



**SİNERLEME TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN Ni₃Al
TABANLI SÜPERALAŞIMLARIN YAPISAL
PARAMETRELERİNİN VE γ -IŞINI SOĞURMA
YETENEKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Merve DURDAĞ

**Danışman: Doç. Dr. Erdem ŞAKAR
Yüksek Lisans Tezi
Fizik Ana Bilim Dalı
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

**SİNERLEME TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN Ni₃Al TABANLI SÜPERALAŞIMLARIN
YAPISAL PARAMETRELERİNİN VE γ -IŞINI SOĞURMA YETENEKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of the Structural Parameters and γ -Ray Absorption Abilities of Ni₃Al-Based
Superalloys Produced by Sintering Technique)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve DURDAĞ

Danışman: Doç. Dr. Erdem ŞAKAR

Erzurum
Ocak, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Merve DURDAĞ tarafından hazırlanan ‘‘Sinterleme Tekniğiyle Üretilen Ni3Al Tabanlı Süper alaşımların Yapısal Parametrelerinin ve γ -Işını Soğurma Yeteneklerinin Araştırılması’’ başlıklı çalışması 02 / 01 / 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Fizik Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Betül GÜZELDİR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Erdem ŞAKAR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Bünyamin ALIM <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan Ceyhun
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FAB-2022-11396

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Erdem ŞAKAR danışmanlığında sunulan “Sinterleme Tekniğiyle Üretilen Ni₃Al Tabanlı Süper alaşımların Yapısal Parametrelerinin ve γ -Işını Soğurma Yeteneklerinin Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	2	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	5	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Merve DURDAĞ	Doç. Dr. Erdem ŞAKAR
5.1.2024	5.1.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, değerli bilgi birikimi ve tecrübeleri ile her zaman yolumu aydınlatan, fikirlerinden, bilim insanı kişiliğinden ve insanîyetinden çok şey öğrendiğim, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erdem ŞAKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında üretilen alaşımların üretim sürecindeki katkılarından dolayı Bayburt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Elektrik ve Enerji Bölüm Başkanı Sayın Doç. Dr. Bünyamin ALİM'a ve üretilen alaşımların karakterizasyon ölçümlerindeki yardımlarından ötürü Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezinde görevli Sayın Öğr. Gör. Dr. Betül CEVİZ ŞAKAR'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel ölçümlerin gerçekleştirildiği Prof. Dr. Wolf Weyrich Yüksek Enerji Spektroskopisi Laboratuvarının kurulmasında emeği geçen tüm Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerine de teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bana güvenen, beni daima sabır ve anlayışla karşılayan maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Hacer DURDAĞ'a ve abim Osman DURDAĞ'a teşekkür ederim.

Merve DURDAĞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİNERLEME TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN Ni₃Al TABANLI SÜPERALAŞIMLARIN YAPISAL PARAMETRELERİNİN VE γ -IŞINI SOĞURMA YETENEKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Merve DURDAĞ

Danışman: Doç. Dr. Erdem ŞAKAR

Amaç: Bu çalışmada Ni₃Al alaşımına farklı kombinasyonlarda yapılacak ağır metal katkılamasının, bu alaşımın kristalografik, morfolojik ve gama-ışını soğurma yeteneklerini nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada kullanılan alaşımlar toz metalurjisi-basamak sinterleme metodu kullanılarak üretilmiştir. Üretilen alaşımların karakterizasyonlarında XRD ve SEM analizlerinden faydalanılmıştır. Deneysel foton zırhlama parametreleri ¹³³Ba radyoaktif kaynağından yayınlanan farklı foton enerjilerinde dar ışın geometrisi kullanılarak belirlenmiştir. Teorik foton zırhlama yetenekleri ise Phy-X/PSD (Photon Shielding and Dosimetry) yazılımıyla hesaplanmıştır.

Bulgular: Ni₃Al alaşımı için elde edilen XRD profili, üretilen alaşımın literatürle uyumlu bir şekilde polikristal yapıda olduğunu ortaya koymuştur. Bu alaşıma farklı kombinasyonlarda yapılan ağır metal katkılamasıyla elde edilen alaşımların da yine polikristal yapıda oldukları belirlenmiştir. SEM görüntülerinden, üretilen tüm alaşımların, sıkı paketlenmiş homojen bir dağılıma sahip oldukları ve herhangi bir topaklanmanın oluşmadığı tespit edilmiştir. Yine SEM analizlerinden, ağır metal katkılamasının, alaşımlarda beklediği üzere γ ' faz oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. Gama-ışını soğurma deneyleri, teorik hesaplamalarla yüksek dereceli bir uyuma sahiptir. Bu da hem alaşım üretiminin planlandığı şekilde yapıldığının hem de deneylerin doğru bir şekilde gerçekleştiğinin kanıtı olarak değerlendirilmiştir. Ni₃Al yapısına ağır metal katkılaması ile çok daha iyi radyasyon soğurucu malzemelerin elde edildiği tespit edilmiştir.

