



Makale / Research Paper

Ni Tabanlı Bazı Süperalaşımın Foton Etkileşim Özelliklerinin İncelenmesi

Zeynep Işık KARADOĞAN^{1a*}, Yüksel ÖZDEMİR^{1b}, Esra KAVAZ^{1c}

¹Atatürk Üniversitesi, Fizik Bölümü, Atom ve Molekül Fiziği ABD, Erzurum/TÜRKİYE
isik.zeynep25@hotmail.com

Received/Geliş: 26.11.2020

Accepted/Kabul: 14.01.2020

Öz: Gelişen teknoloji ile sağlık, nükleer santraller, medikal onkoloji, sanayi ve teknoloji, kontak lensler gibi birçok alanda iyonlaştırıcı radyasyonun kullanımı ve bununla birlikte canlıların radyasyona maruz kalma ihtimalleri artmaktadır. Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmanın temel unsurlarından bir tanesi zırhlama. Bu çalışmada seçilen 14 Ni tabanlı süperalaşımın (Nimonic 901, Alloy 10, Hastelloy X, Haynes 242, Incoloy 801, Inconel 706, Nasair 100, PWA 1480, X4, Nominal, H282-B, H282-C, 247, MCrAlYHf) gama ve X-ışını radyasyonu zırhlama yetkinlikleri incelenmiş birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için WinXCOM programı kullanılarak γ ve X ışını zırhlamada önemli parametreler olan kütle soğurma katsayısı (μ_p), yarı kalınlık değeri (HVL), etkin atom numarası (Z_{eff}), elektron yoğunluğu (N_e) 1 keV- 100 GeV enerji aralığında çalışılan süperalaşım için hesaplanmıştır. Ayrıca foton build-up faktörü zırhlama ve radyasyon doz hesaplamalarında önemli bir parametredir. Bu sebeple süperalaşımın maruz kalma buildup faktörleri (EBF) farklı nüfuz etme derinlikleri için (1-40 mfp) 0,015–15 MeV enerji aralığında elde edildi. X4 ve PWA 1480 süperalaşım için μ_p değerleri 0,015 ve 15 MeV foton enerjileri için sırasıyla 74,71 cm²/g-0,033 cm²/g ve 74,50 cm²/g-0,033 cm²/g olarak bulunurken, Z_{eff} değerleri 35,135- 32,322 ve 35,013-32,221 aralığında değişmektedir. MCrAlYHf alaşımı için μ_p değerleri ve Z_{eff} değerleri sırasıyla 56,79 cm²/g-0,031 cm²/g ve 25.867-26.686 aralığında değişmektedir. Sonuç olarak seçilen numuneler arasında nikel tabanlı X4 ve PWA 1480 süperalaşım için en büyük μ_p ve Z_{eff} değerlerine sahipken, en küçük HVL ve EBF değerine sahiptir. Bu durumda tüm enerji bölgeleri dikkate alındığında hesaplanan parametrelerin tamamının numunelerin kimyasal kompozisyonuna bağlı olduğu ve X4 ve PWA1480 süperalaşımının Ni tabanlı süperalaşım içinde en üstün radyasyon soğurma kabiliyetine sahip olduğu ve hâlihazırda kullanılan birçok zırh malzemesinden üstün radyasyon soğurma kabiliyetinin olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Süperalaşım, zırhlama, etkin atom numarası, kütle soğurma katsayısı, build-up faktörü.

Investigation of Photon Interaction Properties of Some Ni-Based Superalloys

Abstract: With the developing technology, the use of ionizing radiation in many areas such as health, nuclear power plants, medical oncology, industry and technology, contact lenses, and with this, the possibility of exposure to radiation for living creatures increases. One of the basic facts of protection from the harmful effects of radiation is shielding. In this study, gamma and X-ray radiation shielding capabilities of the selected 14 Ni-based superalloys (Nimonic 901, Alloy 10, Hastelloy X, Haynes 242, Incoloy 801, Inconel 706, Nasair 100, PWA 1480, X4, Nominal, H282-B, H282-C, 247, MCrAlYHf) were examined and compared with each other. WinXCOM program is used for this. For this, the mass attenuation coefficient (μ_p), half-value thickness layer (HVL), effective atomic number (Z_{eff}), and electron density (N_e) which are important parameters in shielding γ and X rays, were calculated for the alloys studied in the energy range between 1 keV and 100 GeV In addition, photon build-up factor is an important parameter in shielding and radiation dose calculations. For this reason, the exposure buildup factors (EBF) of Ni-based superalloys were obtained in the energy range of 0.015–15 MeV for different penetration depths (1-40 mfp). For X4 and PWA 1480 superalloys, μ_p values are found as 74.71 cm²/g-

Bu makaleye atf yapmak için

Karadoğan, Z. I., Özdemir, Y., Kavaz, E., "Ni Tabanlı Bazı Süperalaşımın Foton Etkileşim Özelliklerinin İncelenmesi", El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2021, 8(2); 552-566

How to cite this article

Karadoğan, Z. I., Özdemir, Y., Kavaz, E., "Investigation of Photon Interaction Properties of Some Ni-Based Superalloys", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8(2); 552-566.

ORCID ID: *0000-0001-5083-6816, ^b0000-0003-3684-6254, ^c0000-0002-7016-2510

0.033 cm²/g and 74.50 cm²/g-0.033 cm²/g, respectively for 0.015 and 15 MeV photon energies, while Z_{eff} values vary between 35.135-32.322 and 35.013-32.221. The μ_p values and Z_{eff} values for MCrAlYHf alloy range from 56.79 cm²/g -0.031 cm²/g and 25.867-26.686, respectively. As a result, among the selected samples, nickel-based X4 and PWA 1480 superalloys have the largest μ_p and Z_{eff} values, while the smallest HVL and EBF values. In this case, considering all energy regions, all of the calculated parameters depend on the elemental composition of the samples. Accordingly, it can be said that X4, PWA1480 superalloys have the highest radiation absorption capability among Ni-based superalloys and has superior radiation absorption capability than many armor materials currently used.

Keywords: Superalloys, shielding, effective atomic number, mass attenuation coefficient, build-up factor

1. Giriş

Medikal uygulamalar, nükleer silahlar ve reaktörler γ ve X ışınları gibi güvenli olmayan suni nükleer emisyonun temel kaynaklarıdır. Yüksüz ve kütsüz olan γ ışınlarının çok uzun mesafelerde hareket etmesi ve malzeme içinden kolayca geçmesi canlılar için en tehlikeli boyutlara ulaşan iyonlaştırıcı radyasyon tipi olmasını sağlar. İnsanlar gamma radyasyonuna uzun süre maruz kalırsa kan hücreleri zarar görür ve bu durum kanser gibi tehlikeli hastalıklara davetiye çıkarır. Canlıları iyonlaştırıcı radyasyonun zararlarından korumak için geleneksel zırh malzemesi olarak bilinen kurşun bloklar ve ağır agregalarla üretilen betonlar uzun yıllardır kullanılmaktadır [1,2]. Kurşunun toksik etkileri ve kurşun, beton blokların kullanımı açısından bazı dezavantajları sebebiyle araştırmacılar yeni zırh malzemelerine yönelmişlerdir [3,4].

Son zamanlarda çeşitli cam sistemleri ve alaşımların radyasyon zırhı olarak kullanılabilirliği birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Cam malzemeler, hazırlama kolaylığı, yüksek berraklık, düşük maliyet, iyi ısı kararlılık ve kimyasal kalıcılık gibi sınırsız kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir [5]. Gama radyasyonundan korunmak için fosfat, tellür, borat, germanat ve silikat tabanlı cam sistemlerine çeşitli ağır oksitler (Bi₂O₃, CeO₂, Er₂O₃, PbO, AgO, HgO) katılarak radyasyon soğurma kabiliyetleri artırılmaktadır. Endüstride ve teknolojik uygulamaların birçoğunda alaşımlar geniş kullanım alanına sahiptir. Çok farklı kompozisyonlarda hazırlanabilmeleri, korozyona olan dayanıklılıkları, mekanik özelliklerinin birçok malzemeye göre üstün olması ve genellikle yüksek atom numaralı elementlerden oluşmaları sebebiyle alaşımların özellikle nükleer tesislerde çoğu ekipmanda kullanımı mevcuttur [6]. Literatürde çeşitli alaşımların radyasyon zırhlama kapasiteleri değerlendirilmiş ve ilgi çekici sonuçlar elde edilmiştir [7]. Farklı oranlarda bor içeriğine sahip demir bor alaşımlarının gama ve nötron zırhlama kapasitesi deneysel ve teorik olarak incelenmiş ve bor katkılı alaşımların hızlı nötronlara karşı iyi bir zırh olarak kullanılabileceği [8] gösterilmiştir. Al₂₅Zn alaşımlarına farklı oranlarda Ti ilavesinin alaşımın gama fotonlarını durdurma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. En yüksek Ti oranına sahip alaşımın radyasyon zırhlamada daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Yine çeşitli alaşım türlerinin gama radyasyonuna karşı gösterdiği koruma; pirinç alaşımlar [9], Pb-Cu alaşımlar [10], Pb - Sn, Pb - Zn ve Sn - Zn [11] ikili alaşımları ve daha birçok alaşım için değerlendirilmiş ve bu alaşımların radyasyon zırhı olarak geleneksel birçok malzemedan daha başarılı olduğu rapor edilmiştir.

