



## Al-Ni İntermetalik Bileşiklerinin Gama Radyasyonu Zırhlama Parametrelerinin Hesaplanması

Ömer Faruk ÖZDEMİR<sup>1</sup> ve Nergiz YILDIZ YORGUN<sup>1</sup>

How to cite: Özdemir, Ö. F., & Yıldız Yorgun, N. (2024). Al-Ni intermetalik bileşiklerinin gama radyasyonu zırhlama parametrelerinin hesaplanması. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 287-301. <https://doi.org/10.33484/sinopfbid.1471890>

### Araştırma Makalesi

#### Sorumlu Yazar

Ömer Faruk ÖZDEMİR  
o.f.ozdemir@gmail.com

#### Yazarlara ait ORCID

Ö.F.Ö: 0000-0002-2389-1139  
N.Y.Y: 0000-0002-2515-1994

Received: 22.04.2024

Accepted: 24.06.2024

### Öz

Bu çalışmada yüksek mukavemet, düşük özgül ağırlık, termal stabilite, yüksek termal iletkenlik (76 W/mK) ve oksidasyon/korozyon direnci gibi sahip oldukları fiziksel özelliklerle nükleer uygulamalar için potansiyel barındıran Al-Ni intermetalik bileşiklerinin ( $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$ ,  $Al_4Ni_3$ ,  $AlNi$ ,  $Al_3Ni_5$  ve  $AlNi_3$ ) radyasyon zırhlama özellikleri incelendi. WinXCom programı ile 1 keV -  $10^5$  MeV aralığında, PHITS ve GEANT4 programları ile 0.047 - 2.506 MeV aralığındaki foton enerjileri için yapılan hesaplamalarla kütle soğurma katsayıları, lineer soğurma katsayıları, yarı kalınlık değerleri (YKD), onda bir kalınlık değerleri (OKD), ortalama serbest yolları (MFP) ve etkin atom numaraları elde edildi. Seçilen enerji aralığında her üç programla da elde edilen sonuçların iyi bir uyum içerisinde oldukları tespit edildi. İntermetalik bileşiğin yoğunluğunun artmasıyla, kütle soğurma katsayısı ve etkin atom numaraları değerlerinin arttığı, YKD, OKD ve OSY değerlerinin ise azaldığı görüldü. Hesaplanan parametreler incelenerek Al-Ni intermetalik bileşiklerinin literatürde zırhlama malzemesi olarak önerilen diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha düşük zırhlama kapasitesine sahip olsa da radyasyon zırhlama için yeterli düzeyde olduğu ve  $AlNi_3$  bileşiğinin diğer bileşiklere oranla gama zırhlama için daha uygun bir aday olduğu tespit edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Radyasyon zırhlama, Al-Ni, İntermetalik bileşik, Geant, Phits

## Calculation of Gamma Radiation Shielding Parameters of Al-Ni Intermetallic Compounds

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi,  
Fen Fakültesi, Fizik Bölümü,  
Van, Türkiye

### Abstract

In this study, the radiation shielding properties of Al-Ni intermetallic compounds ( $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$ ,  $Al_4Ni_3$ ,  $AlNi$ ,  $Al_3Ni_5$  and  $AlNi_3$ ), which have the potential for nuclear applications due to their physical properties such as high strength, low density, thermal stability, high thermal conductivity (76 W/mK) and oxidation/corrosion resistance, were investigated. Mass absorption coefficients, linear absorption coefficients, half thickness values (HVL), tenths thickness values (TVL), mean free paths (MFP) and effective atomic numbers were obtained by calculations for photon energies in the range of 1 keV -105 MeV with WinXCom program and 0.047 - 2.506 MeV with PHITS and GEANT4 programs. The results obtained with all three programs were in good agreement in the selected energy range. The values of the mass absorption coefficient and effective atomic numbers were observed to increase with increasing density of the intermetallic compound. In contrast, the values of the HVL, TVL and MFP

Bu çalışma Creative Commons Attribution 4.0 International License ile lisanslanmıştır

decreased. By examining the calculated parameters, Al-Ni intermetallic compounds were determined to have lower armouring capacity compared with other materials proposed as armouring materials in literature. Still, they are sufficient for radiation shielding and the AlNi<sub>3</sub> compound is a more suitable candidate for gamma shielding compared with other compounds.

**Keywords:** Radiation shielding, Al-Ni, Intermetallic compound, Geant, Phits

## Giriş

Disiplinler arası çalışmaların yeni teknolojilerle desteklenmesi, nükleer teknolojilerin de pek çok alanda kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Yüksek enerjili fotonların ve nötronların madde ile etkileşiminin tıp, nükleer enerji ve radyoizotop üretimi, gıda güvenliği, endüstriyel tahribatsız muayene, kriminal çalışmalar ve uzay çalışmaları gibi çeşitli alanlarda faydalı uygulamaları bulunur [1-3]. Bu gelişmeler insan kaynaklı radyasyon maruziyetinin birincil kaynağı olan radyonüklidlerin sayısını da artırır. Sonuçta radyasyonun kaçınılmaz olarak sebep olacağı olumsuz biyolojik etkileri minimum düzeyde tutmak için uygun koruyucu malzemelerin kullanılması gerekliliği de artar. Radyasyon maruziyeti, olumsuz sağlık ve çevresel etkiler doğurur. Uygun radyasyon zırhlama özelliklerine sahip malzemeler, deterministik etkilerin ortaya çıkmasını önlemeye, stokastik etkilerin olasılığını yönetilebilir bir düzeye indirmeye ve çevresel hasarı önlemeye yardımcı olduklarından özellikle biyolojik zırhlama için büyük önem taşırlar [4]. Radyasyon üreten ya da radyasyona duyarlı bazı cihazların ve radyoaktif kaynakların güvenli kullanımı için de etkili radyasyon zırhlamasına sahip malzemelerin kullanılması oldukça önemli bir zorunluluktur. Radyasyon zırhlama için kullanılacak malzemeler, radyoaktif izotoplardan yayılan radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak çeşitlilik gösterir ve uygun malzemelerin özelliklerini araştırmak için pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu amaçla polimer [4, 5], alaşım [6, 7], seramik [8, 9], cam [10, 11] ve beton [12, 13] benzeri pek çok malzemenin radyasyon zırhlama parametreleri incelenmiştir. Zırhlama malzemesi olarak potansiyele sahip intermetalik bileşikler, metal ve seramiklerin ara özelliklerine sahip, yüksek erime sıcaklığı, düşük yoğunluk ve iyi korozyon direnci de dahil olmak üzere pek çok fiziksel ve mekanik özellikleri ile malzeme bilimi alanında kapsamlı araştırmalara konu olan bir metalik malzeme sınıfıdır [14-19]. Sahip oldukları özellikleri ile, yüksek sıcaklıklı gaz türbini, korozyona dayanıklı malzemeler, ısıtım işlem armatürleri, manyetik malzemeler ve hidrojen depolama malzemeleri vb. (>1200 °C) yüksek sıcaklık mühendisliği uygulamalarında kullanılmasının yanı sıra nükleer güvenlik sistemlerinde, uzay teknolojilerinde ve tıpta kullanım potansiyeli yüksek olan malzemeler olarak nitelendirilirler [19-21]. İntermetalik bileşiklerden Al-Ni bileşikleri, yüksek mukavemet, düşük özgül ağırlık, termal stabilite, yüksek termal iletkenlik (76 W/mK) ve 1400 °C'ye kadar iyi oksidasyon/korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir ve faz diyagramlarının ilk yayınlandığı 1908'den beri birçok araştırmacı tarafından deneysel ve teorik olarak incelenmiştir [14, 15, 17, 20-24]. Al-Ni intermetalik bileşikleri yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kullanım için Ni bazlı süper alaşımların yerini alabilecek yüksek potansiyelli hafif malzemeler olarak ayrıca nano ısıtıcı – Ni reaktif

