

Bakır/Alüminyum/Demir/Antimon Alaşımlarının Gama ve Nötron Radyasyonları Zırhlama Karakteristiklerinin İncelenmesi

Seçil NİKSARLIOĞLU*

¹Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Bilim Dalı, Elazığ

¹<https://orcid.org/0000-0002-2904-6307>

*Sorumlu yazar: sniksarlioglu@firat.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 20.05.2025

Kabul tarihi: 26.09.2025

Online Yayınlanma: 16.03.2026

Anahtar Kelimeler:

Gama radyasyonu azaltma

Nötron radyasyonu azaltma

Atom başına yer değiştirme (DPA)

İkincil radyasyon

GEANT4

FLUKA

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, literatürde yaygın kullanım alanına sahip CuAlFe alaşımının ve bu alaşıma farklı ağırlık yüzdelerinde (%3 ve %6) antimon (Sb) katkılanarak oluşan yeni alaşımların gama ve nötron radyasyonu azaltma özelliklerini, alaşımların bu radyasyonlar ile etkileşimi neticesinde oluşan ikincil radyasyonları ve meydana gelen radyasyon hasarını incelemektir. Gama radyasyonu koruma parametreleri 59,5-1332,5 keV enerji aralığında hem deneysel hem WinXCOM, GEANT4 ve FLUKA programları kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. Nötron zırhlama parametreleri, ikincil radyasyon miktarları ve radyasyon hasarı GEANT4 ve/veya FLUKA programları kullanılarak belirlenmiştir. Alaşımdaki Sb miktarının artması ile kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı ve etkin atom numarası değerleri artarken, hızlı nötron için etkin uzaklaştırma tesir kesiti ve toplam makroskopik tesir kesiti kademeli olarak azalmıştır. CuAlFeSb6 alaşımı gama radyasyonuna, CuAlFeSb0 alaşımı nötronlara karşı daha iyi zırhlama sağlamıştır. Hem düşük ve orta enerjili gama radyasyonuna hem de termal (0,025 eV) ve yavaş (100 eV) nötronlara karşı CuAlFeSb0 alaşımı radyasyon hasarı açısından en dayanıklı alaşım olmuştur.

Investigation of Gamma and Neutron Radiation Shielding Characteristics of Copper/Aluminum/Iron/Antimony Alloys

Research Article

Article History:

Received: 20.05.2025

Accepted: 26.09.2025

Published online: 16.03.2026

Keywords:

Gamma radiation attenuation

Neutron radiation attenuation

Displacements Per Atom (DPA)

Secondary radiation

GEANT4

FLUKA

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the gamma and neutron radiation attenuation properties of CuAlFe alloy, which is widely used in the literature, and new alloys formed by adding antimony (Sb) to this alloy at different weight percentages (3% and 6%), the formed secondary radiations as a result of the interaction of the alloys with these radiations, and the resulting radiation damage. Gamma radiation protection parameters were calculated both experimentally and theoretically using WinXCOM, GEANT4 and FLUKA programs in the energy range of 59.5-1332.5 keV. Neutron shielding parameters, secondary radiation amounts, and radiation damage were determined using GEANT4 and/or FLUKA programs. With the increase in the amount of Sb in the alloy, the mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient and effective atomic number values increased, while the effective removal cross section for fast neutrons and total macroscopic cross section gradually decreased. CuAlFeSb6 alloy provided better shielding against gamma radiation, while CuAlFeSb0 alloy provided better shielding against neutrons. CuAlFeSb0 alloy was the most resistant alloy in terms of radiation damage against both low and medium energy gamma radiation and thermal (0.025 eV) and slow (100 eV) neutrons.

To Cite: Niksarlioğlu S. Bakır/Alüminyum/Demir/Antimon Alaşımlarının Gama ve Nötron Radyasyonları Zırhlama Karakteristiklerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(2): 634-655.

1. Giriş

Hızlı ekonomik büyüme ve sürekli artan enerji ihtiyacı son derece verimli ve düşük emisyonlu temiz bir enerji kaynağı olan nükleer enerjinin yaygın olarak kullanımına yol açmıştır. Bu gelişme, insanları ve çevreyi bu endüstrinin neden olduğu elektromanyetik ve parçacık radyasyonundan koruyan, yüksek mukavemet özelliğine sahip malzemelere duyulan ihtiyacı arttırmıştır (Fernández-Arias ve ark., 2020; Qi ve ark., 2022; Yang ve ark., 2024). Nükleer reaktörlerde, atomlardan ve moleküllerden elektroni koparabilecek kadar yüksek enerjiye sahip olabilen gama ışınlarına ek olarak nötron emisyonu da meydana gelmektedir. Karışık radyasyon alanlarına maruz kalınan bu tür ortamlarda yüksek giricilik özelliğine sahip bu radyasyonlardan korunma ana endişe kaynağıdır. Nükleer santraller dışında gama ve nötron radyasyonu tıpta teşhis ve tedavi amaçlı olarak da kullanılmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon sınıfında yer alan bu elektromanyetik dalga ve parçacık sınıfındaki radyasyonlar, canlı dokuda genetik mutasyonlara sebep olma ve DNA'ya zarar verme, malzemelerde ise atom dizilişinde değişikliklere sebep olarak malzemenin kırılmalık gibi mekanik özelliklerinde birtakım değişimlere yol açabilmektedir. Dolayısıyla dikkate alınması gereken konulardan biri de bu alanlarda çalışan kişiler kadar, uzay araçlarında olduğu gibi ilgili ortamlarda bulunan elektronik cihazları korumak ve oluşabilecek radyasyon hasarını minimuma indirecek malzemeler seçmektir. Bu durum, nötron ve gama ışını karışık alanlarda kullanılmak üzere mukavemet ve plastisite arasında iyi bir sinerjiye sahip, hafif, yüksek sıcaklığa dayanıklı, toksik olmayan eş-koruma malzemelerinin acilen geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (AbuAlRoos ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020; Gan ve ark., 2021; Oğul ve ark., 2023; Hao ve ark., 2024; Akman ve ark., 2025). Günümüzde nükleer ve radyasyon tesislerinde gama radyasyonuna, nötronlara ve yüklü parçacıklara olan maruziyeti azaltmak için yeni koruyucu malzemeler bulmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu koruyucu malzemeler arasında polimerler, betonlar, camlar ve alaşımlar gibi çeşitli materyaller yer almaktadır (Agar ve ark., 2019a; Tekin ve Kilicoglu 2020; Karabul ve İçelli 2021; Kavun 2021; Hannachi ve ark., 2022; Hao ve ark., 2024; Kanca ve ark., 2024; Kaya ve ark., 2024; Kayakökü 2024; Yang ve ark., 2024; Erkoyuncu ve ark., 2025; Özdemir ve ark., 2025; Pekdemir ve ark., 2025; Uyar ve ark., 2025). Ancak kullanılacak koruyucu malzeme gereksinimlere göre çeşitlendirilmeli ve basınç, sıcaklık, dayanıklılık, yüksek radyasyon vb. gibi zorlu koşullar altında işlev görecektir şekilde tasarlanmalıdır. Bu açıdan alternatif radyasyon koruma malzemeleri arasında alaşımlar literatürde büyük önem kazanmıştır (Agar ve ark., 2019b; Akman ve ark., 2019; Kaur ve ark., 2019; Tekin ve Kilicoglu 2020; Ekinci ve ark., 2021; Turhan ve ark., 2022; Aygun ve ark., 2023; Saleh ve ark., 2024; Abdelhakim ve ark., 2025).

Alaşımlar, farklı metal türlerinin birleşimi olup; ana elemente nispeten küçük miktarlarda ikincil elementlerin eklenmesiyle kendisini oluşturan elementlerden daha üstün özellikler sergileyen malzemelerdir (Tekin ve Kilicoglu 2020). Bu sebeple son dönemde birçok araştırmacı düşük ve yüksek atom numaralı elementlerle katılanmış metal alaşımları üreterek hem gama hem de nötron radyasyonuna karşı koruma sağlayan malzemeler üzerinde çalışmaya başlamıştır. Seenappa ve ark., (2018), farklı oranlarda Mg, Gd, Y, Zn, Zr elementlerini içeren alaşımların X-ışını, gama ve nötron

etkileşimlerinin detaylı analizini yaptılar ve ürettikleri alaşımlar arasında Mg-8,2Gd-7,8Y-1,0Zn-0,4Zr alaşımının bu radyasyon türlerinin tamamı için diğerlerinden daha iyi koruma sağladığı sonucuna vardılar. Dong ve ark., (2019), bazı bor içeren kaynakların gama ışını ve hızlı nötronlar için koruma parametrelerini incelediler ve bor içeren demir konsantresinin her iki radyasyon türünü zırlamada iyi olduğu sonucuna vardılar. Manjunatha ve ark., (2019), yüksek miktarda alüminyum veya silisyum içeren bazı alaşımların X-ışını, gama ve nötron radyasyonu zırlama özelliklerini teorik olarak incelediler ve Ferro-Silikon alaşımının tüm bu radyasyon türleri için en iyi korumayı sağlayan malzeme olduğu sonucuna vardılar. Tekin ve Kılıçoğlu (2020), Pd/Mn ikili alaşımına Ga katkılarak oluşan alaşımların 0,02-15 MeV enerji aralığında gama radyasyonu ve nötron zırlama özelliğini MCNPX simülasyon kodu ile teorik olarak inceledi ve % 0 Ga içeren alaşımın nötron zırlamada, %25 Ga içeren alaşımın gama radyasyonunu azaltmada etkili olduğu sonucuna vardılar. Levet ve ark., (2020) farklı miktarlarda bor eklenmiş Fe-B alaşımlarının gama ve nötron radyasyonu zırlama özelliklerini hem deneysel hem de teorik olarak incelendiler ve Fe-B alaşımlarının gama radyasyonuna göre nötron radyasyonunu azaltmada daha başarılı olduğu sonucuna vardılar. Hamad ve ark., (2021), $Fe_xSe_{0,5}Te_{0,5}$ alaşımlarının foton, nötron ve proton zırlama özelliklerini SRIM ve Phy-X programları kullanımıyla teorik olarak araştırdılar ve $Fe_{0,95}Se_{0,5}Te_{0,5}$ alaşımının incelenen alaşımlar arasında bu radyasyonlara karşı en iyi zırlama malzemesi olduğunu bildirdiler. Yan ve ark., (2025), Kalay-Bizmut alaşımına farklı miktarlarda nano- B_4C parçacıkları katkılarak oluşan alaşımın hem mekanik özelliklerindeki değişimi hem de gama ve nötron radyasyonu zırlama yeteneklerini incelediler. Ürettikleri alaşımlar arasında Sn-10,92Bi-9B $_4$ C numunesinin hem mekanik özelliklerinin hem de gama ve nötron radyasyonu koruma performansının çok iyi olduğu ve 0,03–0,08 MeV enerji aralığında gama ışını koruma yeteneğinin Pb'ninkini aştığı sonucuna vardılar. Ding ve ark., (2025), Al-5Cu-6Gd-10Bi alaşımının termal nötron ve gama radyasyonu zırlama özelliğini GEANT4 programı ile teorik olarak incelediler ve karışık radyasyon alanlarında zırlama için umut verici bir malzeme olduğu sonucuna vardılar.

