



**NÜKLEER ENERJİ UYGULAMALARINDA
KULLANILABİLECEK NİKEL TABANLI BAZI ÖNEMLİ
ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

İbrahim ARSLAN

Yüksek Lisans Tezi

Fizik

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Bünyamin ALIM

2023

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

**NÜKLEER ENERJİ UYGULAMALARINDA KULLANILABİLECEK NİKEL
TABANLI BAZI ÖNEMLİ ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

(Determination of Radiation Shielding Characteristics of Some Essential Nickel-Based Alloys
that can be used in Nuclear Energy Applications)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim ARSLAN

Danışman: Doç. Dr. Bünyamin ALİM

Bayburt
Ekim, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Bünyamin ALIM danışmanlığında, 202226013 numaralı İbrahim ARSLAN tarafından hazırlanan ‘‘Nükleer Enerji Uygulamalarında Kullanılabilecek Nikel Tabanlı Bazı  nemli Alaşımların Radyasyon Zırhlama Karakteristiklerinin Belirlenmesi’’ adlı bu çalışma 12/09/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Erdem şAKAR

İmza:

Jüri  yesi: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

İmza:

Jüri  yesi: Doç. Dr. Bünyamin ALIM

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve  ğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Doç. Dr. Murat KUL

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nükleer Enerji Uygulamalarında Kullanılabilecek Nikel Tabanlı Bazı Önemli Alaşımların Radyasyon Zırhlama Karakteristiklerinin Belirlenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

12/09/2023

İbrahim ARSLAN

TEŞEKKÜR

Hoş tut özünü, hoşluğa yönel,

Bu kubbede yalnız hoş söz kalacak...

Mesai arkadaşı olarak tanıştığım, Fizik bilimine duyduğum ilgiden dolayı bilgilerine başvurduğum, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Tezli Yüksek Lisans çalışmamı sürdürürken kayda değer yardımlar aldığım ve bilgisine başvurduğum tüm zamanlarda beni hiçbir zaman geri çevirmeden vakit ayıran ve akademik serüvenimin ilerlemesi adına birlikte gerçekleştirmeye karar verdiğimiz bu çalışmamızda; bana yön gösteren, destek ve emeklerini esirgemeyen, beni yüreklendiren, değerli bilgilerini benimle paylaşan, sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemeyen, daha önce yapmış olduğum tez çalışmama da katkılar sunan, öğrencisi olmaktan büyük mutluluk duyduğum kıymetli hocam, danışmanım, Doç. Dr. Bünyamin ALIM’a teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Lisansüstü eğitimlerim boyunca; beni destekleyen, ilgi teşvik ve alakasını esirgemeyen değerli büyüğüm, hocam Doç. Dr. Murat ÇOLAK’a teşekkür ediyor ve saygılarımı sunuyorum.

Deneyisel ölçümlerin alınması sürecinde laboratuvar imkanlarını ve tecrübelerini bizimle paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Erdem ŞAKAR’a teşekkür ediyor ve saygılarımı sunuyorum.

Yaptığımız bu çalışmanın bu aşamaya kadar gelmesinde emeği geçen, “*ne zaman istersen, biz de yardım edelim*” diyen, adını burada yazamadığım bütün arkadaşlarıma sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan aileme sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürler...

İbrahim ARSLAN

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NÜKLEER ENERJİ UYGULAMALARINDA KULLANILABİLECEK NİKEL TABANLI BAZI ÖNEMLİ ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

İbrahim ARSLAN

Ekim 2023, 130 sayfa

Bu tez çalışmasında, geleneksel radyasyon zırhlama malzemelerinin yetersizliğinden dolayı nükleer enerji uygulamalarına entegre edilebilmek için optimal koşulları sağlayan yeni malzemelerin keşfine odaklanılmıştır. Bu kapsamda, Evanohm, Alloy 825, Haynes 230, Monel K-500 ve Monel 400 olarak adlandırılan beş farklı Ni-tabanlı alaşımın radyasyon zırhlama performansları ve karakteristik özellikleri araştırılmıştır. Bu alaşımların radyasyon zırhlama performanslarını belirlemek için, ilk olarak, foton-madde etkileşim parametreleri (MAC, LAC, HVL, MFP, ACS, ECS, Z_{eff} , N_{eff} , σ_{eff} ve RPE) 30-1333 keV enerji aralığında EDXRF tekniği kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, deneysel hataların belirlenmesi için bu parametreler Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak teorik olarak da hesaplanmıştır. İkinci olarak, malzemelerin foton saçılma özellikleri hakkında bilgi veren $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , EBF ve EABF parametreleri 0,015-15 MeV geniş enerji aralığında hesaplanmıştır. İncelenen alaşımların radyasyon zırhlama yetenekleri çelik-manyetit (SM) betonu ve Cupero-Nikel (CN) alaşımı ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, elde edilen sonuçlara dayanarak alaşımların fiziksel, kimyasal, mekanik, termal ve radyasyon zırhlama özellikleri birlikte değerlendirilerek nükleer enerji uygulamalarında kullanılabilecek en uygun alaşımın seçimi yapılmıştır. Araştırma sonucunda, incelenen malzemelerin radyasyon zırhlama performans sıralamaları Haynes 230>CN>Monel 400>Monel K-500>Evanohm>Alloy 825>SM olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Haynes 230 alaşımın diğer alaşımlardan yaklaşık %40 daha fazla zırhlama performansı gösterdiği saptanmıştır. Bu sonuca ek olarak, Haynes 230 alaşımının incelenen diğer Ni-tabanlı alaşımlara göre daha iyi kırılma direncine ($\%<50$), daha iyi gerilme direncine (860 MPa), daha iyi elastik modülüne (211 GPa), daha düşük termal iletkenliğe (23 °C’de 8,9 W.m⁻¹.K⁻¹), daha düşük özgül ısıya (23 °C’de 397 J.K⁻¹.kg⁻¹), daha büyük yoğunluğa (8,97 g/cm³), düşük termal genleşme katsayısına (20-150 °C’de 13x10⁻⁶ K⁻¹) ve yüksek erime noktasına (~1350 °C) sahip olduğu belirlenmiştir. Böylece, Haynes 230 alaşımının taşıdığı bu üstün karakteristik özellikler ile nükleer uygulamalarda kullanılabilecek optimal özellikleri sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, bu alaşımın nükleer uygulamalarda reaktör tasarımında yapı malzemesi olarak ve nükleer enerji santrallerinde ve diğer iyonize radyasyon uygulamalarında zırhlama malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İyonize radyasyon, radyasyon zırhlama, nükleer enerji, Nikel-tabanlı alaşımlar.

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DETERMINATION OF RADIATION SHIELDING CHARACTERISTICS OF SOME ESSENTIAL NICKEL BASED ALLOYS THAT CAN BE USED IN NUCLEAR ENERGY APPLICATIONS

İbrahim ARSLAN

October 2023, 130 pages

In this thesis, it was focused on discovering new alternative materials that provide optimal conditions to be integrated into nuclear energy applications due to the insufficient properties of conventional radiation shielding materials. In this context, radiation shielding performances and characteristics properties of five different Ni-based alloys named Evanohm, Alloy 825, Haynes 230, Monel K-500 and Monel 400 were investigated. To determine the radiation shielding performances of these alloys, firstly, photon-matter interaction parameters (MAC, LAC, HVL, MFP, ACS, ECS, Z_{eff} , N_{eff} , σ_{eff} ve RPE) were experimentally determined using the EDXRF technique in the energy range of 30-1333 keV. At the same time, these parameters were also calculated theoretically using the Phy-X/PSD software to determine the experimental errors. Secondly, $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , EBF and EABF parameters giving information about the photon scattering characteristics of the materials were calculated in the wide energy range of 0.015-15 MeV. The radiation shielding capabilities of the studied alloys were compared with steel-magnetite (SM) concrete and Cupero-Nickel (CN) alloy. Finally, based on the results obtained, the physical, chemical, mechanical, thermal and radiation shielding properties of the alloys were evaluated together and the most suitable alloy that could be used in nuclear energy applications was selected. As a result of the research, the radiation shielding performance orders of the examined materials were determined as Haynes 230>CN>Monel 400>Monel K-500>Evanohm>Alloy 825>SM. Moreover, it was determined that Haynes 230 alloy showed approximately 40% more shielding performance than other alloys. In addition to this result, it was determined that Haynes 230 alloy has better elongation at break ($\%<50$), better tensile strength (860 MPa), better elastic modulus (211 GPa), lower thermal conductivity ($8.9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ at 23°C), lower specific heat ($397 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ at 23°C), greater density (8.97 g/cm^3), low thermal expansion coefficient ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ at $20-150^\circ\text{C}$) and high melting point ($\sim 1350^\circ\text{C}$) than other investigated Ni-based alloys. Thus, it was observed that the Haynes 230 alloy meets the optimal properties that can be used in nuclear applications with these superior characteristics. Consequently, it has been concluded that this alloy can be used as a building material in reactor design in nuclear applications and as a shielding material in nuclear power plants and other ionizing radiation applications.

Keywords: Ionizing radiation, radiation shielding, nuclear energy, Nickel-based alloys.

İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
ÖZ	III
ABSTRACT	IV
TABLolar DİZİNİ.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
EK TABLolar DİZİNİ.....	X
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	XII

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş	1
-------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

Kuramsal Temeller.....	19
Nikel ve Nikel Tabanlı Alaşımlar	19
Radyasyon ve Radyasyon Çeşitleri.....	22
İyonlaştırıcı olmayan radyasyon.....	23
İyonlaştırıcı radyasyon	24
Foton-Madde Etkileşim Türleri	27
Tesir kesiti.	29
X- ve γ -ışınlarının soğurulması.	30
X- ve γ -ışınlarının saçılması.	32
X- ve γ -ışınlarının fotonükleer soğurulması.....	37
Foton-Madde Etkileşim Parametreleri	38
Foton-madde etkileşim parametrelerin deneysel tayini için gerekli geometrik koşullar.	40
Foton-madde etkileşim parametrelerinin hesaplama teorisi	42

Malzemeden saçılan fotonlar için gerekli olan ve malzemenin foton saçma durumu hakkında bilgi veren saçılma parametreleri.....	49
--	----

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem	54
Malzeme Seçimi.....	54
Malzeme Özellikleri.....	54
Numunelerin Hazırlanması ve Deney Geometrisi	55
Ölçüm Tekniği ve Sistemi.....	58
Spektrumların Analizi ve Foton-Madde Etkileşim Parametrelerinin Tayini	59
Foton-madde etkileşim parametrelerinin deneysel tayini.....	61
Foton-madde etkileşim parametrelerinin teorik tayini.	61
Hata analizi.	62

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları ve Tartışma.....	64
---	-----------

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç ve Öneriler	97
Kaynakça.....	99
Ekler	109
Öz Geçmiş.....	130

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. <i>Nikel Metaline Ait Diğer Bazı Önemli Fiziksel ve Kimyasal Özellikler (Alım, 2017)</i>	20
Tablo 2. <i>Radyasyon Terimleri, Birimleri ve Anlamları</i>	23
Tablo 3. <i>Foton-Madde Etkileşim Türleri ve Etkileşme Sonucu Meydana Gelen Olay (İçin, 2016)</i>	28
Tablo 4. <i>Foton Soğurma İçin Gerekli Olan Foton-Madde Etkileşim Parametreleri (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020)</i>	39
Tablo 5. <i>Malzemedan Saçılan Fotonlar İçin Gerekli Olan ve Malzemenin Foton Saçma Durumu Hakkında Bilgi Veren Saçılma Parametreleri (Alım, Şakar, Han, vd., 2020)</i>	40
Tablo 6. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların Bazı Önemli Karakteristik Özellikleri</i>	55
Tablo 7. <i>Deneyisel Ölçümlerde Kullanılan Radyoaktif Kaynaklar ve Dedektörlerin Özellikleri</i>	57
Tablo 8. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların MAC Sonuçları</i>	67
Tablo 9. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların MFP Sonuçları</i>	75
Tablo 10. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların ACS Sonuçları</i>	78
Tablo 11. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların Z_{expt} ve Z_{eff} Sonuçları</i>	81
Tablo 12. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların N_{eff} Sonuçları</i>	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Radyasyon çeşitleri.	23
Şekil 2. Gama-ışını oluşumu (Khatry, Nieminen, Smith, & Slotten, 2017).	25
Şekil 3. X-ışını tüpü ve sürekli X-ışını oluşumunun şematik gösterimi (Uglo, 2021).	26
Şekil 4. Karakteristik X-ışını oluşumu (Çakır, 2021).	27
Şekil 5. Tabakalar arası elektron geçişleri ile oluşan karakteristik X-ışınlarının adlandırılması.	27
Şekil 6. Foton-madde etkileşim olayları.	29
Şekil 7. Tesir kesitinin geometrik yorumu (İ. Han, 2009).	30
Şekil 8. Fotoelektrik olayının şematik gösterimi (radioactivity.eu.com).	31
Şekil 9. Çift oluşumu olayının şematik gösterimi.	32
Şekil 10. Compton saçılmasının şematik gösterimi.	35
Şekil 11. E ve Z'ye bağlı olarak fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum olaylarının baskın olduğu bölgeler (Baltaş, 2006).	36
Şekil 12. Örnek bir ideal geometri (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020).	41
Şekil 13. Örnek bir zayıf geometri.	42
Şekil 14. Bir foton şuasının t kalınlığındaki malzemeden geçişinin şematik gösterimi.	43
Şekil 15. 13 mm çap uzunluğuna ve 75 µm levha (et) kalınlığına sahip Ni-tabanlı alaşım numunelerin görüntüleri.	56
Şekil 16. Monel 400 alaşımı için örnek spektrum.	59
Şekil 17. Monel 400 alaşımı için I ve I ₀ değerlerinin belirlendiği örnek spektrumlar; (a) ²⁴¹ Am kaynağın 59,54 keV enerjisi için, (b) ²² Na kaynağın 511 keV ve 1274,54 keV enerjileri için.	60
Şekil 18. (a) Uyarıcı foton enerjisine karşı MAC değerlerinin deneysel ve teorik olarak değişimi, (b) Deneysel ve teorik MAC değerleri arasındaki rölatif farklar.	68
Şekil 19. Uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen Ni-tabanlı alaşımların MAC değerlerinin bölgesel olarak değişimleri.	69
Şekil 20. İncelenen Ni-tabanlı alaşımların radyasyon zırhlama performanslarının (a) SM betonuna göre ve (b) CN alaşımına göre rölatif olarak karşılaştırılması.	72
Şekil 21. İncelenen malzemelerinin LAC değerlerinin uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişimleri.	73
Şekil 22. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının MFP (a) ve HVL (b)	

değerlerinin değişimleri.....	76
Şekil 23. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının ACS (a) ve ECS (b) değerlerinin değişimleri.....	79
Şekil 24. Uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının Z_{eff} değerlerinin değişimleri.....	82
Şekil 25. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının N_{eff} (a) ve σ_{eff} (b) değerlerinin değişim grafikleri.	85
Şekil 26. Uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının RPE(%) değerlerinin değişimleri.....	87
Şekil 27. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımların ve karşılaştırma numunelerinin $R_{inc/toplam}$ (a) ve Z_{eq} (b) değerlerinin değişim grafikleri.	89
Şekil 28. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen alaşımların EBF değerlerinin farklı penetrasyon derinliklerindeki değişim eğrileri.....	91
Şekil 29. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen alaşımların EABF değerlerinin farklı penetrasyon derinliklerindeki değişim eğrileri.....	92
Şekil 30. Farklı penetrasyon derinliklerinde uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EBF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.....	93
Şekil 31. Farklı penetrasyon derinliklerinde uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EABF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.....	94
Şekil 32. Farklı foton enerjilerinde penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EBF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.	95
Şekil 33. Farklı foton enerjilerinde penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EABF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.	96

EK TABLOLAR DİZİNİ

Ek Tablo 1. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların LAC Sonuçları</i>	110
Ek Tablo 2. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların HVL Sonuçları</i>	111
Ek Tablo 3. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların ECS Sonuçları</i>	112
Ek Tablo 4. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların Etkin İletkenlik (σ_{eff}) Sonuçları</i>	113
Ek Tablo 5. <i>İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların RPE (%) Sonuçları</i>	114
Ek Tablo 6. <i>Evanohm Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq}, ve G-P Fit Etme Parametreleri</i>	115
Ek Tablo 7. <i>Alloy 825 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq}, ve G-P Fit Etme Parametreleri</i>	116
Ek Tablo 8. <i>Haynes 230 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq}, ve G-P Fit Etme Parametreleri</i>	117
Ek Tablo 9. <i>Monel K-500 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq}, ve G-P Fit Etme Parametreleri</i>	118
Ek Tablo 10. <i>Monel 400 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq}, ve G-P Fit Etme Parametreleri</i>	119
Ek Tablo 11. <i>Evanohm Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri</i>	120
Ek Tablo 12. <i>Alloy 825 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri</i>	121
Ek Tablo 13. <i>Haynes 230 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri</i>	122
Ek Tablo 14. <i>Monel K-500 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri</i>	123
Ek Tablo 15. <i>Monel 400 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri</i>	124
Ek Tablo 16. <i>Evanohm Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri</i>	125
Ek Tablo 17. <i>Alloy 825 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri</i>	126
Ek Tablo 18. <i>Haynes 230 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri</i>	127

Ek Tablo 19. <i>Monel K-500 Alaşının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri</i>	128
Ek Tablo 20. <i>Monel 400 Alaşının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri</i>	129



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

LAC	: Lineer azaltma katsayısı
MAC	: Kütle azaltma katsayısı
MFP	: Ortalama serbest yol
HVL	: Yarı-değer kalınlığı
QVL	: Dörttebir-değer kalınlığı
TVL	: Ondabir-değer kalınlığı
ACS	: Atomik tesir kesiti
ECS	: Elektronik tesir kesiti
Z_{eff}	: Etkin atom numarası
N_{eff}	: Etkin elektron yoğunluğu (sayısı)
σ_{eff}	: Etkin iletkenlik
G-P	: Geometrik dizi interpolasyon katsayıları
$R_{inc/toplam}$	: İnkoherent (inelastik) saçılma katsayısı
Z_{eq}	: Eşdeğer atom numarası
EBF	: Maruz kalma build-up (foton kuvvetlendirme) faktörü
EABF	: Enerji absorpsiyon build-up (foton kuvvetlendirme) faktörü
FNRCs	: Hızlı nötron etkileşim tesir kesiti
RPE	: Radyasyon korunma verimliliği
NS	: Nikel-Silver
OC	: Sıradan beton
BM	: Bazalt-manyetit
SM	: Çelik-manyetit
SS	: Çelik-hurdası
SAFE	: Spesifik enerji absorpsiyon kesri
XRD	: X-ışını difraksiyonu (kırınımı)
EDXRF	: Enerji ayırmalı X-ışını flöresans
FCC	: Yüzey merkezli kübik kristal faz yapısı
EDS	: Enerji ayırmalı spektroskopi
FE-SEM	: Alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirmeli elektron mikroskobu
Si(Li)	: Silisyum yarı iletken dedektörü

NaI(Tl)	: Sodyum iyodür sintilasyon dedektörü
ρ	: Yoğunluk
h	: Planck sabiti
k_B	: Boltzmann sabiti
T	: Sıcaklık
t	: Kalınlık
f	: Foton frekansı
w	: İş fonksiyonu
E	: Foton enerjisi
I_0	: Birincil foton akı şiddeti
I	: Numuneden etkilenmeden geçen foton akı şiddeti



BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Artan teknolojik uygulamalar, modern teknolojinin gelişmesi ve enerji ihtiyacından dolayı kurulan nükleer enerji santrallerindeki reaktör tasarımlarının iyileştirilmesi ve endüstrinin gelişmesine bağlı olarak radyasyonun günlük yaşantımıza kadar girmesi neticesinde, radyasyondan korunma başta sağlığımız olmak üzere tüm alanlarda son derece gerekli ve önemlidir. Radyasyonun tıbbi uygulamalar, radyasyon dozimetrisi, tarımsal uygulamalar, uzay araştırmaları, sterilizasyon süreçleri, tıbbi görüntüleme sistemleri, gıda teknolojisi, kristalografi süreçleri, nükleer reaktörler ve çeşitli bilimsel ve teknolojik Ar-Ge çalışmaları gibi alanlarda kullanılması ile hayatımızda vazgeçilmez bir yere sahip olduğu açık bir gerçektir. Bu durum, hayatımızın her aşamasında fayda sağladığı gibi yaşamın var olmasını sağlayan canlı organizmaların soğurduğu doz miktarına (özellikle iyonlaştırıcı radyasyon dozu) göre de zararlı hale gelebilmektedir. Biyolojik bir sistem veya belirli özelliklere sahip herhangi bir materyal uzun süre iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalırsa, radyasyonun yıkıcı etkisi ile biyolojik sistemlerde yapı bozulmasına dayalı olarak hastalık ve ölüm gibi istenmeyen sonuçlar ve materyallerde ise karakteristik yapı ve özelliklerinin değişimi meydana gelebilir. Bu sebeple radyasyona karşı iyi soğurucu özellik gösteren ve ortaya çıkan olumsuz fiziksel koşullarda deforme olmayan yeni tip malzemelerin keşfi, tasarımı ve geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Alım, 2020; Şakar, 2020).

Her ne kadar günümüzde radyasyonun yıkıcı etkisinden korunmak için kurşun (Pb), kurşun türevi malzemeler ve/veya ağır metal içerikli betonlar kullanılıyor olsa da bu malzemelerin bazı yetersiz özellikleri (düşük erime noktası, düşük mekanik mukavemet, düşük korozyon direnci, şekil alma zorluğu ve toksik etki gibi) zırhlama malzemesi olarak kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Ayrıca, bu sınırlı özelliklere sahip malzemeler, uzun süre radyasyona maruz kaldığında oluşan yoğun ısı nedeniyle belli bir süre sonra zırhlama kabiliyetlerini kaybederler ve radyasyon sızıntılarının oluşumuna neden olurlar. Bu durum araştırmacıları, radyasyonun kullanıldığı ve/veya olduğu uygulama alanlarında (nükleer reaktörler, nükleer enerji santralleri, radyoterapi, gıda teknolojisi, kristalografik araştırmalar, vb.) kullanılabilecek ve bir zırh malzemesinde olması gereken optimal (ideal) özelliklere sahip yeni tip koruyucu malzeme keşfi, tasarımı ve arayışına yönlendirmiştir. Yeni tip koruyucu malzemede olması gereken optimal özellikler; uzun süre ısınlama sonrası malzemenin yapısal

kararlılığını koruması, yüksek ısı direnci, düşük ısı yayma kapasitesi, düşük maliyet, yüksek erime noktası, yüksek yoğunluk, yüksek mekanik mukavemet, yüksek korozyon direnci, yüksek tutunma oranı, yüksek şeffaflık, iyi kalıplama yeteneği, yüksek homojenite ve yüksek radyasyon zırhlama performansı gibi eşsiz özelliklerdir (Alım, 2020). Bu özelliklerin tamamını yapısında barındıran bir malzemenin keşfi oldukça meşakkatli bir süreçtir. Bu sebeple araştırmacılar, bu özelliklerin tamamından ziyade çoğunluğuna sahip malzemeleri zırhlama malzemesi olarak aday göstermektedirler. Literatürde belirtilen özelliklerin çoğunluğuna sahip aday zırh malzemesi arayışında yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, camlar (A. E. Ersundu, Büyükyıldız, Çelikkilek Ersundu, Şakar, & Kurudirek, 2018; M. Ç. Ersundu vd., 2019; Hassib vd., 2019; Kaky vd., 2020), betonlar (Akkurt, Basyigit, Kilincarslan, & Mavi, 2005; Bashter, 1997; Kharita, Yousef, & Alnassar, 2011), polimerler (Abdalsalam vd., 2019; Nambiar & Yeow, 2012; Soylu, Yurt Lambrecht, & Ersöz, 2015) ve alaşımlar (I. Han & Demir, 2009; Kobayashi, Hosoda, & Takashima, 1997; Şakar, Büyükyıldız, Alım, Şakar, & Kurudirek, 2019; Tellili, Elmahroug, & Souga, 2017) gibi malzemeler üzerine kurgulanmıştır.

Yukarıda verilen örnek referanslar ve literatürde mevcut olan benzer çalışmalar incelendiğinde, cam malzemelerin genel olarak düşük yoğunluk, kırılgenlik ve düşük mekanik dayanım gibi zayıf özelliklere, polimerlerin çok düşük yoğunluk, düşük ısı direnci, düşük erime noktası, sınırlı homojenlik ve düşük mekanik mukavemet gibi zayıf özelliklere ve betonların ise yüksek ısı yayılımı, düşük yoğunluk, uzun süre radyasyona maruz kaldığında yapı stabilitesini (kararlılığını) koruyamama gibi zayıf özelliklere sahip oldukları görülebilir. Bu nedenle, belirtilen zayıf özellikler bu malzemelerin nükleer uygulamalar için zırh malzemesi olarak kullanılabilme olasılığını sınırlandırır. Alaşımlar ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ise alaşımların optimal özellikler olarak tanımlanan karakteristiklerin çoğunu yapısında barındırmaları, yüksek üretim ihtimaline ve sınırsız bileşim oranları ile üretilebilmeleri ve üstün tribolojik özelliklere sahip olmaları sebebiyle birçok uygulama alanında olduğu gibi radyasyon zırhlama uygulamalarında da tercih önceliğine sahip oldukları görülebilir. Bu bilgiyi destekleyici sonuçlar, Kaur ve arkadaşlarının, gama-ışını zırh tasarımında metalik alaşımlarının rolü ve önemi konulu derleme çalışmasında daha detaylı olarak verilmiştir (Kaur, Sharma, & Singh, 2019). Özetle, alaşımları hem radyasyondan korunma uygulamalarında hem de teknolojinin ihtiyaç duyduğu diğer uygulama alanlarında kullanım olasılığı en yüksek olan malzemeler olarak sınıflayabiliriz.

Herhangi bir radyasyon koruma uygulamasında kullanılacak en uygun koruyucu malzemeyi belirlemek için, daha önce açıklanan optimal özelliklere ek olarak radyasyon-madde etkileşim süreçlerinin bilinmesi gerekir. Bir malzeme üzerine gönderilen foton ışını demeti,

malzemenin içindeki madde atomlarıyla etkileşime girdiğinde, temel olarak fotoelektrik olay, Compton saçılması ve/veya çift oluşum olayları ile saçılma olayları meydana gelebilir. Bu olaylara ek olarak, foton enerjisi, malzeme tarafından ısı emisyonuna, yüklü partiküllere veya farklı bir flöresans radyasyona dönüşecek şekilde soğrulabilir. Bundan dolayı, herhangi bir malzemenin radyasyon zırhlama performansının belirlenebilmesi için o malzemenin karakteristik özelliklerinin yanı sıra radyasyon zırhlama parametrelerinin de bilinmesi gerekir. Tüm elektromanyetik radyasyon tipleri (özellikle X- ve gama-ışınları) için, bu parametreler; kütle soğurma katsayısı (MAC; μ_m ; cm^2g^{-1}), lineer soğurma katsayısı (LAC; μ ; cm^{-1}), radyasyon korunma verimliliği (RPE; %), ortalama serbest yol (MFP; λ ; cm), yarı-değer kalınlığı (HVL; $X_{1/2}$; cm), toplam atomik ve elektronik tesir kesitleri (ACS (σ_T ; barns/atom) ve ECS (σ_e ; barns/elektron)), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron yoğunluğu (N_{eff} ; e^-/g), etkin iletkenlik (σ_{eff} ; S/m), eşdeğer atom numarası (Z_{eq}) ve build-up faktörleridir (β ; EBF ve EABF). Herhangi bir malzemenin zırhlama uygulamaları için uygunluğu araştırılırken yukarıdaki paragrafta bahsettiğimiz optimal özellikler diye adlandırılan karakteristiklere ek olarak, bu parametrelerin hem deneysel hem de teorik olarak farklı foton enerjileri için belirlenmesi nükleer uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında yaptığımız incelemeler neticesinde, son yıllarda literatüre kazandırılan ve yukarıda bahsettiğimiz bilgiler doğrultusunda, alaşımların çeşitli radyasyon zırhlama uygulamaları için kullanılabilirliğini hem karakteristik özellikleri hem de radyasyon zırhlama performansları açısından değerlendiren bazı önemli çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Şakar vd., (2019), yüksek işlenebilirlik ve yüksek atmosferik korozyon direncine sahip olan kurşunlu pirinç alaşımlarının, makine parçaları, valfler, bağlantı elemanları gibi farklı uygulama alanlarında kullanıldığı ancak radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlenmemesinden yola çıkarak gama-ışını zırhlama performanslarını araştırmışlardır. Farklı kimyasal konsantrasyonlara sahip standart CuZn ve kurşunlu CuZnPb pirinç alaşımlarını sinterleme tekniği ile üretmişler ve bu alaşımların kütle soğurma katsayıları (μ/ρ), lineer soğurma katsayısı (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), ondabir-değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve radyasyon korunma verimliliği (RPE) değerlerini HPGe dedektörü kullanılarak ^{133}Ba radyoaktif kaynaktan yayımlanan 53, 276, 302, 356 ve 383 keV foton enerjileri için belirlemişlerdir. Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasında iyi bir uyum olduğunu gözlemlemişler ve rölatif farkların %9'dan yaklaşık küçük-eşit olduğunu saptamışlardır. Foton saçılma durumunu belirlemek için maruz kalma build-up faktörlerini (EBF) araştırmışlar ve elde edilen sonuçları foton enerjisine ve penetrasyon derinliğine göre değerlendirmişlerdir. Ayrıca, incelenen altı farklı alaşımların hızlı nötron etkileşim tesir kesitlerini (FNRCs) hesaplamışlar ve hesaplama sonuçlarını Fe-tabanlı zırhlama betonlarıyla

karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçlarına göre hem gama-ışınları hem de hızlı nötronlar için bu pirinç alaşımlarının betonlardan daha iyi soğurma kabiliyetine sahip olduğunu saptamışlardır. Ek olarak, alaşımların üstün özelliklerinin yanı sıra zırhlama için morfolojik olarak uygunluğunu belirlemek amacıyla EDX haritalama tekniğini kullanmışlar ve radyasyon zırhlama uygulamaları için Pb içerikli pirinç alaşımlarının daha uygun olduğunu rapor etmişlerdir.

Üstün mekanik özellikler, yüksek sıcaklık ve korozyona karşı direnç gibi iyi karakteristik özelliklere sahip olması nedeniyle geniş bir uygulama alanında kullanılan AISI-302, 304, 321 ve 430 paslanmaz çeliklerinin radyasyon zırhlama performansları foton ve parçacık radyasyonu açısından Alım ve arkadaşları tarafından araştırılmış ve araştırma sonuçları Part-I ve Part-II olmak üzere iki kısım halinde sunulmuştur. Bunlardan ilkinde (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020), bu paslanmaz çeliklerin foton zırhlama parametrelerini (toplam kütle soğurma katsayısı (MAC), lineer soğurma katsayısı (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), dörttebir-değer kalınlığı (QVL), ondabir-değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP), toplam atomik ve elektronik tesir kesiti (σ_T ve σ_e), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) ve etkin iletkenlik (σ_{eff})) teorik ve deneysel olarak hesaplamışlardır. Deneysel ölçümlerde, dar-ışın geçiş geometrisinde Si(Li) ve NaI(Tl) dedektörlerini kullanmışlar ve numuneleri yedi farklı radyoaktif kaynaktan (^{22}Na , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{133}Ba) yayımlanan 22-1333 keV aralığından yirmi üç farklı foton enerjisiyle uyarmışlardır. Ek olarak, tüm parametreleri 15 keV-15 MeV geniş enerji aralığında teorik olarak hesaplamışlardır. İncelenen paslanmaz çeliklerin radyasyon zırhlama kabiliyetleri hakkında kayda değer bir değerlendirme yapabilmek için tüm hesaplamaları birçok nükleer uygulamada zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan Fe-tabanlı çelik betonları (sıradan beton (OC), çelik-hurdası (SC) ve çelik-manyetit (SM)) için de hesaplamışlar ve karşılaştırmalı bir şekilde analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, Ni içeren AISI-300 östenitik paslanmaz çelik serisinin hem AISI-430 ferritik paslanmaz çeliğinden hem de karşılaştırılan betonlardan daha iyi radyasyon zırhlama performansına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmanın ikinci kısmında (Alım, Şakar, Han, & Sayyed, 2020), $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , G-P eşleşme katsayıları (a , b , c , d ve X_K) ve build-up faktörleri (EBF ve EABF) değerlerini 15 keV-15 MeV enerji aralığında 40 MFP penetrasyon derinliğine kadar hesaplamışlardır. Ek olarak, incelenen paslanmaz çeliklerin parçacık radyasyonu açısından soğurma yeteneklerini belirlemek amacıyla elektron, proton ve alfa parçacık etkileşimleri için kütle durdurma gücü (MSPs; dE/pdx ; MeVcm^2/g) ve menzil değerlerini (R_e , R_p ve R_α ; μm) 10 keV-20 MeV enerji aralığında hesaplamışlardır. Ayrıca, hızlı nötron parçacık etkileşimleri için FNRCs değerlerini de (Σ_R ; cm^{-1}) hesaplamışlardır. Part I'de olduğu gibi karşılaştırma numunelerini OC, SS ve SM olarak

seçmişler ve tüm hesaplamaları bu betonlar içinde gerçekleştirmişlerdir. Hesaplama sonuçlarına göre, incelenen paslanmaz çeliklerin parçacık radyasyonu zırhlama kabiliyetlerinin betonlardan oldukça iyi olduğunu saptamışlar ve bu paslanmaz çeliklerin (özellikle AISI-300 serisinin) radyoterapi, nükleer tıp, radyoloji, nükleer reaktör ve radyasyon fiziği gibi uygulama alanlarında alternatif zırhlama malzemesi olarak düşünülebileceğini belirtmişlerdir.

Alım (2020), Pb ve türevlerinin yerine kullanılabilecek ve bir koruyucu malzemenin sahip olması gereken optimal koşulları yapısında barındıran yeni alternatif zırhlama materyallerinin literatüre kazandırılması amacıyla özel olarak seçilmiş Tin-Silver, Manganin-R, Hastelloy-B, Hastelloy-X ve Dilver-P adlı beş farklı alaşımın radyasyon zırhlama karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine odaklanmıştır. Bu doğrultuda, bu alaşımların radyasyon zırhlama performansları hakkında önemli bilgiler veren foton etkileşim parametrelerini (μ , μ_m , λ , $X_{1/2}$, σ_T , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} , σ_{eff} ve RPE) 30-1333 keV enerji aralığında deneysel olarak ölçmüş ve hesaplamıştır. Deneysel hataları minimize etmek ve belirtilen parametrelerin en doğru sonuçlarına ulaşmak için dar-ışın geçiş geometrisi kullanarak incelenen alaşımları yedi farklı radyoaktif kaynaktan yayımlanan (^{22}Na , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{133}Ba) 19 farklı foton enerjisi ile uyarmış ve uygun enerji bölgelerinde etkin verimliliğe sahip iki farklı dedektör (Si(Li) ve NaI(Tl)) kullanarak foton şiddetlerini ölçmüştür. Deneysel ölçümlerin hata sınırları içerisinde doğru olup olmadığını test etmek için tüm parametreleri Phy-X/PSD yazılımı aracılığıyla teorik olarak da belirlemiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Bunlara ek olarak, foton saçılma sonuçları hakkında bilgi sahibi olmak ve zırhlayıcı malzemeyi daha iyi seçebilmek için 0,015-15 MeV enerji aralığında $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , G-P eşleşme katsayıları (a , b , c , d ve X_K) ve EBF değerlerini de Phy-X/PSD yazılımı ile hesaplamıştır. Araştırılan alaşımların zırhlama kabiliyetleri hakkında kayda değer bir karşılaştırma yapmak ve radyasyon uygulamalarında kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla literatürde var olan ve nükleer uygulamalarda hâlihazırda kullanılan Pb metal, RS 253 camı ve Cupero-Nikel alaşımı ile karşılaştırma yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mevcut tüm alaşımların düşük enerji bölgesinde RS 253 camı ve Cupero-Nikel alaşımından daha iyi zırhlama performansına sahip olduğunu ve Tin-Silver alaşımının 30-88 keV enerji bölgesinde Pb metalinden bile %25 daha iyi zırhlama performansına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, incelenen alaşımların kendi aralarında zırhlama performans sıralamasının Tin-Silver>Manganin-R>Hastelloy-B>Hastelloy-X>Dilver-P şeklinde olduğunu rapor etmiştir. Ek olarak, alaşımların arasından optimal şartlara sahip en uygun alaşımı belirlemek için fiziksel, kimyasal, elektriksel, mekanik ve termal özelliklerini de incelemiştir. Bunun sonucunda Tin-Silver alaşımının en yüksek zırhlama performansına sahip olmasına rağmen zayıf karakteristik özellikleri sebebiyle tercih edilmemesini ve bu alaşım yerine üstün özelliklere (yüksek

yoğunluk (10.22 gcm^{-3}), yüksek erime noktası ($2500\text{-}2600 \text{ }^{\circ}\text{C}$), yüksek çekme dayanımı ($560\text{-}1150 \text{ MPa}$), yüksek esneklik modülü (320 GPa) ve yüksek özgül ısı ($305 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$) gibi sahip Manganin-R alaşımının düşünülmesi gerektiğini savunmuş ve deneysel sonuçlarla bu durumu doğrulamıştır.

Şakar (2020), Cu-esaslı dört farklı Nikel-Silver (NS) alaşımının alternatif koruyucu malzemeler olarak olası kullanımlarını belirlemek amacıyla foton ve hızlı nötron etkileşimleri üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. $30\text{--}1333 \text{ keV}$ foton enerji aralığında $\text{Cu}_{65}\text{Ni}_{18}\text{Zn}_{17}$, $\text{Cu}_{62}\text{Ni}_{18}\text{Zn}_{20}$, $\text{Cu}_{64}\text{Ni}_{12}\text{Zn}_{24}$ ve $\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{18}\text{Zn}_{27}$ bileşimlerine sahip NS alaşımlarının foton etkileşim parametrelerini (μ , μ_m , $X_{1/2}$, σ_T , Z_{eff} , N_{eff} , C_{eff}) deneysel olarak belirlemiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki uyumu belirlemek ve geniş enerji aralığında ($0,015\text{--}15 \text{ MeV}$) kapsamlı bir değerlendirme yapabilmek için tüm parametreleri Phy-X/PSD yazılımı aracılığıyla teorik olarak hesaplamıştır. Analizler sonucunda, deneysel ve teorik sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu ve maksimum bağıl farkın yaklaşık %1,2 olduğunu saptamıştır. İncelenen alaşımların radyasyon zırlama kapasitelerini değerlendirmek ve nükleer uygulamalara uygunluğunu test etmek amacıyla nükleer uygulamalarda zırh materyali olarak kullanılan sıradan beton (OC), bazalt-manyetit (BM) ve çelik-manyetit (SM) betonları ile karşılaştırma yapmıştır. Ayrıca hem alaşımlar ve hem de karşılaştırma betonları için maruz kalma build-up faktörlerini $0,015\text{-}15 \text{ MeV}$ foton enerji aralığında 40 MFP penetrasyon derinliğine kadar G-P interpolasyon yöntemini kullanarak hesaplamıştır. Bunu yanı sıra, malzemelerin hızlı nötron etkileşim tesir kesitlerini (FNRCs) Phy-X/PSD yazılımı ile teorik olarak belirlemiştir. Elde edilen verilere göre, NS alaşımlarının hem foton radyasyonu hem de hızlı nötronlar için zırlama kapasitelerinin karşılaştırılan betonlara göre çok daha iyi olduğunu rapor etmiştir. Sonuç olarak, incelenen NS alaşımlarının yüksek yoğunlukları, yüksek erime noktaları (yaklaşık $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve iyi mekanik dayanımları nedeniyle alternatif bir koruyucu malzeme adayı olabileceğini önermiştir.

Akman vd., (2021), ferrokrom (FeCr) kompozit alaşımlarının iyonize olmayan ve iyonize elektromanyetik zırlama özellikleri ile build-up faktörlerini detaylı bir şekilde araştırmışlardır. Kompozitlerin iyonize olmayan elektromanyetik zırlama niteliklerini $12,4\text{--}18,0 \text{ GHz}$ frekans aralığında belirlemişlerdir. Aynı zamanda, iyonize elektromanyetik radyasyon zırlama performanslarını deneysel olarak gama spektrometresi ve çeşitli radyoaktif kaynaklar kullanarak saptamışlar ve karşılaştırma için teorik değerleri MCNPX simülasyon programını kullanarak hesaplamışlardır. Lineer soğurma katsayısı (LAC) yardımı ile hesaplanan yarı-değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) gibi soğurma parametrelerini kullanarak kompozitlerin gama-ışını soğurma yeteneklerini

tartışmışlardır. Ek olarak, foton saçılma özelliklerinin belirlenmesi için G-P interpolasyon metodunu kullanarak build-up faktörlerini (EBF ve EABF) hesaplamışlardır. Sonuç olarak, incelenen numuneler arasında FeCr (%15) kodlu kompozitin üstün zırhlama özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Hamad *vd.*, (2021), farklı Fe konsantrasyonlarına sahip $Fe_xSe_{0,5}Te_{0,5}$ ($0,95 \leq x \leq 1,05$) alaşımlarının foton, nötron ve proton zırhlama özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla bu alaşımların zırhlama parametrelerini foton radyasyonu için Phy-X/PSD programı ve partikül radyasyonu için SRIM programını kullanarak hesaplamışlardır. Ayrıca, alaşımların kristal yapılarını X-ışını kırınımı (XRD) tekniğini kullanarak PbO-tetragonal fazında belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, alaşım yapısı içerisindeki Fe konsantrasyonunun artışıyla alaşım yoğunluğu, kütle soğurma katsayısı değerleri ve hızlı nötronlar için etkileşim tesir kesitleri değerlerinin aşamalı olarak azaldığını ve buna karşın kütle durdurma gücü ve menzil değerlerinin arttığını saptamışlardır. İncelenen alaşımlar arasında $Fe_{0,95}Se_{0,5}Te_{0,5}$ numunesinin maksimum yoğunluğa ve üstün foton, nötron ve proton zırhlama özelliğine sahip olduğunu iddia etmişlerdir. Sonuç olarak, araştırılan alaşımların iyonize radyasyon zırhlama uygulamalarında aday malzeme olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Mansy *vd.*, (2021), farklı Pb ve Sb içeriklerine sahip $Pb_xSb_yCu_{0,15}Al_{0,1}$ ($x=0,5-0,3-0,1-0$ ve $y=0,25-0,45-0,65-0,75$) alaşımlarını füzyon tekniği ile üretmişler ve bu alaşımlar arasında optimal şartlara sahip en iyi alaşımı bulmak için karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, toplam kütle soğurma katsayısı (MAC), lineer soğurma katsayısı (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), ondabir-değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) ve build-up faktörlerini (EBF ve EABF) WinXCOM yazılımını kullanarak hesaplamışlar ve belirli enerji değerlerinde interpolasyon işlemi yapmışlardır. Alaşımların iletim deney simülasyonlarını ise FLUKA-MC yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçları ile teorik sonuçları karşılaştırdıklarında aralarında iyi bir uyum olduğunu saptadıklarını belirterek üretilen alaşımların gama-ışını soğurma yetenekleri açısından uygun olduğunu ve yüksek Pb içeriğine sahip alaşımın ($Pb_{0,5}Sb_{0,25}Cu_{0,15}Al_{0,1}$) en iyi soğurma yeteneğine sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Ekinci *vd.*, (2021), Cr, Fe, Cu, W ve Re metallerinin farklı kompozisyonlarından oluşan Ni-tabanlı beş alaşımı üretmiş ve bu alaşımların kristal yapılarını X-ışını kırınımı (XRD) tekniği ile araştırmışlardır. Ayrıca, bu alaşımların gama-ışını soğurma yeteneklerini MCNP-5 Monte Carlo simülasyon kodu ve XCOM teorik hesaplama programı sonuçlarını kullanarak değerlendirmişlerdir. Değerlendirme aşamasında kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma

katsayısı, yarı-değer kalınlığı, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve build-up faktörlerinin (EBF ve EABF) değerlerini dikkate almışlardır. Hesaplama bulgularının sonuçlarına göre, yapısında en yüksek W bileşim oranına sahip (%18) S9 kodlu alaşımın en yüksek MAC değerine sahip olduğunu ve en düşük yoğunluğa ($9,37 \text{ g/cm}^3$) sahip S0 kodlu alaşımın ise en düşük MAC değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, yapısında W ve Re oranları toplamının yüksek olduğu numunelerin en yüksek etkin atom numarası değerlerine sahip olduğunu saptamışlardır. Sonuç olarak, üretilen alaşım yapılarındaki W ve Re oranları toplamının yüksek olduğu alaşımların soğurma kabiliyetlerinin iyi olmasından kaynaklı olarak nükleer reaktör ve medikal merkez bölgelerinde bulunan insanların maruz kaldığı radyasyon doz miktarını azaltmak için aday malzemeler olarak düşünülebileceğini rapor etmişlerdir.

Aksoy (2021), günümüz endüstriyel dünyasının radyoaktivite risklerini ortaya çıkarmak için önemli olan flöresans ve zırlama parametrelerinin belirlenmesi ve kriyojenik teknoloji ile radyasyon sistemlerinde kullanılan süperiletken malzemeler için güvenli ve verimli koruma yapılarının tasarlanması temeline dayalı olarak gümüş (Ag) katkılanmış süperiletken alaşımların X-ışını flöresans parametreleri ve radyasyon zırlama verimlilikleri üzerine deneysel bir çalışma tasarlamıştır. Çalışmada, K-tabakası üretim tesir kesitleri ve şiddet oranlarını ölçmek ve hesaplamak için Ultra-LEGe dedektör ile ^{241}Am radyoaktif kaynaktan yayımlanan 59,5 keV enerjili gama-ışınlarını kullanmıştır. Bunun yanı sıra, kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısı, yarı-değer kalınlığı, ondabir-değer kalınlığı, ortalama serbest yol ve etkin atom numarası gibi parametreleri ^{241}Am ve ^{135}Cs nüklitlerinden yayımlanan 59,5 keV ve 662 keV gama-ışınlarının uyarımı ve HPGe dedektörü vasıtasıyla belirlemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Ag katkılama oranının artışının Ti'nin flöresans parametrelerinde artışa sebep olduğunu ve sinterleme prosesinin toz ve sinterlenmiş süperiletken katı numunelerin flöresans parametrelerinde değişikliğe sebep olduğunu rapor etmiştir. Aynı zamanda, her iki enerji değeri için de hesaplanan radyasyon soğurma parametre değerlerinin hem deneysel hem de teorik değerlendirilmesinde Ag katkılanmış $\text{MgB}_2\text{Ti}_{0,06}$ alaşımının çok küçük HVL, TVL ve MFP değerlerine sahip olmasından kaynaklı olarak radyasyon zırlama uygulamalarında yeni alternatif materyal olarak düşünülmesi gerektiğini belirtmiştir.

Turşucu vd., (2021), dokuz farklı $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ ve Fe_xNi_x alaşım numunelerini toz metalurjisi üretim teknikleri ile farklı karışım hızlarını kullanarak üretmişler ve gama-ışını radyasyon soğurma parametrelerini araştırmışlardır. Bu parametrelerden toplam kütle soğurma katsayısı (μ), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}), yarı-değer kalınlığı (HVL), ondabir-değer kalınlığı (TVL) ve build-up faktörlerini (EBF ve EABF) hesaplamışlardır.

Deneysel ölçümlerde, 17,5-59,54 keV enerji aralığındaki gama fotonlarını kullanmışlar ve radyasyon zırhlama özelliklerinin karakterizasyonunu yapmak için teorik hesaplamalarda WinXCOM, ParShield ve Phy-X/PSD yazılımlarını kullanmışlardır. Deneysel kütle soğurma katsayısı değerleri ile WinXCOM sonuçları arasında %0,04-13,21 aralığında fark oluştuğunu ve genel olarak iyi bir uyum gözlemlediklerini belirtmişlerdir. Aynı zamanda, kütle soğurma katsayıları için ParShield ve Phy-X/PSD simülasyon sonuçları ile WinXCOM'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapmışlar ve oldukça iyi derecede eşleşme olduğunu saptamışlardır. Ek olarak, bazı deneysel radyasyon soğurma bulgularının WinXCOM sonuçları ile mükemmel derecede örtüşmesine rağmen ParShield ve Phy-X/PSD sonuçları ile kabul edilebilir ölçüde farklılıklar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sathish *vd.*, (2022), bir foton kaynağından yayımlanan radyasyonun tam doğru absorpsiyon kesrinin belirlenebilmesinin sadece foton-madde etkileşim mekanizmalarına değil aynı zamanda absorplanan doz olarak tanımlanan enerjinin spesifik soğurma kesrine de bağlı olduğu temeline dayanarak Galyum alaşımı (50Al-50Ga), Galfenol (30Fe-70Ga) ve Galinstan (68,5Ga-21,5In-10Sn) alaşımlarının maruz kalma build-up faktörlerini (EBF) ve spesifik absorpsiyon kesirlerini (SAF) araştırmışlardır. Artan penetrasyon derinlikleri ile birlikte EBF değerlerinin arttığını ve Galinstan alaşımının diğer incelenen alaşımlara göre EBF ve SAF değerlerinin daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Sonuç olarak, Galinstan alaşımının X- ve gama-ışınları için iyi bir soğurucu olduğunu savunarak çalışmalarının radyasyon zırhlama hususunda yararlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Saad *vd.*, (2022), radyasyon terapi için Bi-tabanlı blok alaşımların geliştirilmesi üzerine kurguladıkları çalışmalarında ilki 50Bi-40Pb-10Sn ikincisi ise 40Bi-40Pb-10Sn-10Cd olan düşük erime sıcaklıklı alaşım olarak bilinen (eriyebilir alaşım olarak adlandırılan) iki alaşımı seçmişlerdir. Bu alaşımların, radyoterapi uygulamaları esnasında bombardıman edilen bölge içerisindeki hayati önem taşıyan kritik organların korunması için kullanıldığını belirterek çalışmanın bu alaşımları eriyik-eğirme (Melt-spun) tekniği ile üretilmesi ve analiz edilmesi üzerine kurgulandığını belirtmişlerdir. Çalışmada üretilen alaşımların yapısal, mekaniksel ve radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlendiğini ve yapılan X-ışını kırınım (XRD) analizlerinden Pb_7Bi_3 olarak adlandırılan yeni bir yarı-kararlı kristal faz yapısının (hegzagonal yapı $a=3,505$; $b=3,505$ ve $c=5,795$ nm) ortaya çıktığını rapor etmişlerdir. Bu faz oluşumunun alaşımların mekanik özelliklerinin artmasına sebep olduğunu ve Cd içermeyen Bi alaşımının diğerine göre daha üstün mikro-sertliğe sahip olduğunu vurgulamışlardır. Radyasyon parametrelerinin ölçümlerinde ^{60}Co radyoaktif kaynağını ve 6 MV hızlandırma potansiyelini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçların, Cd içermeyen alaşımın iyi soğurma katsayısı

değerlerine, iyi mekanik özelliklere, iyi Vickers mikro-sertliğine ve uygun erime sıcaklığına sahip olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, radyasyon terapide kullanılan Cd içeren Bi alaşımının yerine çevre dostu ve kolay şekillenebilen Cd içermeyen Bi alaşımının daha uygun aday olduğunu rapor etmişlerdir.

Z. Aygün ve M. Aygün (2022), yüksek çalışma sıcaklığı dayanımı, yüksek sürünme ve korozyon direnci, düşük termal iletkenlik ve yüksek gerilme dayanımı gibi üstün özelliklerle karakterize edilen Rene 41, Rene 65, Rene 77, Rene 80, Rene 88 ve Rene 95 kodlu nikel bazlı süper alaşımların radyasyon-madde etkileşim parametrelerini araştırmışlardır. Belirtilen alaşımların radyasyon koruma parametrelerini geniş enerji aralığında Phy-X/PSD yazılımını kullanarak hesaplamışlardır. Ayrıca, bu alaşımların kütle soğurma katsayılarını XCOM yazılımı ile teorik olarak belirlemişler ve Phy-X/PSD yazılımı ile elde edilenler ile kıyaslama yapmışlardır. Bu alaşımların zırhlama katsayı değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olmasına rağmen Rene 80, Rene 88 ve Rene 95 alaşımlarının en yüksek zırhlama yeteneğine sahip olduğunu saptadıklarını rapor etmişlerdir. Ek olarak, bu alaşımların lineer soğurma katsayısı (LAC), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve yarı-değer kalınlığı (HVL) değerlerinin yoğunluğa bağlı değişimlerini incelemişler ve yoğunluk artışıyla LAC ve Z_{eff} değerlerinin lineer olarak arttığını ve HVL değerlerinin lineer olarak azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, incelenen alaşımların hızlı nötron etkileşim tesir kesitlerini (FNRCs) hesaplamışlar ve nötron zırhlama uygulamaları için Rene 41 ve Rene 77'den ziyade Rene 65, Rene 80, Rene 88 ve Rene 95 alaşımlarının daha uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Saleh vd., (2022), Eriyik-eğirme (melt-spinning) tekniğini kullanarak farklı kompozisyonlu 60Sn-(40-x)Zn-xBi ($x = 0, 10, 20, 30, 40$ %ağ.) hızlı bir şekilde katılaştıran alaşımları üretmişler ve bu alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerini X-ışınımı kırınımı (XRD) ve çekme testi mekanik tekniğini kullanarak araştırmışlardır. Bunun yanı sıra, üretilen alaşımların nükleer zırhlama performanslarını XCOM yazılımını kullanarak belirlemişlerdir. Zırhlama hesaplamalarında temel parametre olan kütle soğurma katsayısı (μ_m) değerlerini 0,015-15 MeV geniş enerji aralığında hesaplamışlar ve bu değerden hareketle yarı-değer kalınlığı (HVL), toplam atomik ve elektronik tesir-kesitleri (σ_a ve σ_e), etkin atom numarası (Z_{eff}), build-up faktörleri (EBF ve EABF), spesifik enerji absorpsiyon kesri (SAFE) ve makroskobik etkileşim tesir kesiti (Σ_R) parametrelerini belirlemişlerdir. Tüm hesaplama sonuçlarını, zırhlama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan betonlar, grafit ve su gibi malzemelerin karşılık gelen sonuçlarıyla karşılaştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçların, alaşım yapısı içerisindeki Bi bileşim oranının artmasının kristal boyutun azalmasına ve dolayısıyla radyasyon zırhlama ve mekanik özelliklerin iyileşmesine sebep olduğunu

gösterdiğini rapor etmişlerdir. İncelenen alaşımlardan Sn-%40Bi (S5) alaışımının en yüksek Young modülü (90,5 GPa), çekme dayanımı (299,9 MPa), akma dayanımı (267,9 MPa), kütle soğurma katsayısı (μ_m), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve makroskopik etkileşim tesir kesiti (Σ_R) ($0,1016 \text{ cm}^{-1}$) değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, S5 alaışımının en düşük HVL, MFP, EBF, EABF ve SAFE değerlerine sahip olduğunu da belirtmişlerdir. Sonuç olarak, S5 alaışımının radyasyon zırhlama uygulamaları için tercih edilebilir bir malzeme olduğunu ve araştırma bulgularının nükleer atık depolama, medikal ve endüstri alanlarında çok faydalı olduğunu savunmuşlardır.

R. M. Hamad *vd.*, (2022), geleneksel katı-hal reaksiyon tekniği kullanılarak üretilen $\text{Fe}_x\text{Se}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ ($0,95 \leq x \leq 1,05$) polikristal alaşımların radyasyon zırhlama özelliklerini deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. Kütle soğurma katsayılarını (MAC) deneysel olarak belirledikten sonra XCOM simülasyon sonuçları ile kıyaslamışlar ve aralarındaki rölatif farkları %0,4-4,1 aralığında gözlemlemiş ve bu farkın kabul edilebilir bir korelasyon fark olduğunu savunmuşlardır. Tüm numunelerde bu istatistiki farkı anlamlandırmak için Kolmogorov-Smirnov (K-S) testini yapmışlar ve dikey sapmanın (D_n) %0,33-1,17 aralığında olduğunu saptamışlardır. Bu istatistiki değerlendirme ile XCOM sonuçlarından elde edilen dataların deneysel datalar ile çok iyi derecede eşleştiğini belirlemişlerdir. Tüm incelenen alaşımların lineer soğurma katsayısı (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), foton iletim faktörü (TF) ve radyasyon korunma verimliliği (RPE) gibi farklı radyasyon zırhlama parametrelerini MAC değerlerine bağlı olarak saptamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, $\text{Fe}_{0,95}\text{Se}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ alaışımının diğer demir içerikli alaşımlara göre üstün zırhlama kabiliyetine sahip olduğunu rapor etmişler ve bu alaışımın iyonize radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabileceğini bulgular doğrultusunda önermişlerdir.

Abdel-latif M ve Kassab (2022), elektro-akı yeniden eritme (ESR) yöntemi kullanılarak %2-18 aralığında farklı Cr konsantrasyonuna sahip ve yapısındaki Ni oranı kabaca %12 seviyesine düşürülmüş yeni zırhlama çelik alaşımlarını geliştirmişlerdir. Bu alaşımların, kütle soğurma katsayısı (μ_m), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) ve foton kuvvetlendirme faktörlerini (EBF ve EABF) 0,015-15 MeV foton enerji aralığında Phy-X/PSD yazılımını kullanarak hesaplamışlardır. Ek olarak, 25,4 MeV termal nötronlar için, 4 MeV hızlı nötronlar için ve 10 MeV hızlı nötronlar için alaşımların nötron makroskopik etkileşim tesir-kesitlerini (Σ_R) NGCAL online yazılımını kullanarak belirlemişlerdir. İnceleme altındaki Co içermeyen tüm çelik numunelerin daha küçük MFP ve HVL değerlerine ve daha büyük Σ_R değerlerine sahip olduğunu bulmuşlar ve bunların hem karbon çeliği hem de paslanmaz çelik ile eşdeğer olduğunu tahmin etmişlerdir. Bunun yanı sıra,

yapısında en düşük oranda Fe (yaklaşık ağırlıkça %64,87) ve en yüksek oranda Cr (yaklaşık ağırlıkça %17,68) içeren ve yoğunluğu 7,9056 g/cm³ olan S5 kodlu çelik alaşımının hesaplanan parametrelere göre nötron zırhlamadan ziyade gama-ışını zırhlaması için uygun bir aday malzeme olduğunu rapor etmişlerdir.

Shalaby *vd.*, (2022), PbSn₃Sb_x (x = 0; 0,5; 1,5 ve 2,5 %ağ.) alaşımlarının gama-ışınlarına karşı zırhlama kabiliyetlerini araştırmak amacıyla yaptıkları bu çalışmada dört tip alaşımın mekanik özellikleri ve gama-ışını soğurma parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemiş ve analiz etmişlerdir. Üretilen alaşımların gama-ışını etkileşimlerini, toplam kütle soğurma katsayısı (μ_m), lineer soğurma katsayısı (μ), yarı-değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (X_m) ana parametreleri açısından değerlendirmişlerdir. SnSb alaşımının faz yapısını X-ışını analizlerini kullanarak intermetalik bileşik faz olarak saptamışlardır. İntermetalik bileşik fazın oluşumu ve değerlendirilen partikül boyutunun iyileştirilmesinin alaşımların mikro-sertliğinde, dinamik elastik modülünde ve iç sürtünmede belirgin bir artışa sebep olduğunu belirlemişlerdir. Antimon katkılanmadan üretilen alaşımların zırhlama parametrelerini belirlemişler ve elde edilen değerlerin beklenen değerler ile uyumlu olduğunu savunmuşlardır. Alaşımların mekanik özellikleri ve Vickers mikro-sertliklerinin (H_v) sıcaklığa ve antimon katkılmasına karşı hassaslık gösterdiği ve sıcaklık ile Sb katkılama yüzdesinin değişimi ile değiştiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, ağırlıkça %2,5 Sb içeren alaşımın gama-ışını soğurma yeteneği açısından fark edilir bir özelliğe sahip olduğunu belirterek bu tip ikili alaşım yapıları içerisine Sb katkılmasının gama-ışını zırhlama performansını artırdığını rapor etmişlerdir.

