cm (S3) aralığında, MFP değerleri ise 0,068 cm (S1) ile 0,070 cm (S2 ve S3) aralığında yoğunlaşmıştır. Bu yakın değerler, yüksek enerjilerde alaşımlar arasındaki farkların azaldığını doğrulamaktadır.

TVL değerleri de benzer bir eğilim sergilemektedir. 0,059 MeV'de S5 için 0,025 cm olan TVL değeri, S2 için 0,028 cm'ye ulaşmaktadır. Enerji 1,332 MeV'e çıkarıldığında ise tüm alaşımların TVL değerleri 0,157–0,162 cm aralığında toplanmaktadır.

Z_{eff} parametresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek değerler düşük enerjilerde gözlenmiştir. 0,059 MeV'de S5'nin Z_{eff} değeri 14,987 olup tüm alaşımlar arasında en yüksek seviyeyi göstermektedir. Bunu 14,580 ile S1 takip etmektedir. Enerji yükseldikçe tüm alaşımlarda Z_{eff} değerleri düşmüş, 1,332 MeV'de 13,139–13,426 aralığında belirlenmiştir. Bu azalma, düşük enerjilerde fotoelektrik etkinin baskın olmasıyla açıklanırken, yüksek enerjilerde Compton saçılması ve çift oluşum süreçlerinin giderek daha etkin hale gelmesiyle ilişkilidir.

Düşük enerjilerde alaşım bileşiminin etkisi belirgin olup özellikle S5 yüksek Z_{eff} değeri ve düşük HVL/TVL/MFP değerleri ile öne çıkmaktadır. Buna karşın, yüksek enerjilerde tüm alaşımlar benzer zayıflatma özellikleri sergilemekte ve enerji bağımlı süreçlerin baskınlığı ön plana çıkmaktadır.

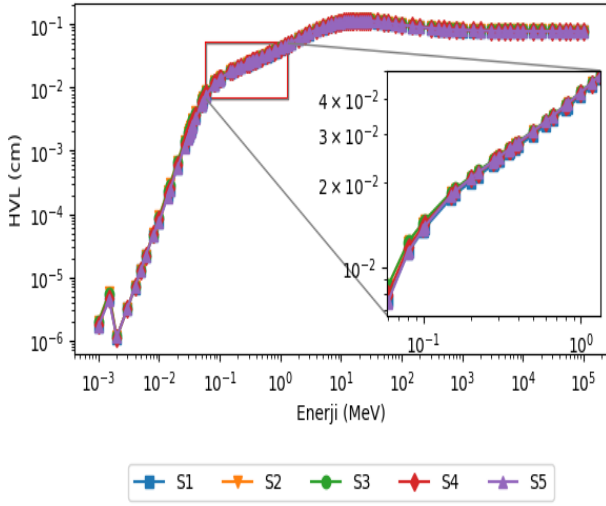
Tablo 4. Alaşımların foton enerjisine bağlı HVL, TVL, MFP, Z_{eff} değerleri

Numune No	Enerji (MeV)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	Z_{eff}
S1	0,059	0,008	0,025	0,011	14,580
	0,081	0,011	0,038	0,016	14,060
	0,356	0,026	0,085	0,037	13,340
	0,662	0,034	0,112	0,048	13,310
	1,173	0,044	0,147	0,064	13,300