Sonuç: Yüksek sıcaklık uygulamalarında radyasyon güvenliğinin gerekli olduğu ortamlarda kullanılabileceği düşünülen ve kompozisyonları simülasyon programlarının öngörülerini doğrultusunda belirlenen 13 farklı Ni₃Al tabanlı alaşım üretilmiştir. Bu alaşımların kristalografik, morfolojik ve gama-ışını soğurma yetenekleri belirlenmiştir. Üretilen alaşımların tek kristal olarak sentezlenebilmeleri durumunda, belirtilen alanlarda kullanılabilecek yeni tip süper-alaşımlar olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Süper-alaşım, Ni₃Al, Ağır metal katkılaması, Sinterleme, Toz metalurjisi, Foton zırhlama, Gama-ışını, Phy-X/PSD

Ocak 2024, 93 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION of the STRUCTURAL PARAMETERS and γ -RAY ABSORPTION ABILITIES of Ni₃Al-BASED SUPERALLOYS PRODUCED by SINTERING TECHNIQUE

Merve DURDAĞ

Supervisor: Assoc. Prof. Erdem ŞAKAR

Purpose: In this study, it is aimed to determine how heavy metal doping in different combinations to Ni₃Al alloy will affect the crystallographic, morphological and gamma-ray absorption capabilities of this alloy.

Method: The alloys used in this study were produced using the powder metallurgy-step sintering method. XRD and SEM analyzes were used in the characterization of the produced alloys. Experimental photon shielding parameters were determined using narrow beam geometry at different photon energies emitted from the ¹³³Ba radioactive source. Theoretical photon shielding capabilities were calculated with Phy-X/PSD (Photon Shielding and Dosimetry) software.

Findings: The XRD profile obtained for the Ni₃Al alloy revealed that the produced alloy had a polycrystalline structure, consistent with the literature. It has been determined that the alloys obtained by adding heavy metals in different combinations to this alloy also have a polycrystalline structure. From the SEM images, it was determined that all the produced alloys had a tightly packed homogeneous distribution and no agglomeration occurred. Again, from SEM analysis, it was determined that heavy metal doping supported the formation of γ'' phase as expected in alloys. Gamma-ray absorption experiments have a high degree of agreement with theoretical calculations. This was considered as proof that both the alloy production was carried out as planned and the experiments were carried out correctly. It has been determined that much better radiation absorbing materials are obtained by doping heavy metal into the Ni₃Al structure.

Results: 13 different Ni₃Al-based alloys were produced, which could be used in high temperature applications and environments where radiation safety is required, and whose compositions were determined in line with the predictions of the simulation programs. The crystallographic, morphological and gamma ray absorption abilities of these alloys were determined. It is thought that if the alloys produced can be synthesized as single crystals, there may be new types of superalloys that can be used in the mentioned areas.

Keywords: Superalloy, Ni₃Al, Heavy metal doping, Sintering, Powder metallurgy, Photon shielding, Gamma-ray, Phy-X/PSD

January 2024, 93 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Ni Tabanlı Alaşımlar.....	5
γ , γ' ve γ'' Fazları.....	5
İntermetalikler	7
Ni ₃ Al Alaşımları	8
Radyasyon	11
X ve gama ışınları	12
Yüksek enerjili fotonların maddeyle etkileşimleri.....	14
Foton madde etkileşim parametreleri.....	16
İnkohherent saçılma tesir kesiti/toplam zayıflama oranı ($R_{inc}/R_{toplaml}$).....	20
Eşdeğer atom numarası (Z_{eq}).....	20
Geometrik progresyon parametrelerinin belirlenmesi (G-P fit etme parametreleri).....	20
Maruz kalma ve Enerji soğurma foton kuvvetlendirme faktörleri (EBF ve EABF).....	21
Bragg Yasası ve X-ışınları Kırınım (XRD) Yöntemi	21
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	24
MATERYAL VE METOT	26
Malzeme Seçimi ve Alaşımların Üretilmesi	26
X-Işını Kırınım (XRD) Ölçümleri	29
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri.....	30
Gama Işını Soğurma Deneyleri.....	31
Teorik hesaplamalarda kullanılan Phy-X/PSD yazılımı	33
Deneysel Verilerin Hata Analizi	34

ARAŞTIRMA BULGULARI	36
XRD Sonuçları	36
SEM Görüntüleri	43
DeneySEL ve Teorik Gama IŞını Soğurma Parametreleri	50
SONUÇLAR ve TARTIŞMA	62
REFERANSLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	77



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Ni ₃ Al Alaşımının Temel Özellikleri	10
Tablo 2. Ticari Olarak Kullanılan Bazı Ni-Al Süper-Alaşımının Kompozisyonları	11
Tablo 3. Alaşım Üretiminde Kullanılan Elementlerin Temel Özellikleri.....	27
Tablo 4. Üretilen Alaşımın Kütlece Element Yüzdeleri (wt.%) ve Yoğunlukları	28
Tablo 5. Kütle Azaltma Katsayılarının Teorik ve Deneysel Sonuçları	51
Tablo 6. Kütle Azaltma Katsayılarının Deneysel Sonuçlarının Standart Sapmaları ve Teorik Değerlere Göre Rölatif Farkları.....	51