M. K. Hamad *vd.*, (2022), MgB₂, CrAs_{0,45}Sb_{0,55} ve FeAs polikristal alaşımlarını geleneksel katı-hal reaksiyon tekniğini kullanarak sentezlemişler ve radyasyon zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Sentezlenen alaşımların yapısal özelliklerini X-ışını kırınımı (XRD) tekniği ile belirlemişler ve bu alaşımların yoğunluklarını (MgB₂ için 1,9041 g/cm³, CrAs_{0,45}Sb_{0,55} için 3,9482 g/cm³ ve FeAs için 5,6934 g/cm³) radyasyon zırhlama parametrelerini hesaplayabilmek için deneysel olarak saptamışlardır. Alaşımların kütle azaltma katsayılarını ve diğer zırhlama parametrelerini 0,015-15 MeV enerji aralığında Phy-X/PSD yazılımını kullanarak saptamışlardır. XRD sonuçlarına göre, MgB₂ numunesinin P 6 2 uzay grubunda, CrAs_{0,45}Sb_{0,55} numunesinin P 6c 2c uzay grubunda ve FeAs numunesinin ise P 2c 2ab uzay grubunda olduğunu göstermişlerdir. 15 keV foton enerjisinde MgB₂, CrAs_{0,45}Sb_{0,55} ve FeAs polikristal alaşımlarının kütle soğurma katsayılarını sırasıyla 3,59 cm²/g, 44,04 cm²/g ve 80,84 cm²/g olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak, FeAs alaşımının incelenen alaşımlar arasında en iyi iyonize radyasyon zırhlama özelliğine sahip olduğunu belirlemişler ve bu bulgulara dayanarak bu alaşımın iyonize radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabileceğini

önermişlerdir.

Alım vd., (2022), geleneksel malzemelerin yetersizliği sebebiyle radyasyon zırhlama uygulamalarında optimum koşullara ve yüksek foton soğurma verimliliğine sahip yeni alternatif malzemelerin araştırılması üzerine kurguladıkları bu çalışmada, 15-5PH, 15-7PH, 17-4PH ve 17-7PH olarak kodlanan dört farklı çökeltme-sertleşmesi paslanmaz çeliğin (PH-SS) radyasyon zırhlama kabiliyetlerini geniş enerji aralığında deneysel ve teorik olarak belirlemişlerdir. Deneysel ölçümlerde iki farklı dedektör (Si(Li) ve Na(Tl)) ile yedi farklı radyo nüklitten yayımlanan 23 farklı foton enerjisini (22,1-1332,5 keV) kullanmışlar ve tüm ölçümleri dar-ışın geçiş geometrisi kullanarak yapmışlardır. Teorik hesaplamaları ise Phy-X/PSD yazılımını kullanarak hem radyo-nüklitlerden yayımlanan spesifik enerjilerde hem de 0,015-15 MeV geniş foton enerji aralığında yapmışlardır. Ayrıca, incelenen alaşımların nükleer enerji uygulamalarına entegrasyonunu kapsamlı bir şekilde yapabilmek ve bütün yönleriyle en üstün zırhlama yeteneğine sahip alaşımı belirleyebilmek için nükleer uygulamalarda geleneksel zırh materyali olarak yaygın bir şekilde kullanılan Fe tabanlı çelik betonları (çelik-hurdası (SS) ve çelik-manyetit (SM)) ile karşılaştırma yapmışlardır. İncelenen çökeltme sertleşmesi paslanmaz çelikler arasında en iyi foton soğurma performansına ve en iyi malzeme karakteristiğine sahip olanını seçmek için çeşitli istatistiki karşılaştırmalar yapmışlar ve bu işlem sonucunda en iyi olanın 15-7PH olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak ise performans sıralamasının $15-7PH \geq 15-5PH > 17-4PH > 17-7PH > SM > SS$ şeklinde olduğunu saptamışlar ve bu PH kodlu alaşımların nükleer uygulamalarda alternatif ve yeni zırhlama malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Turhan vd., (2022), $Cu_xAg_{(1-x)}$ ($x=0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8$) alaşımlarının gama radyasyonu zırhlama performanslarını belirlemek için toplam kütle soğurma katsayısı (MAC), lineer soğurma katsayısı (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Z_{eff}), kerma değerleri ve build-up faktörlerini (EBF ve EABF) hesaplamışlardır. Belirtilen parametrelerin ölçümlerinde HPGe dedektör ile entegre gama spektrometresini kullanmışlar ve numuneleri farklı radyoaktif kaynaklardan yayımlanan 59,5-1332,5 keV enerji aralığında ki çeşitli fotonlar ile uyarak sayma işlemini gerçekleştirmişlerdir. MAC değerlerini teorik olarak WinXCOM yazılım sonuçları ile doğrulayarak FLUKA ve GEANT4 simülasyon kodlarıyla elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırarak uyumluluğu test etmişlerdir. Ek olarak, 0,015-15 MeV enerji aralığında 40 MFP penetrasyon derinliğine kadar G-P interpolasyon yöntemini kullanarak maruz kalma build-up faktörlerini (EBF) hesaplamışlardır. Sonuç olarak, $Cu_{0,2}Ag_{0,8}$ alaşımının yüksek enerjili foton radyasyonuna karşı iyi bir zırhlama performansına sahip olduğunu ve bu alaşımın zırhlama performansının geleneksel betonlar, camlar ve bazı alaşımlar

gibi alternatif soğuruculardan daha iyi olduğunu rapor ederek bu alaşımların nükleer laboratuvarlarda ve reaktör çekirdek tasarımında kullanılma olasılığının olduğunu savunmuşlardır.

Kaur *vd.*, (2022), $Pb_{60}Sn_{20}Cd_xZn_{(20-x)}$ ($x=0, 5, 10, 15$ ve 20 %mol) kompozisyonuna sahip alaşımları geleneksel eriyik-söndürme (melt-quench) tekniği ile hem nano skalada hem de bulk (yığın) skalada üretmişlerdir. Bu alaşım sistemlerinin elementel bileşim yüzdeleri ve yüzey morfolojisini belirlemek ve parçacık boyutunun nano skalaya indirgendiğini doğrulamak için TEM (geçirmeli elektron mikroskobu), FE-SEM (alan emisyon taramalı elektron mikroskobu) ve EDS (enerji ayrımlı spektroskopi) gibi farklı karakterizasyon tekniklerini kullanmışlardır. Aynı zamanda hem nano hem de bulk yapıdaki alaşımların radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabilme potansiyelini belirlemek amacıyla deneysel araştırma yapmışlardır. Ek olarak, bu alaşımların elektron, proton ve ağır karbon iyonu ışınlarına karşı radyasyon koruma etkinliğini de GEANT4 simülasyonlarını kullanarak belirlemişlerdir. Yapılan teorik ve deneysel analizler sonucunda, nano skaladaki $PbSnCdZn$ alaşım yapılarının bulk yapıdaki muadillerine göre daha iyi zırhlama performansına sahip olduğunu saptamışlardır.

Akman *vd.*, (2023), insan ve elektronik aygıtları yüksek enerjili foton radyasyonundan koruyabilecek kurşun (Pb) ve/veya türevleri ile geleneksel betonlar yerine farklı yeni alternatif malzemeler keşfetmek amacıyla W-Ni-Fe-Co ve La-Bi içerikli alaşımların tasarımı ve radyasyon zırhlama performansların belirlenmesi üzerine çalışmayı kurgulamışlardır. Çalışmada, Monte Carlo GEANT4 simülasyon kodu ile XCOM yazılımını kullanarak hesaplamaları yapmışlar ve karşılaştırmalı olarak rapor etmişlerdir. Her iki hesaplama aracı ile elde edilen sonuçların birbiri ile çok iyi uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca hesapladıkları MFP, HVL, Z_{eff} , EBF ve EABF değerlerine göre kütlece %98,2 W, %1,4 Ni ve %0,4 Fe içeren W-3 diye kodladıkları alaşımların en iyi zırhlama performansına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak, W-3 alaşımlarının radyasyon zırhlama uygulamalarında düşünülmesi gerekliliğini düşük üretim maliyeti, kolay üretim süreci ve hafif oluşu gibi avantajlarını da belirterek rapor etmişlerdir.

Şakar *vd.*, (2023), üstün özellikleri sebebiyle radyasyon zırhlama uygulamalarında geniş yer kaplayan yüksek entropili alaşımlardan düşük maliyete sahip olan CoNiFeCr-Ti/Al kompozisyonlarının radyasyon zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. CoNiFeCr, CoNiFeCrAl ve CoNiFeCrTi kompozisyonlarını eş-molar olarak mekanik alaşımlama tekniği ile başarılı bir şekilde üretmişler ve bu alaşımların üretim ve yapısal özelliklerini detaylı bir şekilde araştırmışlardır. Bunun yanı sıra, bu yüksek entropili alaşımların foton ve parçacık radyasyonu

zırhlama kabiliyetleri Phy-X/PSD, SRIM (10 keV-20 MeV) ve ESTAR (10 keV-20 MeV) programlarını kullanarak belirlemişlerdir. Foton-madde etkileşim parametrelerini hem 15 keV-15 MeV sürekli enerji aralığında hem de ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{109}Cd , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{131}I ve ^{22}Na nüklitlerinden yayımlanan spesifik foton enerjileri için hesaplamışlardır. İncelenen yüksek entropili alaşımların karakterizasyonunu X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopuna (SEM) bağlı enerji ayrımlı X-ışını spektroskopisini (EDX) kullanarak belirlemişlerdir. Bu araştırma sonucunda, incelenen yüksek entropili alaşımların seçilen üretim metodu sebebiyle oldukça amorf yapıya sahip olduğunu saptamışlar ve bu alaşımların kristal boyutlarını 70 nm (CoNiFeCr için), 35 nm (CoNiFeCrAl için) ve 20 nm (CoNiFeCrTi için) olarak hesaplamışlardır. Ek olarak, bu alaşımların standart zırhlama betonlarına göre foton ve parçacık radyasyonu açısından daha iyi radyasyon zırhlama performansına sahip olduklarını belirlemişler ve incelenen yüksek entropili alaşımlar arasında en iyi zırhlama yeteneğine sahip olan alaşımın CoNiFeCr olduğunu keşfetmişlerdir. Sonuç olarak, foton, elektron, proton, alfa ve nötron radyasyonlarından korunma gerektiren uygulamalarda CoNiFeCr alaşımının zırhlama malzemesi olarak kullanılabileceğini savunmuşlardır.

Alzahrani vd., (2023), $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_6\text{Te}_{72}\text{Bi}_2$ (GTSB1), $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_6\text{Te}_{70}\text{Bi}_4$ (GTSB2), $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_6\text{Te}_{68}\text{Bi}_6$ (GTSB3), $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_6\text{Te}_{66}\text{Bi}_8$ (GTSB4) ve $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_6\text{Te}_{64}\text{Bi}_{10}$ (GTSB5) kimyasal kompozisyonları ile tanımlanan beş yeni geliştirilmiş kalkojenit alaşımın radyasyon zırhlama yeteneklerini Monte Carlo simülasyon tekniği ile araştırmışlardır. Araştırma sonucunda her bir alaşım numunesi için simülasyon ile elde edilen sonuçlar ile teorik sonuçlar arasındaki maksimum sapmaları belirlemişler ve bu sapmaların GTSB1, GTSB2, GTSB3, GTSB4 ve GTSB5 alaşımları için sırasıyla %0,525, %0,517, %0,875, %0,619 ve %0,574 olduğunu belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, azaltma katsayılarının değerlerindeki hızlı düşüşlerin $E \leq 500$ keV enerji bölgesinde temel foton etkileşim süreçleri (Fotoelektrik olay ve Compton saçılması) sebebiyle olduğunu savunmuşlardır. Foton zırhlamaya ek olarak incelenen kalkojenit alaşımların yüklü parçacık ve nötron radyasyon tutma özelliklerini de araştırmışlardır. Düşük parçacık enerjilerinde ($E < 1,25$ MeV) elektronlar için toplam durdurma güçlerinin (TSP) enerjinin artışıyla azaldığını ve 1,25 MeV'den büyük enerjilerde radyasyon durdurma güçlerinin enerjinin artışıyla arttığını saptamışlar ve TSP değerlerinin partikül kinetik enerjisine bağlı değişimlerinin proton, alfa ve karbon partikülleri için hem elektrondan hem de birbirlerinden farklı olduğunu belirtmişlerdir. İncelenen alaşımlar için elde edilen sonuçların geleneksel zırhlama camları ve betonları ile karşılaştırıldığında alaşımların daha iyi radyasyon zırhlama performanslarına sahip olduğunu belirterek radyasyon koruma uygulamalarında bazı geleneksel zırh malzemeleri yerine kullanılabileceğini savunmuşlardır.

Hamad (2023), $Ta_9(XS_3)_2$ ($X=Fe, Co, Ni$) yapısındaki Ta atomları bakımından zengin sülfitlerin iyonize radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla MCNP-5 simülasyon kodunu kullanarak kütle zayıflama katsayısını (MAC) belirlemiştir. Numuneleri geleneksel katı-hal reaksiyonunu kullanarak hazırlamış ve numune yoğunluklarını $10,32-10,52 \text{ g/cm}^3$ aralığında saptamıştır. MCNP-5 kodu kullanılarak elde edilen sonuçlar ile XCOM sonuçlarını karşılaştırmış ve tüm numunelerde %0,00-3,59 aralığında rölatif bir fark olduğunu belirterek sonuçlar arasında nispi farklarla iyi bir korelasyon olduğunu saptamıştır. XCOM ve kullanılan MCNP-5 kodu ile elde edilen MAC sonuçları arasındaki istatistiki karşılaştırmayı Kolmogorov-Smirnov (K-S) testini kullanarak gerçekleştirmiş ve tüm numunelerde %0,10-0,14 aralığında değişen maksimum bir dikey sapma (D_{max}) olduğunu ve ilişki doğruluk değerinin 0,99 olduğunu belirterek eşleşmenin mükemmel olduğunu savunmuştur. Bu doğruluk ilişkisinden sonra MCNP-5 simülasyon kodu ile bulunan MAC değerlerini kullanarak lineer zayıflama katsayısı (LAC), yarı-değer katmanı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), iletim faktörü (TF) ve radyasyondan korunma verimliliği (RPE) parametrelerini belirlemiş ve literatür sonuçları ile karşılaştırmıştır. 0,5 MeV enerji değerinde, $Ta_9(XS_3)_2$ alaşım yapıları için elde edilen MFP değerlerinin Pb'den daha yüksek olduğunu gözlemlemiş ve Pb'nin 0,5 MeV enerjide hala radyasyon zırhlamada en iyi malzeme olduğunu belirtmiştir. Ancak incelenen alaşım yapılarının belirtilen enerjide MgB_2 , FeAs, CrTe ve PbTe gibi önceden literatüre sunulan malzemelerden daha düşük MFP değerlerine sahip olduğunu bulmuştur. Son olarak incelenen alaşım yapıların sadece 3 cm kalınlıkta 0,5 MeV uyarıcı gama enerjisinde radyasyondan korunma verimliliğini (RPE) hesaplamış ve bu alaşımların yaklaşık %98 oranda radyasyon şiddetini azalttığını belirlemiştir. Çalışma sonucunda, incelenen alaşımların yüksek yoğunluk, kimyasal kararlılık, iyi dayanıklılık, düşük maliyet ve kolay sentezlenebilme gibi üstün özelliklere sahip olması ve iyonize radyasyon zırhlama derecesinin birçok malzemeden iyi olması araştırmacıyı motive etmiş ve bulgular sonucunda $Ta_9(XS_3)_2$ alaşım yapılarının iyonize radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabileceğini önermiştir.

Saad vd., (2023), Radyasyon koruma uygulamaları için yeni uygun malzemeler elde etmek amacıyla dört farklı Pb-tabanlı alaşımı ($Sn-40Pb$, $Sn-39,5Pb-ZnO$, $Zn-40Pb$ ve $Zn-39,5Pb-ZnO$) erime-dövme yöntemi ile hazırlayıp sentezleyerek radyasyon zırhlama uygulamaları için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Temel olarak, Sn ve Zn esaslı ikili sistemlere hızlı katılaştırma işleminin ve ağırlıkça %0,5 ZnO nano boyutlu partikülleri (NPs) katkılamanın etkileri ve oluşan alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri ile radyasyon zırhlama özelliklerinin stabilitesi üzerine çalışmalarını kurgulamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda üretilen alaşımlarının, β -Sn (cisim merkezli tetragonal), α -Pb (yüzey merkezli kübik (FCC)) yapısına ek olarak Sn-Pb sistemi için α -Pb (kübik) Fm-3m, Zn (hekzagonal) P63/mmc

ve Zn-Pb sistemi için ZnO P63mc kristal yapılarını içerdiklerini gözlemlemişlerdir. Nano boyutlu ZnO katkılanmasının alaşımların mikro-yapısal morfolojisinde ötektik yapının ortaya çıktığını saptamışlardır. Bunlara ek olarak deneysel olarak belirledikleri yoğunlukları kullanarak radyasyon zırhlama parametrelerinden lineer zayıflama katsayısını farklı foton enerjilerinde (662 keV, 1173 keV ve 1332 keV) hesaplamışlar ve bu katsayıyı kullanarak kütle zayıflama katsayısı, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlığı ve onda-bir değer kalınlığı gibi zırhlama parametrelerini foton enerjisine bağlı olarak belirlemişlerdir. Alaşım yapılarına katkılanan nano boyutlu ZnO partiküllerinin alaşım yapı içerisinde emilen radyasyon yoğunluğunu artırdığı ve alaşımların radyon zırhlama kabiliyetlerini önemli ölçüde etkilediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, normal alaşımlara göre nano boyutlu ZnO partikülleri içeren kompozit alaşımların gama-ışını radyasyonu için daha iyi zırhlama kapasitesine sahip olduklarını saptamışlar ve bu tip kompozit alaşımların radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabileceğini önermişlerdir.

Yapılan çalışma sonuçlarından yola çıkarak yukarıdaki paragraflarda bahsettiğimiz gibi nükleer enerji uygulamalarında herhangi bir malzemenin soğurucu olarak kullanılabilmesi için optimal (ideal) özelliklere sahip olması ve çok iyi radyasyon zırhlama performansı göstermesi gereklidir. Bu sebeple, birçok malzeme sınıfı arasından seçilebilecek en uygun malzemelerin alaşımlar olduğunu sebebiyle birlikte önceki paragraflarda açıklamıştık. Odaklanmamız gereken yeni nokta ise çeşitli alaşım grupları içerisinde sınırsız kompozisyon bileşiminde oluşabilecek alaşımlardan hem maliyetleri hem de özellikleri düşünülerek hangi alaşımları seçmemiz gerekliliği hususudur. Bu hususta, seçimi yapılacak alaşımların, nükleer enerji uygulamalarında ki temel problem olan yüksek ısıya karşı dayanıklılık ve uzun süre radyasyona maruz kalındığında yapı stabilitesini (kararlılığını) koruma gibi özelliklere kesinlikle sahip olması ve üretim maliyetinin makul düzeyde olması gereklidir. Bu noktadan hareketle bu tez çalışmasında, Evanohm, Alloy 825, Haynes 230, Monel K-500 ve Monel 400 isimli beş farklı Ni-tabanlı özel alaşım seçilmiştir. Ni-tabanlı bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklara ve oluşabilecek olumsuz fiziki etkilere dayanıklı olmaları, yüksek gerilme (çekme) mukavemetine sahip olmaları ve muadillerine göre düşük üretim maliyetine sahip olmaları ile bilinirler. Bu özellikler bu alaşımları kritik bileşenlerde ve uygulamalarda tercih edilebilir kılar. Bunların yanı sıra, Ni-tabanlı bu alaşımlar iyi korozyon direnci, yüksek tokluk, yüksek mekanik mukavemet, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek yoğunluk, yüksek homojenite gibi birçok üstün karakteristik özelliğe sahiplerdir (Axinte, Andrews, Li, Gindy, & Withers, 2006; Jin vd., 2016; B. Li vd., 2017; H. Li vd., 2017; Lu, Xue, Wang, & Ouyang, 1997; Wen, Wang, Simmons, & Wang, 2006). Ayrıca, bu alaşımların sahip oldukları eşsiz özellikleri sebebiyle uzay endüstrisi, kimyasal işleme, tıbbi ekipmanlar, türbin sistemleri ve elektronik aygıtlar gibi uygulamalarda

kullanıldığı bilinmekte olup, nükleer uygulamalar için de gerekli özellikleri taşımasına rağmen bu konuda yapılmış herhangi bir detaylı çalışmaya rastlanmamıştır. Bu eksiklik ile literatürde oluşan bu boşluğun giderilmesi ve belirtilen alaşımların nükleer uygulamalara entegrasyonunu sağlamak bu tez çalışmasının temel odağı olmuştur.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, nükleer uygulamalarda kullanılabilecek üstün özellikli ve düşük maliyetli yeni alternatif zırh malzemelerinin keşfi amacıyla kurgulanan bu tez çalışmasında isimleri bir üst paragrafta açıklanan Ni-tabanlı alaşımların radyasyon zırhlama parametreleri belirlenmiş ve uygunluğu tartışılmıştır. Bu kapsamda, foton zırhlama parametreleri hem deneysel hem de teorik olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde enerji ayrımlı X-ışını spektroskopisi (EDXRF) ve yarı-iletken katı-hal dedektörleri (Si(Li) ve NaI(Tl)) kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, hesaplanan parametrelerin doğruluk değerinin artması amacıyla dar-ışın geçiş geometrisi (ideal geometri) kurulmuş ve numuneler farklı radyoaktif kaynaklardan (7 farklı radyonüklitten) yayımlanan farklı frekanslı fotonlar (16 farklı foton enerjisi) ile uyarılmıştır. Deneysel sonuçlarda oluşabilecek hata oranlarını belirlemek ve sapma sınırları içerisinde doğru değerlere ulaşmak için karşılaştırma amacıyla tüm zırhlama parametreleri teorik olarak Phy-X/PSD programı yardımıyla hesaplanmıştır. Ek olarak, incelenen Ni-tabanlı alaşımların nükleer uygulamalara entegrasyonunun uygunluğunu belirlemek için halihazırda nükleer sistemlerde radyasyon zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan Fe-tabanlı çelik-manyetit (SM) betonu (Bashter, 1997) ve literatürde iyi bir zırhlayıcı malzeme olarak önerilen Cupero-Nikel (CN) alaşımının (Singh & Badiger, 2014) zırhlama kapasiteleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde incelenen Ni-tabanlı alaşımların fiziksel, kimyasal, termal ve mekanik özellikleri ile birlikte iyonize radyasyon zırhlama performansları değerlendirilerek nükleer uygulamalar için en uygun alaşım seçimi yapılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

Kuramsal Temeller

Nikel ve Nikel Tabanlı Alaşımlar

Ni-tabanlı alaşımların kimyasal formunu oluşturan elementlerin en yüksek bileşim konsantrasyonuna sahip olan Nikel (Ni), yer çekirdeğinde ve katmanlarında bol miktarda bulunan çok yönlü bir metaldir. İlk olarak 1751 yılında İsveçli kimyager Axel Fredrik Cronstedt tarafından nikolit adlı bir mineralden izole (ayrıştırılarak) edilerek keşfedilmiş ve daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalar ile diğer metallerden farklı olarak endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesinin sebebi olan üstün özellikler sergilediği belirlenmiştir. Atom numarası 28 olan ve 3d geçiş metalleri grubunda yer alan Nikel, $[Ar]4s^23d^8$ elektronik konfigürasyon yapısına sahiptir. Beş farklı oksidasyon seviyesine (-1, 1, 2, 3, 4) ve 1,91 elektronegatiflik değerine sahip olan Ni metal atomları, diğer metal ve/veya ametal atomları (özellikle kafes yapısı benzer metal atomlarıyla) ile çok sayıda bağ kurarak alaşım veya bileşik oluşturabilir. Gümüş beyazı bir görünüme sahip olan Nikel, yüzey merkezli kübik (FCC) kristal dokulu östenitik faz (γ fazı) yapısına sahiptir ve oda sıcaklığında manyetik olup Curie sıcaklığı 253 °C (487 °F) dir. Ek olarak, bu element yüksek erime noktası (1453 °C), yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direnci gibi üstün karakteristik özelliklere sahip olmasının yanı sıra oldukça sünektir (Oğuz, 1989). Yukarıda bahsedilen özelliklerin dışında Nikel metaline ait diğer bazı önemli fiziksel ve kimyasal özellikler de Tablo 1’de verilmiştir. Bu eşsiz özellikleri nedeniyle Nikel, alaşım teknolojisinin vazgeçilmez bir elemanı olmuştur.

Hume-Rothery kuralları çerçevesinde, yüksek valens elektron yoğunluğuna sahip olan Ni metal atomları çok sayıda metal atomuyla bağ kurabilme gücüne sahip olup alaşımlama sırasında çok sayıda metali yapısında çözme (eritme) özelliğine sahiptir. Yani Ni metalinin katı eriyik bölge sınırı oldukça geniştir. Bu sebeple Ni metali, çok sayıda farklı metalle çeşitli bileşim konsantrasyonlarında sınırsız sayıda alaşım oluşturabilir (Callister & Retwisch, 2013). Bu alaşım türlerinin yapısında yaygın olarak bulunan diğer alaşım elementleri; Alüminyum (^{13}Al), Titanyum (^{22}Ti), Vanadyum (^{23}V), Krom (^{24}Cr), Manganez (^{25}Mn), Demir (^{26}Fe), Kobalt (^{27}Co), Bakır (^{29}Cu), Niyobyum (^{41}Nb), Molibden (^{42}Mo), Kalay (^{50}Sn), Tungsten (^{74}W) ve Platin (^{78}Pt) dir. Bilindiği üzere, bir alaşımın karakteristik özelliği, yapısını oluşturan element atomlarının bileşim yüzdelere ve türlerine bağlı olarak değişir. Ayrıca, alaşım çoğunlukla yapısındaki ana elemanın (yani bileşim oranı en yüksek olan elementin) temel karakteristik

özelliklerine doğrudan sahip olur ve bu ana elemanın adıyla (Ni-tabanlı, Co-tabanlı ve Fe-tabanlı gibi) anılır. Alaşımın diğer spesifik özellikleri ise katkılanan diğer alaşım elementlerinin karakteristiklerinden gelmektedir. Örneğin, alaşım yapısına Cu katkısı alaşımın sertlik ve dayanımını artırır, Mn katkısı alaşımın iç mukavemetini artırır, Cr katkısı alaşımın tane sınırlarının büyümesini engeller, Fe katkısı alaşımın esnekliğini azaltır, vb (Arslan, 2019). Yukarıda izah edildiği gibi, yapısında Ni metali bileşim oranı diğer metallere göre yüksek olan alaşımlara Ni-tabanlı alaşımlar denir. Ni-tabanlı alaşımlar birçok üstün karakteristik özelliğe sahiptir ve bu özellikleri Ni metalinin etkisiyle oluşmaktadır. Bu özelliklerin en önemlileri arasında yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek korozyon direnci, düşük termal genleşme katsayısı, iyi derecede kaynaklanabilirlik ve iyi termal iletkenlik gelmektedir. Ayrıca, Ni-tabanlı alaşımların ani darbelere karşı kırılmadan dayanabilen çok sert malzeme olmalarını sağlayan süneklik özelliği yine Ni metalinin etkisiyledir. Bu özellikleri sayesinde birçok teknolojik uygulamada kullanılan Ni-tabanlı alaşımlar, ticari olarak patent adlarıyla anılırlar. Bu isimlerden bazıları; Evanohm, Monel, Haynes, Inconel, Incoloy, Hastelloy, Vascomax, Rene, Waspaloy, Invar, Nimonic, Nilo, Brightray, Udimet ve Pyromet dir.

Tablo 1. *Nikel Metaline Ait Diğer Bazı Önemli Fiziksel ve Kimyasal Özellikler*(Alım, 2017)

Karakteristik	Değer
Atom Ağırlığı	58,69 amu
Fotoelektrik İş Fonksiyonu	4,9 eV
Kaynama noktası	2730 °C
Eletriksel Özdirenç (20 °C'de)	6,9 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Yoğunluk	8,9 g/cm ³
Termal Genleşme katsayısı	13,4 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Termal İletkenlik katsayısı	160 W/(m.K)
Young modülü	200 GPa
Vickers Sertliği	638 MPa
Atomik çap	1,49 Å
İyonik çap	1,35 Å
Kovalent çap	1,21 Å
Van der Waals çap	1,63 Å
Kristal çap	0,7 Å

Ni metalinin östenitik faz yapısı için stabilizatör görevi görmesi ve FCC kristal yapıya sahip olması nedeniyle, Ni-tabanlı alaşımlar için FCC kristal dokulu östenitik faz (γ fazı) yapısı ayırt edici bir özelliktir. Bu özelliğine ek olarak, yukarıda bahsettiğimiz yüksek sıcaklık dayanımı, iyi korozyon direnci ve yüksek tokluk gibi diğer üstün karakteristik özellikleri bu alaşım grubunun roket motorlarında, nükleer reaktörlerde, deniz altılarda, buhar santrallerinde, petrokimya ekipmanlarında ve gaz türbinleri gibi yüksek sıcaklıkta dayanım gerektiren tüm

uygulama alanlarında kullanılması için önerilmiştir (Ezugwu, Wang, & Machado, 1999; Rosenberg, 1968; Stopher, 2016).

1905 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin gaz türbini geliştirmeye başlaması ile bu alanda kullanılacak malzemelerin yüksek sıcaklıklara dayanması için östenitik faz (γ fazı) yapısına sahip olması gerektiği bilgisine ulaşıldı. Bu amaçla, Ni-tabanlı alaşımlardan henüz haberdar olmayan bilim insanları bu faz yapısına sahip olan paslanmaz çelikleri geliştirmeye başladılar. Bu çeliklerde ortaya çıkan bazı yetersizlikleri (süneklik gibi) keşfeden bilim insanları, bu yetersizlikleri gidermek için, FCC kristal dokulu östenitik faz (γ fazı) yapısına sahip süper alaşım denilen (Fe-tabanlı ve Co-tabanlı) alaşımları keşfetmeye ve bu alanlarda kullanmaya başladılar. Süper alaşımların en temel özellikleri arasında mekanik dayanım, temel sürünme ve deformasyon direnci, iyi korozyon ve oksidasyon direnci ile yüzey kararlılığı gelmektedir (Betteridge & Shaw, 2013; Choudhury & El-Baradie, 1998; Thakur & Gangopadhyay, 2016; Thellaputta, Chandra, & Rao, 2017). Daha sonra bu alaşım yapılarının güçlendirilmesi için gama fazı (γ fazı) ile uyumlu ve alaşım yapıları içerisinde oluşan dislokasyonları azaltarak alaşımın mukavemetini artıracak bir intermetalik fazın (γ' (gama prime) fazı) oluşumu için alaşım yapılarına Al ve Ti ile iyi bağ kuran Ni metalini katkılama ve bileşim oranını artırmaya başladılar. Bu işlemler ile Ni-tabanlı süper alaşımlar keşfedilmeye başlandı ve bu keşif Fe- ve Co-tabanlı süper alaşımların hızlıca geride bırakılmasına sebep oldu. Böylece gaz türbinlerinde $Ni_3(Al, Ti)$ esaslı düzenli bir FCC kristal yapıya sahip intermetalik faz (γ' faz) yapısında Ni-tabanlı süper alaşımlar kullanılmaya başlandı. Keşfedilen bu Ni-tabanlı süper alaşımlarda yüksek sıcaklıklarda ($T \geq 700$ °C) oksidasyon direncini artırmak için yapıdaki krom (Cr) metali bileşim oranı azaltılmaya ve alüminyum (Al) bileşim oranı artırılmaya başlandı. Bu katkılama, alaşımları daha düşük sıcaklıklarda ($T < 650$ °C) güçsüzleştirdi. Böylece, bu olumsuzluğu gidermek ve alaşımları düşük sıcaklıklarda güçlendirmek için yaklaşık 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kararsız olan ve düşük sıcaklıklarda etki gösteren yeni bir faz yapısına (γ'' (gama çift prime)) ihtiyaç olduğu anlaşıldı. Bu faz yapısı için yapıya belirli oranlarda Nb ve V metali katkılanması yapılarak yapı içerisinde Ni_3Nb veya Ni_3V içerikleri oluşturuldu. Böylece Ni-tabanlı süper alaşımların düşük sıcaklıklarda da mukavemetini artıran cisim merkezli dörtgen (BCT-*body cubic tetragonal*) dokulu γ'' fazı oluşturulmuş oldu. Bu faz yapılarına ek olarak, Ni-tabanlı süper alaşımlarda malzemenin yapısını deformasyona karşı stabilize eden ve tane sınırı hareketini engelleyen karbür fazları ve yüksek sıcaklıklarda ($T > 750$ °C) uzun süre (binlerce saat) çalışan alaşım yapılarında kinetikler sonucu oluşan topolojik olarak sıkı paketlenmiş fazlar (TCP; σ fazı, χ fazı, μ fazı ve Laves fazı) da bulunmaktadır (Jena & Chaturvedi, 1984; Reed, Tao, & Warnken, 2009; Tang vd., 2021). Bu faz oluşumları tane sınırlarının genişlemesine ve mekanik özelliklerin zayıflamasına sebep

olur. Bu olumsuzluklar sebebi ile giderilmesi gereken son teknolojik ihtiyaçlar bilim insanlarını tek kristalli süper alaşım keşfne odaklandırmıştır. Bu tür alaşımların keşfi için, hiçbir tanecik sınırı oluşumuna izin vermeyen yönlü katılaşma tekniği kullanılmakta ve alaşım yapılarına performans artırmak için Renyum (Re) ve Rutenyum (Ru) katkılaması yapılarak tasarlanan çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Bu tür alaşımların en popöler olanları ise yine Ni-tabanlı tek kristal süper alaşımlardır.

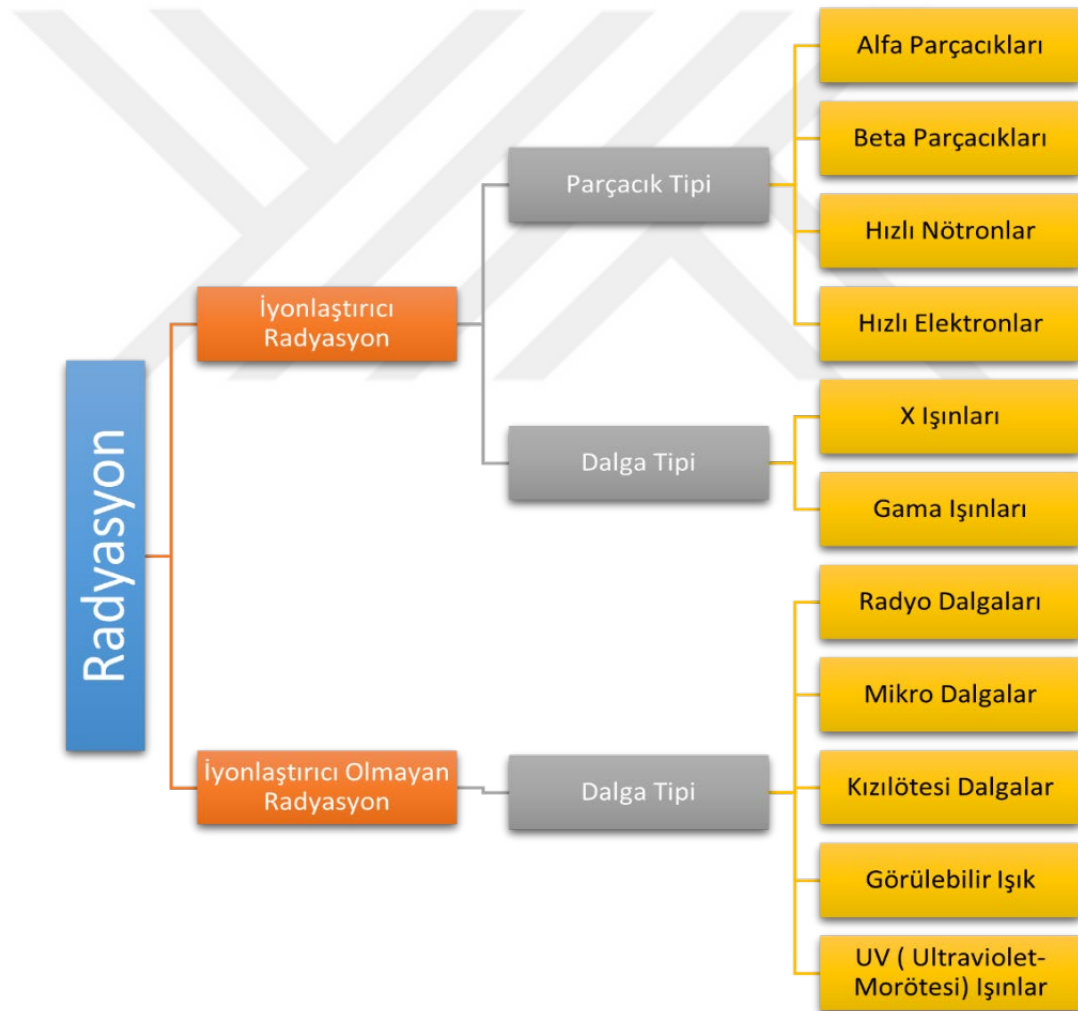
Bu tez çalışmasının konusu olan Ni-tabanlı alaşımların üzerinde radyasyonun etkisi ve bu alaşımların radyasyon zırhlama performanslarının değerlendirilmesi üzerine detaylı olarak yapılmış çok az sayıda çalışma olması (Aygün & Aygün, 2023; Ekinci vd., 2021; Sayyed vd., 2020; Sonehara vd., 2009) literatürdeki bilimsel boşluğun henüz doldurulmadığının bir göstergesidir. Bu sebeple yüksek sıcaklıklara dayanma gücüne sahip ve zırh malzemesinin sahip olması gereken optimal özellikleri taşıyan bu tip alaşımların nükleer reaktörler ve nükleer enerji uygulamaları için uygunluğu araştırılmalı ve rapor edilmelidir. Bu boşluk bu tez çalışmasının odak noktası olmuştur.

Radyasyon ve Radyasyon eşitleri

Işınım olarak da adlandırılan radyasyon, kaynağından ıraksayan doğrular boyunca yayılan enerjidir. Radyoaktif ekirdeklerin (Uranyum 238, Toryum 232, Radyum 226, Kurşun 210, vb.) kararlı olabilme sürecinde yayımladıkları parçacık (α , β , vb.) veya dalga (X- ve gama-ışınları, vb.) şeklindeki enerji veya bir kaynaktan herhangi bir nedenle yayımlanan elektromanyetik ışınımın tamamı radyasyondur. Radyasyon, temelde iki çeşittir. Bunlar şekil 1’de gösterildiği gibi iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. İyonlaştırıcı radyasyon, dalga ve parçacık türünde olmak üzere iki çeşide ayrılırken, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon sadece dalga türündeki düşük frekanslı ışınım türlerinden oluşur (şekil 1’e bakınız). Radyasyonun canlı organizmalar için zararlılık boyutu, radyoaktif kaynaktan yayımlanan ışınım enerjisinden ziyade soğurulan doz miktarı ile doğru orantılıdır. Bu sebeple, kullanılan radyasyon birimleri, ilgili terime göre değişkenlik gösterir. Radyasyon terimleri, birimleri ve anlamları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Radyasyon Terimleri, Birimleri ve Anlamları

Terim	Klasik Birim	SI Birim	Dönüşüm	Açıklama
Aktivite	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq	1 Ci; Saniyede $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma veya bozunma gösteren maddenin aktivitesidir. 1 Bq; Saniyede 1 parçalanma yapan çekirdeğin aktivitesidir.
Işınlanma Düzeyi	Röntgen (R)	C/kg	1 C/kg = 3876 R	1 R; Normal hava şartlarında havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ C' luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X- ve gama-ışını miktarıdır.
Soğrulmuş Doz	Radiation Absorbed Dose (rad)	Gray (Gy)	1 Gy = 100 Rad	1 Gy; Işınlanan maddenin 1 kg'ına 1 joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır.
Doz Eşdeğeri	Röntgen equivalent man (rem)	Sievert (Sv)	1 Sv = 100 rem	1 Sv; 1 Gray'lık X- ve gama-ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır.



Şekil 1. Radyasyon çeşitleri.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

Bu radyasyon türü, düşük frekanslı, düşük enerjili ve yüksek dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgalarıdır. Bu tür radyasyonların penetrasyon derinlikleri küçük olup vücuda

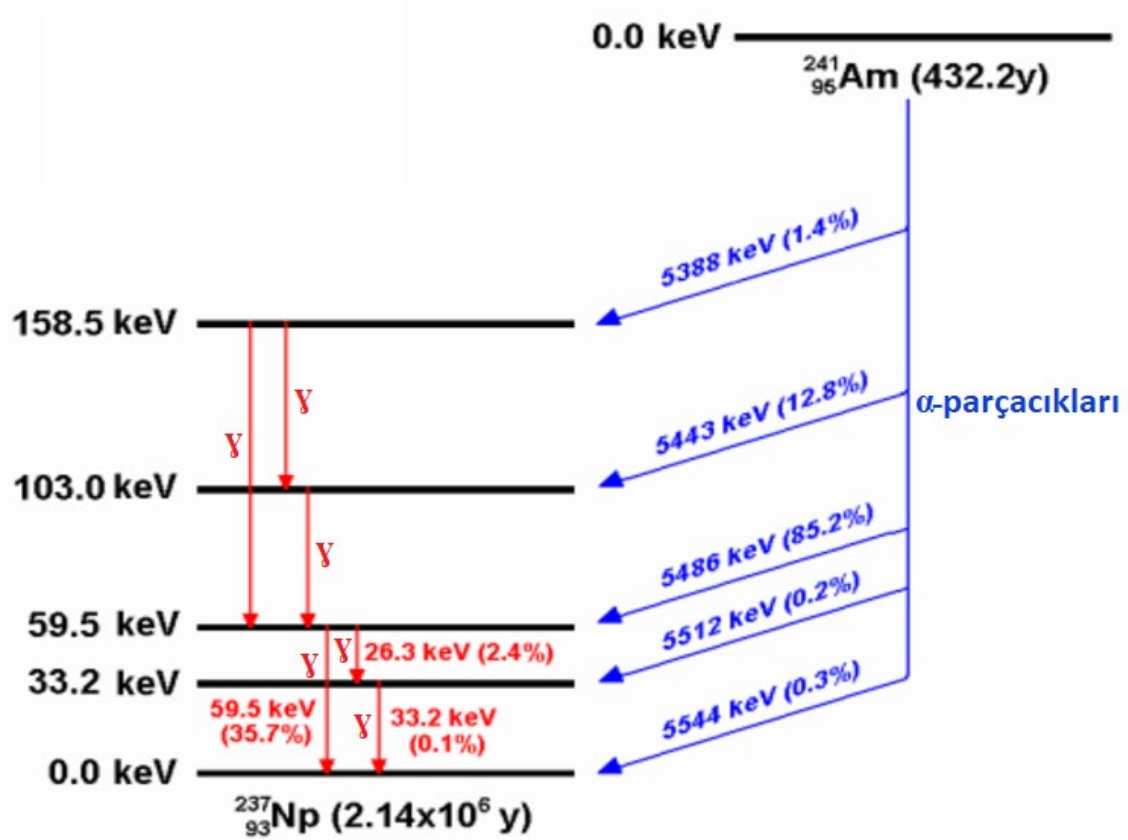
etkileri moleköl düzeyinde kaldığından iyon oluşturmazlar. Bu sebeple sağık açısından çok fazla tehditkâr değillerdir. Frekans aralığı oldukça geniş olan bu tür radyasyonlar, Şekil 1’de de görüldüğü gibi elektromanyetik dalga spektrumunun düşük enerji bölgesindeki radyo dalgaları ile UV (Ultraviolet-Mor ötesi) ışınlarını da içerisine alan bölgedir. Güneşten gelen ve günlük hayatta kullandığımız görünür bölge ışınları diye tanımlanan Kırmızı-Mor ışın bölgesi (gökkuşağı renk bölgesi de denir) de iyonlaştırıcı olmayan radyasyon içerisinde yer almaktadır. Bu tür radyasyonlar, trafolardan, cep telefonlarından, yüksek gerilim hatlarından, baz istasyonlarından ve mikro dalga fırınları gibi günlük hayatta karşılaştığımız aygıtlardan yayımlanırlar (Aral, 2019; Atakan, 2014).

İyonlaştırıcı radyasyon

Bu radyasyon türü, kararsız bir radyoaktif çekirdeğin kararlı hale gelebilmek için bozunma sırasında yayımladığı parçacık ve/veya dalga şeklindeki ışınımıdır. Parçacık şeklindeki ışınım; alfa (α), beta (β), hızlı nötronlar (n) ve hızlı elektronlar (e^-)’ın yayılımı şeklindedir. Bu ışınım türleri tez konumuzun dışında olduğu için bu bölümde izah edilmeyecektir. Detaylı bilgi için verilen referanslar incelenebilir (Arya, 1999; Martin, 2013; Tsoulfanidis & Landsberger, 2021; Williams, 2014). Dalga şeklindeki ışınım ise X- ve gama-ışınlarıdır. Bu tez kapsamında kullanılan radyasyon türleri X- ve gama-ışınları olduğundan bunlar hakkında özet bilgiyi aşağıdaki gibi verebiliriz.

Gama-ışını (γ -ışını); radyoaktif bir çekirdeğin kararlılık durumu için yaptığı bozunma sürecinde, genellikle önce α veya β parçacığı yayımlayarak yarı-kararlı enerji düzeyine (uyarılmış enerji seviyesi) ulaşır. Daha sonra yeniden bir bozunum (ikinci bozunum) ile enerji yayımlayarak daha düşük enerji seviyesine ve/veya temel enerji düzeyine ulaşır. İşte böyle bir çekirdeğin ikinci bozunum esnasında yayımladığı enerji foton şeklinde yayımlanır. Yayımlanan bu fotona gama-ışını denir. Örnek olması açısından $^{95}\text{Am}^{241}$ radyoaktif çekirdeğinin bozunumu ve gama-ışını oluşumunu gösteren şema Şekil 2’de verilmiştir.

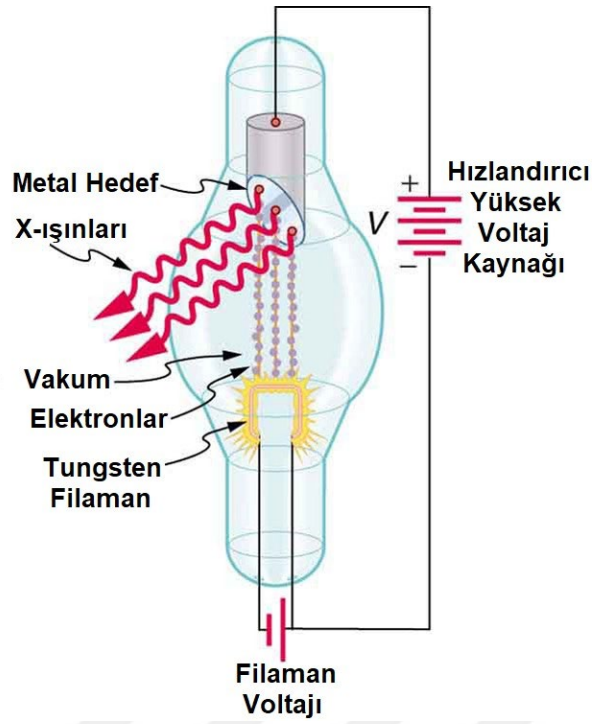
Gama-ışınları yukarıda anlattığımız radyoaktif bozunma dışında, yüksek enerjili hızlandırılmış parçacıkların çarpışmaları, bir parçacık ve onun karşıt parçacığının karşılıklı yok olması (annihilation-yok oluş ışınımı) veya ivmelendirilmiş yüklü parçacıkların ışınımı yoluyla da oluşabilir (Kurudirek, 2011).



Şekil 2. Gama-ışını oluşumu (Khatry, Nieminen, Smith, & Slotten, 2017).

Gama-ışınları, diğer elektromanyetik dalga türleri gibi boşlukta ışık hızı ile yayılırlar. Yüksüz oldukları için manyetik ve elektrik alanda sapma göstermezler. Ayrıca, yüksek enerjili (0,1-10 MeV) oldukları için maddeye nüfus edebilme derinlikleri (giricilikleri) çok yüksektir ve madde içerisinde iyon oluştururlar. Bu sebeple canlı organizmalar için oldukça zararlıdır. Ancak, zararlı olduğu kadar yararlı uygulamalarda da kullanılırlar. Bu ışınım türünün en yaygın kullanıldığı alanlar arasında, gıdaların sterilizasyonu, radyoterapi, görüntüleme cihazları, elementel ve izotopik analizler, uzay araştırmaları ve nükleer yapı çalışmaları gelmektedir.

X-ışınları (Röntgen ışınları); 10^{-8} - 10^{-13} m aralığındaki dalga boylarına sahip elektromanyetik ışınım türüdür. X-ışınları, oluşum şekilleri ve niteliklerine göre sürekli X-ışınları ve karakteristik X-ışınları olmak üzere iki çeşide ayrılır. Sürekli X-ışınları, yüksek enerji kazandırılmış yüklü parçacıkların (proton, elektron, alfa parçacığı gibi) bir metal hedef (ağır çekirdeklere sahip anot) tarafından durdurulması ve/veya yavaşlatılmaları sürecinde (ağır çekirdeklerin Coulomb alanından geçerken nükleer saçılmalar ile enerji kaybetmeleri süreci) yayımladıkları ışınımıdır. Örnek olarak, Bremsstrahlung tüpü diye adlandırılan X-ışını tüpünün ve sürekli X-ışını oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. X-ışını tüpü ve sürekli X-ışını oluşumunun şematik gösterimi (Uglo, 2021).

Atom çekirdeği etrafında belirli iç yörüngelerde dolanan bir elektronun uzaysal konumu herhangi bir dış enerji (enerjik yüklü parçacık, X-ışını ve/veya γ -ışını bombardımanları) ile değişirse (yani atomun uyarılma veya iyonlaşma durumu oluşursa), uzaysal konumu değişen bu elektronun yörüngede oluşturduğu boşluk dış katmanlardaki elektronlar tarafından enerjinin minimumluğu prensibi ve geçiş kurallarına göre doldurulur. Bu olay esnasında, yani dış katmandan iç katmana elektron geçişi esnasında katmanlar arası enerji farkı kadar bir ışınım yayımlanır. Yayımlanan bu ışınımın karakteristik X-ışını adı verilir. Örnek olması açısından karakteristik X-ışınının oluşum mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 4’de verilmiştir. Bu ışınım, boşluk oluşan yörüngenin sembolü ile kodlanarak isimlendirilir (K-tabakası X-ışını, L-tabakası X-ışını, vb.). Ayrıca, farklı yörüngelerden tek bir yörüngeye geçiş durumunda da farklı enerjili X-ışınları yayımlandığından bu X-ışınları da farklı indisler ile kodlanır. Örneğin, L-tabakasından K-tabakasına geçişler $K\alpha$ ile kodlanırken, M-tabakasından K-tabakasına geçişler $K\beta$ olarak kodlanır. Ek olarak, bir yörüngenin farklı alt katmanlarından başka bir yörüngeye geçiş sırasında yayımlanan ışınım enerjileri de birbirlerinden farklıdır. Bundan dolayı, bu geçişlerde farklı indislerle ifade edilir. Örneğin L-III alt katmanından K tabakasına geçiş $K\alpha_1$ olarak kodlanırken, L-II alt katmanından K tabakasına geçiş $K\alpha_2$ olarak kodlanır. Bu geçişlerin daha iyi anlaşılması açısından hem katmanlar arası hem de alt katmanlar arası geçişlerin bazıları Şekil 5’de şematik olarak verilmiştir. Bu geçiş enerjileri tüm atomlar için farklı olduğundan ve atom türünün karakteristik özelliğinden kaynaklandığından bu ışınımın karakteristik X-ışını adı verilir (Şahin & Demir, 2013).

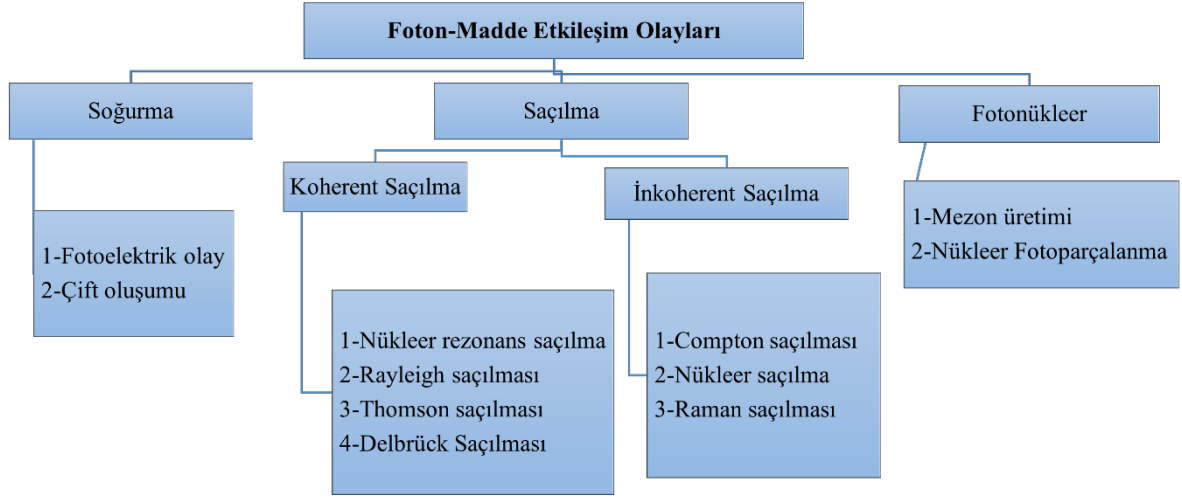
X- ve γ -ışınları, madde ile dört farklı türde etkileşime girebilir. Bu etkileşim türleri ve etkileşme sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. *Foton-Madde Etkileşim Türleri ve Etkileşme Sonucu Meydana Gelen Olay (İçin,2016)*

Etkileşme Türü	Etkileşme Sonucu Olay
Fotonların atomun elektronları ile etkileşmesi	Foton Soğurulması
Fotonların atom çekirdekleri ile etkileşmesi	Elastik (Koherent) Saçılma
Fotonların atom çekirdeği ve elektronları saran elektrik alan ile etkileşmesi	İnelastik (İnkoherent) Saçılma
Fotonların çekirdek etrafındaki mezon alanı ile etkileşmesi	Mezon üretimi veya Fotodisintegrasyon

Bu etkileşim türlerinin gerçekleşme olasılıkları foton enerjisinin büyüklüğüne ve maddeyi oluşturan atomların türüne (yani atom numaralarına) göre değişkenlik gösterir. Örneğin, düşük foton enerji bölgesinde (yaklaşık 0,5 MeV enerjiye kadar) madde üzerine gönderilen fotonların madde atomlarının elektronları tarafından soğurulması ile yapılan etkileşme (fotoelektrik olay) ihtimali en büyük iken, orta foton enerji bölgesinde (yaklaşık 0,1-0,5 MeV arası) madde üzerine gönderilen fotonların çekirdek veya elektronları çevreleyen elektrik alan ile etkileşerek inelastik saçılma (Compton saçılması) yapma ihtimali daha fazladır. Daha yüksek enerjilerde (1,02 MeV ve daha büyük enerjiler) yine fotonların madde atomları tarafından soğurulması olayı ile yaptığı etkileşme (Çift oluşum) daha fazla ihtimaliyette gerçekleşir (Güder, 1995). Çok çok yüksek enerjilerde (150 MeV ve üzeri enerjilerde) madde üzerine gelen fotonların madde atomlarının nükleonlarını çevreleyen mezon alanı ile etkileşim yaparak mezon üretimi meydana gelme ihtimali daha fazladır. Ancak genel olarak söyleyebiliriz ki, Compton saçılması dışındaki diğer saçılma olaylarının meydana geldiği etkileşmeler, foton soğurulmasına dayalı etkileşmelere göre daha zayıf etkileşimlerdir.

Foton-madde etkileşimlerinde etkileşim sonucunda meydana gelen olaylar Şekil 6’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Foton-madde etkileşim olayları.

Foton radyasyonu soğurma ölçümlerinin değerlendirilmesinde, zırlama parametrelerinin hesaplanmasında ve soğurucu malzemenin zırlama performansı hakkında bilgi sahibi olmada Şekil 6’da verilen foton-madde etkileşim olayları çok önemlidir. Doğru değerlendirme yapabilmek için bu olayların nasıl oluştuklarını ve meydana gelme ihtimaliyetlerini (etkileşim tesir kesitlerini) bilmek önemli ve gereklidir.

Tesir kesiti.

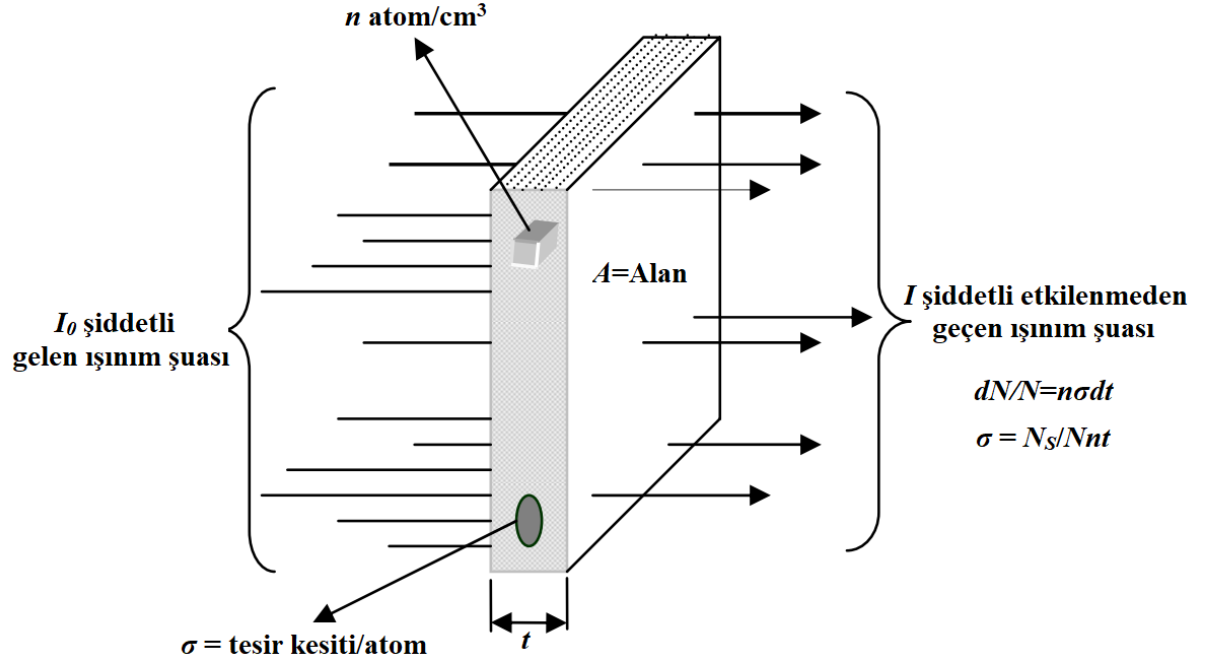
Hangi tür radyasyon olursa olsun (parçacık veya dalga tipi), radyasyon-madde etkileşimlerinde bir nükleer olayın meydana gelme ihtimaliyetine tesir kesiti denir. Meydana gelen olayın çeşidine göre flöresans tesir kesiti, saçılma tesir kesiti, soğurma tesir kesiti, vb. gibi adlandırılır. Bu fiziksel parametre, deneysel olarak belirlenebildiği için nükleer olayların detaylı olarak değerlendirilebilmesine imkân sağlar. Bu fiziksel parametrenin yüksek doğruluk derecesi ile bilinmesi, radyasyon zırlama parametrelerinin hesaplanması, reaktör zırh malzemelerinin tasarımı, radyografi ölçümleri ve radyoterapi gibi uygulama alanlarında yapılacak keşif ve gelişmeler için önemli ve gereklidir.

Tesir kesitini matematiksel olarak izah edebilmek için, Şekil 7’de şematik olarak gösterilen bir olay düşünelim. Aşırı derecede ince (t kalınlığında) ve A alanına sahip bir levha olsun. Bu levhanın yüzeyine I_0 şiddetine (yoğunluğuna) sahip bir ışınım (parçacık veya foton) akısı düştüğünde ince levhayı etkilenmeden geçen ışınım akısının I olduğunu kabul edelim. Bu sebeple ışınım akısındaki değişim; $\Delta I = I_0 - I = I_{\text{Etkileşen}}$ (etkileşen ışınım şiddeti) olacaktır. Bu levhanın sahip olduğu toplam atom sayısı N ve birim hacminde bulunan atom sayısının da n olduğunu kabul edelim. Tesir kesitini (σ) de bir atomun bir fotonla etkileşebildiği etkin alan (yani bu alana düşen fotonun kesinlikle atomla etkileştiği bölge) olarak kabul edelim. Etkileşen

ışınımların ($I_{Etkileşen}$) N_S tane atomun etkin alanına düştüğü düşünülürse etkileşme tesir kesiti;

$$\sigma = \frac{N_s}{Nnt} \quad (1)$$

ifadesi ile verilir. Tesir kesitinin birimi barn (b) olup $1b=10^{-24} \text{ cm}^2$ dir.



Şekil 7. Tesir kesitinin geometrik yorumu (İ. Han, 2009).