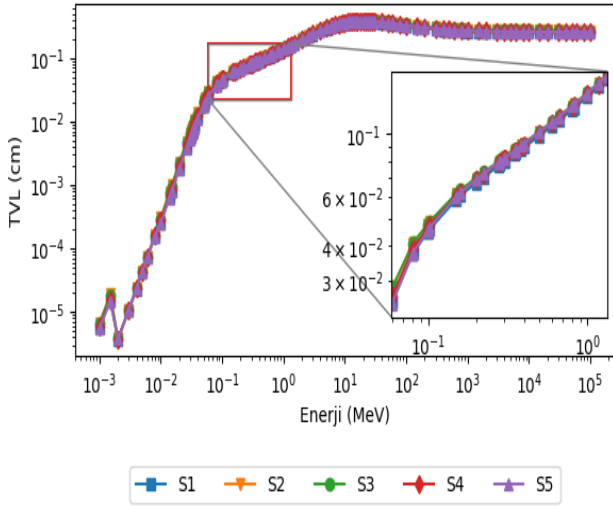
S2	1,332	0,047	0,157	0,068	13,300
	0,059	0,009	0,028	0,012	13,804
	0,081	0,012	0,041	0,018	13,538
	0,356	0,027	0,088	0,038	13,168
	0,662	0,035	0,115	0,050	13,145
S3	1,173	0,046	0,151	0,066	13,139
	1,332	0,049	0,161	0,070	13,139
	0,059	0,008	0,028	0,012	13,830
	0,081	0,012	0,041	0,018	13,580
	0,356	0,027	0,088	0,038	13,250
S4	0,662	0,035	0,115	0,050	13,220
	1,173	0,046	0,152	0,066	13,220
	1,332	0,049	0,162	0,070	13,220
	0,059	0,008	0,026	0,011	13,323
	0,081	0,012	0,039	0,017	13,911
S5	0,356	0,026	0,087	0,038	13,334
	0,662	0,034	0,114	0,050	13,301
	1,173	0,045	0,150	0,065	13,299
	1,332	0,048	0,160	0,070	13,298
	0,059	0,007	0,025	0,011	14,987
S5	0,081	0,011	0,038	0,017	14,370
	0,356	0,027	0,088	0,038	13,472
	0,662	0,035	0,115	0,050	13,435
	1,173	0,046	0,152	0,066	13,426
	1,332	0,049	0,162	0,070	13,426

HVL, bir malzemenin radyasyon zayıflatma kapasitesini değerlendirmede kullanılan önemli bir parametredir ve LAC ile ters orantılıdır. Başka bir deyişle, LAC değerinin artması, fotonların malzeme içerisindeki zayıflatma olasılığını yükseltmekte ve dolayısıyla daha düşük bir HVL değerine yol açmaktadır. HVL, γ -ışını yoğunluğunu başlangıç değerinin %50'sine düşürmek için gereken soğurucu kalınlığı temsil eder. Benzer şekilde TVL, bir malzemenin gama ışınlarını orijinal şiddetinin %10'una düşürecek kalınlığını ifade eder ve HVL gibi malzemenin zayıflatma özelliği hakkında bilgi verir [42].

İncelenen örneklerde, HVL ve TVL değerlerinin foton enerjisine bağlı olarak 10^{-3} – 10^5 MeV aralığında nasıl değiştiği Şekil 3 ve Şekil 4'de grafiksel olarak sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde, gama ışını enerjisindeki artışa bağlı olarak HVL ve TVL değerlerinde belirgin bir yükselme gözlemlenmektedir. Bu artış, yüksek enerjili fotonların malzeme ile etkileşim olasılığının azalması sonucu, aynı oranda zayıflatma sağlanabilmesi için daha kalın bir soğurucu tabakaya ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.

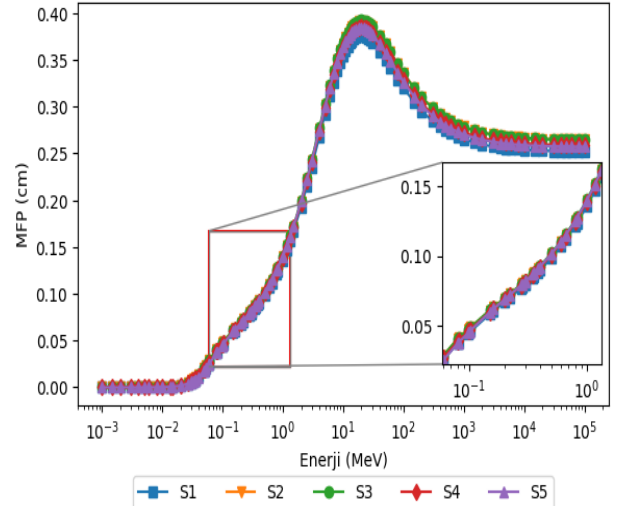


Şekil 3. 10^{-3} - 10^5 MeV Enerji Aralığında ve Seçili Enerjilerde HVL Değerleri