Gerek yukarıda özetlenen çalışmalar gerekse literatürde yer alan alaşım çalışmalarının büyük bir kısmı hafiflik ve belirli enerji aralığındaki radyasyonlara karşı koruma sağlama dışında işlevsellik açısından bir farkındalık sunmamaktadır. Bununla birlikte süperelastiklik ve bir dış kuvvet ile deforme olduğunda sıcaklık veya mekanik stres gibi başka bir dış uyaran ile orijinal şekline dönebilme özelliğine sahip, bilinen geleneksel malzemelerden farklı fonksiyonel özelliklere sahip olan şekil hafızalı alaşımların (SHA) son dönemde radyasyonlu ortamlarda kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmaların arttığı görülmektedir. Örneğin; Niccoli ve ark., (2019), Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde (CERN) bazı kısıtlı erişimli radyoaktif alanlarda kullanılmak üzere sıcaklık değişiklikleriyle uzaktan etkinleştirilerek kontrol edilebilecek NiTi SHA'lardan oluşan civatasız kuplörlerin tasarlanmasını ve bu malzemelerin maruz kalınan parçacık radyasyonuna karşı mekanik ve işlevsel özelliklerinde bir değişimin meydana gelip gelmediğini araştırmışlardır. Bunun için CERN hızlandırıcılarının gelecekte çalışılması beklenen koşulları temsil eden bir radyasyon ortamı FLUKA simülasyon programı kullanılarak oluşturulmuş ve ışınlama sonrasındaki süreci simüle etmişlerdir. Malzemenin sızdırmazlık özelliğinin ışınlama

sonrasında değişmediği ancak parçacık radyasyonuna maruz kalan ŞHA'larda meydana gelen hem mekanik hem de işlevsel hasarların daha derin ve kapsamlı bir şekilde anlaşılması için daha fazla araştırmanın uzun zaman dilimleri için yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu kapsamda yüksek enerjili karma radyasyon alanına maruz kalan ŞHA tabanlı vakum düzeneklerinin sürekli sızdırmazlık izlenimine devam etmektedirler. Niksarlıoğlu ve ark., (2024), Sn katkılı CuAlNi temelli ŞHA'ların gama radyasyonu azaltma özelliği ile radyasyon öncesi ve sonrası malzemenin kristal yapısında meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Ürettikleri alaşımlar arasında CuAlNiSn4 alaşımının 59,5 keV'lik gama radyasyonu azaltma özelliğinin Fe bazlı alaşımlardan daha iyi olduğu, SEM ve XRD sonuçlarına göre alaşımların şekil hafıza özelliklerinin radyasyon sonrasında bir değişim göstermediği sonucuna varmışlardır. Kalay ve ark., (2025), CuAlMn bazlı yüksek sıcaklık ŞHA'ların termal, yapısal ve radyasyon zırlama özellikleri üzerinde Ce ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, Ce-III kodlu alaşımın optimum radyasyon azaltma özelliğine ve faz kararlılığına sahip olduğunu göstermiştir. Salh ve ark., (2025), farklı Al miktarlarına sahip CuAlNi ŞHA'ların 511-1333 keV enerji aralığındaki gama radyasyonunu azaltma özelliğini NaI(Tl) dedektörü kullanımıyla deneysel ve WinXCom ile Phy-X/PSD programları kullanarak teorik olarak incelediler. Bu alaşımlar içinde %13,5 Al içeren ŞHA'nın gama radyasyonu azaltma özelliğinin daha iyi olduğu sonucuna vardılar. Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilen şekil hafıza özelliğine sahip bir diğer alaşım Cu bazlı, CuAlFe alaşımıdır. Cu bazlı ŞHA'lar NiTi alaşımlarına göre daha ekonomik bir alternatif olup; birçok endüstriyel alanda, biyomedikal uygulamalarda, otomotiv ve havacılık endüstrisinde, sensör, aktüatör teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Aldirmaz ve ark., 2020; Balci ve Akpınar 2021; Karaduman ve ark., 2024a; Karaduman ve ark., 2024b; Santosh ve ark., 2024). Yapılan literatür araştırması sonunda böyle geniş bir kullanım alanına sahip CuAlFe ŞHA'larının yalnızca termal ve yapısal özelliklerinin incelendiği ancak gama ve nötron radyasyonu azaltma özelliği ile bu radyasyon türleriyle etkileşim sonucunda atomik düzeninde meydana gelebilecek değişimlerin incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle çalışmada, CuAlFe alaşımının ve bu alaşıma farklı oranlarda Sb katkılanması ile üretilen alaşımların 59,5-1332,5 keV enerji aralığındaki gama radyasyonu azaltma özelliği, gama ve nötron radyasyonu etkileşimi neticesinde oluşan ikincil parçacık sayısı ve ortalama enerjileri, nötron radyasyonu azaltma özelliği ve bu iki radyasyon ile ayrı ayrı etkileşimleri sonucunda malzemenin atomik düzeninde meydana gelen hasar GEANT4 ve/veya FLUKA programları kullanılarak incelenmiştir. Malzemenin gama radyasyonu azaltma özelliği ayrıca WinXCOM yazılımı ile de değerlendirilmiştir. Bunların yanı sıra alaşımların gama radyasyonu azaltma özelliği deneysel ölçümleri yüksek saflıkta Germanyum dedektör (HPGe) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Alaşımların Hazırlanması

Alaşımlar, mikro boyutlu toz formunda Bakır (%99,0), Alüminyum (%99,7); Demir (%99,7) ve Antimon (%99,7) elementleri kullanılarak üretildi. İlk olarak %83 Cu, %13 Al ve %4 ağırlık yüzdelere

sahip ana malzeme olan CuAlFe alaşımları, ardından %3 ve %6 ağırlık oranlarında Sb katkılanan alaşımlar üretildi. Bu alaşımlara ait yüzde miktarları ve isimleri Tablo 1’de verilmiştir. Üretim için ilk olarak toz formundaki elementlerin kütleleri %0,0001 hassasiyete sahip hassas terazi kullanılarak belirlendi. Kütleleri ölçülen elementler kapalı bir kap içerisinde bir araya getirilerek mekanik bir karıştırıcı yardımı ile yaklaşık yarım saat boyunca homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırıldı. Homojen hale gelen bu toz karışımlar 5 ton kapasiteli ve 13 mm çapında SPECAC hidrolik pres makinası kullanılarak pelet haline getirildi ve bu peletler 900 °C sıcaklığa ayarlanan fırında 8 saat bekletildi. Bu süre sonunda atomik difüzyonunun önlenmesi için alaşımların tuzlu buzlu suya atılarak soğutulması ile üretim tamamlandı.

Tablo 1. Cu, Al, Fe ve Sb içeren alaşımların kütlece element yüzdeleri

Örnek Kodu	Yüzde Element Bileşenleri (%)				Alaşımların Yoğunluğu (gr/cm ³)
	Cu	Al	Fe	Sb	
CuAlFeSb0	83	13	4	-	6,8642
CuAlFeSb3	80	13	4	3	6,8109
CuAlFeSb6	77	13	4	6	6,7584

2.2. Radyasyon Koruma Parametrelerinin Belirlenmesi

Hazırlanan alaşımların gama radyasyonu azaltma özelliği hem deneysel hem teorik olarak, nötron radyasyonu azaltma özelliği ise yalnızca teorik olarak belirlenmiştir. Deneysel gama radyasyonu ölçümleri ²⁴¹Am (59,5 keV), ¹³³Ba (81,0; 276,4; 302,9; 356,0; 383,9 keV), ²²Na (511,0; 1274,5 keV), ¹³⁷Cs (661,7 keV), ⁶⁰Co (1173,2; 1332,5 keV) nokta radyoaktif kaynakları ile yüksek saflıkta HPGe dedektör sistemi kullanılarak, nötron radyasyonu etkileşimi teorik hesaplamaları ise termal (0,025 eV), yavaş (100 ev) ve hızlı nötronlar (4,5 ve 10 MeV) için gerçekleştirilmiştir. Teorik hesaplamalar; radyasyon ve madde arasındaki etkileşimi modelleme ve tanımlama da yaygın olarak kullanılan Monte Carlo metodunu temel alan GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları ile 1×10⁷ gama ışını fotonu ve nötron gönderilerek yapılmıştır. Gama radyasyonunun teorik hesaplamasında ayrıca Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından geliştirilen WinXCOM programı da kullanılmıştır (Gerward ve ark., 2001). Malzemenin bu radyasyon türleri ile etkileşiminden sonra meydana gelen ikincil radyasyon miktarları ve ortalama enerjileri ile toplam iyonize doz (TID) ve atom başına yer değiştirme (DPA) sonuçları GEANT4 ve/veya FLUKA simülasyon programları ile hesaplanmıştır. Bir alaşım veya karışımın gama radyasyonu azaltma özelliğinin belirlenmesinde önemli bir parametre olan kütle azaltma katsayısı (μ/ρ, cm²g⁻¹), Eşitlik 1 ile verilmektedir (Akman ve ark., 2025).