X- ve γ-ışınlarının soğurulması.

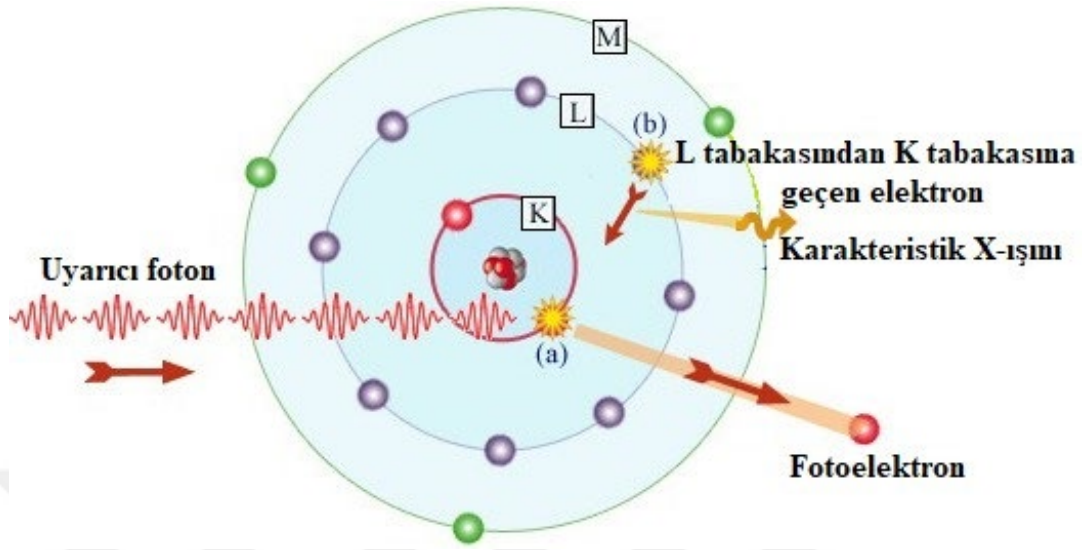
Fotonların (X- ve γ-ışınları gibi) madde ile etkileşmesi esnasında, maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin elektronları tarafından kısmen veya tamamen soğurulmasını sağlayan bazı önemli olaylar gerçekleşebilir. Bu ışıının türlerinin tamamen soğurulması halinde fotoelektrik olay veya çift oluşumu gerçekleşirken, kısmen soğurulması durumunda ise Raman saçılması meydana gelmektedir.

Fotoelektrik olay.

Fotoelektrik olay, yeterli enerjiye (eşik enerjisi; elektronun çekirdeğe bağlanma enerjisi) sahip bir fotonun madde atomlarının yörüngelerindeki elektronlarla etkileşmesi sonucu atomdan elektron sökme olayına denir. Atomdan sökülen bu elektronlara ise fotoelektron denir. Bu olay meydana geldiğinde uyarıcı foton soğurularak tamamen yok olur. Tüm enerjisini elektrona aktardığı için, eşik enerjiden büyük enerjiye sahip fotonların söktüğü elektronlar kinetik enerji kazanarak atomu terk eder. Bu durum matematiksel olarak, Einstein bağıntısı olarak bilinen aşağıdaki eşitlikle verilebilir;

$$KE_{\max} = hf - w = hf - hf_0 = h(f - f_0) \quad (2)$$

burada, KE_{max} ; fotoelektronun sahip olabileceği maksimum kinetik enerji, h ; Planck sabiti ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s), f ; gelen fotonun frekansı, w ; iş fonksiyonu (eşik enerjisi), f_0 ; eşik frekansıdır. Bu olayın şematik gösterimi Şekil 8’de verilmiştir.



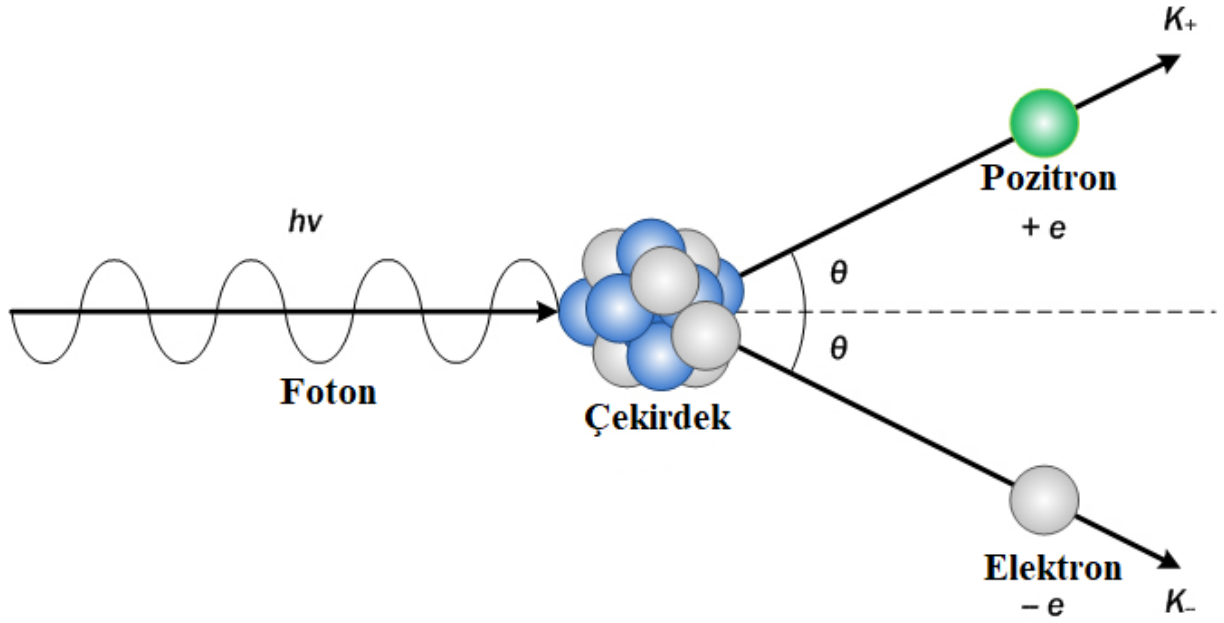
Şekil 8. Fotoelektrik olayının şematik gösterimi (radioactivity.eu.com).

Bu olay, madde atomlarının soğurma kıyılarına eşit veya yakın enerjiye sahip fotonlarla etkileşmesi durumunda en yüksek ihtimaliyette (dominant) meydana gelir. Bu sebeple, düşük foton enerjili fotonların ağır element atomları tarafından soğurulmasında meydana gelen temel olay fotoelektrik olaydır. Fotoelektrik olayın meydana gelme ihtimaliyeti hem uyarıcı foton enerjisine hem de madde atomlarının atom numarasının büyüklüğüne bağlıdır. Bu bağıllık $Z^4 \cdot E^{-7/2}$ ile ifade edilir (Alım vd., 2022). Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere, bir foton-madde etkileşim mekanizmasında Z (atom numarası) arttıkça ve E (foton enerjisi) azaldıkça fotoelektrik olayın meydana gelme olasılığı artar.

Çift Oluşumu.

Çift oluşumu olayı, uyarıcı fotonun atom çekirdeği ile etkileşmesi sonucu elektromanyetik enerjinin maddeye (elektron (e^-) ve pozitron (e^+) tanecik çiftine) dönüştüğü olaydır. Bu olay tüm korunum olayları çerçevesinde gerçekleşir (yük korunumu, momentum korunumu, enerji korunumu, vb.). Bu sebeple, boş uzayda hem enerji hem de lineer momentum birlikte korunamayacağı için çift oluşumu boş uzayda gerçekleşmez. Çift oluşumunda meydana gelen elektron ve pozitronun durgun kütle enerjileri $E=mc^2=0,511$ MeV olduğundan, çift oluşumun gerçekleşebilmesi için uyarıcı fotonun enerjisinin minimum $E=2mc^2=1,022$ MeV olması gerekir. Bu enerjiye sahip foton dalga boyları yaklaşık 1,2 pm olduğu için bu olayı gerçekleştiren elektromanyetik dalga türü X-ışınlarından ziyade gama-ışınlarıdır (Beiser, 2008). Eğer uyarıcı foton enerjisi 1,022 MeV’den büyük ise kalan enerji parçacıklara kinetik

enerji olarak aktarılır. Çift oluşum olayının şematik gösterimi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Çift oluşumu olayının şematik gösterimi.

Çift oluşumu olayının meydana gelme ihtimaliyeti hem uyarıcı foton enerjisine hem de maddenin atom numarasının büyüklüğüne bağlıdır. Bu bağıllık $Z^2 \ln(E)$ ile ifade edilir (Alım, 2020). Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere, bir foton-madde etkileşim mekanizmasında Z (atom numarası) ve E (foton enerjisi) arttıkça çift oluşum olayın meydana gelme olasılığı artar. Bu sebeple, yüksek enerjili (1,022 MeV’den büyük) fotonların ağır element atomları tarafından soğurulmasında meydana gelen temel olay çift oluşum olayıdır.

X- ve γ-ışınlarının saçılması.

X- ve γ-ışınlarının saçılması, uyarıcı fotonların madde atomlarının çekirdekleri ile etkileşmesi sonucu oluşan koherent (elastik) saçılma ile çekirdek ve elektronları saran elektrik alan ile etkileşmesi sonucu oluşan inkoherent (inelastik) saçılma olmak üzere iki türde gerçekleşir. Bu saçılmalar, saçılan ve gelen foton arasındaki faz ve enerji ilişkisine göre birbirlerinden ayrılırlar.

Koherent (Elastik) Saçılma.

Elastik saçılma olarak da adlandırılan bu saçılma, saçılan fotonun enerjisinin gelen fotonun enerjisine eşit olduğu saçılma türüdür. Yani gelen fotonun dalga boyu saçılan fotonun dalga boyuna eşittir. Ayrıca bu saçılmada, saçılan ve gelen foton arasında faz ilişkisi olup aynı fazlıdır. Bu saçılma türünde temel mekanizma, uyarıcı fotonun serbest bir elektron ile etkileşerek fotonun elektrik alan bileşeninin bu serbest elektronu ortalama uzaysal bir konum etrafında titreştirmesi olayına dayanır. Bu titreşim ile ivmeli hareket yapan elektron uyarıcı

foton ile eş enerjili bir foton yayımlar. Böylece uyarıcı foton sanki saçıcı gibi davranan elektron tarafından koherens bir şekilde saçılır. Bu saçılmaya koherent saçılma denir. Bu olayda, gelen ve saçılan fotonlar eş fazlı olduğundan saçılan fotonlar arasında girişim oluşur. Bu saçılmada, atom tarafından saçılan fotonların toplam şiddeti atomun sahip olduğu her bir elektron tarafından saçılan fotonların genlikleri toplamı ile hesaplanabilir. Bu olayın meydana gelme ihtimaliyeti, yani toplam saçılma tesir kesiti $\sigma_T = (8\pi r_e^2) / 3 = 0,6652 \times 10^{-24} \text{ cm}^2/\text{elektron}$ (burada, r_e elektronun yarıçapıdır) olduğundan uyarıcı foton enerjisinden ve atom numarasından tamamen bağımsızdır. Bu saçılma türü Şekil 6'da gösterildiği gibi Nükleer rezonans saçılma, Rayleigh saçılması, Nükleer Thomson saçılması ve Delbrück saçılması olmak üzere dört çeşide ayrılır. Bundan dolayı, bir atomda oluşan toplam koherent saçılma genliği bu 4 tür saçılma genliklerinin toplamıyla verilir ($A=A^R+A^T+A^N+A^D$). Bu saçılma türündeki tüm saçılmaların meydana gelme ihtimaliyetleri çok küçük olduğundan foton zırlama hesaplamalarında ihmal edilebilir (Erzeneoğlu, 1990).

Nükleer rezonans saçılma.

Bu saçılma, uyarıcı foton ile madde atomlarının çekirdeği arasındaki etkileşme ile oluşur. Atom çekirdeği, iki nükleer enerji seviyesi farkı kadar enerjiye sahip uyarıcı bir fotonu soğurarak uyarılır. Çekirdeğin uyarılmış durumdan temel hale dönmesi (de-eksitasyon) sonucu eş frekanslı bir foton emisyonu gerçekleşir. Böylece atom çekirdeği bir saçıcı olarak görev yaparak nükleer rezonans saçılma meydana gelir (Erzeneoğlu, 1990). Bu saçılma sadece atom numarasına bağlı olup, saçılma tesir kesiti Z ile orantılıdır. Bu sebeple ağır çekirdeklerin bu saçılmayı gerçekleştirme ihtimali daha büyüktür.

Rayleigh saçılması.

Bu saçılma, uyarıcı foton ile madde atomlarının iç yörüngelerinde bulunan ve çekirdeğe çok sıkı bağlarla bağlı olan (bağlanma enerjisi yüksek olan) iç yörünge elektronları (core elektronları) arasında meydana gelen etkileşme sonucu oluşur. Bu olayda, foton enerjisi core elektronlarını sökebilecek yeterlilikte değildir. Bu sebeple, core elektronları ile etkileşen uyarıcı foton atomu titreşime maruz bırakıp temel durumdan uyarılmış bir atomik enerji durumuna uyarır. Atom tekrar temel duruma gelirken soğurduğu enerji ile eş enerjili ışıma yapar. Bu olaya, bağlı elektrondan rezonans saçılma veya Rayleigh saçılması denir. Bu saçılmanın tesir kesiti Z^2 ile orantılıdır. Bu saçılma çeşidi, düşük enerjili (0,5 MeV'den az) fotonların ağır metal atomları ile (büyük Z 'li) etkileşmesinde daha çok görülebilir. Küçük enerjili fotonların küçük atom numaralı element atomlarından saçılmasında Rayleigh saçılması, Compton saçılması yanında ihmal edilebilir (Güder, 1995). Rayleigh saçılmasının etkisi, deneysel olarak ancak dar-

ışın iletim geometrisinde (ideal geometri) tespit edilebilir (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020).

Nükleer Thomson saçılması.

Bu saçılma, uyarıcı fotonun atom çekirdeği ile etkileşmesi ile oluşur. Atom çekirdeği, gelen uyarıcı dalga ile titreşir ve bu titreşim esnasında çekirdek kararlı yapıya dönünce ışıma yapar. Bu ışıma, çekirdekten saçılan nükleer Thomson saçılması olarak adlandırılır. Bu saçılmanın tesir kesiti, $(Ze)^4 M^{-2}$ (Ze ; çekirdeğin yükü ve M ; çekirdeğin kütlesi) ile orantılıdır. Atom çekirdeklerinin kütlesi çok büyük olduğundan bu saçılmanın meydana gelme olasılığı çok çok düşüktür. Ancak, uyarıcı fotonun dalga boyu eğer çekirdeğin yarıçapından çok büyük olursa (yani foton enerjisi küçük olursa) bu saçılmanın meydana gelme olasılığı artar (Güder, 1995).

Delbrück saçılması.

Bu saçılma, uyarıcı fotonun atom çekirdeğinin durgun Coulomb alanından geçerken uğradığı saçılmadır. Bu saçılma mekanizması, uyarıcı fotonun çekirdeğin Coulomb alanında bir elektron (e^-)-pozitron (e^+) çifti oluşturmalarının ardından atomun geri tepmesiyle bu çiftin yok olarak (annihilation) enerji ve faz bakımından uyarıcı foton ile eşdeğer yeni bir fotonun salınması temeline dayanır. Bu saçılmaya koherent nükleer potansiyel saçılma da denir. Bu saçılma olayının tesiri çok çok küçük olduğundan deneysel ölçümlerde gözlemlenmesi zordur. Bu saçılmanın tesir kesiti Z^4 ile orantılı olduğundan yüksek atom numaralı element atomlarına sahip malzemelerde daha çok oluşma ihtimaline sahiptir (Güder, 1995).

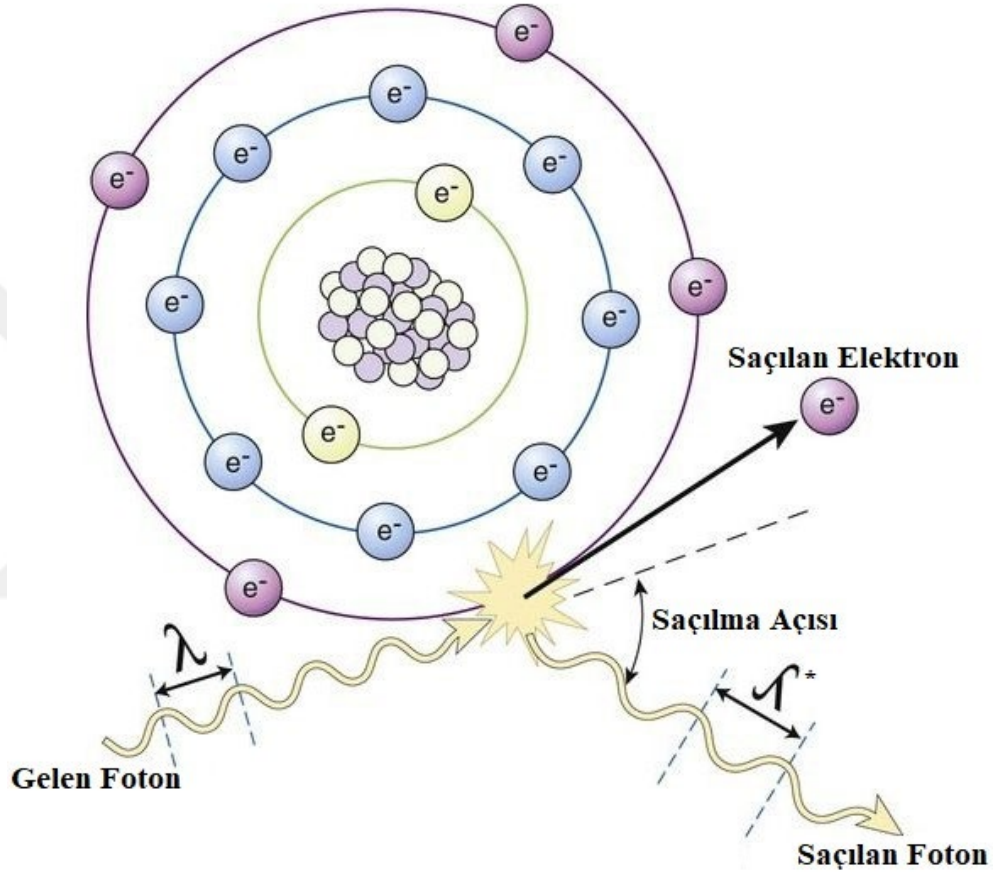
İnkoherent (İnelastik) saçılma.

İnelastik saçılma olarak da adlandırılan bu saçılma, saçılan foton ile gelen foton arasında faz ve enerji eşitliğinin olmadığı saçılmadır. Bu saçılma türünde uyarıcı foton enerji kaybederek saçılır. Yani gelen fotonun dalga boyu saçılan fotonun dalga boyundan küçüktür. Ek olarak, bu saçılmada, saçılan ve gelen foton arasında faz ilişkisi olmadığından saçılan fotonlar arasında girişim olmaz. Ayrıca, bir atomda meydana gelen toplam inelastik saçılma şiddeti, atomun her bir elektronundan yapılan saçılma şiddetlerinin toplamına eşittir. Bu saçılma türü Şekil 6'da gösterildiği gibi Compton saçılması, Nükleer saçılma ve Raman saçılması olmak üzere üç çeşide ayrılır (Güder, 1995).

Compton saçılması.

Bu saçılma inelastik saçılma türünün en temel saçılması olup, tüm saçılma çeşitleri arasında en yüksek ihtimaliyette meydana gelme olasılığına sahip saçılmadır. Bu saçılma

mekanizması, $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (λ dalga boyu) enerjisine sahip uyarıcı bir fotonun, durgun kabul edilen serbest bir elektrondan veya bağlanma enerjisi uyarıcı foton enerjisine kıyasla çok küçük olan bağlı elektronlardan (genellikle son yörünge elektronları) enerji kaybederek ve doğrultu değiştirerek saçılması temeline dayanır. Saçılan fotonun enerjisi gelen fotonun enerjisinden küçük olduğundan saçılan foton daha büyük dalga boyuna sahiptir. Bu olayın şematik gösterimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Compton saçılmasının şematik gösterimi.

Saçılan fotonun dalga boyu λ^* olmak üzere, enerjisi $E^* = h\nu^* = \frac{hc}{\lambda^*}$ ifadesi ile verilir.

Gelen ve saçılan foton arasındaki enerji farkı, geri tepen (saçılan) elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Saçılma açısı; θ olmak üzere, fotonun dalga boyu değişimi ($\Delta\lambda$), saçılan fotonun enerjisi (E^*) ve geri tepen elektrona aktarılan enerji (kinetik enerji) aşağıdaki eşitlikler ile verilir.

$$\Delta\lambda = \lambda^* - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \theta) = \lambda_c(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

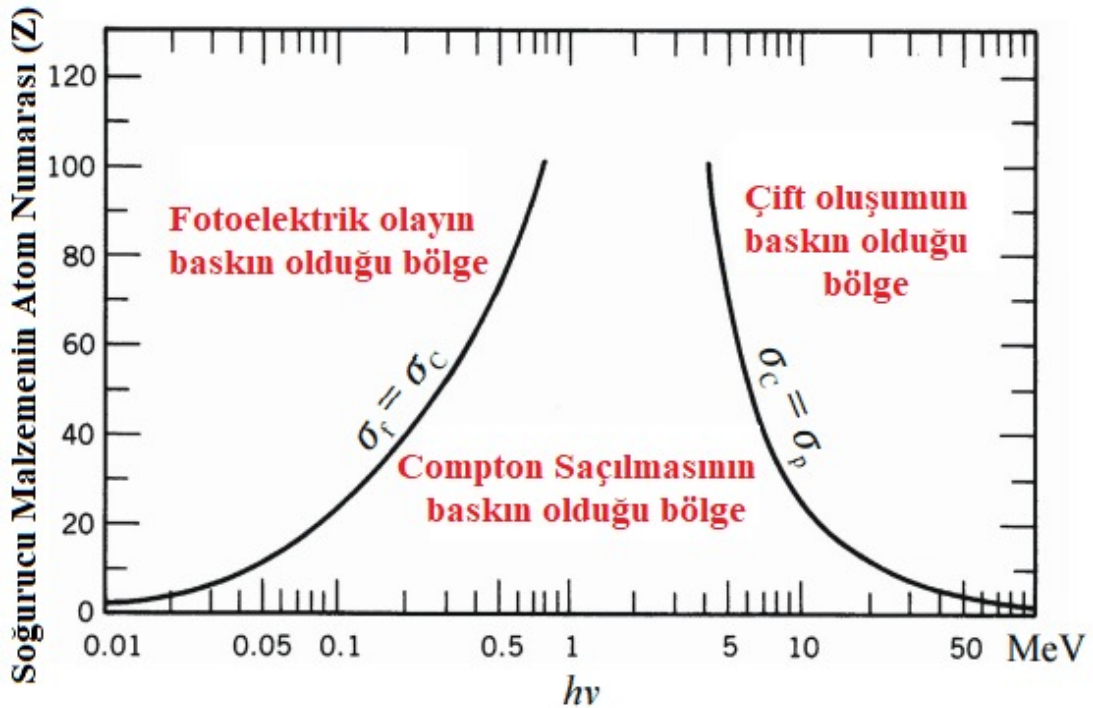
$$E^* = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

$$KE_{elektron} = \frac{\alpha E (1 - \cos \theta)}{1 + \alpha (1 - \cos \theta)} \quad (5)$$

Bu ifadelerde, h ; planck sabiti ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s), m_0 ; elektronun kütlesi ($9,11 \times 10^{-31}$ kg), c ; ışığın boşluktaki hızı ($\sim 2,98 \times 10^8$ m/s), $\lambda_C = h/m_0 c = 2,43 \times 10^{-13}$ m; Compton dalga boyu, E ; gelen fotonun enerjisi, E^* ; saçılan fotonun enerjisi ve $\alpha = 1/137$ olup ince yapı sabitidir (Güder, 1995).

Genellikle 0,1-0,5 MeV aralığındaki (orta enerji bölgesi) elektromanyetik radyasyonun hafif element atomları tarafından saçılmasında temel olay Compton saçılması olayıdır. Compton saçılması olayının meydana gelme ihtimaliyeti hem uyarıcı foton enerjisine hem de madde atomlarının atom numarasının büyüklüğüne bağlıdır. Bu bağıllık yani tesir kesiti ZE^{-1} ile orantılıdır (Alım vd., 2022). Yani orta enerji bölgesinde, atom numarası büyük atomların en yüksek ihtimaliyetle gerçekleştirdiği olay Compton saçılmasıdır.

Yukarıdaki bölümlerde izah edilen foton-madde etkileşmesinde etkin rol alan üç temel olayın (Fotoelektrik etki, Compton saçılması ve Çift oluşumu) uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak etkileştiği madde atomlarının atom numarasına bağlı etkileşim tesir kesiti değişim grafiği Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. E ve Z'ye bağlı olarak fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum olaylarının baskın olduğu bölgeler (Baltaş, 2006).

Bu şekil incelendiğinde, Z atom numarası ve $E = h\nu$ uyarıcı foton enerjisi olmak üzere,

[düşük E]-[yüksek Z] bölgesinde foton soğurma olaylarından fotoelektrik olayın, [orta düzey E]-[yüksek Z] bölgesinde foton saçılma olaylarından Compton saçılmasının ve [yüksek E (1,022 MeV'den büyük)]-[yüksek Z] bölgesinde ise foton soğurma olaylarından çift oluşum olayının baskın olduğu açıkça görülmektedir.

Nükleer saçılma.

Bu saçılmanın oluşumu için foton-madde etkileşim mekanizması, nükleer rezonans saçılma olayı ile aynıdır. Nükleer rezonans saçılmadan farkı çekirdeğin de-eksitasyon sürecinde yayımladığı foton frekansının uyarıcı foton frekansına eşit olmamasıdır. Yani saçılan foton enerjisi gelen fotonun enerjisinden daha küçüktür ve fotonlar arasında enerji ilişkisinin olmadığı saçılma türüdür. Bu saçılmanın tesir kesiti çok çok küçük olduğundan inelastik saçılmaya katkısı ihmal edilebilecek kadar küçüktür (Erzeneoğlu, 1990).

Raman saçılması.

İnkoherent saçılmanın madde içerisindeki moleküllerden yapıldığı saçılma türüdür. Bu saçılma mekanizması, uyarıcı fotonun madde molekülleri ile etkileşimi gerçekleştiğinde uyarılan molekülün temel seviye düzeyine dönmesi esnasında ışıma yapması temeline dayanır. Eğer uyarılan molekül başlangıçta temel halde iken uyarılmış ise; (I) molekülün de-eksitasyon sürecinde geçiş temel enerji düzeyine değil de uyarılmış titreşim veya dönme enerji düzeyine gerçekleşirse saçılan fotonun enerjisi gelen fotonun enerjisinden küçük olur, (II) molekülün de-eksitasyon sürecinde geçiş temel enerji düzeyine olursa saçılan fotonun enerjisi gelen fotonun enerjisine eşit olur. Eğer uyarılan molekül başlangıçta temel halde değil de uyarılmış titreşim veya dönme enerji seviyesinde ise; (I) molekülün de-eksitasyon sürecinde geçiş temel enerji düzeyine değil de aynı uyarılmış titreşim veya dönme enerji düzeyine gerçekleşirse saçılan fotonun enerjisi gelen fotonun enerjisine eşit olur, (II) molekülün de-eksitasyon sürecinde geçiş temel enerji düzeyine gerçekleşirse saçılan fotonun enerjisi gelen fotonun enerjisinden büyük olur. Bu tür saçılmalar genellikle düşük atom numaralı element atomlarının molekül yapılarında daha fazla ihtimaliyette gerçekleşir (Tipler, 1978).

X- ve γ -ışınlarının fotonükleer soğurulması.

Çok yüksek foton enerjilerinde (genellikle yüksek enerjili γ -ışınları) atom çekirdeklerinin radyasyonu soğurduğu ve akabinde bir atom altı parçacık yayarak bozunduğu süreçlerdir. Bu süreçler genellikle nükleer fotobozunma (fotodisintegrasyon) ve mezon üretim olmak üzere iki türde gerçekleşir. Bu tür etkileşimler, radyasyon zırh tasarımları ve radyasyondan korunma uygulamalarında dikkate alınmalıdır.

Nükleer fotobozunma (Fotodisintegrasyon).

Fotodisintegrasyon (fototransmutasyon veya fotonükleer reaksiyon olarak da adlandırılır), bir atom çekirdeğinin yüksek enerjili bir gama ışını emdiği, uyarılmış bir duruma girdiği ve hemen bir atom altı parçacık yayarak bozunduğu bir nükleer süreçtir. Gelen gama ışını, bir veya daha fazla nötronu, protonu veya bir alfa parçacığını çekirdekten etkin bir şekilde atar. Reaksiyonlar (γ, n) , (γ, p) ve (γ, α) olarak adlandırılır. Fotodisintegrasyon, demirden daha hafif atom çekirdekleri için endotermik (enerji soğurma) ve demirden daha ağır atom çekirdekleri için bazen ekzotermik (enerji salma) şeklinde gerçekleşebilir. Bu etkileşimin gerçekleştiği enerji aralığı; $30\text{MeV} \geq E_{\text{foton}} \geq 8\text{MeV}$ şeklindedir. Bu enerji aralığında fotodisintegrasyon tesir kesitleri oldukça büyüktür ve zırhlama tasarımlarında dikkate alınmalıdır. Bu enerji bölgesinde, madde içerisinde büyük nötron alanları oluşur ve çok sayıda herhangi bir etkileşime girmemiş foton bu nötronlar ile etkileşebilirler. Belirtilen enerji bölgesinin dışında kalan ve daha düşük enerjilerde gerçekleşen iki önemli belirgin fotodisintegrasyon etkileşimi mevcuttur. Bunlardan biri 1,66 MeV'de gerçekleşen ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$ etkileşimi ve diğeri 2,225 MeV'de gerçekleşen ${}^2\text{H}(\gamma, n)$ etkileşimleridir (Martin, 2013).

Mezon üretimi.

Bu etkileşim mekanizması; uyarıcı fotonların atom çekirdeği etrafındaki mezon alanı ile etkileşerek mezon üretimi gerçekleşmesi temeline dayanır. Malzeme ile etkileşen foton enerjisi 150 MeV ve üzerinde bir enerjiye sahip ise mezon üretimi, gelen fotonlar ya doğrudan malzeme atomlarının nükleonlarıyla etkileşerek ya da atomlar arası ortamda nükleonik rezonansların uyarılması durumunda mezon üretimi gerçekleşir. Ayrıca mezon üretimi, yüksek enerjili fotonların çarpışması sonucu yok olma radyasyonu sonucu meydana gelebilir. Bundan dolayı eğer zırhlama hesabında kullanılan foton enerjisi 150 MeV veya daha büyük ise mezon üretimi de zırhlama hesabında dikkate alınmalıdır (Martin, 2013).

Foton-Madde Etkileşim Parametreleri

Radyasyonun hangi türü olursa olsun madde ile etkileştiğinde, fotonlar ya soğurulur ya saçılır ya da etkilenmeden direk maddeden geçiş yapar (transmisyon), parçacıklar ise ya enerjilerini bir miktar kaybederek maddeden çıkar ya da tamamen enerjilerini kaybederek durdurulurlar. Bu sebeple herhangi bir radyasyon tipinin madde tarafından zırhlanması demek, o radyasyon ile madde atomları arasında çeşitli etkileşimlerin meydana gelmesi demektir. Bu sebeple, bir radyasyonun madde tarafından zırhlanma olasılığını artırmak için o radyasyon tipi ile madde atomları arasında radyasyon etkileşim ihtimalinin artırılması gerektiği düşünülmeli ve malzeme seçimi ve tasarımı radyasyon tipine göre gerçekleştirilmelidir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, foton radyasyonu zırlama hesaplamalarında kullanılan ve malzemelerin radyasyon zırlama performansları hakkında detaylı bilgi sunan foton-madde etkileşim parametreleri (foton zırlama parametreleri) gruplar halinde etkileşim çeşidine göre Tablo 4 ve Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 4’de verilen parametreler soğurucu malzemelerin foton soğurma kabiliyetleri hakkında bilgi verirken, Tablo 5’de ki parametreler ise malzemelerin foton saçma kabiliyetleri hakkında bilgi verir.

Tablo 4. *Foton Soğurma İçin Gerekli Olan Foton-Madde Etkileşim Parametreleri (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020)*

Sembol	Kodlama	Adı	Birimi
μ	LAC	Lineer azaltma katsayısı (<i>Linear attenuation coefficient</i>)	cm ⁻¹
μ_m	MAC	Kütle azaltma katsayısı (<i>Mass attenuation coefficient</i>)	cm ² /g
λ	MFP	Ortalama serbest yol (<i>Mean free path</i>)	cm
$X_{1/2}$	HVL	Yarı-değer kalınlığı (<i>Half-value layer</i>)	cm
$X_{1/4}$	QVL	Dörttebir-değer kalınlığı (<i>Quarter-value layer</i>)	cm
$X_{1/10}$	TVL	Ondabir-değer kalınlığı (<i>Tenth-value layer</i>)	cm
σ_T	ACS	Atomik tesir kesiti (<i>Atomic cross-section</i>)	barns/atom (cm ² /atom)
σ_C	ECS	Elektronik tesir kesiti (<i>Electronic cross-section</i>)	barns/elektron (cm ² /elektron)
Z_{eff}	Z_{eff}	Etkin atom numarası (<i>Effective atomic number</i>)	Birimsiz
N_{eff}	N_{eff}	Etkin elektron yoğunluğu (<i>Effective electron density</i>)	elektron/g
σ_{eff}	σ_{eff}	Etkin iletkenlik (<i>Effective conductivity</i>)	S/m

Tablo 5. *Malzemeden Saçılan Fotonlar İçin Gerekli Olan ve Malzemenin Foton Saçma Durumu Hakkında Bilgi Veren Saçılma Parametreleri (Alım, Şakar, Han, vd., 2020)*

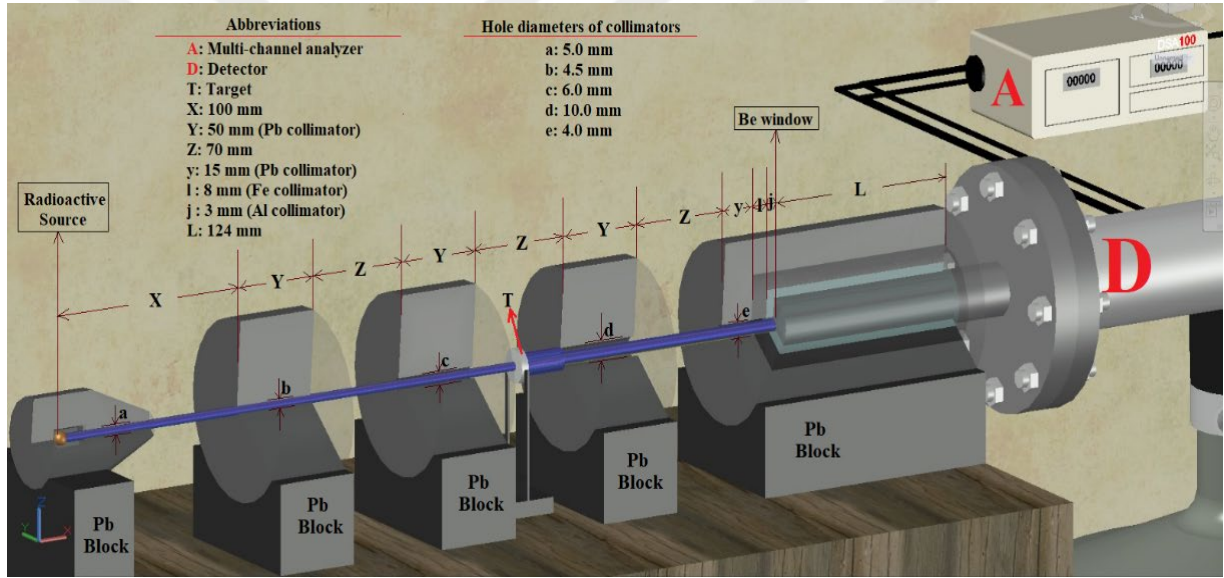
Parametre	Adı	Birimi
G-P interpolasyon katsayıları (a, b, c, d ve X_k)	Geometrik dizi interpolasyon katsayıları (<i>Geometric-Progression interpolation coefficient</i>)	Birimsiz
$R_{inc/total}$	İnkoherent saçılma katsayısı/Toplam azaltma oranı (<i>Incoherent scattering/total attenuation ratio</i>)	Birimsiz
Z_{eq}	Eşdeğer atom numarası (<i>Equivalent atomic number</i>)	Birimsiz
EBF (β)	Maruz kalma build-up (foton kuvvetlendirme) faktörü (<i>Exposure build-up factor</i>)	Birimsiz
EABF (β)	Enerji soğurma build-up (foton kuvvetlendirme) faktörü (<i>Energy absorption build-up factor</i>)	Birimsiz

Foton-madde etkileşim parametrelerin deneysel tayini için gerekli geometrik koşullar.

Yukarıda da izah ettiğimiz gibi, foton-madde etkileşimlerinde uyarıcı (birincil) fotonların bir kısmı malzeme tarafından emilir, bir kısmı etkileşime girmeden iletir ve bir kısmı da uyarıcı fotonun geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuda saçılır. Bu olaylar neticesinde, malzemenin radyasyon zırlama kapasitesini yüksek doğruluk derecesinde belirlemek oldukça önemli bir durumdur. Malzemenin kimyasal kompozisyonu ve yoğunluğu bilindiği takdirde malzemenin foton etkileşim parametrelerini teorik olarak belirlemek oldukça kolaydır. Hatta günümüz şartlarında bu hesaplamaları teorik olarak yapan birçok yazılım programı geliştirilmiş ve araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (“Materyal ve Yöntem” bölümündeki “Foton-madde etkileşim parametrelerinin teorik tayini” başlığına bakınız). Asıl önemli olan durum gerçek deneysel koşullarda üretilen malzemenin nasıl bir radyasyon zırlama performansı sergilediğini belirlemektir. Bunun için de doğru ölçüm sonuçları verecek deneysel geometri koşullarını oluşturmak gereklidir.

Deneysel koşullarda, bir foton demetinin koruyucu bir malzeme tarafından zayıflatılması, iki farklı deneysel geometri (ideal geometri veya zayıf geometri) için tanımlanmalıdır. Çünkü soğurucu malzeme için elde edilen deneysel sonuçlar, deneysel geometrinin koşulları düzgün oluşturulmadığında hatalı olabilir. Eğer, malzemenin foton zırlama kabiliyeti, tüm foton-madde etkileşim mekanizmaları kapsamında değerlendirilecek ise kurulması gereken geometri ideal geometridir (dar-ışın geçiş geometrisidir). İdeal geometri, her bir fotonun sadece malzeme tarafından soğurulduğu ve/veya birincil ışıktan saçıldığı durum için geçerlidir. Bu geometride, malzemedan ve/veya çevreden saçılan fotonlar dedektör tarafından algılanmazken, sadece soğurucu malzeme ile herhangi bir etkileşime girmeden

malzemeyi terk eden fotonlar (*unattenuated*) dedektöre ulaşır ve dedektör tarafından sayılır. Dedektöre ulaşan fotonların enerjileri, madde ile etkileşmedikleri için başlangıç enerjilerine eşittir. Yani, uyarıcı foton frekansı ile dedektörün saydığı foton frekansı aynı olup monokromatiktir. Ayrıca bu geometride birincil fotonlar kolimatörler vasıtasıyla dar bir doğrultuya hapsedilir ve dedektörün algılama alanı (aktif pencere alanı) çok küçük yapılır. Bu nedenle bu geometriye dar-ışın geçiş geometrisi (*narrow-beam transmission geometry*) de denir. Sonuç olarak, bu geometride, soğurucu malzemenin varlığında etkileşimler ile akı yoğunluğu azaltılmış fotonlar (*attenuated photons*) veya yokluğunda doğrudan kaynaktan gelen birincil fotonların akı yoğunluğu (*unattenuated photons*) dedektör tarafından sayılır. Bu sayımlar eş zamanlı yapılamaz. Bu sayımların ölçümü, aynı çevresel koşullar altında soğurucu varken ve yokken ayrı zamanlarda gerçekleştirilir. Anlatılan bu geometrik koşulları sağlayan örnek bir ideal geometri (dar-ışın geçiş geometrisi) Şekil 12’de verilmiştir.

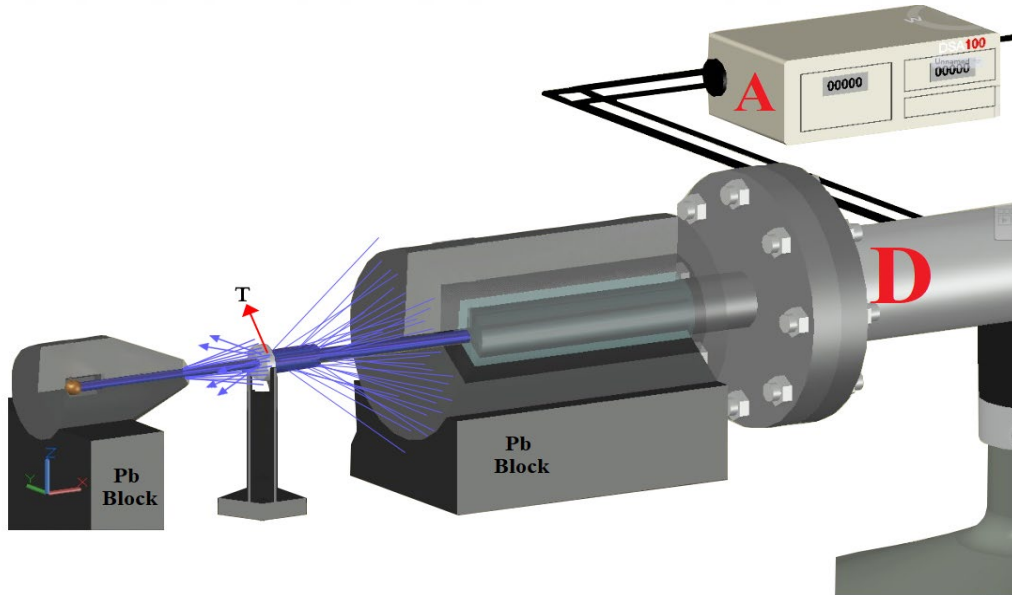


Şekil 12. Örnek bir ideal geometri (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020).

Eğer böyle bir ideal geometri kurulmadan farklı geometrik koşullarda ölçümler gerçekleştirilirse; direk radyoaktif kaynaktan, çevreden ve malzemeden saçılarak gelen fotonlarda dedektör tarafından sayılacağından dolayı ölçülen birincil foton akısı (I_0) ve malzemeden etkilenmeden geçen foton akısı (I) değerleri gerçek değeri yansıtmayacak ve kuvvetli ihtimalle saçılmış foton sayılarını da içerecektir. Bu sebeple, bu değerler kullanılarak Beer-Lambert yasası ($I(x) = I_0 e^{-\mu x}$) ile yapılan hesaplama sonuçları hatalı olacaktır. Bu hatalı deneysel sonuçlar, teorik sonuçlar ile karşılaştırıldığında muazzam ölçüde sapmalar gözlemlenecektir. Bu durum ise malzemenin gerçek koşullarda radyasyon zırhlama performansının doğruluğunu olumsuz etkileyecektir. Bunlara ek olarak, doğru ideal geometri kurulumu gerçekleştirilse bile en doğru sonuçlara ulaşmak için tüm ölçümler aynı çevresel koşullar altında en az üçer kez tekrarlanmalı ve ölçülen foton akı yoğunluklarının ortalamaları

kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmelidir.

Zayıf geometri denilen geometrik koşullarda ise, geniş bir foton demeti soğurucu bir malzeme üzerine gönderilir ve dedektör vasıtasıyla sayımlar yapılır. Bu geometride, radyoaktif kaynağın kolimasyonu dışında herhangi bir kolimasyon işlemi olmadığından (kolimatör kullanılmadığından) dolayı malzemeden etkileşim yapmadan geçen foton akısına ek olarak doğrudan radyoaktif kaynaktan, çevreden ve malzemeden saçılarak gelen foton akıları da dedektöre ulaşır ve sayılır. Bu geometride, malzeme-dedektör arası mesafe ve radyoaktif kaynak-soğurucu malzeme arası mesafe küçük yapılırsa, sayma işleminde dedektörün ölü zamanı artar ve sayım işleminde ekstra bir hata oluşur. Bundan dolayı mesafelere de dikkat etmek son derece önemlidir. Ayrıca, böyle bir geometride, saçılan fotonlar dedektöre ulaştığı için enerji spektrumu oldukça karmaşıktır. Çünkü, spektrumda birincil foton enerjisi ile eş enerjili olan zayıflatılmamış fotonlara ek olarak farklı enerjili olan çoklu saçılmış fotonlar da mevcuttur. Ayrıca, spektrumda, dedektör tarafından sayılan fotonlardan enerjisi eşit ve/veya yakın olanların üst üste binerek birbirlerini kuvvetlendirdiği durumlarda mevcut olabilir. Bu nedenle, bu tür geniş-ışın geometrisi (*broad-beam geometry*) koşulları altında bir soğurucu malzemede veya bir detektörde depolanan enerji miktarını analitik ve ampirik olarak belirlemek zor ve zaman alıcıdır. Anlatılan bu geometrik koşulları sağlayan örnek bir zayıf geometri (geniş-ışın geçiş geometrisi) Şekil 13’de verilmiştir.

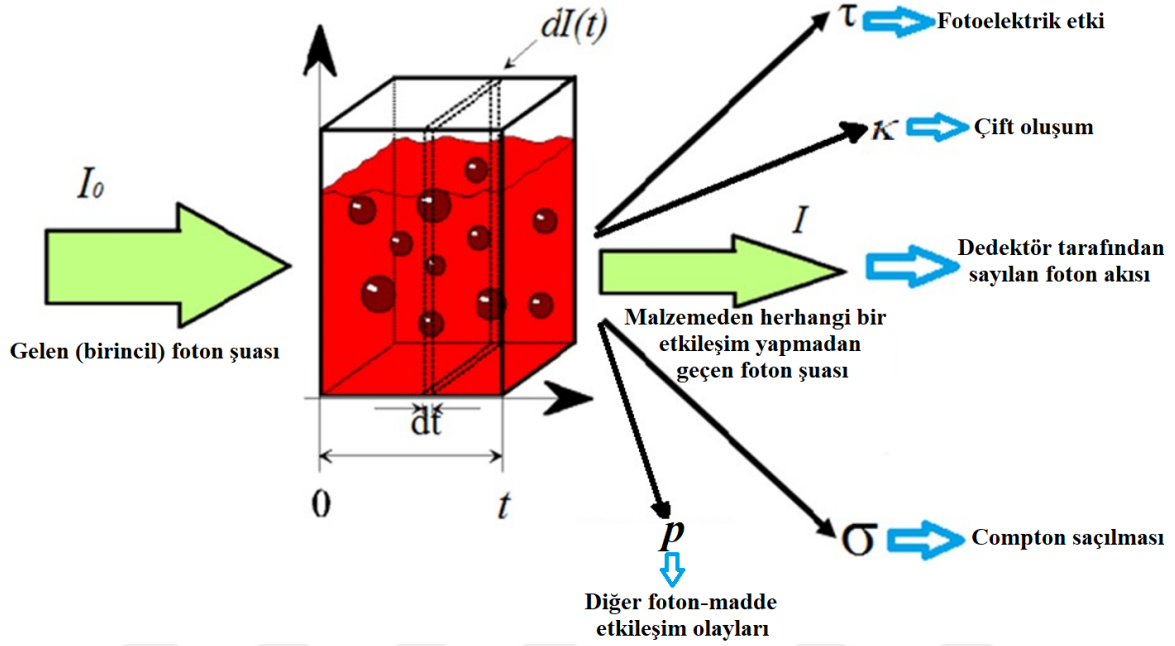


Şekil 13. Örnek bir zayıf geometri.

Foton-madde etkileşim parametrelerinin hesaplama teorisi

Bir foton şuasının herhangi bir malzemenin birim kalınlığı ile etkileşme durumunda meydana gelen temel olayların ve buna bağlı olarak foton akı şiddetinde meydana gelen azalmanın şematik gösterimi Şekil 14’de verilmiştir. Bu şekilde, gelen foton şuası akısının

azaldığı ve bu azalmanın sebebinin yukarıda “Foton-madde etkileşim türleri” başlığı altında izah edilen olaylardan kaynaklandığı sembolik olarak gösterilmektedir. Bu gösterimde, I_0 ; soğurucu üzerine gelen (birincil) foton akı şiddetini, I ; malzemeden herhangi bir etkileşim yapmadan geçen ve dedektör tarafından sayılan foton akı şiddetini, τ ; fotoelektrik tesir kesitini, σ ; Compton saçılması tesir kesitini, κ ; çift oluşum tesir kesitini ve p ; diğer foton-madde etkileşim olaylarının toplam tesir kesitlerini ifade etmektedir.



Şekil 14. Bir foton şuasının t kalınlığındaki malzemeden geçişinin şematik gösterimi.

Doğrusal (linear) azaltma katsayısı (LAC).

Bir ideal geometride (Şekil 12'de gösterildiği gibi) aynı frekanslı fotonların akı şiddetindeki değişim, malzeme kalınlığının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemle verilir;

$$-\frac{dI}{dt} = \mu I \quad (6)$$

burada μ , aynı enerjiye sahip fotonlar (aynı frekanslı) için malzemenin toplam lineer azaltma katsayısıdır. Fotonların tümü tek enerjili bir demet oluşturuyorsa ve fotonlar dar-ışın geçiş geometrisi koşullarında inceleniyorsa, t kalınlığındaki malzeme ile etkileşmeden dedektöre ulaşan fotonların sayısı ($I(t)$) aşağıdaki denklemle (Beer-Lambert kanunu) verilir;

$$I(t) = I_0(e^{-\tau t})(e^{-\sigma t})(e^{-\kappa t})(e^{-pt}) = I_0 e^{-(\tau+\sigma+\kappa+p)t} = I_0 e^{-\mu t} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{t} \quad (8)$$

burada $I(t)$; zayıflatılmış mono-enerjili fotonların sayısıdır, I_0 ; zayıflatılmamış mono-enerjili

fotonların sayısıdır, τ ; Fotoelektrik olay meydana gelme tesir kesiti, σ ; Compton saçılması olayı tesir kesiti, κ ; çift oluşum olayı tesir kesiti, p ; diğer foton–madde etkileşim olaylarının toplam tesir kesiti ve μ ; (LAC, cm^{-1}), bir radyasyon zırh malzemesinde birim kalınlık başına toplam etkileşim olasılığıdır. LAC, birim zamanda radyoaktif atomların bozunma olasılığı olarak tanımlanan radyoaktif bozunma sabiti (λ) ile eş anlamlıdır (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020). Herhangi bir zırh malzemesinin herhangi bir foton enerjisindeki LAC değeri ne kadar yüksek ise o malzemenin ilgilenilen foton enerjisinde radyasyon zırhlama performansı o kadar yüksektir. Ancak malzemenin kalınlığı ile doğrudan ilişkili olan LAC değeri malzemenin birim hücresinin radyasyon zırhlama performansı hakkında tam manasıyla bilgi veremez. Sadece aynı kalınlıktaki malzemelerin zırhlama performanslarının birbirlerine göre değerlendirilmesinde rol oynar. Bu sebeple herhangi bir malzemenin birim hücresinin zırhlama performansı hakkında kayda değer bir bilgi elde edebilmek için kütle azaltma katsayısının (MAC) bilinmesi gereklidir.

Kütle azaltma katsayısı (MAC).

Kütle azaltma katsayısı (MAC), bir radyasyon zırh malzemesinde birim kütle başına radyasyon-madde etkileşim olasılığı hakkında bilgi verir ve böylece malzemenin birim hücresinin radyasyon zırhlama performansının değerlendirilmesine olanak sunar. MAC değeri, LAC değerinin malzemenin yoğunluğuna oranlanması ile hesaplanır. MAC (μ_m ; cm^2/g), malzemelerin zırhlama performanslarını değerlendirmek için en kullanışlı zırhlama parametresidir. Bu sebeple MAC değerleri, radyasyon zırh malzemelerini tasarlamak ve seçmek için LAC değerlerinden daha anlamlıdır. Saçılma etkileşimleri de dahil olmak üzere tüm etkileşim türleri hakkında bilgi veren MAC değerleri, belirli soğurucu ortama ve foton enerjisine bağlıdır. Farklı foton enerjileri ve malzemeleri için MAC değerleri, foton iletim (Şekil 12’deki geometri) deneyleri gerçekleştirilerek ölçülür. Deney gerçekleştirildikten sonra MAC değerleri aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{\ln(I_0/I)}{\rho t} = \frac{\ln(I_0/I)}{t_m} \quad (9)$$

burada I_0 ve I ; sırasıyla birincil foton akı şiddeti ve malzemedan etkilenmeden geçen foton akı şiddeti, ρ (g/cm^3); hedef malzemenin yoğunluğu, t (cm); hedef malzemenin kalınlığı, $t_m = m / A$ (g/cm^2); birim alan başına düşen kütle miktarı olup hedef malzemenin kütle kalınlığıdır. Bu ifade de verilen m (g); hedef malzemenin kütlesi ve A (cm^2); hedef malzemenin

yüzey alanıdır.

Teorik olarak MAC (μ/ρ) değerleri, yapısında iki veya daha fazla atom türü içeren herhangi bir kompozit malzeme için karışım kuralı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\mu_m = (\mu/\rho) = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (10)$$

burada w_i ve $(\mu/\rho)_i$; sırasıyla hedef malzemenin i 'nci bileşen elementinin ağırlık kesri (ağırlık %'si) ve kütle zayıflatma katsayısıdır. Bu denklemdeki w_i ; aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir,

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_i a_i A_i}$$

burada a_i ve A_i ; sırasıyla hedef malzemenin i 'inci bileşen elementinin atom sayısı ve atom ağırlığıdır (veya atom kütlesi).

LAC, MFP, HVL, QVL, TVL, Z_{eff} ve N_{eff} gibi diğer radyasyon zırhlama parametreleri doğrudan MAC değerleri ile ilişkilidir (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020). Herhangi bir malzemenin ilgilenilen foton enerjisinde elde edilen MAC değeri ne kadar yüksek ise malzemenin ilgili enerji değerinde foton zırhlama performansı o kadar yüksektir.

Ortalama serbest yol (MFP).

Birimi cm olan MFP, hedef malzeme içerisinde ilerleyen mono-enerjik bir fotonun ardışık iki etkileşimi arasında aldığı ortalama mesafedir. Relaksasyon uzunluğu (λ) olarak da adlandırılır ve aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$MFP = \lambda = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\mu t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt} = \frac{1}{\mu} \quad (11)$$

Görüldüğü üzere bu değer, LAC değerinin matematiksel tersidir (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020). Bu sebeple herhangi bir malzemenin ilgilenilen foton enerjisinde MFP değeri ne kadar küçük ise bu enerji değerinde malzemenin zırhlama performansı o kadar iyidir denilebilir.

Yarı-değer, dörttebir-değer ve ondabir-değer kalınlıkları (HVL, QVL ve TVL).

Birimi cm olan HVL, QVL ve TVL; malzeme üzerine uyarıcı olarak gelen mono-enerjik fotonların başlangıç yoğunluğunu sırasıyla yarıya, dörtte birine ve onda birine düşürmek için

gerekli malzeme kalınlığı olarak tanımlanırlar.

Yarı değer kalınlığı olarak da adlandırılan HVL, fotonların yarı kalınlıkta ($X_{1/2}$) üstel zayıflamasını gösteren yararlı bir radyasyon zırlama parametresidir. Aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$\frac{I(t)}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu X_{1/2}} \quad (12)$$

Eşitlik 12’de $X_{1/2}$ (cm) yalnız bırakılırsa HVL değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$X_{1/2} = HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (13)$$

burada μ ; hedef malzemenin ilgilenilen foton enerjisindeki LAC değeridir.

Benzer şekilde, dörttebir-değer kalınlığı (QVL veya $X_{1/4}$; cm) ve ondabir-değer kalınlığı (TVL veya $X_{1/10}$; cm) aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilebilir (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020);

$$X_{1/4} = QVL = \frac{\ln(4)}{\mu} \quad (14)$$

$$X_{1/10} = TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (15)$$

Bir malzemenin nükleer uygulamalarda zırlı malzemesi olarak kullanılabilmesi için MAC ve LAC değerlerinin büyük olmasının yanı sıra HVL, QVL ve TVL değerlerinin de oldukça küçük olması beklenir. Bu değerlerin küçük olması belli bir foton akısını zayıflatmak için gerekli malzeme kalınlığının küçük olması anlamına gelir ki bu durum zırlama maliyetini düşüreceğinden oldukça önemlidir.

Toplam atomik ve elektronik tesir kesitleri (ACS ve ECS).

Barns/atom veya cm^2/atom birimindeki toplam atomik tesir kesiti (ACS), birincil uyarıcı fotonlar ve hedef malzemenin atomları arasındaki etkileşim olasılığını gösteren bir parametredir. Bu parametre, birincil foton enerjisine, hedef malzemenin atomik çeşitliliğine ve hedef malzemenin birim hacmindeki atomların sayısına bağlıdır. σ_T ile sembolize edilen ACS, aşağıdaki denklem kullanılarak MAC değerleri yardımıyla elde edilebilir;

$$\sigma_T = \frac{\sum_i f_i A_i}{N_A} \mu_m = \frac{A_m}{N_A} \mu_m \quad (16)$$

burada N_A ; Avogadro sayısı, $\sum_i f_i A_i = A_m$; hedef malzemenin toplam atom kütlesi, A_i ; malzemedeki i 'inci elementin atom kütlesi, μ_m ; ilgilenilen foton enerjisindeki hedef malzemenin MAC değeri ve f_i ; hedef malzemedeki i 'nci elementin atomik (veya mol) kesridir. Bu ifadede atomik kesirlerin toplamı 1 olmak zorundadır ($f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_i = 1$). Eğer hedef malzemedeki element atomlarının ağırlık kesirlerinin toplamı 1 ($w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_i = 1$) ise f_i aşağıdaki formülle verilir;

$$f_i = \frac{w_i}{A_i \sum_i \frac{w_i}{A_i}} \quad (17)$$

Barns/elektron veya $\text{cm}^2/\text{elektron}$ birimindeki toplam elektronik tesir kesiti (ECS), birincil uyarıcı fotonlar ile hedef malzemenin elektronları arasındaki etkileşim olasılığını gösteren bir parametredir. σ_e ile sembolize edilen ECS, ilgilenilen foton enerjisindeki hedef malzemenin ACS değeri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, ACS gibi ECS değerleri de birincil foton enerjisine, hedef malzemenin atomik çeşitliliğine ve hedef malzemenin birim hacmindeki elektron sayısına doğrudan bağlıdır. ECS aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{N_A} \right) \sum_i \left(\frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \right) = \frac{\sigma_r}{Z_{eff}} \quad (18)$$

burada Z_i ve $(\mu_m)_i$; sırasıyla hedef malzemedeki i 'inci elementin atom numarası ve ilgili enerjideki MAC değeridir. Eşitlik 18'den görüldüğü gibi, ilgilenilen foton enerjisindeki hedef malzemenin ECS değeri, o malzemenin o enerjideki ACS değerinin Z_{eff} değerine (etkin atom numarası) oranıdır (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020).

Herhangi bir malzemenin herhangi bir foton enerjisinde zırhlama performansının yüksek olması isteniyor ise bu malzemenin ilgilenilen enerjideki ACS ve ECS değerlerinin yüksek olması beklenir.

Etkin atom ve etkin elektron sayıları (Z_{eff} ve N_{eff}).

Tıpkı saf bir element atomu gibi, belirli bir foton enerjisinde birden fazla atom türü içeren bir soğurucu malzemeyi simgeleyen ve karakterize eden eşsiz bir atom ve elektron sayısına ihtiyaç vardır. Bu sayılar, soğurucu malzemenin gelen foton enerjisi karşısında hangi atoma benzer karakteristik özellik sergilediği hakkında bilgi veren niceliklerdir. Farklı tür atomlardan oluşmuş malzemeyi karakterize eden bu eşsiz niceliklere etkin atom numarası ve

etkin elektron sayısı (veya etkin elektron yoğunluğu) adı verilir. Bu sayılar, malzemeleri bir dizi malzeme sınıfı arasında belli gruplar arasına dahil eder ve aynı grupta yer alan malzemeler foton zırlama performansı açısından benzer karakteristikler gösterirler. Ancak, bu sayılar pür element atomlarında olduğu gibi tek bir sayı ile nicel olarak ifade edilemezler. Bu sayılar, ACS ve ECS değerleriyle doğrudan ilişkili olduğundan, birincil uyarıcı foton enerjisine, malzemenin yapısındaki atom türü çeşitliliğine ve bu atom türlerinin bileşim oranlarına bağlıdır. Ayrıca, etkin atom numarası, inkohherent saçılma türü olan Compton saçılması etkileşim sürecinden oldukça etkilenir. Z_{eff} ile sembolize edilen etkin atom numarası birimsiz olup farklı atomik çeşitliliğe sahip soğurucu malzemeler için aşağıdaki formülle verilir;

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_T}{\sigma_e} \quad (19)$$

Elektron/g birimine sahip etkin elektron sayısı ise soğurucu malzemenin birim kütlesi başına elektron sayısı olarak tanımlanabilir. N_{eff} ile sembolize edilen etkin elektron sayısı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$N_{eff} = \frac{N_A}{\sum_i f_i A_i} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{N_A}{A_m} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad (20)$$

burada $\sum_i n_i$, malzemenin sahip olduğu toplam atom sayısıdır (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020).