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Ni ₃ Al yapısına katkılanabilecek metallerin geliştirebileceği özellikler	3
Şekil 2. FCC kristal yapısı.....	5
Şekil 3. Gama ve gama prime fazlarının temsili gösterimi	6
Şekil 4. γ ve γ' fazlarından oluşan intermetalik yapının temsili gösterimi	8
Şekil 5. Ni metali ve Ni ₃ Al intermetalığının kafes yapısı	9
Şekil 6. γ ve γ' fazları	10
Şekil 7. Radyasyon türleri	12
Şekil 8. Karakteristik X-ışınlarının oluşumunun temsili gösterimi.....	13
Şekil 9. Karakteristik X-ışınlarının adlandırma terminolojisine ait şematik gösterim.....	13
Şekil 10. ¹³³ Ba bozunma şeması.....	14
Şekil 11. Fotoelektrik olayın temsili gösterimi	15
Şekil 12. Compton saçılmasının temsili gösterimi.....	16
Şekil 13. Çift oluşumun temsili gösterimi.....	16
Şekil 14. Zayıf ışın geometrisinin temsili gösterimi	19
Şekil 15. X-ışınlarının kırınımının temsili gösterimi	23
Şekil 16. SEM cihazının ana bileşenlerinin temsili gösterimi.....	25
Şekil 17. Presleme sonrası numunelerin görünüşleri.....	28
Şekil 18. Sinterlemede kullanılan Mikrotek marka MFX1010 model fırın	29
Şekil 19. Sinterleme sonrası alaşımların görünüşleri.....	29
Şekil 20. X-ışını kırınım ölçüm sistemi (a) genel görüntü, (b) Numune tutucu, X-ışını tüpü ve dedektör	30
Şekil 21. SEM cihazının genel görünümü.....	31
Şekil 22. Gama ışını soğurma geometrisi.....	32
Şekil 23. Örnek spektrum.....	33
Şekil 24. Phy-X/PSD yazılımının görsel ara yüzü	34
Şekil 25. Ni ₃ Al alaşımının XRD profili	36
Şekil 26. Al _{9.5} Cr ₁₆ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{28.5} alaşımının XRD profili	37
Şekil 27. Al ₁₀ Cr ₁₅ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni ₃₀ alaşımının XRD profili	37
Şekil 28. Al _{8.5} Cr ₁₇ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{25.5} alaşımının XRD profili.....	38
Şekil 29. Al _{9.5} Cr _{15.5} Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{28.5} alaşımının XRD profili	38
Şekil 30. Al ₁₀ Cr _{14.5} Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni ₃₀ alaşımının XRD profili	39

Şekil 31. Al _{8.5} Cr _{16.5} Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{25.5} alaşımasının XRD profili.....	39
Şekil 32. Al ₉ Cr _{15.5} Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni ₂₇ alaşımasının XRD profili	40
Şekil 33. Al _{10.5} Cr ₁₄ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{31.5} alaşımasının XRD profili	40
Şekil 34. Al _{9.5} Cr ₁₅ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{28.5} alaşımasının XRD profili	41
Şekil 35. Al _{8.5} Cr ₁₆ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni _{25.5} alaşımasının XRD profili	41
Şekil 36. Al ₁₀ Cr ₁₄ Nb ₁ Mo ₁ W ₁ Ni ₃₀ alaşımasının XRD profili.....	42
Şekil 37. Al _{9.5} Cr _{14.5} Nb ₁ Mo _{1.5} W ₁ Ni _{28.5} alaşımasının XRD profili	42
Şekil 38. Üretilen alaşımların karşılaştırmalı XRD profilleri	43
Şekil 39. S ₁ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	44
Şekil 40. S ₂ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	44
Şekil 41. S ₃ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	45
Şekil 42. S ₄ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	45
Şekil 43. S ₅ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	46
Şekil 44. S ₆ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	46
Şekil 45. S ₇ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	47
Şekil 46. S ₈ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	47
Şekil 47. S ₉ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	48
Şekil 48. S ₁₀ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	48
Şekil 49. S ₁₁ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	49
Şekil 50. S ₁₂ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	49
Şekil 51. S ₁₃ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri	50
Şekil 52. Deneysel ve teorik MAC değerleri arasındaki rölatif farklar.....	52

Şekil 53. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayılarının değişimi	52
Şekil 54. Üretilen alaşımların MAC değerlerinin Ni ₃ Al'ye göre rölatif farkları	53
Şekil 55. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında lineer azaltma katsayılarının değişimi	53
Şekil 56. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında yarı değer kalınlıklarının değişimi	54
Şekil 57. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında ortalama serbest yol değerlerinin değişimi	54
Şekil 58. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında atomic tesir kesitlerin değişimi	55
Şekil 59. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında elektronik tesir kesitlerinin değişimi.....	55
Şekil 60. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında etkin atom numarasının değişimi.....	56
Şekil 61. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında Rinc/Rtot değişimi	56
Şekil 62. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında eşlenik atom numaralarının değişimi.....	57
Şekil 63. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında EBF değerlerinin değişimi a) 1 MFP b) 10 MFP c) 20 MFP d) 40 MFP.....	58
Şekil 64. Farklı penetrasyon derinliklerinde EBF değerlerinin değişimi a) 0,015 MeV b) 0,15 MeV c) 1,5 MeV d) 15 MeV.....	59
Şekil 65. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında EABF değerlerinin değişimi a) 1 MFP b) 10 MFP c) 20 MFP d) 40 MFP	60
Şekil 66. Farklı penetrasyon derinliklerinde EABF değerlerinin değişimi a) 0,015 MeV b) 0,15 MeV c) 1,5 MeV d) 15 MeV.....	61

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

°C	: Santigrat derece
A	: Yüzey alanı
ACS	: Atomik tesir kesiti
A_i	: i 'nci elementin atomik numarası
akb	: Atomik kütle birimi
A_m	: Toplam atomik kütle
b	: 1 MFP'deki foton kuvvetlendirme faktörü
B	: Foton kuvvetlendirme faktörü
B	: Build-up faktörü
Barn	: Tesir kesiti
Becquerel (Bq)	: Aktivite birimi
d	: Kristal düzlemler arasındaki uzaklık
DAYTAM	: Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi
E	: Gelen fotonun enerjisi
EABF	: Enerji soğurma build-up faktörü
EBF	: Maruz kalma build-up faktörü
ECS	: Elektronik tesir kesiti
eV	: Elektron volt
FCC	: Yüzey merkezli kübik kristal yapı
FESEM	: Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
f_i	: i 'nci elementin mol kesri
FNRCS	: Hızlı nötron azaltma tesir kesiti
FWHM	: Yarı yükseklikteki tam genişlik
GEANT4	: Geometry and tracking
GeV	: Giga elektron volt
G-P	: Geometrik progresyon
Gray (Gy)	: Soğurulmuş doz düzeyi
HVL	: Yarı değer kalınlığı
I	: Numune varken dedektöre ulaşan foton sayısı
I_0	: Boş ölçüm
K	: Kristalin türüne bağlı olan sabit değer