nanoyapı vb. – nanoteknolojik uygulamaları da içeren endüstriyel kullanım için önemli malzemeler arasında yer alır [16, 17, 25]. Shi ve ark., [24] Al-Ni faz diyagramlarına dayanarak, Al-Ni sistem bileşiminde,  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$ ,  $Al_4Ni_3$ ,  $AlNi$ ,  $Al_3Ni_5$  ve  $AlNi_3$  olmak üzere altı intermetalik bileşiğin mevcut olabileceğini bildirmektedir. Bunlardan  $AlNi_3$  ve  $AlNi$ , süper alaşımların çoğunda güçlendirme aşamasında işlev gören önemli iki alüminittir [20]. Literatürde Al ve Ni bazlı alaşımların, farklı metallere intermetalik alaşımları ya da farklı kullanım amaçlarına yönelik üretilen çelik tipleri (superalloy) üzerine, çeşitli fiziksel özellikleri ve radyasyon zırhlama parametreleri ile ilgili çok sayıda araştırma mevcuttur [1, 7, 19, 20, 24, 26-29]. Bu çalışmada intermetalik bileşiklerden Al-Ni bileşiklerinin nükleer uygulamalar için sahip olduğu potansiyel göz önüne alınarak, faz diyagramlarına göre bildirilen altı adet intermetalik bileşiminin ( $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$ ,  $Al_4Ni_3$ ,  $AlNi$ ,  $Al_3Ni_5$  ve  $AlNi_3$ ) radyasyon zırhlama özellikleri incelendi. Doğrudan hesaplama programı (WinXCom) ve Monte Carlo simülasyon programları (PHITS 3.27, GEANT4) ile tıp ve radyografi uygulamalarında kullanılan radyoizotopların gama yayınlama enerjileri dikkate alınarak belirlenen enerji aralığında elde edilen sonuçlar, Al-Ni bileşiklerinin gama zırhlama yeterliliğini belirlemek için analiz edildi.

## **Materyal ve Yöntem**

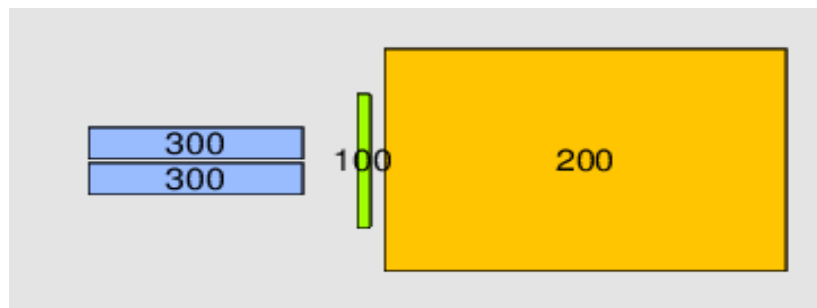
Radyasyon zırhlamasına konu olan malzemelerin, kütle soğurma katsayısı ( $\mu_m$ ), etkin atom numarası ( $Z_{\text{etk}}$ ) gibi radyasyon zırhlama parametreleri deneysel verilerle tespit edilebilmekte ya da deterministik yaklaşımla foton tesir kesiti veri tabanlarına dayalı hesaplama yapan programlar (XCOM, EpiXS, Phy-X/PSD vb.) ve daha kompleks geometrilerde istatistiksel çözümler sunan simülasyon programları (MCNP, GEANT4, FLUKA ve PHITS) ile hesaplanabilmektedir. Verilen üç yöntem de kabul edilebilir doğruluk ve hassasiyete sahiptir, ancak kodlar aracılığıyla doğrudan hesaplama ve simülasyonların deney yapmaya kıyasla daha hızlı ve daha ucuz olması birçok malzemenin radyasyon zırhlama parametrelerinin bu iki yaklaşım kullanılarak incelenmesine olanak sağlar [4, 6, 7, 10, 11, 28, 30, 31]. WinXCom, mermi tanecik olarak yalnızca foton seçilmesine olanak sağlayan ancak herhangi bir geometri tanımlamasına gerek olmadan kütle zayıflama katsayılarını ve zırhlama parametrelerini hesaplamak için kullanılan bir programdır [32]. Çoklu iş parçacığı için optimize edilmiş ve karmaşık simülasyonları yüksek hassasiyetle gerçekleştirebilen Monte Carlo Simülasyon programları ise daha karmaşık geometri tanımlarına olanak sağlarken, mermi tanecik seçiminde de esneklik getirirler. Örneğin PHITS, geniş bir enerji aralığında farklı parçacıklar için radyasyon ve malzemeler arasındaki çarpışmaları simüle eden bir programdır. Hafif yüklü parçacıklar için INCL 4.6 (Liège intranükleer kaskad) ve daha ağır parçacık etkileşimleri için JQMD (Jaeri Quantum Molecular Dynamics) modeli gibi çeşitli fizik modellerini ve veri tabanlarını içeren PHITS, foton-madde etkileşimi hesaplamalarında EPDL97 ve EGS (Electron Gamma Shower) kütüphanelerinin kullanımına olanak sağlar [33]. Yüksek enerji fiziği deneylerinde dedektör simülasyonları için yaygın olarak kullanılan ve radyasyondan korunma ve tıbbi fizik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulamaları olan GEANT4 simülasyon

programı ise farklı enerji aralıkları için QGS (Quark-gluon String) ve FTF (Fritiof string) gibi modeller içerir [34]. Foton-madde etkileşimi için tesir kesiti hesaplamalarında analitik yaklaşım sağlayan standart elektromagnetik modele ek olarak, Livermore modelleri, Penlope modeli gibi farklı modellerin de kullanılmasına olanak sağlar [35]. Bu çalışmada radyasyon zırlama parametreleri incelenen  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$ ,  $Al_4Ni_3$ ,  $AlNi$ ,  $Al_3Ni_5$  ve  $AlNi_3$  intermetalik bileşiklerinin literatürden alınan yoğunluk [24] ve % ağırlık değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