Herhangi bir malzemenin belirli bir foton enerjisinde zırlama performansı hakkında kayda değer bir yorum yapabilmek için MAC değeri ile birlikte Z_{eff} değerinin de dikkate alınması gerekir. Bir malzemenin belirli bir foton enerjisinde Z_{eff} değeri ne kadar büyük ise o malzemenin o enerjideki foton zırlama performansı o kadar yüksektir denilebilir. Ancak N_{eff} değeri bir malzemenin zırlama performansı hakkında bilgi veremez. Çünkü, bu değer A_m değeri ile ters orantılıdır. $\sum_i f_i A_i = A_m$ ifadesine göre, bir malzemenin yapısındaki atomik kütlesi büyük olan elementlerin mol kesri ne kadar fazla ise o malzemenin toplam atom kütlesi (A_m) o kadar büyük olur. Bu durumda, böyle bir malzemenin, toplam foton-madde etkileşim tesir kesiti yüksek olacağından iyi derece radyasyon soğurucu malzeme olması beklenir. Zira matematiksel eşitliklere göre MAC ve Z_{eff} değerleri de büyük olacağından böyle bir beklenti duyulması normaldir. Fakat, N_{eff} değerleri A_m ile ters orantılı olduğundan böyle bir malzemede MAC ve Z_{eff} değerlerinin aksine N_{eff} değerleri daha küçük olacaktır. Dolayısıyla, aynı foton

enerjisinde malzemelerin N_{eff} değerlerinin büyüklüğüne göre foton zırhlama performansları karşılaştırılmaz (Alım, 2020). N_{eff} değerleri sadece gelen uyarıcı fotonların malzemenin birim kütlesi başına kaç elektronla etkileşebileceği hususunda ön tahmin sunar.

Etkin iletkenlik (σ_{eff}).

Fotonlar (γ -ışınları veya X-ışınları gibi), fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu gibi baskın etkileşim süreçleri yoluyla malzeme ile etkileşime girdiğinde, malzemedeki serbest elektronların sayısı değişir. Bu değişiklik, koparılan veya saçılan elektronların sayısındaki değişikliklerden dolayı N_{eff} değerlerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, etkin iletkenlik olarak adlandırılan elektriksel iletkenlik, malzemenin N_{eff} değeri ile doğru orantılıdır. σ_{eff} ile sembolize edilen etkin iletkenlik aşağıdaki denklem ile verilmektedir;

$$\sigma_{eff} = \left(\frac{N_{eff} \rho e^2 \tau}{m_e} \right) 10^3 \quad (21)$$

burada ρ (g/cm³); kompozitin yoğunluğu, N_{eff} (elektron/kg); kompozitin etkin elektron yoğunluğu, e (Coulomb) ve m_e (kg); sırasıyla elektronun yükü ve kütlesidir. Saniye birimiyle τ (s); elektronun Fermi yüzeyindeki ortalama yaşam süresi veya relaksasyon süresidir ve aşağıdaki formülle tanımlanır.

$$\tau = \frac{\hbar}{k_B T} = \frac{h}{2\pi k_B T} \quad (22)$$

burada h (J.s), k_B (J / K) ve T (K); sırasıyla Planck sabiti, Boltzmann sabiti ve ortam sıcaklığıdır (Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020).

Etkin elektron yoğunluğunda olduğu gibi herhangi bir foton enerjisinde herhangi bir malzeme için elde edilen etkin iletkenlik değeri malzemenin zırhlama performansı hakkında bilgi vermeyip sadece uyarıcı fotonlar etkisiyle malzemedeki oluşan serbest elektron sayısı hakkında bilgi sunmaktadır. Bu iki parametre (N_{eff} ve σ_{eff}) her ne kadar malzemenin zırhlama performansı hakkında bilgi vermese de foton-madde etkileşim sürecinde etkin rol oynayan birim kütle başındaki elektron sayısı ve etkin iletkenlik hakkında bilgi sunduğu için zırhlama hesaplamalarında dikkate alınır.

Malzemedeki saçılan fotonlar için gerekli olan ve malzemenin foton saçma durumu hakkında bilgi veren saçılma parametreleri.

“Foton-madde etkileşim parametrelerinin deneysel tayini için gerekli geometrik koşullar”

başlığı altında anlattığımız sebeplerden dolayı eğer ölçümlerde ideal geometri koşulları oluşturulamaz ise elde edilen sayımların (I ve I_0) Beer-Lambert yasasında ($I(t) = I_0 e^{-\mu t}$) yerine yazılarak yapılan hesaplama sonucu bulunan μ (LAC) değerleri hatalı olacağından, bu μ değerleri kullanılarak hesaplanan tüm parametreler de gerçek değerleri yansıtmayacaktır. Buna bağlı olarak, incelenen malzemenin foton-zırlama performansı doğru bir şekilde deneysel olarak belirlenemeyecektir. Çünkü, Beer-Lambert yasası yalnızca ideal geometri ve tek frekanslı foton ışını için geçerlidir. Yani bu yasa, ince bir soğurucu malzemeden etkilenmeden geçen ve dedektöre ulaşan mono-frekanslı fotonlar için ancak kullanılabilir. Ayrıca, ideal geometri koşullarında I akı yoğunluğu kesinlikle I_0 akı yoğunluğundan küçüktür. Eğer deneysel şartlar ideal geometri koşullarını karşılamıyorsa, yani koşullar zayıf geometri koşulları gibi ise, ölçüm sonuçlarında tek frekanslı fotonlarda bile I akı yoğunluğu, gerçek olması değerden farklı olarak I_0 akı yoğunluğundan çok az küçük, eşit ve hatta büyük olarak ölçülebilir. Bu durumda, hesaplama sonuçları olması gereken değerden oldukça sapma gösterebilir. Aslında bu sapma I akı yoğunluğunun kuvvetlenmesine sebep olan saçılmış foton akılarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Yani, eğer malzemeden etkilenmeden geçen fotonlara ek olarak yine malzemeden saçılan fotonların etkisi araştırılıyor ise zayıf geometri koşulları gibi bir deneysel geometri kurulması gerekir. Ancak bu geometride doğrudan kaynaktan ve çevreden saçılarak gelen fotonların dedektöre ulaşmaması ve spektruma etki etmemesi için gerekli önlemler (kolimasyon işlemi) alınmalıdır. Bu önlem alındığında, dedektör malzemeden etkilenmeden geçen I foton akısına ilaveten malzemeden saçılan fotonları da sayacaktır. Böylece spektruma malzemeden saçılan fotonlar da dahil olacaktır. Bu durumda spektrum analizi sonucu elde edilen I_s akı yoğunluğu, sadece numuneden etkilenmeden geçen fotonların sayısını değil aynı zamanda numuneden saçılmış fotonların sayısını da içerdiğinden Beer-Lambert yasasında bir değişiklik yapılmalıdır. Bu sebeple, $I(t) = I_0 e^{-\mu t}$ eşitliği, “foton kuvvetlendirme faktörü (build-up faktör), β ” olarak adlandırılan bir düzeltme faktörünün eklenmesiyle yeniden yazılabilir. Modifiye edilmiş denklem aşağıdaki gibi verilir.

$$I_s(t) = \beta I_0 e^{-\mu t} \quad (23)$$

$$\beta(E) = \frac{I_s(t)}{I_0 e^{-\mu t}} \quad (24)$$

Foton kuvvetlendirme faktörü (β ; *build-up factor*) lineer azaltma katsayısına (μ), soğurucu materyalin kalınlığına (t), gelen uyarıcı foton enerjisine ve soğurucu materyalin atomik özelliklerine (atom numarası, absorpsiyon ve saçılma kesitleri gibi) bağlıdır. Foton kuvvetlendirme faktörü, saçılmayan fotonlara ek olarak saçılan fotonların etki oranı veya toplam dedektör yanıtının çarpışmamış fotonlara oranı olarak tanımlanabilir. Ortalama serbest

yolun (MFP) bir fonksiyonu olarak foton kuvvetlendirme faktörü (β), maruz kalma build-up faktörü (EBF; *exposure build-up factor*) ve enerji soğurma build-up faktörü (EABF; *energy absorption build-up factor*) olarak iki türe ayrılır. EBF değerleri radyasyonun havadaki soğurulması ile alakalı iken, EABF değerleri soğurucu hedef malzemede absorbe edilen veya depolanan enerji ile ilgilidir.

Herhangi bir malzemenin (t kalınlığında) deneysel olarak foton kuvvetlendirme faktörü (β) belirlenmek isteniyorsa, ilk önce ideal geometri (dar-ışın geçiş geometrisi) koşullarında ölçümler alınıp I ve I_0 akı yoğunlukları belirlenmelidir. Daha sonra bu akı yoğunlukları $I(t) = I_0 e^{-\mu t}$ denkleminde kullanılarak malzemenin tüm foton-madde etkileşim süreçlerinin meydana gelme ihtimaliyetleri ile ilişkili olan LAC (μ) değerleri deneysel olarak belirlenir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra aynı çevresel koşullarda geniş-ışın geometrisinde (zayıf geometri) ölçümler numune varken ve yokken tekrarlanır. Elde edilen spektrumlardan I_s ve I_0 akı yoğunlukları tekrar yeni geometri koşulları için deneysel olarak belirlenir. Daha sonra, I_s ve I_0 akı yoğunluk değerleri ve ideal geometride belirlenen LAC (μ) değerleri kullanılarak Eşitlik 24 yardımıyla belirli foton enerjisindeki (E) foton kuvvetlendirme faktörü (β) belirlenir. Ancak önceden de belirtildiği gibi zayıf geometri koşullarında elde edilen spektrum çok karmaşık olduğundan analiz edilmesi zor ve zaman alıcıdır. Bu sebeple, build-up faktörlerinin deneysel olarak doğru bir şekilde belirlenmesi çok kolay değildir. Bundan dolayı araştırmacılar, bu karmaşık spektrumu tam manasıyla incelemenin zorluğundan ve uzun zaman almasından kaynaklı olarak, EBF ve EABF değerlerini teorik olarak hesaplama ve yorumlamayı daha çok tercih etmişlerdir.

Foton kuvvetlendirme faktörlerini teorik olarak hesaplamak için, literatürde rapor edilmiş birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler, Monte Carlo yöntemi (Sardari, Saudi, & Tajik, 2011), iterasyon (yineleme) yöntemi (Suteau & Chiron, 2005), değişmez gömme yöntemi (Shimizu, 2012) ve geometrik ilerlemeli fit etme (G-P interpolasyon) yöntemidir (Y. Harima, 2017; Y. Harima, Sakamoto, Tanaka, & Kawai, 2017). Build-up faktörlerinin kullanımı, uygulamaları ve hesaplanması ile ilgili detaylı bir derleme Yoshiko Harima isimli bir araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Yoshiko Harima, 1993). Bu yöntemler arasından en doğru sonuçları veren ve en yaygın bir şekilde kullanılan G-P interpolasyon metodudur. Bu metotta interpolasyon işlemi için, Amerikan Nükleer Derneği (*American Nuclear Society*) tarafından enerji santralleri ve diğer nükleer tesislerdeki yapıların radyasyondan koruma hesaplamalarında kullanılmak üzere seçilmiş mühendislik malzemeleri için sunulan build-up faktörleri veri seti kullanılmaktadır (Trubey vd., 1991).

Bu tez çalışması kapsamında build-up faktörleri G-P interpolasyon metodu ile hesaplandığı için, bu yöntemle yapılan hesaplama prosedürü aşağıdaki gibi detaylandırılmıştır.

Foton kuvvetlendirme faktörlerinin (Build-up faktör) G-P interpolasyon metodu ile hesaplanması.

Herhangi bir malzemenin foton kuvvetlendirme faktörlerinin hesaplaması için aşağıda verilen dört adım sırasıyla uygulanır.

1 Adım: İnkohherent saçılma tesir kesiti/toplam zayıflatma oranı ($R_{inc/toplam}$) hesabı;

Herhangi bir malzeme için $R_{inc/toplam}$ değeri, Compton kısmi kütle azaltma katsayısının (inkohherent saçılma tesir kesiti; $(\mu/\rho)_{Compton}$) toplam kütle azaltma katsayısına ($(\mu/\rho)_{Toplam}$) oranıdır. İncelenen zırh malzemeleri için $R_{inc/toplam}$ oranları belirli bir foton enerjisinde aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$R_{inc/toplam} = \frac{(\mu/\rho)_{Compton}}{(\mu/\rho)_{Toplam}} \quad (25)$$

2. Adım: Eşdeğer atom numarasının (Z_{eq}) hesabı;

Çeşitli element atomlarından oluşan malzemeler için, Z_{eq} değerleri, bu malzemelerin özelliklerini eşdeğer element açısından karakterize eden elementlerin atom numaralarına benzer. Z_{eq} değerleri malzemelerin foton saçma oranlarını gösteren atom numarasıdır. İncelenen hedef malzemelerin Z_{eq} değerleri, malzemenin $R_{inc/toplam}$ değerinin, bu malzemeyi oluşturan elementlerin aynı foton enerjisinde bireysel olarak sahip oldukları $R_{inc/toplam}$ oranları ile eşleşmesi ile hesaplanır. Bu eşleşme metoduna interpolasyon işlemi adı verilir ve aşağıdaki formül ile interpolasyon işlemi gerçekleştirilerek Z_{eq} değerleri hesaplanır;

$$Z_{eq} = \frac{Z_1(\log R_2 - \log R_{inc/toplam}) + Z_2(\log R_{inc/toplam} - \log R_1)}{\log R_2 - \log R_1} \quad (26)$$

burada Z_1 ve Z_2 , sırasıyla R_1 ve R_2 oranlarına karşılık gelen elementlerin atom numaralarıdır (Alım, Şakar, Han, vd., 2020). Herhangi bir malzeme için hesaplanan Z_{eq} değerleri ne kadar yüksek ise ilgilenilen foton enerjisinde o malzemenin foton saçılma tesir kesiti o kadar yüksektir anlamına gelir.

3. Adım: Geometrik ilerleme parametrelerinin belirlenmesi (G-P fit etme parametreleri);

G-P fit etme parametreleri (a , b , c , d ve X_K katsayıları) yukarıda izah edilen interpolasyon metoduna benzer bir logaritmik interpolasyon prosedürü ile hesaplanır. Bu hesaplama işlemi, Eşitlik 27 ile verilen matematiksel formül kullanılarak yapılır.

$$P = \frac{P_1(\log Z_2 - \log Z_{eq}) + P_2(\log Z_{eq} - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1} \quad (27)$$

burada P_1 ve P_2 , sırasıyla belirli bir foton enerjisinde Z_1 ve Z_2 atom numaralarına karşılık gelen G-P fit etme parametrelerinin değerleridir (Alım, Şakar, Han, vd., 2020).

4. Adım: Maruz kalma ve enerji soğurma foton kuvvetlendirme faktörlerinin (EBF ve EABF) hesabı;

Eşitlik 27 ile elde edilen G-P fit etme parametreleri yardımıyla aşağıdaki Eşitlikler kullanılarak EBF ve EABF değerleri hesaplanır.

$$B(E, X) = \begin{cases} 1 + \frac{(b-1)(K^X - 1)}{K - 1} & K \neq 1 \text{ için} \\ 1 + (b-1)X & K = 1 \text{ için} \end{cases} \quad (28)$$

burada b ; 1 MFP'deki foton kuvvetlendirme faktörüdür, E ; gelen foton enerjisidir, X (cm); fotonun hedef malzemeye nüfuz edebilme (penetrasyon) derinliğidir. Aşağıda Eşitlik 29 ile verilen $K(E, X)$ fonksiyonu ise; G-P fit etme parametrelerine bağlı foton doz kuvvetlendirme faktörünün penetrasyon derinliği ($X \leq 40$ mfp sınırında hesaplanması için gerekli ifadedir.

$$K(E, X) = c X^a + d \frac{\tanh((X/X_K) - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad \text{penetrasyon derinliği } (X) \leq 40 \text{ mfp} \quad (29)$$

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Malzeme Seçimi

Bu tez çalışmasında, bir radyasyon soğurucu malzemenin sahip olması gereken optimal özellikler dikkate alınarak üstün karakteristik özelliklere sahip olan ve birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılan Ni-tabanlı alaşım gruplarından 5 farklı özel alaşım seçilmiştir. Bu alaşımların ticari isimleri Evanohm, Alloy 825, Haynes 230, Monel K-500 ve Monel 400 dür. Bu alaşımlar, yüksek saflıkta (%99,999) ve ince levha (*foil*) formunda GoodFellow Limited şirketinden (*Cambridge Limited, England*) temin edilmiştir (Goodfellow, 2023). Alaşımlar seçilirken bazı önemli durumlar dikkate alınmıştır. Bu durumlar;

- Seçilen alaşımların bir radyasyon zırh malzemesinin sahip olması gereken optimal özelliklerin çoğunluğuna sahip olması gerekliliği,
- Foton-madde etkileşim parametrelerinin doğru olarak belirlenebilmesi için numune kalınlıklarının oldukça küçük olması durumu düşünülerek tüm numunelerin çok ince levha formlarda olması gerekliliği,
- Malzemelerin radyasyon koruma verimliliklerinin (RPE (%); *Radiation Protection Efficiency*) karşılaştırılabilmesi için tüm numunelerin eşit kalınlıkta olması gerekliliği,
- İncelenen alaşımlar arasından en uygun zırh malzemesi adayını radyasyon zırhlama performanslarına göre önerebilmek için seçilen alaşımların benzer mekanik özelliklere sahip olması gerekliliğidir.

Malzeme Özellikleri

İncelenen Ni-tabanlı alaşımların karakteristiğini gösteren bazı önemli fiziksel, kimyasal, elektriksel, termal ve mekanik özellikleri üretici şirket tarafından belirlenmiş olup teknik şartname gereği şirketten temin edilmiştir. Bu karakteristik özellikler Tablo 6’da verilmiştir.

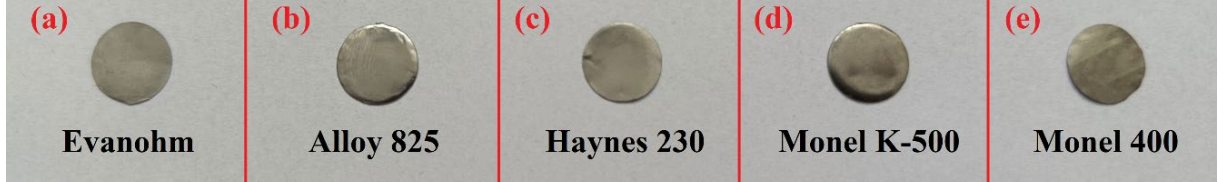
Tablo 6. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların Bazı Önemli Karakteristik Özellikleri

Özellikler	İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımlar				
	Evanohm	Alloy 825	Haynes 230	Monel K-500	Monel 400
Fiziksel Özellikler					
Yoğunluk (g.cm ⁻³)	8,1	8,14	8,97	8,4	8,84
Kalınlık (μm)	75	75	75	75	75
Kütle (mg)	80,635	81,033	89,296	83,621	88,002
Kütle kalınlığı (g.cm ⁻²)	0,061	0,061	0,067	0,063	0,066
Erime noktası (°C)	1340-1390	2500	1300-1370	2400-2460	1300-1350
Kimyasal Özellikler					
Alaşımlardaki elementlerin ağırlık kesri (w _i) (Kesirlerin toplamı 1'e eşittir)	¹³ Al:0,025	²² Ti:0,015	²⁴ Cr:0,220	¹³ Al:0,030	²⁶ Fe:0,020
	²⁴ Cr:0,200	²⁴ Cr:0,220	²⁸ Ni:0,620	²² Ti:0,005	²⁸ Ni:0,650
	²⁸ Ni:0,750	²⁶ Fe:0,320	⁴² Mo:0,020	²⁵ Mn:0,015	²⁹ Cu:0,330
	²⁹ Cu:0,025	²⁸ Ni:0,395	⁷⁴ W:0,140	²⁶ Fe:0,020	
		²⁹ Cu:0,020		²⁸ Ni:0,630	
Alaşımdaki elementlerin atomik kesri (f _i) (Kesirlerin toplamı 1'e eşittir)	¹³ Al:0,052	²² Ti:0,018	²⁴ Cr:0,268	¹³ Al:0,064	²⁶ Fe:0,022
	²⁴ Cr:0,214	²⁴ Cr:0,240	²⁸ Ni:0,670	²² Ti:0,006	²⁸ Ni:0,666
	²⁸ Ni:0,712	²⁶ Fe:0,325	⁴² Mo:0,013	²⁵ Mn:0,016	²⁹ Cu:0,312
	²⁹ Cu:0,022	²⁸ Ni:0,382	⁷⁴ W:0,048	²⁶ Fe:0,021	
		²⁹ Cu:0,018		²⁸ Ni:0,620	
Elektriksel Özellikler					
Elektriksel öz direnç (μ.Ω.cm)	134	131	125	61	48-51
Mekanik Özellikler					
Kırılma direnci (%)	<33	<45	<50	<45	<40
Gerilme direnci (MPa)	1210	550-585	860	630-1370	550-950
Elastik modülü (GPa)	221	196	211	179	185
Termal Özellikler					
²³ °C'de ki termal iletkenlik (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	14,6	11,1	8,9	17	21,7
20-150 °C (x10 ⁻⁶ K ⁻¹) arasındaki termal genleşme katsayısı	11,7	14,1	13	8	13,9-14,1
²³ °C'de ki özgül ısı (J.K ⁻¹ kg ⁻¹)	435	440	397	419	450

Numunelerin Hazırlanması ve Deney Geometrisi

Ölçüm sistemi için numuneler hazırlanırken oluşabilecek en küçük bir deformasyona bile mahal vermeyecek şekilde araç-gereçler kullanılmıştır. İnce levha formda temin edilen numuneler, ölçüm sistemindeki numune haznesine yerleştirilmek üzere 13 mm çapında dairesel şekle sahip olacak şekilde hassas bir şekilde kesilmiştir. Kesilen numunelerin görüntüleri Şekil 15'de verilmiştir. Kesilen numuneler üzerinde oluşan kirlilik atomlarından kaynaklanacak

foton saçılmalarını minimize etmek için numune yüzeyleri her bir ölçümden önce seyreltilmemiş etil alkol (etanol) ile temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra, 13 mm çapındaki numunelerin kütleleri (Tablo 6'ya bakınız), numunelerin kütle kalınlıklarını ($t_m = m / A$) belirlemek ve hesaplamalarda kullanmak için çok hassas elektronik terazi yardımıyla ölçülmüştür. Böylece incelenen alaşımlar ölçümü yapılmak için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 15. 13 mm çap uzunluğuna ve 75 μ m levha (et) kalınlığına sahip Ni-tabanlı alaşım numunelerin görüntüleri.

Malzemelerin foton zırhlama performanslarının belirlenmesi için hesaplanan foton-madde etkileşim parametrelerinin deneysel tayininde kullanılan birincil (uyarıcı) foton akı yoğunluğu (I_0) ve hedef malzemeden etkilenmeden geçen foton akı yoğunluğu (I) değerlerini, farklı radyoaktif kaynaklardan yayımlanan farklı foton enerjilerinde iyi bir doğruluk derecesi ile deneysel olarak belirlemek için ideal geometri (dar-ışın geçiş geometrisi) kurulmuştur. Bu deneysel geometrinin şematik gösterimi Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 12'de görülebileceği gibi, bu geometri yapısında; kolimatör içerisine yerleştirilmiş radyoaktif kaynak, kolimasyon işlemini gerçekleştirecek Pb kolimatörler, Pb'den yapılmış numune tutucu ve dedektör sistemi bulunmaktadır. Dedektör sisteminde, içerisinde yüksek voltaj kaynağı, ön yükseltici, yükseltici ve analog sayısal dönüştürücü bulunan çok kanallı analizör (MCA) ve bu MCA sistemi ile entegre çalışan dedektör (foton sayıcı) mevcuttur. Ölçümlerde, aynı deneysel koşullar altında foton sayma işleminde farklı enerji-verim bölgelerine sahip iki farklı dedektör kullanılmıştır. Bu dedektörler, düşük enerji bölgesinde ($E_{foton} \leq 100 \text{ keV}$) çözme gücü (yani enerji-verim oranı) daha yüksek olan Si(Li) yarıiletken katı-hal dedektörü ve yüksek enerji bölgesinde ($E_{foton} \geq 100 \text{ keV}$) çözme gücü verimliliği daha yüksek olan NaI(Tl) sintilasyon dedektörüdür. Ayrıca, incelenen numunelerin foton-madde etkileşim parametrelerini birçok deneysel enerjide belirleyebilmek için ölçümlerde yedi (7) farklı radyoaktif kaynak kullanılmıştır. Bu radyoaktif kaynakların ve kullanılan dedektörlerin özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Radyoaktif Kaynaklar ve Dedektörlerin Özellikleri

Radyoaktif Kaynak	*Aktivite	Fiziksel Yarı-Ömür	* Enerji (keV)
Am-241	10 mCi (370 MBq)	432,2 yıl	59,54
Ba-133	10 µCi (370 kBq)	10,74 yıl	30,824 35 53,155 80,997 276,397 302,9 356
Cd-109	10 mCi (370 MBq)	465 gün	88,037
Eu-152	10 µCi (370 kBq)	13,516 yıl	40,1181 45,9
Na-22	10 µCi (370 kBq)	2,602 yıl	511 1274,537
Cs-137	10 µCi (370 kBq)	30,1 yıl	661,661
Co-60	10 µCi (370 kBq)	5,27 yıl	1173,228 1332,492

*Deneysel ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynakların aktiviteleri ve enerjileri.

Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Dedektörler	
Si(Li) dedektör	Na(Tl) dedektör
5,9 keV'de FWHM: 160 eV	662 keV'de FWHM: 8,5 keV
Aktif alan: 12 mm ²	Kristal boyutu: 2 inc x 2 inc
Kalınlık: 3 mm	Kalınlık: 1,6 mm
Be pencere kalınlığı: 25 µm	Al pencere kalınlığı: 0,5 mm
Çok kanallı analizör (MCA) entegreli	Çok kanallı analizör (MCA) entegreli

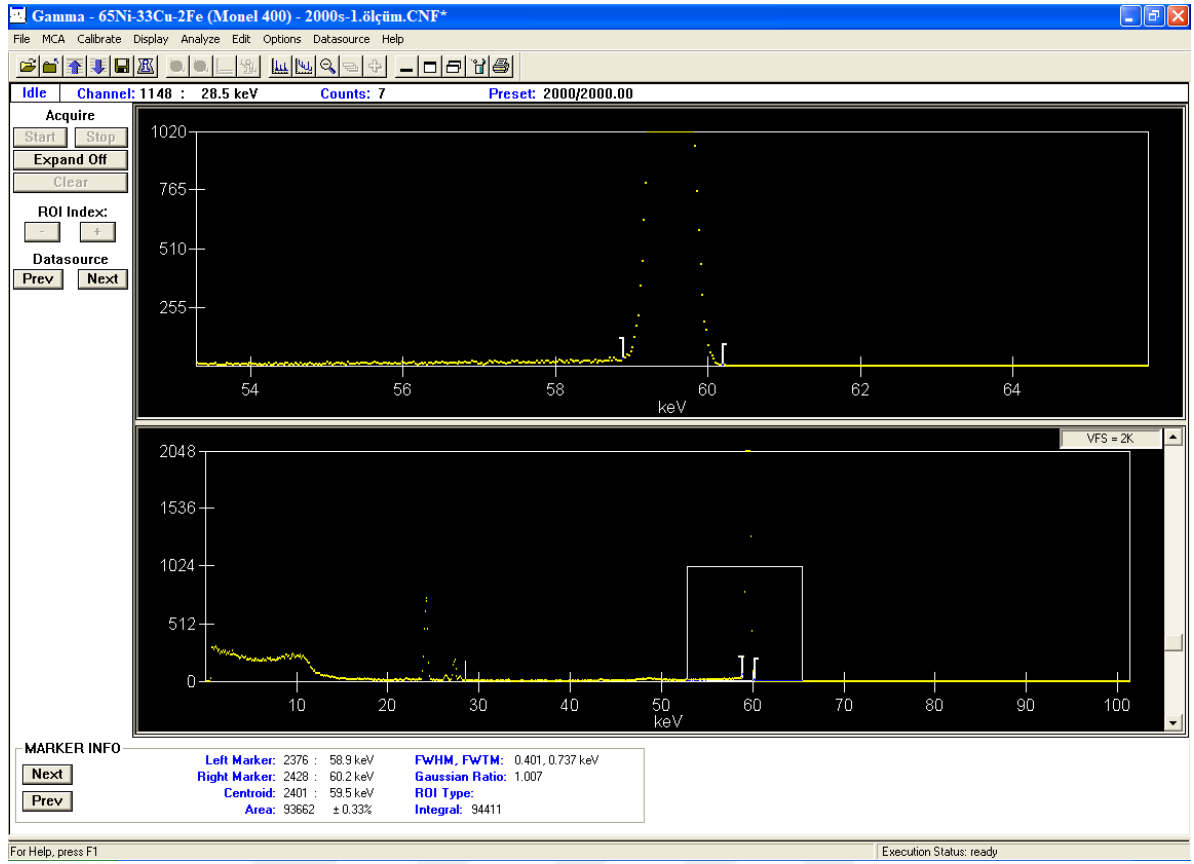
Tüm deneysel ölçümler esnasında aynı ideal geometri kullanılmıştır. Bu geometride (Şekil 12'ye bakınız);

- Kullanılan radyoaktif kaynaktan yayımlanan ışınları (X- ve γ-ışınları) dar-ışın hüzmesi haline getirebilmek için 5 mm delik çapına sahip başı konik huni şeklinde kurşundan (Pb) yapılmış hazneli kolimatör kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan tüm radyoaktif kaynaklar ayrı ayrı bu kolimatördeki hazneye yerleştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır.

- Kaynaktan çıkan ışınımın saçılmalarını önlemek ve saçılmış fotonları elimine ederek birincil ışınların dar bir hüzmeye ıraksamasını sağlamak için radyonüklit- numune arasına delik doğrultuları aynı olacak şekilde ardışık yerleştirilmiş ve delik çapları sırasıyla 4.5 mm ve 6 mm olan iki kurşun blok kullanılmıştır.
- İncelenen hedef malzemeden direk saçılan ve havadan saçılan fotonların dedektöre ulaşmasını ve dolayısıyla spektrumu etkilemesini engellemek için numune-dedektör arasına delik çapı 10 mm olan başka bir kurşun (Pb) blok yerleştirilmiştir.
- Çevreden saçılan fotonları ve doğrudan radyoaktif kaynaktan gelen fotonları elimine etmek ve spektrumun sadece numuneden etkilenmeden geçen fotonlardan oluşmasını sağlamak için kullanılan dedektörlerin aktif pencereleri, 4 mm delik çapına sahip ve silindirik olarak iç içe yerleştirilmiş sırasıyla (dıştan içe doğru) Pb, Fe ve Al bloktan oluşan bir kolimatör sistemi ile korunmuştur.
- Kolimatörlerin kalınlıkları, kolimatörler arası mesafeler gibi diğer geometri bileşenleri tüm ölçümlerde aynı tutulmuştur. Bunlar ile ilgili detaylı bilgiler Şekil 12'de verilmiştir.

Ölçüm Tekniği ve Sistemi

Tüm deneysel datalar, enerji ayırmalı X-ışını flöresans (*EDXRF; Energy Dispersive X-Ray Fluorescence*) tekniği kullanılarak işlenen spektrumlardan elde edilmiştir. Spektrumlar Genie-2000 bilgisayar programı Gamma yazılımı kullanılarak kaydedilmiştir. EDXRF tekniği önceden yapılmış tez çalışmalarında (Alım, 2012, 2017; Çeçen, 2012; İ. Han, 2009) detaylı bir şekilde anlatıldığı için bu bölümde referans verilerek geçilmesi uygun bulunmuştur. Kaydedilen spektrumlara örnek olması açısından Monel 400 alaşımının ²⁴¹Am radyoaktif kaynaktan yayımlanan 59,54 keV foton enerjisinde kaydedilmiş ölçümlerinden birisi örnek olması açısından Şekil 16' da verilmiştir.

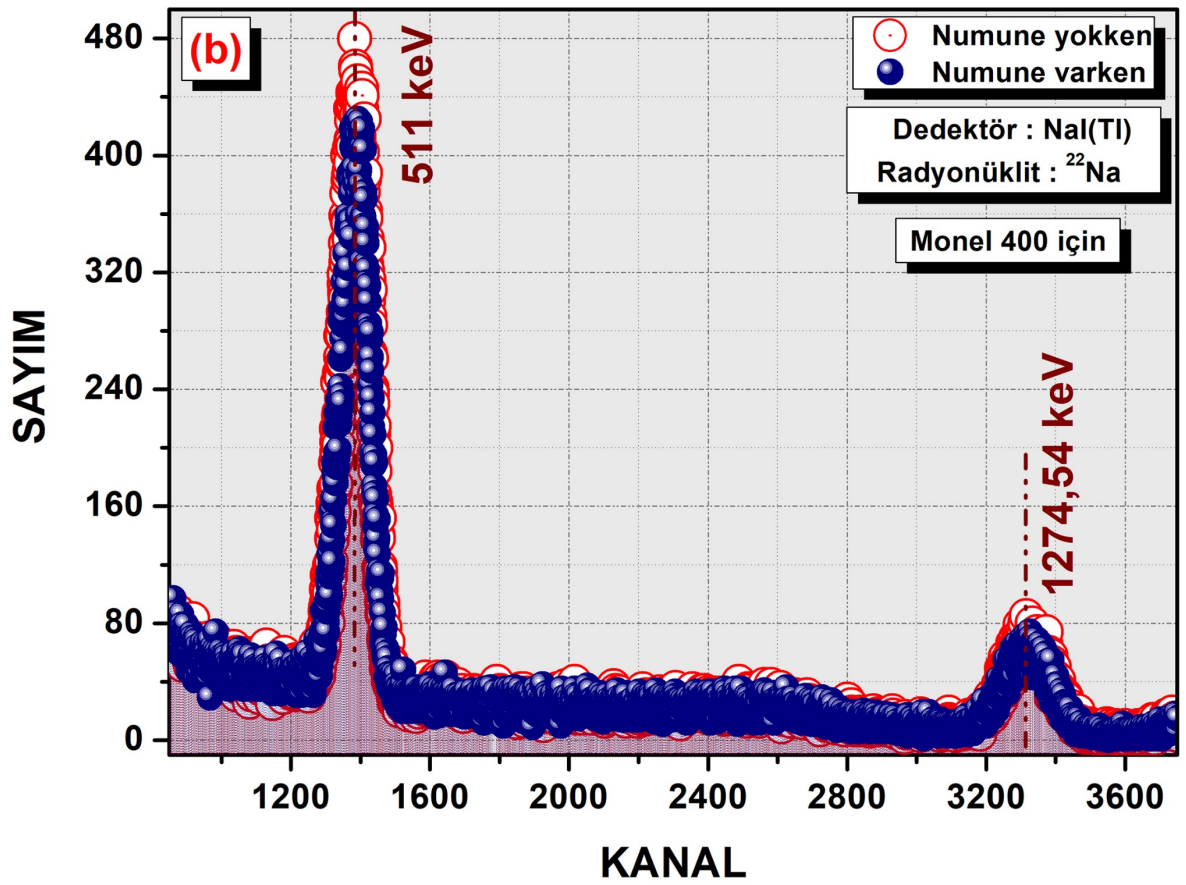
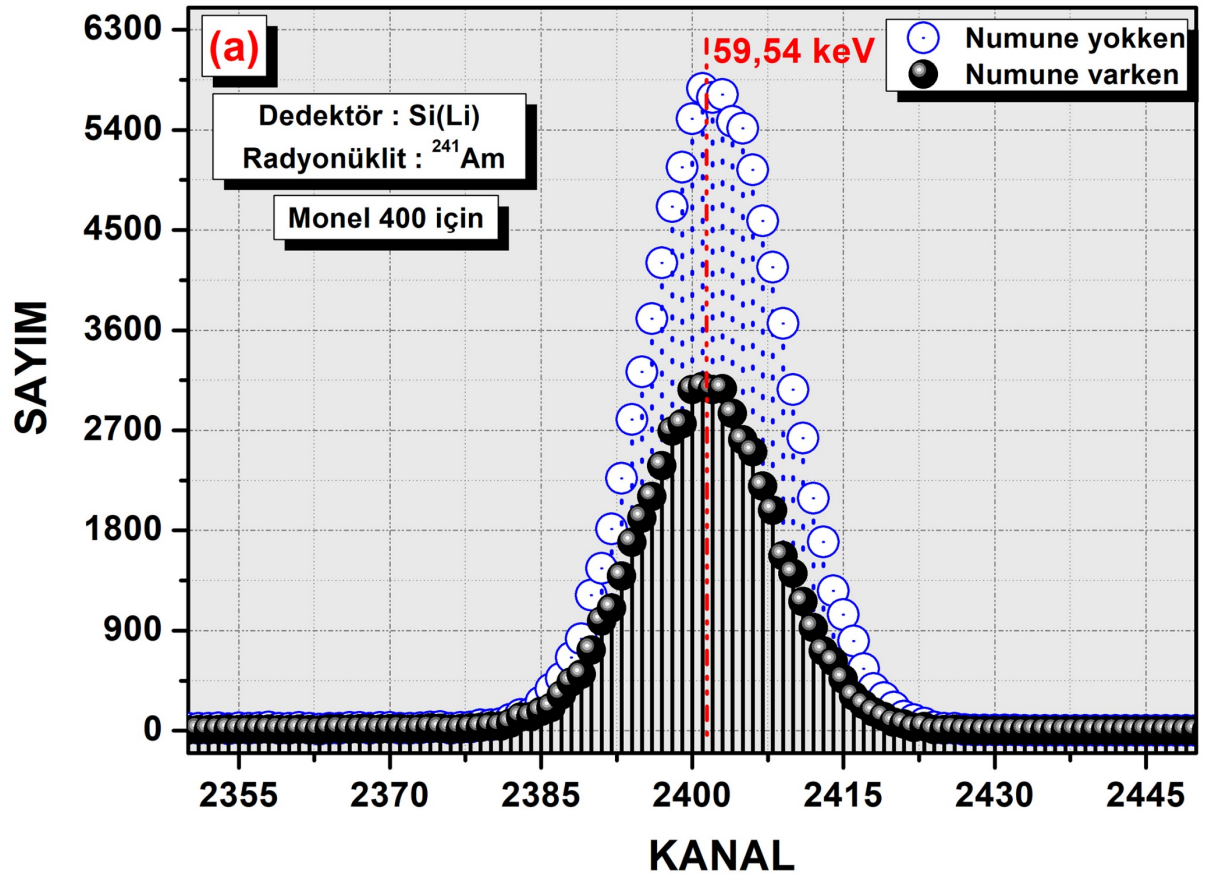


Şekil 16. Monel 400 alaşımı için örnek spektrum.

Bahsedilen deneysel koşullar altında, deneysel hata oranlarının belirlenebilmesi ve foton akı yoğunluklarındaki rölatif değişimin incelenebilmesi amacıyla incelenen alaşımların foton iletim ölçümleri her bir radyonüklitten yayımlanan foton enerjileri için üçer kez tekrarlanmıştır.

Spektrumların Analizi ve Foton-Madde Etkileşim Parametrelerinin Tayini

İncelenen tüm foton enerjileri için, hedef soğurucu malzeme varken malzemeden etkilenmeden geçerek dedektöre ulaşan fotonların sayılması sonucu oluşan spektrumlar ile hedef soğurucu malzeme yokken doğrudan kaynaktan dar bir hüzme halinde gelen fotonların sayılması ile oluşan spektrumlar ayrı ayrı her bir tekrarlanan ölçüm için analiz edilmiştir. Analizler, ortalama foton akı şiddetlerinin (I ve I_0) belirlenmesi için hem Gamma programından elde edilen pik altında kalan alanlar kullanılarak (Örneğin Şekil 15’de görüldüğü gibi 59,5 keV enerji fotonların oluşturduğu pik alanı (I şiddeti) 93662 dir.) hem de Microcal OriginPro 8.5 programı kullanılarak yapılan pik analizi sonucu bulunan alanlar kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra aynı deneyin tekrarlı ölçümleri için bulunan tüm foton sayım değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak belirli bir foton enerjisi için I ve I_0 değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Örnek olması açısından, I ve I_0 değerlerinin Microcal OriginPro 8.5 programı kullanılarak belirlendiği piklerin Kanal-Sayım grafiklerinden bazıları Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Monel 400 alaşımı için I ve I_0 değerlerinin belirlendiği örnek spektrumlar; (a) ^{241}Am kaynağın 59,54 keV enerjisi için, (b) ^{22}Na kaynağın 511 keV ve 1274,54 keV enerjileri için.

Foton-madde etkileşim parametrelerinin deneysel tayini.

Tüm incelenen alaşımların ilgilenilen foton enerjilerindeki ortalama I ve I_0 değerleri “Kuramsal Temeller” bölümünde “Doğrusal (lineer) azaltma katsayısı (LAC)” başlığı altında verilen Eşitlik 8 ve “Kütle azaltma katsayısı (MAC)” başlığı altında Eşitlik 9 ifadelerinde yerlerine konularak yapılan hesaplamalar ile sırasıyla LAC (μ) ve MAC (μ_m) değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, aynı bölümde (11)-(22) numaraları aralığındaki tüm ilgili eşitlikler kullanılarak foton-madde etkileşim parametreleri incelenen tüm foton enerjilerinde (16 farklı foton enerjisinde) deneysel olarak hesaplanmıştır. Bu iş ve işlemler araştırma yaptığımız tüm Ni-tabanlı alaşımlar için gerçekleştirilmiş ve sonuçların birlikte değerlendirilmesi ile bu alaşımların radyasyon zırhlama performansları belirlenmiştir.

Foton-madde etkileşim parametrelerinin teorik tayini.

Yukarıdaki paragraflarda özetlenen çalışmalarda ve literatürdeki birçok çalışmada (Abdelgawad vd., 2023; Abdelghany vd., 2023; Al-Hadeethi & Sayyed, 2020; Almutairi, Al-Saleh, Abualsayed, & Elsafi, 2023; Ardiansyah vd., 2023; Dong vd., 2022; El-Mesady vd., 2023; Es-soufi vd., 2023; Ezzeldin vd., 2023; Gursal, Mehboob, Ahmed, & Mehmood, 2023; Sarihan, Boodaghi Malidarre, & Akkurt, 2021; Sayyed, Abdel-Ghany, Askin, Sedqy, & Sadeq, 2023; Shaaban, Alotaibi, & Yousef, 2023; Thabit vd., 2023; Wu vd., 2023) yaptığımız incelemeler neticesinde, radyasyon zırhlama parametrelerinin doğruluğunu test etmek için deneysel ölçümlere ek olarak teorik hesaplamaların yapıldığını ve bu hesaplamaların çeşitli yazılım programları aracılığıyla gerçekleştirildiğini gözlemledik. Bu alanda yapılan çalışmaların inceleme konusu olan zırhlama malzemesi keşfi, tasarımı ve zırhlama performanslarının belirlenmesinin oldukça zor ve zaman alıcı olması ve ayrıca malzeme sınıfları arasında sonsuz ihtimaliyette oluşturulabilecek türdeki malzemelerin (örneğin alaşımlar) var olması gibi durumlardan dolayı bilim insanlarının işlerini kolaylaştırabilecek bu tür yazılımların (teorik hesaplama araçlarının) geliştirilmesi ve kullanılması oldukça önemlidir. Bu kapsamda literatüre kazandırılmış birçok teorik hesaplama programı vardır. Bunların ilkleri sürekli enerji aralığında elementlerin, bileşiklerin ve karışımların MAC değerlerinin hesaplanması için geliştirilen XCOM (M.J. Berger & J.H. Hubbell, 1987), XMuDat (Nowotny, 1998) ve WinXCOM’dur (Gerward, Guilbert, Jensen, & Levring, 2004). Belli bir zaman sonra farklı bileşim kompozisyonlarında kas dokularının kütle soğurma katsayılarını hesaplamak için Okunade tarafından MUA-T bilgisayar programı geliştirilmiştir (Okunade, 2007). Daha sonra farklı foton-madde etkileşim parametrelerini hesaplayan Auto-Zeff (Taylor, Smith, Dossing, & Franich, 2012), Direct-Zeff (Un & Caner, 2014), ZXCOM (Eyecioğlu, Karabul, El-Khayatt, & İçelli, 2016; Yalçın vd., 2012), BXCOM (Eyecioğlu vd., 2019), ParShield (Elmahroug, Tellili,

Souga, & Manai, 2015), EXABCal (Olarinoye, Odiaga, & Paul, 2019), Phy-X/PSD (Şakar, Özpolat, Alım, Sayyed, & Kurudirek, 2020), Py-MLBUF (Mann & Mann, 2021) ve EpiXS (Hila vd., 2021) gibi yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımlar arasından Phy-X/PSD programı, kullanım kolaylığı en iyi olmasından, tüm radyasyon zırhlama parametrelerini hem sürekli enerji aralığında (1 keV-100 GeV) hem de deneysel ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynakların (^{22}Na , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am) yayımladığı foton enerjilerinde hesaplayabilmesinden, laboratuvarlarda ikincil X-ışını oluşturmak için kullanılan *VEX* kaynağın yapısındaki Cu, Rb, Mo, Ag, Ba ve Tb elementlerin K-tabakası X-ışını enerjilerinde hesaplama yapabilmesinden ve sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde Excel formatında tablo ve grafik şeklinde sunmasından dolayı literatürde daha çok tercih edilmiştir. Ayrıca bu program eş zamanlı olarak çok hızlı bir şekilde sınırsız sayıda numunenin tüm zırhlama parametrelerini hesaplayabilmektedir. Sonuçlarının doğruluğu birçok araştırmacı tarafından test edilerek literatürde rapor edilmiştir. Bu sebeptendir ki bu tez çalışmasında tüm teorik hesaplamalar Phy-X/PSD programı kullanılarak yapılmıştır.

Foton-madde etkileşim parametreleri için teorik hesaplamalar deneysel foton enerji değerlerinde gerçekleştirilmişken, incelenen alaşımların foton saçma karakteristikleri hakkında bilgi veren Z_{eq} , $R_{inc/toplam}$, EBF ve EABF değerleri 15 keV-15 MeV geniş enerji aralığında hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde tablo ve grafikler halinde “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde verilmiştir.

Hata analizi.

Bu tez çalışmasında, deneysel ölçümlerde numune kalınlığından kaynaklanan problemleri ortadan kaldırmak için, foton-madde etkileşim parametreleri arasından deneysel olarak ilk belirlediğimiz parametre MAC değerleridir. Bunun için Eşitlik 9 ile verilen formülü kullanarak deneysel verileri hesaplamaya başladık. Ancak yaygın olarak önce LAC değerleri hesaplamalarının yapıldığını da belirtmek isteriz.

Bu tez kapsamında öncelikle ilgili numunenin kütlesi (m ; gram) tartıldı. Daha sonra yarıçapı 0,65 cm olan dairesel numunenin yüzey alanı hesaplandı ($A = \pi r^2$; cm^2). Bu değerler kullanılarak; $t_m = m/A$ (g/cm^2) eşitliği yardımıyla numunelerin kütle kalınlıkları belirlendi. Bu işlemlerden sonra ölçümler alındı ve ilgili foton enerjisinde I ve I_0 foton akı şiddetleri hesaplandı. Daha sonra Eşitlik 9 aşağıdaki gibi verilen adımlar ile nihai halini aldığından numune kalınlığından bağımsız olarak ilk önce MAC (μ_m) değerleri deneysel olarak belirlendi.

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{\ln(I_0/I) / t}{\rho} = \frac{\ln(I_0/I)}{\rho t} \quad (30)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{At} \quad (31)$$

Eşitlik 31’de verilen V (cm³); soğurucu numunenin hacmidir. Bu denklem Eşitlik 30’da yerine yazılırsa;

$$\mu_m = \frac{\ln(I_0/I)}{\rho t} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{At} t} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{A}} = \frac{\ln(I_0/I)}{t_m} \quad (32)$$

ifadesi elde edilir. Böylece MAC değerlerinin kütle kalınlığına bağlı ifadesi türetilmiş olur. Bundan dolayı, deneysel hata oranı ifadelerinin t_m ifadesine bağlı olması ve bu ifadedeki deneysel sapma değerlerini de içermesi gerekir. Bu noktadan hareketle MAC değerlerinde ki hata oranları aşağıdaki eşitlik (Alım, 2020; Alım, Şakar, Baltakesmez, vd., 2020; Şakar, 2020) ile bulunmuştur.

$$\Delta(\mu_m) = \frac{1}{t_m} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\ln \frac{I_0}{I}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta t_m}{t_m}\right)^2} \quad (33)$$

burada, Δt_m , ΔI_0 ve ΔI değerleri sırasıyla kütle kalınlığı (t_m) hesaplamasındaki, birincil (uyarıcı) fotonların akı yoğunluğu (I_0) hesaplamalarındaki ve numuneden etkilenmeden geçen fotonların akı yoğunluğu (I) hesaplamalarındaki hata belirsizlik (tolerans) değerleridir.

MAC parametresi dışındaki diğer tüm etkileşim parametreleri, bu parametrenin değeri kullanılarak hesaplandığından diğer parametrelerinin hata oranları da doğrudan $\Delta(\mu_m)$ değişimlerine bağlı olarak hesaplanmıştır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları ve Tartışma

Bu tez çalışması, özellikle nükleer enerji uygulamaları başta olmak üzere yüksek enerjili iyonize radyasyonun (X- ve γ -ışınları) kullanıldığı ve/veya üretildiği uygulama alanlarında, radyasyondan korunma amacıyla kullanılan soğurucu (zırhlama) materyalleri ve reaktör tasarımlarında kullanılan yapı materyallerine göre daha avantajlı yeni alternatif malzeme(ler) keşfetmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda yapılan bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşamada; ilk olarak, nükleer enerji uygulamalarında halihazırda zırlama materyali olarak kullanılan malzemelerin (kurşun (Pb), kurşun türevi kompleks materyaller, camlar ve ağır metal katkılanmış betonlar, vb.) yetersizlikleri dolayısıyla bunlara alternatif olabilecek bir radyasyon zırhlama materyalinin sahip olması gereken optimal şartları taşıyan malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Seçilen bu malzemeler, çeşitli uygulama alanlarında kullanılan ve ticari olarak Evanohm, Alloy 825, Haynes 230, Monel K-500 ve Monel 400 olarak adlandırılan beş farklı Ni-tabanlı özel alaşımdır. Bu alaşımların seçilmesinin en önemli sebebi ise optimal şartlar (*giriş bölümünde sayfa 1-2'ye bakınız*) olarak adlandırılan şartlar arasından; yüksek ısı ve sıcaklığa karşı yapı stabilitesini bozmadan uzun süre dayanabilme, yüksek mukavemete sahip olma, iyi derecede sünekliğe sahip olma ve yüksek korozyon direncine sahip olma gibi özellikleri karşılamalarıdır. Ayrıca, nükleer reaktör tasarımında ve gaz türbinlerinde kullanılacak malzemelerde aranan ve malzemenin yüksek mukavemetli olmasının kaynağı olan FCC γ -fazı kristal yapısına sahip olmaları da seçim şartlarımızdan olmuştur. Daha sonra, seçilen bu alaşımlar, radyasyon zırhlama parametrelerinin ölçülmesinde uygun şartları taşıyabilecek şekilde çok ince (75 μ m kalınlıkta) levhalar şeklinde GoodFellow Limited şirketinde (*Cambridge Limited, England*) ürettirilerek temin edilmiştir. Ürettirilen alaşımların fiziksel, kimyasal, elektriksel, mekanik ve termal özellikleri temin edilen şirket bünyesindeki laboratuvarlarda belirtilmiş ve teknik şartname gereği şirketten temin edilmiştir. Araştırılan bu özellikler “Materyal ve Yöntem” bölümünde Tablo 6’da verilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde, seçilen alaşımların yüksek erime noktasına, yüksek yoğunluğa, iyi mekanik özelliklere ve düşük termal genleşme katsayılarına sahip olduğu görülebilir. Tablo 6’da sunulan bu özellikler, seçilen Ni-tabanlı alaşımların nükleer enerji uygulamalarına entegrasyonu için gerekli ön şartı sağladıklarının kanıtı olarak gösterilebilir.

İkinci aşamada; nükleer enerji uygulamaları için karakteristik özellik açısından uygunluğu anlaşılan bu beş farklı Ni-tabanlı alaşımın radyasyon zırhlama performansı açısından uygunluğunu saptayabilmek için gerekli tüm foton-madde etkileşim parametreleri deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümler, dar-ışın iletim geometrisinde detayları Tablo 7’de verilen yedi farklı radyonüklitten yayımlanan on altı (16) farklı foton enerjisinde çözme gücü verimlilikleri farklı enerji bölgelerine karşılık gelen iki farklı dedektör yardımıyla EDXRF tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonrası elde edilen spektral datalar kullanılarak incelen tüm foton enerjilerinde seçilen Ni-tabanlı alaşımların Tablo 4’de verilen foton-madde etkileşim parametreleri deneysel olarak hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel ölçümlerin hata oranları sınırında kabul edilebilirliğini test etmek amacıyla tüm parametreler teorik olarak da hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak, malzemeden saçılan fotonlar için gerekli olan ve malzemenin foton saçma durumu hakkında bilgi veren saçılma parametreleri (*Tablo 5’e bakınız*) 15 keV-15 MeV geniş enerji aralığında teorik olarak saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak incelenen Ni-tabanlı alaşımların nükleer enerji uygulamalarına entegrasyonunun olabileceğini önerebilmek için tüm datalar halihazırda nükleer sistemlerde radyasyon zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan Fe-tabanlı çelik-manyetit (SM) betonu (Bashter, 1997) ve literatürde iyi bir zırhlayıcı malzeme olarak önerilen Cupero-Nikel (CN) (Singh & Badiger, 2014) alaşımının karşılık gelen sonuçları ile karşılaştırmalı bir şekilde grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında deneysel olarak belirlenen ilk foton-madde etkileşim parametresi, incelenen Ni-tabanlı alaşımların kütle azaltma katsayısı (MAC; μ_m ; cm^2/g) değerleridir. Diğer parametreler bu değerler kullanılarak hesaplanmıştır. MAC değerleri, incelenen malzemelerin foton zırhlama kabiliyetleri hakkında en önemli ve en temel bilgileri veren niceliklerdir. Bu parametre, fotonların malzeme içerisine girdiğinde madde atomlarıyla, atomları çevreleyen veya serbest haldeki elektronlarla ve/veya atom çekirdekleriyle yaptığı tüm etkileşim ihtimaliyetlerini (tesir kesitlerini) gösteren niceliktir. Fiziksel olarak MAC parametresi, malzemenin birim kütlesinin (1 gram) f frekanslı fotonlarla etkileşim yapabileceği tesir alanı olarak tanımlanabilir. Bu tesir alanı (cm^2) ne kadar büyük olursa gelen foton demeti içerisinde o alana düşen foton akı şiddeti o kadar fazla olacağından maddenin birim kütlesinin etkileşim yapabileceği foton sayısı da doğru orantılı olarak o kadar fazla olacaktır. Bu durumda, fotonların madde ile etkileşim olasılığı artacaktır. Etkileşim olasılığı, incelenen malzemenin gelen foton akı şiddetini azaltma kabiliyetinin bir ölçüsü olduğundan, bu olasılık artışı malzemenin foton zırhlama performansını artıracaktır. Sonuç olarak, MAC niceliğinin herhangi bir malzeme için ilgilenilen bir foton enerjisinde büyük değerler alması, o fotonun incelenen malzeme ile yüksek olasılıkla etkileştiğinin ve malzemenin bu fotona karşı zırhlama

kabiliyetinin iyi derecede olduğunun göstergesidir denilebilir. Bu sebeple deneysel ölçümlerde MAC değerlerinin yüksek doğruluk dereceleri ile belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında hem deney geometrisinin iyi kurulması hem de deneylerin tekrarlanarak ölçümlerin alınmasına bağlı olarak MAC değerleri düşük hata paylarına sahip yüksek doğruluk derecelerinde belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler hata payları ile birlikte Tablo 8’de sunulmuştur.