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

Burada, W_i ve $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ sırasıyla i . elementin alaşım içindeki ağırlık kesrini ve kütle azaltma katsayısını ifade etmektedir. Kütle azaltma katsayısı maddenin fiziksel halinden ve yoğunluktan bağımsız bir parametredir (Özdemir ve ark., 2022). Radyasyonun malzeme ile birim kalınlık başına etkileşime girme olasılığı olarak tanımlanan lineer azaltma katsayısı (μ, cm⁻¹), gama ışınlarının malzeme içinde maruz

kaldığı farklı etkileşim (fotoelektrik, Compton saçılması, çift oluşumu) olasılıklarının toplamı olarak ifade edilir. Malzemenin yoğunluğuna bağlı bir parametre olan μ , kütle azaltma katsayısı ile malzemenin yoğunluk değerinin çarpımından hesaplanabilir (Akman ve ark., 2025). Radyasyondan korunma da önemli olan parametrelerden bir diğeri de gelen radyasyon şiddetini yarıya düşürmek için gereken malzeme kalınlığı olarak tanımlanan yarı kalınlık değeridir (HVL) ve Eşitlik 2 kullanılarak elde edilir (Akman ve Oğul, 2025).

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

Her element tek bir atom numarasıyla sembolize edilirken, alaşımlar ve kompozitler gibi birden fazla element içeren malzemeler için etkin atom numarasının (Z_{etk}) hesaplanması gerekir. Bir elementin gama radyasyonu azaltma özelliği atom numarası ile ilişkili olduğundan, radyasyonun etkileştiği alaşımların Z_{etk} değerinin hesaplanması da oldukça önemlidir. Atomik tesir kesitinin (σ_a), elektronik tesir kesitine (σ_e) oranı olarak tanımlanan Z_{etk} parametresi Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanır (Dilsiz ve ark., 2021). Atomik tesir kesiti (σ_a) ve elektronik tesir kesiti (σ_e) ile ilgili detaylı hesaplama bilgileri Akman (2023)'te yer almaktadır (Akman, 2023).

$$Z_{etk} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (3)$$

Bir malzemenin nötron radyasyonu azaltma özelliğini belirleyen toplam makroskopik tesir kesiti (Σ_T) Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanır (Akkaş ve ark., 2025; Kurşun ve ark., 2025).

$$\Sigma_T = \frac{\ln \left(\frac{I_0}{I} \right)}{x} \quad (4)$$

Burada, I_0 ve I , sırasıyla malzemeye gelen ve geçen nötron sayısını; x ise malzemenin kalınlığını ifade etmektedir. Toplam makroskopik tesir kesiti, aynı zamanda nötronların çekirdek ile etkileşmesi esnasında meydana gelen saçılma, soğurma ve yakalama gibi olayların tesir kesitlerinin toplamıdır. Nötron radyasyonundan korunmada temel prensip, öncelikle hızlı nötronların esnek ve esnek olmayan çarpışma yoluyla enerjisini termal enerji seviyesine düşürmek ve ardından bu enerjideki nötronların yakalama tesir kesiti yüksek elementler ile soğurulmasını sağlamaktır. Bir malzemenin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti Eşitlik 5 ile hesaplanır (Akyıldırım, 2019; Gaylan ve ark., 2021).

$$\Sigma_R = \sum_i \rho_i (\Sigma_{R/\rho})_i \quad (5)$$

Burada, $(\Sigma_{R/\rho})_i$ malzemedeki i . elementin kütle uzaklaştırma tesir kesitini, ρ_i ise i . elementin kısmi yoğunluğunu ifade etmektedir. Toplam makroskopik tesir kesiti kullanılarak hesaplanan parametre,

nötronların iki ardışık çarpışması arasındaki ortalama uzaklığı olarak tanımlanan ortalama serbest yoldur (MFP) ve Eşitlik 6 ile hesaplanır (Şahmaran ve Tuğrul, 2023).

$$MFP = \frac{1}{\Sigma_T} \quad (6)$$

3. Bulgular ve Tartışma

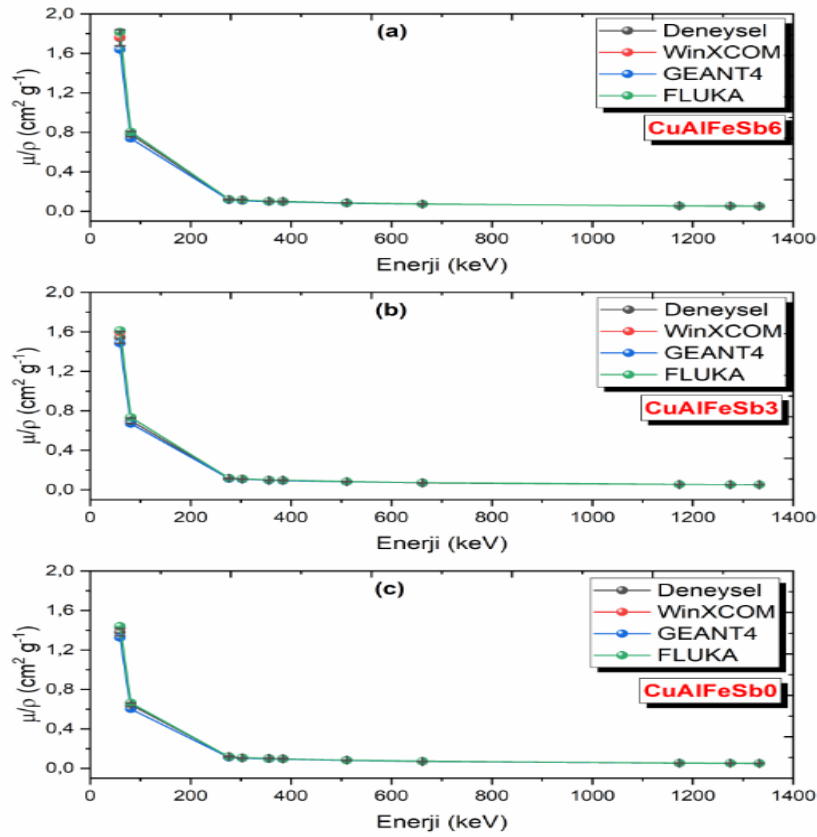
Çalışmada farklı ağırlık yüzdelerinde (%3, %6) Sb katkılanan CuAlFe alaşımlarının gama ve nötron radyasyonu zırlama özelliği bazı radyasyon parametreleri hesaplanarak incelenmiştir. Gama radyasyonu zırlama parametreleri olan; kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma katsayısı (μ), yarı kalınlık değeri (HVL), etkin atom numarası (Z_{etk}) değerleri 59,5-1332,5 keV enerji aralığında deneysel ve teorik olarak hesaplanmıştır. Alaşımlardan geçen termal, yavaş ve hızlı nötron sayıları ile nötron radyasyonu zırlama parametreleri olan; toplam makroskobik tesir kesiti (Σ_T), hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri GEANT4 ve/veya FLUKA programları kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmada gama ve nötron radyasyonunun alaşımlar ile etkileşime girmesinden sonra oluşan ikincil radyasyonların miktarları ve ortalama enerjileri ile toplam iyonlaştırıcı doz (TID) ve atom başına yer değiştirme (DPA) parametreleri GEANT4 ve/veya FLUKA yazılım programları kullanılarak hesaplanmış ve alaşımlarda meydana gelen radyasyon hasarları incelenmiştir.

Üretilen alaşımların gama ışını etkileşimlerini değerlendirmek için elde edilen kütle azaltma katsayısının (μ/ρ , cm^2g^{-1}) enerjiye bağlı değişim grafiği Şekil 1’de, deneysel ve teorik değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu değer hesaplandıktan sonra diğer gama radyasyonu parametreleri (μ , HVL, Z_{etk}) elde edilmiştir.

Şekil 1 incelendiğinde alaşımların μ/ρ değerlerinin artan enerji ile azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni gama ışınının madde ile etkileşiminde baskın olan fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu olaylarının tesir kesitlerinin farklı enerji bölgelerinde etkin olmasıdır. Bununla birlikte malzemelerin kimyasal bileşimi μ/ρ değerinde farklılıklara neden olan bir diğer unsurdur. Çünkü μ/ρ değeri atom numarası ile değişmektedir ve malzemenin bileşimindeki değişim atom numarasının değerini etkilemektedir (Özdemir ve ark., 2022; Akman ve Oğul, 2025). Fotoelektrik tesir kesiti, gama radyasyonunun maddeyle en çok etkileşime girdiği düşük enerji bölgesinde $Z^{4.5}$ (Z , atom numarası) ve $E^{-3.5}$ (gama enerjisi) ile orantılı olarak değiştiğinden üretilen alaşımların μ/ρ değeri düşük enerji bölgesinde keskin bir düşüş göstermiştir. Orta enerji bölgesinde gama enerjisi E^{-1} şeklinde ve atom numarası Z ile doğrusal bir şekilde değişen Compton saçılma tesir kesiti baskın olduğundan, bu aralıkta μ/ρ değerindeki azalma veya değişim daha az olmuştur. Yüksek enerji bölgesinde çift oluşum baskın süreç haline geldiğinden ve tesir kesiti Z^2 ve E ile orantılı olduğundan bu enerji aralığında μ/ρ değerleri hemen hemen sabit kalmıştır. Şekil 1 ve Tablo 2’deki değerler incelendiğinde Sb katkısı arttıkça μ/ρ değerinin arttığı ve

üretileen alaşımlar arasında CuAlFeSb6 alaşımlarının düşük enerjili gama radyasyonundan koruma performansının diğer alaşımlara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

CuAlFeSb6 alaşımlarının μ/ρ değlerleri literatürde yer alan bazı Cu bazlı ikili ve üçlü alaşımlar ile kıyaslanmıştır. Kaewkhao ve ark., (2008)'nın ağırlıkça %65,53 Cu ve %34,47 Zn içeren Cu/Zn alaşımlarının 356-1275 keV enerji aralığında sahip olduğu μ/ρ değlerini araştırdığı çalışmada elde edilen değler ile CuAlFeSb6 alaşımlarının bu enerji aralığında elde edilen μ/ρ değlerinin birebir aynı olduğu görölmektedir. Dolayısıyla bu durum ilgili enerji aralığında iki alaşımlarında eş değ koruma sağlayacağı şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca, Limkitjaroenporn ve ark., (2012)'nin ağırlıkça %14,8 Ag, %57,61 Cu, %27,59 Zn içeren üçlü alaşımlarının 220-662 keV enerji aralığında radyasyon koruma parametrelerini belirlediği çalışmada, 662 keV enerjili gama radyasyonu için elde edilen μ/ρ değinin CuAlFeSb6 alaşımlarını ile aynı olduğu görölmüştür.