Süperalaşımlar mükemmel oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklıktaki mekanik kararlılıkları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamaları için önemli malzemelerdir [12]. Ni tabanlı süperalaşımlar, havacılık ve enerji üretimi endüstrilerinde önemli bir rol oynar. Bu süperalaşımlar zorlu koşullar altında korozyon ve oksidasyona karşı tatmin edici dirençlerinden dolayı yüksek sıcaklıklarda çalışma imkânı sağlar ve bu sebeple yüksek verimli gaz türbini motorlarının üretilmesinde kullanılır [13]. Bu üstün özellikleri ile Ni tabanlı süperalaşımların özellikle nükleer reaktörlerde kullanılabilmesi göz önüne alınarak radyasyon zırhlama kabiliyetlerini değerlendirmek anlamlı olacaktır [14]. MCNP-5 simülasyon kodlarını kullanarak beş adet Co ve Ni tabanlı süperalaşımın

gama radyasyonuna karşı gösterdiği korumayı araştırmıştır ve Ni tabanlı MAR-247 ve MAR-302 süperalaşımının diğer süperalaşımlara nazaran daha iyi radyasyon soğurma yeteneğine sahip olduğunu bulmuştur [14].

Yukarıda bahsedilen üstün özellikler, endüstriyel uygulamalarda sık kullanım, kolay ulaşılabilirlik ve yüksek mekanik özellikler süperalaşımın radyasyon zırhı olarak kullanılabilirliği konusunda avantaj sağlayabileceği düşüncesine yöneltmektedir. Bu noktadan hareketle endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan 14 Ni tabanlı süperalaşımın (Nimonic 901, Alloy 10, Hastelloy X, Haynes 242, Incoloy 801, Inconel 706, Nasair 100, PWA 1480, X4, Nominal, H282-B, H282-C, 247, MCrAlYHf) referanslardan [15,16,17-18], alınarak radyasyon zırhlama kapasiteleri araştırılmıştır. Çalışmada literatürden seçilen süperalaşımın geleneksel olarak kullanılan birçok radyasyon zırh malzemesinden daha başarılı olabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla seçilen süperalaşımın kütle soğurma katsayıları (μ_p) WinXCOM programında 1 keV-100 GeV enerji aralığında hesaplanmıştır. Bulunan μ_p değerlerinden faydalanarak süperalaşımın yarı değer kalınlığı (HVL), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{el}) parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca süperalaşımın buildup faktörü (EBF) değerleri, 0,015-15 MeV enerji aralığında foton enerjisine ve 1-40 ortalama serbest yol (mfp) için nüfuz etme derinliğine bağlı olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların radyasyon zırhlama literatürüne önemli bir katkı sağlayacağı kanısındayız.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışmada Kullanılan Alaşım

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan ve radyasyon zırhlama parametreleri literatürde mevcut olmayan on dört Ni tabanlı süperalaşımın (Nimonic 901, Alloy 10, Hastelloy X, Haynes 242, Incoloy 801, Inconel 706, Nasair 100, PWA 1480, X4, Nominal, H282-B, H282-C, 247, MCrAlYHf) elementel konsantrasyonları [15, 16, 17-18] referanslarından alınarak foton etkileşim parametreleri araştırılmıştır. Bu süperalaşımın elementel kompozisyonları Tablo 1’de verilmiştir. Teorik bir çalışma yürütülmek suretiyle, seçilen alaşımın radyasyon zırhlama parametreleri WinXCOM [19] yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

2.2. Hesaplamalar

Gama ve X-ışınlarının madde ile etkileşimi esnasında şiddetindeki azalma Beer-Lambert Kanunu ile ifade edilir [20];

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

Eşitlik 1’de I_0 ve I , sırasıyla gelen ve geçen foton yoğunluğunu belirtir. Ayrıca μ , lineer soğurma katsayısını ve x , araştırılan malzemenin kalınlığını temsil eder. Kütle soğurma katsayısı (μ_p) birim alanda birim kütle başına radyasyon şiddetindeki azalmayı verir ve

$$\mu_p = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu çalışmada, μ_p değerleri WinXCOM yazılımı ile hesaplanmıştır [19].

Etkin atom numarası (Z_{eff}), gama ve X-ışınlarının maddedeki penetrasyonunu tespit etmede önemli temel niceliklerden biridir. Z_{eff} kompozit malzemeler için ortalama atom numarasını vermektedir. Bu çalışmada Z_{eff} değerleri direkt yöntem kullanılarak hesaplanmıştır [21].

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_j f_j \frac{A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j} \quad (3)$$

Etkin elektron yoğunluğu (N_{el}) birim kütle başına düşen elektron sayısı olarak tanımlanmakla birlikte etkin atom numarasıyla da yakından ilişkilidir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan Ni tabanlı süperalaşımın elementel kompozisyonu

Alaşımlar	Cr	Mo	Al	Ti	C	Ni	Co	W	Nb	Hf	Ta	B	Zr	Fe	Re	Mn	Si
Nimonic 901	12,5	5,75	0,35	2,9	0,05	78,45											
Alloy 10	11,5	2,3	3,8	3,9	0,030	55,05	15	5,9	1,7		0,75	0,020	0,05				
Hastelloy X	22	9	0,25		0,10	48,05	1,5	0,6						18,5			
Haynes 242	8	25	0,25		0,15	62,092	2,5					0,003		2			
Incoloy 801	20,5			1,13	0,05	32,02								46,3			
Inconel 706	16		0,2	1,8	0,03	39,07			2,9					40			
Nasair 100	9	1	5,75	1,2		69,25		10,5			3,3						
PWA 1480	10		5	1,5		62,5	5	4			12						
X4	6,4	0,6	5,8	1		60,8	9,5	6,4			6,5				2,9		
Nominal	18,5	8	1,38	1,9	0,04	59,23	9							1,5		0,3	0,15
H282-B	19,2	8,49	1,27	2,22	0,08	58,46	9,86									0,25	0,15
H282-C	19,1	8,5	1,54	1,94	0,08	58,51	9,85									0,25	0,14
247	8,5	0,62	5,6	1	0,16	59,1	10,2	10			3,2				0,02		
MCrAlYHF	16,7		12,3		0,01	48	21,6	0,01									

Saf bir element için $N_{el} = N_A Z/A$ ifadesi kullanılmakla beraber bu ifade kompozit bir malzeme için aşağıdaki gibi genelleştirilebilmektedir [22];

$$N_{el} = N_A \frac{n Z_{eff}}{\sum_i n_i A_i} = N_A \frac{Z_{eff}}{\langle A \rangle} \quad (4)$$

Radyasyon zırlamada önemli diğer parametreler yarı değer kalınlık (HVL) ve ortalama serbest yol (mfp)'dur. HVL , gelen radyasyonun yoğunluğunu, saçılma veya emilim yoluyla %50 azaltmak için gerekli malzeme kalınlığı olarak tanımlanırken, mfp iki etkileşim arasında bir fotonun kat ettiği ortalama fiziksel mesafeyi ifade eder. HVL ve mfp aşağıdaki denklemlerle elde edilebilir [23].

$$HVL = 0.693/\mu, \quad mfp = 1/\mu \quad (5)$$

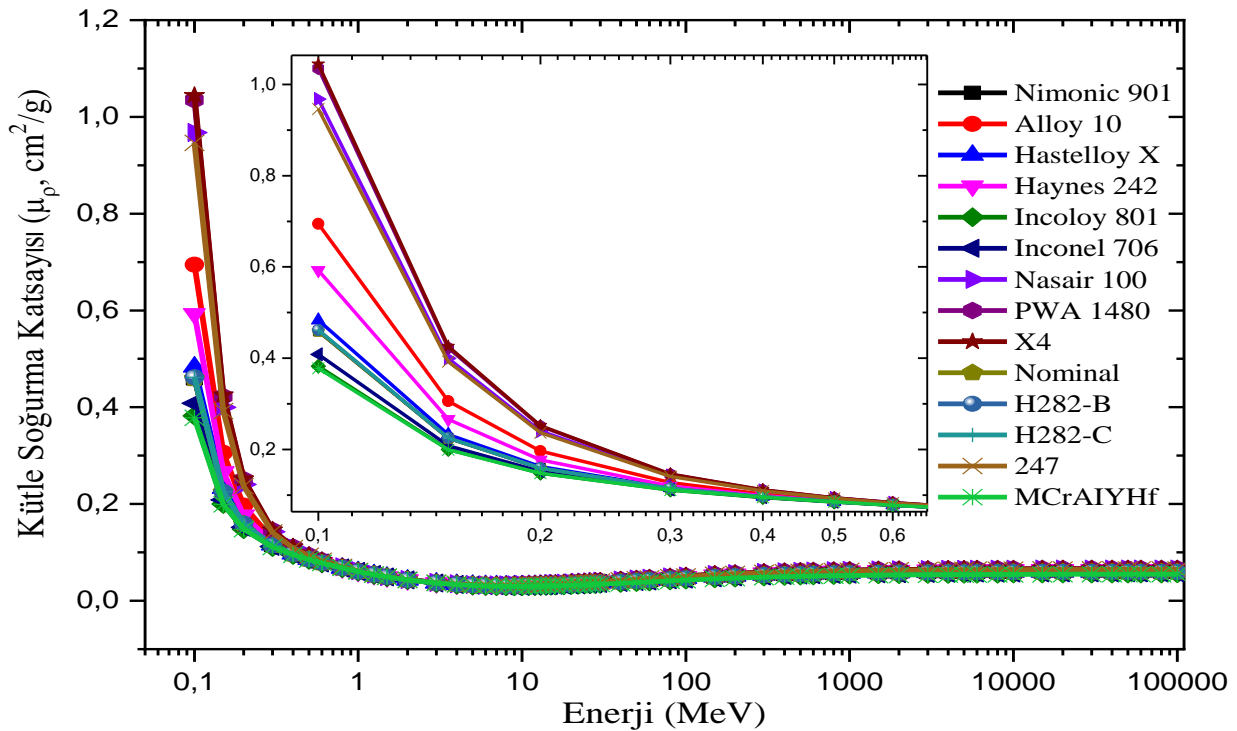
Bir malzeme için bu ifadelerden elde edilen daha düşük HVL ve mfp değerleri, incelenen malzeme için daha iyi bir foton zırlama verimliliğine işaret eder.