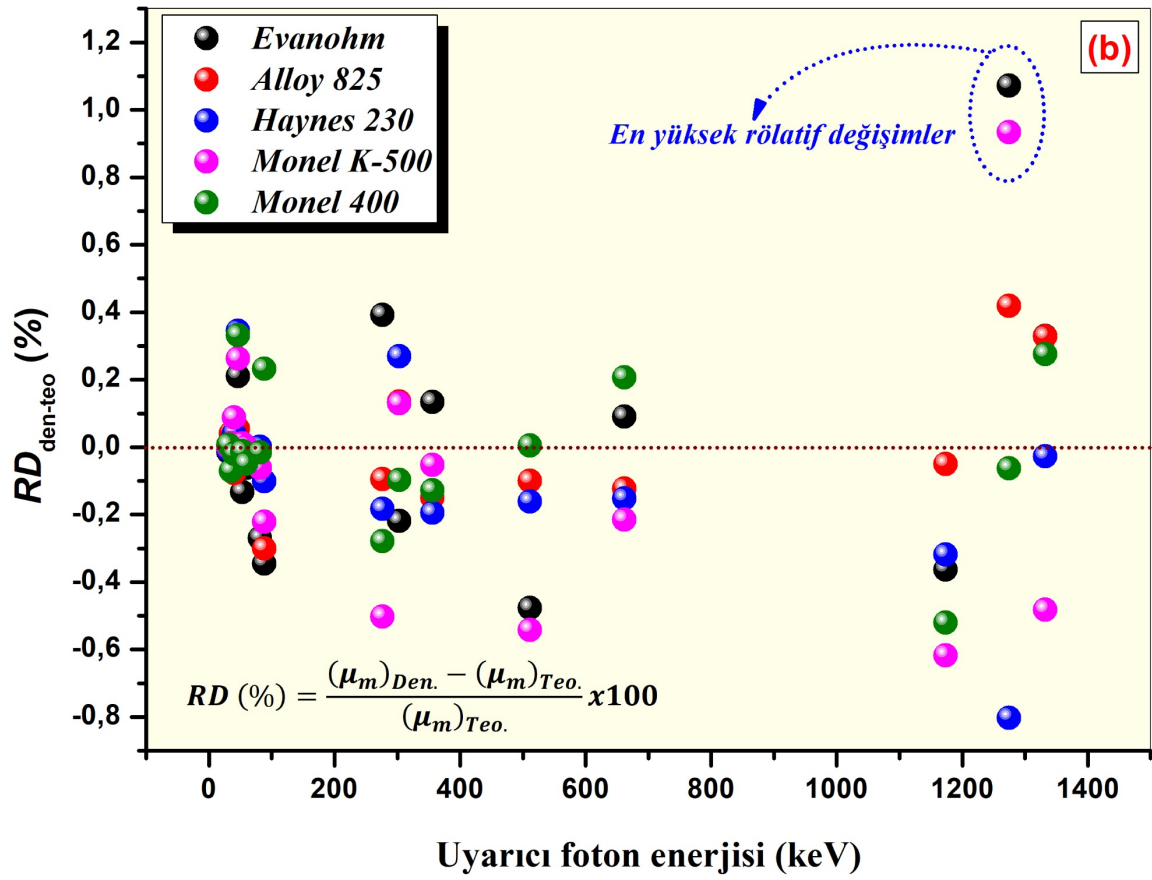
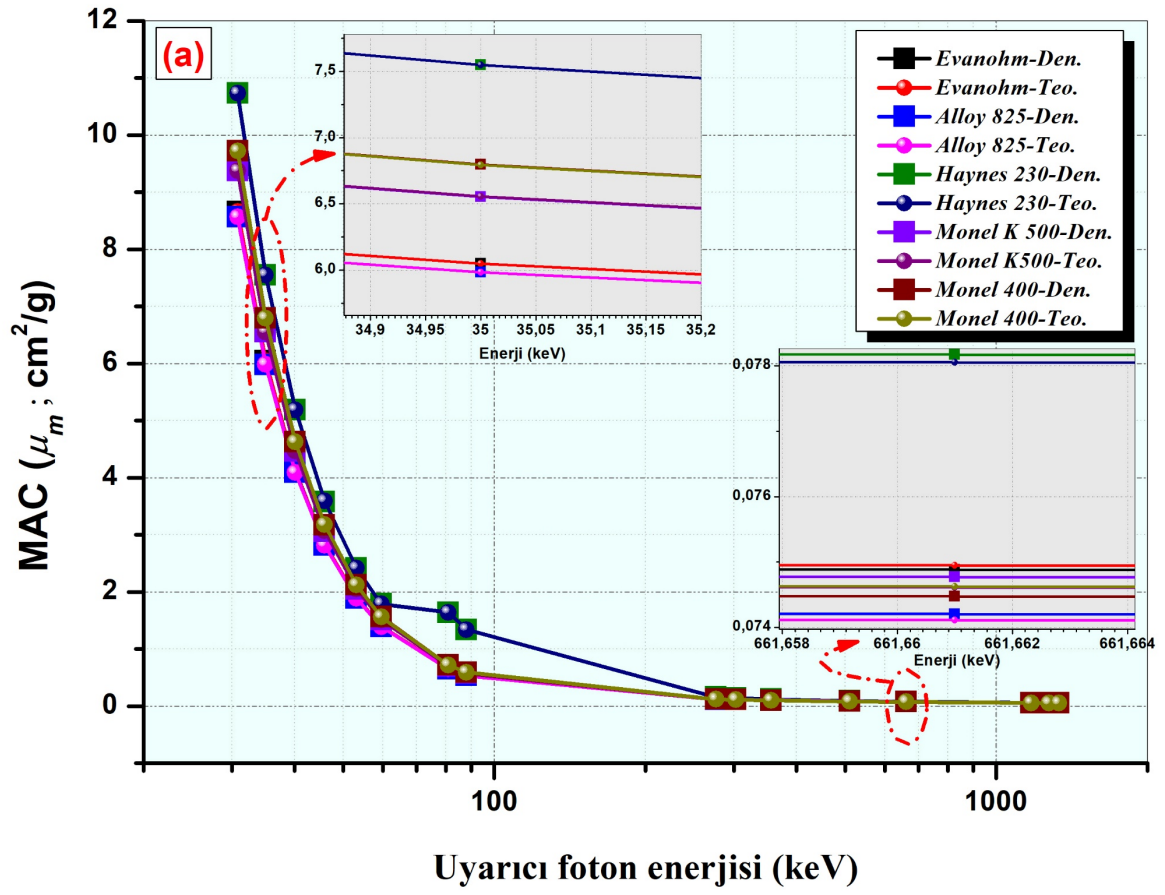
Ayrıca, deneysel ve teorik sonuçların uyumluluğunu grafiksel olarak göstermek için uyarıcı foton enerjisine karşın MAC değerlerinin değişimleri Şekil 18(a)’da sunulmuştur. Ek olarak, deneysel ve teorik MAC değerleri arasındaki rölatif (bağıl) farklar aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar grafiksel dağılım olarak Şekil 18 (b)’de verilmiştir.

$$RD(\%) = \frac{(\mu_m)_{Den.} - (\mu_m)_{Teo.}}{(\mu_m)_{Teo.}} \times 100 \quad (34)$$

Şekil 18 (b)’den de görülebileceği gibi, tüm hesaplamalar arasından en yüksek bağıl fark Evanohm alaşımının 1274,537 keV foton enerjisindeki değerleri arasında yaklaşık %1,1 olarak saptanmıştır. Tablo 8 ve Şekil 18 incelendiğinde, deneysel ve teorik sonuçlar arasında çok düşük rölatif farklılıklar ile iyi bir uyum olduğu görülebilir. Bu uyum, foton iletim ölçümlerinde kullanılan dar-ışın iletim geometrisinin (ideal geometri) doğru bir şekilde yapılandırıldığı ve tüm deneysel hesaplama adımlarının doğru bir şekilde gerçekleştirildiğinin açık bir göstergesidir. Ayrıca, Şekil 18(b) incelendiğinde, düşük enerji bölgesindeki rölatif farkların yüksek enerji bölgesindeki rölatif farklara göre çok daha küçük olduğu açık bir şekilde görülebilir. Bu durum, yüksek enerjili fotonların penetrasyon derinliklerinin düşük enerjili fotonlara nazaran daha büyük olmasından kaynaklı olarak daha fazla çoklu saçılma ihtimaliyetlerinin olmasına atfedilebilir.

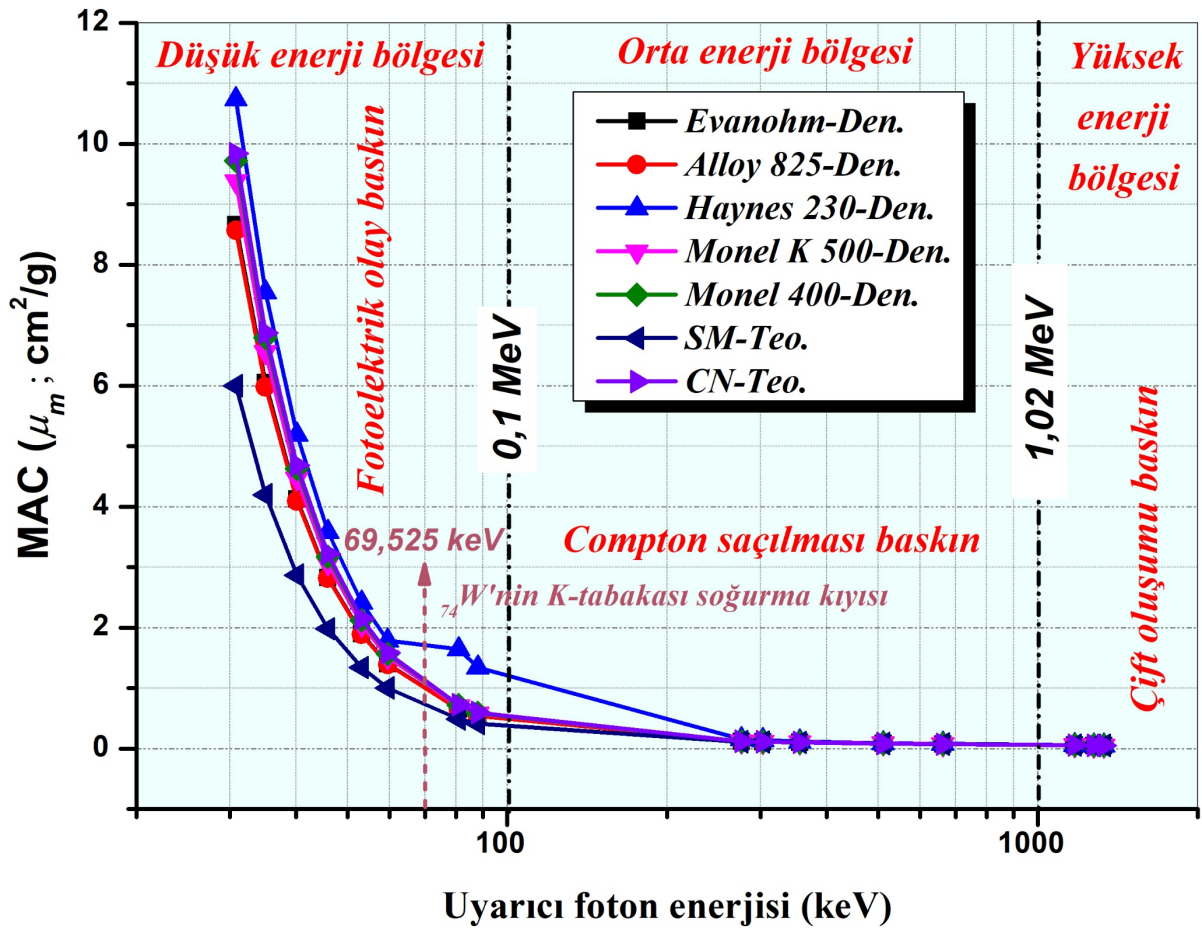
Tablo 8. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların MAC Sonuçları

Enerji (keV)	MAC değerleri (μ_m ; cm ² /g)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.
30,824	8,6614	0,1286	8,6601	8,5670	0,0380	8,5674	10,7345	0,0890	10,7336	9,3789	0,0126	9,3790	9,7197	0,0712	9,7204
35,000	6,0488	0,0023	6,0488	5,9823	0,2397	5,9847	7,5488	0,0875	7,5479	6,5538	0,0826	6,5546	6,7972	0,4779	6,7924
40,118	4,1228	0,0547	4,1222	4,0941	0,3131	4,0910	5,1877	0,2140	5,1899	4,4632	0,3948	4,4672	4,6289	0,0893	4,6280
45,900	2,8288	0,5973	2,8348	2,8149	0,1556	2,8165	3,5800	0,2354	3,5924	3,0620	0,8043	3,0700	3,1685	0,0531	3,1791
53,155	1,8990	0,2525	1,8965	1,8857	0,0297	1,8854	2,4163	0,0155	2,4164	2,0507	0,0242	2,0510	2,1224	0,0262	2,1221
59,540	1,4018	0,0866	1,4010	1,3942	0,0259	1,3940	1,7898	0,0037	1,7899	1,5125	0,0016	1,5125	1,5643	0,0773	1,5635
80,997	0,6528	0,1760	0,6510	0,6482	0,0087	0,6481	1,6418	0,0017	1,6419	0,6967	0,0433	0,6963	0,7171	0,0110	0,7170
88,037	0,5409	0,1864	0,5390	0,5382	0,1614	0,5366	1,3400	0,1350	1,3386	0,5757	0,1277	0,5744	0,5892	0,1371	0,5906
276,397	0,1188	0,0466	0,1193	0,1183	0,0112	0,1182	0,1569	0,0287	0,1566	0,1206	0,0606	0,1200	0,1209	0,0337	0,1206
302,900	0,1129	0,0247	0,1126	0,1113	0,0151	0,1115	0,1413	0,0380	0,1417	0,1129	0,0146	0,1130	0,1135	0,0111	0,1134
356,000	0,1024	0,0137	0,1026	0,1016	0,0153	0,1015	0,1214	0,0237	0,1212	0,1027	0,0054	0,1026	0,1030	0,0131	0,1029
511,000	0,0855	0,0408	0,0851	0,0842	0,0084	0,0841	0,0920	0,0148	0,0918	0,0853	0,0462	0,0848	0,0849	0,0004	0,0849
661,661	0,0749	0,0068	0,0750	0,0742	0,0091	0,0741	0,0782	0,0119	0,0781	0,0748	0,0161	0,0746	0,0745	0,0154	0,0746
1173,228	0,0565	0,0205	0,0563	0,0557	0,0028	0,0556	0,0566	0,0180	0,0564	0,0563	0,0347	0,0559	0,0562	0,0293	0,0559
1274,537	0,0534	0,0572	0,0539	0,0531	0,0222	0,0533	0,0544	0,0437	0,0540	0,0531	0,0496	0,0536	0,0536	0,0034	0,0536
1332,492	0,0526	0,0173	0,0527	0,0520	0,0171	0,0521	0,0528	0,0015	0,0527	0,0527	0,0254	0,0524	0,0523	0,0144	0,0524



Şekil 18. (a) Uyarıcı foton enerjisine karşı MAC değerlerinin deneysel ve teorik olarak değişimi, (b) Deneysel ve teorik MAC değerleri arasındaki rölatif farklar.

Kuramsal temeller başlığında foton-madde etkileşiminde meydana gelme ihtimali en yüksek olan üç temel olayın (fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum) var olduğu ve diğer olayların oluşma ihtimaliyetlerinin bu olaylar yanında ihmal edilecek kadar küçük olduğundan bahsedilmiştir. Ancak, üç temel olay dışındaki diğer olayların foton-madde etkileşim sürecinde oluşum ihtimaliyetlerinin düşük olması bu olayların gerçekleşmediği anlamına gelmez. Bu sebeple bu olayları da ilgilenin foton enerjisinin büyüklüğüne ve malzemeyi oluşturan elementlerin atom numarasına göre değişen tesir kesitlerini dikkate alarak değerlendirmek gerekir. Bu üç temel olay dışındaki olaylar genellikle çok büyük atom numaralı elementlere sahip malzemelerde gerçekleştiğinden bu tez çalışmasında yine genel çerçeve üç temel olay etrafında çizilmiştir. Bundan dolayı, foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak MAC değerlerinin değişimleri bu üç temel olayın baskın olduğu enerji bölgelerine göre grafize edilmiş ve Şekil 19’da sunulmuştur.



Şekil 19. Uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen Ni-tabanlı alaşımların MAC değerlerinin bölgesel olarak değişimleri.

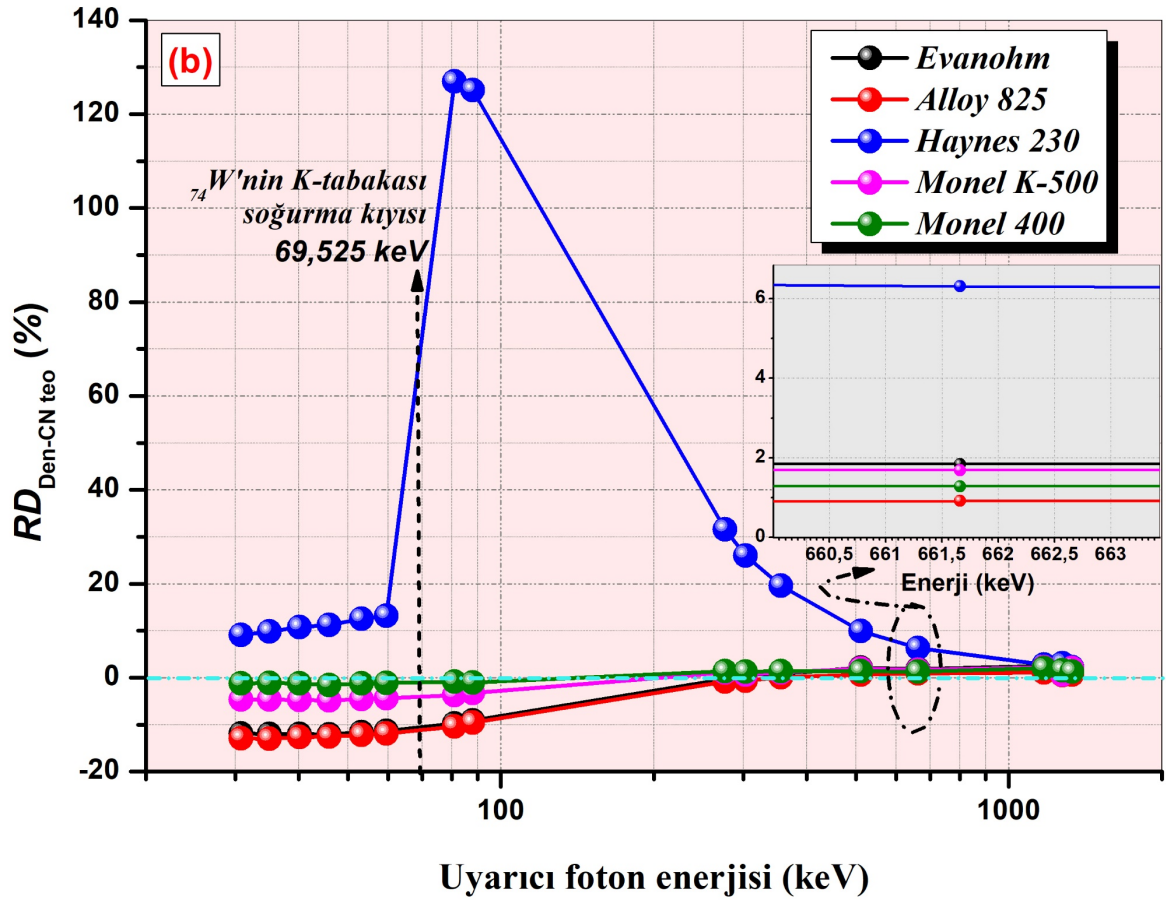
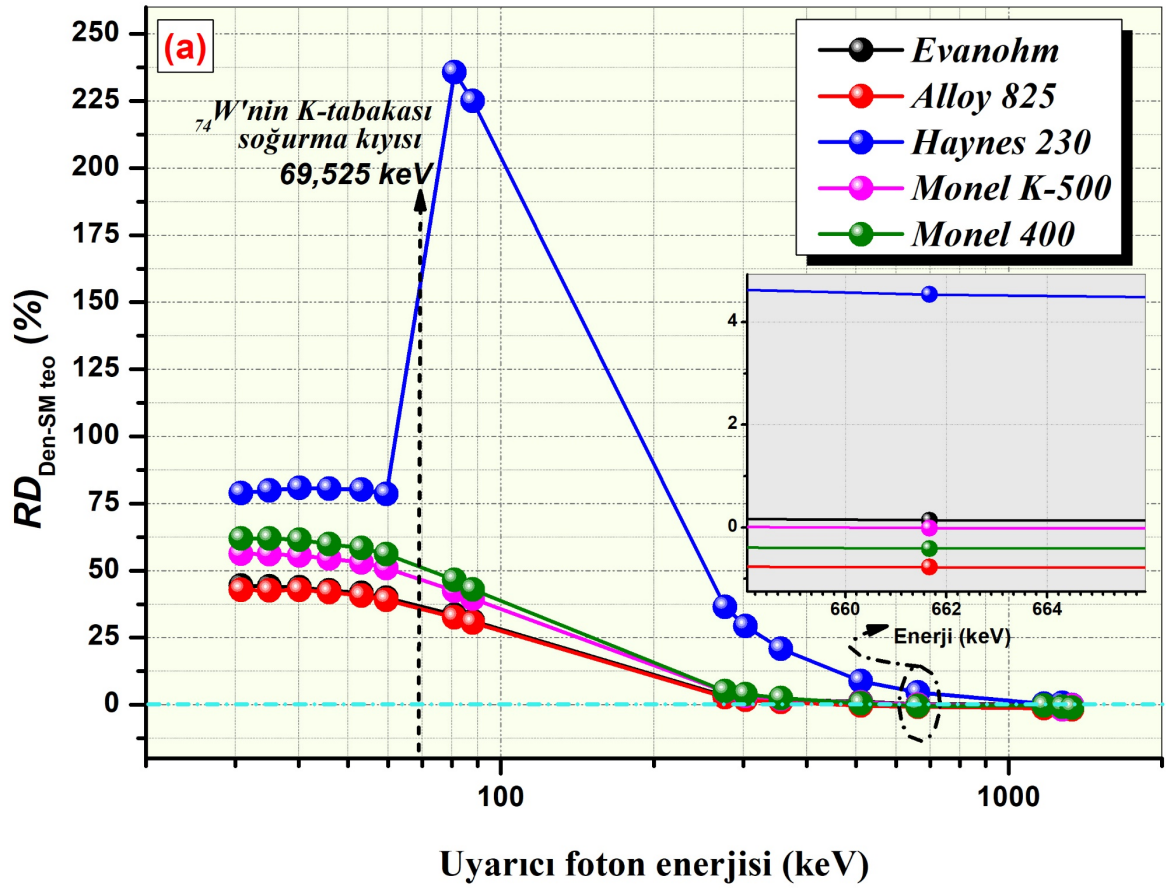
Şekil 19’da verilen grafik incelendiğinde, tüm incelenen Ni-tabanlı alaşımların MAC değerlerinin artan foton enerjisi ile birlikte azaldığı, en yüksek MAC değerlerinin fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde ($E_{Foton} \leq 100 \text{ keV}$) olduğu ve yüksek enerji

bölgesine doğru gittikçe alaşımların MAC değerleri arasındaki farkların kapanarak yaklaşık olarak birbirlerine eşit olmaya başladığı görülebilir. Bu durum bahsedilen bu üç temel olayın etkileşim tesir kesitlerinin sırasıyla fotoelektrik olay için $Z^4 E^{-7/2}$, Compton saçılması için ZE^{-1} ve çift oluşum için $Z^2 \ln(E)$ olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 19'dan da açık bir şekilde görülebileceği gibi yaklaşık 300 keV foton enerjisi değerine kadar en yüksek MAC değerine sahip alaşım Haynes 230 olarak saptanmıştır. Bu alaşımın diğerlerinden oldukça büyük MAC değerlerine sahip olmasının sebebi yapısındaki ağırlıkça bileşim oranı %14 olan ^{74}W elementinin varlığıdır. Çünkü bu element incelenen alaşımları oluşturan diğer elementlere göre daha büyük atom numarasına sahiptir ve Z'nin büyük olmasından dolayı etkileşim tesir kesiti daha fazladır. Bu da Haynes 230 alaşımının MAC değerlerinin büyük olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, Tablo 8 ve Şekil 19 birlikte değerlendirildiğinde, yaklaşık 200 keV foton enerjisine kadar ki düşük enerji bölgesinde incelenen malzemelerin MAC değerlerinin büyüklük sıralaması Haynes 230 > CN > Monel 400 > Monel K – 500 > Evanohm > Alloy 825 > SM olarak elde edilmiştir.

Nükleer enerji uygulamalarında kullanılabilecek yeni tip malzemelerin araştırılmasında sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek için bazı aktif zırhlama malzemeleri ve literatürde önerilen aynı tip malzemeler ile kıyaslama yapmak gerekir. Bu sebeple bir üstteki paragrafta verilen MAC sıralamasını desteklemek ve alaşımların radyasyon zırhlama performansları hakkında nicel bir değerlendirme yapabilmek için hem nükleer enerji santrallerinde zırh malzemesi olarak kullanılan Fe-tabanlı çelik-manyetit (SM) betonu hem de literatürde iyi bir radyasyon zırh malzemesi olarak önerilen Cu-tabanlı Cupero-Nikel (CN) alaşımı ile rölatif olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen rölatif farklar uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 20'de verilmiştir. Bu rölatif farklar, alaşımların karşılaştırıldıkları malzemeye göre radyasyon zırhlama performansının yüzdelik olarak karşılaştırmasını da verir. Şekil 20(a) incelenen alaşımların SM betonuna göre rölatif farklarını gösterirken, Şekil 20(b) ise CN alaşımına göre rölatif farkları göstermektedir. Şekil 20(a) incelendiğinde, incelenen alaşımların tüm ilgilenilen foton enerjilerinde SM betonundan daha büyük MAC değerlerine sahip olduğundan oluşan rölatif farklar pozitifdir. Ayrıca, yaklaşık 60 keV foton enerjisine kadar, incelenen alaşımlar arasından en düşük MAC değerlerine sahip olan Alloy 825 alaşımının bile SM betonundan %40 daha fazla radyasyon zırhlama performansına sahip olduğu saptanmıştır. Haynes 230 alaşımı hariç diğer alaşımların yüksek foton enerjilerine gidildikçe zırhlama performanslarının azalarak SM betonuna yaklaştığı ve hatta yaklaşık 500 keV'den sonra hemen hemen eşit olduğu belirlenmiştir. En yüksek MAC değerlerine sahip olan Haynes 230 alaşımı ise 60 keV foton enerjisine kadar SM betonuna göre yaklaşık %79 daha fazla zırhlama performansına sahip olup 60 keV'den büyük foton enerjilerinde bu performansın aniden artarak

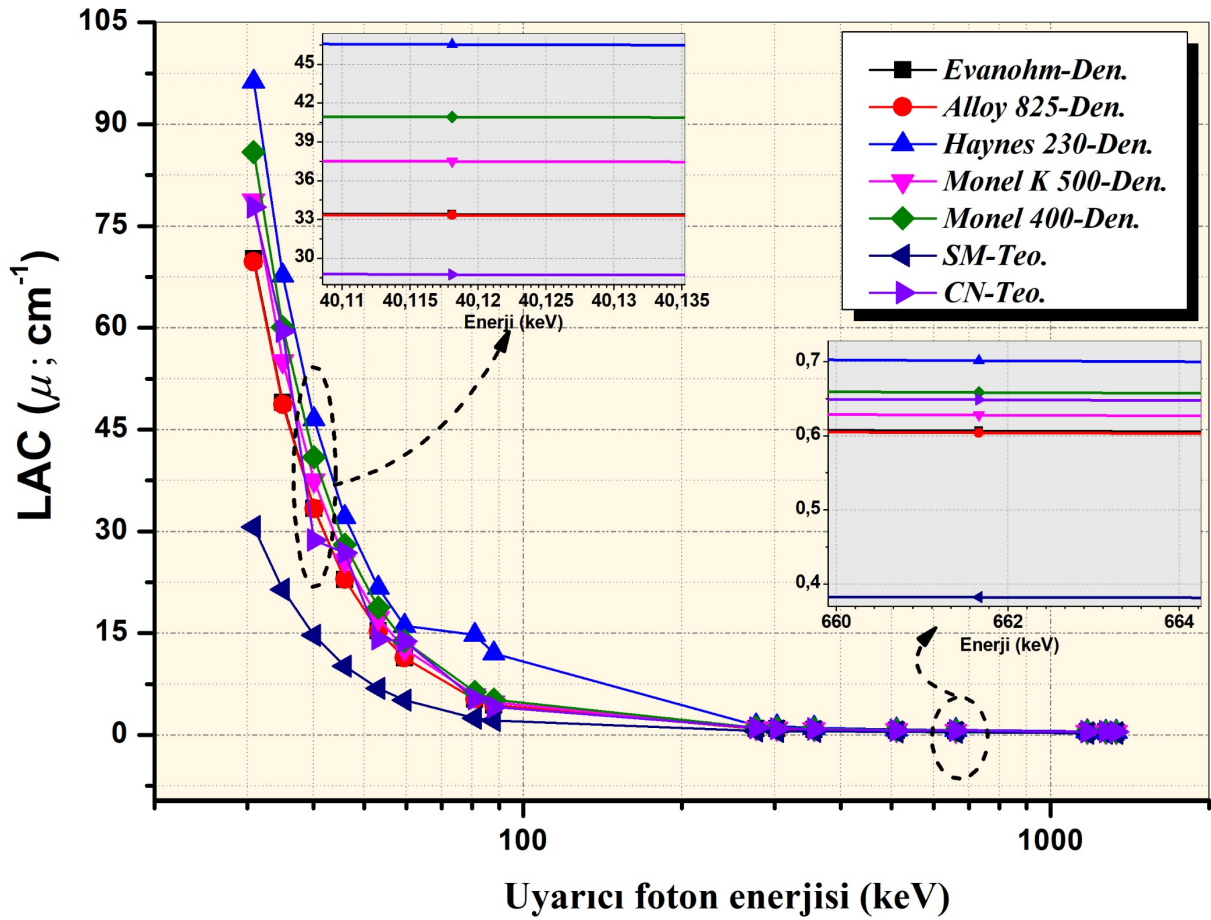
%235 katına kadar çıktığı Şekil 20(a)'dan açıkça görülebilir. 60-300 keV foton enerji aralığında Haynes 230 alaşımının foton zırhlama performansı diğer foton enerjilerine göre oldukça fazladır. Bu durum hem Şekil 19'dan hem Şekil 20(a)-(b)'den açıkça görülebilir. Bu performans artışının sebebi Haynes 230 alaşımının yapısında bulunan ^{74}W metal atomlarının 69,525 keV foton enerjisine karşılık gelen K-tabakası soğurma kıyısıdır. Soğurma kıyısının enerjisine veya yakın enerjilere sahip fotonlar bu alaşım tarafından daha fazla soğrulduğundan bu alaşımın belirtilen enerji aralığındaki foton zırhlama performansı artmıştır. Ek olarak, Şekil 20(b) incelendiğinde, 200 keV foton enerjisine kadar Haynes 230 alaşımı hariç diğer tüm alaşımların zırhlama performanslarının CN alaşımından daha düşük olduğu görülebilir. Ayrıca, bu alaşımların performanslarının daha düşük oluşu fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde daha belirgin olup 70 keV foton enerjisinden sonra artan foton enerjisi ile aradaki bağıl farkın kapanarak yaklaşık 300 keV'den sonra hemen hemen eşit oldukları belirlenmiştir. Haynes 230 alaşımında ise durum tamamen farklı olup, 60 keV foton enerjisine kadar CN alaşımına göre ortalama %13 daha fazla zırhlama performansı sergilerken 60 keV'den sonra bu oran ani bir şekilde artarak ortalama %130 değerlerine ulaşmaktadır. Bunun sebebi yukarıda da anlatıldığı gibi W'nin K-tabakası soğurma kıyısıdır. Hem Şekil 19 hem de Şekil 20'den görülebileceği gibi 1000 keV (1 MeV) enerji değerinden büyük enerjili fotonlar için tüm alaşımların ve karşılaştırma materyallerinin zırhlama performanslarının hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, deneysel olarak ikinci sırada belirlediğimiz parametre lineer azaltma katsayısı (LAC ; μ ; cm^{-1}) değerleridir. Bu parametre bir malzemeye gelen foton akısı yoğunluğunun doğrusal olarak malzemedan ilerlerken şiddetindeki azalmayı ifade eder. Bu nicelik, fotondan maddeye aktarılan lineer enerji transferinin (LET) bir ölçüsü olarak tarif edilebilir. Bu değer in fazla olması malzemenin birim uzunluğunda (1 cm) daha fazla fotonun lineer olarak madde ile etkileşim gerçekleştirdiğini gösterir. Bu sebeple, bu değerin herhangi bir foton enerjisinde büyük olması malzemenin birim kalınlığında daha fazla foton zırhladığının bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Bu da incelenen malzemenin gelen foton akı şiddetini daha küçük levha kalınlığında daha yüksek oranda azaltacağı sonucunu ortaya koyar. İncelenen Ni-tabanlı alaşımların ilgilenilen foton enerjilerindeki LAC değerleri ve hata oranlarını içeren sayısal değerler Ek Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerlerin değişimi uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak grafize edilmiş ve Şekil 21'de sunulmuştur. LAC için verilen tablo ve grafik incelendiğinde, düşük foton enerji bölgesinde incelenen alaşımlar için LAC değerlerinin büyüklük sıralamasının Haynes 230 > Monel 400 > Monel K – 500 > Evanohm $\geq$ Alloy 825 şeklinde olduğu açıkça görülebilir.



Şekil 20. İncelenen Ni-tabanlı alaşımların radyasyon zırhlama performanslarının (a) SM betonuna göre ve (b) CN alaşımına göre rölâtif olarak karşılaştırılması.

Yüksek foton enerjilerine gidildikçe tüm alaşımların LAC değerleri arasında oluşan farklılıkların giderek azaldığı ve 1000 keV foton enerjisinden sonra hemen hemen aynı LAC değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bu sıralama ve durum, MAC değerlerindeki sıralama ve durum ile aynıdır. Bu benzerlik, LAC değerlerinin ilgilenilen foton enerjisindeki MAC değerleri ile malzeme yoğunluğunun çarpılması sonucu elde edilmesi ve incelenen Ni-tabanlı alaşımların yoğunluklarının hemen hemen aynı olmasından kaynaklı olarak oluşmuştur. Yine MAC sonuçlarına benzer olarak, LAC değerlerinin de artan foton enerjisi ile eksponansiyel olarak azaldığı ve en yüksek LAC değerlerinin fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde olduğu görülebilir. Ek olarak, tüm alaşımların LAC değerlerinin Fe-tabanlı SM betonundan hemen hemen tüm foton enerjilerinde büyük olduğu saptanmıştır.



Şekil 21. İncelenen malzemelerin LAC değerlerinin uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişimleri.

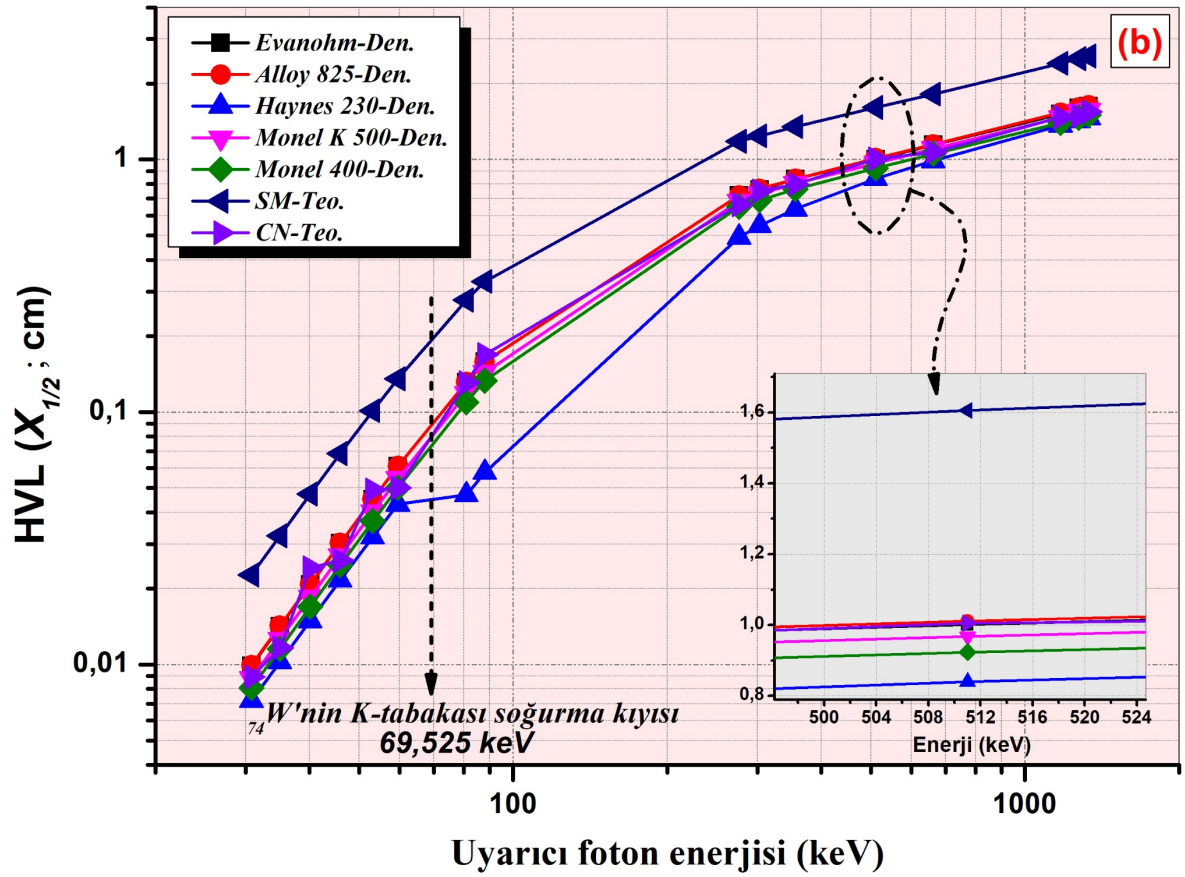
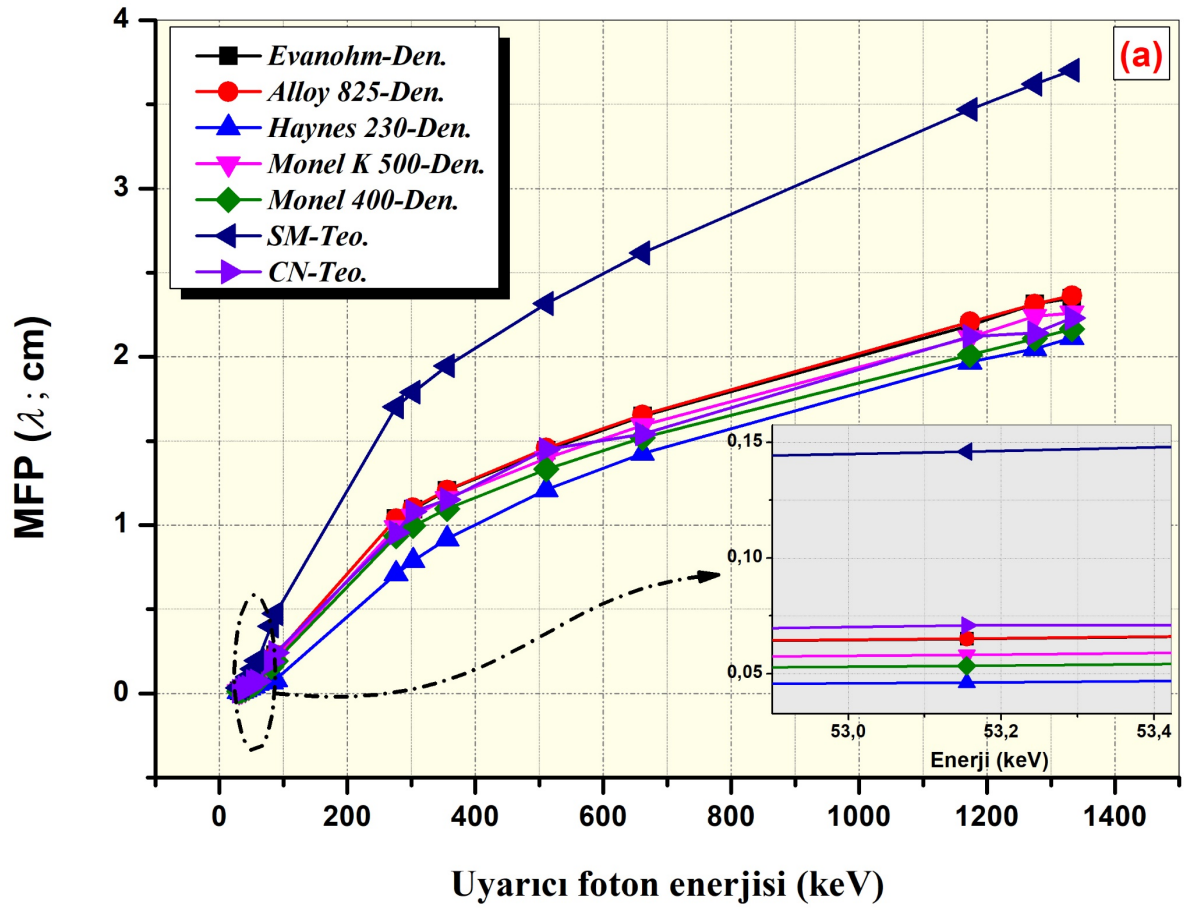
Bu benzerliklerin aksine, incelenen alaşımların karşılaştırılan materyallerden CN alaşımına göre büyüklük sıralamasının foton enerjisine göre farklılaştığı Şekil 21'in içerisine çizilen inset grafiklerinden açıkça görülebilir. Örneğin, 40,118 keV'de CN'nin LAC değeri incelenen Ni-tabanlı alaşımlardan küçük iken, 661,661 keV'de Haynes 230 ve Monel 400 alaşımından küçük diğerlerinden daha büyük LAC değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, doğrudan LAC değerlerine bakılarak malzemelerin radyasyon zırhlama performansları

hakkında tam bir bilgiye ulaşılamayacağını göstergesidir. Ayrıca, Haynes 230 alaşımının en büyük LAC değerlerine sahip olarak diğerlerine göre üstünlüğünü koruduğu ve 70 keV civarındaki foton enerjisinde LAC değerlerinin W'nin K-tabakası soğurma kıyısına bağlı olarak ani bir artış gösterdiği Şekil 21'den gözlemlenmiştir.

LAC değerleri kullanılarak MFP ve HVL değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Bu değerler matematiksel olarak LAC değerlerinin tersi ile orantılı olduğundan LAC değerlerinde elde edilen sonuçların büyüklük sıralamasının tam tersinin bu değerlerde oluşacağı kesindir. Ancak her ne kadar bu değerler LAC değerlerinin tersi ile orantılı olsa da bu değerlerin hesaplanması tıbbi uygulamalarda (özellikle radyoterapide) çok önemlidir. Çünkü bu değerler radyasyon akı şiddetinin azaldığı mesafe değerlerini verir. MFP (ortalama serbest yol), belli bir enerjili fotonun malzeme içerisinde lineer olarak ilerlerken ardışık iki başarılı etkileşim arasında aldığı ortalama mesafeyi gösterirken, HVL (yarı-değer kalınlığı) bir malzemenin üzerine düşen foton akı yoğunluğunu yarıya düşüren levha kalınlığını gösterir. Bu sebeple, MFP ve HVL, özellikle radyoterapide tümör büyüklüğüne göre radyasyon dozunun ayarlanmasında kullanılır. Ayrıca, HVL değerleri nükleer enerji uygulamalarında radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılan malzemelerin gelen radyasyon akı şiddetini minimize etmek için gerekli malzeme kalınlığı hesabında kullanıldığından kullanılan malzemelerin maliyet hesaplamalarının yapılmasında ve karşılaştırılmasında çok önemli bir parametredir. Düşük HVL değerleri daha küçük malzeme kalınlığı anlamına geleceğinden zırhlama için daha az maliyet oluşturacaktır. Bu nedenlerden dolayı literatür açısından faydalı olabilmek için incelenen alaşımların MFP ve HVL değerleri hesaplanmıştır. MFP değerleri Tablo 9'da ve HVL değerleri Ek Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca bu değerlerin uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişimleri Şekil 22'de grafik olarak sunulmuştur. Şekil 22, Tablo 9 ve Ek Tablo 2 incelendiğinde hem MFP hem de HVL değerlerinin uyarıcı foton enerjisi arttıkça exponansiyel olarak arttığı ve en düşük değerlerin fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde elde edildiği belirlenmiştir. Radyasyon zırhlama açısından herhangi bir malzemenin MFP ve HVL değerlerinin düşük olması beklenir. Bu sebeple en düşük MFP ve HVL değerlerine sahip olan malzemenin yine Haynes 230 alaşımı olduğu görülebilir. Ayrıca, tüm incelenen Ni-tabanlı alaşımların SM betonundan daha düşük HVL ve MFP değerlerine sahip olduğu ve CN alaşımına göre değerlerin büyüklük sıralamasının ise foton enerjisine bağlı olarak değiştiği saptanmıştır. Fakat, Haynes 230 dışındaki tüm alaşımların MFP ve HVL değerlerinin ortalama olarak aynı değer aralığında seyrettiği belirlenmiştir. Haynes 230 alaşımı önceden belirtilen sebebe bağlı olarak sahip olduğu özel durumunu burada da açıkça sergilediği ve zırhlama üstünlüğünü koruduğu söylenebilir.

Tablo 9. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların MFP Sonuçları

Enerji (keV)	MFP Değerleri (λ ; cm ⁻¹)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.
30,824	0,0143	0,0002	0,0143	0,0143	0,0001	0,0143	0,0104	0,0001	0,0104	0,0127	0,0001	0,0127	0,0116	0,0001	0,0116
35,000	0,0204	0,0001	0,0204	0,0205	0,0008	0,0205	0,0148	0,0002	0,0148	0,0182	0,0002	0,0182	0,0166	0,0012	0,0167
40,118	0,0299	0,0004	0,0299	0,0300	0,0023	0,0300	0,0215	0,0009	0,0215	0,0267	0,0024	0,0266	0,0244	0,0005	0,0244
45,900	0,0436	0,0092	0,0436	0,0436	0,0024	0,0436	0,0311	0,0011	0,0310	0,0389	0,0013	0,0388	0,0357	0,0012	0,0356
53,155	0,0650	0,0086	0,0651	0,0651	0,0010	0,0652	0,0461	0,0003	0,0461	0,0581	0,0007	0,0580	0,0533	0,0007	0,0533
59,540	0,0881	0,0054	0,0881	0,0881	0,0016	0,0881	0,0623	0,0001	0,0623	0,0787	0,0001	0,0787	0,0723	0,0036	0,0723
80,997	0,1891	0,0051	0,1896	0,1895	0,0026	0,1895	0,0679	0,0001	0,0679	0,1709	0,0106	0,1710	0,1578	0,0024	0,1578
88,037	0,2282	0,0079	0,2290	0,2282	0,0068	0,2289	0,0832	0,0084	0,0833	0,2068	0,0046	0,2073	0,1920	0,0045	0,1915
276,397	1,0388	0,0041	1,0347	1,0388	0,0098	1,0397	0,7105	0,0013	0,7118	0,9870	0,0050	0,9920	0,9357	0,0026	0,9383
302,900	1,0939	0,0024	1,0963	1,1035	0,0015	1,1020	0,7891	0,0021	0,7870	1,0546	0,0014	1,0533	0,9962	0,0097	0,9972
356,000	1,2053	0,0016	1,2037	1,2086	0,0018	1,2105	0,9179	0,0018	0,9197	1,1593	0,0061	1,1599	1,0981	0,1399	1,0995
511,000	1,4442	0,0069	1,4511	1,4585	0,0015	1,4600	1,2118	0,0019	1,2137	1,3962	0,0076	1,4037	1,3328	0,0066	1,3327
661,661	1,6486	0,0015	1,6471	1,6556	0,0020	1,6576	1,4261	0,0022	1,4283	1,5922	0,0034	1,5956	1,5190	0,0031	1,5158
1173,228	2,1861	0,0079	2,1940	2,2072	0,0011	2,2083	1,9690	0,0063	1,9752	2,1151	0,0030	2,1282	2,0124	0,0048	2,0229
1274,537	2,3135	0,0048	2,2887	2,3135	0,0097	2,3038	2,0487	0,0064	2,0651	2,2411	0,0094	2,2202	2,1090	0,0013	2,1104
1332,492	2,3485	0,0077	2,3407	2,3639	0,0078	2,3562	2,1132	0,0058	2,1138	2,2597	0,0089	2,2706	2,1642	0,0060	2,1583



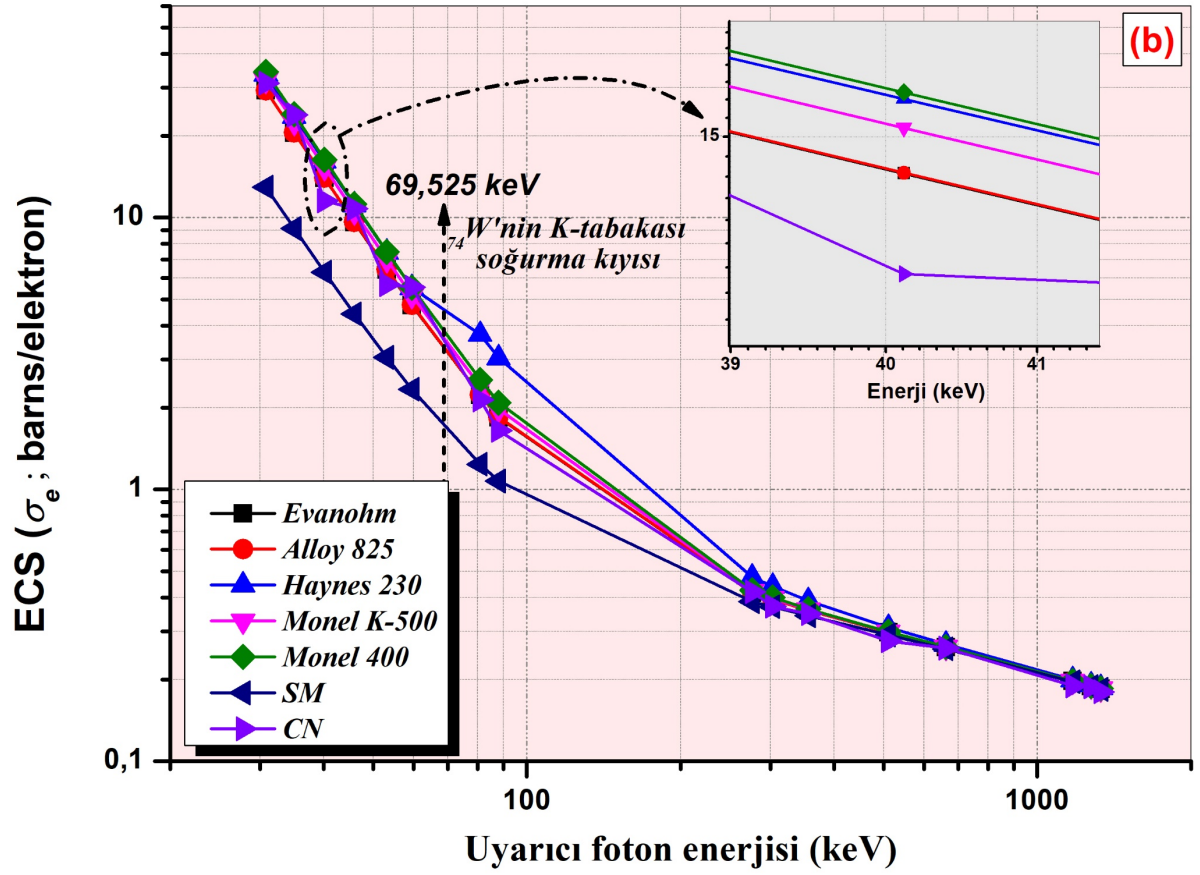
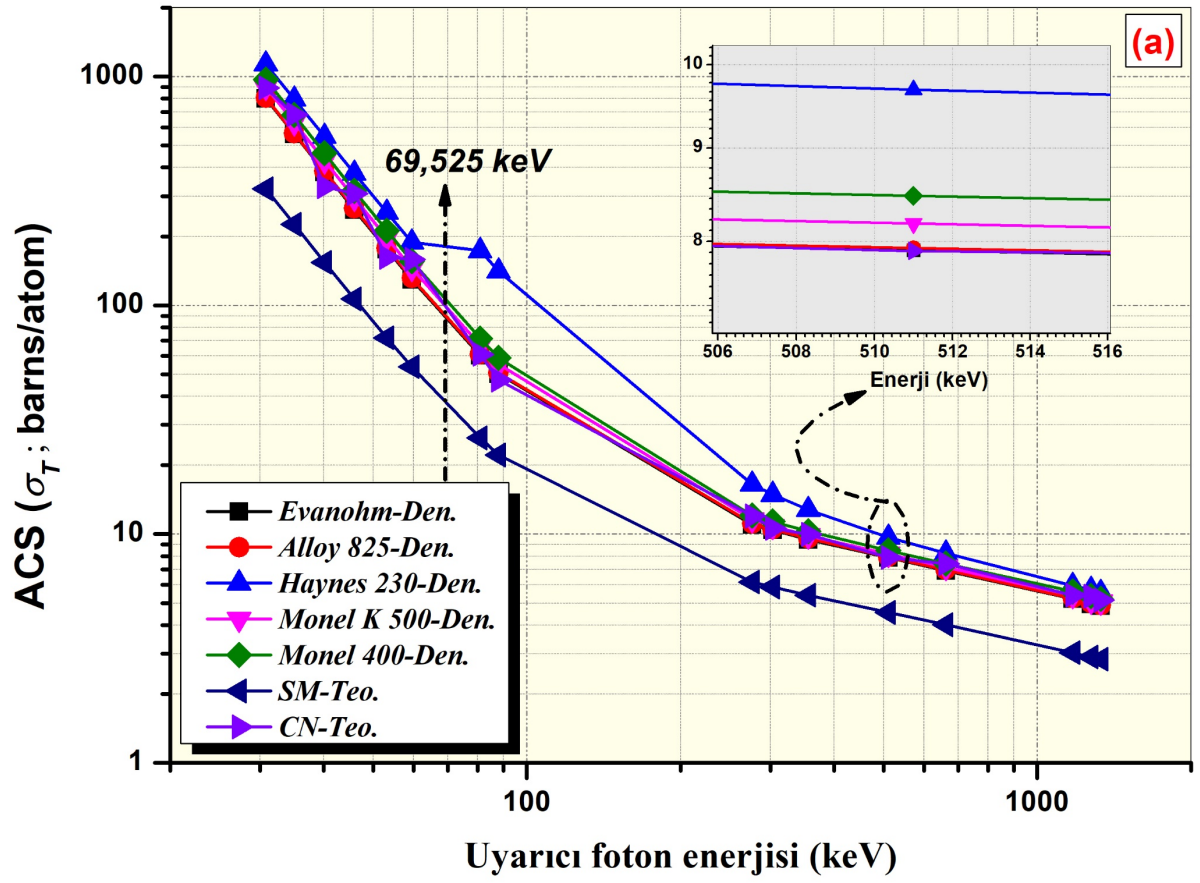
Şekil 22. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının MFP (a) ve HVL (b) değerlerinin değişimleri.

Malzemelerin MAC değerleri kullanılarak ACS parametre değerleri ve malzemeyi oluşturan elementlerin MAC değerleri kullanılarak ECS parametre değerleri uyarıcı foton enerjisine bağlı olarak belirlenmiştir. Atomik tesir-kesiti (ACS; σ_T ; barns/atom veya cm^2/atom), bir atomun üzerine gelen fotonla etkileşebileceği tesir alanı olarak tanımlanabilir. Yani tek bir bireysel atomun gelen uyarıcı fotonla etkileşebileceği düzlemsel tesir alanı (cm^2) olarak tanımlanan ACS değeri, atomik yarıçapın artmasından kaynaklı olarak doğrudan daha büyük bir tesir alanına sahip olacak ve Z 'si büyük olan atomlarda daha büyük olacaktır. Bu sebeple, farklı yarıçaplara sahip farklı tür atomları yapısında barındıran kompleks bir malzemenin sahip olduğu toplam atomik tesir alanı, her bir atomun düzlemsel tesir alanlarının toplamı olacaktır. Buna bağlı olarak, bu malzemeyi temsil eden yeni bir bireysel atom varmış gibi düşünüldüğünde bu temsili atomun (sanal atom) tesir alanı, malzemenin toplam atomik tesir alanının malzemeyi oluşturan toplam atom sayısına oranlanması ile bulunur. İşte bulunan bu değer, malzemenin atomik tesir kesiti olarak tanımlanır ve fiziksel olarak, malzemeyi karakterize eden o temsili atomun fotonla etkileşebileceği tesir alanı olarak yorumlanır. Bundan dolayı, incelenen malzeme için belirli bir foton enerjisinde belirlenen ACS değerleri ne kadar büyükse gönderilen bu uyarıcı fotona karşı bu temsili atomun etkileşim yapabileceği düzlemsel tesir alanı o kadar büyüktür denir. Buda, ACS değerleri arttıkça malzemenin foton zırhlama performansının nicel olarak artacağı anlamına gelir. Benzer şekilde elektronik tesir kesiti (ECS; σ_e ; barns/elektron veya $\text{cm}^2/\text{elektron}$), bir elektronun uyarıcı bir fotonla etkileşim yapabileceği düzlemsel tesir alanı olarak tanımlanabilir. Bu alan malzemenin yapısındaki bağlı ve/veya serbest elektronların toplam sayısının artması ile cebirsel olarak doğrudan artacaktır. ECS değerlerinin artması malzemenin elektronlar vasıtasıyla foton akı şiddetini azaltma potansiyelinin artması anlamına gelmektedir. Bundan dolayı, bu değerlerde doğrudan malzemenin zırhlama performansına etki etmektedir. Verilen bu bilgiler doğrultusunda incelenen Ni-tabanlı alaşımların atomik ve elektronik tesir alanları ölçüsünü belirleyebilmek ve zırhlama performanslarındaki katkılarını anlayabilmek açısından ACS ve ECS değerleri hesaplanmış ve sırasıyla Tablo 10 ve Ek Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca bu parametrelerin uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişimleri Şekil 23'de sunulmuştur.

Şekil 23 incelendiğinde, ACS ve ECS değerlerinin artan foton enerjisine paralel olarak exponansiyel olarak azaldığı açıkça görülebilir. Ayrıca, ACS ve ECS değerleri malzemeyi oluşturan atomların türüne ve bileşim oranlarına bağlı olduğundan farklı malzemeler için aynı foton enerjisinde farklılık gösterebilir. Tablo 10, Ek Tablo 3 ve Şekil 23'den görülebileceği gibi, incelenen numunelerin aynı foton enerjisinde birbirlerinden farklı ACS ve ECS değerlerine sahip olmasının sebebi budur.

Tablo 10. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların ACS Sonuçları

Enerji (keV)	ACS değerleri (σ_T ; barns/atom)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.
30,824	801,492	11,898	801,373	806,827	3,576	806,863	1130,713	9,375	1130,619	900,118	1,205	900,130	970,779	7,107	970,850
35,000	559,736	5,215	559,738	563,401	2,572	563,627	795,149	9,213	795,057	628,983	7,929	629,063	678,884	7,728	678,407
40,118	381,508	5,057	381,458	385,577	2,484	385,282	546,448	2,539	546,673	428,347	7,886	428,726	462,321	8,920	462,232
45,900	261,768	5,274	262,322	265,103	1,658	265,249	377,095	3,132	378,401	293,864	7,192	294,638	316,462	5,178	317,518
53,155	175,728	3,365	175,495	177,590	2,795	177,562	254,516	1,631	254,532	196,815	2,320	196,838	211,979	2,616	211,953
59,540	129,722	3,017	129,642	131,306	2,443	131,281	188,532	0,394	188,536	145,154	0,152	145,156	156,241	7,725	156,164
80,997	60,406	4,288	60,243	61,047	0,823	61,038	172,942	0,182	172,943	66,866	4,151	66,824	71,621	1,094	71,610
88,037	50,053	2,251	49,881	50,691	1,204	50,539	141,143	1,219	141,001	55,250	2,257	55,127	58,850	3,690	58,987
276,397	10,998	1,312	11,041	11,138	1,054	11,127	16,527	0,024	16,497	11,575	1,812	11,518	12,074	3,367	12,041
302,900	10,444	1,290	10,421	10,485	1,421	10,499	14,881	0,400	14,922	10,833	1,405	10,847	11,341	1,106	11,330
356,000	9,478	1,267	9,491	9,573	1,439	9,558	12,793	1,492	12,768	9,855	0,517	9,850	10,289	1,311	10,276
511,000	7,911	0,775	7,873	7,933	0,791	7,925	9,690	0,556	9,675	8,183	1,431	8,139	8,477	0,042	8,478
661,661	6,930	0,626	6,936	6,988	0,855	6,980	8,234	0,254	8,222	7,176	0,541	7,161	7,438	0,539	7,454
1173,228	5,226	0,897	5,207	5,242	0,261	5,239	5,964	0,900	5,945	5,402	0,333	5,369	5,614	0,924	5,585
1274,537	4,938	0,289	4,992	5,001	0,095	5,022	5,732	0,600	5,686	5,098	0,763	5,146	5,357	0,335	5,354
1332,492	4,865	0,604	4,881	4,894	0,606	4,910	5,557	0,153	5,555	5,056	0,438	5,032	5,220	0,439	5,235



Şekil 23. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının ACS (a) ve ECS (b) değerlerinin değişimleri.

Yukarıda açıklananlara ek olarak, asıl ilginç olan nokta ise, ACS ve ECS değerlerinin malzemeler açısından büyüklük sıralamasının farklı foton enerjilerinde değişkenlik göstermesidir. 35 keV’de ACS, değerlerinin malzemeye göre sıralaması Haynes 230 > CN ≥ Monel 400 > Monel K – 500 > Alloy 825 > Evanohm > SM şeklinde iken 40,118 keV’de Haynes 230 > Monel 400 > Monel K – 500 > Alloy 825 > Evanohm > CN > SM olarak elde edilmesi bu duruma örnek olarak verilebilir. Bu durum, malzemeyi karakterize eden temsili atomun ve elektronların uyarıcı fotonun dalga boyuna göre farklı tesir alanları oluşturduğunun bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

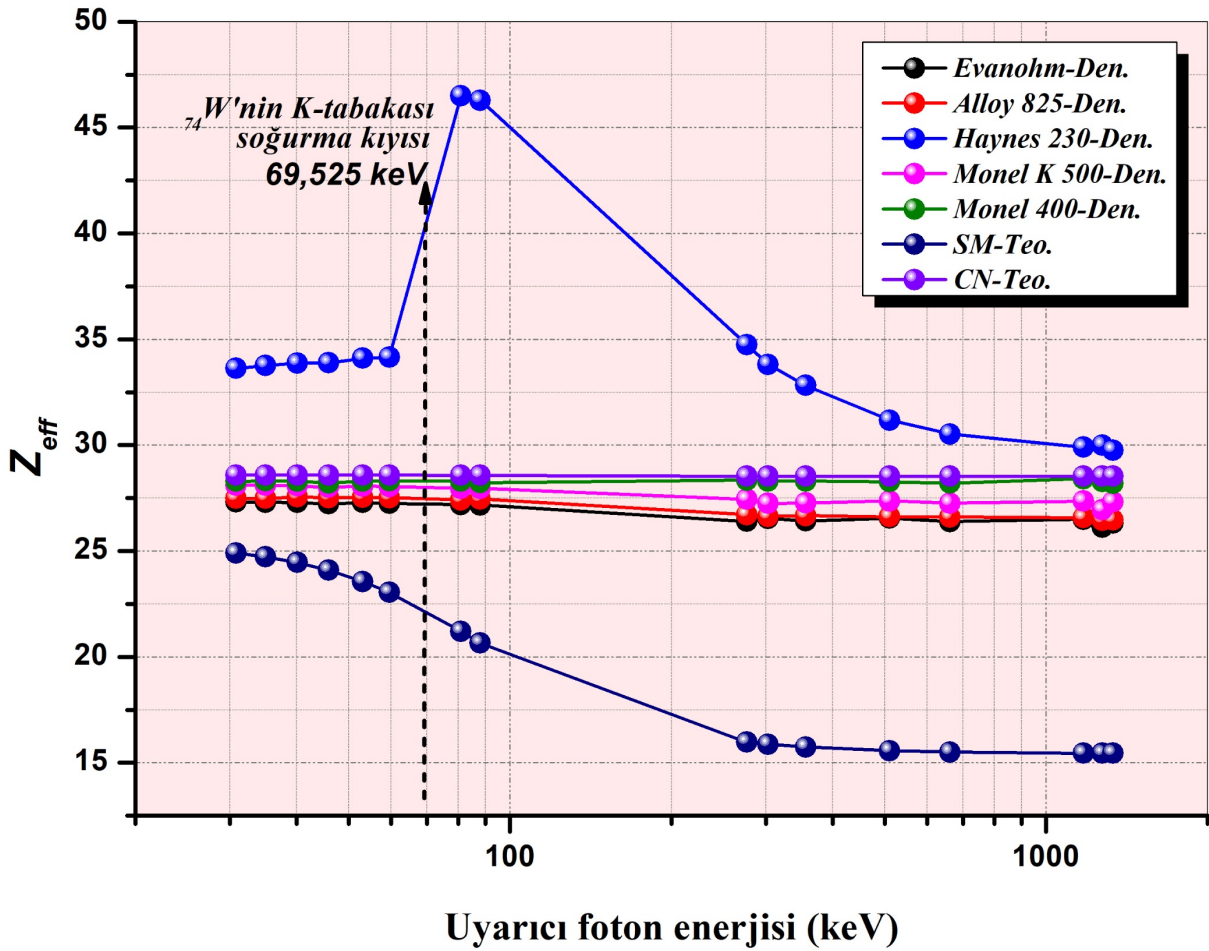
Şekil 23’de yaklaşık 60 keV’den sonra Haynes 230 alaşımının ACS ve ECS değerlerinin ani bir artış gösterdiği açıkça görülebilir. Bu durum yine önceden de bildirildiği gibi Haynes 230 alaşımının yapısındaki W element atomlarının 69,525 keV enerjideki soğurma kıyılarından kaynaklanmaktadır. ACS ve ECS değerlerine göre genel bir değerlendirme yapıldığında, yine en büyük tesir alanlı temsili atomlara sahip alaşımın Haynes 230 olduğu söylenebilir. Bu sonuç, bu alaşımın radyasyon zırhlama yeteneği olarak diğer alaşımlardan üstün olduğunun bir diğer kanıtıdır.