Şekil 1. Üretileen alaşımların kütle azalma katsayısının enerjiye göre değışimi

Turhan ve ark., (2022) $\text{Cu}_x\text{Ag}_{(1-x)}$ ($x = 0,2-0,4-0,5-0,6$ ve $0,8$) alaşımlarının gama radyasyonu zırhlama özelliğini 59,5-1332,5 keV enerji aralığında incelemiştir. Yaptıkları bu çalışmada $\text{Cu}_{0,6}\text{Ag}_{0,4}$ alaşımlarının 1173,2, 1274,5 ve 1332,5 keV enerjilerinde μ/ρ değlerini sırasıyla 0,0542, 0,0519 ve 0,0507 cm^2/g olarak; $\text{Cu}_{0,8}\text{Ag}_{0,2}$ alaşımlarının μ/ρ değlerini aynı enerji aralığında sırasıyla 0,0543, 0,0520 ve 0,0508 cm^2/g olarak hesaplamışlardır. Tablo 2 incelendiğinde CuAlFeSb6 alaşımlarının aynı enerji aralığında μ/ρ değlerinin bu alaşımlardan daha yüksek olduğu görölmektedir. Dolayısıyla bu durum yüksek enerji bölgesinde CuAlFeSb6 alaşımlarının $\text{Cu}_{0,6}\text{Ag}_{0,4}$ ve $\text{Cu}_{0,8}\text{Ag}_{0,2}$ alaşımlarından daha iyi koruma

sağladığı şeklinde yorumlanabilir. Niksarlıoğlu ve ark., (2024)'nın 59,5-1332,5 keV enerji aralığında Sn katkılanmış CuAlNi alaşımlarının radyasyon koruma özelliğini incelediği çalışmada, üretilen alaşımlar arasında en iyi zırhlama özelliğine sahip CuAlNiSn4 alaşımının μ/p değerlerinin teorik olarak 1,6514 ve 0,0512 cm²/g aralığında değiştiğini görmüşlerdir. Mevcut çalışmamızda ürettiğimiz CuAlFeSb6 alaşımının μ/p değerlerinin 511 keV enerjiye kadar daha büyük olduğu daha yüksek enerjilerde ise değerlerin CuAlNiSn4 alaşımının μ/p değerine hemen hemen eşit olduğu görülmektedir (Tablo 2). Bu da CuAlFeSb6 alaşımının düşük ve orta enerji bölgesinde CuAlNiSn4 şekil hafızalı alaşımından daha iyi zırhlama sağladığı anlamına gelmektedir. Salh ve ark., (2025) tarafından incelenen Cu bazlı ağırlıkça %13 Al ve %4 Ni içeren CAN1 kodlu alaşım ile yine Cu bazlı %13,5 Al ve %4 Ni içeren CAN2 kodlu şekil hafızalı alaşımın 511 ve 661,7 keV enerjilerinde sahip olduğu μ/p değerleri sırasıyla 0,0798 ve 0,0713 cm²/g olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık sunulan çalışmada üretilen CuAlFeSb6 alaşımının μ/p değeri aynı enerjilerde 0,0835 ve 0,0731 cm²/g olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Bu sonuçlar CuAlFeSb6 alaşımının CAN1 ve CAN2 kodlu şekil hafızalı alaşımlardan daha iyi zırhlama sağladığı şeklinde yorumlanmaktadır. Çalışmada elde edilen deneysel değerler ile WinXCOM, GEANT4 ve FLUKA programları ile elde edilen teorik sonuçların uyum içinde olduğu ve düşük enerjili gama bölgesinde GEANT4 ile elde edilen sonuçların diğer programlardan elde edilen sonuçlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. GEANT4 yazılım sisteminin merkezinde, parçacıkların maddeyle çok geniş bir enerji aralığındaki etkileşimlerini ele alan zengin bir fizik modelleri seti yer almaktadır. Elektromanyetik süreçlerin simülasyonunda kullanılan Standart Elektromanyetik (EM) model fotoelektrik tesir kesiti hesaplamasında yeterince hassas olmadığından yüksek atom numaralı elementlerde dahi soğurma oranlarını daha düşük hesaplamaktadır. Aynı durum yüksek enerji bölgesinde meydana gelen olayların tesir kesiti hesaplamalarında geçerli olmadığından değerler birbirine yaklaşmaktadır (Anh ve ark., 2021).

Kütle azaltma katsayısının yoğunluk ile çarpılması sonucunda hesaplanan lineer azaltma katsayısı (μ); bir malzemenin birim kalınlık başına gama radyasyonu ile etkileşime girme olasılığını ifade ettiğinden ve malzemelerin yarı kalınlık değerleri (HVL) ve onda-bir kalınlık değerleri (TVL) gibi farklı radyasyon koruma parametrelerinin elde edilmesinde kullanıldığından hesaplanması gereken bir parametredir. μ değerleri, μ/p değeri gibi gelen radyasyonun enerjisine bağlı olarak aynı etkileşim süreçleri (fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu) ile değişir. Tek fark μ 'nün yoğunluğa bağlı olmasıdır. Üretilen alaşımların lineer azaltma katsayısının enerjiye bağlı değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'ye göre CuAlFeSb6 alaşımı en yüksek, CuAlFeSb0 alaşımı ise en düşük μ değerine sahiptir. Bu durum yüksek atom numarasına sahip elementin, düşük atom numarasına sahip elementten daha etkili bir şekilde gama zırhlaması sağladığını ve yüksek atom numarasına ait elementin katkılama miktarının artmasıyla gama radyasyonu zırhlama özelliğinin daha da geliştiğini göstermektedir. Dolayısıyla CuAlFeSb6 alaşımının μ değeri, düşük ve orta enerji bölgesinde diğer alaşımlardan daha yüksek olduğundan bu aralıkta gama radyasyonuna karşı daha iyi zırhlama sağlayacaktır. Ayrıca, gama radyasyonu enerjisi arttıkça alaşımların sahip olduğu μ değerleri arasındaki farkın azaldığı ve hemen hemen birbirine yaklaştığı

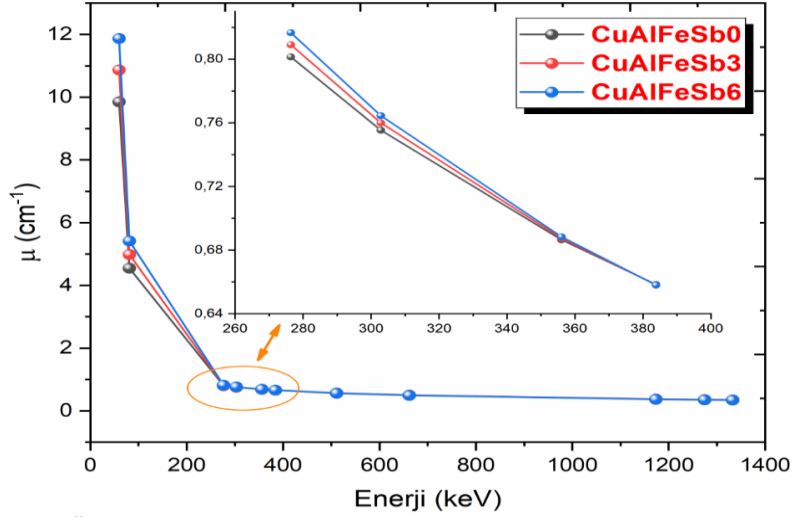
görülmektedir. Bu durum belli bir enerji değerinden sonra üretilen alaşımların hemen hemen aynı zırlama özelliğine sahip olacağı şeklinde yorumlanabilir.

Tablo 2. İncelenen alaşımların farklı metotlarla belirlenmiş kütle azalma katsayısı (cm^2/g) sonuçları

Enerji (keV)	CuAlFeSb0			
	Deneyssel	WinXCOM	GEANT4	FLUKA
59,5	1,3806±0,0363	1,4375	1,3261	1,4423
81,0	0,6445±0,0169	0,6636	0,6027	0,6644
276,4	0,1188±0,0050	0,1169	0,1106	0,1170
302,9	0,1047±0,0029	0,1102	0,1050	0,1102
356,0	0,1013±0,0022	0,1001	0,0963	0,1002
383,9	0,0974±0,0042	0,0960	0,0930	0,0961
511,0	0,0836±0,0021	0,0828	0,0815	0,0828
661,7	0,0699±0,0015	0,0729	0,0724	0,0729
1173,2	0,0537±0,0013	0,0547	0,0547	0,0547
1274,5	0,0521±0,0014	0,0524	0,0525	0,0524
1332,5	0,0510±0,0012	0,0513	0,0513	0,0513