Fotonların malzeme içerisinde ve dışında meydana getirebileceği saçılmaları hesaba katmak için kullanılan parametreler enerji soğurma (EABF) ve maruz kalma buildup faktörüdür (EBF). EBF, radyasyon kaynağı ile dedektör arasındaki hava ile olası etkileşimlerin büyüklüğünü verirken, EABF, radyasyonun etkileşime girdiği maddedeki emilen veya biriken foton miktarı hakkında fikir verir [24]. EABF ve EBF parametreleri Geometrik İlerleme (GP) uydurma metodu kullanılarak hesaplanmaktadır. Amerikan Nükleer Topluluğu (ANSI / ANS-6.4.3, 1991), 23 element için (Be,

B, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ar, K, Ca, Fe, Cu, Mo, Sn, La, Gd, W, Pb ve U), 0.015 MeV – 15 MeV aralığındaki standart foton enerjileri için 1-40 *mfp* penetrasyon derinliklerinde GP uydurma parametrelerini bir veri tabanı olarak sunmuştur. Bu çalışmada alaşımlar için GP uydurma yaklaşımı kullanılarak EBF değerleri hesaplanmıştır. Buildup faktörlerinin hesaplanması için detaylı bilgi literatürde birçok çalışmada mevcuttur [25,22-26].

3. Sonuçlar ve Tartışma

Şekil 1’de seçilen Ni tabanlı süperalaşımlar için WinXCOM programı kullanılarak 1 keV- 100 GeV enerji aralığında hesaplanan kütle soğurma katsayıları (μ_p)’nın foton enerjisi ile değişimi görülmektedir. Ayrıca Tablo 2’de 0,015-15 MeV enerji aralığında seçilen süperalaşımların μ_p değerleri verilmektedir. Düşük enerji bölgesinde soğurma katsayısının enerjinin artmasıyla hızlı bir şekilde azaldığı görülür. Çünkü bu bölgede fotoelektrik etki baskındır ve fotoelektrik tesir kesiti Z^{4-5} ile orantılıdır. Bu bölgede kütle soğurma katsayısı (μ_p) en büyük değerini alır. Süperalaşımların 0,015 ve 15 MeV foton enerjilerinde μ_p değerleri sırasıyla 52,64 cm^2/g -74,50 cm^2/g ve 0.031 cm^2/g -0.035 cm^2/g aralığında değişmektedir. Tablo 2 incelendiğinde, X4 ve PWA1480 süperalaşımları en büyük μ_p değerlerine sahipken MCrAlYHf ve Nominal süperalaşımları ise en küçük değerlere sahiptir. X4 süperalaşımında Ta ve Re ve PWA1480 süperalaşımında Ta elementlerinin varlığı malzemenin soğurma yeteneğini artırmıştır. Orta enerji bölgesine kaydıka Compton Saçılması baskın hâle gelmeye başlar ve burada Compton saçılma tesir kesiti Z ile lineer bir değişime sahiptir. Bu bölgede μ_p değerleri alaşımların kompozisyonlarına güçlü bir şekilde bağlı değildir ve tüm süperalaşımlar için neredeyse sabittir. Yüksek enerjilere doğru gidildikçe μ_p değerlerinde yavaşça bir artış olduğu görülür. Bunun sebebi yüksek enerjilerde çift oluşum mekanizmasının baskın oluşu ve beraberinde etkileşim tesir kesitinin Z^2 ile değişmesidir.



Şekil 1. Ni tabanlı süperalaşımlarda μ_p 'nin enerjiye göre değişimi.

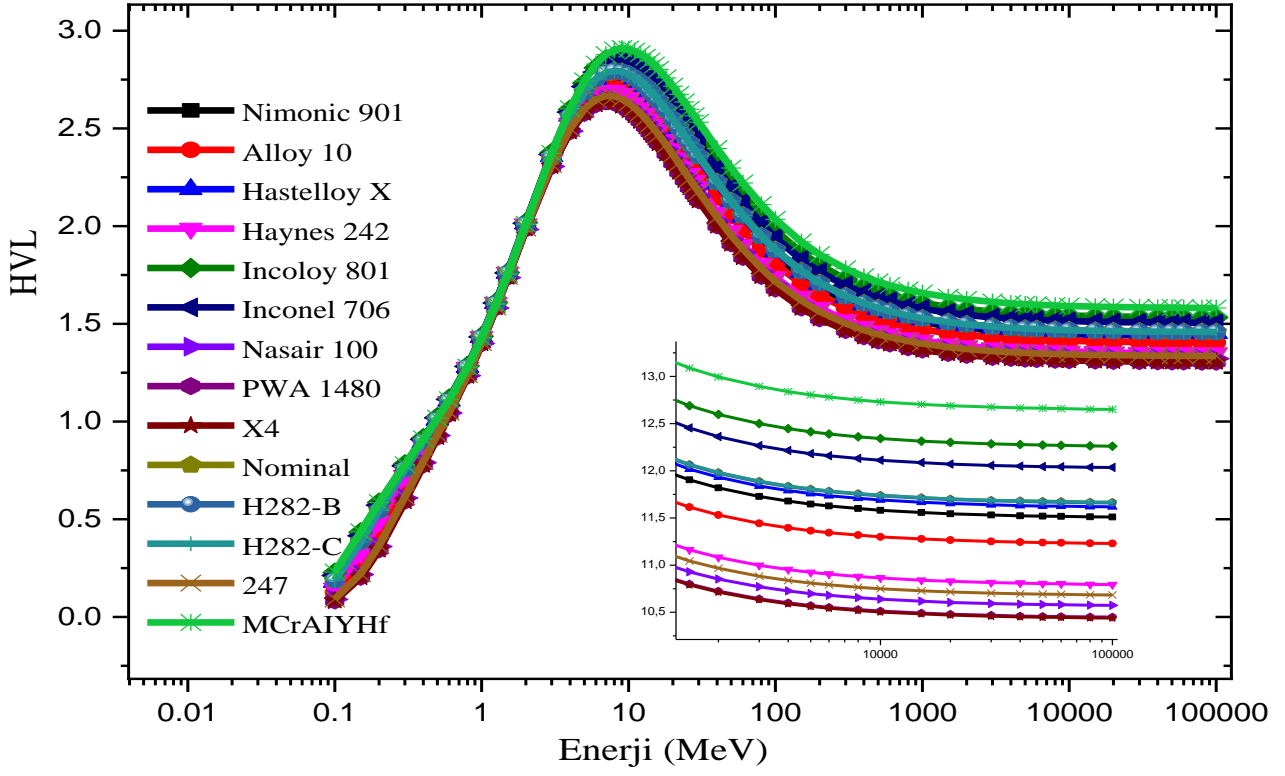
Şekil. 2 Ni tabanlı süperalaşımların yarı değer kalınlığının (HVL) foton enerjisi ile değişimini sunmaktadır. HVL değerleri bir malzemenin soğurma yeteneğini doğrudan gösteren önemli bir parametredir. X4, PWA1480 ve Nasair 100 süperalaşımları küçük HVL değerlerine sahiptir.