keV	: Kilo elektron volt
kW	: Kilovat
L_{12-γ'}	: Çökelti fazı
LAC	: Lineer azaltma katsayısı
m	: Kütle
MAC	: Kütle azaltma katsayısı
MCNP-5	: Monte carlo N parçacık
MeV	: Mega elektron volt
MFP	: Ortalama serbest yol
mm	: Milimetre
MSP	: Kütle durdurma gücü
n	: Kırınım mertebesini veren tamsayı değerleri
N_A	: Avogadro sayısı
N_{eff}	: Etkin elektron yoğunluğu
n_i	: Malzemede bulunan i'nci atom sayısı
nm	: Nanometre
Phy-X/PSD	: Photon Shielding and Dosimetry yazılımı
r	: Yarıçap
R_{inc}	: İnkoherent saçılma tesir kesiti
R_{toplam}	: Toplam zayıflama oranı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Sievert (Sv)	: Doz eşdeğeri
SRIM	: Stopping and Range of Ions in Matter yazılımı
t	: Kalınlık
t_m	: Kütle kalınlığı
TVL	: Onda bir değer kalınlığı
w_i	: i'nci elementin ağırlık yüzdesi
X	: Fotonun hedef malzemeye nüfuz edebilme derinliği
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
Z	: Hedef malzemenin atom numarası
Z_{eff}	: Etkin atom numarası
Z_{eq}	: Eşdeğer atom numarası
Z_i	: i'nci elementin kütle numarası
α	: Alfa ışını
β	: Beta ışını

β	: Pik genişlemesi
γ	: Gama fazı
γ'	: Gama prime fazı
γ''	: Gama double prime fazı
θ	: Kristalin normaliyile gelen ışınlar arasındaki açı
λ	: Dalga boyu
π	: Pi sayısı
ρ	: Malzemenin yoğunluğu
σ_e	: Elektronik tesir kesiti
σ_T	: Atomik tesir kesiti



GİRİŞ

Havacılık sanayisinde yer alan temel ekipmanların uzun süreli yüksek sıcaklık değerlerinde (>1000 °C) çalışmaları gerekmektedir. Bu sıcaklık değerlerinde, yüksek korozyon direncine ve yüksek mekanik mukavemete sahip malzemelerin kullanımları elzemdir. Dolayısıyla, erime noktası 1000 °C üzerinde olan ve oda sıcaklığında sahip olduğu özelliklerini yüksek sıcaklık değerlerinde de koruyabilen malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Sıradan metal, seramik, beton, polimer ve cam gibi malzemelerin, düşük erime noktaları, kırılabilirlikleri ve düşük mekanik mukavemetleri gibi zayıf özellikleri bu malzemelerin kullanımını engellemektedir. Tek bir metalin bu özellikleri kendi içerisinde barındırması söz konusu değildir. Bu sebeple, özellikle türbin kanadı ve roket motorlarında bu amaçla sadece alaşımlar kullanılabilir. Ayrıca, dünyanın artan nüfusuna paralel olarak artan enerji ihtiyacına en efektif çözümü sunan enerji, nükleer enerjidir. Nükleer enerji üretiminde ortaya çıkan radyasyonu daha az maliyetle güvenilir bir şekilde zırlamak, insan ve çevre sağlığı için oldukça önemlidir. Kurşun (Pb) en iyi radyasyon soğurucu malzeme olarak bilinmesine rağmen, onun birçok zayıf özelliği (düşük erime noktası ve zayıf mekanik mukavemet), bu elementin kullanımına ciddi kısıtlamalar getirmektedir. Bu nedenle, toksik etkileri olmayan, korozyon direnci yüksek, yüksek sıcaklıklarda yapısal özelliklerini koruyabilen ve iyi foton, nötron ve parçacık radyasyonu soğurma kapasitesine sahip malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Havacılık teknolojisinde, sürekli artan itme-ağırlık oranı ve yanma odasının çalışma sıcaklığının artması nedeniyle, yüksek sıcaklıkta kullanılan malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi gereklidir. İntermetalik tabanlı alaşımlar, düzenli yapıları sebebiyle, kritik bir sıcaklık değerine kadar arzu edilen fizikokimyasal ve mekanik özelliklere sahiptirler (Jozwik *et al.* 2015; Li and Gao, 2008; Martin, 2007; Paufler, 1995). Dolayısıyla, intermetalik tabanlı alaşımların araştırılması ve geliştirilmesi, araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir. İntermetalikler genel olarak Ni-Al, Fe-Al ve Ti-Al yapılarını esas alan alaşımlardan meydana getirilmektedir. Bu yapıların kullanıldığı intermetaliklerde ana bileşen olarak NiAl, Ni₃Al, FeAl, Fe₃Al, TiAl, Ti₃Al ve TiAl₃ kullanılmaktadır (Aoki and Izumi, 1978; Deevi *et al.* 1997; Deevi and Sikka, 1996; Karczewski *et al.* 2007; Liu *et al.* 1997; Łyszkowski and Jerzy, 2007; Pawłowski *et al.* 2009; Senderowski, 2014; Sikka *et al.* 2000; Stoloff *et al.* 2000; Wu, 2006; Yamaguchi *et al.* 2000). Ana bileşen olarak bu metaller arasından ön plana çıkan element nikteldir. Bu metalin hem yüksek erime noktası (1455 °C), hem nispeten düşük maliyeti hem de