**Tablo 1.** Seçilen intermetalik bileşiklerin kimyasal içerikleri ve yoğunlukları [24]

Numune	Bileşimi (% Ağırlık)		Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
	Al	Ni	
$Al_3Ni$	0.5797	0.4203	4.1
$Al_3Ni_2$	0.4081	0.5919	4.9
$Al_4Ni_3$	0.3800	0.6200	5.22
$AlNi$	0.3149	0.6851	6.04
$Al_3Ni_5$	0.2162	0.7838	6.73
$AlNi_3$	0.1329	0.8671	7.5

Gama zırlama özellikleri incelenen bileşikler için kütle soğurma katsayıları ( $\mu_m$ ), lineer soğurma katsayıları ( $\mu$ ), yarı kalınlık değerleri (YKD), onda bir kalınlık değerleri (OKD), ortalama serbest yolları (OSY), etkin atom numaraları ( $Z_{\text{etk}}$ ) WinXCom [32], PHITS 3.27 [33] ve GEANT4 [34] programları ile elde edildi ve literatürde belirtilen çeşitli ampirik denklemler ile (Eşitlik 1-7) hesaplanarak karşılaştırıldı [29, 31, 36]. Phits ve Geant simülasyonları için literatürdeki deneysel çalışmalarda [11] yer alan temel dar ışın geometrisi kullanıldı (Şekil 1) ve istatistiksel hatanın minimum olması amacıyla hesaplamalar 1000000 parçacıkla yapıldı. PHITS hesaplamalarında foton tesir kesitleri için EGS modeli kullanılırken, GEANT4 hesaplamalarında Standart elektromagnetik model tercih edildi. Her iki simülasyon programında da hedefin kalınlık değeri, düşük enerjilerdeki fotonların tamamıyla soğurulmasını önlemek amacıyla 5 mm olarak ayarlandı.



**Şekil 1.** Simülasyonda kullanılan geometrinin 2 boyutlu gösterimi.

Fotonun madde ile etkileşim parametrelerinin en önemlilerinden biri olan ve malzemelerin radyasyondan korunma etkinliğinin tanımlamak için kullanılan kütle soğurma katsayısı ( $\mu_m$ ), Beer-Lambert Yasası ile elde edilir:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \ln(I_0/I)/\rho t \quad (2)$$

Burada  $I_0$  gelen gama ışını yoğunluğu;  $I$  ortamdan geçen gama ışını yoğunluğu;  $\mu$  lineer soğurma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $\mu_m$  kütle soğurma katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $\rho$  ortamın yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ve  $t$  ortamın kalınlığıdır (cm). Bir bileşik için kütle soğurma katsayısı, bileşiği oluşturan elementlerin ağırlık oranlarına ( $w_i$ ) bağlı olarak Eşitlik 3 ile hesaplanır:

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu_m)_i \quad (3)$$

Numunelerin gama ışını zırlama etkilerini açıklayan diğer temel teorik parametreler; yarı kalınlık değeri (YKD), gelen radyasyon şiddetinin yarıya azaldığı malzeme kalınlığı, onda-bir kalınlık değeri (OKD), gelen radyasyon şiddetinin onda birine düştüğü malzeme kalınlığı ve ortalama serbest yol (OSY), iki ardışık foton etkileşimi arasındaki ortalama hareket mesafesi olarak tanımlanır. YKD, OKD ve OSY sırasıyla Eşitlik 4-5-6 ile hesaplanabilir.

$$YKD = \ln 2 / \mu \quad (4)$$

$$OKD = \ln 10 / \mu \quad (5)$$

$$OSY = 1 / \mu \quad (6)$$

Numune, bir karışım veya bileşik olduğunda etkin atom numarası ( $Z_{\text{etk}}$ ) toplam atomik tesir kesiti ( $\sigma_a$ ) ile toplam elektronik tesir kesitinin ( $\sigma_e$ ) oranı olarak verilir ve aşağıdaki eşitliğe indirgenir [37].

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu/\rho)_i}{\sum_j \frac{f_j A_j}{Z_j} (\mu/\rho)_j} \quad (7)$$

Burada  $A$  : atomik kütle,  $Z$  : atom numarası ve  $f$  : molar kesirdir.