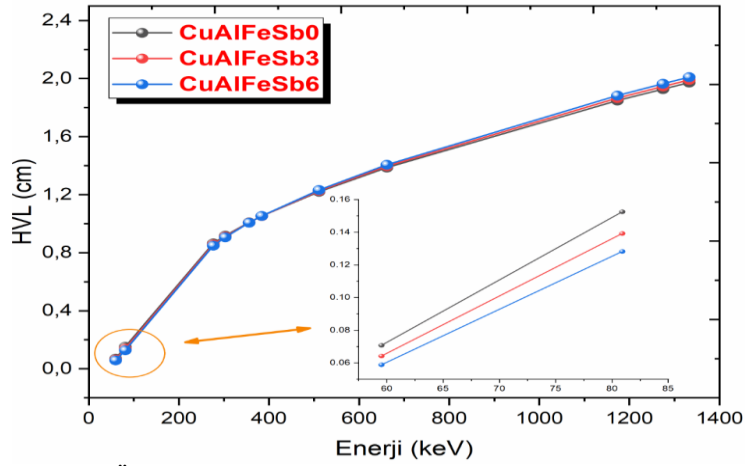
Enerji (keV)	CuAlFeSb3			
	Deneyssel	WinXCOM	GEANT4	FLUKA
59,5	1,5428±0,0612	1,5996	1,4843	1,6157
81,0	0,6990±0,0267	0,7336	0,6700	0,7350
276,4	0,1164±0,0049	0,1190	0,1125	0,1190
302,9	0,1086±0,0029	0,1118	0,1064	0,1118
356,0	0,0974±0,0021	0,1011	0,0972	0,1013
383,9	0,0971±0,0039	0,0968	0,0936	0,0969
511,0	0,0825±0,0020	0,0831	0,0817	0,0832
661,7	0,0700±0,0015	0,0730	0,0724	0,0730
1173,2	0,0544±0,0013	0,0546	0,0546	0,0546
1274,5	0,0521±0,0014	0,0524	0,0524	0,0524
1332,5	0,0521±0,0012	0,0512	0,0512	0,0512

Enerji (keV)	CuAlFeSb6			
	Deneyssel	WinXCOM	GEANT4	FLUKA
59,5	1,7574±0,0814	1,7617	1,6384	1,8170
81,0	0,7812±0,0266	0,8035	0,7368	0,8049
276,4	0,1186±0,0050	0,1212	0,1145	0,1211
302,9	0,1153±0,0032	0,1134	0,1079	0,1135
356,0	0,1009±0,0022	0,1021	0,0980	0,1023
383,9	0,0988±0,0038	0,0976	0,0943	0,0977
511,0	0,0853±0,0021	0,0835	0,0819	0,0835
661,7	0,0730±0,0016	0,0731	0,0725	0,0731
1173,2	0,0545±0,0013	0,0546	0,0546	0,0546
1274,5	0,0531±0,0014	0,0523	0,0523	0,0523
1332,5	0,0519±0,0012	0,0511	0,0511	0,0511



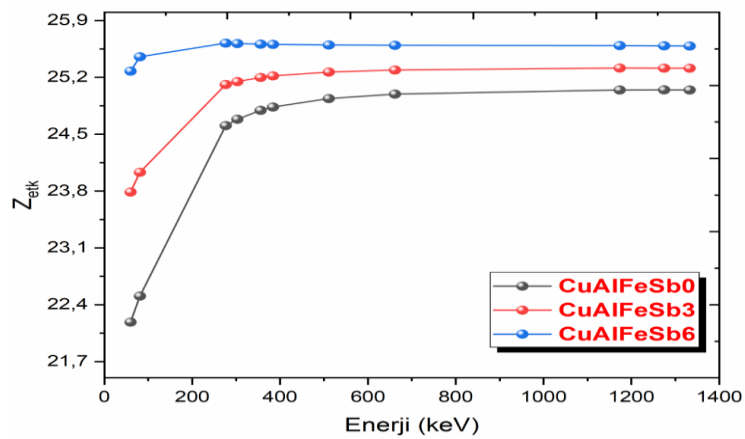
Şekil 2. Üretilen alaşımların lineer azalma katsayısının enerjiye göre değişimi

Malzemelerin radyasyona karşı koruma özelliği belirlenirken üretilecek malzemenin kalınlığı da önem arz etmektedir. Bu nedenle gelen radyasyon şiddetini yarıya düşüren malzeme kalınlığının, üretilen malzemenin boyutlarının kullanıma uygun olup olmadığına karar verilmesi açısından hesaplanması gereklidir. Yarı kalınlık değeri (HVL), lineer azalma katsayısına (μ) bağlı olarak belirlenmekte olup aralarında ters orantılı bir ilişki vardır. Bir malzemenin HVL değerinin küçük olması o malzemenin radyasyon azaltma özelliğinin o kadar fazla olduğu veya daha iyi zırhlama sağladığı anlamına gelmektedir (Akman ve ark., 2025). Üretilen alaşımlar için elde edilen HVL değerlerinin enerjiye bağlı değişim grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Bu şekle göre HVL değerlerinin artan enerji değeri ile arttığı ve düşük enerji bölgesinde CuAlFeSb6 alaşımının en düşük HVL değerine sahip olduğu, bunu sırasıyla CuAlFeSb3 ve CuAlFeSb0 alaşımlarının takip ettiği görülmektedir. Dolayısıyla düşük enerji bölgesinde CuAlFeSb6 alaşımı CuAlFeSb3 ve CuAlFeSb0 alaşımlarından daha etkin korumaya sahiptir. Bu HVL değerinin alaşımın içeriğine bağlı olarak değiştiğini gösterir. Alaşımın içeriğinde yüksek atom numarasına (Sb=51) sahip element arttıkça; fotonların alaşım ile etkileşimi artacağından malzeme içerisinde daha kısa mesafelere hareket edebilecektir. Bu nedenle düşük enerji bölgesinde CuAlFeSb6 alaşımı en düşük HVL değerine sahip olurken, CuAlFeSb0 alaşımı en yüksek HVL değerine sahip olmuştur. Yüksek enerji bölgesinde alaşımların zırhlama performansının nispeten küçük olduğu, CuAlFeSb6 alaşımının aynı korumayı bu enerji aralığında sağlayamadığı görülmektedir. Bu durum yüksek enerjili fotonlar ile alaşımdaki atomlar arasında nispeten az sayıda etkileşimin meydana geldiğini ve bu fotonların yüksek nüfuz gücüne sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Üretilen alaşımların HVL değerinin enerjiye göre değişimi

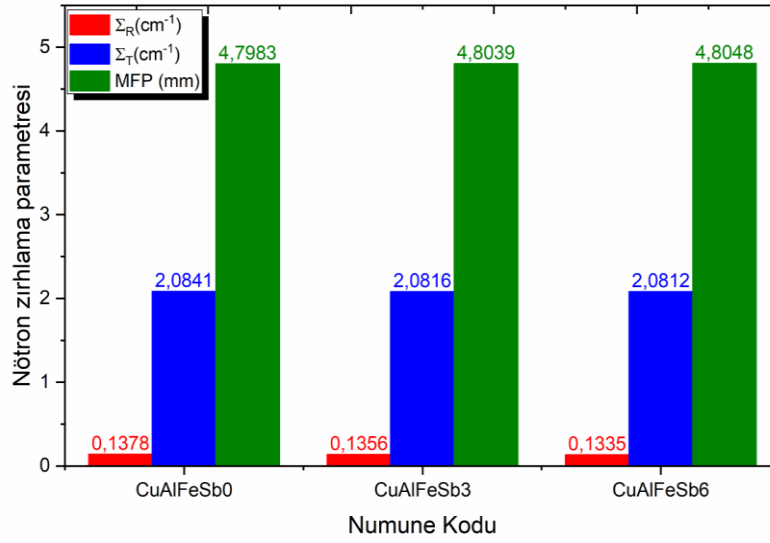
Radyasyon fiziğinde fotonların ve yüklü parçacıkların malzeme ile nasıl etkileşime girdiğini analiz etmek için yaygın olarak kullanılan bir diğer parametre etkin atom numarasıdır (Z_{etk}). Şekil 4, üretilen alaşımların Z_{etk} değerinin enerjiye bağlı değişim grafiğini göstermektedir. Yüksek Z_{etk} değeri malzemenin gelen gama radyasyonu ile etkileşime girme yeteneğinin daha fazla olduğunu gösterir. Gama enerjisine bağlı olarak meydana gelen etkileşimler sebebiyle bazı dalgalanmalar yaşanabileceği farklı çalışmalarda görülmüştür (Mnajunatha ve ark., 2019; Özdemir ve ark., 2022; Akman ve ark., 2025). Şekil 4 incelendiğinde daha yüksek Sb içeriği nedeniyle enerji spektrumu boyunca en yüksek Z_{etk} değerine CuAlFeSb6 alaşımının sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla CuAlFeSb6 alaşımı üretilen alaşımlar arasında yüksek gama radyasyonu etkileşim oranına ve daha iyi gama radyasyonu azaltma özelliğine sahip alaşımdır. Bu durum CuAlFeSb6 alaşımının daha büyük μ/ρ değerine sahip olması ile de uyum göstermektedir. Ayrıca Şekil 4 incelendiğinde üretilen alaşımların Z_{etk} değerlerinin 511 keV enerji değerine kadar üstel olarak arttığı bu enerji değerinden sonra ise neredeyse sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 4. Üretilen alaşımların Z_{etk} değerinin enerjiye göre değişimi

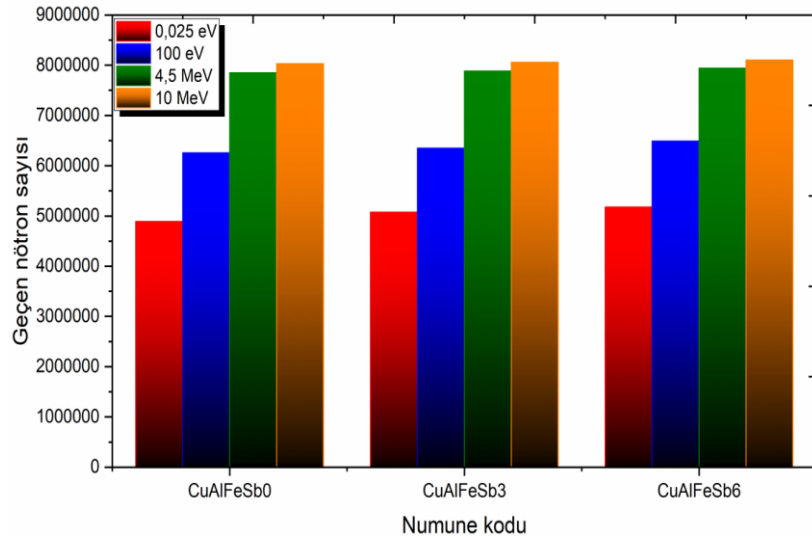
Hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) ve toplam makroskopik tesir kesiti (Σ_T) uygulamalarda nötron azaltması için önemli olan parametrelerdir. Herhangi bir malzemenin Σ_R ve Σ_T tesir kesitleri ne kadar yüksekse, malzeme atomlarının nötron parçacıkları ile çarpışma olasılığı da o kadar yüksektir.