ACS sonuçlarının yorumlanması kısmında da açıklandığı gibi, yapısında farklı bileşim oranlarına sahip birden çok atom türü barındıran kompleks bir malzemenin karakteristiğini temsil eden ve bir dizi malzeme sınıfı içerisinde malzemeyi radyasyon zırhlama kapasitesine göre gruplayan temsili bir atom (sanal atom) olduğunu düşünelim. Bu atomun da uyarıcı fotonun frekansına bağlı olarak bir tesir alanı olduğundan bu atomu temsil eden bir atom numarasına ihtiyaç vardır. İşte bu numaraya etkin atom numarası (Z_{eff}) denir. Etkin atom numarası bireysel atomlarda (örneğin Fe, Ni, Cu, vb.) olduğu gibi tek bir sayı ile temsil edilemez. Bu sebeple bu sayı malzeme çeşidine ve uyarıcı foton enerjisine bağlı olarak değişkenlik arz edebilir ve sonsuz malzeme kombinasyonunun var olması sebebi ile sonsuz ihtimaliyette Z_{eff} değerleri var olabilir. Bu parametrenin büyüklüğü, uyarıcı fotona karşı malzemenin etkileşim ihtimalinin bir ölçüsü olarak değerlendirilir ve zırhlama uygulamalarında ilgilenilen foton enerjilerinde yüksek Z_{eff} değerlerine sahip malzemeler aranır. Belirli bir foton enerjisindeki Z_{eff} değeri malzemenin o foton enerjisindeki ACS değerinin ECS değerine oranlanması ile hesaplanır. Bu çalışmada incelenen alaşımların Z_{eff} değerleri hata oranları ile birlikte Tablo 11’de verilmiştir. Ayrıca bu değerlerin uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak varyasyonlarını gösteren grafiksel sunum Şekil 24’de verilmiştir. Hem grafik hem de tabloda verilen Z_{eff} değerleri incelendiğinde, tüm ilgilenilen foton enerji aralığında malzemelerin sahip olduğu Z_{eff} değerlerinin büyüklüklerine göre sıralama; Haynes 230 > CN > Monel 400 > Monel K – 500 > Evanohm > Alloy 825 > SM olarak saptanmıştır.

Tablo 11. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların Z_{expt} ve Z_{eff} Sonuçları

Alaşımların foton enerjisinden bağımsız beklenen atom numaraları (Z_{expt})															
Evanohm				Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
26,3900				26,5497			29,3337			27,1840			28,2693		
Enerji (keV)	Z_{eff} değerleri														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.
30,824	27,3096	0,4054	27,3055	27,4902	0,1218	27,4915	33,6281	0,2788	33,6253	28,1146	0,0376	28,1150	28,2991	0,2072	28,3012
35,000	27,3023	0,0105	27,3024	27,4881	0,1013	27,4991	33,7552	0,3911	33,7513	28,1067	0,3543	28,1103	28,3214	0,9911	28,3015
40,118	27,2982	0,3619	27,2946	27,5521	0,1068	27,5310	33,8834	0,3976	33,8974	28,0767	0,4833	28,1015	28,3071	0,5461	28,3016
45,900	27,2235	0,7484	27,2811	27,5227	0,5218	27,5379	33,8934	0,6963	34,0108	28,0140	0,3587	28,0878	28,2074	0,3749	28,3015
53,155	27,2943	0,6291	27,2581	27,5312	0,4333	27,5269	34,1067	0,2186	34,1089	28,0618	0,3308	28,0651	28,3046	0,3493	28,3011
59,540	27,2497	0,6841	27,2329	27,5170	0,5120	27,5119	34,1551	0,0714	34,1558	28,0404	0,0294	28,0407	28,3146	0,3999	28,3006
80,997	27,1966	0,3333	27,1235	27,4167	0,3697	27,4130	46,5112	0,0489	46,5117	27,9528	0,7353	27,9355	28,3017	0,4323	28,2974
88,037	27,1758	0,3662	27,0825	27,4528	0,2339	27,3707	46,2913	0,6633	46,2447	27,9580	0,2023	27,8961	28,2303	0,5673	28,2961
276,397	26,4024	0,3521	26,5063	26,7191	0,5285	26,6939	34,7487	0,3578	34,6852	27,4481	0,7810	27,3109	28,3533	0,9062	28,2744
302,900	26,5444	0,8201	26,4863	26,6329	0,6104	26,6690	33,8132	0,0887	33,9043	27,2540	0,5335	27,2894	28,3012	0,7609	28,2736
356,000	26,4238	0,5327	26,4592	26,6753	0,0114	26,6352	32,8277	0,3938	32,7639	27,2742	0,4304	27,2599	28,3084	0,6069	28,2724
511,000	26,5501	0,6697	26,4240	26,6177	0,6536	26,5912	31,1742	0,0068	31,1243	27,3689	0,8182	27,2216	28,2694	0,1397	28,2708
661,661	26,3874	0,3827	26,4112	26,6080	0,2546	26,5755	30,5244	0,6484	30,4780	27,2657	0,8557	27,2073	28,2117	0,8373	28,2702
1173,228	26,4947	0,6195	26,3988	26,5735	0,3220	26,5603	29,9037	0,5243	29,8088	27,3614	0,8812	27,1936	28,4168	0,7979	28,2696
1274,537	26,1160	0,9728	26,3987	26,4484	0,0799	26,5596	30,0080	0,0800	29,7691	26,9396	0,1665	27,1936	28,2873	0,7671	28,2696
1332,492	26,3119	0,6733	26,3989	26,4723	0,6890	26,5595	29,7622	0,8204	29,7540	27,3249	0,1738	27,1938	28,1917	0,7710	28,2696

Alaşımların Z_{eff} değerleri için elde edilen sıralamanın, MAC sıralaması ile aynı olduğu tespit edilmiş olup, bu sonuç ile alaşımların radyasyon zırhlama performansları hakkında kesin bir bilgi elde edilmiş olmaktadır. Buna ek olarak, Şekil 24 incelendiğinde, en yüksek zırhlama performansına sahip Haynes 230 alaşımının Z_{eff} değerlerinin diğer parametrelerde olduğu gibi yaklaşık 70 keV enerji civarında ani bir artış sergilediği görülmektedir. Bu artışın sebebinin ^{74}W element atomlarının K-tabakası soğurma kıyısından (69,525 keV) kaynaklandığı önceden bildirilmişti. Burada önemli olan, bu elementin bu malzemenin soğurma performansını yaklaşık %38 artırması sonucudur. Bu sonuç, radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılacak alternatif zırh malzemelerinin veya reaktör tasarımında kullanılacak malzemelerin dizaynı esnasında Hume-Rothery kuralları çerçevesinde ana alaşım elementinin çözebileceği oranda atomik yarıçapı daha büyük element katkılanması yapmanın gerekli olduğunu göstermektedir.



Şekil 24. Uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının Z_{eff} değerlerinin değişimleri.

Radyasyon zırhlamada kullanılacak malzemede aranması gereken bir diğer önemli husus ise malzemenin sahip olduğu Z_{eff} değerlerinin artan foton enerjisi ile azalmaması gerekliliğidir. Bu durum kullanılan alaşımın yapı stabilitesi ve zırhlama performansı açısından oldukça önemlidir. Bundan dolayı incelenen karşılaştırma numunelerinden Fe-tabanlı SM

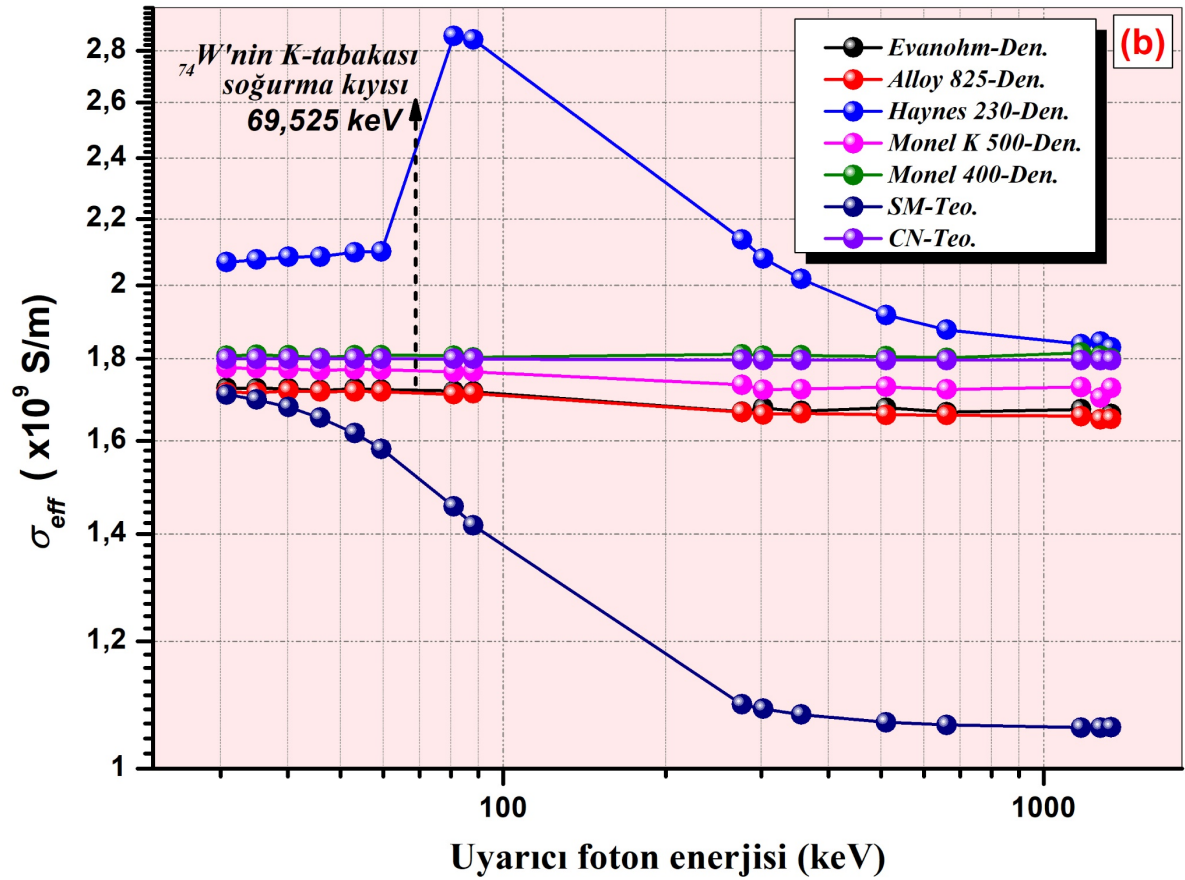
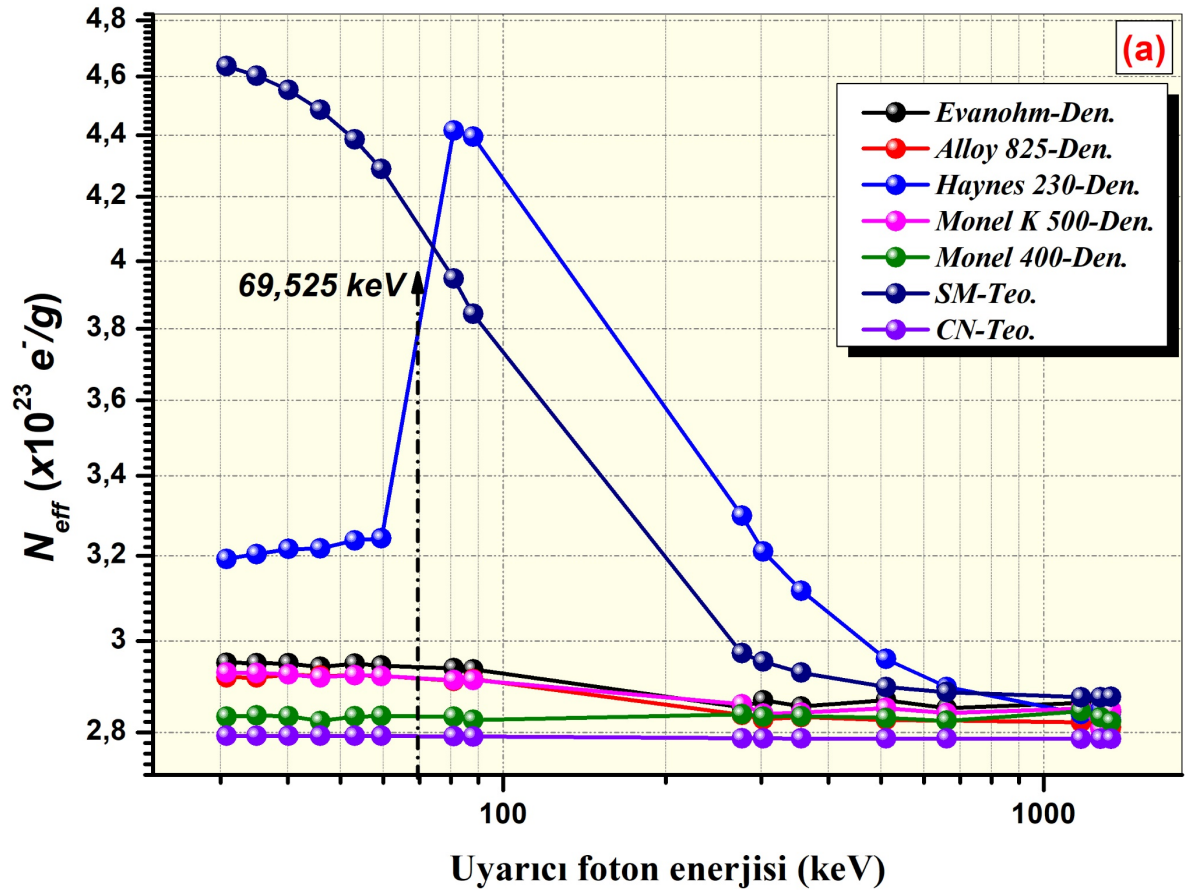
betonunun Z_{eff} değerlerinin artan foton enerjisi ile azaldığı açıkça görülmektedir. Bu sonuç bu malzemenin zırhlama uygulamalarında sahip olduğu yetersizliklerden birisini oluşturur. Ancak diğer karşılaştırma numunesi olan CN alaşımı ve inceleme yaptığımız Ni-tabanlı alaşımların (Haynes 230 hariç) Z_{eff} değerlerinin artan foton enerjisi ile neredeyse sabit kaldığı saptanmıştır. Bu sonuç, alaşımların diğer malzemeler yanındaki tercih edilme olasılıklarının nedenini bir kez daha kanıtlamaktadır.

Herhangi bir malzeme için hesaplanan Z_{eff} değerlerinin hem foton-madde etkileşim mekanizmasına hem de birincil foton enerjisine bağlı olduğunu göstermek amacıyla incelenen alaşımların enerjiden bağımsız beklenen atom numaraları (Z_{expt}) hesaplanmış ve değerler Tablo 11’de verilmiştir. Malzemelerin Z_{eff} değerleri sadece malzemeyi oluşturan atomların cinsine ve mol kesrine bağlı olsaydı incelenen tüm enerjilerde hesaplanan Z_{eff} değerlerinin Z_{expt} değerlerine eşit olması beklenirdi. Çünkü Z_{expt} değerleri, foton-madde etkileşmelerinden bağımsız olarak $Z_{expt} = \sum_i f_i Z_i$ (f_i ve Z_i , malzemedeki i ’inci elementin mol kesri ve atom numarasıdır) eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere Z_{expt} değerleri sadece malzemeyi oluşturan elementlerin mol kesrine ve atom numarasına bağlıdır. Tablo 11 incelendiğinde, malzemeler için elde edilen Z_{eff} değerlerinin azalan sırasının Z_{expt} için de aynı olduğu görülmektedir. Yani en yüksek Z_{eff} değerlerine sahip Haynes 230 alaşımı en yüksek Z_{expt} değerine, en düşük Z_{eff} değerlerine sahip Evanohm alaşımı ise en düşük Z_{expt} değerine sahiptir. Mevcut alaşımların ortalama Z_{eff} değerleri Haynes 230 için 34,312, Monel 400 için 28,289, Monel K-500 için 27,660, Alloy 825 için 27,045 ve Evanohm için 26,830 olarak elde edilmiştir. Bu ortalama değerler ile Z_{expt} değerleri arasındaki mutlak farklar (% farklar) Haynes 230 için %14,51, Monel 400 için %0,07, Monel K-500 için %1,72, Alloy 825 için 1,83 ve Evanohm için %1,64 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç dikkate alındığında atom numaraları birbirine çok yakın elementlerden oluşan karmaşık malzemelerin (Monel 400 gibi) ortalama Z_{eff} değerlerinin Z_{expt} değerlerine çok yakın olduğu ve bu tür malzemeler için Z_{eff} değerlerinin neredeyse enerjiden bağımsız olabildiği sonucuna varılabilir.

Malzemenin birim kütleinde (1 gram) uyarıcı foton ile etkileşim yapabilme ihtimaline sahip elektron sayısı olarak tanımlanabilen N_{eff} (elektron/g) değerleri, Z_{eff} değerlerine benzer bir şekilde hem uyarıcı fotonun dalga boyuna hem de malzemenin türüne bağlı olup saf element atomlarında olduğu gibi tek sayılar ile temsil edilemez. Bu değerler malzemelerin ilgilenilen foton enerjisindeki MAC değerlerinin ECS değerlerine bölünmesi sonucu elde edilebilirler. Bu çalışmada, incelenen alaşımların N_{eff} değerleri Tablo 12’de verilmiştir ve bu değerlerin foton enerjisine bağlı değişimleri ise Şekil 25(a)’da grafik olarak sunulmuştur.

Tablo 12. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların N_{eff} Sonuçları

Enerji (keV)	N_{eff} değerleri ($\times 10^{23}$ elektron/g)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.
30,824	2,9512	0,0438	2,9508	2,9190	0,0129	2,9191	3,1925	0,0265	3,1922	2,9294	0,0039	2,9295	2,8334	0,0207	2,8336
35,000	2,9504	0,0011	2,9504	2,9187	0,1169	2,9199	3,2046	0,0371	3,2042	2,9286	0,0369	2,9290	2,8356	0,1994	2,8336
40,118	2,9500	0,0391	2,9496	2,9255	0,2237	2,9233	3,2167	0,1327	3,2181	2,9255	0,2588	2,9281	2,8342	0,0547	2,8336
45,900	2,9419	0,6212	2,9481	2,9224	0,1616	2,9240	3,2177	0,1104	3,2288	2,9190	0,7668	2,9266	2,8242	0,9386	2,8336
53,155	2,9496	0,3922	2,9457	2,9233	0,0460	2,9229	3,2379	0,0207	3,2382	2,9239	0,0345	2,9243	2,8339	0,0350	2,8336
59,540	2,9448	0,1820	2,9429	2,9218	0,0544	2,9213	3,2425	0,0068	3,2426	2,9217	0,0031	2,9217	2,8349	0,1402	2,8335
80,997	2,9390	0,7925	2,9311	2,9112	0,0393	2,9108	4,4156	0,0046	4,4156	2,9126	0,1808	2,9108	2,8336	0,0433	2,8332
88,037	2,9368	0,0122	2,9267	2,9150	0,8743	2,9063	4,3947	0,4427	4,3903	2,9131	0,6463	2,9067	2,8265	0,6575	2,8331
276,397	2,8532	0,1187	2,8644	2,8371	0,2685	2,8344	3,2989	0,6036	3,2929	2,8600	0,4359	2,8457	2,8388	0,7916	2,8309
302,900	2,8685	0,6289	2,8623	2,8279	0,3834	2,8318	3,2101	0,8628	3,2187	2,8398	0,3682	2,8435	2,8336	0,2764	2,8308
356,000	2,8555	0,3818	2,8593	2,8324	0,4259	2,8282	3,1165	0,6070	3,1105	2,8419	0,1490	2,8404	2,8343	0,3611	2,8307
511,000	2,8691	0,3692	2,8555	2,8263	0,2818	2,8235	2,9596	0,4753	2,9548	2,8517	0,5440	2,8364	2,8304	0,0140	2,8305
661,661	2,8516	0,2575	2,8541	2,8253	0,3456	2,8218	2,8979	0,4413	2,8934	2,8410	0,6101	2,8349	2,8246	0,5844	2,8305
1173,228	2,8632	0,0395	2,8528	2,8216	0,1404	2,8202	2,8389	0,9042	2,8299	2,8510	0,7590	2,8335	2,8452	0,4816	2,8304
1274,537	2,8222	0,0229	2,8528	2,8083	0,1765	2,8202	2,8488	0,2861	2,8262	2,8070	0,6223	2,8335	2,8322	0,1769	2,8304
1332,492	2,8434	0,9373	2,8528	2,8109	0,0923	2,8201	2,8255	0,0779	2,8247	2,8472	0,3727	2,8335	2,8226	0,7781	2,8304

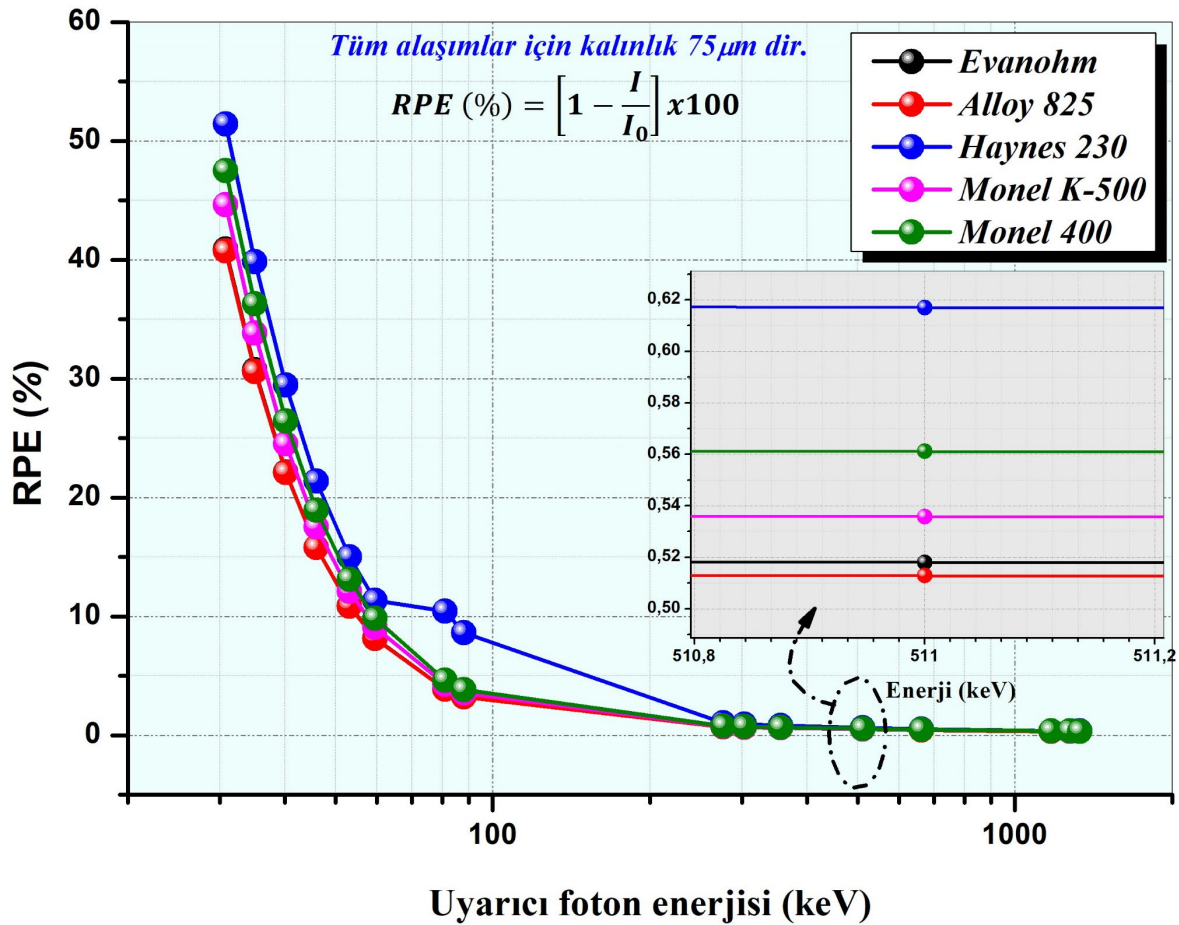


Şekil 25. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının N_{eff} (a) ve σ_{eff} (b) değerlerinin değişim grafikleri.

Şekil 25(a) incelendiğinde, en yüksek N_{eff} değerlerine karşılaştırma malzemesi olarak seçilen Fe-tabanlı SM betonunun sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, Haynes 230 alaşımının yine Compton saçılması olayının baskın olduğu enerji bölgesinde yüksek N_{eff} değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Haynes 230'un bu karakteristiği orta enerji bölgesinde bu alaşımın vazgeçilmez bir zırhlayıcı olarak tercih edilebileceğinin en büyük göstergelerindendir. Ek olarak, Haynes 230 alaşımı hariç diğer alaşımların N_{eff} değerlerinin sıralaması ise $Evanohm > Monel K - 500 > Alloy 825 > Monel 400 > CN$ olarak elde edilmiş olup bu sıralamanın MAC ve Z_{eff} değerleri için belirlenmiş sıralamadan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu durum, malzemeyi oluşturan element atomlarının mol kesrinden ve atomik kütlelerinin büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, “Kuramsal Temeller” bölümünde etkin elektron sayısının bir zırhlama parametresi olamayacağını açıklarken detaylandırdığımız sebebi desteklemektedir. Sonuç olarak, bir malzemenin yapısındaki yüksek atom kütleli elementlerin bolluğu ne kadar fazla ise o malzemenin N_{eff} değerlerinin o kadar küçük olacağı söylenebilir. Ancak yine de uyarıcı fotonlar karşısında malzemenin birim kütlesi başına ne kadar etkileşim gerçekleştirebilecek elektron sayısı bilgisini verdiği için önemli bir parametredir. Bu parametrenin önemli olmasının sebeplerinden birisi de malzemenin etkin iletkenliği hakkında bilgi veren σ_{eff} (S/m) parametresinin hesaplanmasında temel parametre olarak kullanılmasıdır.

Etkin iletkenlik (σ_{eff} ; S/m), malzemelerin yoğunlukları ve etkin elektron sayıları ile doğru orantılıdır. Foton-madde etkileşimi sırasında meydana gelen üç temel baskın olay, malzemenin bağlanmamış (serbest) elektronlarının sayısında değişikliklere yol açabilir. Bu değişiklik, etkin elektron sayısını ve dolayısıyla malzemenin etkin iletkenlik derecesini etkileyebilir. Bu nedenle, σ_{eff} değerleri foton enerjisindeki değişimlerden etkilenebilir. Dolayısıyla bir malzemenin σ_{eff} değerindeki değişiklik iletkenlik gibi bazı özelliklerinin değişmesine neden olabilir. Bu çalışmada, mevcut alaşımların σ_{eff} değerleri belirlenmiş olup ve elde edilen sonuçlar Ek Tablo 4’de verilmiştir. Ayrıca bu değerlerin gelen foton enerjisine göre değişimi Şekil 25(b)’de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde tüm incelenen numuneler için $\sigma_{eff} - E_{foton}$ dağılım grafiği $Z_{eff} - E_{foton}$ dağılım grafiğine benzer olduğu görülebilir. σ_{eff} değerleri, N_{eff} değerlerine doğrudan bağlı olmasına rağmen, grafik yöneliminin Z_{eff} yönelimine benzemesi incelenen malzemelerin yoğunlukları arasındaki farklara atfedilebilir. Elde edilen sonuçlara göre, yine en yüksek σ_{eff} değerlerine Haynes 230 alaşımının sahip olduğu ve diğer alaşımların değerlerinin yaklaşık olarak aynı seyrettiği ve CN alaşımının da bu alaşımlara benzer karakteristik gösterdiği saptanmıştır.

Dar-ışın geometrisinin uygulandığı deney koşullarında hesaplanan son parametre radyasyondan korunma verimliliğidir (RPE). RPE değerleri bir malzemenin gelen foton akı yoğunluğunu yüzdesel azaltma kesri olarak tanımlanabilir. RPE değerlerinin büyüklük veya küçüklüğü malzeme kalınlığına göre doğrudan değişebileceği için malzemelerin radyasyon zırhlama performansları hakkında kesin bilgi vermez. Çünkü kötü zırhlama kapasitesine sahip daha kalın bir malzeme iyi zırhlama kapasitesine sahip çok ince bir malzemeye göre daha yüksek RPE değerlerine sahip olabilir. Bu sebeple RPE değerlerinin anlamlı olabilmesi için karşılaştırma yapılan malzemelerin kalınlıklarının aynı olması şarttır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında tüm incelenen Ni-tabanlı alaşımlar 75 µm olarak eşit kalınlıkta seçilmiştir. İncelenen alaşımların ölçülen RPE değerleri hata payları ile birlikte Ek Tablo 5’de verilmiştir. Ayrıca bu değerlerin değişimleri uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 26’da grafik olarak sunulmuştur.



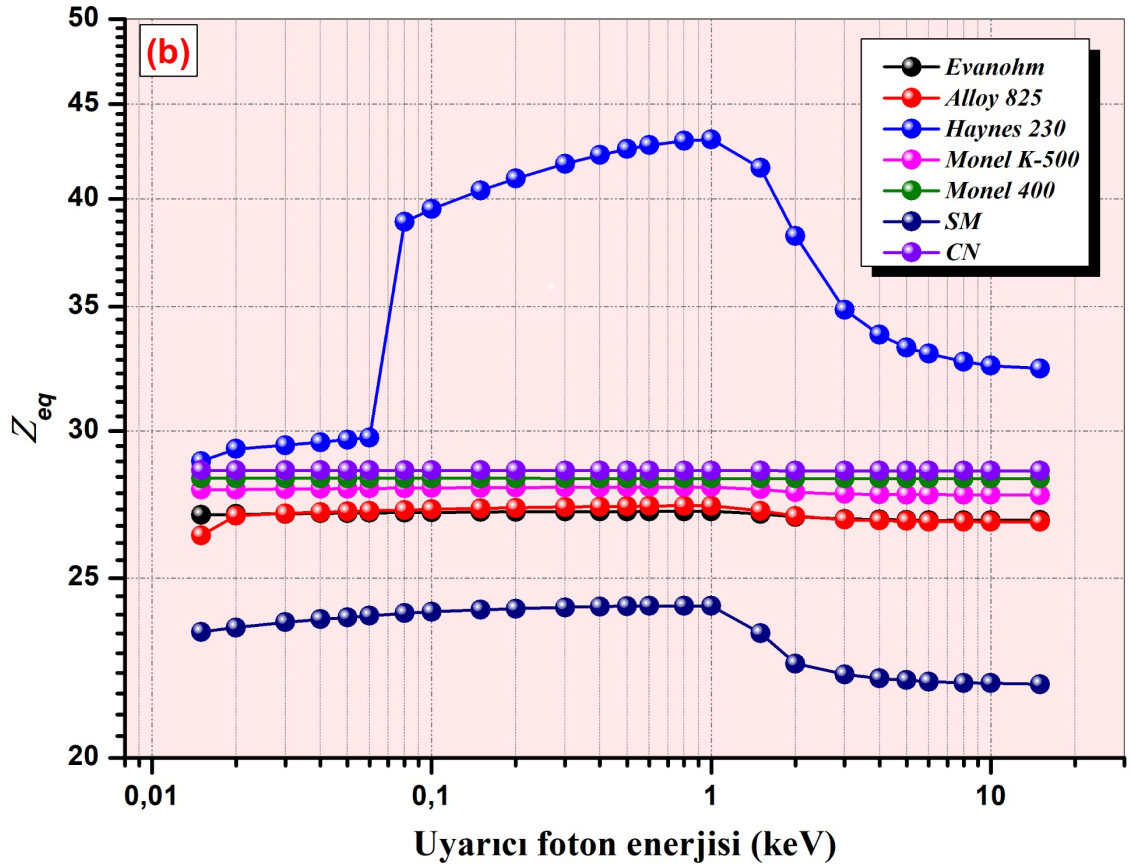
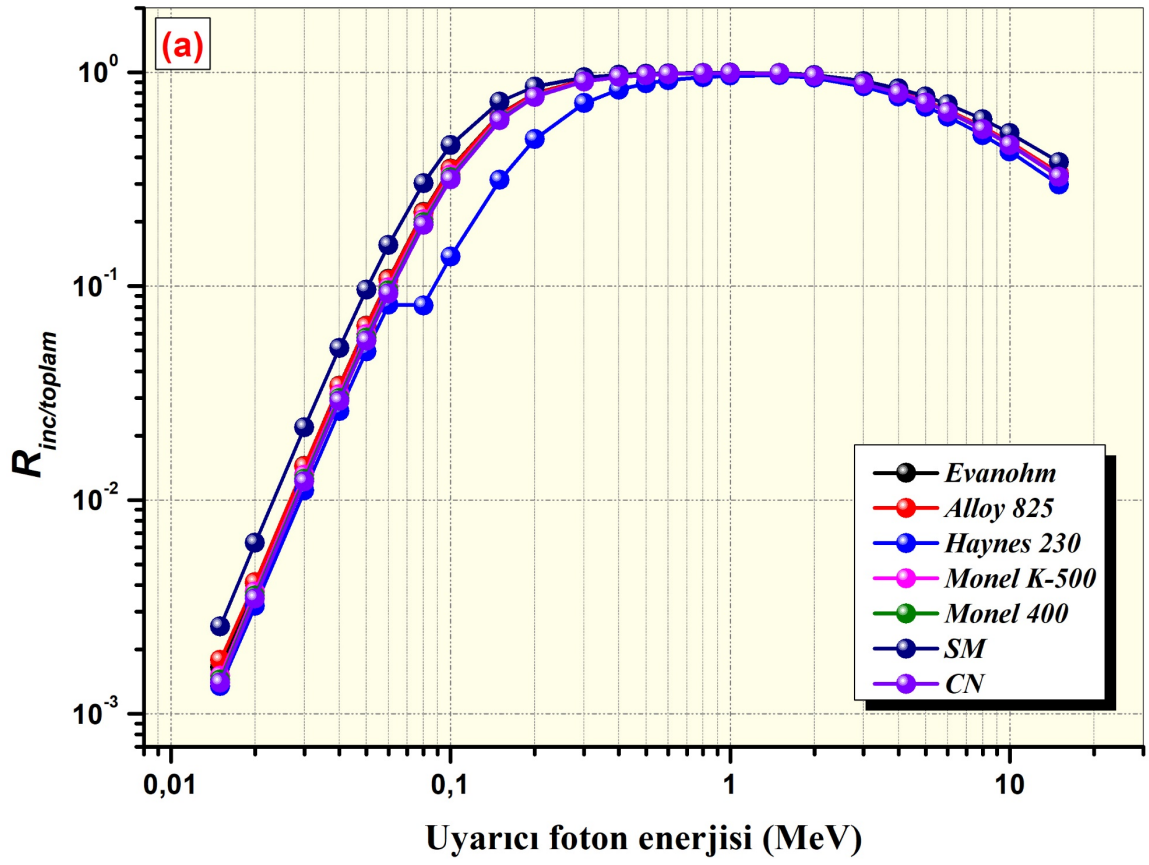
Şekil 26. Uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen Ni-tabanlı alaşımlarının RPE(%) değerlerinin değişimleri.

Şekil 26 incelendiğinde, incelenen alaşımların tüm incelenen foton enerji aralığında radyasyondan korunma verimliliğinin malzemeye göre sıralaması Haynes 230 > Monel 400 > Monel K – 500 > Evanohm ≥ Alloy 825 olarak saptanmıştır. Bu sıralamaya

göre de yine en iyi zırhlama performansı Haynes 230 alaşımına aittir. Ayrıca, alaşımların 75 µm gibi çok ince kalınlıkta RPE değerleri oldukça iyidir denilebilir. Ek olarak, düşük foton enerji bölgesinde Haynes 230 alaşımının çok ince olmasına rağmen yaklaşık %50 oranında gelen foton şuasını azalttığı düşünüldüğünde koruma performansı olarak ortalamanın üzerinde bir performans gösterdiği söylenebilir.

“Kuramsal Temeller” bölümünde anlatıldığı gibi, iyi bilinen Beer-Lambert yasası, dar-ışın iletim geometrisi olmayan deneysel ölçüm sistemlerinde ve numune kalınlığı yüksek olan malzemelerde geçerliliğini yitirmektedir. Bu nedenle, $I = I_0 e^{-\mu x}$ eşitliği ile verilen radyasyon akı şiddeti azaltma ifadesi, β katsayısının müdahil olması ile modifiye edilir ve $I = \beta I_0 e^{-\mu x}$ şekline dönüşür. Buradaki β katsayısına foton kuvvetlendirme faktörü (build-up) denir. Bu faktörün deneysel olarak hesaplanmasının zor ve zaman alıcı olmasından dolayı genellikle teorik olarak hesaplama yoluna gidilir. Bu sebeple, bu tez çalışmasında da build-up faktörleri 15 keV-15 MeV geniş enerji aralığında teorik olarak belirlenmiştir. Bu parametrenin hesaplamasında ilk adım, malzemeye gelen toplam foton sayısının ne kadarının saçılmaya maruz kaldığını belirlemektir. Bu işlem, ilgilenilen tüm foton enerji değerlerinde inkoherent saçılma tesir-kesitlerinin toplam soğurma tesir-kesitlerine bölünmesiyle elde edilir ve $R_{inc/toplam}$ olarak gösterilir. Build-up faktörlerini hesaplamak için gerekli ikinci adım, G-P fit etme katsayıları (a , b , c , d ve X_K) ve Z_{eq} değerlerinin hesaplanmasıdır. İncelenen tüm alaşımların $R_{inc/toplam}$, G-P fit etme katsayıları (a , b , c , d ve X_K) ve Z_{eq} değerleri uyarıcı foton enerjisi değerlerine göre hesaplanmış ve her bir alaşım için sırasıyla Ek Tablo 6-10’da ayrı ayrı verilmiştir. $R_{inc/toplam}$ değerlerinin 15 keV-15 MeV enerji aralığındaki değişimleri Şekil 27(a)’da sunulmuştur. Bilindiği üzere Compton saçılması (ZE^{-1}) elastik olmayan bir saçılma ve orta enerji bölgesinde baskındır. Dolayısıyla toplam tesir-kesitin sabit olması durumunda elastik olmayan saçılma tesir-kesiti orta enerji bölgesinde maksimum seviyeye ulaşır ve neredeyse malzeme bileşiminden bağımsız hale gelir. Daha sonra artan foton enerjisine bağlı olarak Compton saçılma ihtimaliyeti azalır ve yerini çift oluşum olayına bırakır. Çok yüksek enerjilerde ($30 \text{ MeV} \geq E_{foton} \geq 8 \text{ MeV}$) ise baskınlık fotodisintegrasyon olayına ve daha da yüksek enerjilerde ($E_{foton} \geq 150 \text{ MeV}$) mezon üretimi olayına devreder.

Tüm incelenen malzemeler için $R_{inc/toplam}$ değerlerinin artan enerjinin bir fonksiyonu olarak önce keskin bir şekilde artıp belli bir maksimuma ulaştıktan sonra düşme eğilimi göstermesinin temel sebebi, etkileşim ihtimaliyet artışının aratan foton enerjisine göre *Fotoelektrik olay* $\rightarrow$ *Compton saçılması* $\rightarrow$ *Çift oluşumu* şeklinde değişim göstermesidir.



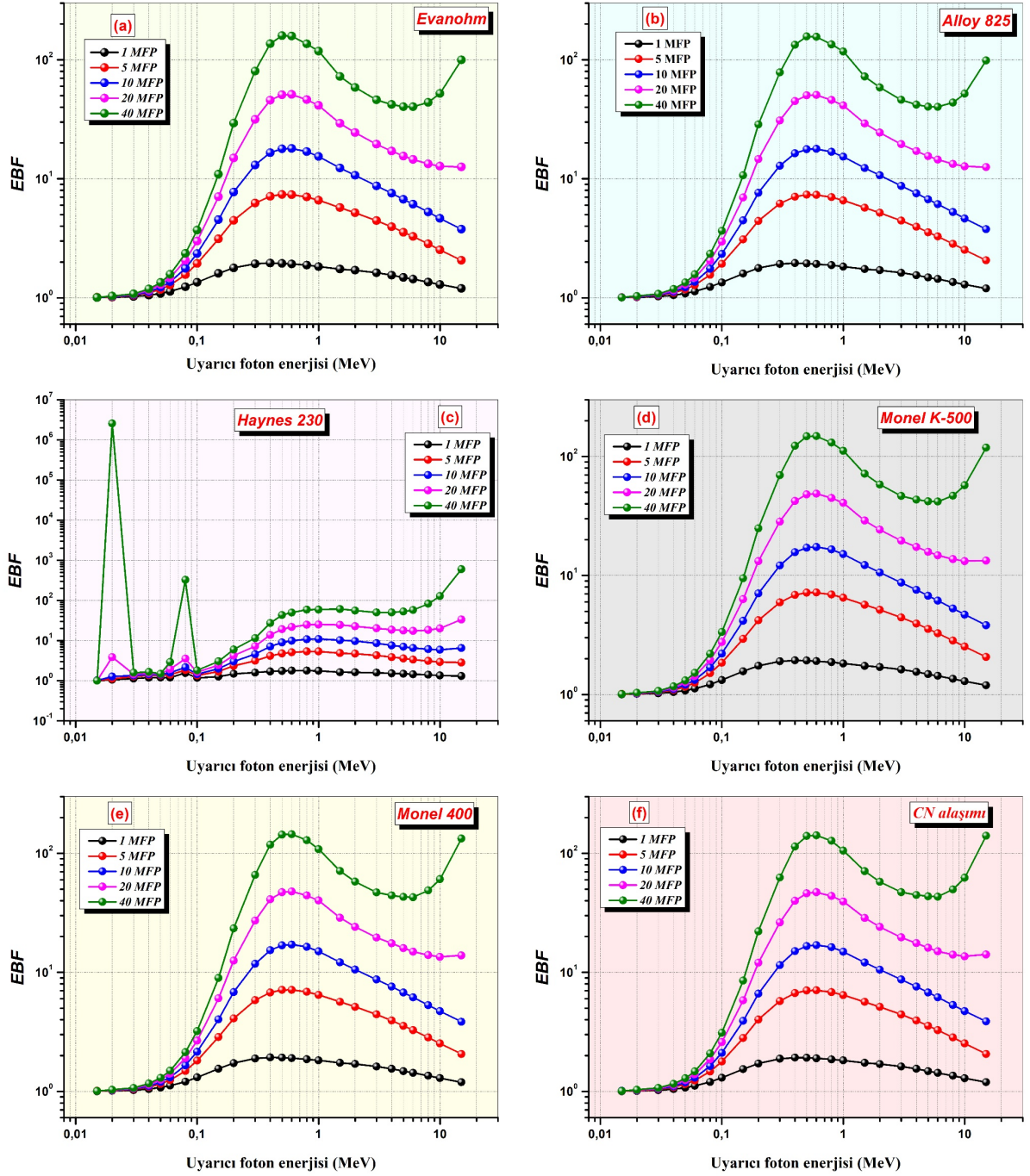
Şekil 27. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen Ni-tabanlı alaşımların ve karşılaştırma numunelerinin $R_{inc/toplam}$ (a) ve Z_{eq} (b) değerlerinin değişim grafikleri.

Şekli 27(a) ve ilgili tablolar incelendiğinde, düşük enerji bölgesinde en yüksek $R_{inc/toplam}$ değerlerine sahip malzemenin Fe-tabanlı SM betonu ve en düşük $R_{inc/toplam}$ değerlerine sahip malzemenin ise Haynes 230 alaşımı olduğu görülebilir. Orta enerji bölgesinde ise tüm numunelerin $R_{inc/toplam}$ değerlerinin yaklaşık olarak birbirlerine eşit ve malzeme içeriğinden bağımsız olarak maksimum olduğu ve çift oluşum bölgesinde tekrar aralarında farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir.

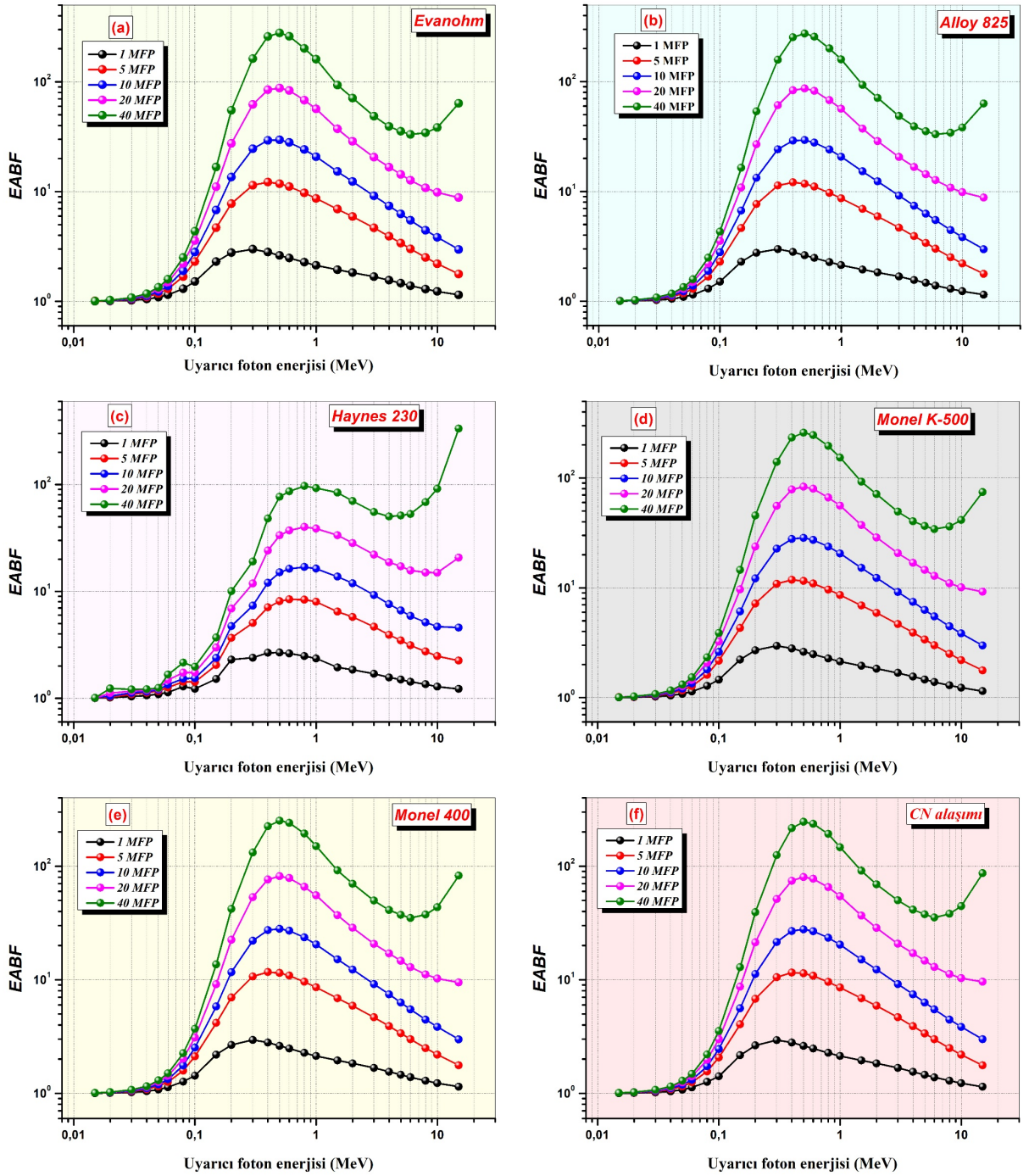
Fotonlar malzemeler tarafından emildiğinde kompleks malzemeyi tanımlayan sanal atom numarası Z_{eff} iken, saçılma durumunda ise bu sanal atom numarası Z_{eq} olarak adlandırılır. Şekil 27(b), incelenen numunelerin Z_{eq} değerlerindeki değişimleri foton enerjisine göre göstermektedir. Haynes 230 alaşımı ve SM betonu dışındaki diğer alaşımlar yapılarında yakın atom numaralı elementleri barındırdığından Z_{eq} değerleri foton enerjisine bağlı olarak büyük dalgalanmalar göstermemiştir. Ancak, Haynes 230 alaşımı yapısında diğerlerine göre daha büyük atom numarasına sahip tungsten (^{74}W) elementini içerdiğinden dolayı, bu alaşımın Z_{eq} değerleri Compton bölgesinde pozitif yönde büyük bir sıçrama yaptıktan sonra tekrar düşmektedir. Genel olarak elde edilen Z_{eq} değerlerinin tüm foton enerji bölgesinde malzemeye göre sıralaması Haynes 230 > CN > Monel 400 > Monel K – 500 > Alloy 825 > Evanohm > SM olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında son olarak, G-P interpolasyon yöntemi kullanılarak incelenen Ni-tabanlı alaşımların EBF (havadaki soğurulmadan kaynaklı build-up faktörü) ve EABF (malzemedeki soğurulmadan kaynaklı build-up faktörü) değerleri uyarıcı foton enerji değerlerinde MFP'nin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları tüm alaşımlar için tek tek tablolar halinde sunulmuştur. EBF değerleri için elde edilen data Ek Tablo 11-15 aralığındaki tablolarda her bir alaşım için tek tek sunulmuştur. Ayrıca, EABF değerleri için elde edilen data Ek Tablo 16-20 aralığındaki tablolarda her bir alaşım için tek tek sunulmuştur. Ek olarak, sonuçları yorumlayabilmek için EBF ve EABF değerleri, uyarıcı foton enerjisinin ve penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olarak grafize edilmiştir. İncelenen alaşımların foton enerjisine karşı EBF ve EABF değişimleri her bir alaşım numunesi için tek tek olmak üzere 1, 5, 10, 20 ve 40 MFP penetrasyon derinlikleri için çizilmiş ve sırasıyla Şekil 28 ve Şekil 29'da sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde, tüm alaşımlarda genel olarak EBF ve EABF değerlerinin benzer karakteristik yönelim gösterdiği saptanmıştır. Yani düşük foton enerji bölgesinde en düşük değerlere sahip olan EBF ve EABF değerleri Compton saçılması bölgesinde maksimum olmakta daha sonra çift oluşumun baskın olduğu bölgeye geçişte tekrar azalma eğilimi göstermektedir. Ayrıca EBF ve EABF değerlerinin şiddetleri tüm foton enerji değerlerinde en yüksek penetrasyon derinliğinde (40 MFP) daha büyük olarak saptanmıştır.

Buda malzeme içerisinde derinlere gittikçe saçılan foton sayısının giderek arttığı anlamına gelmektedir. Ayrıca her iki grafikte de yüksek penetrasyon derinliğindeki EBF ve EABF değerlerinde tüm alaşımlar için yaklaşık 8 MeV foton enerjisinden sonra ani bir artışın oluşması ile kuyruklanma olduğu saptanmıştır. Bu artışın, $30 \text{ MeV} \geq E_{\text{foton}} \geq 8 \text{ MeV}$ enerji bölgesinde baskın bir etkileşme olan fotodisintegrasyon olayı sonrası saçılan gama foton sayısının artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 28. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen alaşımların EBF değerlerinin farklı penetrasyon derinliklerindeki değişim eğrileri.

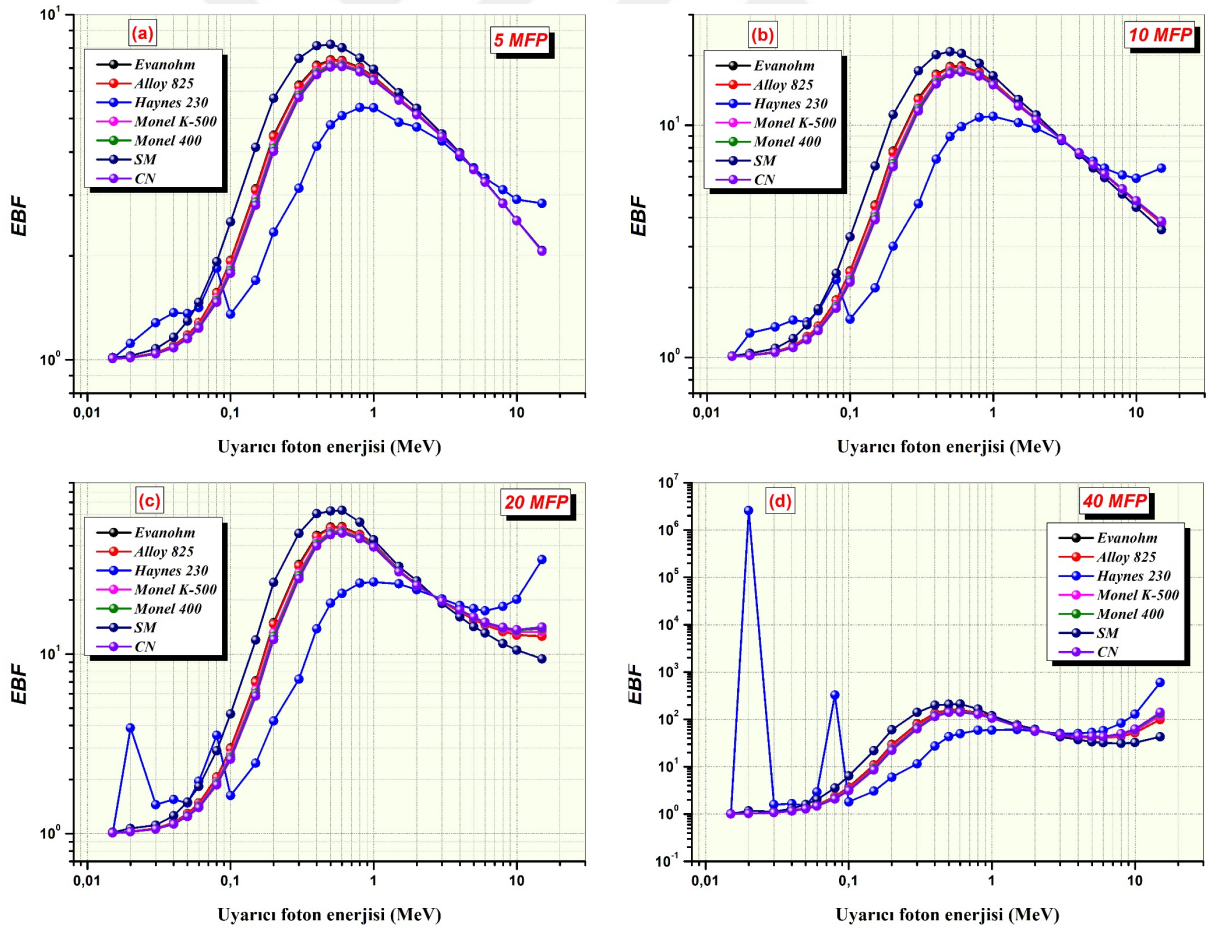


Şekil 29. Uyarıcı foton enerjisine göre incelenen alaşımların EABF değerlerinin farklı penetrasyon derinliklerindeki değişim eğrileri.

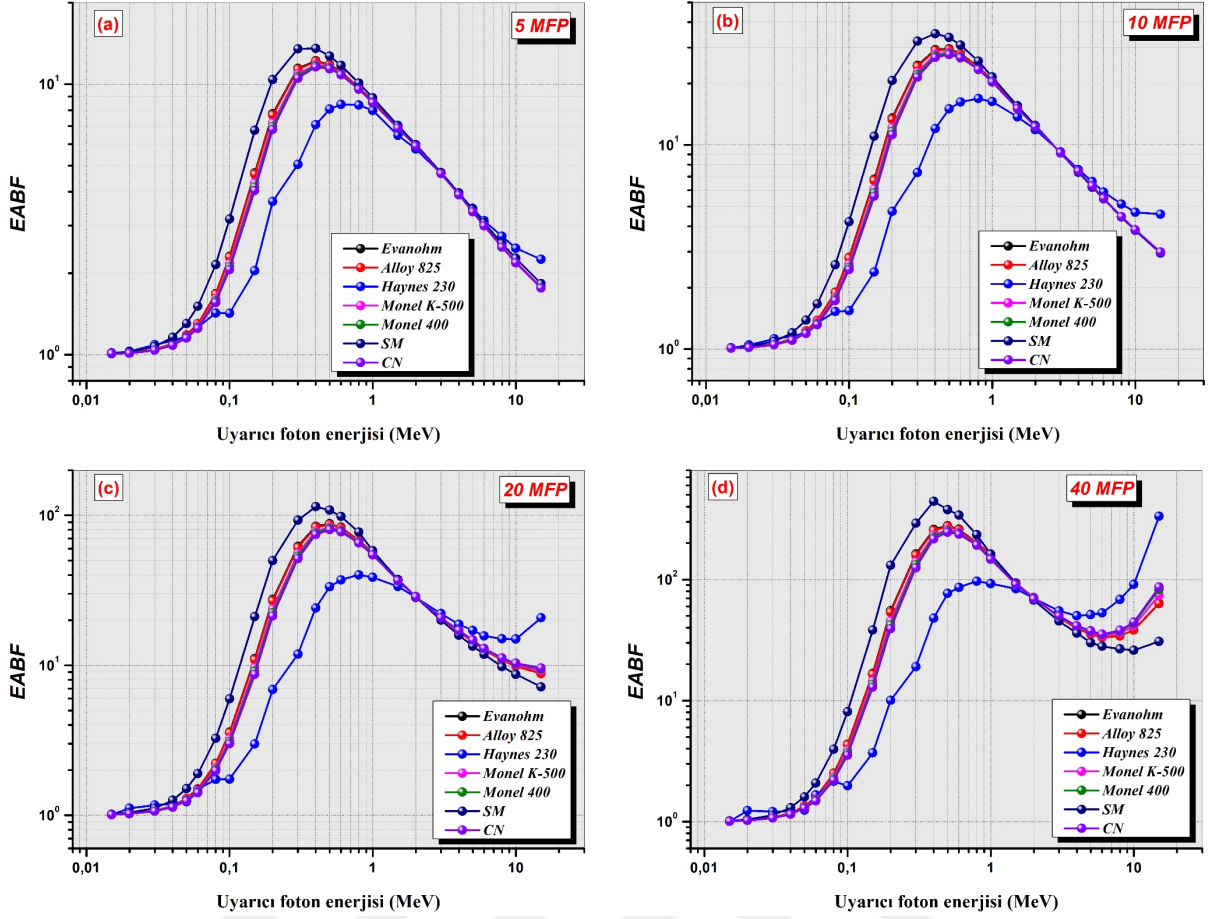
Şekil 28 ve 29 incelendiğinde, Haynes 230 alaşımının düşük enerji bölgesindeki 20 keV ve 80 keV foton enerjisindeki EBF ve EABF değerlerinin ani artış gösterdiği ve bu ani artışın EBF değerlerinde daha belirgin olduğu saptanmıştır. Bu durumun Haynes 230 alaşımının yapısında bulunan Mo elementinin K-tabakası soğurma kıyısı (19,9995 keV) ve W elementinin K-tabakası soğurma kıyısı (69,525 keV) sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Zira, uyarıcı foton enerjileri soğurma kıyısı enerjilerine eşit olduğunda soğurulurken soğurma kıyısından çok az büyük foton enerjileri kısmi enerji aktarımı yapamadıkları için daha fazla saçılırlar.