Tablo 2. 0,015-15 MeV enerji aralığında alaşımların kütle azaltma katsayıları

Enerji (MeV)	Kütle azaltma katsayısı (μ_p , cm^2/g)													
	Nimonic 901	Alloy 10	Hastelloy X	Haynes 242	Incoloy 801	Inconel 706	H282-C	MCrAlYHF	Nasair 100	PWA 1480	X4	Nominal	H282-B	247
1,50E-02	63,975	65,564	58,996	57,475	58,882	59,251	59,697	56,794	73,330	74,503	74,712	52,649	59,759	72,407
2,00E-02	32,856	32,553	32,691	42,737	26,559	28,643	32,698	25,699	34,309	34,205	34,721	26,109	32,718	33,618
3,00E-02	10,683	10,632	10,701	14,353	8,473	9,206	10,692	8,230	11,256	11,221	11,410	8,415	10,697	11,015
4,00E-02	4,776	4,783	4,800	6,494	3,764	4,102	4,792	3,666	5,090	5,079	5,168	3,757	4,795	4,979
5,00E-02	2,576	2,595	2,595	3,514	2,030	2,213	2,589	1,983	2,773	2,770	2,818	2,033	2,590	2,712
6,00E-02	1,575	1,595	1,589	2,142	1,248	1,358	1,584	1,222	1,709	1,709	1,738	1,253	1,585	1,672
8,00E-02	0,760	1,173	0,803	1,012	0,615	0,663	0,764	0,605	1,656	1,777	1,793	0,618	0,765	1,618
1,00E-01	0,459	0,695	0,483	0,593	0,382	0,408	0,462	0,378	0,968	1,035	1,044	0,384	0,462	0,946
1,50E-01	0,225	0,306	0,233	0,266	0,200	0,208	0,225	0,199	0,400	0,422	0,426	0,201	0,225	0,392
2,00E-01	0,160	0,197	0,163	0,177	0,148	0,152	0,159	0,148	0,240	0,251	0,252	0,148	0,159	0,237
3,00E-01	0,115	0,127	0,116	0,120	0,111	0,112	0,115	0,111	0,143	0,146	0,146	0,111	0,115	0,141
4,00E-01	0,097	0,102	0,097	0,099	0,095	0,095	0,097	0,095	0,110	0,111	0,111	0,094	0,097	0,109
5,00E-01	0,086	0,089	0,086	0,087	0,085	0,085	0,086	0,085	0,093	0,094	0,094	0,084	0,086	0,093
6,00E-01	0,079	0,080	0,078	0,079	0,078	0,078	0,078	0,078	0,083	0,083	0,083	0,077	0,078	0,083
8,00E-01	0,068	0,069	0,068	0,068	0,067	0,068	0,068	0,068	0,070	0,070	0,070	0,067	0,068	0,070
1,00E+00	0,061	0,061	0,060	0,061	0,060	0,060	0,061	0,061	0,062	0,062	0,062	0,060	0,061	0,062
1,50E+00	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,050	0,050	0,050	0,049	0,049	0,050
2,00E+00	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,044	0,044	0,044	0,043	0,043	0,044
3,00E+00	0,037	0,037	0,037	0,037	0,036	0,037	0,037	0,037	0,038	0,038	0,038	0,036	0,037	0,037
4,00E+00	0,034	0,034	0,034	0,034	0,033	0,034	0,034	0,033	0,035	0,035	0,035	0,033	0,034	0,035
5,00E+00	0,033	0,033	0,032	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032	0,034	0,034	0,034	0,031	0,032	0,033
6,00E+00	0,032	0,032	0,031	0,032	0,031	0,031	0,031	0,031	0,033	0,033	0,033	0,030	0,031	0,033
8,00E+00	0,031	0,032	0,031	0,032	0,030	0,030	0,031	0,030	0,033	0,033	0,033	0,030	0,031	0,033
1,00E+01	0,032	0,032	0,031	0,033	0,030	0,031	0,031	0,030	0,033	0,033	0,033	0,030	0,031	0,033
1,50E+01	0,033	0,033	0,033	0,034	0,031	0,032	0,032	0,031	0,035	0,035	0,035	0,031	0,032	0,035

Fotoelektrik ve çift oluşumun egemen olduğu düşük ve yüksek enerji bölgesinde *HVL* değerlerinin süperalaşımın elementel konsantrasyonuna önemli derece bağlı olduğunu gösterir. *HVL* değeri ne

kadar küçükse malzeme radyasyonu o kadar iyi soğurur. Dolayısıyla en küçük *HVL* değerine sahip süperalaşım X4, PWA 1480 ve Nasair 100 gama radyasyonunu soğurmada en başarılı iken, en büyük *HVL* değerine sahip süperalaşım MCrAlYHf en düşük radyasyon soğurma yeteneği göstermektedir.

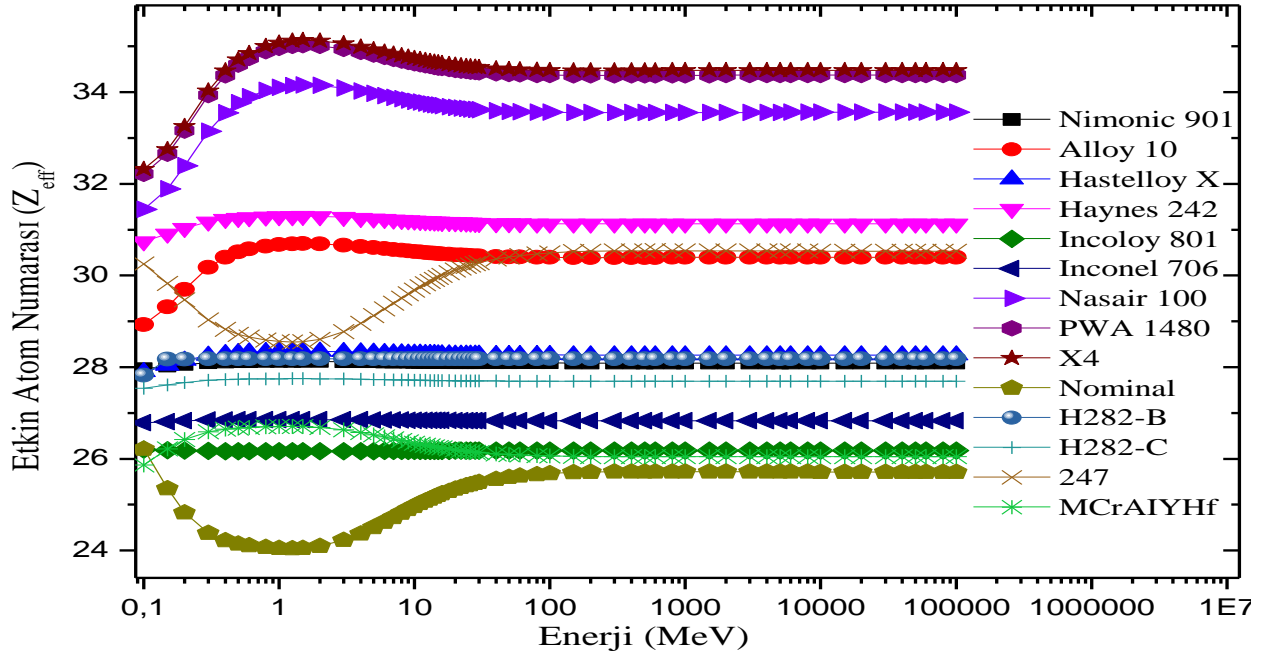


Şekil 2. Ni tabanlı süperalaşımlarda *HVL*'nin enerjiye göre değişimi.

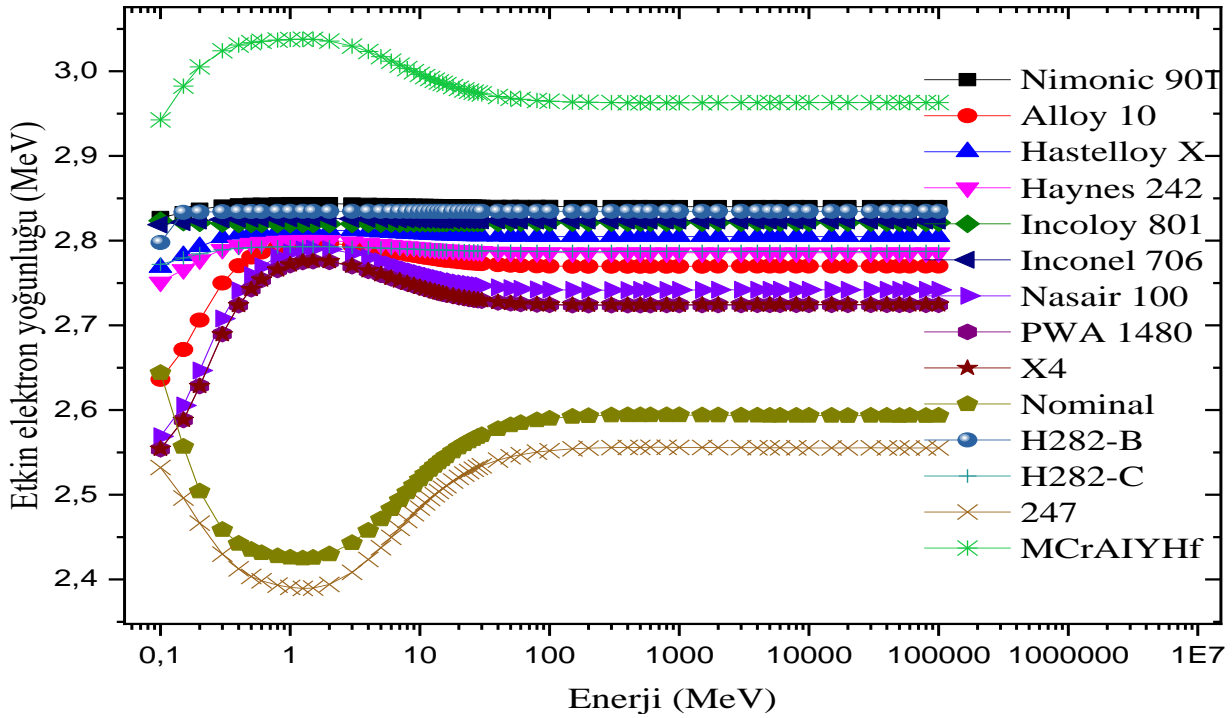
Şekil 3. Ni tabanlı süperalaşımların etkin atom numarasının (Z_{eff}) enerjiyle değişimini ifade etmektedir. Burada μ_p 'nin foton enerjisi ile değişiminde olduğu gibi üç farklı foton-madde etkileşim mekanizmasının var olduğu açıktır.

Düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkinin baskın olması sebebiyle Z_{eff} en büyük değerlerini almaktadır. X4, PWA1480 ve Nasair 100 süperalaşımları en büyük Z_{eff} değerlerine sahiptir. Genel olarak alaşımların Z_{eff} değerleri 24-35 aralığında değerler almaktadır. Nominal alaşımı en küçük Z_{eff} değerlerine sahiptir. Bir zırh malzemesinde aranan en önemli özelliklerden biri malzemenin atom numarası veya Z_{eff} değerinin mümkün olduğunca büyük olmasıdır. Bu sebeple seçilen alaşımların gama radyasyonunu soğurmada kullanılan geleneksel malzemeler dikkate alındığında iyi derece radyasyon soğurduğu söylenebilir.

Şekil 4 Ni tabanlı süperalaşımların elektron yoğunluğunun enerjiyle değişimini göstermektedir. N_{el} 'in enerjiye göre değişimi Z_{eff} 'le benzerlik göstermektedir. Ancak burada önemli diğer bir parametre malzemenin ortalama atomik ağırlığıdır (Denklem 4'e bakınız). Ortalama atom ağırlığı en küçük olan MCrAlYHf alaşımı en büyük N_{el} değerlerine sahipken, Nominal ve 247 alaşımları en küçük N_{el} değerine sahiptir.



Şekil 3. Ni tabanlı süperalaşımlarda Z_{eff} enerjeye göre değişimi.



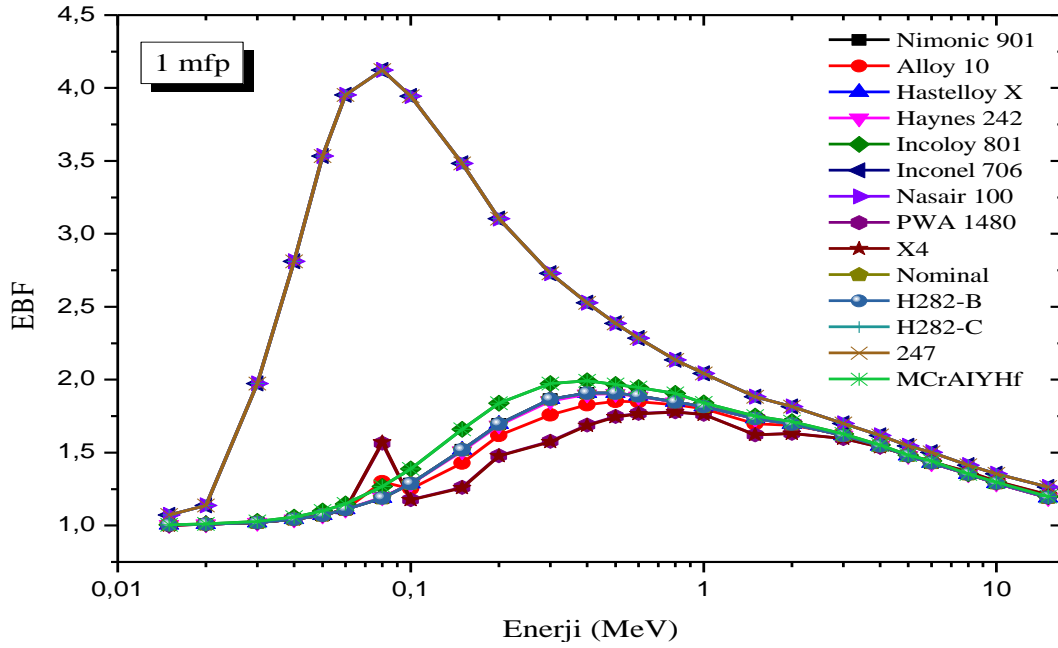
Şekil 4. Ni tabanlı süperalaşımlarda N_{el} 'in enerjeye göre değişimi.

Ni tabanlı süperalaşımların maruz kalma build up faktör (EBF) değerlerinin foton enerjisi ile değişimi Şekil 5 (a-c)'de verilmiştir. Ayrıca, Tablo 3'te Ni tabanlı süperalaşımların eşdeğer atom numaraları (Z_{eq}) verilmiştir. Tablo incelendiğinde Nasair100 ve X4 alaşımlarının en büyük Z_{eq} değerlerini aldığı görülmektedir. Düşük enerji bölgesinde seçilen tüm nüfuz etme derinlikleri için EBF değerleri küçüktür. 0,1 MeV'e yaklaştıkça EBF değerleri artmaya başlar. 0,07 MeV civarında X4 ve PWA1480 için küçük keskin bir pik gözlenir.

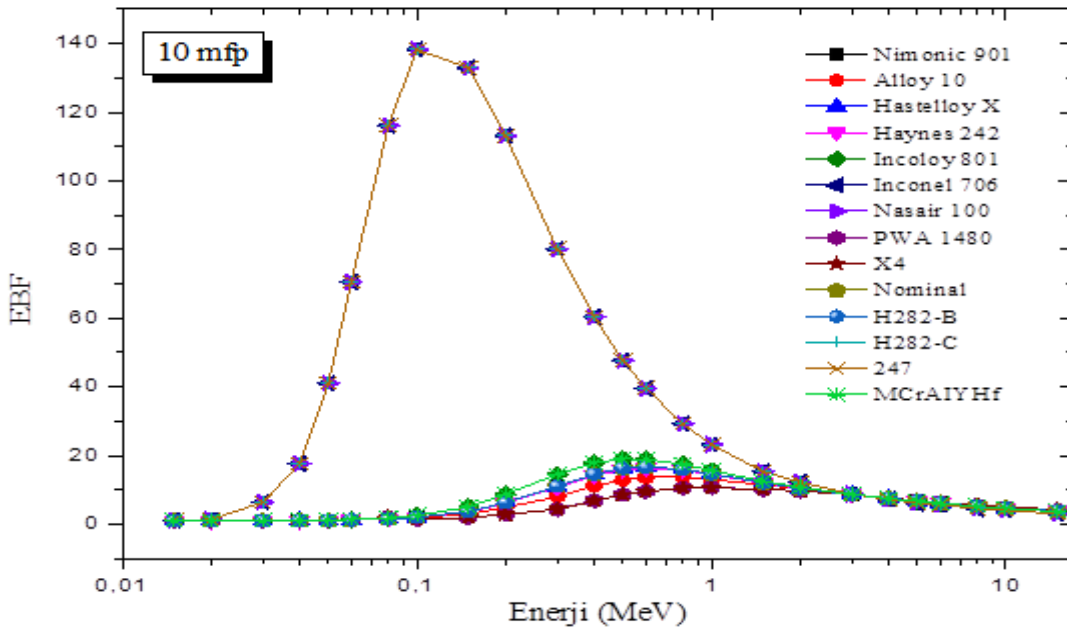
Tablo 3. Ni tabanlı süperalaşımlarda eşdeğer atom numarasının (Z_{eq}) 0,015 -15 MeV enerji aralığındaki değişimi