(Akyıldırım, 2019; Gaylan ve ark., 2021; Akman ve Oğul, 2025). Dolayısıyla nötron zırlama çalışmalarında kullanılacak malzemeler için bu değerlerin yüksek olması istenir. Bu aynı zamanda malzemenin azaltma gücünü de ifade eder. Tesir kesiti parametrelerinin aksine malzemenin ortalama serbest yol (MFP) değerinin küçük olması, o malzemenin nötron azaltma kabiliyetinin daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 5, 4,5 MeV enerjiye sahip hızlı nötronların azaltma parametrelerini göstermektedir. Bu şekil incelendiğinde CuAlFeSb0 kodlu alaşımın Σ_R ve Σ_T değerlerinin üretilen diğer alaşımlardan daha yüksek, MFP değerinin ise daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum CuAlFeSb0 kodlu alaşımın hızlı nötron azaltma yeteneğinin üretilen diğer alaşımlardan daha fazla olduğu anlamına gelir.



Şekil 5. 4,5 MeV enerjili nötronlar için zırlama parametreleri

Nötronlar parçacık tipi radyasyonlardır. Bu nedenle madde ile etkileşen nötron sayılarının belirlenmesi zırlama çalışmalarında önemlidir. Madde üzerine gelen ve geçen nötron parçacıklarının sayısı, birim hacim başına oluşan akı ile ilgilidir. Bu akı, hedef madde ile yapılabilecek elastik ve elastik olmayan saçılmalar ve yakalanan nötronların sayısına bağlıdır. Dolayısıyla malzemeye gelen, geçen ve yakalanan nötronların sayısı malzemenin nötron azaltma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir (Schober 2014). Üretilen alaşımlardan geçen nötron sayılarını belirlemek için her alaşım 1×10^7 tane termal, yavaş ve hızlı nötron ile ayrı ayrı bombardıman edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'a göre, farklı enerjilerdeki nötronların CuAlFeSb0 alaşımından diğer alaşımlara göre daha az geçtiği görülmektedir. Geçen nötron sayısının az olması CuAlFeSb0 alaşımının diğer alaşımlardan daha iyi bir azaltma gücüne sahip olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 6. Enerjilerine göre geçen nötron sayıları

Malzemelerden geçen ve azaltılan radyasyon kadar, etkileşim esnasında meydana gelen ikincil radyasyon ve parçacıkların tespit edilmesi gerek canlılar gerekse elektronik cihazlarda oluşabilecek olumsuz etkiler nedeniyle önem arz etmektedir. Gama ışınlarının madde ile etkileşimi esnasında meydana gelen farklı etkileşim süreçleri ikincil radyasyonların üretimine yol açar. Birincil gama etkileşimi sonucu oluşan ikincil elektronların sayısı ve ortalama enerjileri Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’e göre malzemeye gelen gama radyasyonunun enerjisi arttıkça oluşan elektron sayısının ve ortalama enerji değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, Sb katkı miktarının artması ile oluşan ikincil elektron sayısının arttığı, ancak düşük ve orta enerjili gama radyasyonu bölgesinde aynı enerjili gama radyasyonuna karşılık gelen elektronların ortalama enerji değerleri kıyaslandığında aralarında çok büyük farkların olmadığı bu farkın 661,7 keV enerji gama radyasyonu ile etkileşimden sonra arttığı görülmüştür. Bu enerji değerinden sonra CuAlFeSb3 ve CuAlFeSb6 alaşımlarında meydana gelen ikincil elektronların enerji seviyeleri arasındaki farkın CuAlFeSb0 alaşımına göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum Cu, Al, Fe elementlerine göre daha yüksek atom numarasına sahip Sb elementinin katkılanmasıyla artan Z_{etk} değerinden dolayı gelen gama radyasyonunun daha fazla elektron ile etkileşmesine bağlanmaktadır.

Tablo 3. Birincil gama etkileşimi sonucu oluşan ikincil elektronların sayısı ve ortalama enerjileri

Enerji(keV)	CuAlFeSb0		CuAlFeSb3		CuAlFeSb6	
	Elektron sayısı	Ortalama enerji(keV)	Elektron sayısı	Ortalama enerji(keV)	Elektron sayısı	Ortalama enerji(keV)
59,5	8540	0,0167	8810	0,0182	8960	0,0186
81,0	17320	0,0370	17820	0,0350	18310	0,0361
276,4	151700	0,4603	160500	0,4661	169200	0,4794
302,9	178300	0,5434	184400	0,5553	192100	0,5684
356,0	221200	0,7507	238500	0,7459	248300	0,7747
383,9	251500	0,8679	269800	0,8809	282500	0,8964
511,0	391600	1,5110	412100	1,5180	434900	1,5330
661,7	570300	2,3900	609600	2,4260	644700	2,5120
1173,2	1311000	7,2180	1410000	7,3690	1472000	7,5010
1274,5	1472000	8,3670	1574000	8,5710	1657000	8,7200
1332,5	1568000	9,2290	1686000	9,5230	1751000	9,6160

Birincil nötron etkileşimi sonucu oluşan ikincil radyasyon ve parçacık sayıları ile ortalama enerjileri Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde en fazla ikincil gama ışınının termal nötronlar (0,025 eV) ile yapılan etkileşimler sonucunda, en fazla ikincil nötronun ise 4,5 MeV’lik hızlı nötronlar ile etkileşim sonucunda meydana geldiği görülmüştür. Bu iki enerji değeri için alaşımlar kıyaslandığında ise CuAlFeSb0 alaşımının daha fazla ikincil gama ışını ürettiği, CuAlFeSb6 alaşımının ise en az ikincil gama ışını ürettiği gözlemlenmiştir. Termal (0,025 eV) ve yavaş (100 eV) nötronlar ile yapılan etkileşimlerde alaşımların tamamında ikincil nötron üretimi olmamıştır. Yavaş (100 eV) nötronlar ile etkileşimde üretilen gama ışını sayısı diğer enerji seviyelerine göre en düşük seviyede olsa da ortalama enerji değeri hızlı nötronlar (4,5 ve 10 MeV) ile etkileşimde meydana gelen enerji değerlerinden daha fazla olmuştur. En yüksek gama ışının ortalama enerji değeri termal nötronlar (0,025 eV) ile yapılan etkileşimde ortaya çıkmıştır. Hızlı nötronlar ile olan etkileşimler kendi içlerinde kıyaslandığında 4,5 MeV enerjili nötronlar ile etkileşimde oluşan ikincil parçacık sayısı 10 MeV enerjili nötronlar ile olan etkileşimden daha fazla iken ortalama enerji değerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Oluşan ikincil radyasyon açısından bir değerlendirme yapıldığında yavaş (100 eV) nötronlar ile olan etkileşim haricindeki diğer tüm enerjilerde CuAlFeSb6 alaşımının daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Birincil nötron etkileşimi sonucu oluşan ikincil gama-ışınlarının ve nötronların sayısı ve bunların ortalama enerjileri

Numune Kodu	Gama sayısı	0,025 eV			Gama sayısı	100 eV		
		Ortalama enerji (MeV)	Nötron sayısı	Ortalama enerji (MeV)		Ortalama enerji (MeV)	Nötron sayısı	Ortalama enerji (MeV)
CuAlFeSb0	11593901	2,9488	0	0	142007	2,9557	0	0
CuAlFeSb3	11469708	2,9333	0	0	145638	2,8848	0	0
CuAlFeSb6	11209223	2,9042	0	0	149597	2,8104	0	0
Numune Kodu	Gama sayısı	4,5 MeV			Gama sayısı	10 MeV		
		Ortalama enerji (MeV)	Nötron sayısı	Ortalama enerji (MeV)		Ortalama enerji (MeV)	Nötron sayısı	Ortalama enerji (MeV)
CuAlFeSb0	2028497	1,2927	861192	1,5996	2695211	2,2431	790006	2,9087
CuAlFeSb3	1993536	1,3014	849215	1,5882	2638578	2,2583	782988	2,8891
CuAlFeSb6	1945068	1,3098	831820	1,5742	2556972	2,2799	771580	2,8657

Radyasyon ortamında kullanılan malzemeler, bir süre sonra yapısal bozulklara uğrayıp mekanik özelliklerini kaybedebilirler. Bu nedenle üretilcek malzemelerin kullanım süreleri ve dayanıklılıkları hakkında fikir sahibi olmak, uygun malzeme seçimi yapabilmek için radyasyon hasarının tespit edilmesi gerekir. Radyasyon bir malzemenin atomları ile etkileşime girerek onları bulundukları kafes konumlarından çıkarabilir ve başka bir konuma yerleşmelerine neden olabilir. Bir malzemede oluşan radyasyon hasarı, malzemedeki her atom başına ortalama olarak kaç atomun yerinden çıktığını ifade eden, atom başına yer değiştirme (DPA) parametresi ile hesaplanır. Bu parametrenin dışında; iyonlaştırıcı radyasyonun bir malzemenin birim kütlesi başına bıraktığı toplam enerjisinin ölçüsü olarak tanımlanan toplam iyonize doz (TID) değerinin belirlenmesi de kullanılacak malzemelerin radyasyon direnci hakkında bilgi vermektedir. Hem DPA hem de TID değerlerinin düşük olması o malzemenin

radasyona karşı daha dayanıklı olduğu anlamına gelmektedir (Mascitti ve Magariaga, 2011; Altıkulaç, 2016; Akman ve Oğul, 2025). Üretilen alaşımların gama radyasyonu ile etkileşimi neticesinde elde edilen TID ve DPA değerleri Tablo 5’de ve nötron ile etkileşimi neticesinde elde edilen TID ve DPA değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 5’te TID ve DPA sonuçlarına göre CuAlFeSb0 alaşımı düşük ve orta enerjili gama ışınlarına karşı en dayanıklı malzeme olurken, yüksek enerjili gama ışınlarına karşı TID sonucuna göre CuAlFeSb0 alaşımı, DPA sonucuna göre ise CuAlFeSb6 alaşımı en dayanıklı malzemeler olmuşlardır. TID değerlerinin artan enerji ile arttığı gözlemlenirken, DPA değeri değişkenlik göstermiştir. Hem TID hem de DPA değerlerinin malzeme türü ve enerji seviyelerine göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