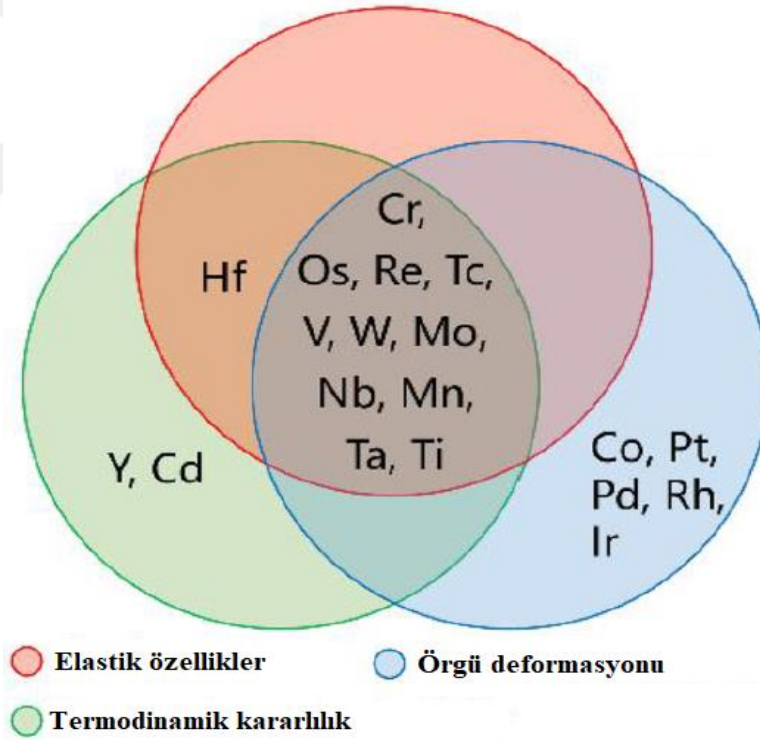
oda sıcaklığında sahip olduğu kristalografik özelliklerini yaklaşık 1300 °C'lere kadar koruyabilmesi, onu ön plana çıkarmaktadır. Ancak daha önce izah edildiği üzere, herhangi bir metalin tek başına, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, yüksek foton ve nötron soğurma özelliği sergilemesi mümkün değildir. Bu gereksinim doğrultusunda, Ni metaline farklı metallerin katkılanmasıyla elde edilen alaşımlara dair çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ni-Ti, Ni-Fe, Ni-Co alaşımlarına ek olarak son yıllarda üzerinde en çok araştırma yapılan alaşım gruplarından birisi de Ni₃Al alaşımlarıdır.

Ni₃Al-tabanlı alaşımlar, yüksek erime noktası (~1395°C), düşük yoğunluk ve mükemmel korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle geleneksel Ni bazlı alaşımlara kıyasla daha çekici özellikler sergilerler (Deevi and Sikka, 1996; Jozwik *et al.* 2015; Pei *et al.* 2020; Raju *et al.* 2018; Sheng *et al.* 2009). Bununla birlikte, oda sıcaklığında polikristal yapıda olan bu alaşımlar oldukça kırılgan yapıda olduklarından, işlenmeleri ve üretilmeleri oldukça zordur. Ni₃Al'nin oda sıcaklığındaki kırılganlığı, yüksek dereceli düzenli kafeslerde azalan çıkık hareketliliğine atfedilir (Shee *et al.* 1998; Wang, 1998). Bu alaşımın daha geniş uygulama alanlarında kendine yer bulabilmesi için literatürde raporlanan çalışmalar mevcuttur. (Aoki and Izumi, 1978), az miktarda bor katkılmasının, Ni₃Al'nin kırılganlığını azaltabileceğini raporlamıştır. Benzer şekilde, (Liu *et al.* 1985), bor ilavelerinin Ni₃Al bazlı alaşımın tane sınırı kimyası ve çekme özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve bor ilavelerinin alaşımın oda sıcaklığındaki sünekliğini önemli ölçüde iyileştirebildiğini bulmuşlardır. Bazı araştırmacılar, bu bor katkılmasına alternatif olarak Zr katkılmasıyla da sünekleşmenin iyileştirilebileceğini raporlamışlardır (George *et al.* 1992; Gu *et al.* 1996; Li *et al.* 2004).

Geleneksel Ni bazlı alaşımlarla karşılaştırıldığında, Ni₃Al bazlı alaşımların en önemli özelliklerinden biri, düşük Ni/Al oranı olarak da ifade edilebilen yüksek Al içeriğidir. Ni₃Al bazlı alaşımların mikro yapısı esas olarak γ' ve γ fazlarıdır. Ayrıca, çeşitli element ilaveleri ile Ni₃Al bazlı alaşımlarda β fazı, α -Cr çökeltisi ve bazı karbür türleri de rapor edilmiştir (Wu *et al.* 2021). Düşük Ni/Al oranı, Ni₃Al bazlı alaşımlardaki γ' fazının hacim fraksiyonunu Ni bazlı alaşımlardakinden daha yüksek yapar ve %80' in üzerine çıkarır. Ayrıca, Ni₃Al bazlı alaşımların yüksek sıcaklıklardaki mükemmel performansları, temelde iki farklı faza (γ' ve γ) sahip olmasına atfedilir (WU Jing, 2019).