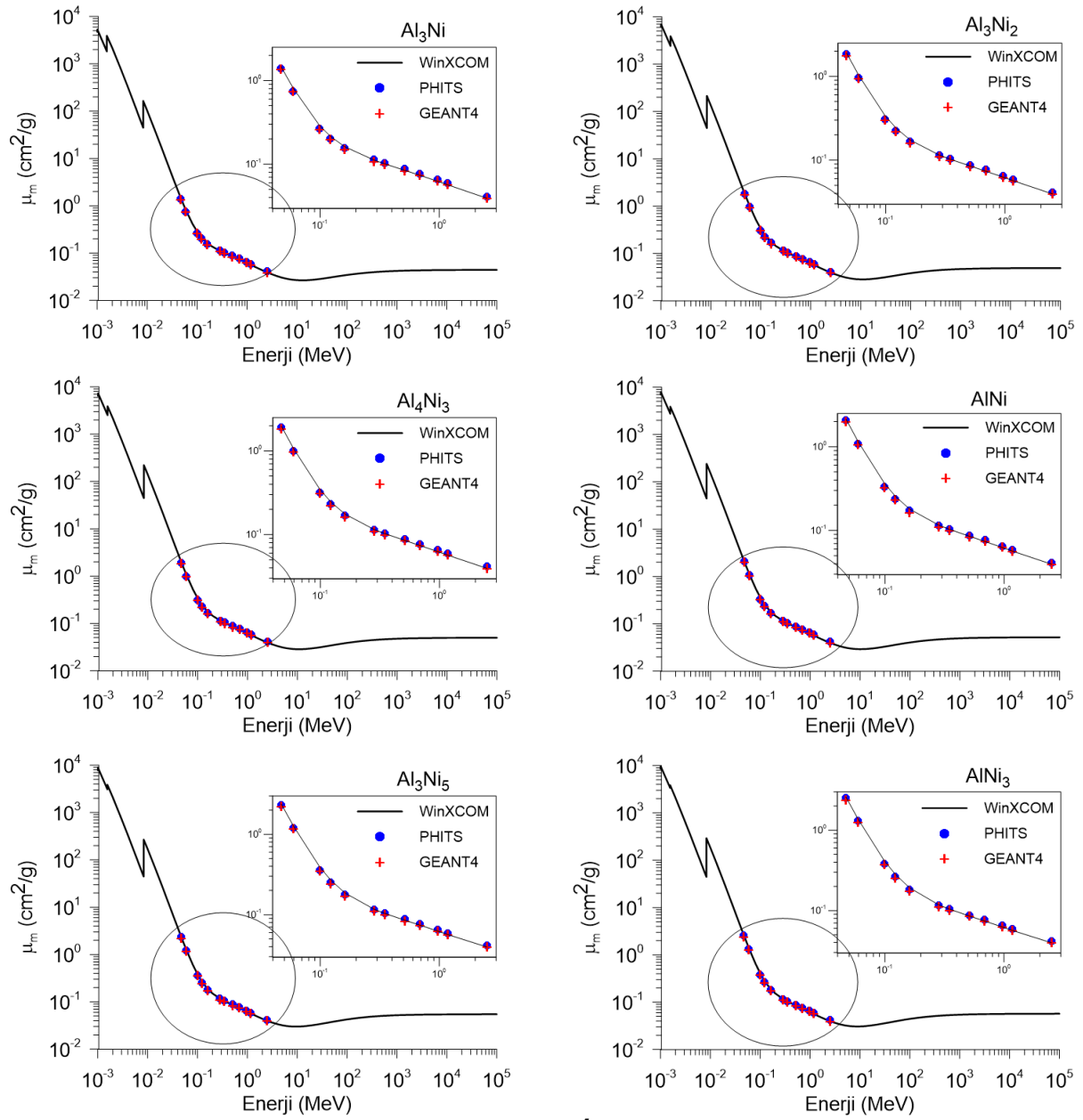
## Bulgular

Yoğunluk ve % ağırlık değerleri Tablo 1'de verilen AlNi intermetalik bileşiklerinin radyasyon zırlama özelliklerini incelemek için kütle soğurma katsayıları ( $\mu_m$ ), lineer soğurma katsayıları, yarı kalınlık değerleri, onda bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yolları, etkin atom numaraları WinXCom, PHITS 3.27 ve GEANT4 programları ve analitik ifadelerle elde edildi. Tablo 1'den, ağırlıkça % oranları değişen Al ve Ni'in oluşturdukları bileşiklerin yoğunluklarının 4.1 ile 7.5  $\text{g}/\text{cm}^3$  arasında değiştiği görülür. Yüzde ağırlık ve yoğunluk değişimleri incelendiğinde, artan Ni konsantrasyonu (% ağırlık) ile kütle yoğunluğunun  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) yaklaşık olarak doğrusal bir ilişkiyle arttığı söylenebilir [24]. Şekil 2, seçilen intermetalik bileşiklerin 1 keV ile  $10^5$  MeV aralığındaki enerjilerde, WinXCom ile hesaplanan teorik kütle soğurma katsayısı ( $\mu_m$ ) değerlerini göstermektedir. Şekil detaylı olarak incelendiğinde, foton

enerjisi arttıkça kütle soğurma katsayısının üstel olarak azaldığı görülür. Bu durum, foton kısmi etkileşim süreçleri temelinde açıklanabilir. Düşük enerji bölgesinde ( $E < 0.04$  MeV) fotoelektrik etkinin baskın olduğunu söyleyebiliriz. Bu bölgede, incelenen örnekler için  $\mu_m$  değeri artan enerjiyle keskin bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, fotoelektrik mikroskobik tesir kesitinin gelen foton enerjisi ( $E$ ) ile ters orantılı olduğu ve örneklerin atom numarası ( $Z$ ) ile doğru orantılı olduğu ile açıklanabilir. Yine bu bölgede bazı enerji değerlerinde pikler görülmektedir. Bu pikler fotoelektrik etki nedeniyle 1.0081 ve 8.3328 keV'de (Ni'nin L-I ve K soğurma kenarı) ve 1.5596 KeV'de (Al'nin K soğurma kenarı) meydana gelir.  $0.04 < E < 2.6$  MeV'de  $\mu_m$  değerleri yavaş yavaş azalmakta ve bileşiklerin  $\mu_m$  değerleri arasındaki fark neredeyse sıfıra yaklaşmaktadır. Bu bölge Compton saçılmasının baskın olduğu bölgedir. Bu bölgede mikroskobik tesir kesiti, enerji ( $E$ ) ile ters orantılı ve soğurucu malzemenin atom numarası ( $Z$ ) ile doğrusal olarak ilişkili olmasından kaynaklanmaktadır. 2.6 MeV'den sonra  $\mu_m$  değerleri hafifçe artar ve sonra neredeyde sabit kalır. Bu durum çift oluşum sürecinin ortamın atom numarası  $Z^2$ 'ye bağımlılığı ile açıklanmaktadır. Araştırılan tüm bileşikler için  $\mu_m$  değerlerindeki değişiklikler benzer bir model izlemektedir; farklı enerji sınırlarında önce keskin bir azalış daha sonra hafif bir azalış ve en sonunda hafif bir artış şeklindedir. Diğer taraftan, bileşiklerin soğurma yeteneği bileşiklerin yoğunluğu ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Örneğin  $AlNi_3$  bileşiğinin yoğunluğu yüksek olduğu için gama fotonlarını daha yüksek soğurma kabiliyetindedir. Her ne kadar bileşiklerdeki  $\mu_m$  değerleri arasındaki fark küçük olsa da,  $AlNi_3$  bileşiğinin  $\mu_m$  değerleri tüm enerjilerde biraz daha yüksektir. Ayrıca  $\mu_m$  değerleri, 0.047 ile 2.506 MeV enerji aralığında PHITS 3.27 ve GEANT4 simülasyon kodları kullanılarak hesaplandı. Simülasyon değerlerinin teorik tahminlerle doğrulanması, mevcut sonuçların doğruluğunun ispatlanmasında temel rol oynamaktadır. Bu nedenle PHITS ve GEANT sonuçları WinXCom yazılımı kullanılarak elde edilen teorik değerlerle karşılaştırıldı (Tablo 2). Buna ek olarak Tablo 2'ye WinXCom ile PHITS ve WinXCom ile GEANT arasındaki yüzde sapma (% sapma) değerleri Eşitlik 8 kullanılarak eklendi.

$$\%Sapma = \left| \frac{(\mu/\rho)_T - (\mu/\rho)_S}{(\mu/\rho)_T} \right| \times 100 \quad (8)$$

Burada S, simülasyon kodları (PHITS ve GEANT) kullanılarak elde edilen sonuçları, T ise WinXCom yazılımı kullanılarak hesaplanan teorik değerleri ifade etmektedir. En yüksek fark, %10.136 değeriyle 0.099 MeV enerjili fotonda  $AlNi_3$  numunesinde gözlemlendi. Bu nedenle simülasyon sonuçları ile teorik değerler arasında iyi bir uyum olduğu söylenebilir.