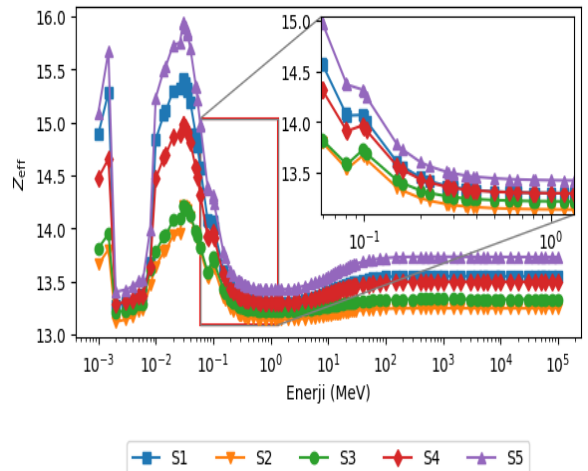
Şekil 4. 10^{-3} - 10^5 MeV Enerji Aralığında ve Seçili Enerjilerde TVL Değerleri

MFP değerlerinin enerjiye bağlı değişimi de benzer şekilde Şekil 5'te sunulmuştur. MFP, bir fotonun malzeme içerisinde etkileşime girmeden önce ortalama olarak kat ettiği mesafeyi ifade eder [43]. Elde edilen sonuçlara göre, MFP değerleri de enerji arttıkça artış göstermektedir. Bu durum, yüksek enerjili fotonların maddeyle etkileşim olasılığının azalmasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, enerji yükseldikçe fotonlar daha uzun mesafe kat edebildiğinden, MFP değerleri artmaktadır. Bu bulgular, materyalin zayıflatma kapasitesinin enerjiye bağlı olarak değiştiğini ve özellikle düşük enerjilerde daha etkin bir zayıflama gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5. 10^{-3} - 10^5 MeV Enerji Aralığında ve Seçili Enerjilerde MFP Değerleri

Çalışmada incelenen alaşımlar, atom numaraları 13 (Al) ile 82 (Pb) arasında değişen elementler içermekte olup, bu geniş atomik yapı çeşitliliği, alaşımların Z_{eff} değerlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Her element tek bir atom numarasıyla sembolize edilir. Ancak, alaşımlar ve kompozitler gibi farklı oranlarda birden fazla element içeren malzemelerde atom numarası tek bir sayıyla ifade edilemez. Bu tür malzemeler için Z_{eff} kullanılır [44]. Z_{eff} değerlerinin 10^{-3} - 10^5 MeV enerji aralığındaki değişimi Şekil 6'da sunulmuştur. Z_{eff} , bir malzemenin fotonlarla etkileşim etkinliğini gösteren bir parametredir. Analiz edilen sonuçlara göre, Z_{eff} değerleri düşük enerjilerde daha yüksek olup, enerji arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum, düşük enerjili fotonların fotoelektrik etkileşime daha duyarlı olmasıyla açıklanabilir. Enerji yükseldikçe Compton saçılmanın baskın hale gelmesi, atom numarasına duyarlılığı azaltmakta ve buna bağlı olarak Z_{eff} değerlerini düşürmektedir. Bu bulgular, alaşımların düşük enerjili fotonlara karşı daha yüksek koruyuculuk sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6. 10^{-3} - 10^5 MeV Enerji Aralığında ve Seçili Enerjilerde Z_{eff} Değerleri

HVL ve TVL değerlerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla hesaplanan sonuçlar WinXCom referans verileri ile karşılaştırılmış ve parametreler arasındaki uyum yüzdesel hata analiziyle nicel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tüm numunelerde HVL değerlerinin XCOM verileriyle 0–14.286% arasında; TVL değerlerinin ise 0–4.167% aralığında oldukça düşük bir sapma gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle 0.081–1.332 MeV aralığında ise hem HVL hem TVL değerleri için hata oranının %0 olması, Phy-X/PSD ile hesaplanan değerlerin XCOM çıktılarına tamamen uyumlu olduğunu göstermektedir. Enerji arttıkça gözlenen hata değerlerinin sıfıra yaklaşması, zayıflatma parametrelerinin foton etkileşim rejimleri boyunca istikrarlı ve güvenilir bir şekilde hesaplandığını desteklemektedir. Bu sonuçlar, HVL ve TVL parametrelerinin XCOM referans verileriyle yüksek derecede tutarlı olduğunu, dolayısıyla hesaplanan radyasyon zayıflatma özelliklerinin literatürle uyumlu bir doğruluk seviyesine sahip olduğunu göstermektedir.