Son yıllarda, yüksek sıcaklık uygulamaları için ön plana çıkan malzeme grubu süper-alaşımlardır. Sayıları beş ile on arasında değişen metalin farklı oranlarda belirli bir amaç doğrultusunda bir araya getirilmesi ile elde edilen alaşımlara süper-alaşım denilmektedir. Bu alaşımların oluşturulmasında ana metal, genel olarak %60'lık bir kütlece yüzdeye sahiptir. %40'lık kütlece bileşen ise, geliştirilmek istenen özelliğe göre farklı metallere seçilmektedir.

Ancak alaşım üretiminde %1'lik bir kütlece yüzde ile katkılama planlandığında, 8-9 metal için 10^9 civarında kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Böyle bir olasılık arasından optimum özellikleri sağlayabilecek süper-alaşımın deneysel olarak belirlenmesi neredeyse imkansızdır. Bu zorluğun üzerinden gelebilmek için, araştırmacılar, metallerin kendi saf hallerindeki fiziksel ve kimyasal özelliklerini kullanarak çeşitli simülasyon programları geliştirmişlerdir. Bu programlar termodinamik kuralları ve kristalografik parametreleri dikkate alarak hazırlanmaktadır. Bu programlar ayrıca, belirlenen taban metal ve katkılama metalleri için tüm kombinasyonlarda alaşımları teorik olarak belirlemektedir. Bu kombinasyonlar arasından amaca uygun malzeme seçimi ise yoğunluk, erime noktası, sürünme ve kristalografik parametrelere kısıtlamalar konularak yapılmaktadır. Böylece sayıları deneysel olarak üretilebilecek seviyeye düşürülen alaşımlar için üretimler yapılarak karakterizasyonları yapılmaktadır. Hangi metalin Ni_3Al yapısına nasıl bir katkıda bulunabileceğine dair önemli bir çalışma (Xu *et al.* 2022) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaya göre; metal katkılamasıyla geliştirilebilecek özelliklerin küme gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ni_3Al yapısına katkılanabilecek metallerin geliştirebileceği özellikler

Ni_3Al tabanlı süper-alaşımların yapısal özellikleri üzerine literatürde çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, nükleer güvenlik uygulamalarını da içine alan bir çalışmaya yapılan literatür taramasında rastlanmamıştır. Ancak farklı türde süper-alaşımların radyasyon zırhlama parametrelerini içeren çeşitli deneysel ve teorik çalışmalar bulunmaktadır. (Korkut *et al.* 2015), Renyum ile zenginleştirilmiş Ni-tabanlı 3 farklı süper-alaşımın hızlı nötron tesir kesitlerini

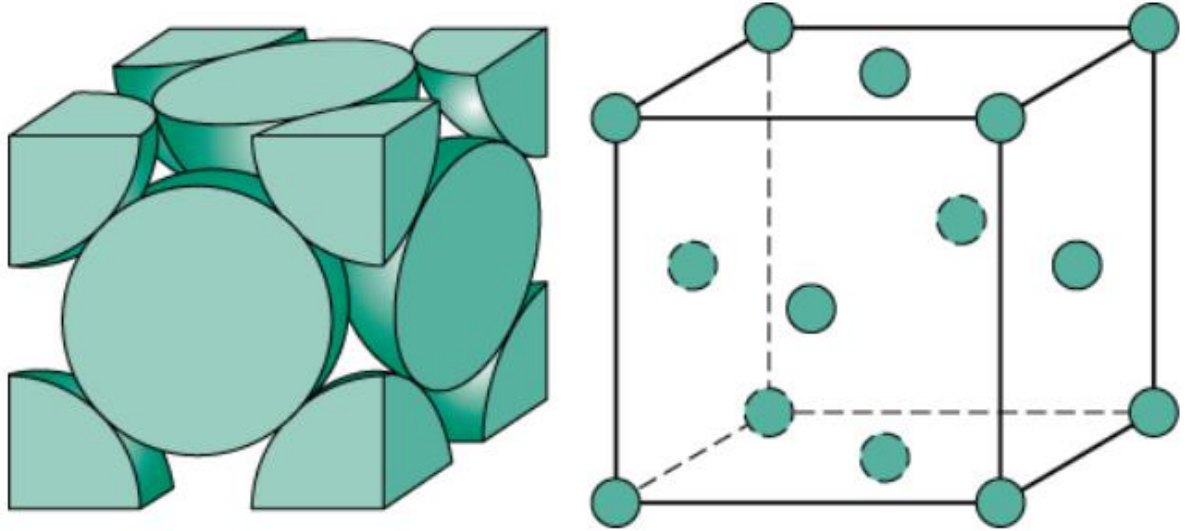
Am-Be nötron kaynağı kullanarak deneysel olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları GEANT4 simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ürettikleri alaşımların Ni tabanlı 600 alaşımından daha iyi zırhlama kapasitelerine sahip olduklarını belirtmişlerdir. (M. I. Sayyed *et al.* 2020) Ni ve Co tabanlı 6 farklı süper-alaşımın foton ve nötron soğurma tesir kesitlerini hem MCNP-5 hem de Phy-X/PSD yazılımı aracılığıyla teorik olarak çalışmışlardır. Çalışmada ayrıca proton ve alfa parçacık radyasyonları için kütle durdurma gücü (MSP) ve menzil değerleri SRIM yazılımı aracılığıyla yine teorik olarak hesaplanmıştır. Yazarlar MAR-302 kodlu süper-alaşımın en iyi foton ve parçacık radyasyonu zırhlama özelliği gösterdiğini ancak bu alaşımın incelenen diğer alaşımlar (MAR-247, Inconel-625, Inconel-718, Nimocast-75 ve WI-52) arasından en düşük nötron zırhlama yeteneğine sahip olduğunu raporlamışlardır. (Sriwongsa *et al.* 2022), Ni-tabanlı Inconel 600, 718 ve 725 süper alaşımlarının yüksek enerjili fotonlar (1 keV-100 GeV) ve hızlı nötronlar (2 MeV-12 MeV) için zırhlama karakteristiklerini teorik olarak çalışmışlardır. Çalışmada Inconel 725 süper-alaşımın hem diğer karşılaştırılan süper-alaşımlara göre hem de ticari olarak kullanılan bazı standart betonlara göre daha iyi zırhlama yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. (Aygün, 2021), Re, B4C ve B katkılı Ni-tabanlı süper-alaşımların nötron ve foton zırhlama özelliklerini hem deneysel hem de GEANT4 ve Phy-X/PSD yazılımı ile teorik olarak araştırarak sonuçlarını ticari 316LN çeliği ile karşılaştırmış ve geliştirdiği süper-alaşımların nükleer güvenlik gerektiren uygulamalarda kullanılabileceği sonucunu elde etmiştir.