Şekil 2. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin 1 keV ile  $10^5$  MeV enerji aralığında WinXCom ve seçilen enerjilerde PHITS ve GEANT4 ile hesaplanan kütle soğurma katsayıları

Tablo 2. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin seçilen enerjilerde WinXCom, PHITS ve GEANT4 ile hesaplanan kütle soğurma katsayıları (cm<sup>2</sup>/g)

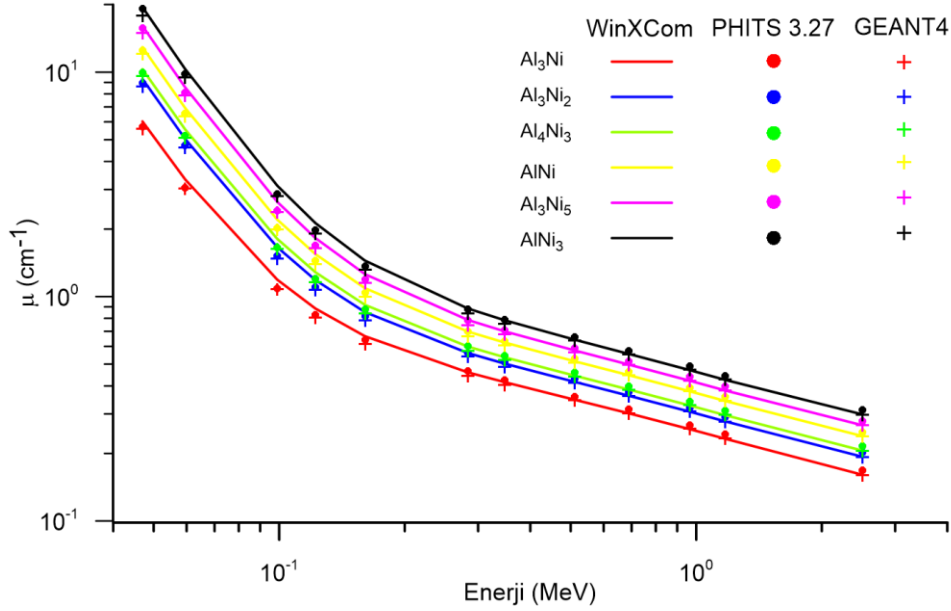
Enerji (MeV)	Al <sub>3</sub> Ni					Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>					Al <sub>4</sub> Ni <sub>3</sub>				
	WinXCom	PHITS	GEANT	% phits	% geant	WinXCom	PHITS	GEANT	% phits	% geant	WinXCom	PHITS	GEANT	% phits	% geant
0.047	1.472	1.389	1.360	5.627	7.618	1.905	1.831	1.767	3.856	7.236	1.976	1.905	1.834	3.588	7.192
0.060	0.811	0.742	0.740	8.471	8.732	1.027	0.960	0.943	6.523	8.216	1.063	0.997	0.975	6.227	8.254
0.099	0.290	0.265	0.262	8.758	9.544	0.338	0.309	0.301	8.742	11.075	0.346	0.316	0.312	8.665	9.832
0.122	0.216	0.202	0.196	6.237	8.939	0.242	0.226	0.219	6.738	9.427	0.246	0.229	0.222	6.771	9.587
0.161	0.162	0.157	0.150	3.500	7.404	0.174	0.167	0.160	4.274	8.066	0.176	0.168	0.161	4.404	8.297
0.284	0.112	0.113	0.108	-0.975	3.681	0.114	0.115	0.110	-0.297	3.813	0.115	0.115	0.110	-0.061	4.367
0.347	0.101	0.103	0.099	-1.882	2.540	0.103	0.104	0.099	-1.508	3.558	0.103	0.104	0.100	-1.304	3.083
0.511	0.085	0.088	0.084	-3.351	0.910	0.085	0.088	0.084	-2.975	1.257	0.085	0.088	0.084	-3.012	1.166
0.689	0.074	0.077	0.074	-3.802	0.118	0.074	0.077	0.074	-3.590	0.201	0.074	0.077	0.074	-3.555	0.301
0.964	0.063	0.065	0.063	-4.227	-0.231	0.063	0.065	0.063	-4.171	-0.023	0.063	0.065	0.063	-4.002	-0.126
1.173	0.057	0.059	0.057	-4.316	-0.281	0.057	0.059	0.057	-4.321	0.261	0.057	0.059	0.057	-4.321	-0.222
2.506	0.039	0.041	0.039	-4.835	0.348	0.039	0.041	0.039	-4.497	0.068	0.039	0.041	0.039342	-4.654	0.308

Enerji (MeV)	AlNi					Al <sub>3</sub> Ni <sub>5</sub>					AlNi <sub>3</sub>				
	WinXCom	PHITS	GEANT	% phits	% geant	WinXCom	PHITS	GEANT	% phits	% geant	WinXCom	PHITS	GEANT	% phits	% geant
0.047	2.140	2.075	1.994	3.039	6.815	2.389	2.330	2.223	2.466	6.978	2.599	2.547	2.384	2.031	8.286
0.060	1.145	1.081	1.052	5.624	8.122	1.270	1.206	1.170	4.983	7.842	1.375	1.313	1.263	4.501	8.102
0.099	0.365	0.334	0.329	8.546	9.917	0.393	0.359	0.353	8.461	10.091	0.416	0.382	0.374	8.320	10.136
0.122	0.256	0.238	0.231	6.892	9.744	0.271	0.252	0.244	7.096	9.938	0.284	0.263	0.255	7.254	10.114
0.161	0.180	0.172	0.165	4.640	8.577	0.187	0.178	0.171	5.067	8.595	0.193	0.182	0.175	5.364	9.027
0.284	0.116	0.116	0.110	0.074	4.573	0.117	0.116	0.111	0.413	5.033	0.118	0.117	0.112	0.574	4.863
0.347	0.103	0.105	0.100	-1.125	3.094	0.104	0.105	0.101	-0.901	2.943	0.105	0.105	0.101	-0.693	3.845
0.511	0.085	0.088	0.084	-2.826	1.278	0.086	0.088	0.084	-2.544	1.782	0.086	0.088	0.085	-2.542	1.184
0.689	0.074	0.077	0.074	-3.475	0.312	0.074	0.077	0.074	-3.354	0.294	0.074	0.077	0.074	-3.251	0.552
0.964	0.063	0.065	0.063	-3.981	-0.281	0.063	0.065	0.063	-3.948	0.037	0.063	0.065	0.063	-3.762	-0.485
1.173	0.057	0.059	0.057	-4.147	-0.250	0.057	0.059	0.057	-4.149	-0.096	0.057	0.059	0.057	-3.975	-0.082
2.506	0.040	0.041	0.040	-4.430	-0.046	0.040	0.042	0.040	-4.597	0.191	0.040	0.042	0.040	-4.565	0.196