Numunelerin MFP değerleri Phy-X/PSD ve XCOM çıktıları kullanılarak hesaplanmış ve iki yöntem arasında oldukça yüksek bir uyum gözlenmiştir. Her iki veri tabanından elde edilen MFP değerleri tüm numunelerde enerjiye bağlı olarak artış göstermiş ve hata oranının çoğunlukla %0 olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kütle zayıflatma katsayısından hesaplanan MFP sonuçlarının her iki yöntem için de tutarlı olduğunu ve kullanılan girdilerin fiziksel olarak doğru seçildiğini göstermektedir. Numuneler arasında en düşük MFP değerleri düşük enerjilerde (0.059–0.081 MeV) gözlenirken, enerji yükseldikçe fotonların ortalama ilerleme mesafesi beklediği gibi artmıştır. E Z_{eff} değerleri incelendiğinde, S1 ve S5 numuneleri için Phy-X/PSD verilerinin XCOM'a göre daha düşük çıktığı ve hata oranlarının sırasıyla yaklaşık –13% ve –12% seviyelerine kadar ulaştığı belirlenmiştir. Buna karşın S2, S3 ve S4 numunelerinde Z_{eff} değerleri iki yöntem arasında oldukça yakın olup hata oranlarının genellikle %1–6 aralığında sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, alaşımların kompozisyonuna bağlı olarak veri tabanlarının hassasiyetinin değişebildiğini, ancak genel olarak Phy-X/PSD ve XCOM'un birbirleriyle uyumlu sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır. Özellikle MFP açısından gözlenen mükemmel uyum, numunelerin foton etkileşim davranışlarının yüksek doğrulukla modellendiğini teyit etmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada, yüzdece farklı bileşim oranlarına ve 2,66–2,76 g cm⁻³ aralığındaki yoğunluk değerlerine sahip beş alaşımın gama fotonları ile etkileşimleri, MAC, LAC, HVL, TVL, MFP ve Z_{eff} parametreleri üzerinden incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, foton enerjisine

bağlı olarak bu parametrelerde belirgin ve tutarlı eğilimler ortaya koymaktadır.

Artan foton enerjisi ile MAC ve LAC değerleri teorik beklentiler doğrultusunda değişmiş; düşük enerjilerde yüksek MAC ve LAC değerleri gözlenmiş ve alaşımların zayıflatma kapasitesinin bileşim ile güçlü şekilde ilişkili olduğu doğrulanmıştır. 0,0595 MeV'de S5'nin LAC değeri 93,1595 cm⁻¹ iken, S2'de 81,8551 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır. MAC değerleri de düşük enerjilerde belirgin farklılıklar gösterirken, yüksek enerjilerde tüm alaşımlar için yaklaşık olarak sabitlenmiştir. Enerji yükseldikçe HVL, TVL ve MFP değerleri artmış; S2 için 0,0595 MeV'de HVL 0,009 cm, TVL 0,028 cm, MFP 0,012 cm iken, 1332,5 keV'de HVL 0,049 cm, TVL 0,161 cm, MFP 0,070 cm olarak bulunmuştur. Bu bulgular, enerji arttıkça daha kalın soğurucu tabakalara ihtiyaç duyulduğunu ve alaşımlar arasındaki farklılıkların yüksek enerjilerde azaldığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, foton–madde etkileşim teorisi ile de uyumludur. Düşük enerjilerde yüksek Z_{eff} , MAC ve LAC değerleri, fotoelektrik etkinin baskınlığını ve atom numarasına güçlü bağımlılığını yansıtırken; HVL, TVL ve MFP değerlerinin düşük olması, fotonların malzeme içerisinde kısa mesafelerde soğurulduğunu göstermektedir. Orta enerji aralığında (0,356–0,662 MeV) Compton saçılması baskın hâle gelirken, MAC ve LAC değerleri azalmış, HVL, TVL ve MFP ise artış göstermiştir. Yüksek enerjilerde ise Compton ve çift oluşum süreçleri hâkim olup, MAC ve LAC değerleri enerjiye bağlı olarak daha sabit seviyelere yaklaşırken, HVL, TVL ve MFP en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu uyum, hesaplamaların güvenilirliğini ve yöntemlerin teorik beklentilerle tutarlılığını doğrulamaktadır.