Yapılan literatür taraması göstermektedir ki gerek Ni-tabanlı, gerekse diğer süper-alaşımlarla ilgili, literatürde çok sayıda yapısal ve tribolojik özellikleri içeren çalışma bulunmaktadır. Ancak tüm süper-alaşım gruplarında radyasyon güvenliği uygulamalarını içeren çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Dahası bu çalışmaların birçoğu simülasyon teknikleriyle veya teorik olarak yapılmıştır. Literatür taramalarında, Ni₃Al tabanlı süper-alaşımlarda yapısal ve nükleer radyasyon zırhlama karakteristiklerini birlikte ele alan ve bunlar arasında var olabilecek korelasyonu deneysel ölçümlerle belirleyen bir çalışmaya rastlanmaması bu tez çalışmasının çıkış noktalarından birisidir.

KURAMSAL TEMELLER

Ni Tabanlı Alaşımlar

Nikel (Ni) atom numarası 28, atom ağırlığı 58,693 akb olan 3d geçiş grubu metallere aittir. Bu elementin erime ve kaynama noktaları sırasıyla 1435°C ve 2730°C'dir. Saf Ni oda sıcaklığında örgü sabiti 3.520 Å olan yüzey merkezli kübik kristal (FCC) yapısına sahiptir Şekil 2 (Mahmoud and Mousseau, 2018). Yoğunluğu 8.9 g/cm³ olan bu element gümüş beyaz renktedir. Nikel bileşiklerinde +1, +2, +3 ve +4 değerlik alabilmesine rağmen, +4 oksidasyonunu temsil eden bileşikler çok az sayıda olup kararsız bir yapı sergilerler. Ayrıca bu element 800°C'nin üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında, ortamda bulunan oksijenlerle $2\text{Ni} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NiO}$ reaksiyonunu gerçekleştirerek NiO bileşimini oluştururlar. Kimyasal olarak düşük bir aktiviteye sahip olmasına rağmen, yüksek sıcaklık dayanımı, üstün korozyon direnci ve düşük genleşme katsayısı gibi özellikleri, bu metalin mühendislik ve tıbbi uygulamalarda gerekli olan birçok alaşımın temelini oluşturmasına neden olmaktadır.