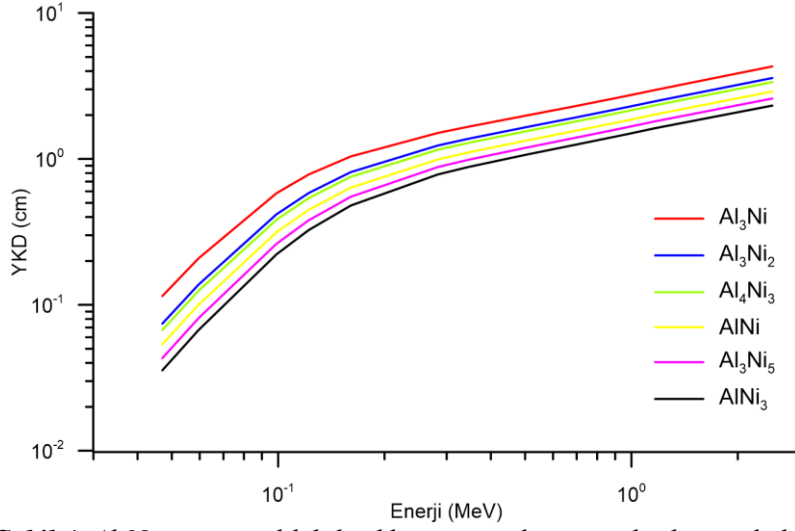


Ele alınan intermetalik bileşiklerin Lineer Soğurma Katsayıları ( $\mu$ ), ilgili malzemenin kütle soğurma katsayıları ile yoğunluklarının çarpımıyla elde edilerek, foton enerjisine bağlı değişimi Şekil 3'te verildi. Şekilden  $\mu$ 'nün enerji ile değişim grafiğinin,  $\mu/\rho$  ile benzer bir eğilime sahip olduğu görülmektedir.

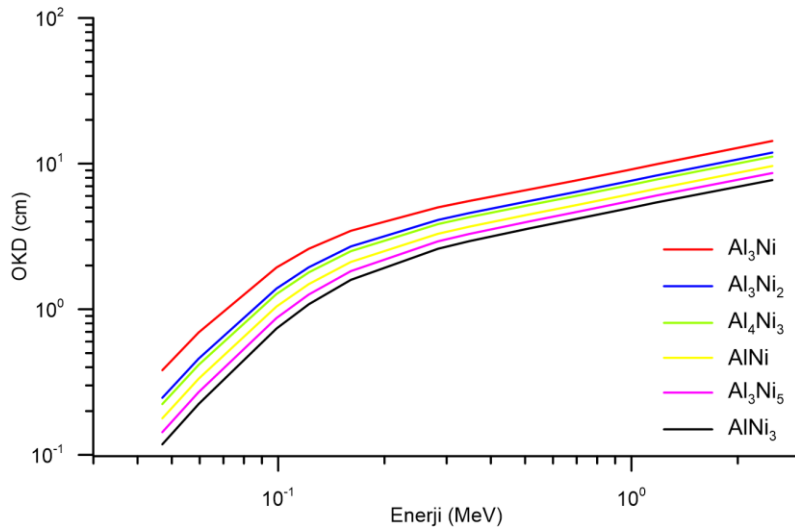


Şekil 3. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin seçilen enerjilerde WinXCom, PHITS ve GEANT4 ile hesaplanan lineer soğurma katsayıları.

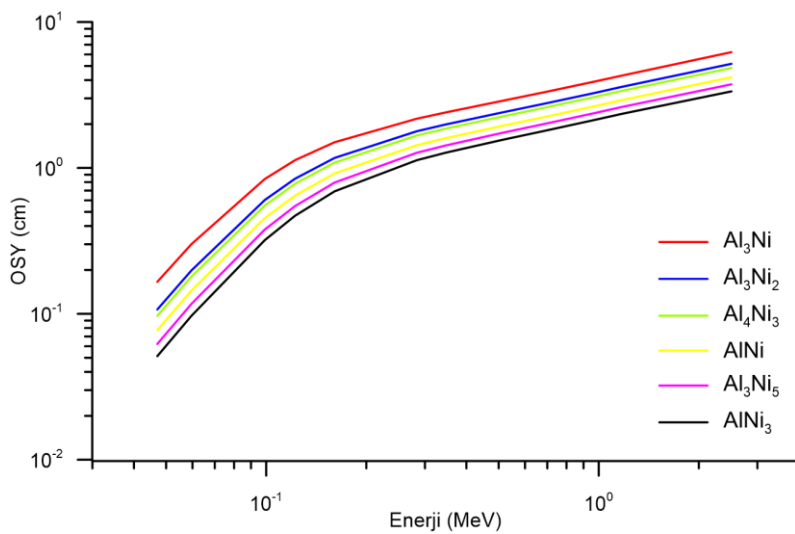
YKD, OKD ve OSY lineer soğurma katsayısı kullanılarak belirlenebilen önemli gama radyasyonu zırlama parametreleridir. Bu parametreler ile lineer soğurma katsayıları arasında ters orantı olduğundan bu parametrelerin küçük değerleri malzemenin daha iyi bir zırlama malzemesi olduğunu göstermektedir. Çalışma konusu bileşiklerin OSY, OKD ve YKD değerlerinin foton enerjisiyle değişimi Şekil 4, 5 ve 6'da verilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, gelen foton enerjisi arttıkça YKD, OKD ve OSY değerleri de artmaktadır. Yoğunluk, bileşiklerin YKD, OKD ve OSY değerlerini önemli ölçüde etkiler; böylece yoğunluğun artmasıyla YKD, OKD ve OSY azalır ve soğurma etkisi artar. Örneğin, bileşikler içinde en düşük yoğunluğa sahip olan  $\text{Al}_3\text{Ni}$  ( $4.1 \text{ g/cm}^3$ )'in  $0.047 \text{ MeV}$  deki YKD değeri  $0.1149 \text{ cm}$  iken en yüksek yoğunluğa sahip  $\text{AlNi}_3$  ( $7.5 \text{ g/cm}^3$ ) bileşiğinin bu enerjideki değeri  $0.03555 \text{ cm}$  olarak hesaplanmıştır. Benzer eğilimler OKD ve OSY'de gözlemlenmektedir. Bu yüzden  $\text{AlNi}_3$  bileşiği, gama zırlama uygulamaları için umut verici bir aday olarak düşünülebilir. Etkin atom numarası ( $Z_{\text{etk}}$ ), kompozit malzemelerin foton penetrasyonunu anlamak için sıklıkla kullanılan başka bir parametredir. Şekil 7, enerjinin bir fonksiyonu olarak bileşikler için  $Z_{\text{etk}}$ 'in grafiksel bir temsilini göstermektedir. Genel olarak  $Z_{\text{etk}}$  değerlerinin fotonun enerjisine ve bileşiklerin yapılarına güçlü bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde bileşiklerin teorik  $Z_{\text{etk}}$  değerlerinin  $\text{AlNi}_3 > \text{Al}_3\text{Ni}_3 > \text{AlNi} > \text{Al}_4\text{Ni}_3 > \text{Al}_3\text{Ni}_2 > \text{Al}_3\text{Ni}$  şeklinde büyükten küçüğe doğru sıralandığı açıkça görülmektedir.