Energy (MeV)	Nimonic 901	Alloy 10	Hastelloy X	Haynes 242	Incoloy 801	Inconel 706	Nasair 100	PWA 1480	X4	Nominal	H282-B	247	MCrAlYHF	H282-C
0,015	27,11	27,51	26,45	26,49	26,26	26,36	28,69	27,92	28,96	26,57	26,53	28,58	25,79	26,52
0,02	28,26	28,34	28,30	31,27	26,27	26,97	28,96	29,01	29,17	28,22	28,28	28,77	25,85	28,27
0,03	28,39	28,49	28,50	31,65	26,27	27,03	29,10	29,14	29,32	28,40	28,47	28,91	25,91	28,46
0,04	28,45	28,59	28,60	31,82	26,28	27,06	29,22	29,25	29,44	28,49	28,56	29,02	25,95	28,55
0,05	28,50	28,67	28,67	31,93	26,28	27,08	29,32	29,36	29,54	28,55	28,63	29,12	25,99	28,62
0,06	28,52	28,73	28,72	32,00	26,28	27,10	29,41	29,44	29,63	28,59	28,67	29,21	26,01	28,66
0,08	28,56	34,10	29,32	32,11	26,29	27,13	38,74	39,75	39,88	28,65	28,73	38,47	26,05	28,72
0,1	28,59	34,50	29,42	32,19	26,29	27,15	39,27	40,31	40,45	28,69	28,77	38,99	26,07	28,77
0,15	28,64	34,98	29,58	32,28	26,29	27,17	40,02	41,15	41,31	28,76	28,85	39,73	26,12	28,85
0,2	28,67	35,21	29,69	32,32	26,29	27,19	40,51	41,74	41,92	28,80	28,89	40,20	26,14	28,89
0,3	28,71	35,51	29,83	32,36	26,29	27,21	41,26	42,49	42,65	28,86	28,96	40,92	26,16	28,95
0,4	28,73	35,74	29,92	32,38	26,30	27,22	41,82	42,89	43,06	28,89	28,99	41,46	26,17	28,99
0,5	28,75	35,92	29,98	32,39	26,30	27,23	42,22	43,15	43,32	28,92	29,01	41,84	26,18	29,01
0,6	28,75	36,04	30,02	32,40	26,30	27,24	42,30	43,31	43,49	28,93	29,02	42,06	26,18	29,02
0,8	28,77	36,18	30,06	32,41	26,30	27,24	42,49	43,50	43,68	28,94	29,04	42,25	26,19	29,04
1	28,77	36,23	30,07	32,41	26,30	27,24	42,55	43,56	43,74	28,95	29,04	42,31	26,19	29,04
1,5	28,54	34,98	29,50	32,12	26,27	27,10	40,89	42,26	42,43	28,61	28,69	40,51	25,88	28,68
2	28,28	32,77	28,78	31,52	26,23	26,94	37,24	38,42	38,60	28,21	28,28	36,91	25,48	28,26
3	28,11	30,82	28,32	31,08	26,20	26,84	34,12	35,00	35,12	27,96	28,01	33,81	25,31	27,99
4	28,06	30,16	28,20	30,94	26,20	26,81	33,09	33,90	33,99	27,89	27,94	32,79	25,26	27,92
5	28,04	29,88	28,14	30,87	26,20	26,80	32,58	33,34	33,43	27,86	27,90	32,27	25,23	27,88
6	28,02	29,71	28,10	30,83	26,19	26,78	32,30	33,05	33,14	27,83	27,88	32,00	25,21	27,86
8	28,01	29,54	28,06	30,78	26,19	26,78	31,97	32,70	32,78	27,81	27,86	31,69	25,19	27,83
10	28,00	29,45	28,04	30,77	26,19	26,77	31,81	32,51	32,59	27,80	27,84	31,53	25,18	27,82
15	27,99	29,41	28,03	30,79	26,20	26,77	31,72	32,40	32,47	27,79	27,84	31,44	25,19	27,81

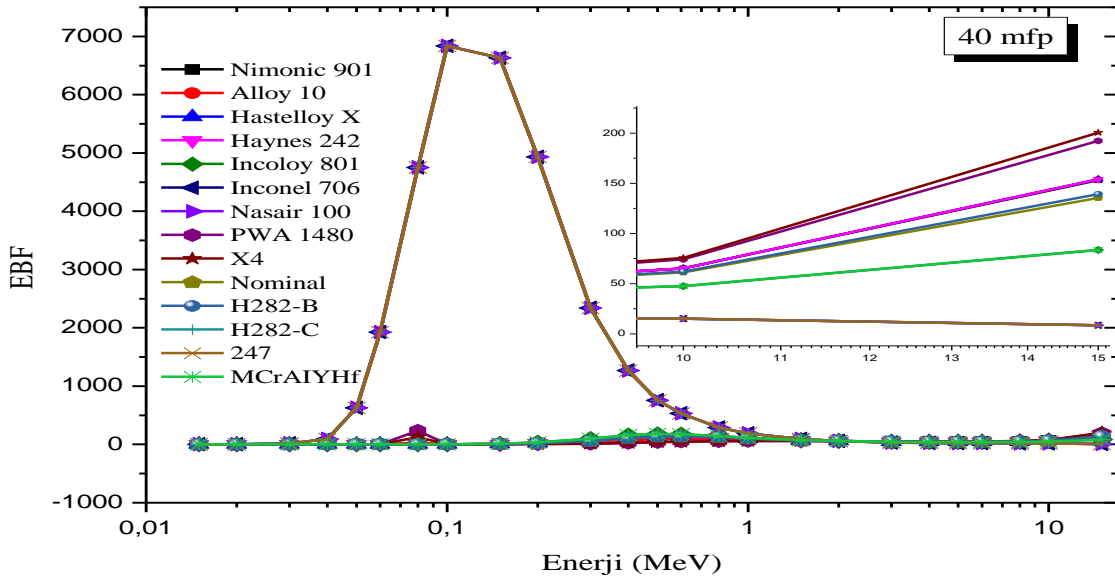
Bu pikler, süperalaşımın içerisindeki Ta ve Re elementlerinin sırasıyla 67,41 ve 71,67 keV'deki K tabakası X- ışını soğurma kıyılarına denk gelmektedir. Çünkü bu bölgede fotoelektrik etki baskındır ve $Z^{4.5}$ ile orantılıdır. Nominal, Hastelloy ve Inconel 706 1, 10 ve 40 mfp için en büyük EBF değerlerine sahiptir. X4 ve PWA 1480 ise en küçük EBF değerini alır. Orta enerji bölgesinde 10 ve 40 mfp'de Nominal, Hastelloy ve Inconel 706 hariç diğer Ni tabanlı süperalaşım lar nerdeyse sıfır EBF değerlerine sahiptir. Çift oluşumun egemen olduğu yüksek enerji bölgesinde çift oluşum tesir kesitinin Z^2 ile orantılı olması sebebiyle, Nominal'in EBF değeri en küçükken X4'ün en büyüktür (Şekil 5.c). Bu enerji bölgesi nükleer uygulamalar için nispeten önemsizdir, çünkü en önemli γ - ışını uygulamaları 1,022 MeV'nin altındadır.



Şekil 5.a. Ni tabanlı süperalaşım larında EBF'nin 1, 10 ve 40 mfp'de 0,015-15 MeV enerji aralığındaki değişimi

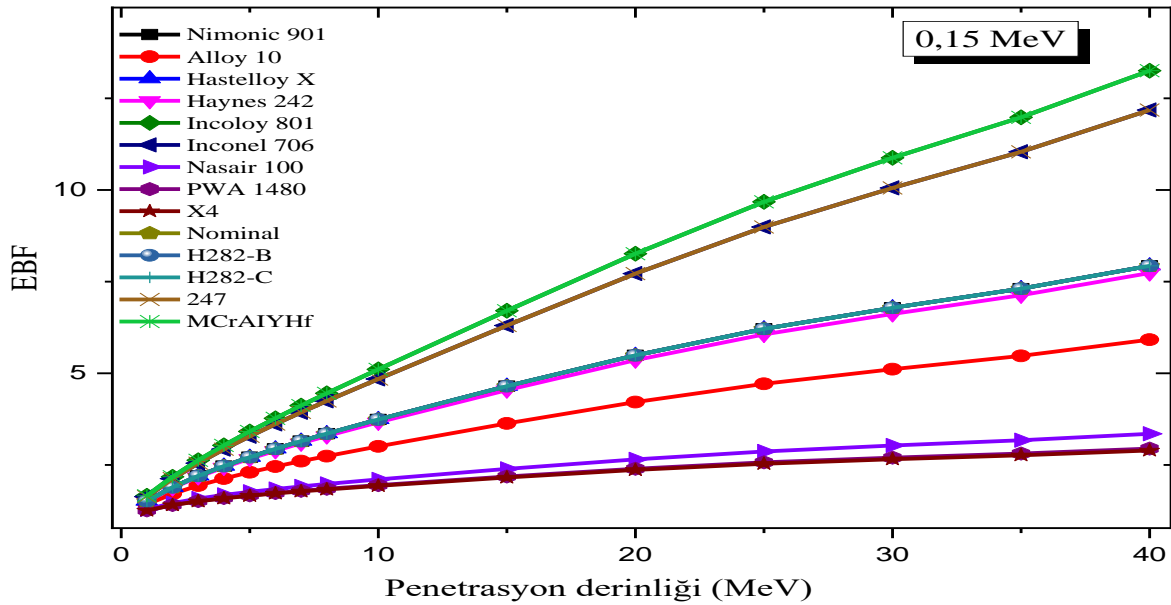


Şekil 5.b. Ni tabanlı süperalaşım larında EBF'nin 1, 10 ve 40 mfp'de 0,015-15 MeV enerji aralığındaki değişimi