Tüm alaşımlar aynı elementleri içermekle birlikte farklı ağırlık oranlarına sahiptir ve yoğunlukları birbirine yakındır (2,66–2,76 g cm⁻³). Bu durum, gözlenen zayıflatma farklılıklarının esas olarak bileşimdeki element ağırlık oranlarından kaynaklandığını göstermektedir. Özellikle Al oranı S2'de %94'e kadar yükselirken, yüksek-Z element katkısı daha fazla olan S5 düşük enerjilerde yüksek MAC, LAC ve Z_{eff} değerleri ile öne çıkmaktadır.

Daha önce bu alaşımlar için gama ışını zayıflatma parametreleri ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Bu nedenle, elde edilen bulgular literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılabilir yeni veriler sunmakta ve bu alaşımlar için bir referans niteliği taşımaktadır. Elde edilen parametreler (MAC, LAC, HVL, TVL, MFP, Z_{eff}), alaşımların zayıflatma performansını ortaya koyarken, sonuçlar radyasyon zırlama alanında alternatif malzeme seçimlerine katkı sunmaktadır.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Kaynakça

- [1] Elsafi, M., Almousa, N., Al-Harbi, N., Almutiri, M. N., Yasmin, S., Sayyed, M. I. 2023. Ecofriendly and radiation shielding properties of newly developed epoxy with waste marble and WO_3 nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 269–277.
- [2] Pour, H. G., Shojaei, M. R., Soltani, J. 2023. A new approach to calculating the ratio of the Compton to total mass attenuation coefficient. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110848.
- [3] Zare Mehrjardi, A., Gholamzadeh, L., Zafari, F. 2023. Coating of polyester fabrics with micro-particles of Bi_2O_3 and BaO for ionization ray shielding. *Applied Radiation and Isotopes*, 192, 110573.
- [4] Geidam, I. G., Matori, K. A., Halimah, M. K., Chan, K. T., Muhammad, F. D., Ishak, M., Umar, S. A. 2022. Oxide ion polarizabilities and gamma radiation shielding features of $TeO_2-B_2O_3-SiO_2$ glasses containing Bi_2O_3 using Phy-X/PSD software. *Materials Today Communications*, 31, 103472.
- [5] Gili, M. B. Z., Jecong, J. F. M. 2023. Radiation shielding properties of ZnO and other glass modifier oxides: BaO, MgO, Na_2O , and TiO_2 , using EpiXS software. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 1021–1029.
- [6] Şahin, M. C., Manisa, K., Bircan, H., Saygılı, S. K. 2024. Experimental, theoretical, and biological investigations on radiation shielding parameters of boron-doped Cerrobend alloys. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 29.
- [7] Dong, M., Zhou, S., Yang, H., Xue, X. 2023. Gamma ray attenuation behaviors and mechanism of boron rich slag/epoxy resin shielding composites. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(7), 2613–2620.
- [8] Issa, S. A. M., Tekin, H. O., Elsaman, R., Kilicoglu, O., Saddeek, Y. B., Sayyed, M. I. 2019. Radiation shielding and mechanical properties of $Al_2O_3-Na_2O-B_2O_3-Bi_2O_3$ glasses using MCNPX Monte Carlo code. *Materials Chemistry and Physics*, 223, 209–219.
- [9] Al-Buriahi, M. S., Sriwunkum, C., Arslan, H., Tonguc, B. T., Bourham, M. A. 2020. Investigation of barium borate glasses for radiation shielding applications. *Appl. Phys. A*, 126.
- [10] Kilicoglu, O., Akman, H., Agar, O., Kara, U. 2023. Nuclear radiation shielding performance of borosilicate glasses: Numerical simulations and theoretical analyses. *Radiation Physics and Chemistry*, 204, 110676.
- [11] Oztürk, H., Avcı Karakurt, D., Onat, F. E., ALMisned, G., Tekin, H. O., Günay, O. 2025. Investigation of gamma ray shielding and transmission properties in B_2O_3 -Doped glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 238, 113199.
- [12] Zayed, A. M., El-Khayatt, A. M., Mahmoud, K. A., Petrounias, P., Masoud, M. A. 2025. Evaluation of some heavyweight minerals as sustainable neutron and gamma-ray attenuating materials: Comprehensive theoretical and simulation investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 3373–3386.
- [13] Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., Kurudirek, M. 2020. Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108496.
- [14] Al-Hadeethi, Y., Sayyed, M. I. 2020. A comprehensive study on the effect of TeO_2 on the radiation shielding properties of $TeO_2-B_2O_3-Bi_2O_3-LiF-SrCl_2$ glass system using Phy-X / PSD software. *Ceramics International*, 46(5), 6136–6140.
- [15] 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.
- [16] Sabry, N., Yahia, I. S. 2023. Attenuation features of Ag_2ZnSnS_4 , $Ag_2ZnSnSe_4$, ZnS, and Ag_2S compounds against indirect ionizing radiation using Phy-X/PSD software. *Physica B: Condensed Matter*, 650, 414526.
- [17] Aygun, Z., Aygün, M. 2023. Evaluation of radiation shielding potentials of Ni-based alloys, Inconel-617 and Incoloy-800HT, candidates for high temperature applications especially for