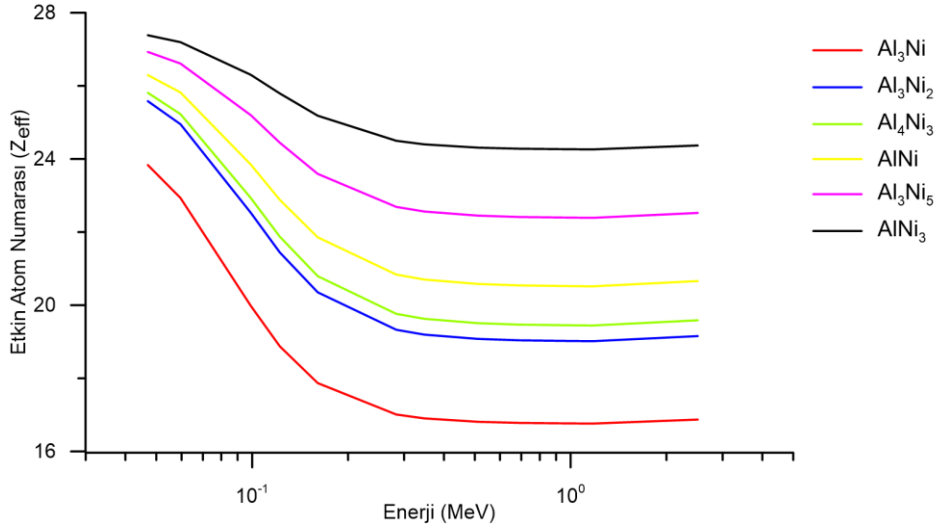
Şekil 4. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin seçilen enerjilerde yarı kalınlık değerleri.



Şekil 5. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin seçilen enerjilerde onda kalınlık değerleri.



Şekil 6. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin seçilen enerjilerde ortalama serbest yol değerleri.



Şekil 7. Al-Ni intermetalik bileşiklerinin seçilen enerjilerde  $Z_{\text{eff}}$  değerleri.

## Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada Al-Ni bileşiklerinin ( $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ ,  $\text{Al}_4\text{Ni}_3$ ,  $\text{AlNi}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}_5$  ve  $\text{AlNi}_3$ ) gama radyasyon zırlama özellikleri araştırıldı. Her bileşik için kütle soğurma katsayıları PHITS ve GEANT kodu ve XCOM programı kullanılarak, tıp ve radyografi uygulamalarında kullanılan radyoizotopların gama yayınlama enerjileri dikkate alınarak 0.047 – 2.506 MeV enerji aralığında belirlendi. Bu yöntemlerle elde edilen sonuçların iyi bir uyum içerisinde olduğu görüldü. Sonuçlar, intermetalik bileşiğin yoğunluğunun artmasıyla,  $\mu_m$  ve  $Z_{\text{eff}}$  değerlerinin arttığını, YKD, OKD ve OSY değerlerinin ise azaldığını göstermiştir. Radyasyondan korunmak için bu parametrelerin hesaplanan verilerinin dikkate alınması ve ayrıca istenen uygulamaya göre uygun bileşiğin seçimi yapılabilir. Hesaplanan parametrelere göre yoğunluğu büyük olan nikelin, bileşikteki yüzde katkısı arttıkça intermetalik bileşiğin radyasyon zırlama kapasitesinin de arttığı görüldü. Bu sonuca dayalı olarak,  $\text{AlNi}_3$  bileşiğinin diğer bileşiklere oranla gama zırlama için daha uygun bir aday olduğu tespit edildi. Al-Ni intermetalik bileşikler, literatürde zırlama malzemesi olarak önerilen diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha düşük zırlama kapasitesine sahip olsalar da, gama zırlama ihtiyacı duyulan alanlarda kullanım için yeterli düzeydedir. Ayrıca Al-Ni bileşiklerinin sahip oldukları fiziksel özellikler de (yüksek mukavemet, düşük özgül ağırlık, termal stabilite vb.) göz önünde bulundurularak bileşiklerin hastanelerde, radyasyon yayan ekipman bulunan odalarda, radyoaktif atık ürünlerin depolanmasında ve nükleer santrallerde gama radyasyonu zırlama malzemesi olarak kullanılabilmesi öngörülebilir.

## Teşekkür -

**Fon/Finansman bilgileri** Bu çalışma için herhangi bir kurum ve/veya kuruluştan destek alınmamıştır.

**Etik Kurul Onayı ve İzinler** Çalışma, etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

**Çıkar çatışmaları/Çatışan çıkarlar** Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**Yazarların Katkısı** Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır. Yazarlar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

## Kaynaklar

- [1] Li, T., Wang, D., Zhang, S., & Wang, J. (2023). Corrosion behavior of high entropy alloys and their application in the nuclear industry—An overview. *Metals*, 13(2), 363. <https://doi.org/10.3390/met13020363>
- [2] Simon, A., Barradas, N. P., Jeynes, C., & Romolo, F. S. (2023). Addressing forensic science challenges with nuclear analytical techniques – A review. *Forensic Science International*, 358 111767. <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2023.111767>
- [3] Daneshvar, H., Milan, K. G., Sadr, A., Sedighy, S. H., Malekie, S., & Mosayebi, A. (2021). Multilayer radiation shield for satellite electronic components protection. *Scientific Reports*, 11(1), 20657. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99739-2>
- [4] Jecong, J. F. M., Hila, F. C., Balderas, C. V., & Guillermo, N. R. D. (2022). Effect of the new photoatomic data library EPDL2017 to mass attenuation coefficient calculation of materials used in the nuclear medicine facilities using EpiXS software. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(9), 3440–3447. <https://doi.org/10.1016/J.NET.2022.03.030>
- [5] Kaçal, M. R., Akman, F., & Sayyed, M. I. (2019). Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(3), 818–824. <https://doi.org/10.1016/J.NET.2018.11.011>
- [6] Yılmaz, M., Erkoyuncu, İ., Gürel Özdemir, H., Demirkol, İ., Kaçal, M. R., & Akman, F. (2023). Bizmut tabanlı bazı alaşımların radyasyon zırhlama kapasitelerinin incelenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(1), 92–105. <https://doi.org/10.53433/YYUFBED.1140507>
- [7] Aygün, Z., & Aygün, M. (2022). 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. *Journal of Polytechnic*, 26(2), 795-801. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1004657>
- [8] Ekinci, N., Alsaif, N. A. M., Aygün, B., Sarıtaş, S., Kalecik, S., & Rammah, Y. S. (2023). Assessment of structural, physical properties as well as radiation safety competence of lithium borate glass-ceramics: Experimental and theoretical evaluation. *Physica Scripta*, 98(4), 045004. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ACBEEF>
- [9] Kavaz, E., El-Agawany, F. I., Tekin, H. O., Perişanoğlu, U., & Rammah, Y. S. (2020). Nuclear radiation shielding using barium borosilicate glass ceramics. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 142, 109437. <https://doi.org/10.1016/J.JPCS.2020.109437>
- [10] Kavaz, E., Tekin, H. O., Yorgun, N. Y., Özdemir, F., & Sayyed, M. I. (2019). Structural and nuclear radiation shielding properties of bauxite ore doped lithium borate glasses: Experimental and Monte Carlo study. *Radiation Physics and Chemistry*, 162, 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.05.019>
- [11] Yildiz Yorgun, N., Kavaz, E., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., & Özdemir, F. (2019). Borax effect on gamma and neutron shielding features of lithium borate glasses: An experimental and Monte Carlo studies. *Materials Research Express*, 6(11). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4fcc>