Bu durum Haynes 230 alaşının belirtilen enerjilerde build-up faktörlerinin ani artış göstermesinin sebebidir. Fotonların saçılma ihtimaliyeti malzeme derinliğinde daha fazla olduğundan bu ani artış daha çok 40 MFP penetrasyon derinliğinde gözlemlenmiştir.

EBF ve EABF değerlerinin malzemeye göre kıyaslamasını yapabilmek için bu değerler, seçilen MFP değerlerinde (5, 10, 20 ve 40 MFP) uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak tüm incelenen numuneler için üst üste çizdirilmiştir. Bu grafikler EBF ve EABF için sırasıyla Şekil 30 ve Şekil 31’de verilmiştir. Bu grafikler ve ilgili tablolar incelendiğinde, düşük penetrasyon derinliklerinde (10 MFP’ye kadar) yaklaşık 5 MeV foton enerjisine kadar ve yüksek penetrasyon derinliklerinde (10 MFP ve daha büyük) EBF ve EABF değerlerinin malzemeye bağılı olarak büyüklük sıralaması genel olarak (özellikle orta enerji bölgesinde olmak üzere) $SM > Evanohm > Alloy\ 825 > Monel\ K-500 > Monel\ 400 > CN > Haynes\ 230$ şeklinde elde edilmiştir. Belirtilen enerjilerden sonra belirlenen sıralamanın tam tersi duruma döndüğü saptanmıştır. Bu durum da yine yukarıda izah edildiğı gibi fotodisintegrasyon olayına atfedilebilir.



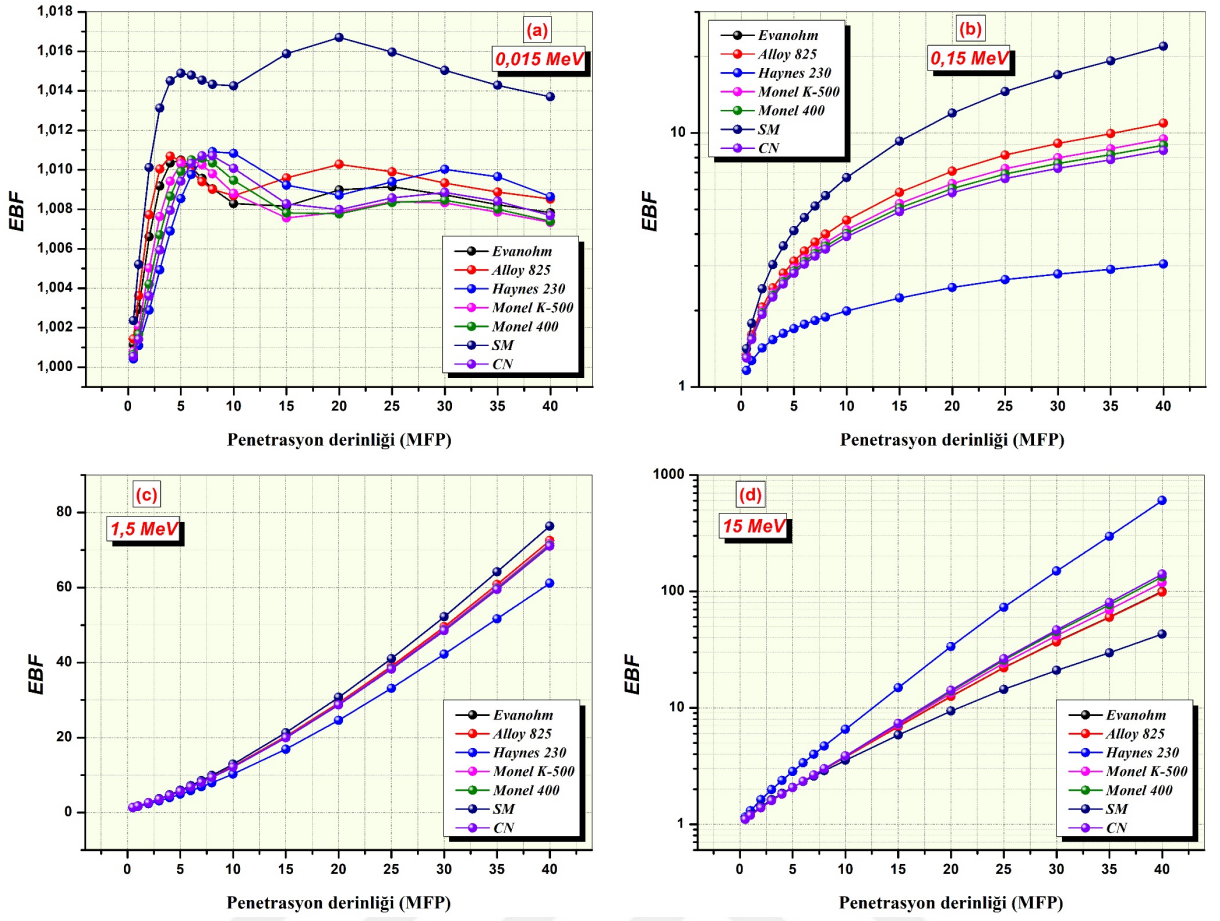
Şekil 30. Farklı penetrasyon derinliklerinde uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EBF değerlerinin birlikte gösterildiğı değışim eğrileri.



Şekil 31. Farklı penetrasyon derinliklerinde uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EABF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.

Yukarıda verilen sıralamaya göre ortalama 2-3 MeV foton enerjisine kadar ki foton enerjisi gerektiren uygulamalarda incelenen malzemeler arasında en az foton saçıcı özelliğe sahip olanın Haynes 230 alaşımı olduğu belirlenmiştir.

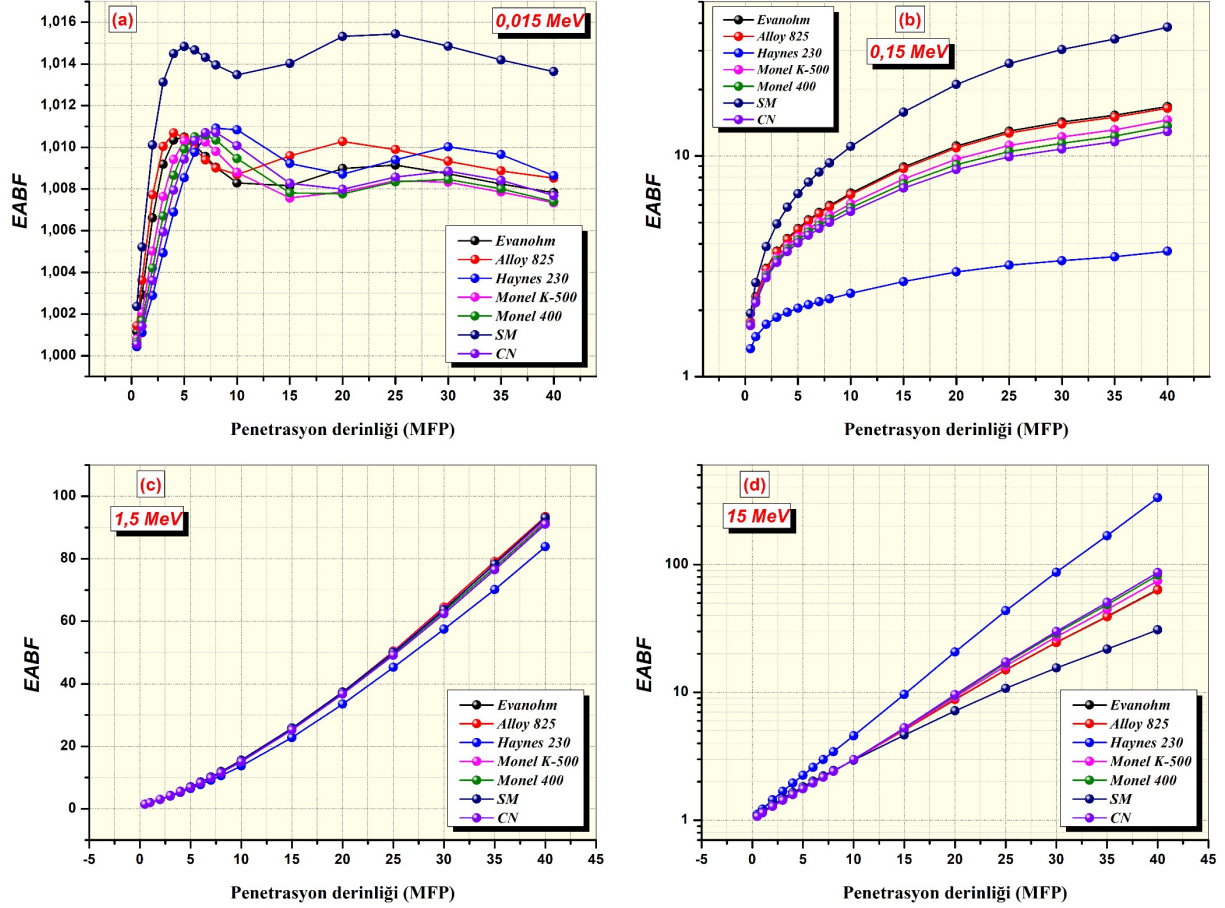
Son olarak, incelenen alaşımların EBF ve EABF değerlerinin penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olarak değerlendirmesini yapabilmek için seçilen foton enerjilerinde (0,015 MeV, 0,15 MeV, 1,5 MeV ve 15 MeV) ortalama serbest yolun (MFP) değişimine göre EBF ve EABF değerlerinin değişimleri tüm alaşımlar için birlikte grafize edilmiştir. Bu grafikler, EBF değerleri için Şekil 32’de ve EABF değerleri için Şekil 33’de sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde, düşük foton enerjilerinde hem EBF değerlerinin hem de EABF değerlerinin yaklaşık değerinin 1 olduğu saptanmış olup bu değer penetrasyon derinliğine bağlı olarak da çok fazla değişim göstermediği gözlemlenmiştir. Buda düşük foton enerjilerinde incelenen alaşımların foton saçma etkisinin bir önemi olmadığı sonucunu doğurmuştur. Ancak, yüksek enerjilere gidildikçe bu faktörlerin logaritmik olarak arttığı gözlemlenmiş ve dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir. Ek olarak, incelenen alaşımların EBF ve EABF değerlerinin hem uyarıcı foton enerjisine hem de penetrasyon derinliğine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu saptanmıştır.



Şekil 32. Farklı foton enerjilerinde penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EBF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.

Sonuç olarak, tez kapsamında çalışılan tüm parametreler için elde edilen veriler birlikte değerlendirildiğinde, nükleer enerji uygulamalarında kullanılabilmesi için gerekli optimal özelliklere sahip Ni-tabanlı alaşımların uygun adaylar olduğu belirlenmiş ve bu alaşımların hem soğurulan hem de saçılan radyasyon açısından gerekli tüm parametreleri ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan deneyler ve hesaplamalar neticesinde Ni-tabanlı alaşımların nükleer enerji santrallerinde halihazırda zırhlama malzemesi olarak kullanılan Fe-tabanlı SM betonundan oldukça iyi ölçüde radyasyon zırhlama performansına sahip olduğu ve yine bu malzemeye göre daha düşük oranlarda foton saçılmasına neden olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, bu alaşımların genel olarak nükleer uygulamalar için aday olabileceğinin göstergesidir. Ancak, önemli olan bu adaylar arasından en verimli olanını tespit etmektir. Bu doğrultuda, hem malzemenin karakteristik özellikleri hem de zırhlama performansları birlikte değerlendirilerek karar verilmesi ve seçim yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda elde edilen veriler doğrultusunda, incelenen Ni-tabanlı alaşımlar arasından hem en iyi foton soğurma özelliği hem de en az foton saçma özelliği göstermesinden kaynaklı olarak en iyi iyonize radyasyon zırhlama performansına sahip olan alaşımların Haynes 230 olduğu saptanmıştır. Ayrıca, bu alaşımların karşılaştırma için kullanılan ve literatürde iyi bir radyasyon soğurucu materyal olarak önerilen

Cu-tabanlı Cupero-Nikel alaşımdan da çok iyi radyasyon zırhlama yeteneğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca ek olarak, Tablo 6'da verilen özelliklerde dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında seçilen bu beş farklı alaşım arasında fiziksel, kimyasal, elektriksel, mekanik ve termal özellikler açısından ortalama olarak en iyi olanının Haynes 230 olduğu saptanmıştır. Bundan dolayı, bu tez çalışmasının bir sonucu olarak Haynes 230 alaşımının nükleer uygulamalar için umut verici bir malzeme olduğu söylenebilir.



Şekil 33. Farklı foton enerjilerinde penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olarak incelenen numunelerin EABF değerlerinin birlikte gösterildiği değişim eğrileri.

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç ve Öneriler

Artan teknolojik uygulamalar ile hayatımızın her aşamasına nüfus etmiş olan radyasyon, yararlı uygulamalarda kullanılsa bile onun yıkıcı etkisinin oluşturabileceği olumsuzlukların önlenmesi açısından radyasyondan korunma göz ardı edilmemesi gereken bir gerçektir. Bunun için radyasyonun üretildiği ve/veya kullanıldığı uygulama alanlarında (radyoterapi, nükleer reaktörler, gıda sterilizasyonu, uzay araştırmaları, kristalografik araştırmalar, vb.) özellikle iyonize radyasyonun yıkıcı etkisinden korunmak için zırh malzemelerin kullanılması son derece önemlidir. Her ne kadar halihazırda zırh malzemesi olarak kullanılan materyaller (kurşun, kurşun türevi malzemeler, ağır metal katkılanmış betonlar, vb.) var olsa da bu malzemelerin bazı yetersiz özellikleri bazı uygulama alanları için onların kullanımını sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı, özellikle nükleer enerji uygulamalarında kullanılabilecek ölçüde üstün özelliklere sahip yeni alternatif zırh malzemelerinin keşfi ve tasarımı son derece gereklidir. Bu gereklilik, bu çalışmanın temel amacı olmuştur. Bu amaç doğrultusunda bu tez çalışmasında, bir nükleer uygulamada kullanılabilecek malzemenin sahip olması gereken optimal koşulları taşıyan ve Evanohm, Alloy 825, Haynes 230, Monel K-500 ve Monel 400 olarak adlandırılan beş farklı Ni-tabanlı alaşımın radyasyon zırhlama performanslarını belirleyerek aralarından en uygun alaşımın seçilmesine ve nükleer uygulamalar için entegrasyonunun yapılmasına odaklanılmıştır. Bunun için, bu alaşımların radyasyon zırhlama parametrelerini deneysel olarak belirleyebilmek için dar-ışın iletim geometrisinde yedi farklı radyoaktif kaynaktan (^{241}Am , ^{133}Ba , ^{109}Cd , ^{152}Eu , ^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co) yayımlanan on altı farklı foton enerjisi (30-1333 keV aralığında) için EDXRF tekniği kullanılarak foton iletim ölçümleri alınmıştır. Ölçümlerden elde edilen spektral datalar kullanılarak incelenen alaşımların kütle azaltma katsayıları (MAC), lineer azaltma katsayıları (LAC), ortalama serbest yolları (MFP), yarı-değer kalınlıkları (HVL), atomik ve elektronik tesir kesitleri (ACS ve ECS), etkin atom ve elektron sayıları (Z_{eff} ve N_{eff}) ve etkin iletkenlik (σ_{eff}) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Hata sınırları içerisinde doğru değerlendirme yapabilmek için tüm parametreler Phy-X/PSD yazılımı aracılığı ile teorik olarak da hesaplanmıştır. Ek olarak, incelenen alaşımların foton saçma durumlarını da değerlendirmek için $R_{\text{inc/toplam}}$, Z_{eq} ve build-up faktörleri (EBF ve EABF) 0,015-15 MeV geniş enerji aralığında Phy-X/PSD yazılımı aracılığı ile hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar nükleer uygulamalarda halihazırda zırh malzemesi olarak kullanılan Fe-

tabanlı çelik-manyetit (SM) betonu ve literatürde iyi bir zırhlayıcı olarak önerilen Cu-tabanlı Cupero-Nikel alaşımının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen tüm datalar sonucunda, incelenen malzemelerin radyasyon zırhlama performans sıralaması Haynes 230 > CN > Monel 400 > Monel K – 500 > Evanohm > Alloy 825 > SM olarak belirlenmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre, Haynes 230 alaşımın diğer alaşımlardan ortalama olarak yaklaşık %40 daha fazla zırhlama performansı gösterdiği saptanmıştır. Bu sonuca ek olarak, Haynes 230 alaşımının incelenen diğer Ni-tabanlı alaşımlara göre daha iyi kırılma direncine ($\% < 50$), daha iyi gerilme direncine (860 MPa), daha iyi elastik modülüne (211 GPa), daha düşük termal iletkenliğe (23 °C’de 8,9 W.m⁻¹.K⁻¹), daha düşük özgül ısıya (23 °C’de 397 J.K⁻¹.kg⁻¹), daha büyük yoğunluğa (8,97 g/cm³), düşük termal genleşme katsayısına (20-150 °C’de 13x10⁻⁶ K⁻¹) ve yüksek erime noktasına (~1350 °C) sahip olduğu belirlenmiştir. Literatüre göre, en iyi radyasyon zırhlayıcı materyal olarak bilinen kurşunun (Pb) yoğunluğu 11,34 g/cm³, erime noktası 327,5 °C, gerilme direnci 18 MPa, elastik modülü 14 GPa ve öz ısı 130 J.K⁻¹.kg⁻¹ dir. Haynes 230 alaşımının değerleri Pb’nin değerleri ile kıyaslandığında bu alaşımın optimal şartları kurşundan çok daha iyi ölçüde sağladığı açıkça görülebilir. Sonuç olarak, Haynes 230 alaşımının taşıdığı bu üstün karakteristik özellikler ile nükleer uygulamalarda kullanılabilecek optimal malzeme özellikleri denilen koşulları karşılamasına dayanılarak bu alaşımın nükleer uygulamalar için umut verici bir malzeme olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, bu alaşımın nükleer uygulamalarda reaktör tasarımında, nükleer enerji santrallerinde zırh tasarımında ve iyonize radyasyon uygulamalarında koruyucu malzeme olarak kullanılabileceği önerilmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasının radyasyon zırhlama uygulamaları için malzeme tespiti ve tasarımı hakkında yapılan çalışmalara ışık tutması umut edilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdalsalam, A. H., Sayyed, M. I., Ali Hussein, T., Şakar, E., Mhareb, M. H. A., Ceviz Şakar, B., ... Kaky, K. M. (2019). A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi₂O₃ nanocomposites. *Chemical Physics*, 523, 92-98. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMPHYS.2019.04.013>
- Abdelgawad, K. R. M., Ahmed, G. S. M., Farag, A. T. M., Bendary, A. A., Salem, S. M., Tartor, B. A., & Bashter, I. I. (2023). Structure and gamma-ray attenuation capabilities for eco-friendly transparent glass system prepared from rice straw ash. *Progress in Nuclear Energy*, 158, 104586. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2023.104586>
- Abdelghany, A. M., Alsaif, N. A. M., Madshal, M. A., ElBatal, H. A., Rammah, Y. S., & Awad, W. (2023). Structural, optical and radiation shielding parameters of sodium aluminium borate glasses modified with chromium oxide. *Radiation Physics and Chemistry*, 207, 110861. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2023.110861>
- Abdel-latif M, A., & Kassab, M. M. (2022). Effect of chromium contents on radiation shielding and macroscopic cross-section in steel alloys. *Applied Radiation and Isotopes*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110263>
- Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., & Mavi, B. (2005). The shielding of γ -rays by concretes produced with barite. *Progress in Nuclear Energy*, 46(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2004.09.015>
- Akman, F., Kilicoglu, O., & Agar, O. (2023). Feasibility of a novel shield of nuclear radiation with W–Ni–Fe–Co and La–Bi alloys alternative to Pb and ordinary concrete absorbers. *Progress in Nuclear Energy*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104537>
- Akman, F., Ozkan, I., Kaçal, M. R., Polat, H., Issa, S. A. M., Tekin, H. O., & Agar, O. (2021). Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109470>
- Aksoy, C. (2021). The X-Ray fluorescence parameters and radiation shielding efficiency of silver doped superconducting alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109543>
- Al-Hadeethi, Y., & Sayyed, M. I. (2020). BaO–Li₂O–B₂O₃ glass systems: Potential utilization in gamma radiation protection. *Progress in Nuclear Energy*, 129, 103511. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2020.103511>
- Alım, B. (2012). *Dış Manyetik Alanda Geçiş Metal Alaşımlarının K Tabakası X-Işını Şiddet Oranları ve Valens Elektron Yapılarının Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 312936).
- Alım, B. (2017). *Tavlama Sıcaklığı, Basınç ve Dış Manyetik Alanın Şekil Hafızalı Nanoalaşımların X-Işını Şiddet Oranları ve Valens Elektron Yapıları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 498409).
- Alım, B. (2020). A comprehensive study on radiation shielding characteristics of Tin-

- Silver, Manganin-R, Hastelloy-B, Hastelloy-X and Dilver-P alloys. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 126(4). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-3442-7>
- Alım, B., Özpolat, Ö. F., Şakar, E., Han, İ., Arslan, İ., Singh, V. P., & Demir, L. (2022). Precipitation-hardening stainless steels: Potential use radiation shielding materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110009>
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M. I., & Demir, L. (2020). Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108455>
- Alım, B., Şakar, E., Han, İ., & Sayyed, M. I. (2020). Evaluation the gamma, charged particle and fast neutron shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part II. *Radiation Physics and Chemistry*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108454>
- Almutairi, H. M., Al-Saleh, W. M., Abualsayed, M. I., & Elsafi, M. (2023). Effect of Cerium (IV) Oxide Particle Size on Polydimethylsiloxane Polymer to Form Flexible Materials against Ionizing Radiation. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 2883, 15(13), 2883. <https://doi.org/10.3390/POLYM15132883>
- Alzahrani, J. S., Alrowaili, Z. A., Mutuwong, C., Olarinoye, I. O., & Al-Buriahi, M. S. (2023). Radiation shielding competence of chalcogenide alloys with high Te content. *Applied Radiation and Isotopes*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110759>
- Aral, İ. (2019). *Alumina ve Zirkonya Esaslı Seramiklerin Nükleer Zırhlama Kabiliyetlerinin MCNP-X Kodu ile Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 610148).
- Ardiansyah, A., Heryanto, H., Armynah, B., Salah, H., Sulieman, A., Bradley, D. A., & Tahir, D. (2023). Physical, mechanical, optical, and gamma radiation shielding properties of the BaO-based glass system prepared by the melt-quench technique: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 210, 111059. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2023.111059>
- Arslan, İ. (2019, Mayıs). *Alüminyum Alaşımlarının Değişen Döküm Şartlarında Mekanik ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 553990).
- Arya, A. P. (1999). *Çekirdek Fiziğinin Esasları*. (Y. Şahin, Ed.). İstanbul: Aktif Yayınevi.
- Atakan, Y. (2014). *Radyasyon ve Sağlığımız?* (Y. Atakan, Ed.) (C. 1). Ankara: Nobel.
- Axinte, D. A., Andrews, P., Li, W., Gindy, N., & Withers, P. J. (2006). Turning of advanced Ni based alloys obtained via powder metallurgy route. *CIRP Annals*, 55(1), 117-120. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60379-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60379-5)
- Aygun, Z., & Aygun, M. (2022). Radiation Shielding Potentials of Rene Alloys by Phy-X/PSD Code. *Acta Physica Polonica A*, 141(5), 507-515. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.141.507>
- Aygün, Z., & Aygün, M. (2023). Evaluation of radiation shielding potentials of Ni-based alloys, Inconel-617 and Incoloy-800HT, candidates for high temperature applications especially for nuclear reactors, by EpiXS and Phy-X/PSD codes. *Journal of Polytechnic*, 26(2), 795-801. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1004657>

- Baltaş, H. (2006, Ağustos). *YBaCuO ve BiPbSrCaCuO Süperiletkenlerinin Soğurma Katsayılarının İncelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 182958).
- Bashter, I. I. (1997). Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of Nuclear Energy*, 24(17), 1389-1401. [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(97\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00003-0)
- Beiser, A. (2008). *Modern Fiziğin Kavramları*. (G. Önengüt, Ed.) (C. 6). Ankara: Akademi Yayıncılık.
- Betteridge, W., & Shaw, S. W. K. (2013). Development of superalloys. *Materials Science and Technology*, 3(9), 682-694. <https://doi.org/10.1179/MST.1987.3.9.682>
- Callister, W. D., & Retwisch, D. G. (2013). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. (K. Genel, Ed.) (C. 8). Nobel.
- Choudhury, I. A., & El-Baradie, M. A. (1998). Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3), 278-284. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00429-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00429-9)
- Çakır, B. (2021). *Mathematical Modelling Of Molecular Trajectories in Stem Cell Transformation Processes Via Bioinformatic Analysis Of Single Cell Omics Data* (Master Of Science). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 678199).
- Çeçen, R. (2012, Haziran). *Pomza Taşının Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No.316517).
- Dong, M., Zhou, S., Xue, X., Sayyed, M. I., Tishkevich, D., Trukhanov, A., & Wang, C. (2022). Study of comprehensive shielding behaviors of chambersite deposit for neutron and gamma ray. *Progress in Nuclear Energy*, 146, 104155. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2022.104155>
- Ekinci, N., El-Agawany, F. I., Mahmoud, K. A., Karabulut, A., Aygün, B., Yousef, E., & Rammah, Y. S. (2021). Synthesis, physical properties, and gamma-ray shielding capacity of different Ni-based super alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, 186, 109483. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2021.109483>
- Elmahroug, Y., Tellili, B., Souga, C., & Manai, K. (2015). ParShield: A computer program for calculating attenuation parameters of the gamma rays and the fast neutrons. *Annals of Nuclear Energy*, 76, 94-99. <https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2014.09.044>
- El-Mesady, I. A., Rammah, Y. S., Hussein, A. E., El-Samman, H. M., El-Agawany, F. I., & Elsad, R. A. (2023). Synthesis, optical, mechanical characteristics, and gamma-ray shielding capacity of polyethylene -basalt mixture. *Radiation Physics and Chemistry*, 209, 110974. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2023.110974>
- Ersundu, A. E., Büyükyıldız, M., Çelikbilek Ersundu, M., Şakar, E., & Kurudirek, M. (2018). The heavy metal oxide glasses within the WO₃-MoO₃-TeO₂ system to investigate the shielding properties of radiation applications. *Progress in Nuclear Energy*, 104, 280-287. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2017.10.008>
- Ersundu, M. Ç., Ersundu, A. E., Gedikoğlu, N., Şakar, E., Büyükyıldız, M., & Kurudirek, M. (2019). Physical, mechanical and gamma-ray shielding properties of highly transparent ZnO-MoO₃-TeO₂ glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 524, 119648. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY SOL.2019.119648>

- Erzeneoğlu, S. (1990). *9,5 keV Enerjili Gama Işınları Kullanılarak Sn ve Ta'da Atom Başına Koherent Saçılma Diferansiyel Tesir Kesitlerinin Farklı Açılarda Ölçülmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 13094).
- Es-soufi, H., Ouachouo, L., Sayyed, M. I., Hashim, S., Bih, H., & Bih, L. (2023). Synthesis and investigation of the physical, structural, and radiation shielding properties of the titano-bismuth phosphate glasses. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(12), 1-15. <https://doi.org/10.1007/S10854-023-10479-7/FIGURES/13>
- Eyecioglu, O., Karabul, Y., El-Khayatt, A. M., & İçelli, O. (2016). ZXCOM: a software for computation of radiation sensing attributes. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 171(11-12), 965-977. <https://doi.org/10.1080/10420150.2016.1263958>
- Eyecioglu, Ö., El-Khayatt, A. M., Karabul, Y., Çağlar, M., Toker, O., & İçelli, O. (2019). BXCOM: a software for computation of radiation sensing. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 174(5-6), 506-518. <https://doi.org/10.1080/10420150.2019.1606811>
- Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., & Machado, A. R. (1999). The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1-3), 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00314-8)
- Ezzeldin, M., Al-Harbi, L. M., Sadeq, M. S., Mahmoud, A. E. razek, Muhammad, M. A., & Ahmed, H. A. (2023). Impact of CdO on optical, structural, elastic, and radiation shielding parameters of CdO–PbO–ZnO–B₂O₃–SiO₂ glasses. *Ceramics International*, 49(11), 19160-19173. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2023.03.042>
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., & Leving, H. (2004). WinXCom - A program for calculating X-ray attenuation coefficients. *İçinde Radiation Physics and Chemistry* (C. 71, ss. 653-654). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.040>
- Goodfellow. (2023). *Supplier of materials for research and development*. Geliş tarihi 17.08.2023 gönderen <https://www.goodfellow.com/>
- Gursal, S. A., Mehboob, N., Ahmed, B., & Mehmood, M. S. (2023). On the neutron shielding efficacy of flexible silicone infused with CdO nanoparticles. *Radiation Physics and Chemistry*, 202, 110555. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSHEM.2022.110555>
- Güder, H. S. (1995). *Fe, Zn, Nb, Mo, Ag ve Sn'nin Koherent ve İnkoherent Saçılma Diferansiyel Tesir Kesiti Oranlarının Açısıl Değişimi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No.45085).
- Hamad, M. Kh, Mhareb, M. H. A., Sayyed, M. I., Alajerami, Y. S. M., Alsharhan, R., & Khandaker, M. U. (2022). Novel efficient alloys for ionizing radiation shielding applications: A theoretical investigation. *Radiation Physics and Chemistry*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110181>
- Hamad, Morad Kh. (2023). Evaluation of photon shielding properties for new refractory tantalum-rich sulfides Ta₉(XS₃)₂ alloys: A study with the MCNP-5. *Annals of Nuclear Energy*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109687>
- Hamad, R. M., Hamad, M. K., Dwaikat, N., & Ziq, K. A. (2022). Assessment of Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} alloy properties for ionizing radiation shielding applications: an experimental study. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 128(7).

- Hamad, R. M., Mhareb, M. H. A., Alajerami, Y. S., Sayyed, M. I., Saleh, G., Hamad, M. K., & Ziq, K. A. (2021). A comprehensive ionizing radiation shielding study of Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} alloys with various iron concentrations. *Journal of Alloys and Compounds*, 858. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157636>
- Han, İ. (2009). *Geçiş Metallerinin Valens Elektron Yapılarının X-Işını Şiddet Oranları Vasıtasıyla Belirlenmesi, X-Işını Şiddet Oranlarının Tavlama Sıcaklığına Bağlı Davranışlarının İncelenmesi, Alaşımlar İçin Etkin Atom Numaraları ve Elektron Yoğunluklarının Tayini* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 238020).
- Han, I., & Demir, L. (2009). Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for Cr, Fe and Ni alloys at different energies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 267(1), 3-8. <https://doi.org/10.1016/J.NIMB.2008.10.004>
- Harima, Y. (2017). An Approximation of Gamma-Ray Buildup Factors by Modified Geometrical Progression. *Nuclear Science and Engineering*, 83(2), 299-309. <https://doi.org/10.13182/NSE83-A18222>
- Harima, Y., Sakamoto, Y., Tanaka, S., & Kawai, M. (2017). Validity of the Geometric-Progression Formula in Approximating Gamma-Ray Buildup Factors. *Nuclear Science and Engineering*, 94(1), 24-35. <https://doi.org/10.13182/NSE86-A17113>
- Harima, Yoshiko. (1993). An Historical Review and Current Status Of Build-up Factor Calculations and Applications. *Radiat. Phys. Chem*, 41(5), 631-672.
- Hassib, M. D., Kaky, K. M., Kumar, A., Şakar, E., Sayyed, M. I., Baki, S. O., & Mahdi, M. A. (2019). Boro-silicate glasses co-doped Er³⁺/Yb³⁺ for optical amplifier and gamma radiation shielding applications. *Physica B: Condensed Matter*, 567, 37-44. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.2019.05.006>
- Hila, F. C., Asuncion-Astronomo, A., Dingle, C. A. M., Jecong, J. F. M., Javier-Hila, A. M. V., Gili, M. B. Z., ... Amorsolo, A. V. (2021). EpiXS: A Windows-based program for photon attenuation, dosimetry and shielding based on EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI.8). *Radiation Physics and Chemistry*, 182, 109331. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2020.109331>
- İçin, Y. R. (2016, Ocak). *Gamaların Çeşitli Ortamlardan Geri Saçılmalarının Monte Carlo Yöntemiyle İncelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 421385).
- Jena, A. K., & Chaturvedi, M. C. (1984). The role of alloying elements in the design of nickel-base superalloys. *Journal of Materials Science*, 19(10), 3121-3139. <https://doi.org/10.1007/BF00549796/METRICS>
- Jin, K., Sales, B. C., Stocks, G. M., Samolyuk, G. D., Daene, M., Weber, W. J., ... Bei, H. (2016). Tailoring the physical properties of Ni-based single-phase equiatomic alloys by modifying the chemical complexity. *Scientific Reports* 2016 6:1, 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/srep20159>
- Kaky, K. M., Sayyed, M. I., Khammas, A., Kumar, A., Şakar, E., Abdalsalam, A. H., ... Mhareb, M. H. A. (2020). Theoretical and experimental validation gamma shielding properties of B₂O₃-ZnO-MgO-Bi₂O₃ glass system. *Materials Chemistry and Physics*, 242, 122504. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2019.122504>
- Kaur, T., Sharma, J., & Singh, T. (2019). Review on scope of metallic alloys in gamma

- rays shield designing. *Progress in Nuclear Energy*, 113, 95-113. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2019.01.016>
- Kaur, T., Vermani, Y. K., Al-Buriahi, M. S., Alzahrani, J. S., & Singh, T. (2022). Comprehensive investigations on radiation shielding efficacy of bulk and nano Pb-Sn-Cd-Zn alloys. *Physica Scripta*, 97(5), 055009. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/AC6709>
- Kharita, M. H., Yousef, S., & Alnassar, M. (2011). Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. *Progress in Nuclear Energy*, 53(2), 207-211. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2010.09.012>
- Khatry, J., Nieminen, J., Smith, J., & Sloten, K. (2017). *10 We Radioisotope Thermophotovoltaic (RTPV) Power Source Demonstration*. Orlando, FL. Geliş tarihi gönderen <https://www.researchgate.net/publication/331332981>
- Kobayashi, S., Hosoda, N., & Takashima, R. (1997). Tungsten alloys as radiation protection materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 390(3), 426-430. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00392-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00392-6)
- Kurudirek, M. (2011). *Bazı Çoklu Element Yapıdaki Maddelerin Foton Etkileşimi, Foton Enerji Kuvvetlendirme Faktörü ve Hızlı Nötron Azaltma Tesir Kesitleri Açısından İncelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir (Tez No. 284360).
- Li, B., Li, C., Zhang, Y., Wang, Y., Yang, M., Jia, D., ... Wu, Q. (2017). Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9-12), 3459-3474. <https://doi.org/10.1007/S00170-016-9324-7>
- Li, H., Liang, Y., Zhao, L., Hu, J., Han, S., & Lian, J. (2017). Mapping the strain-rate and grain-size dependence of deformation behaviors in nanocrystalline face-centered-cubic Ni and Ni-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 709, 566-574. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2017.03.188>
- Lu, J., Xue, Q., Wang, J., & Ouyang, J. (1997). The effect of CeF₃ on the mechanical and tribological properties of Ni-based alloy. *Tribology International*, 30(9), 659-662. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(97\)00033-9](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(97)00033-9)
- Mann, K. S., & Mann, S. S. (2021). Py-MLBUF: Development of an online-platform for gamma-ray shielding calculations and investigations. *Annals of Nuclear Energy*, 150, 107845. <https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2020.107845>
- Mansy, M. S., Lasheen, Y. F., Breky, M. M. E., & Selim, Y. (2021). Experimental and theoretical investigation of Pb-Sb alloys as a gamma-radiation shielding material. *Radiation Physics and Chemistry*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109416>
- Martin, J. E. (2013). *Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği*. (G. A. Tanır, M. H. Bölükdemir, & K. Koç, Ed.) (C. 2). Ankara: Palme Yayıncılık.
- M.J. Berger, & J.H. Hubbell. (1987). XCOM: Photon Cross Sections Database | NIST. *National Institute of Standards and Technology*. Geliş tarihi gönderen <http://physics.nist.gov/xcom>
- Nambiar, S., & Yeow, J. T. W. (2012). Polymer-composite materials for radiation protection. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(11), 5717-5726. <https://doi.org/10.1021/AM300783D/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2012->

- Nowotny, R. (1998). XMuDat: Photon attenuation data on PC. *IAEA Report IAEA-NDS*, 195, 52.
- Oğuz, B. (1989). *Malzeme Bilgisine Giriş*. (B. Oğuz, Ed.) (C. 1). İstanbul.
- Okunade, A. (2007). Parameters and computer software for the evaluation of mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for body tissues and substitutes. *Journal of Medical Physics / Association of Medical Physicists of India*, 32(3), 124. <https://doi.org/10.4103/0971-6203.35725>
- Olarinoye, I. O., Odiaga, R. I., & Paul, S. (2019). EXABCal: A program for calculating photon exposure and energy absorption buildup factors. *Heliyon*, 5(7), e02017. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E02017>
- radioactivity.eu.com. *Photoelectric Effect - laradioactivite.com*. Geliş tarihi 15.08.2023 gönderen https://radioactivity.eu.com/phenomenon/photoelectric_effect
- Reed, R. C., Tao, T., & Warnken, N. (2009). Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. *Acta Materialia*, 57(19), 5898-5913. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2009.08.018>
- Rosenberg, S. J. (1968). *Nickel and Its Alloys*. Gaithersburg, MD. <https://doi.org/10.6028/NBS.MONO.106>
- Saad, M., AlMohiy, H., Alqahtani, M. S., Alshihri, A. A., & Shalaby, R. M. (2022). Study of structural, physical, characteristics and radiation shielding parameters of Bi50-Pb40-Sn10 and Bi40-Pb40-Sn10-Cd10 alloys used for radiation therapy. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 177(5-6), 545-555. <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2063125>
- Saad, M., AlMohiy, H., Alshihri, A. A., Alelyani, M., & Shalaby, R. M. (2023). Fabrication, microstructural modifications, elastic properties and radiation attenuation performance of ZnO nano-sized particles-reinforced Pb-based alloys for radiation shielding applications. *Radiation Effects and Defects in Solids*. <https://doi.org/10.1080/10420150.2023.2177998>
- Sakar, E., Guler, O., Alim, B., Say, Y., & Dikici, B. (2023). A comprehensive study on structural properties, photon and particle attenuation competence of CoNiFeCr-Ti/Al high entropy alloys (HEAs). *Journal of Alloys and Compounds*, 931. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167561>
- Saleh, A., Shalaby, R. M., & Abdelhakim, N. A. (2022). Comprehensive study on structure, mechanical and nuclear shielding properties of lead free Sn–Zn–Bi alloys as a powerful radiation and neutron shielding material. *Radiation Physics and Chemistry*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110065>
- Sardari, D., Saudi, S., & Tajik, M. (2011). Evaluation of gamma ray buildup factor data in water with MCNP4C code. *Annals of Nuclear Energy*, 38(2-3), 628-631. <https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2010.09.007>
- Sarihan, M., Boodaghi Malidarre, R., & Akkurt, I. (2021). An extensive study on the neutron-gamma shielding and mass stopping power of (70-x) CRT–30K2O–xBaO glass system for ²⁵²Cf neutron source. *Environmental Technology*, 44(6), 875-885. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1987529>
- Sathish, K. V., Seenappa, L., Manjunatha, H. C., Vidya, Y. S., Sridhar, K. N., & Alfred Cecil Raj, S. (2022). Radiation shielding properties of gallium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 57, 295-299. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.090>

- Sayyed, M. I., Abdel-Ghany, A. M., Askin, A., Sedqy, E. M., & Sadeq, M. S. (2023). The structure, optical basicity, ligand field strength and shielding parameters of alkali/alkaline borate glasses doped with V₂O₅. *Optical Materials*, 142, 114078. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2023.114078>
- 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* 2020, Vol. 10, Page 7680, 10(21), 7680. <https://doi.org/10.3390/APP10217680>
- Shaaban, K. S., Alotaibi, B. M., & Yousef, E. S. (2023). Effect of La₂O₃ Concentration on the Structural, Optical and Radiation-Shielding Behaviors of Titanate Borosilicate Glasses. *Journal of Electronic Materials*, 52(6), 3591-3603. <https://doi.org/10.1007/S11664-023-10347-4/FIGURES/17>
- Shalaby, R. M., Al-Mohiy, H., Alqahtani, M. S., Alshihri, A. A., & Saad, M. (2022). The influence of antimony additive on structural, mechanical, and nuclear radiation shielding parameters of rapidly quenched Pb-Sn binary alloy. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 177(9-10), 1049-1064. <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2105216>
- Shimizu, A. (2012). Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (I). <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.2002.9715225>, 39(5), 477-486. <https://doi.org/10.1080/18811248.2002.9715225>
- Singh, V. P., & Badiger, N. M. (2014). Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials. *Annals of Nuclear Energy*, 64, 301-310. <https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2013.10.003>
- Sonehara, M., Noguchi, S., Kurashina, T., Sato, T., Yamasawa, K., & Miura, Y. (2009). Development of an electromagnetic wave shielding textile by electroless Ni-based alloy plating. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10), 4173-4175. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2021403>
- Soylu, H. M., Yurt Lambrecht, F., & Ersöz, O. A. (2015). Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 305(2), 529-534. <https://doi.org/10.1007/S10967-015-4051-3/TABLES/4>
- Stopher, M. A. (2016). The effects of neutron radiation on nickel-based alloys. *Materials Science and Technology*, 33(5), 518-536. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1187334>
- Suteau, C., & Chiron, M. (2005). An iterative method for calculating gamma-ray build-up factors in multi-layer shields. *Radiation Protection Dosimetry*, 116(1-4), 489-492. <https://doi.org/10.1093/RPD/NCI192>
- Şahin, Y., & Demir, D. (2013). *X-ışını Spektroskopisi*. (Y. Şahin & D. Demir, Ed.) (C. 2). Konya: Çimke.
- Şakar, E. (2020). Determination of photon-shielding features and build-up factors of nickel–silver alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108778>
- Şakar, E., Büyükyıldız, M., Alım, B., Şakar, B. C., & Kurudirek, M. (2019). Lead brass alloys for gamma-ray shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 159, 64-69. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2019.02.042>

- Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., & Kurudirek, M. (2020). Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>
- Tang, Y. T., Panwisawas, C., Ghoussoub, J. N., Gong, Y., Clark, J. W. G., Németh, A. A. N., ... Reed, R. C. (2021). Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing. *Acta Materialia*, 202, 417-436. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2020.09.023>
- Taylor, M. L., Smith, R. L., Dossing, F., & Franich, R. D. (2012). Robust calculation of effective atomic numbers: The Auto-Zeff software. *Medical Physics*, 39(4), 1769-1778. <https://doi.org/10.1118/1.3689810>
- Tellili, B., Elmahroug, Y., & Souga, C. (2017). Investigation on radiation shielding parameters of cerrobend alloys. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(8), 1758-1771. <https://doi.org/10.1016/J.NET.2017.08.020>
- Thabit, H. A., Ismail, A. K., Es-soufi, H., Abdulmalik, D. A., Al-Fakih, A. M., Alraddadi, S., & Sayyed, M. I. (2023). Structural, thermal, and mechanical investigation of telluro-borate-Bismuth glass for radiation shielding. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4353-4363. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.04.082>
- Thakur, A., & Gangopadhyay, S. (2016). State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100, 25-54. <https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2015.10.001>
- Thellaputta, G. R., Chandra, P. S., & Rao, C. S. P. (2017). Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3712-3721. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.02.266>
- Tipler, P. A. (1978). *Modern Physics*. Worth Publishers. Geliş tarihi gönderen <https://books.google.com.tr/books?id=6CsOAAAAQAAJ>
- Trubey, D. K., Eisenhauer, C. M., Foderaro, A., Gopinath, D. V., Harima, Y., Hubbell, J. H., ... Su, S.-. (1991). Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. *American National Standard ANSI/ANS-*, 6.4.3. Geliş tarihi gönderen <https://www.nist.gov/publications/gamma-ray-attenuation-coefficients-and-buildup-factors-engineering-materials>
- Tsoufanidis, N., & Landsberger, S. (2021). *Measurement and Detection of Radiation. Measurement & Detection of Radiation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003009849>
- Turhan, M. F., Akman, F., Taşer, A., Dilsiz, K., Oğul, H., Kaçal, M. R., & Agar, O. (2022). Gamma radiation shielding performance of CuxAg(1-x)-alloys: Experimental, theoretical and simulation results. *Progress in Nuclear Energy*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104036>
- Turşucu, A., Elmahroug, Y., & Yılmaz, D. (2021). Measurement on radiation shielding parameters of FexCr1_x and FexNix alloys. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 127(8). <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04786-1>
- Uglo, M. (2021, Kasım 5). *Radioactivity, nuclear energy in technology – The National*. Geliş tarihi 15.08.2023 gönderen <https://www.thenational.com.pg/radioactivity-nuclear-energy-in-technology/>
- Un, A., & Caner, T. (2014). The Direct-Zeff software for direct calculation of mass attenuation coefficient, effective atomic number and effective electron number. *Annals of Nuclear Energy*, 65, 158-165.

<https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2013.10.041>

- Wen, Y. H., Wang, B., Simmons, J. P., & Wang, Y. (2006). A phase-field model for heat treatment applications in Ni-based alloys. *Acta Materialia*, 54(8), 2087-2099. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2006.01.001>
- Williams, W. S. C. (2014). *Nükleer Parçacık fiziği*. (İ. Dumanoğlu & S. Ertürk, Ed.) (C. 1). Ankara: Nobel.
- Wu, J., Hu, J., Deng, Z., Feng, Y., Fan, H., Wang, Z., ... Zhang, W. (2023). Comparative investigation of physical, X-ray and neutron radiation shielding properties for B₂O₃-MnO₂-CdO borate glasses. *Ceramics International*, 49(19), 30915-30923. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2023.07.118>
- Yalçın, Z., İçelli, O., Okutan, M., Boncukçuoglu, R., Artun, O., & Orak, S. (2012). A different perspective to the effective atomic number (Z_{eff}) for some boron compounds and trommel sieve waste (TSW) with a new computer program ZXCOM. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 686, 43-47. <https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2012.05.041>

EKLER

Bu kısımda incelenen Ni-tabanlı alaşımların LAC değerleri Ek Tablo 1’de, HVL değerleri Ek Tablo 2’de, ECS değerleri Ek Tablo 3’de, σ_{eff} değerleri Ek Tablo 4’de, RPE değerleri Ek Tablo 5’de verilmiştir. Ayrıca $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} ve G-P interpolasyon parametrelerini içeren değerler Eavanohm alaşımı için Ek Tablo 6’da, Alloy 825 alaşımı için Ek Tablo 7’de, Haynes 230 alaşımı için Ek Tablo 8’de, Monel K-500 alaşımı için Ek Tablo 9’da ve Monel 400 alaşımı için Ek Tablo 10’da verilmiştir. Ek olarak, incelenen alaşımların 0,5-40 MFP aralığındaki penetrasyon derinliklerine göre EBF değerleri Eavanohm alaşımı için Ek Tablo 11’de, Alloy 825 alaşımı için Ek Tablo 12’de, Haynes 230 alaşımı için Ek Tablo 13’te, Monel K-500 alaşımı için Ek Tablo 14’de ve Monel 400 alaşımı için Ek Tablo 15’de sunulmuştur. Son olarak, incelenen alaşımların 0,5-40 MFP aralığındaki penetrasyon derinliklerine göre EABF değerleri Eavanohm alaşımı için Ek Tablo 16’da, Alloy 825 alaşımı için Ek Tablo 17’de, Haynes 230 alaşımı için Ek Tablo 18’de, Monel K-500 alaşımı için Ek Tablo 19’da ve Monel 400 alaşımı için Ek Tablo 20’de verilmiştir.

Ek Tablo 1. *İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların LAC Sonuçları*

Enerji (keV)	LAC değerleri (μ ; cm ⁻¹)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.
30,824	70,1570	1,0414	70,1466	69,7357	0,3091	69,7388	96,2885	0,7983	96,2805	78,7829	0,1054	78,7839	85,9220	0,6290	85,9282
35,000	48,9954	0,0188	48,9956	48,6959	1,9509	48,7154	67,7128	0,7845	67,7049	55,0518	0,6940	55,0587	60,0869	1,2243	60,0446
40,118	33,3946	0,4427	33,3902	33,3262	1,5484	33,3008	46,5341	1,9194	46,5533	37,4911	1,3160	37,5242	40,9192	0,7895	40,9113
45,900	22,9134	1,8383	22,9619	22,9134	1,2670	22,9260	32,1124	1,0817	32,2236	25,7205	1,7563	25,7882	28,0095	1,3091	28,1029
53,155	15,3820	1,0452	15,3616	15,3495	0,2416	15,3471	21,6739	0,1389	21,6753	17,2262	0,2030	17,2283	18,7619	0,2316	18,7596
59,540	11,3549	0,7018	11,3479	11,3490	0,2112	11,3469	16,0549	0,0336	16,0552	12,7046	0,0133	12,7048	13,8286	0,6837	13,8218
80,997	5,2875	0,4257	5,2733	5,2764	0,0711	5,2757	14,7273	0,0155	14,7274	5,8524	0,3633	5,8488	6,3391	0,0968	6,3381
88,037	4,3813	0,5100	4,3662	4,3813	1,3141	4,3682	12,0194	1,2108	12,0073	4,8357	1,0728	4,8250	5,2087	0,2117	5,2208
276,397	0,9627	0,3775	0,9665	0,9627	0,0911	0,9618	1,4074	0,2575	1,4048	1,0131	0,5087	1,0081	1,0687	0,2980	1,0657
302,900	0,9142	0,2004	0,9122	0,9062	0,1228	0,9075	1,2673	0,3406	1,2707	0,9482	0,1229	0,9494	1,0038	0,0979	1,0028
356,000	0,8296	0,1109	0,8308	0,8274	0,1244	0,8261	1,0894	0,2122	1,0873	0,8626	0,0452	0,8621	0,9106	0,1160	0,9095
511,000	0,6924	0,3304	0,6891	0,6856	0,0684	0,6849	0,8252	0,1325	0,8239	0,7163	0,3878	0,7124	0,7503	0,0037	0,7503
661,661	0,6066	0,0548	0,6071	0,6040	0,0739	0,6033	0,7012	0,1068	0,7001	0,6281	0,1349	0,6267	0,6583	0,1362	0,6597
1173,228	0,4574	0,1661	0,4558	0,4531	0,0225	0,4528	0,5079	0,1618	0,5063	0,4728	0,2917	0,4699	0,4969	0,2588	0,4943
1274,537	0,4322	0,4630	0,4369	0,4322	0,1811	0,4341	0,4881	0,3917	0,4842	0,4462	0,4168	0,4504	0,4741	0,0296	0,4739
1332,492	0,4258	0,1404	0,4272	0,4230	0,1388	0,4244	0,4732	0,0130	0,4731	0,4425	0,2134	0,4404	0,4621	0,1274	0,4633

Ek Tablo 2. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların HVL Sonuçları

Enerji (keV)	HVL Değerleri ($X_{1/2}$; cm ⁻¹)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.	Den.	Hat.(±)	Teo.
30,824	0,0099	0,0001	0,0099	0,0099	0,0001	0,0099	0,0072	0,0001	0,0072	0,0088	0,0001	0,0088	0,0081	0,0001	0,0081
35,000	0,0141	0,0001	0,0141	0,0142	0,0006	0,0142	0,0102	0,0001	0,0102	0,0126	0,0002	0,0126	0,0115	0,0008	0,0115
40,118	0,0208	0,0003	0,0208	0,0208	0,0016	0,0208	0,0149	0,0006	0,0149	0,0185	0,0016	0,0185	0,0169	0,0003	0,0169
45,900	0,0303	0,0064	0,0302	0,0303	0,0017	0,0302	0,0216	0,0074	0,0215	0,0269	0,0071	0,0269	0,0247	0,0082	0,0247
53,155	0,0451	0,0060	0,0451	0,0452	0,0007	0,0452	0,0320	0,0002	0,0320	0,0402	0,0005	0,0402	0,0369	0,0005	0,0369
59,540	0,0610	0,0038	0,0611	0,0611	0,0011	0,0611	0,0432	0,0001	0,0432	0,0546	0,0001	0,0546	0,0501	0,0025	0,0501
80,997	0,1311	0,0353	0,1314	0,1314	0,0018	0,1314	0,0471	0,0001	0,0471	0,1184	0,0074	0,1185	0,1093	0,0017	0,1094
88,037	0,1582	0,0545	0,1588	0,1582	0,0475	0,1587	0,0577	0,0058	0,0577	0,1433	0,0318	0,1437	0,1331	0,0310	0,1328
276,397	0,7200	0,0823	0,7172	0,7200	0,0681	0,7207	0,4925	0,0901	0,4934	0,6842	0,0343	0,6876	0,6486	0,0181	0,6504
302,900	0,7582	0,0662	0,7599	0,7649	0,0037	0,7638	0,5470	0,0470	0,5455	0,7310	0,0948	0,7301	0,6905	0,0674	0,6912
356,000	0,8355	0,0117	0,8344	0,8378	0,0260	0,8390	0,6363	0,0239	0,6375	0,8036	0,0421	0,8040	0,7612	0,0970	0,7621
511,000	1,0010	0,0777	1,0058	1,0110	0,0008	1,0120	0,8400	0,0349	0,8413	0,9677	0,0524	0,9730	0,9238	0,0046	0,9238
661,661	1,1427	0,0032	1,1417	1,1475	0,0404	1,1490	0,9885	0,0505	0,9900	1,1036	0,0237	1,1060	1,0529	0,0022	1,0507
1173,228	1,5153	0,0502	1,5208	1,5299	0,0761	1,5307	1,3648	0,0347	1,3691	1,4661	0,0905	1,4751	1,3949	0,0073	1,4022
1274,537	1,6036	0,0176	1,5864	1,6036	0,0718	1,5969	1,4200	0,0395	1,4314	1,5534	0,0451	1,5389	1,4619	0,0091	1,4628
1332,492	1,6278	0,0366	1,6225	1,6386	0,0378	1,6332	1,4648	0,0404	1,4652	1,5663	0,0755	1,5739	1,5001	0,0041	1,4960

Ek Tablo 3. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların ECS Sonuçları

Enerji (keV)	ECS değerleri (σ_e ; barns/elektron)				
	Evanohm	Alloy 825	Haynes 230	Monel K-500	Monel 400
	Teo.	Teo.	Teo.	Teo.	Teo.
30,824	29,3484	29,3496	33,6240	32,0160	34,3042
35,000	20,5014	20,4962	23,5563	22,3784	23,9707
40,118	13,9756	13,9945	16,1273	15,2563	16,3323
45,900	9,6155	9,6321	11,1259	10,4899	11,2191
53,155	6,4383	6,4505	7,4623	7,0136	7,4892
59,540	4,7605	4,7718	5,5199	5,1766	5,5180
80,997	2,2211	2,2266	3,7183	2,3921	2,5306
88,037	1,8418	1,8465	3,0490	1,9762	2,0846
276,397	0,4166	0,4169	0,4756	0,4217	0,4259
302,900	0,3934	0,3937	0,4401	0,3975	0,4007
356,000	0,3587	0,3589	0,3897	0,3613	0,3634
511,000	0,2979	0,2980	0,3108	0,2990	0,2999
661,661	0,2626	0,2626	0,2698	0,2632	0,2637
1173,228	0,1972	0,1973	0,1994	0,1974	0,1976
1274,537	0,1891	0,1891	0,1910	0,1892	0,1894
1332,492	0,1849	0,1849	0,1867	0,1850	0,1852

Ek Tablo 4. *İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların Etkin İletkenlik (σ_{eff}) Sonuçları*

Enerji (keV)	Etkin iletkenlik değerleri (σ_{eff} ; $\times 10^9$ S/m)														
	Evanohm			Alloy 825			Haynes 230			Monel K-500			Monel 400		
	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.	Den.	Hat.($\pm$)	Teo.
30,824	1,7257	0,0256	1,7255	1,7153	0,0076	1,7154	2,0674	0,0171	2,0672	1,7765	0,0024	1,7765	1,8082	0,0132	1,8083
35,000	1,7253	0,0007	1,7253	1,7152	0,0687	1,7159	2,0752	0,0240	2,0749	1,7760	0,0224	1,7762	1,8096	0,0127	1,8084
40,118	1,7250	0,0229	1,7248	1,7192	0,0131	1,7179	2,0830	0,0859	2,0839	1,7741	0,0157	1,7756	1,8087	0,0349	1,8084
45,900	1,7203	0,0363	1,7239	1,7173	0,0950	1,7183	2,0837	0,0719	2,0909	1,7701	0,0465	1,7748	1,8023	0,0599	1,8084
53,155	1,7248	0,0229	1,7225	1,7179	0,0270	1,7176	2,0968	0,0134	2,0969	1,7731	0,0209	1,7733	1,8086	0,0223	1,8083
59,540	1,7220	0,0106	1,7209	1,7170	0,0319	1,7167	2,0997	0,0044	2,0998	1,7718	0,0019	1,7718	1,8092	0,0894	1,8083
80,997	1,7186	0,0463	1,7140	1,7107	0,0231	1,7105	2,8594	0,0030	2,8594	1,7662	0,0110	1,7651	1,8084	0,0276	1,8081
88,037	1,7173	0,0592	1,7114	1,7130	0,0514	1,7079	2,8458	0,0287	2,8430	1,7666	0,0392	1,7626	1,8038	0,0420	1,8080
276,397	1,6684	0,0654	1,6750	1,6672	0,0158	1,6656	2,1362	0,0391	2,1323	1,7343	0,0871	1,7257	1,8117	0,0505	1,8066
302,900	1,6774	0,0368	1,6737	1,6618	0,0225	1,6641	2,0787	0,0559	2,0843	1,7221	0,0223	1,7243	1,8083	0,0176	1,8066
356,000	1,6698	0,0223	1,6720	1,6645	0,0250	1,6620	2,0181	0,0393	2,0142	1,7234	0,0904	1,7225	1,8088	0,0230	1,8065
511,000	1,6778	0,0801	1,6698	1,6609	0,0166	1,6592	1,9165	0,0308	1,9134	1,7293	0,0936	1,7200	1,8063	0,0089	1,8064
661,661	1,6675	0,0151	1,6690	1,6603	0,0203	1,6582	1,8765	0,0286	1,8737	1,7228	0,0370	1,7191	1,8026	0,0373	1,8063
1173,228	1,6742	0,0608	1,6682	1,6581	0,0825	1,6573	1,8384	0,0586	1,8325	1,7289	0,0667	1,7183	1,8157	0,0946	1,8063
1274,537	1,6503	0,0768	1,6682	1,6503	0,0691	1,6572	1,8448	0,0480	1,8301	1,7022	0,0590	1,7183	1,8074	0,0113	1,8063
1332,492	1,6627	0,0548	1,6682	1,6518	0,0542	1,6572	1,8297	0,0504	1,8292	1,7266	0,0832	1,7183	1,8013	0,0497	1,8063