Tablo 5. Bazı gama-ışını enerjilerinde toplam iyonlaştırıcı doz miktarı (rad) ve atom başına yer değiştirme sonuçları

Enerji (keV)	CuAlFeSb0		CuAlFeSb3		CuAlFeSb6	
	TID($\times 10^{-8}$)	DPA($\times 10^{-29}$)	TID($\times 10^{-8}$)	DPA($\times 10^{-29}$)	TID($\times 10^{-8}$)	DPA($\times 10^{-29}$)
59,5	2,1446	0	2,1656	0	2,1859	0
661,7	4,9741	1,1639	5,0411	1,2359	5,0677	1,2907
1332,5	8,0225	0,3822	8,0625	0,3822	8,0580	0,3785

Tablo 6’da TID sonuçlarına göre CuAlFeSb0 alaşımı tüm enerji değerleri için en dayanıklı malzeme olmuştur. DPA sonuçları incelendiğinde termal (0,025 eV) ve yavaş (100 eV) nötron enerji bölgelerinde CuAlFeSb0 alaşımı daha dayanıklı bir yapı sergilerken, hızlı nötron (4,5 ve 10 MeV) enerji bölgesinde CuAlFeSb6 alaşımının daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Hızlı nötronlar (10 MeV), tüm alaşımlar arasında en yüksek DPA değerlerine neden olurken, CuAlFeSb0 alaşımı en yüksek değere sahip olmuştur. Bu da CuAlFeSb0 alaşımının yüksek enerjili nötronlar ile etkileşimi neticesinde en fazla yer değiştirme hasarına uğradığı anlamına gelmektedir.

Tablo 6. İncelenen alaşımlara ait bazı nötron enerjilerinde toplam iyonlaştırıcı doz miktarı (rad) ve atom başına yer değiştirme sonuçları

Enerji	CuAlFeSb0		CuAlFeSb3		CuAlFeSb6	
	TID($\times 10^{-8}$)	DPA	TID($\times 10^{-8}$)	DPA	TID($\times 10^{-8}$)	DPA
0,025 eV	14,394	$1,3001 \times 10^{-26}$	15,273	$1,3136 \times 10^{-26}$	16,281	$1,3364 \times 10^{-26}$
100 eV	2,1004	$2,0401 \times 10^{-28}$	3,5865	$1,2693 \times 10^{-27}$	6,8191	$2,3164 \times 10^{-27}$
4,5 MeV	3,7971	$5,6730 \times 10^{-24}$	3,9375	$5,6212 \times 10^{-24}$	4,1215	$5,5946 \times 10^{-24}$
10 MeV	8,8864	$7,6136 \times 10^{-24}$	9,1626	$7,5504 \times 10^{-24}$	9,4879	$7,5396 \times 10^{-24}$

4. Sonuç

Çalışmada farklı oranlarda Sb içeren CuAlFe temelli alaşımların gama ve nötron radyasyonu azaltma özelliği ile radyasyon etkileşimi sonrası oluşan ikincil radyasyonlar ve alaşımlarda meydana gelen radyasyon hasarı araştırılmıştır. Yapılan bu çalışma sonunda;

- Üretilen alaşımların 59,5-1332,5 keV enerji aralığındaki gama radyasyonu azaltma özelliği incelemesinde, düşük ve orta enerji bölgesinde CuAlFeSb6 alaşımının gama radyasyonuna karşı daha iyi koruma sağladığı, yüksek enerji bölgesinde ise tüm alaşımların hemen hemen aynı koruma seviyesine sahip olduğu,

- CuAlFeSb6 alaşımının kütfe azaltma katsayısı (μ/ρ) değerinin literatürde yer alan %65,53 Cu, %34,37 Zn içeren Cu/Zn alaşımının 356-1275 keV enerji aralığında ki μ/ρ değeri ve %14,8 Ag, %57,61 Cu, %27,59 Zn içeren Ag/Cu/Zn alaşımının 662 keV enerjide ki μ/ρ değerleriyle aynı olduğu; 1173,2-1332,5 keV gama enerji aralığında Cu_{0,6}Ag_{0,4} ve Cu_{0,8}Ag_{0,2} alaşımlarından, 511-661,7 keV enerjilerinde CAN1 ve CAN2 kodlu şekil hafıza özelliğine sahip alaşımlardan ve CuAlNiSn4 kodlu şekil hafıza özelliğine sahip alaşımın μ/ρ değerinden daha büyük olduğu,
- CuAlFeSb0 alaşımının gama radyasyonuna karşı en düşük korumayı sağladığı, ancak üretilen diğer alaşımlardan daha yüksek hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) ve toplam makroskopik tesir kesiti (Σ_T) değerine, ayrıca en düşük ortalama serbest yol (MFP) değerine sahip olması sebebiyle nötron zırhlamasında en etkili alaşım olduğu,
- Üretilen tüm alaşımların termal (0,025 eV) ve yavaş (100 eV) nötronlar ile etkileşme girmeleri neticesinde ikincil nötron üretiminin olmadığı, en fazla ikincil nötron üretiminin 4,5 MeV'lik hızlı nötronlar ile etkileşim sonucunda CuAlFeSb0 alaşımında, en fazla ikincil gama ışınının 0,025 ev termal enerjili nötronlar ile etkileşim sonucunda yine CuAlFeSb0 alaşımında meydana geldiği,
- Toplam iyonlaştırıcı doz (TID) ve atom başına yer değiştirme değerlerine (DPA) bakıldığında, CuAlFeSb0 alaşımının düşük ve orta enerjili gama ışınları ile birlikte termal (0,025 eV) ve yavaş (100 eV) nötronlara karşı en dayanıklı alaşım olduğu,
- Yapılan deneysel ölçüm ve teorik hesaplamaların birbiri ile uyumlu olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Abdelhakim NA., Saleh A., Mitwalli M., El-Farrash AH., Shalaby RM. A good balance between the efficiency of ionizing radiation shielding mechanical performance of various tin-based alloys: comparative analysis. Radiation Physics Chemistry 2025; 226: 112155.
- AbuAlRoos NJ., Amin NAB., Zainon R. Conventional new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: a review. Radiation Physics Chemistry 2019; 165: 108439.
- Agar O., Kavaz E., Altunsoy E., Kilicoglu O., Tekin H., Sayyed M., Erguzel T., Tarhan N. Er₂O₃ effects on photon neutron shielding properties of TeO₂-Li₂O-ZnO-Nb₂O₅ glass system. Results in Physics 2019a; 13: 102277.

- Agar O., Sayyed M., Akman F., Tekin H., Kaçal MR. An extensive investigation on gamma ray shielding features of Pd/Ag-based alloys. *Nuclear Engineering Technology* 2019b; 51(3): 853-859.
- Akkas A., Tugrul AB., Tazegul O. Shielding performance of Al–B₄C–W composite materials against gamma-ray, beta and neutron radiations. *Radiation Physics and Chemistry* 2025; 232: 112662.
- Akman F., Sayyed M., Kaçal MR., Tekin H. Investigation of photon shielding performances of some selected alloys by experimental data, theoretical MCNPX code in the energy range of 81 keV–1333 keV. *Journal of Alloys Compounds* 2019; 772: 516-524.
- Akman F. Determination of gamma radiation shielding characteristics for some iron-based metallic glasses. *Türk Doğa ve Fen Dergisi* 2023; 12(1): 53-60.
- Akman F., Kilicoglu O., Ozdogan H., Agar O. Nuclear radiation shielding characteristics of platinum rhodium-based alloys. In *Advances in Alloys Research and Technologies*. Cham: Springer Nature Switzerland 2025; 239-281.
- Akman F., Oğul H. Interaction parameters of some polymers used in nuclear power plants with ionizing radiation, produced secondary radiations and radiation damages. *Macromolecular Materials and Engineering* 2025; 310(3): 2400326.
- Akyıldırım H. Calculation of fast neutron shielding parameters for some essential carbohydrates. *Erzincan University Journal of Science and Technology* 2019; 12(2): 1141-1148.
- Aldirmaz E., Güler M., Güler E. Effect of nickel addition on the magnetic microstructural properties of Cu-Al-Fe alloy. *Journal of Superconductivity Novel Magnetism* 2020; 33, 755-759.
- Anh L., Cuong P., Ha N., Thao H. Intercomparison of Geant4 low energy electromagnetic models in ⁹⁰Y dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes* 2021; 178: 109938.
- Altıkulaç A. Nükleer reaktörlerde yapı malzemesi olarak kullanılan elementlerde gaz üretimi. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi* 2016; 3(2): 136-144.
- Aygun M., Aygun Z., Ercan E. Radiation protection efficiency of newly produced W-based alloys: Experimental computational study. *Radiation Physics Chemistry* 2023; 212: 111147.
- Balci E., Akpınar S. Quaternary element incorporation effects on thermal properties crystal-micro structure of Cu-Al-Fe high temperature shape memory alloys. *International Journal of Thermodynamics* 2021; 24(2): 119-126.
- Dilsiz K., Ogul H., Akman F., Agar O., Kacal MR., Polat H., Dursun İ. Evaluation of CdS doped polyester composites regarding gamma neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy* 2021; 139: 103865.
- Ding Y., Yang C., Zheng Q., Liu Z., Yang W. Design, fabrication mechanical properties of a novel Al-5Cu-6Gd-10Bi alloy potentially used for shielding both thermal neutron γ -ray. *Journal of Alloys Compounds* 2025; 1014: 178670.
- Dong M., Xue X., Elmahroug Y., Sayyed M., Zaid M. Investigation of shielding parameters of some boron containing resources for gamma ray fast neutron. *Results in Physics* 2019; 13: 102129.