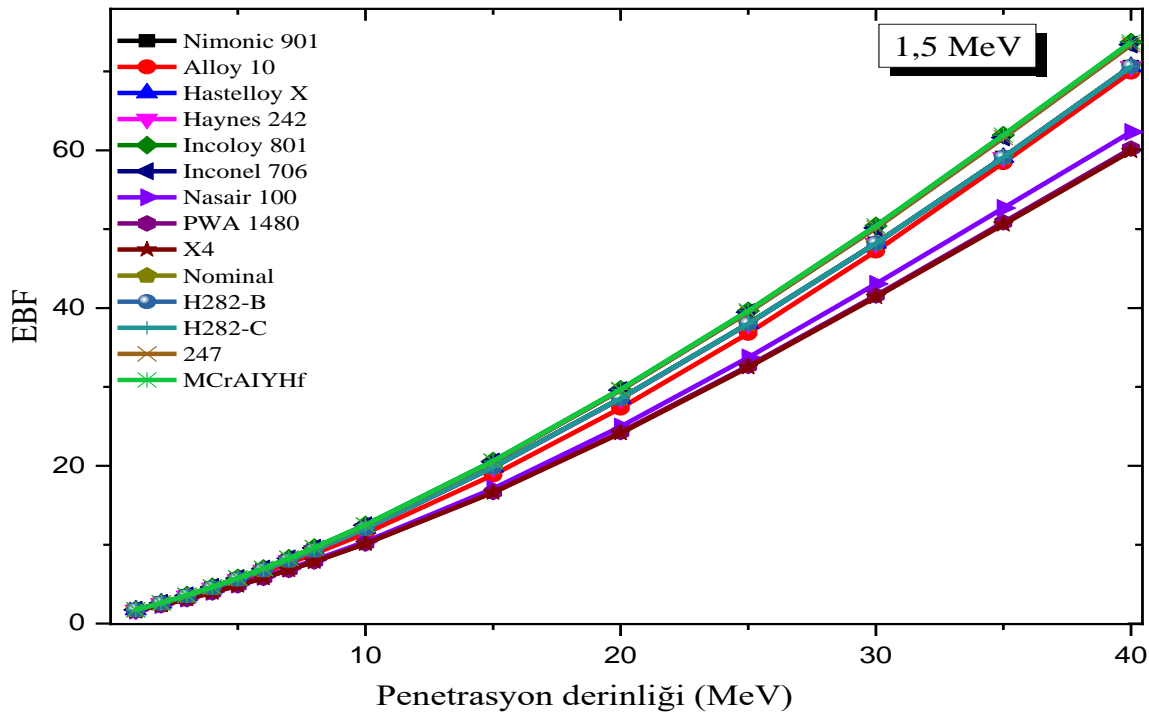


Şekil 5.c. Ni tabanlı süperalaşımlarda EBF 'nin 1, 10 ve 40 mfp 'de 0,015-15 MeV enerji aralığındaki değişimi.

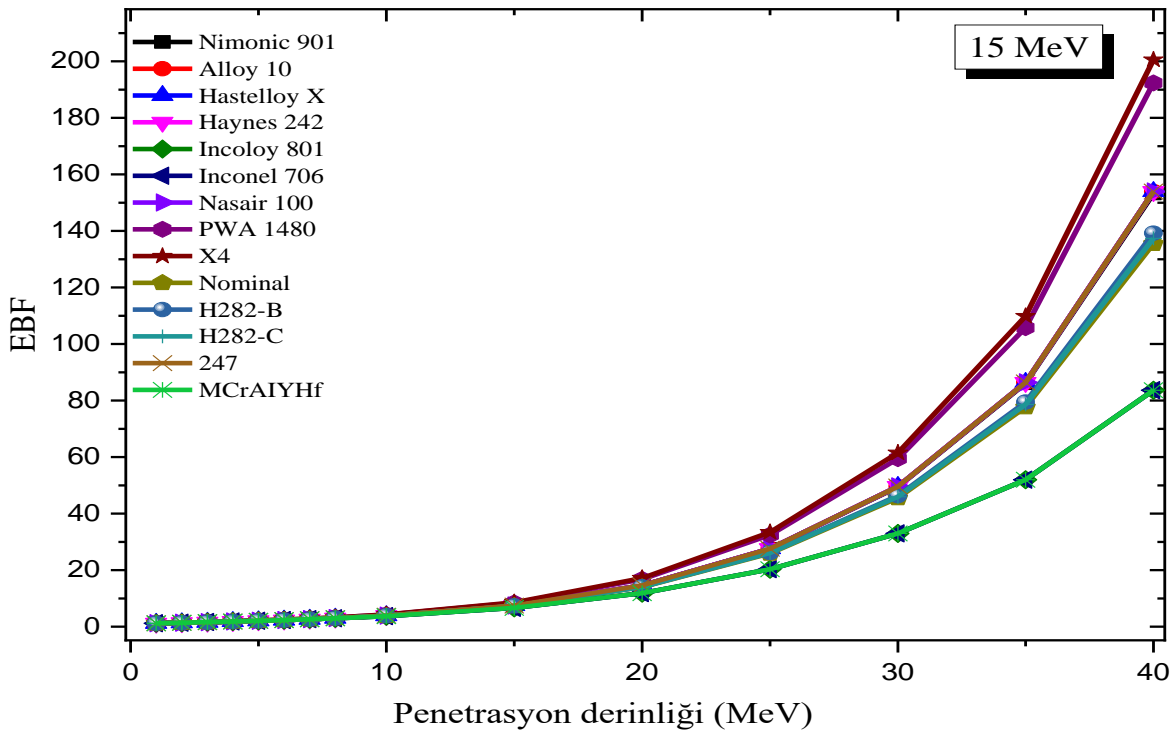
Ni tabanlı süperalaşımların EBF değerlerinin penetrasyon derinliğine bağlı olarak değişimini seçilen bazı önemli enerjiler için Şekil 6 (a-c)'de gösterilmektedir. 0,15 MeV'de EBF geniş değişimler gösterir ve malzeme içeriğine bağlılık en üst seviyededir. Süperalaşımların eşdeğer atom numarası (Z_{eq}) arttıkça EBF değerlerinin azaldığı görülmektedir. Nüfuz etme derinliği arttıkça EBF değerlerinin arttığı görülmekle beraber, daha büyük Z_{eq} değerine sahip süperalaşımlarda bu artış daha dar bir aralıktadır. Bu bölgede tüm mfp değerlerinde X4 ve PWA1480 en küçük EBF değerine sahiptir. 1,5 MeV'de Compton saçılma süreci baskın olduğu için elementel kompozisyona bağlılık azalmaya başlar. EBF değerleri penetrasyon derinliğine bağlı olarak artarken, tüm süperalaşımların EBF değerleri hemen hemen aynıdır. 15 MeV'de Nominal ve Hastelloy daha küçük EBF değerine sahiptir. Sonuç olarak tüm enerji bölgeleri dikkate alındığında hesaplanan parametrelerin tamamı X45 ve PWA1480 süperalaşımlarının Ni tabanlı süperalaşımlar içinde en üstün radyasyon soğurma kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.a. Ni tabanlı süperalaşımlarda 0,15, 1,5 ve 15 MeV için penetrasyon derinliğine bağlı olarak EBF 'nin değişimi.



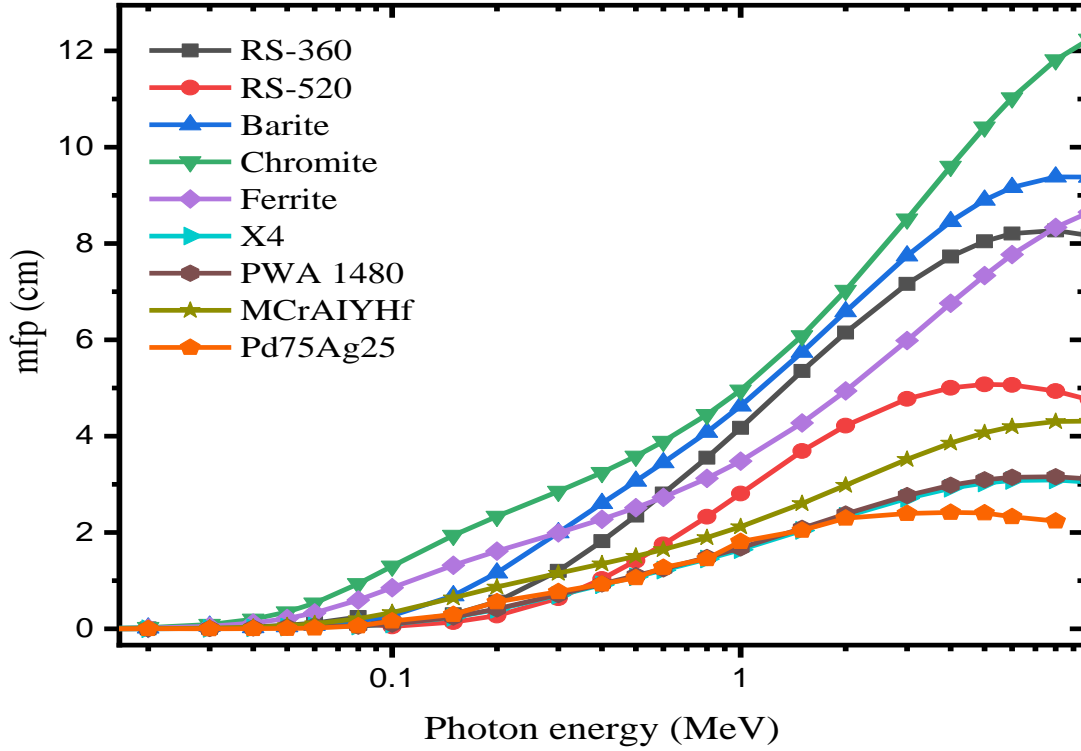
Şekil 6.b. Ni tabanlı süperalaşımarda 0,15, 1,5 ve 15 MeV için penetrasyon derinliğine bağlı olarak *EBF*'nin değişimi.