Ek Tablo 5. İncelenen Ni-Tabanlı Alaşımların RPE (%) Sonuçları

Enerji (keV)	Radyasyon koruma verimliliği (RPE ; %)									
	Evanohm		Alloy 825		Haynes 230		Monel K-500		Monel 400	
	Den.	Hat.(±)	Den.	Hat.(±)	Den.	Hat.(±)	Den.	Hat.(±)	Den.	Hat.(±)
30,824	40,9141	0,6073	40,7271	0,1805	51,4300	0,4264	44,6156	0,0597	47,5030	0,3478
35,000	30,7513	0,0118	30,5956	0,2258	39,8209	0,4614	33,8264	0,4264	36,2787	0,5505
40,118	22,1557	0,2937	22,1158	0,6911	29,4611	0,2152	24,5110	0,1679	26,4271	0,5099
45,900	15,7895	0,3341	15,7895	0,8731	21,4035	0,3861	17,5439	0,6084	18,9474	0,2973
53,155	10,8959	0,4487	10,8742	0,1712	15,0030	0,0961	12,1199	0,1429	13,1263	0,1620
59,540	8,1637	0,5045	8,1596	0,1518	11,3445	0,0237	9,0886	0,0095	9,8517	0,4871
80,997	3,8880	0,0484	3,8800	0,0523	10,4573	0,0110	4,2944	0,2666	4,6430	0,0709
88,037	3,2326	0,1141	3,2326	0,9695	8,6202	0,8684	3,5618	0,7902	3,8312	0,8913
276,397	0,7194	0,2821	0,7194	0,0681	1,0500	0,1921	0,7570	0,3801	0,7983	0,2226
302,900	0,6833	0,1498	0,6774	0,0918	0,9459	0,2543	0,7086	0,0919	0,7500	0,0732
356,000	0,6203	0,0829	0,6186	0,0930	0,8137	0,1585	0,6448	0,0338	0,6806	0,0867
511,000	0,5180	0,2472	0,5129	0,0511	0,6170	0,0991	0,5358	0,2901	0,5611	0,0028
661,661	0,4539	0,0410	0,4520	0,0553	0,5245	0,0799	0,4699	0,1009	0,4925	0,1019
1173,228	0,3425	0,1244	0,3392	0,0169	0,3802	0,1211	0,3540	0,2184	0,3720	0,1937
1274,537	0,3237	0,3467	0,3237	0,1356	0,3654	0,2932	0,3341	0,3121	0,3550	0,0222
1332,492	0,3188	0,1051	0,3168	0,1040	0,3543	0,0098	0,3314	0,1598	0,3459	0,0954

Ek Tablo 6. *Evanohm Alışımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , ve G-P Fit Etme Parametreleri*

Enerji (MeV)	$R_{inc/toplam}$	Z_{eq}	EBF için G-P fit etme parametreleri					EABF için G-P fit etme parametreleri				
			a	b	c	d	X_K	a	b	c	d	X_K
0,015	0,002	27,036	-0,467	1,003	1,734	0,316	7,585	-0,467	1,003	1,734	0,316	7,585
0,02	0,004	27,061	0,673	1,011	0,120	-0,779	11,167	0,364	1,009	0,248	-0,374	16,166
0,03	0,014	27,073	0,196	1,025	0,368	-0,218	22,919	0,250	1,023	0,337	-0,186	16,058
0,04	0,034	27,089	0,245	1,052	0,334	-0,110	12,702	0,229	1,050	0,354	-0,191	18,258
0,05	0,065	27,099	0,236	1,088	0,361	-0,137	13,585	0,243	1,092	0,347	-0,138	13,827
0,06	0,108	27,103	0,219	1,133	0,389	-0,122	13,930	0,237	1,150	0,360	-0,142	14,635
0,08	0,222	27,115	0,185	1,237	0,461	-0,102	14,284	0,201	1,304	0,424	-0,114	14,833
0,1	0,355	27,123	0,152	1,350	0,538	-0,084	14,025	0,161	1,515	0,505	-0,098	16,711
0,15	0,638	27,135	0,087	1,604	0,716	-0,051	14,069	0,173	2,304	0,540	-0,126	14,411
0,2	0,797	27,138	0,041	1,782	0,881	-0,035	13,383	0,096	2,776	0,742	-0,080	13,249
0,3	0,920	27,147	-0,003	1,930	1,067	-0,019	12,117	0,021	2,992	0,989	-0,041	12,600
0,4	0,959	27,150	-0,023	1,959	1,166	-0,014	11,013	-0,011	2,812	1,127	-0,026	11,882
0,5	0,975	27,151	-0,035	1,944	1,220	-0,009	8,967	-0,028	2,620	1,198	-0,016	10,812
0,6	0,983	27,154	-0,038	1,924	1,235	-0,009	8,331	-0,034	2,483	1,221	-0,013	10,451
0,8	0,990	27,157	-0,038	1,882	1,230	-0,011	7,571	-0,037	2,274	1,229	-0,013	8,501
1	0,993	27,156	-0,042	1,831	1,232	0,004	14,702	-0,044	2,130	1,238	0,004	13,911
1,5	0,988	27,069	-0,039	1,744	1,193	0,011	16,808	-0,034	1,943	1,177	0,003	12,705
2	0,964	26,967	-0,021	1,706	1,122	-0,005	8,281	-0,024	1,830	1,128	0,003	20,075
3	0,890	26,896	-0,005	1,624	1,059	-0,014	12,058	0,002	1,681	1,037	-0,018	12,394
4	0,810	26,884	0,006	1,551	1,025	-0,021	12,927	0,013	1,558	1,002	-0,029	13,990
5	0,734	26,871	0,013	1,482	1,009	-0,027	13,162	0,022	1,468	0,976	-0,038	14,143
6	0,667	26,851	0,022	1,438	0,984	-0,036	13,329	0,023	1,390	0,979	-0,038	14,321
8	0,556	26,856	0,032	1,354	0,970	-0,046	13,605	0,034	1,296	0,958	-0,046	14,015
10	0,471	26,854	0,042	1,295	0,953	-0,057	13,952	0,038	1,232	0,958	-0,050	14,288
15	0,336	26,860	0,050	1,197	0,961	-0,061	14,403	0,050	1,146	0,952	-0,056	14,684

Ek Tablo 7. Alloy 825 Alaşımlarının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , ve G-P Fit Etme Parametreleri

Enerji (MeV)	$R_{inc/toplam}$	Z_{eq}	EBF için G-P fit etme parametreleri					EABF için G-P fit etme parametreleri				
			a	b	c	d	X_K	a	b	c	d	X_K
0,015	0,002	26,362	-0,523	1,004	1,622	0,340	6,303	-0,523	1,004	1,622	0,340	6,303
0,02	0,004	27,012	0,670	1,011	0,121	-0,772	11,177	0,362	1,009	0,248	-0,370	16,258
0,03	0,014	27,085	0,196	1,025	0,368	-0,217	22,850	0,250	1,023	0,337	-0,186	16,028
0,04	0,034	27,126	0,245	1,052	0,334	-0,110	12,737	0,228	1,050	0,355	-0,193	18,404
0,05	0,065	27,152	0,236	1,088	0,361	-0,138	13,565	0,243	1,091	0,348	-0,138	13,800
0,06	0,107	27,170	0,220	1,132	0,388	-0,123	13,916	0,237	1,148	0,359	-0,142	14,631
0,08	0,220	27,201	0,185	1,235	0,460	-0,102	14,269	0,202	1,301	0,423	-0,114	14,812
0,1	0,352	27,224	0,153	1,346	0,536	-0,085	14,017	0,159	1,508	0,507	-0,098	16,861
0,15	0,635	27,255	0,088	1,599	0,714	-0,051	14,064	0,176	2,292	0,536	-0,127	14,351
0,2	0,794	27,275	0,042	1,776	0,878	-0,035	13,401	0,098	2,763	0,737	-0,081	13,265
0,3	0,919	27,302	-0,003	1,925	1,063	-0,019	12,151	0,023	2,986	0,983	-0,042	12,618
0,4	0,958	27,317	-0,023	1,954	1,163	-0,014	11,055	-0,010	2,810	1,121	-0,026	11,911
0,5	0,974	27,326	-0,034	1,941	1,217	-0,009	9,060	-0,028	2,620	1,194	-0,016	10,885
0,6	0,982	27,334	-0,038	1,920	1,233	-0,009	8,351	-0,033	2,483	1,218	-0,013	10,480
0,8	0,990	27,341	-0,038	1,879	1,230	-0,011	7,515	-0,036	2,274	1,227	-0,013	8,531
1	0,993	27,342	-0,042	1,829	1,229	0,002	13,952	-0,043	2,130	1,235	0,002	13,207
1,5	0,988	27,174	-0,039	1,743	1,192	0,011	16,895	-0,033	1,944	1,175	0,002	12,450
2	0,964	27,000	-0,021	1,706	1,122	-0,005	8,291	-0,024	1,830	1,127	0,003	19,895
3	0,890	26,876	-0,005	1,624	1,059	-0,014	12,057	0,002	1,681	1,037	-0,018	12,395
4	0,810	26,848	0,006	1,551	1,025	-0,021	12,927	0,013	1,558	1,002	-0,029	13,988
5	0,735	26,830	0,013	1,482	1,009	-0,027	13,160	0,023	1,469	0,976	-0,038	14,143
6	0,667	26,810	0,022	1,438	0,984	-0,036	13,331	0,023	1,390	0,979	-0,038	14,322
8	0,556	26,810	0,032	1,354	0,970	-0,046	13,608	0,034	1,296	0,958	-0,046	14,014
10	0,472	26,804	0,042	1,295	0,953	-0,057	13,953	0,038	1,232	0,958	-0,050	14,287
15	0,337	26,806	0,050	1,197	0,960	-0,061	14,401	0,050	1,146	0,952	-0,056	14,680

Ek Tablo 8. Haynes 230 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , ve G-P Fit Etme Parametreleri

Enerji (MeV)	$R_{inc/toplam}$	Z_{eq}	EBF için G-P fit etme parametreleri					EABF için G-P fit etme parametreleri				
			a	b	c	d	X_K	a	b	c	d	X_K
0,015	0,001	28,896	-0,318	1,001	2,028	0,255	10,968	-0,318	1,001	2,028	0,255	10,968
0,02	0,003	29,344	0,740	1,058	0,164	-1,028	10,860	0,429	1,013	0,288	-0,494	12,786
0,03	0,011	29,478	0,201	1,136	0,391	-0,058	12,889	0,241	1,039	0,402	-0,175	11,999
0,04	0,026	29,585	0,231	1,198	0,330	-0,093	14,931	0,192	1,062	0,388	-0,275	25,330
0,05	0,050	29,680	0,208	1,199	0,333	-0,128	12,832	0,218	1,091	0,334	-0,124	12,603
0,06	0,082	29,756	0,297	1,199	0,339	-0,136	13,817	0,288	1,135	0,318	-0,153	14,556
0,08	0,081	38,875	0,647	1,562	0,119	-0,225	14,310	0,499	1,289	0,147	-0,206	14,113
0,1	0,137	39,499	0,269	1,179	0,334	-0,145	13,773	0,296	1,225	0,300	-0,155	14,723
0,15	0,314	40,429	0,166	1,270	0,509	-0,087	14,376	0,279	1,516	0,337	-0,157	14,039
0,2	0,487	41,024	0,165	1,488	0,534	-0,095	14,247	0,305	2,301	0,330	-0,192	13,993
0,3	0,717	41,778	0,079	1,593	0,737	-0,042	14,462	0,157	2,394	0,564	-0,097	14,042
0,4	0,829	42,245	0,039	1,705	0,888	-0,034	14,179	0,108	2,664	0,710	-0,088	13,909
0,5	0,886	42,554	0,018	1,761	0,970	-0,025	14,310	0,070	2,671	0,821	-0,066	13,898
0,6	0,918	42,757	0,006	1,781	1,015	-0,019	13,948	0,051	2,626	0,880	-0,055	13,757
0,8	0,949	42,994	-0,006	1,788	1,063	-0,014	14,029	0,029	2,483	0,952	-0,042	13,656
1	0,964	43,066	-0,011	1,770	1,083	-0,011	13,430	0,017	2,353	0,988	-0,034	13,543
1,5	0,969	41,572	-0,030	1,627	1,162	0,001	7,441	-0,011	1,941	1,095	-0,015	13,324
2	0,942	38,213	-0,021	1,625	1,125	-0,005	11,671	-0,003	1,846	1,065	-0,020	12,157
3	0,858	34,872	-0,002	1,587	1,062	-0,021	12,524	0,017	1,696	0,999	-0,037	12,738
4	0,770	33,797	0,012	1,529	1,022	-0,033	13,102	0,028	1,566	0,971	-0,048	13,849
5	0,690	33,266	0,026	1,494	0,984	-0,046	13,382	0,043	1,495	0,934	-0,061	14,013
6	0,620	33,021	0,034	1,452	0,969	-0,052	13,437	0,049	1,428	0,923	-0,065	14,195
8	0,509	32,698	0,052	1,411	0,933	-0,069	13,711	0,060	1,351	0,905	-0,074	14,128
10	0,427	32,527	0,047	1,355	0,963	-0,064	14,003	0,055	1,284	0,933	-0,068	14,336
15	0,298	32,423	0,047	1,306	1,014	-0,063	14,384	0,059	1,222	0,966	-0,070	14,650

Ek Tablo 9. Monel K-500 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , ve G-P Fit Etme Parametreleri

Enerji (MeV)	$R_{inc/toplam}$	Z_{eq}	EBF için G-P fit etme parametreleri					EABF için G-P fit etme parametreleri				
			a	b	c	d	X_K	a	b	c	d	X_K
0,015	0,002	27,892	-0,397	1,002	1,872	0,288	9,170	-0,397	1,002	1,872	0,288	9,170
0,02	0,004	27,898	0,713	1,010	0,113	-0,903	10,996	0,398	1,007	0,240	-0,434	14,600
0,03	0,013	27,916	0,200	1,023	0,364	-0,144	18,049	0,249	1,020	0,352	-0,182	13,918
0,04	0,031	27,927	0,242	1,048	0,332	-0,104	13,484	0,215	1,045	0,371	-0,234	21,474
0,05	0,060	27,933	0,239	1,081	0,357	-0,139	13,274	0,243	1,083	0,350	-0,139	13,408
0,06	0,099	27,939	0,227	1,122	0,378	-0,128	13,755	0,243	1,137	0,351	-0,145	14,588
0,08	0,205	27,949	0,188	1,215	0,454	-0,105	14,142	0,208	1,278	0,411	-0,118	14,634
0,1	0,332	27,955	0,158	1,321	0,524	-0,088	13,964	0,148	1,455	0,521	-0,093	17,935
0,15	0,614	27,964	0,093	1,565	0,698	-0,053	14,033	0,189	2,221	0,509	-0,131	14,003
0,2	0,780	27,971	0,046	1,743	0,860	-0,035	13,491	0,107	2,697	0,710	-0,086	13,341
0,3	0,912	27,976	0,000	1,901	1,047	-0,019	12,296	0,029	2,962	0,958	-0,045	12,691
0,4	0,955	27,980	-0,021	1,936	1,152	-0,014	11,217	-0,005	2,804	1,101	-0,029	12,023
0,5	0,972	27,982	-0,032	1,928	1,206	-0,010	9,403	-0,025	2,617	1,180	-0,017	11,154
0,6	0,981	27,985	-0,037	1,908	1,226	-0,009	8,422	-0,031	2,481	1,207	-0,014	10,583
0,8	0,989	27,985	-0,037	1,866	1,228	-0,012	7,324	-0,035	2,272	1,220	-0,013	8,633
1	0,992	27,985	-0,039	1,824	1,219	-0,003	11,390	-0,040	2,129	1,226	-0,002	10,805
1,5	0,988	27,907	-0,038	1,739	1,189	0,011	17,495	-0,030	1,947	1,164	-0,002	10,702
2	0,963	27,805	-0,021	1,702	1,122	-0,005	8,542	-0,022	1,832	1,121	0,000	15,615
3	0,887	27,750	-0,004	1,621	1,059	-0,014	12,121	0,001	1,677	1,039	-0,018	12,343
4	0,805	27,733	0,007	1,549	1,024	-0,023	12,924	0,012	1,551	1,008	-0,029	14,027
5	0,728	27,725	0,014	1,481	1,008	-0,029	13,202	0,021	1,461	0,983	-0,038	14,146
6	0,660	27,722	0,022	1,434	0,989	-0,036	13,288	0,023	1,386	0,981	-0,039	14,312
8	0,548	27,715	0,034	1,353	0,966	-0,050	13,562	0,035	1,293	0,959	-0,047	14,029
10	0,464	27,717	0,042	1,292	0,957	-0,057	13,935	0,039	1,230	0,958	-0,051	14,305
15	0,330	27,710	0,051	1,194	0,964	-0,062	14,434	0,053	1,145	0,949	-0,059	14,735

Ek Tablo 10. Monel 400 Alaşımının EBF ve EABF Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan $R_{inc/toplam}$, Z_{eq} , ve G-P Fit Etme Parametreleri

Enerji (MeV)	$R_{inc/toplam}$	Z_{eq}	EBF için G-P fit etme parametreleri					EABF için G-P fit etme parametreleri				
			a	b	c	d	X_K	a	b	c	d	X_K
0,015	0,001	28,292	-0,365	1,002	1,935	0,275	9,894	-0,365	1,002	1,935	0,275	9,894
0,02	0,004	28,292	0,731	1,010	0,109	-0,961	10,918	0,414	1,007	0,236	-0,461	13,880
0,03	0,013	28,294	0,202	1,022	0,362	-0,111	15,916	0,248	1,019	0,358	-0,180	12,981
0,04	0,030	28,294	0,241	1,046	0,331	-0,101	13,818	0,209	1,043	0,378	-0,253	22,851
0,05	0,057	28,294	0,241	1,077	0,356	-0,140	13,143	0,243	1,079	0,351	-0,140	13,231
0,06	0,095	28,294	0,230	1,118	0,373	-0,130	13,682	0,245	1,131	0,347	-0,147	14,568
0,08	0,198	28,294	0,189	1,207	0,451	-0,107	14,085	0,211	1,267	0,406	-0,119	14,553
0,1	0,323	28,293	0,160	1,310	0,518	-0,089	13,940	0,143	1,431	0,527	-0,091	18,421
0,15	0,604	28,290	0,095	1,550	0,690	-0,054	14,020	0,195	2,189	0,497	-0,133	13,846
0,2	0,773	28,288	0,048	1,728	0,852	-0,036	13,531	0,111	2,668	0,698	-0,088	13,375
0,3	0,909	28,287	0,002	1,890	1,039	-0,019	12,362	0,032	2,951	0,947	-0,046	12,725
0,4	0,953	28,286	-0,020	1,927	1,147	-0,014	11,291	-0,003	2,801	1,091	-0,030	12,074
0,5	0,971	28,286	-0,031	1,922	1,201	-0,010	9,559	-0,023	2,615	1,173	-0,018	11,277
0,6	0,980	28,286	-0,036	1,902	1,223	-0,009	8,455	-0,030	2,481	1,202	-0,014	10,630
0,8	0,988	28,286	-0,037	1,860	1,228	-0,012	7,235	-0,034	2,272	1,217	-0,013	8,680
1	0,992	28,286	-0,037	1,822	1,215	-0,006	10,214	-0,039	2,129	1,221	-0,004	9,703
1,5	0,987	28,285	-0,038	1,737	1,188	0,011	17,797	-0,028	1,949	1,159	-0,004	9,820
2	0,962	28,283	-0,021	1,699	1,121	-0,005	8,687	-0,021	1,833	1,118	-0,002	13,135
3	0,885	28,282	-0,004	1,619	1,059	-0,014	12,159	0,001	1,676	1,040	-0,018	12,311
4	0,802	28,282	0,008	1,548	1,023	-0,024	12,922	0,011	1,547	1,011	-0,029	14,050
5	0,724	28,282	0,014	1,480	1,008	-0,030	13,228	0,020	1,457	0,987	-0,037	14,148
6	0,655	28,283	0,021	1,431	0,992	-0,037	13,262	0,023	1,384	0,982	-0,039	14,307
8	0,543	28,283	0,036	1,353	0,963	-0,052	13,534	0,035	1,291	0,959	-0,048	14,039
10	0,459	28,283	0,042	1,291	0,959	-0,057	13,924	0,040	1,228	0,958	-0,052	14,316
15	0,326	28,282	0,051	1,193	0,966	-0,063	14,455	0,055	1,143	0,947	-0,061	14,769

Ek Tablo 11. *Evanohm Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri*

Enerji (MeV)	<i>MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF</i>															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,003	1,007	1,009	1,010	1,010	1,010	1,010	1,009	1,008	1,008	1,009	1,009	1,009	1,008	1,008
0,02	1,009	1,011	1,013	1,014	1,015	1,016	1,017	1,018	1,020	1,022	1,027	1,027	1,025	1,025	1,028	1,035
0,03	1,016	1,025	1,036	1,042	1,046	1,049	1,051	1,053	1,055	1,058	1,065	1,070	1,075	1,077	1,078	1,078
0,04	1,034	1,052	1,073	1,084	1,093	1,099	1,105	1,110	1,115	1,123	1,141	1,154	1,163	1,170	1,177	1,188
0,05	1,057	1,088	1,126	1,149	1,165	1,179	1,190	1,200	1,210	1,227	1,265	1,293	1,311	1,321	1,330	1,345
0,06	1,084	1,133	1,193	1,231	1,259	1,282	1,301	1,319	1,335	1,364	1,428	1,479	1,513	1,534	1,553	1,579
0,08	1,145	1,237	1,361	1,446	1,511	1,565	1,612	1,654	1,694	1,767	1,928	2,065	2,166	2,233	2,289	2,360
0,1	1,206	1,350	1,558	1,712	1,836	1,943	2,037	2,124	2,205	2,357	2,699	2,995	3,224	3,384	3,525	3,705
0,15	1,332	1,604	2,064	2,456	2,806	3,127	3,430	3,718	3,997	4,536	5,835	7,079	8,187	9,105	9,948	10,932
0,2	1,406	1,782	2,492	3,168	3,826	4,475	5,121	5,768	6,420	7,746	11,248	14,958	18,596	21,977	25,395	29,432
0,3	1,457	1,930	2,920	3,968	5,076	6,246	7,479	8,777	10,142	13,076	21,610	31,597	42,373	53,645	66,051	80,503
0,4	1,459	1,959	3,059	4,287	5,642	7,125	8,740	10,489	12,376	16,571	29,559	45,752	64,286	85,064	108,966	136,729
0,5	1,446	1,944	3,068	4,352	5,795	7,397	9,163	11,093	13,192	17,899	32,585	50,945	72,620	97,980	127,150	159,746
0,6	1,435	1,924	3,035	4,313	5,757	7,367	9,147	11,098	13,224	17,999	32,846	51,203	72,853	98,125	126,819	158,275
0,8	1,416	1,882	2,940	4,153	5,519	7,038	8,712	10,540	12,524	16,945	30,329	46,318	64,994	86,531	110,477	136,119
1	1,391	1,831	2,825	3,957	5,219	6,608	8,122	9,759	11,517	15,391	27,076	41,416	58,146	76,963	97,353	118,474
1,5	1,353	1,744	2,607	3,565	4,607	5,728	6,922	8,185	9,512	12,345	20,311	29,269	39,022	49,539	60,801	72,528
2	1,342	1,706	2,488	3,330	4,230	5,184	6,189	7,245	8,349	10,692	17,220	24,431	32,215	40,590	49,463	58,676
3	1,307	1,624	2,282	2,973	3,697	4,452	5,241	6,062	6,917	8,726	13,811	19,543	25,605	31,868	38,588	46,100
4	1,274	1,551	2,118	2,705	3,316	3,952	4,615	5,305	6,026	7,560	11,965	17,109	22,698	28,510	34,804	42,158
5	1,241	1,482	1,972	2,479	3,005	3,554	4,129	4,730	5,361	6,717	10,708	15,534	20,916	26,593	32,854	40,451
6	1,221	1,438	1,876	2,325	2,791	3,278	3,789	4,326	4,893	6,123	9,850	14,534	19,905	25,655	32,135	40,375
8	1,179	1,354	1,704	2,065	2,442	2,840	3,261	3,711	4,191	5,258	8,682	13,352	19,119	25,664	33,419	43,931
10	1,150	1,295	1,584	1,882	2,195	2,528	2,887	3,273	3,693	4,646	7,901	12,767	19,349	27,420	37,568	52,219
15	1,100	1,197	1,392	1,598	1,821	2,065	2,334	2,634	2,970	3,774	6,898	12,582	22,197	37,140	60,316	99,950

Ek Tablo 12. Alloy 825 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,004	1,008	1,010	1,011	1,010	1,010	1,009	1,009	1,009	1,010	1,010	1,010	1,009	1,009	1,009
0,02	1,009	1,011	1,013	1,014	1,015	1,016	1,017	1,019	1,020	1,022	1,027	1,027	1,026	1,025	1,028	1,035
0,03	1,016	1,025	1,036	1,042	1,046	1,049	1,051	1,053	1,055	1,058	1,065	1,070	1,074	1,077	1,078	1,078
0,04	1,034	1,052	1,072	1,084	1,092	1,099	1,105	1,110	1,114	1,122	1,140	1,154	1,162	1,169	1,176	1,187
0,05	1,057	1,088	1,125	1,148	1,164	1,178	1,189	1,199	1,209	1,226	1,263	1,292	1,309	1,319	1,328	1,343
0,06	1,084	1,132	1,192	1,230	1,257	1,280	1,299	1,316	1,332	1,361	1,424	1,475	1,509	1,530	1,548	1,574
0,08	1,143	1,235	1,357	1,441	1,506	1,559	1,605	1,647	1,686	1,758	1,918	2,052	2,152	2,217	2,272	2,343
0,1	1,204	1,346	1,552	1,704	1,826	1,931	2,024	2,109	2,189	2,338	2,674	2,965	3,189	3,346	3,484	3,660
0,15	1,329	1,599	2,053	2,439	2,783	3,099	3,395	3,678	3,952	4,479	5,750	6,964	8,042	8,934	9,753	10,710
0,2	1,403	1,776	2,477	3,143	3,791	4,429	5,062	5,696	6,334	7,631	11,044	14,651	18,179	21,451	24,752	28,647
0,3	1,455	1,925	2,905	3,942	5,036	6,189	7,402	8,678	10,018	12,894	21,235	30,968	41,445	52,377	64,383	78,356
0,4	1,457	1,954	3,046	4,264	5,605	7,072	8,667	10,394	12,254	16,386	29,148	45,029	63,178	83,484	106,805	133,879
0,5	1,444	1,941	3,058	4,333	5,764	7,352	9,100	11,010	13,085	17,737	32,233	50,328	71,633	96,519	125,156	157,208
0,6	1,433	1,920	3,026	4,296	5,730	7,328	9,093	11,027	13,132	17,859	32,535	50,656	71,995	96,881	125,123	156,079
0,8	1,414	1,879	2,932	4,139	5,498	7,010	8,674	10,492	12,464	16,857	30,134	45,980	64,498	85,848	109,565	134,942
1	1,390	1,829	2,820	3,947	5,203	6,586	8,093	9,722	11,473	15,334	27,005	41,361	58,098	76,816	96,908	117,548
1,5	1,353	1,743	2,606	3,562	4,603	5,722	6,915	8,175	9,500	12,329	20,283	29,227	38,963	49,459	60,699	72,416
2	1,342	1,706	2,487	3,330	4,229	5,182	6,188	7,243	8,346	10,689	17,215	24,424	32,205	40,577	49,447	58,655
3	1,307	1,624	2,283	2,974	3,697	4,453	5,241	6,063	6,917	8,726	13,811	19,541	25,601	31,861	38,578	46,087
4	1,274	1,551	2,118	2,706	3,316	3,952	4,615	5,306	6,026	7,559	11,960	17,098	22,679	28,482	34,766	42,104
5	1,241	1,482	1,972	2,479	3,005	3,554	4,129	4,730	5,361	6,716	10,702	15,521	20,892	26,556	32,802	40,377
6	1,221	1,438	1,876	2,325	2,792	3,278	3,789	4,326	4,892	6,122	9,844	14,522	19,884	25,622	32,088	40,306
8	1,179	1,354	1,704	2,065	2,442	2,840	3,261	3,710	4,191	5,257	8,674	13,332	19,080	25,601	33,321	43,776
10	1,150	1,295	1,584	1,882	2,195	2,528	2,886	3,273	3,692	4,644	7,892	12,742	19,294	27,321	37,400	51,940
15	1,100	1,197	1,392	1,599	1,821	2,065	2,334	2,634	2,969	3,771	6,883	12,535	22,074	36,866	59,763	98,847

Ek Tablo 13. Haynes 230 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,000	1,001	1,003	1,005	1,007	1,009	1,010	1,011	1,011	1,011	1,009	1,009	1,009	1,010	1,010	1,009
0,02	1,044	1,058	1,074	1,086	1,100	1,115	1,134	1,157	1,186	1,273	1,893	3,875	9,046	65,507	4758,757	2573742,544
0,03	1,086	1,136	1,197	1,234	1,260	1,281	1,298	1,314	1,327	1,352	1,405	1,449	1,484	1,515	1,547	1,585
0,04	1,130	1,198	1,275	1,318	1,347	1,370	1,388	1,404	1,419	1,446	1,503	1,551	1,587	1,614	1,635	1,659
0,05	1,129	1,199	1,275	1,316	1,343	1,362	1,377	1,391	1,402	1,422	1,458	1,479	1,486	1,486	1,490	1,499
0,06	1,131	1,199	1,282	1,336	1,379	1,416	1,451	1,484	1,517	1,584	1,762	1,957	2,152	2,344	2,575	2,936
0,08	1,441	1,562	1,667	1,730	1,786	1,841	1,897	1,957	2,020	2,163	2,660	3,530	5,322	10,328	35,412	328,645
0,1	1,118	1,179	1,251	1,296	1,328	1,355	1,379	1,401	1,421	1,461	1,551	1,628	1,684	1,721	1,758	1,810
0,15	1,161	1,270	1,423	1,534	1,623	1,698	1,765	1,827	1,884	1,992	2,241	2,465	2,648	2,785	2,905	3,051
0,2	1,289	1,488	1,780	2,000	2,182	2,342	2,488	2,626	2,758	3,013	3,635	4,238	4,758	5,160	5,526	6,000
0,3	1,323	1,593	2,054	2,452	2,810	3,140	3,451	3,749	4,036	4,592	5,932	7,234	8,439	9,491	10,466	11,552
0,4	1,365	1,705	2,348	2,962	3,562	4,154	4,743	5,334	5,929	7,142	10,358	13,817	17,305	20,588	23,779	27,340
0,5	1,384	1,761	2,508	3,258	4,017	4,789	5,579	6,388	7,218	8,952	13,753	19,200	25,032	30,903	36,844	43,383
0,6	1,389	1,781	2,576	3,392	4,232	5,098	5,992	6,915	7,868	9,870	15,450	21,778	28,542	35,387	42,355	49,927
0,8	1,387	1,788	2,622	3,498	4,417	5,378	6,381	7,426	8,515	10,822	17,341	24,828	32,952	41,319	49,862	58,912
1	1,376	1,770	2,597	3,474	4,400	5,372	6,390	7,455	8,565	10,922	17,579	25,169	33,328	41,697	50,258	59,287
1,5	1,300	1,627	2,340	3,124	3,971	4,879	5,845	6,867	7,943	10,252	16,883	24,600	33,149	42,257	51,668	61,132
2	1,302	1,625	2,318	3,068	3,871	4,725	5,628	6,580	7,579	9,715	15,809	22,808	30,437	38,519	47,054	56,050
3	1,289	1,587	2,210	2,868	3,563	4,297	5,070	5,885	6,741	8,583	13,956	20,266	27,048	34,007	41,491	50,141
4	1,264	1,529	2,074	2,644	3,243	3,874	4,541	5,246	5,992	7,617	12,534	18,634	25,475	32,625	40,492	50,184
5	1,249	1,494	1,988	2,500	3,034	3,598	4,196	4,831	5,509	7,005	11,712	17,898	25,152	32,932	41,758	53,354
6	1,229	1,452	1,901	2,363	2,849	3,362	3,910	4,496	5,125	6,532	11,107	17,403	25,108	33,686	43,813	57,788
8	1,211	1,411	1,808	2,216	2,647	3,107	3,605	4,146	4,738	6,102	10,920	18,400	28,689	41,364	57,745	82,867
10	1,181	1,355	1,708	2,080	2,479	2,915	3,394	3,924	4,514	5,909	11,164	20,172	34,180	53,931	82,246	128,316
15	1,154	1,306	1,627	1,981	2,382	2,840	3,369	3,984	4,703	6,535	14,872	33,617	73,052	149,719	297,321	603,950

Ek Tablo 14. Monel K-500 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,002	1,005	1,008	1,009	1,010	1,010	1,010	1,010	1,009	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,007
0,02	1,008	1,010	1,012	1,013	1,014	1,015	1,016	1,017	1,018	1,020	1,025	1,025	1,022	1,022	1,025	1,033
0,03	1,015	1,023	1,032	1,038	1,041	1,044	1,046	1,048	1,050	1,053	1,059	1,064	1,067	1,069	1,070	1,070
0,04	1,031	1,048	1,066	1,077	1,084	1,090	1,095	1,100	1,104	1,111	1,127	1,140	1,149	1,155	1,162	1,170
0,05	1,052	1,081	1,115	1,135	1,150	1,162	1,173	1,182	1,190	1,206	1,240	1,265	1,280	1,288	1,297	1,312
0,06	1,078	1,122	1,176	1,210	1,235	1,255	1,272	1,287	1,302	1,328	1,385	1,430	1,460	1,478	1,494	1,518
0,08	1,132	1,215	1,327	1,402	1,460	1,508	1,550	1,587	1,622	1,686	1,829	1,947	2,033	2,088	2,135	2,198
0,1	1,191	1,321	1,509	1,646	1,755	1,848	1,931	2,006	2,077	2,208	2,503	2,756	2,948	3,080	3,197	3,348
0,15	1,313	1,565	1,986	2,339	2,651	2,935	3,201	3,453	3,696	4,162	5,273	6,322	7,241	7,989	8,675	9,481
0,2	1,388	1,743	2,402	3,022	3,618	4,200	4,775	5,346	5,918	7,071	10,067	13,184	16,197	18,957	21,709	24,940
0,3	1,445	1,901	2,843	3,830	4,864	5,946	7,078	8,261	9,498	12,135	19,684	28,375	37,634	47,186	57,570	69,604
0,4	1,450	1,936	2,998	4,174	5,464	6,867	8,387	10,025	11,785	15,674	27,581	42,278	58,971	77,500	98,639	123,113
0,5	1,440	1,928	3,022	4,264	5,652	7,187	8,871	10,707	12,697	17,145	30,949	48,093	68,082	91,258	117,950	147,984
0,6	1,428	1,908	2,993	4,236	5,634	7,189	8,902	10,776	12,811	17,367	31,448	48,745	69,011	92,557	119,231	148,453
0,8	1,408	1,866	2,903	4,091	5,427	6,911	8,545	10,328	12,260	16,556	29,468	44,829	62,819	83,532	106,475	130,952
1	1,389	1,824	2,802	3,912	5,148	6,508	7,991	9,595	11,320	15,130	26,677	40,803	56,909	74,416	92,893	111,877
1,5	1,351	1,739	2,595	3,543	4,575	5,683	6,863	8,110	9,421	12,219	20,090	28,944	38,573	48,928	60,016	71,657
2	1,339	1,702	2,477	3,313	4,206	5,151	6,148	7,194	8,287	10,608	17,082	24,253	31,981	40,274	49,052	58,162
3	1,306	1,621	2,277	2,965	3,686	4,440	5,227	6,048	6,903	8,715	13,826	19,616	25,764	32,130	38,978	46,666
4	1,273	1,549	2,113	2,699	3,309	3,945	4,610	5,304	6,030	7,581	12,071	17,366	23,145	29,163	35,715	43,459
5	1,240	1,481	1,970	2,476	3,003	3,554	4,131	4,737	5,374	6,748	10,827	15,815	21,423	27,368	33,956	42,019
6	1,218	1,434	1,869	2,318	2,784	3,273	3,787	4,329	4,902	6,151	9,959	14,785	20,352	26,344	33,143	41,849
8	1,179	1,353	1,703	2,063	2,440	2,838	3,262	3,715	4,201	5,288	8,823	13,730	19,855	26,854	35,247	46,860
10	1,149	1,292	1,580	1,878	2,193	2,529	2,891	3,283	3,711	4,688	8,068	13,213	20,302	29,168	40,532	57,219
15	1,099	1,194	1,388	1,594	1,817	2,063	2,336	2,643	2,987	3,819	7,130	13,350	24,228	41,713	69,693	118,909

Ek Tablo 15. Monel 400 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EBF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,002	1,004	1,007	1,009	1,010	1,011	1,011	1,010	1,009	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,007
0,02	1,008	1,010	1,011	1,012	1,013	1,014	1,015	1,016	1,017	1,020	1,024	1,023	1,021	1,021	1,024	1,032
0,03	1,014	1,022	1,031	1,036	1,040	1,042	1,044	1,046	1,048	1,051	1,057	1,061	1,064	1,066	1,067	1,068
0,04	1,030	1,046	1,063	1,074	1,081	1,086	1,091	1,095	1,099	1,106	1,121	1,133	1,142	1,149	1,155	1,163
0,05	1,050	1,077	1,110	1,130	1,144	1,155	1,165	1,174	1,182	1,197	1,229	1,253	1,267	1,275	1,284	1,298
0,06	1,075	1,118	1,169	1,201	1,225	1,244	1,260	1,275	1,288	1,313	1,367	1,410	1,438	1,454	1,470	1,493
0,08	1,127	1,207	1,313	1,385	1,440	1,485	1,525	1,560	1,594	1,655	1,789	1,901	1,981	2,032	2,075	2,134
0,1	1,184	1,310	1,489	1,620	1,723	1,811	1,889	1,961	2,027	2,151	2,429	2,665	2,843	2,965	3,073	3,214
0,15	1,305	1,550	1,956	2,295	2,593	2,864	3,116	3,355	3,584	4,024	5,068	6,048	6,899	7,589	8,220	8,963
0,2	1,381	1,728	2,369	2,968	3,542	4,101	4,650	5,195	5,739	6,832	9,652	12,566	15,367	17,917	20,446	23,407
0,3	1,441	1,890	2,815	3,781	4,787	5,838	6,934	8,077	9,269	11,803	19,012	27,258	35,999	44,968	54,670	65,886
0,4	1,446	1,927	2,976	4,134	5,400	6,775	8,262	9,861	11,576	15,358	26,890	41,069	57,128	74,887	95,081	118,428
0,5	1,438	1,922	3,006	4,233	5,601	7,113	8,769	10,571	12,523	16,881	30,375	47,099	66,515	88,939	114,760	143,877
0,6	1,426	1,902	2,978	4,209	5,591	7,127	8,816	10,662	12,666	17,147	30,962	47,893	67,683	90,636	116,616	145,068
0,8	1,405	1,860	2,890	4,069	5,394	6,866	8,486	10,253	12,166	16,418	29,163	44,306	62,059	82,485	105,076	129,148
1	1,388	1,822	2,794	3,896	5,123	6,472	7,943	9,534	11,246	15,026	26,447	40,227	55,668	72,397	90,197	108,643
1,5	1,350	1,737	2,590	3,534	4,560	5,663	6,836	8,077	9,381	12,164	19,994	28,804	38,381	48,671	59,686	71,283
2	1,338	1,699	2,471	3,304	4,192	5,133	6,125	7,165	8,252	10,561	17,003	24,152	31,849	40,098	48,823	57,878
3	1,305	1,619	2,273	2,960	3,679	4,432	5,219	6,039	6,894	8,708	13,835	19,660	25,861	32,293	39,220	47,015
4	1,273	1,548	2,111	2,696	3,305	3,941	4,607	5,303	6,032	7,593	12,139	17,530	23,433	29,585	36,307	44,308
5	1,240	1,480	1,969	2,474	3,002	3,554	4,133	4,742	5,382	6,768	10,904	15,998	21,756	27,879	34,686	43,062
6	1,217	1,431	1,865	2,313	2,780	3,270	3,786	4,331	4,908	6,168	10,027	14,945	20,636	26,784	33,790	42,799
8	1,179	1,353	1,702	2,061	2,438	2,837	3,262	3,718	4,208	5,307	8,916	13,979	20,344	27,652	36,484	48,868
10	1,148	1,291	1,578	1,876	2,191	2,529	2,894	3,290	3,722	4,714	8,176	13,508	20,941	30,353	42,567	60,695
15	1,098	1,193	1,386	1,591	1,815	2,062	2,338	2,648	2,999	3,850	7,288	13,887	25,682	45,064	76,725	133,460

Ek Tablo 16. *Evanohm Alışımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri*

Enerji (MeV)	<i>MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF</i>															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,003	1,007	1,009	1,010	1,010	1,010	1,010	1,009	1,008	1,008	1,009	1,009	1,009	1,008	1,008
0,02	1,006	1,009	1,011	1,013	1,014	1,015	1,016	1,017	1,018	1,019	1,023	1,026	1,028	1,028	1,027	1,027
0,03	1,015	1,023	1,033	1,038	1,042	1,045	1,048	1,050	1,053	1,057	1,066	1,073	1,078	1,081	1,081	1,082
0,04	1,033	1,050	1,071	1,084	1,092	1,099	1,105	1,110	1,115	1,123	1,142	1,157	1,168	1,174	1,176	1,175
0,05	1,060	1,092	1,130	1,153	1,169	1,182	1,193	1,203	1,212	1,229	1,266	1,294	1,313	1,323	1,332	1,346
0,06	1,096	1,150	1,213	1,252	1,279	1,302	1,321	1,339	1,355	1,384	1,450	1,502	1,539	1,559	1,573	1,593
0,08	1,189	1,304	1,452	1,549	1,621	1,681	1,732	1,778	1,820	1,899	2,072	2,218	2,327	2,397	2,449	2,511
0,1	1,308	1,515	1,806	2,012	2,173	2,308	2,426	2,532	2,631	2,812	3,217	3,577	3,878	4,097	4,241	4,358
0,15	1,771	2,304	3,097	3,709	4,229	4,697	5,135	5,557	5,970	6,791	8,916	11,088	12,956	14,256	15,305	16,753
0,2	1,969	2,776	4,183	5,442	6,625	7,771	8,902	10,037	11,187	13,566	20,163	27,457	34,325	40,135	46,273	55,180
0,3	2,002	2,992	4,992	7,051	9,192	11,433	13,787	16,266	18,882	24,559	41,588	62,189	84,151	106,157	130,795	162,703
0,4	1,877	2,812	4,837	7,070	9,519	12,192	15,101	18,257	21,673	29,324	53,545	84,531	119,868	158,473	203,321	258,722
0,5	1,770	2,620	4,524	6,688	9,113	11,805	14,773	18,026	21,574	29,586	55,117	87,810	125,818	169,070	219,563	278,795
0,6	1,700	2,483	4,252	6,279	8,565	11,114	13,932	17,028	20,408	28,045	52,324	83,232	119,120	159,900	206,704	259,893
0,8	1,600	2,274	3,800	5,552	7,526	9,726	12,153	14,811	17,703	24,182	44,112	68,073	95,511	127,115	162,790	201,684
1	1,530	2,130	3,486	5,035	6,766	8,674	10,756	13,009	15,431	20,770	36,885	56,640	79,627	105,322	132,828	160,824
1,5	1,450	1,943	3,027	4,225	5,527	6,926	8,419	10,000	11,667	15,245	25,476	37,292	50,421	64,527	79,091	93,504
2	1,401	1,830	2,750	3,743	4,801	5,922	7,100	8,335	9,623	12,353	19,998	28,671	38,219	48,527	59,507	71,070
3	1,337	1,681	2,387	3,122	3,886	4,681	5,509	6,369	7,264	9,159	14,507	20,574	26,979	33,537	40,586	48,656
4	1,279	1,558	2,122	2,701	3,298	3,918	4,561	5,230	5,927	7,410	11,679	16,703	22,147	27,592	33,083	39,216
5	1,237	1,468	1,933	2,406	2,893	3,397	3,922	4,470	5,044	6,275	9,914	14,360	19,317	24,344	29,479	35,425
6	1,197	1,390	1,778	2,175	2,585	3,011	3,457	3,925	4,416	5,479	8,676	12,690	17,315	22,169	27,252	33,212
8	1,150	1,296	1,586	1,883	2,191	2,514	2,854	3,216	3,601	4,450	7,150	10,813	15,355	20,504	26,465	34,309
10	1,118	1,232	1,461	1,696	1,943	2,204	2,483	2,783	3,106	3,834	6,273	9,852	14,689	20,664	28,085	38,409
15	1,075	1,146	1,290	1,441	1,602	1,777	1,969	2,181	2,416	2,973	5,082	8,818	15,045	24,656	39,348	63,798

Ek Tablo 17. Alloy 825 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,004	1,008	1,010	1,011	1,010	1,010	1,009	1,009	1,009	1,010	1,010	1,010	1,009	1,009	1,009
0,02	1,006	1,009	1,011	1,013	1,014	1,015	1,016	1,017	1,018	1,019	1,023	1,026	1,028	1,028	1,028	1,027
0,03	1,015	1,023	1,033	1,038	1,042	1,045	1,048	1,050	1,053	1,057	1,066	1,073	1,078	1,080	1,081	1,081
0,04	1,032	1,050	1,071	1,083	1,092	1,099	1,105	1,110	1,114	1,123	1,141	1,156	1,168	1,174	1,175	1,174
0,05	1,059	1,091	1,129	1,152	1,168	1,181	1,192	1,202	1,211	1,228	1,264	1,292	1,311	1,321	1,330	1,344
0,06	1,096	1,148	1,211	1,250	1,277	1,299	1,319	1,336	1,352	1,381	1,446	1,498	1,534	1,554	1,568	1,588
0,08	1,188	1,301	1,447	1,543	1,615	1,673	1,724	1,769	1,811	1,888	2,059	2,203	2,310	2,378	2,430	2,491
0,1	1,303	1,508	1,795	1,999	2,158	2,291	2,407	2,512	2,609	2,787	3,183	3,536	3,831	4,046	4,188	4,300
0,15	1,765	2,292	3,072	3,672	4,181	4,639	5,067	5,479	5,883	6,686	8,761	10,879	12,693	13,957	14,993	16,444
0,2	1,963	2,763	4,151	5,389	6,550	7,671	8,778	9,886	11,008	13,327	19,745	26,826	33,473	39,073	44,974	53,552
0,3	2,001	2,986	4,970	7,007	9,121	11,328	13,643	16,079	18,645	24,208	40,859	60,951	82,308	103,633	127,483	158,449
0,4	1,878	2,810	4,826	7,044	9,470	12,116	14,991	18,108	21,478	29,021	52,860	83,303	117,930	155,641	199,430	253,674
0,5	1,770	2,620	4,517	6,670	9,079	11,751	14,694	17,917	21,430	29,354	54,575	86,840	124,283	166,778	216,347	274,596
0,6	1,701	2,483	4,247	6,267	8,542	11,076	13,876	16,949	20,303	27,875	51,914	82,472	117,896	158,101	204,258	256,793
0,8	1,600	2,274	3,797	5,545	7,513	9,703	12,120	14,766	17,642	24,086	43,894	67,697	94,932	126,297	161,735	200,427
1	1,531	2,130	3,484	5,029	6,754	8,657	10,732	12,978	15,393	20,720	36,824	56,600	79,585	105,135	132,266	159,730
1,5	1,450	1,944	3,027	4,224	5,524	6,922	8,413	9,993	11,659	15,236	25,477	37,318	50,466	64,560	79,086	93,477
2	1,401	1,830	2,750	3,743	4,801	5,921	7,099	8,334	9,622	12,352	19,998	28,676	38,235	48,557	59,553	71,131
3	1,337	1,681	2,387	3,122	3,886	4,681	5,509	6,369	7,264	9,159	14,506	20,572	26,975	33,530	40,575	48,640
4	1,280	1,558	2,122	2,701	3,299	3,918	4,561	5,230	5,927	7,409	11,675	16,694	22,130	27,566	33,047	39,168
5	1,237	1,469	1,933	2,406	2,893	3,398	3,922	4,470	5,044	6,275	9,910	14,350	19,299	24,315	29,438	35,369
6	1,197	1,390	1,779	2,175	2,585	3,012	3,458	3,925	4,417	5,479	8,674	12,683	17,302	22,146	27,217	33,161
8	1,151	1,296	1,587	1,883	2,191	2,514	2,855	3,216	3,601	4,450	7,146	10,802	15,332	20,464	26,401	34,210
10	1,118	1,232	1,461	1,696	1,943	2,204	2,483	2,783	3,106	3,834	6,269	9,839	14,657	20,604	27,983	38,240
15	1,075	1,146	1,290	1,441	1,602	1,777	1,969	2,181	2,417	2,972	5,076	8,794	14,978	24,502	39,034	63,172

Ek Tablo 18. *Haynes 230 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri*

Enerji (MeV)	<i>MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF</i>															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,000	1,001	1,003	1,005	1,007	1,009	1,010	1,011	1,011	1,011	1,009	1,009	1,009	1,010	1,010	1,009
0,02	1,009	1,013	1,018	1,022	1,025	1,028	1,031	1,035	1,039	1,048	1,078	1,114	1,133	1,136	1,155	1,234
0,03	1,025	1,039	1,057	1,070	1,080	1,088	1,095	1,102	1,109	1,122	1,150	1,169	1,177	1,181	1,191	1,210
0,04	1,039	1,062	1,090	1,106	1,118	1,126	1,133	1,139	1,145	1,154	1,174	1,190	1,203	1,211	1,215	1,214
0,05	1,059	1,091	1,126	1,145	1,158	1,167	1,175	1,182	1,188	1,198	1,218	1,230	1,235	1,237	1,240	1,247
0,06	1,090	1,135	1,188	1,220	1,244	1,263	1,281	1,298	1,314	1,344	1,418	1,486	1,541	1,582	1,617	1,663
0,08	1,218	1,289	1,348	1,380	1,404	1,425	1,446	1,466	1,486	1,526	1,630	1,734	1,830	1,916	2,013	2,153
0,1	1,151	1,225	1,308	1,357	1,393	1,422	1,448	1,473	1,496	1,541	1,646	1,742	1,818	1,872	1,918	1,976
0,15	1,338	1,516	1,727	1,859	1,958	2,042	2,118	2,188	2,255	2,386	2,699	2,984	3,202	3,354	3,497	3,702
0,2	1,858	2,301	2,830	3,174	3,444	3,680	3,898	4,109	4,316	4,730	5,807	6,881	7,764	8,396	9,031	10,038
0,3	1,814	2,394	3,270	3,952	4,532	5,052	5,537	5,999	6,449	7,335	9,578	11,841	13,852	15,447	16,964	19,025
0,4	1,919	2,664	3,936	5,052	6,086	7,079	8,054	9,026	10,009	12,039	17,693	24,099	30,380	35,714	40,898	48,039
0,5	1,887	2,671	4,110	5,462	6,777	8,083	9,402	10,746	12,128	15,040	23,444	33,444	43,988	53,853	63,849	76,862
0,6	1,846	2,626	4,107	5,543	6,970	8,409	9,877	11,386	12,945	16,248	25,800	37,121	49,056	60,332	71,755	86,113
0,8	1,754	2,483	3,924	5,372	6,849	8,368	9,938	11,569	13,268	16,895	27,467	40,075	53,612	66,856	80,436	96,765
1	1,681	2,353	3,707	5,089	6,513	7,986	9,516	11,108	12,768	16,307	26,547	38,600	51,491	64,207	77,238	92,420
1,5	1,459	1,941	2,963	4,058	5,224	6,461	7,769	9,148	10,600	13,724	22,807	33,516	45,271	57,475	70,158	83,891
2	1,416	1,846	2,745	3,695	4,698	5,755	6,867	8,036	9,263	11,896	19,505	28,320	37,701	47,355	57,830	69,912
3	1,349	1,696	2,400	3,126	3,881	4,670	5,497	6,366	7,280	9,253	15,102	22,093	29,529	36,939	45,025	55,142
4	1,286	1,566	2,126	2,699	3,293	3,914	4,567	5,256	5,985	7,578	12,476	18,734	25,865	33,141	40,775	50,176
5	1,254	1,495	1,971	2,453	2,952	3,474	4,024	4,610	5,234	6,618	11,060	17,097	24,352	32,028	40,359	51,247
6	1,220	1,428	1,836	2,249	2,677	3,127	3,603	4,113	4,659	5,885	9,932	15,695	23,007	31,179	40,430	52,898
8	1,182	1,351	1,682	2,017	2,368	2,740	3,139	3,572	4,045	5,131	8,970	15,012	23,525	34,182	47,813	68,451
10	1,146	1,284	1,559	1,844	2,147	2,474	2,831	3,224	3,658	4,678	8,479	14,962	25,061	39,255	59,253	91,233
15	1,113	1,222	1,444	1,685	1,951	2,251	2,593	2,986	3,439	4,581	9,636	20,723	43,580	86,984	168,199	333,161

Ek Tablo 19. Monel K-500 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,002	1,005	1,008	1,009	1,010	1,010	1,010	1,010	1,009	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,007
0,02	1,005	1,007	1,010	1,011	1,012	1,013	1,014	1,015	1,016	1,018	1,022	1,025	1,026	1,025	1,024	1,024
0,03	1,013	1,020	1,029	1,034	1,038	1,041	1,044	1,046	1,049	1,053	1,062	1,068	1,071	1,072	1,073	1,075
0,04	1,029	1,045	1,064	1,076	1,084	1,090	1,096	1,100	1,104	1,112	1,129	1,142	1,153	1,160	1,162	1,160
0,05	1,054	1,083	1,117	1,137	1,152	1,164	1,174	1,184	1,192	1,208	1,241	1,266	1,281	1,290	1,299	1,313
0,06	1,089	1,137	1,193	1,228	1,252	1,272	1,289	1,305	1,319	1,345	1,403	1,450	1,481	1,499	1,511	1,529
0,08	1,174	1,278	1,409	1,495	1,558	1,610	1,654	1,694	1,731	1,799	1,950	2,076	2,167	2,225	2,269	2,325
0,1	1,270	1,455	1,717	1,903	2,048	2,168	2,272	2,365	2,450	2,605	2,942	3,237	3,487	3,674	3,798	3,881
0,15	1,732	2,221	2,928	3,462	3,909	4,309	4,682	5,040	5,390	6,085	7,874	9,669	11,162	12,201	13,140	14,544
0,2	1,937	2,697	3,993	5,128	6,178	7,184	8,168	9,148	10,135	12,163	17,713	23,748	29,313	33,879	38,617	45,550
0,3	1,996	2,962	4,880	6,822	8,817	10,884	13,036	15,287	17,647	22,732	37,787	55,727	74,515	92,945	113,419	140,241
0,4	1,880	2,804	4,783	6,938	9,280	11,818	14,564	17,528	20,723	27,843	50,192	78,510	110,362	144,585	184,177	233,693
0,5	1,771	2,617	4,492	6,604	8,956	11,554	14,404	17,516	20,898	28,503	52,588	83,280	118,676	158,422	204,577	259,108
0,6	1,702	2,481	4,231	6,224	8,460	10,942	13,677	16,672	19,933	27,274	50,468	79,795	113,592	151,769	195,624	245,795
0,8	1,601	2,272	3,787	5,519	7,465	9,627	12,008	14,610	17,436	23,755	43,146	66,409	92,946	123,490	158,102	196,073
1	1,532	2,129	3,475	5,007	6,715	8,596	10,648	12,869	15,259	20,535	36,508	56,001	78,218	102,373	127,754	153,553
1,5	1,453	1,947	3,027	4,217	5,507	6,894	8,374	9,944	11,601	15,168	25,426	37,266	50,225	63,943	78,142	92,508
2	1,402	1,832	2,751	3,741	4,795	5,910	7,083	8,313	9,597	12,322	19,991	28,753	38,442	48,877	59,876	71,265
3	1,336	1,677	2,382	3,115	3,878	4,673	5,501	6,363	7,260	9,161	14,538	20,658	27,146	33,827	41,051	49,351
4	1,276	1,551	2,112	2,688	3,286	3,906	4,552	5,226	5,928	7,428	11,769	16,916	22,537	28,202	33,941	40,352
5	1,232	1,461	1,921	2,392	2,878	3,383	3,910	4,462	5,041	6,287	9,995	14,560	19,690	24,935	30,324	36,579
6	1,195	1,386	1,771	2,166	2,574	3,000	3,446	3,915	4,409	5,480	8,722	12,830	17,604	22,655	27,988	34,289
8	1,149	1,293	1,581	1,875	2,182	2,504	2,845	3,207	3,595	4,453	7,211	11,008	15,780	21,255	27,662	36,189
10	1,117	1,230	1,456	1,689	1,934	2,195	2,474	2,775	3,101	3,838	6,341	10,085	15,236	21,711	29,881	41,424
15	1,074	1,145	1,287	1,436	1,595	1,770	1,962	2,175	2,413	2,981	5,181	9,207	16,145	27,205	44,627	74,478

Ek Tablo 20. Monel 400 Alaşımının 0,5-40 MFP Aralığındaki Penetrasyon Derinliğine Göre EABF Değerleri

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF															
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,001	1,002	1,004	1,007	1,009	1,010	1,011	1,011	1,010	1,009	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,007
0,02	1,005	1,007	1,009	1,010	1,011	1,012	1,013	1,014	1,015	1,017	1,021	1,024	1,024	1,023	1,022	1,023
0,03	1,012	1,019	1,027	1,033	1,036	1,039	1,042	1,044	1,047	1,051	1,059	1,065	1,067	1,068	1,069	1,072
0,04	1,027	1,043	1,061	1,072	1,080	1,086	1,091	1,096	1,100	1,107	1,122	1,136	1,146	1,153	1,155	1,154
0,05	1,051	1,079	1,111	1,131	1,145	1,157	1,166	1,175	1,183	1,198	1,230	1,254	1,268	1,276	1,285	1,299
0,06	1,085	1,131	1,185	1,218	1,241	1,260	1,276	1,291	1,304	1,329	1,384	1,428	1,458	1,474	1,486	1,502
0,08	1,168	1,267	1,393	1,473	1,533	1,582	1,624	1,661	1,696	1,760	1,902	2,020	2,105	2,158	2,199	2,252
0,1	1,255	1,431	1,681	1,859	1,997	2,111	2,210	2,298	2,377	2,522	2,832	3,102	3,330	3,503	3,617	3,691
0,15	1,716	2,189	2,864	3,369	3,790	4,165	4,514	4,848	5,175	5,823	7,484	9,131	10,480	11,416	12,300	13,654
0,2	1,925	2,668	3,923	5,014	6,016	6,972	7,904	8,829	9,759	11,662	16,842	22,430	27,530	31,656	35,900	42,123
0,3	1,994	2,951	4,839	6,740	8,682	10,685	12,766	14,935	17,205	22,080	36,431	53,419	71,070	88,222	107,193	132,124
0,4	1,881	2,801	4,763	6,891	9,194	11,684	14,371	17,267	20,382	27,312	48,989	76,346	106,945	139,596	177,271	224,561
0,5	1,772	2,615	4,480	6,574	8,901	11,464	14,272	17,334	20,657	28,119	51,692	81,675	116,160	154,684	199,295	252,099
0,6	1,702	2,481	4,224	6,205	8,422	10,881	13,587	16,546	19,765	27,003	49,816	78,587	111,653	148,917	191,723	240,800
0,8	1,601	2,272	3,783	5,507	7,444	9,592	11,956	14,539	17,341	23,604	42,803	65,818	92,036	122,202	156,428	194,056
1	1,533	2,129	3,472	4,996	6,696	8,567	10,608	12,817	15,193	20,438	36,263	55,343	76,816	100,159	124,851	150,120
1,5	1,455	1,949	3,027	4,213	5,498	6,880	8,353	9,917	11,568	15,124	25,340	37,026	49,693	63,147	77,243	91,695
2	1,403	1,833	2,751	3,739	4,791	5,903	7,073	8,300	9,581	12,301	19,963	28,697	38,270	48,447	59,081	70,090
3	1,335	1,676	2,378	3,110	3,873	4,668	5,497	6,359	7,257	9,162	14,557	20,709	27,248	34,004	41,336	49,778
4	1,273	1,547	2,105	2,680	3,277	3,899	4,546	5,222	5,929	7,439	11,825	17,049	22,782	28,587	34,484	41,074
5	1,230	1,457	1,914	2,383	2,868	3,374	3,902	4,456	5,038	6,294	10,044	14,685	19,926	25,309	30,862	37,315
6	1,194	1,384	1,767	2,160	2,568	2,993	3,439	3,909	4,404	5,480	8,750	12,919	17,789	22,967	28,462	34,987
8	1,148	1,291	1,577	1,871	2,176	2,498	2,839	3,202	3,591	4,455	7,251	11,137	16,064	21,761	28,474	37,474
10	1,116	1,228	1,453	1,685	1,929	2,189	2,468	2,770	3,097	3,841	6,385	10,238	15,601	22,417	31,106	43,506
15	1,073	1,143	1,284	1,432	1,591	1,765	1,957	2,171	2,411	2,986	5,248	9,475	16,923	29,052	48,543	82,586

ÖZ GEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini 21 Şubat Kurtuluş İlköğretim okulunda tamamladı ve 2005 yılında mezun oldu. Lise öğrenimini Bayburt Lisesinde tamamladı ve 2009 yılında mezun oldu. 2009 yılında Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı. 2014 yılı güz döneminde başladığı Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans programından 2019 yılında mezun oldu. Ek olarak, 2014 yılında başladığı Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Güvenliği Anabilim Dalı Tezsiz Yüksek Lisans programından 2015 yılında mezun oldu. Aynı yıl girdiği uzmanlık sınavından başarılı olarak B sınıfı İş Güvenliği uzmanı unvanına sahip oldu. 2020 yılında Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans programına başladı ve 2023 yılında mezun oldu. 2013-2016 yılları arasında özel sektörde Makine Mühendisi olarak çalıştı ve 2016 yılından itibaren Öğretim Görevlisi olarak çalışma hayatına devam etmektedir.