- nuclear reactors, by EpiXS and Phy-X/PSD codes. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 795-801.
- [18] Almuqrin, A. H., Mahmoud, K. A., Rilwan, U., Sayyed, M. I. 2024. Influence of various metal oxides (PbO, Fe₂O₃, MgO, and Al₂O₃) on the mechanical properties and γ -ray attenuation performance of zinc barium borate glasses. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(7), 2711-2717.
- [19] Issa, S. A. M., Sayyed, M. I., Zaid, M. H. M., Matori, K. A. 2018. Photon parameters for gamma-rays sensing properties of some oxide of lanthanides. *Results in Physics*, 9, 206-210.
- [20] Obaid, S. S., Gaikwad, D. K., Pawar, P. P. 2018. Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 356-360.
- [21] El-Agawany, F. I., Ekinçi, N., Mahmoud, K. A., Sarıtaş, S., Aygün, B., Ahmed, E. M., Rammah, Y. S. 2021. Gamma-ray shielding capacity of different B₄C-, Re-, and Ni-based superalloys. *European Physical Journal Plus*, 136, 527.
- [22] Gaylan, Y., Caglar, S. 2025. Effect of Sm₂O₃ on radiation shielding and mechanical properties of Al-Sm₂O₃ composites. *Ceramics International*, 51(8), 10133-10142.
- [23] Kaur, T., Sharma, J., Singh, T. 2019. Review on scope of metallic alloys in gamma rays shield designing. *Progress in Nuclear Energy*, 113, 95-113.
- [24] Gharissah, M. S., Ardiansyah, A., Pauziah, S. R., Muhammad, N. A., Rahmat, R., Heryanto, H., Tahir, D. 2022. Composites cement/BaSO₄/Fe₃O₄/CuO for improving X-ray absorption characteristics and structural properties. *Scientific Reports*, 12, 19169.
- [25] Subedi, B., Paudel, J., Lamichhane, T. R. 2023. Gamma-ray, fast neutron and ion shielding characteristics of low-density and high-entropy Mg-Al-Ti-V-Cr-Fe-Zr-Nb alloy systems using Phy-X/PSD and SRIM programs. *Heliyon*, 9(7), e17725.
- [26] ETİAL. t.y. Ham Alüminyum Ürünleri / Dökümhane Ürünleri. ETİAL. <https://www.etialuminyum.com/urunler/ham-aluminyum-urunler/dokumhane-urunleri/>(Erişim Tarihi: 26.10.2025)
- [27] Liu, Y., Wei, H., Zhu, W., Wang, Y., Yuan, L., Wang, X., Wang, Q., Wang, B. 2025. Fabrication, characterization and optimization design of flexible materials for X-ray shielding with high efficiency. *Radiation Physics and Chemistry*, 226, 112265.
- [28] Sayyed, M. I. 2024. PbO-PbF₂-B₂O₃-SiO₂ glasses: Exploring the impact of PbF₂ in modulating radiation shielding characteristics. *Silicon*, 16, 1321-1328.
- [29] Kamislioglu, M. 2021. Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters. *Results in Physics*, 22, 103844.
- [30] Levet, A. 2024. Investigation of radiation shielding parameters of boron compounds. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 179(3-4), 458-473.
- [31] Sallam, O. I., Issa, S. A. M., Rashad, M., Madbouly, A. M., Tekin, H. O., Badawi, A., Hamdy, A., Zakaly, H. M. H. 2022. Impact of molybdenum on optical, structure properties and gamma radiation shielding parameters of borophosphate glass: Intensive experiment investigations. *Radiation Physics and Chemistry*, 198, 110140.
- [32] Kaky, K. M., Sayyed, M. I. 2024. The radiation shielding parameters of a standard silica glass system. *Silicon*, 16, 1197-1203.
- [33] Kanca, M. S., Taşgın, Y., Yılmaz, D., Pathman, A. F., Güler, Ö. 2024. The effect of high entropy oxide on radiation shielding parameters of erbium oxide doped glasses. *Ceramics International*, 50(9, Part B), 15600-15612.
- [34] Yılmaz, D., Kılıç, A. D., Kalecik, S. 2023. Radiation shielding parameters and micro-Raman spectral analysis of some pyroclastic rocks. *Radiation Physics and Chemistry*, 203(Part A), 110596.
- [35] Turşucu, A., Elmahroug, Y., Yılmaz, D. 2021. Measurement on radiation shielding parameters of Fe_xCr_{1-x} and Fe_xNi_x alloys. *Applied Physics A*, 127, 640.
- [36] Ehab, M., Salama, E., Ashour, A., Attallah, M., Saleh, H. M. 2022. Optical properties and gamma radiation shielding capability of transparent barium borosilicate glass composite. *Sustainability*, 14(20), 13298.
- [37] Alrowaili, Z. A., Echeweozo, E. O., Alomairy, S., Hammoud, A., Sriwunkum, C., Alsaiari, N. S., Boukhris, I., Al-Buriah, M. S. 2025. Gamma attenuation, buildup factors, and radiation shielding performance of CaO-borosilicate