- [12] Aygün, B., Şakar, E., Agar, O., Sayyed, M. I., Karabulut, A., & Singh, V. P. (2021). Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications. *Progress in Nuclear Energy*, 133, 103645. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2021.103645>
- [13] Kilicoglu, O., More, C. V., Kara, U., & Davraz, M. (2023). Investigation of the effect of cement type on nuclear shield performance of heavy concrete. *Radiation Physics and Chemistry*, 209, 110954. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2023.110954>
- [14] Stoloff, N. S., Liu, C. T., & Deevi, S. C. (2000). Emerging applications of intermetallics. *Intermetallics*, 8(9–11), 1313–1320. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00077-7)
- [15] Liu, C. T. (1995). Recent advances in ordered intermetallics. *Materials Chemistry and Physics*, 42(2), 77–86. [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(95\)01546-9](https://doi.org/10.1016/0254-0584(95)01546-9)
- [16] Jogdand, H., Gulsoy, G., Ando, T., Chen, J., Doumanidis, C. C., Gu, Z., Rebholz, C., & Wong, P. (2008). Fabrication and characterization of nanoscale heating sources (“Nanoheaters”) for nanomanufacturing. *TechConnect Briefs*, 1, 280–283.
- [17] Kaplin, C., Ivanov, R., Paliwal, M., Jung, I. H., & Brochu, M. (2014). The effect of nanostructure on the oxidation of NiAl. *Intermetallics*, 54, 209–217. <https://doi.org/10.1016/J.INTERMET.2014.06.013>
- [18] Awotunde, M. A., Ayodele, O. O., Adegbenjo, A. O., Okoro, A. M., Shongwe, M. B., & Olubambi, P. A. (2019). NiAl intermetallic composites—a review of processing methods, reinforcements and mechanical properties. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5–8), 1733–1747. <https://doi.org/10.1007/S00170-019-03984-9/FIGURES/13>
- [19] Zhilin, S. G., Predein, V. V., & Komarov, O. N. (2023). Industrial use of high-strength intermetallic compounds based on aluminides and prospects for extending scope of their application. *Metallurgist*, 66(9–10), 1114–1126. <https://doi.org/10.1007/S11015-023-01424-4/METRICS>
- [20] Sampath, S., Ravi, V. P., & Sundararajan, S. (2023). An overview on synthesis, processing and applications of nickel aluminides: from fundamentals to current prospects. *Crystals*, 13(3), 435. <https://doi.org/10.3390/cryst13030435>
- [21] Ward-Close, C. M., Minor, R., & Doorbar, P. J. (1996). Intermetallic-matrix composites—a review. *Intermetallics*, 4(3), 217–229. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00037-2](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00037-2)
- [22] Sikka, V. K., Deevi, S. C., Viswanathan, S., Swindeman, R. W., & Santella, M. L. (2000). Advances in processing of Ni<sub>3</sub>Al-based intermetallics and applications. *Intermetallics*, 8(9–11), 1329–1337. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00078-9)
- [23] Dey, G. K. (2003). Physical metallurgy of nickel aluminides. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 28(1–2), 247–262. <https://doi.org/10.1007/BF02717135/METRICS>
- [24] Shi, D., Wen, B., Melnik, R., Yao, S., & Li, T. (2009). First-principles studies of Al-Ni intermetallic compounds. *Journal of Solid State Chemistry*, 182(10), 2664–2669. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2009.07.026>
- [25] Bochenek, K., & Basista, M. (2015). Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 79, 136–146. <https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2015.09.003>

- [26] Alzahrani, J. S., Alrowaili, Z. A., Saleh, H. H., Hammoud, A., Alomairy, S., Sriwunkum, C., & Al-Buriahi, M. S. (2021). Synthesis, physical and nuclear shielding properties of novel Pb–Al alloys. *Progress in Nuclear Energy*, 142, 103992. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2021.103992>
- [27] Sayyed, M. I., Mohammed, F. Q., Mahmoud, K. A., Lacomme, E., Kaky, K. M., Khandaker, M. U., & Faruque, M. R. I. (2020). Evaluation of radiation shielding features of Co and Ni-based superalloys using MCNP-5 code: potential use in nuclear safety. *Applied Sciences*, 10(21), 7680. <https://doi.org/10.3390/APP10217680>
- [28] Almuqrin, A. H., Jecong, J. F. M., 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. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103748>
- [29] Yıldırım, S., Tugrul, A. B., Buyuk, B., & Demir, E. (2016). Gamma attenuation properties of some aluminum alloys. *Acta Physica Polonica A*, 129(4), 813–815. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.129.813>
- [30] El-Mesady, I. A., Hussein, A. E., Semaary, M. M., & Othman, S. M. (2023). Investigation of the mechanical properties, shielding parameters and flux distribution in borate - Based glass system using PHITS code; a simulation study. *Optical Materials*, 138, 113699. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113699>
- [31] Alzahrani, J. S., Alothman, M. A., Eke, C., Al-Ghamdi, H., Aloraini, D. A., & Al-Buriahi, M. S. (2021). Simulating the radiation shielding properties of TeO<sub>2</sub>–Na<sub>2</sub>O–TiO glass system using PHITS Monte Carlo code. *Computational Materials Science*, 196, 110566. <https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2021.110566>
- [32] Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., & Levring, H. (2004). WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry*, 71(3–4), 653–654. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2004.04.040>
- [33] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. I., Kai, T., Matsuya, Y., Matsuda, N., Hirata, Y., Sekikawa, T., Yao, L., Tsai, P., Ratliff, H. N., Iwase, H., Sakaki, Y., Sugihara, K., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. (2024). Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 61(1), 127–135. <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736>
- [34] Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytracsek, R., . . . Zschesche, D. (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8)
- [35] Cirrone, G. A. P., Cuttone, G., Di Rosa, F., Pandola, L., Romano, F., & Zhang, Q. (2010). Validation of the Geant4 electromagnetic photon cross-sections for elements and compounds. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 618, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.02.112>
- [36] Kuttukaran, S. S., Ambika, M. R., Malathi, C., & Nagaiah, N. (2023). DMSO-Bismuth polymer composite as gamma radiation shield – A computational study. *Materials Today: Proceedings*, 89, 75–83. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.05.398>

- [37] Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., & Gerward, L. (2008). On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(18), 3906–3912. <https://doi.org/10.1016/J.NIMB.2008.06.034>