- Ekinci N., El-Agawany F., Mahmoud K., Karabulut A., Aygün B., Yousef E., Rammah Y. Synthesis, physical properties, gamma-ray shielding capacity of different Ni-based super alloys. *Radiation Physics Chemistry* 2021; 186: 109483.
- Erkoyuncu İ., Demirkol İ., Akman F., Kaçal MR., Polat H., Dilsiz K. A study on the mechanical radiation shielding characteristics of concrete samples reinforced with brass alloy boron carbide. *Applied Radiation Isotopes* 2025; 217: 111641.
- Fernández AP., Vergara D., Orosa JA. A global review of PWR nuclear power plants. *Applied Sciences* 2020; 10(13): 4434.
- Gan B., Liu S., He Z., Chen F., Niu H., Cheng J., Tan B., Yu B. Research progress of metal-based shielding materials for neutron gamma rays. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 2021; 34(12): 1609-1617.
- Gaylan Y., Bozkurt A., Avar B. Investigating thermal and fast neutron shielding properties of B_4C , B_2O_3 , Sm_2O_3 , and Gd_2O_3 doped polymer matrix composites using Monte Carlo simulations. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science* 2021; 16(2): 490-499.
- Gerward L., Guilbert N., Jensen KB., Levring H. X-ray absorption in matter reengineering XCOM. *Radiation Physics Chemistry* 2001; 60(1-2): 23-24.
- Hamad R., Mhareb M., Alajerami Y., Sayyed M., Saleh G., Hamad MK., Ziq K. A comprehensive ionizing radiation shielding study of $Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5}$ alloys with various iron concentrations. *Journal of Alloys Compounds* 2021; 858: 157636.
- Hannachi E., Sayyed M., Slimani Y., Elsafi M. Experimental study of yttrium-based ceramic systems containing nanomaterials for gamma radiation protecting applications. *Applied Physics A* 2022; 128(10): 859.
- Hao F., Zhang P., Wang W., Lian X., Rong J., Fan R. Preparation interface analysis of $Gd_2O_3@W$ core-shell powders as co-shielding absorbers for neutron gamma-ray. *Ceramics International* 2024; 50(13): 24379-24386.
- Kaewkhao J., Laopaiboon J., Chewpraditkul W. Determination of effective atomic numbers and effective electron densities for Cu/Zn alloy. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2008; 109(7): 1260-1265.
- Kalay E., Özkul İ., Karaduman O., Kızılgün Y., Güler Ö., Canbay CA., Kilic G., Baykal DS., AlMisned G., Tekin H. Effects of trace rare earth (TRE) additions on thermal, crystal structure, radiation shielding properties of CuAlMn high-temperature S-M alloys: a closer look at cerium effect. *Radiation Physics Chemistry* 2025; 234: 112811.
- Kanca MS., Taşgın Y., Yılmaz D., Pathman AF., Güler Ö. The effect of high entropy oxide on radiation shielding parameters of erbium oxide doped glasses. *Ceramics International* 2024; 50(9): 15600-15612.

- Karaduman O., Özkul İ., Aydemir Y., Canbay CA. Martensitic transformation thermodynamic structure analysis of CuAlFe high-temperature shape memory alloy. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2024a; 36(2): 59-66.
- Karaduman O., Özkul İ., Aydemir Y., Canbay CA. Thermokinetic structural shape memory effect analysis of high-temperature martensitic transformation of ternary CuAlFe alloy. *Journal of Materials Electronic Devices* 2024b; 3(1): 1-7.
- Karabul Y., İçelli O. The assessment of usage of epoxy based micro nano-structured composites enriched with Bi₂O₃ WO₃ particles for radiation shielding. *Results in Physics* 2021; 26: 104423.
- Kavun Y. The theoretical investigation of chitin doped concretes for gamma-ray shielding properties. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Dergisi* 2021; 3(2): 80-91.
- Kaur T., Sharma J., Singh T. Review on scope of metallic alloys in gamma rays shield designing. *Progress in Nuclear Energy* 2019; 113(1): 95-113.
- Kaya M., Kuzu SY., Niksarlıoğlu S., Pekdemir ME., Kök M. Investigation of gamma radiation shielding in nimnga-doped multifunctional smart polymer composites using geant4 winxcom. *Journal of Advanced Research in Natural Applied Sciences* 2024; 10(4): 861-874.
- Kayakökü H. Experimental investigation of gamma radiation shielding ability of some building materials in Bitlis (Turkey). *Radiation Physics and Chemistry* 2024; 214: 111297.
- Kursun C., Gaylan Y., Yalcin AO., Parrey KA., Gao M. Advanced neutron and γ -ray shielding characteristics of nanostructured (90-x)Al-xGd₂O₃ composites reinforced by tungsten. *Journal of Alloys and Compounds* 2025; 1010(9): 177372.
- Levet A., Kavaz E., Özdemir Y. An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 2020; 819: 152946.
- Limkitjaroenporn P., Kaewkhao J., Chewpraditkul W., Limsuwan P. Mass attenuation coefficient and effective atomic number of Ag/Cu/Zn alloy at different photon energy by Compton scattering technique. *Procedia Engineering* 2012; 32: 847-854.
- Manjunatha H., Sathish K., Seenappa L., Gupta D., Raj SAC. A study of X-ray, gamma and neutron shielding parameters in Si-alloys. *Radiation Physics Chemistry* 2019; 165: 108414.
- Mascitti J., Madariaga M. Method for the calculation of DPA in the reactor pressure vessel of atucha II. *Science and Technology of Nuclear Installations* 2011; 2011(1): 534689.
- Oğul H., Agar O., Bulut F., Kaçal MR., Dilsiz K., Polat H., Akman F. A comparative neutron gamma-ray radiation shielding investigation of molybdenum boron filled polymer composites. *Applied Radiation Isotopes* 2023; 194(1): 110731.
- Oğul H., Yaz A., Us H., Bulut F. Investigation on radiation interactions with some quenched alloys used in nuclear reactors. *Applied Radiation and Isotopes* 2025; 218(1): 111701.

- Niccoli F., Garion C., Maletta C., Cangialosi C., Infantino A., Danzeca S., Chiggiato P. Particle radiation effects on shape memory alloy couplers for ultra-high vacuum sealing: A preliminary study. *Smart Materials Structures* 2019; 28(8): 085023.
- Niksarlıoğlu S., Akman F., Agar O., Kaçal MR., Kanca MS. Experimental theoretical results of gamma shielding features for copper based shape memory alloys. *Progress in Nuclear Energy* 2024; 177: 105439.
- Özdemir HG., Demirkol İ., Erkoyuncu İ., Yılmaz M., Kaçal MR., Akman F. Bazı tungsten içerikli minerallerin gama zırhlama özelliklerinin geniş enerji aralığında incelenmesi. *Journal of the Institute of Science Technology* 2022; 12(4): 2175-2187.
- Özdemir HG., Kaçal MR., Akman F., Polat H. Alternative gamma-ray shielding material: ternary composite including polyester resin/barite/molybdenum. *Nuclear Engineering Technology* 2025; 57(7): 103512.
- Pekdemir ME., Yılmaz D., Pekdemir SS., Taşgın Y., Ekmen B. Tungsten carbide-based shape memory biopolymer nanocomposites as a promising new gamma radiation shielding material. *Radiation Physics Chemistry* 2025; 232: 112677.
- Qi Z., Yang Z., Li J., Guo Y., Yang G., Yu Y., Zhang J. The advancement of neutron-shielding materials for the transportation storage of spent nuclear fuel. *Materials* 2022; 15(9): 3255.
- Saleh A., Almohiy H., Shalaby RM., Saad M. Comprehensive investigation on physical, structural, mechanical nuclear shielding features against X/gamma-rays, neutron, proton alpha particles of various binary alloys. *Radiation Physics Chemistry* 2024; 216: 111443.
- Salh H., Saleh DS., Smail JM., Manguri HSA., Balo ŞN., Ahmad ST. Experimental theoretical evaluation of Cu–Al–Ni shape memory alloys shielding properties at the 511–1333 keV gamma energy range. *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry* 2025; 334(1): 851-862.
- Santosh S., Bavin S., Srivatsan T. Comparing surface characteristics of Cu-Al-Fe alloys using thermal-based machining processes. *Surface Engineering* 2024; 40(5): 558-567.
- Seenappa L., Manjunatha H., Chrika B., Sridhar K., Hanumantharayappa C. Gamma, X-ray neutron interaction parameters of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloys. *Radiation Physics Chemistry* 2018; 150: 199-206.
- Şahmaran T., Tuğrul T. Investigation of shielding parameters of fast neutrons for some chemotherapy drugs by different calculation methods. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering* 2023; 9(4): 388-393.
- Tekin H., Kilicoglu O. The influence of gallium (Ga) additive on nuclear radiation shielding effectiveness of Pd/Mn binary alloys. *Journal of Alloys Compounds* 2020; 815: 152484.
- Uyar E., Pul M., Akay D., Şimşek T. 2025. Emerging of high entropy alloy reinforced composites radiation shielding materials: Configurational structure radiation shielding properties. *Journal of Alloys Compounds* 1010: 178210.

- Turhan MF., Akman F., Taşer A., Dilsiz K., Oğul H., Kaçal MR., Agar O. Gamma radiation shielding performance of $\text{Cu}_x\text{Ag}_{(1-x)}$ alloys: experimental, theoretical simulation results. *Progress in Nuclear Energy* 2022; 143(3): 104036.
- Yan H., Yang L., Zhou S., Cao Y. Study on the mechanical properties gamma/neutron radiation shielding performance of SnBi/B₄C composite materials. *Journal of Alloys Compounds* 2025; 1010: 177430.
- Yang C., Chen M., Su X., Zheng Q., Liu Z. The active regulatory effects of magnesium on the preparation, microstructure mechanical properties of a novel Al-Bi based γ -ray shielding material by casting method. *Scripta Materialia* 2024; 252(12): 116281.
- Zhang P., Jia C., Li J., Wang W. Shielding composites for neutron gamma-radiation with Gd₂O₃ W core-shell structured particles. *Materials Letters* 2020; 276: 128082.