Şekil 6.c. Ni tabanlı süperalaşımarda 0,15, 1,5 ve 15 MeV için penetrasyon derinliğine bağlı olarak *EBF*'nin değişimi.

Çalışılan süperalaşımarda sırasıyla en ince ve en kalın mfp değerlerine sahip olan X4-PWA 1480 ve MCrAlYHf alaşımlarının mfp değerlerinin foton enerjisi ile değişimi, RS360 ve RS520 ticari camları [27], barit, kromit, ferrit katkılı betonları [28] ve Pd75Ag25 alaşımı [29] gibi

geleneksel olarak kullanılan bazı zırh malzemeleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7'de gösterilmektedir. Mfp, fotonun materyal atomları ile peş peşe çarpışmaları arasında hareket ettiği ortalama mesafeyi ifade etmektedir. HVL için açıkladığımız foton-madde etkileşim mekanizması, aynı zamanda mfp değerlerinin foton enerjisine karşı değişimi için de geçerlidir. Üç süperalaşımın mfp'leri, ağır agregalı betonlardan ve RS-360, RS-520 camlarından daha incedir. 1 MeV'e kadar seçilen süperalaşımın Pd75Ag25 alaşımının aynı mfp değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar çalışmamızın hipotezini doğrular niteliktedir. 15 MeV enerjiye sahip fotonları azaltmak için dahi mfp değerlerinin 2,5 cm civarında olması oldukça dikkat çekicidir. Seçilen süperalaşım, fotonları azaltmada tüm enerjiler için geleneksel zırh malzemelerinden daha iyidir.



Şekil 7. Seçilen üç süper alaşımın mfp değerlerinin geleneksel zırh malzemeleri ile karşılaştırması.

4. Sonuç

Bu çalışmanın hipotezi özellikle uçak motorlarında, tribünlerde ve endüstride birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan bazı Ni tabanlı süperalaşımın yüksek yoğunluğu, yüksek ağır element içeriği yüksek mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri sebebiyle özellikle gama radyasyonunu zırlamada etkili olabileceğini göstermektedir. Bu amaçla, öncelikle seçilen 14 Ni tabanlı süperalaşımın kütle soğurma katsayısı (μ_p) WinXCOM programında 1 keV-100 GeV enerji aralığında hesaplanmıştır. Bulunan μ_p değerleri ile yarı değer kalınlığı (HVL), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{el}) parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca süperalaşımın maruz kalma build-up faktörü (EBF), 0,015-15 MeV enerji aralığında 1-40 ortalama serbest yol (mfp) için enerji ve penetrasyon derinliğine bağlı olarak incelenmiştir. Çalışılan Ni tabanlı süperalaşımından X4 ve PWA1480 süperalaşımının hâlihazırda kullanılan birçok zırh malzemesinden daha üstün radyasyon soğurma kabiliyetinin olduğu görülmüştür. Bu süperalaşımın özellikle nükleer reaktörlerde, uzay radyasyonunu önlemede, radyasyondan

korunmak için gerekli mekân tasarımında ve araştırma laboratuvarlarında zırhlama malzemesi olarak tercih edilebilecek düzeyde radyasyonu tutma özelliğine sahip olduğu düşünölmektedir.

Teşekkür ve Açıklama

Bu makale Ni, Fe, Co Tabanlı Süper Alaşımın Radyasyon Zırhlama Kabiliyetlerinin Karşılaştırılması adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Yazar(lar)ın Katkıları

ZİK, YÖ ve EK test ve analiz çalışmalarını yaptı ve makaleyi yazdı. Yazarlar makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

- [1]. Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi, B., Akkurt, A., "Radiation shielding of concretes containing different aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28.2: 153-157.
- [2]. Azeez, M. O., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Naqvi, A. A., "Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures", *Construction and Building Materials*, 2019, 224: 284-291.
- [3]. Atashi, P., Rahmani, S., Ahadi, B., Rahmati, A., "Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/W/Bi 2 O 3 for gamma ray shielding application", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29.14: 12306-12322.
- [4]. Kavaz, E., Ekinci, N., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., Aygün, B., Perişanoğlu, U., "Estimation of gamma radiation shielding qualification of newly developed glasses by using WinXCOM and MCNPX code", *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 115: 12-20.
- [5]. Yao, Z. Y., Möncke, D., Kamitsos, E. I., Houizot, P., Célarié, F., Rouxel, T., Wondraczek, L., "Structure and mechanical properties of copper-lead and copper-zinc borate glasses", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 435: 55-68.
- [6]. Singh, V. P., Badiger, N. M., "Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials", *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 64: 301-310.
- [7]. 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.
- [8]. Sırın, M., "The effect of titanium (Ti) additive on radiation shielding efficiency of Al25Zn alloy", *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 128: 103470.
- [9]. Kaur, T., Sharma, J., Singh, T., "Review on scope of metallic alloys in gamma rays shield designing", *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 113: 95-113.
- [10]. Singh, T., Kaur, A., Sharma, J., Singh, P. S., "Gamma rays' shielding parameters for some Pb-Cu binary alloys", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, 21.5: 1078-1085.
- [11]. Sharma, R., Sharma, J. K., Singh, T., "Effective atomic numbers for some alloys at 662 keV using gamma rays backscattering technique", *Physical Science International Journal*, 2016, 1-6.

- [12]. Yan, G., Yu, W., Shengping, S., "Oxidation protection of enamel coated Ni based superalloys: microstructure and interfacial reaction", *Corrosion Science*, 2020, 108760.
- [13]. Chamanfar, A., Jahazi, M., Cormier, J., "1A review on inertia and linear friction welding of Ni-based superalloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46.4: 1639-1669.
- [14]. Sayyed, M. I., Mohammed, F. Q., Mahmoud, K. A., Lacomme, E., Kaky, K. M., Khandaker, M. U., Faruque, M. R. I., "Evaluation of radiation shielding features of co and ni-based superalloys using mcnp-5 code: Potential use in nuclear safety", *Applied Sciences*, 2020, 10.21: 7680.
- [15]. Jovanović, M. T., Lukić, B., Mišković, Z., Bobić, I., Cvijović, I., Dimčić, B. "Processing and some applications of nickel, cobalt and titanium-based alloys", *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, 2007.
- [16]. Pollock, T. M., Tin, S. "Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties." *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22.2: 361-374.
- [17]. Reed, R. C., "The Superalloys: Fundamentals and Applications", Cambridge Cambridge University Press 10.1017. CBO9780511541285, 2006.
- [18]. Segersäll, M., "Nickel-Based Single-Crystal Superalloys: the crystal orientation influence on high temperature properties", 2013. PhD Thesis. Linköping University Electronic Press.
- [19]. Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring, H. "WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients", *Radiation Physics and Chemistry*, 2004, 71: 653-654.
- [20]. Swinehart, D. F., "The beer-lambert law", *Journal of chemical education*, 1962, 39.7: 333.
- [21]. Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Gerward, Leif., "Energy dependence of effective atomic numbers for photon energy absorption and photon interaction: studies of some biological molecules in the energy range 1 keV–20 MeV", *Medical Physics*, 2008, 35.1: 388-402.
- [22]. Kavaz, E., Tekin, H. O., Agar, O., Altunsoy, E. E., Kilicoglu, O., Kamislioglu, M., Sayyed, M. I., "The Mass stopping power/projected range and nuclear shielding behaviors of barium bismuth borate glasses and influence of cerium oxide", *Ceramics International*, 2019, 45.12: 15348-15357.
- [23]. Rammah, Y. S., Mahmoud, K. A., Kavaz, E., Kumar, A., El-Agawany, F. I., "The role of PbO/Bi₂O₃ insertion on the shielding characteristics of novel borate glasses", *Ceramics International*, 2020.
- [24]. Kavaz, E., Yorgun, N. Y., "Gamma ray buildup factors of lithium borate glasses doped with minerals", *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 752: 61-67.
- [25]. Kavaz, E., Perişanoğlu, U., Ekinçi, N., Özdemir, Y., "Determination of energy absorption and exposure buildup factors by using GP fitting approximation for radioprotective agents", *International Journal of Radiation Biology*, 2016, 92.7: 380-387.
- [26]. Obaid, S. S., Sayyed, M. I., Gaikwad, D. K., Pawar, P. P., "Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications", *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, 148: 86-94.
- [27]. Schott, (2018). http://www.schott.com/advanced_optics/english/products/opticalmaterials/special-materials/radiation-shielding-glasses/index.html. (Accessed 03 September 2018).
- [28]. Bashter, I. I., "Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes", *Annals of Nuclear Energy*, 1997, 24.17: 1389-1401.
- [29]. Açar, O., Sayyed, M. I., Akman, F., Tekin, H. O., Kaçal, M. R., "An extensive investigation on gamma ray shielding features of Pd/Ag-based alloys", *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, 51.3: 853-859.