glasses. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 18(1), 101221.

- [38] Singh, T., Kaur, A., Sharma, J., Singh, P. S. 2018. Gamma rays' shielding parameters for some Pb-Cu binary alloys, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1078-1085.
- [39] Abdulazeez, K. M., Sheekhoo, W. A. 2025. Synergistic radiation shielding performance of Cu-based ternary alloys for multifunctional gamma, beta, and neutron radiation protection. *The European Physical Journal Plus*, 140, 877.
- [40] Hossain, Md. S., Barman, R. 2026. Study of attenuation parameters of alloy materials for ionizing radiation using phy-X/PSD and EpiXS, *Radiation Physics and Chemistry*, 238, 113177.
- [41] Almuqrin, A. H., Jecong, J. F. M., F.C. Hila, F. C., Balderas, C. V., Sayyed, M. I. 2021. Radiation shielding properties of selected alloys using EPICS2017 data library, *Progress in Nuclear Energy*, 137,103748.
- [42] Karpuz, N. 2023. Radiation shielding properties of glass composition. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4), 100689.
- [43] Alan, H. Y., Güler, Ö., Yılmaz, A., Susam, L. A., Kavaz, E., Kılıç, G., Ilik, E., Oktik, S., Akkus, B., AlMisned, G., Tekin, H. O. 2025. Exploring the gamma-ray shielding performance of boron-rich high entropy alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, 229, 112512.
- [44] Niksarlıoğlu, S., Akman, F., Pekdemir, M. E., Kuzu, S. Y., Kaçal, M. R., Yılmaz, M. 2023. An extensive investigation on gamma shielding properties of PLA/Gd₂O₃ nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110936.