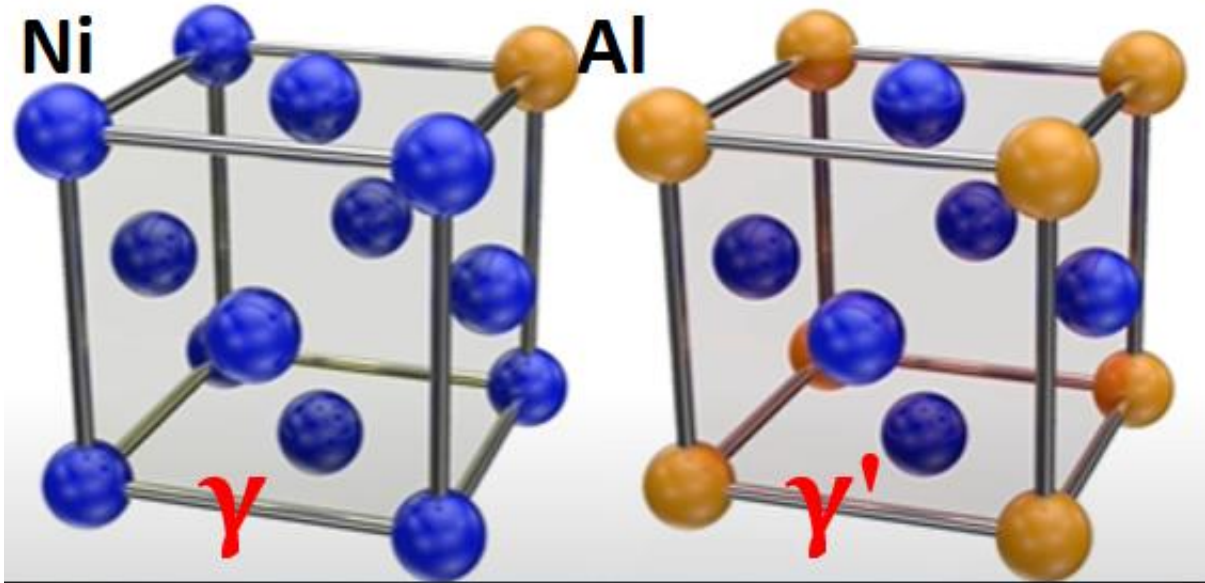


Şekil 2. FCC kristal yapısı

γ , γ' ve γ'' Fazları

Yüzey merkezli kübik bir kristal yapının fazına östenitik veya gama fazı adı verilir. Bu fazda, yapı sıkı paketlenmiş durumdadır. Bu fazda, yapıda meydana getirilecek bir boşluk komşu atomlar tarafından kolayca doldurulma eğilimi gösterir. Gama fazındaki bir yapıda atomların difüzyonu dolayısıyla da tabakaların dislokasyon hareketleri oldukça hızlı gerçekleşir. Bu durumda, yapının dışarıdan maruz kalacağı yüksek sıcaklık durumunda veya mekanik kuvvet durumunda kolayca şekil değiştirmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte,

yapıya çok düşük katkı oranlarında yapılan katkılama işleminde, yapının kristalografik yapısında çok önemli bir değişim gözlenmez. Dolayısıyla gama fazı ya tek cins atomdan oluşan FCC yapıli maddelerde, ya da FCC yapıli bir sisteme çok düşük katkılama durumunda gözlenir. Yapıya katkılanan metal konsantrasyonunun artması durumunda, katkılanan atomlar kübik yapının köşe noktalarını işgal ederlerse, yapı yine kübik yapısını korur ve örgü sabitinde büyük bir değişim olmaz. Ni-tabanlı alaşımlarda, Ti ve Al'nin uygun oranlarda katkılanması, gama prime fazının oluşumunu destekler. Böyle bir durumda, yapıda oluşabilecek herhangi bir boşluk, diğer atomlar tarafından hemen doldurulamayacağından, yapı difüzyon hızını dolayısıyla da dislokasyon hızını azaltarak daha kararlı bir hal sergiler. Şekil 3'te Ni ve Al atomları ile oluşturulabilecek gama ve gama prime fazlarının temsili gösterimi yapılmıştır. Gama ve gama prime fazlarına ek olarak, yapıya Nb veya V gibi metallerin katkılanması durumunda, bu atomlar köşe noktalarda bulunan atomların yerine oturarak daha uzun örgü sabitine sahip bir kristal yapı oluştururlar. Böyle bir durumda kare halinde olan gama prime fazı gama double prime fazına dönüşür. Gama double prime fazları cisim merkezli tetragonal (BCT) kristal yapısına sahiptirler.



Şekil 3. Gama ve gama prime fazlarının temsili gösterimi

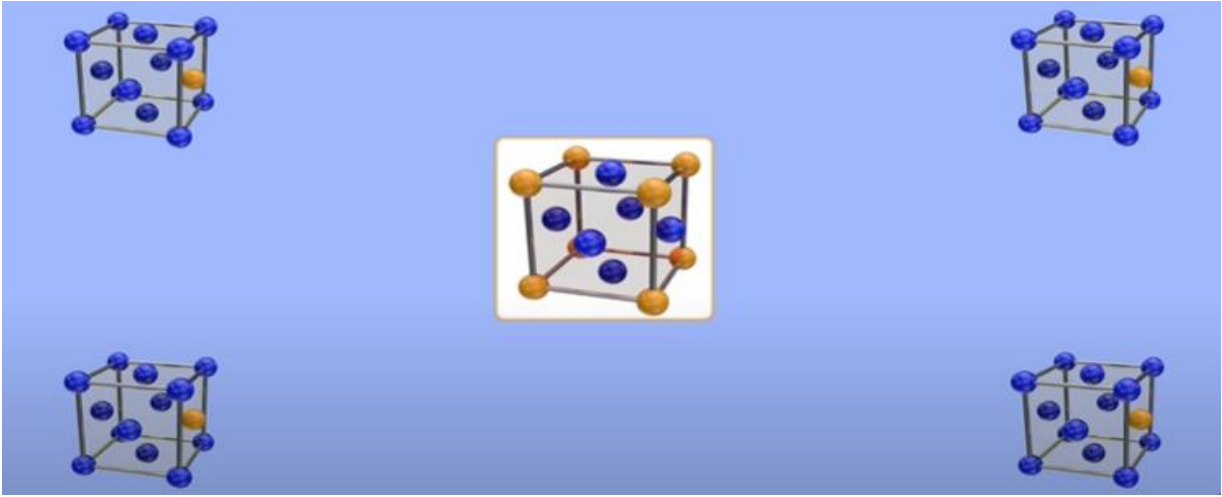
İlk bakışta γ ve γ' arasındaki fark oldukça küçük bir fark gibi görünebilir. Bu iki fazın temel şekli ve yapısı hemen hemen aynıdır ve her ikisi de alüminyum nikelinden oluşur. γ evresinde bir boşluk meydana geldiğinde, boşluğun nerede olduğuna bakılmaksızın, en yakın komşu atomlardan herhangi birinin oraya taşınması oldukça kolaydır. Nikel veya alüminyum için tercih edilen siteler yoktur. Dolayısıyla, bu tür bir yayılma nispeten kolaydır. Öte yandan, aynı şeyi γ' 'da denersek, bu yapı bu sıralı düzeni korumak istediğinden dislokasyon hareketi ve atomik difüzyon genellikle bastırır. Bir alüminyum sahasında boşluk varsa, en yakın atom

nikeldir ve gerçekten buraya geçmek istemez. Gerçekte, nikelin bu tarafı işgal etmesi, anti-site kusuru olarak bilinen şeyi yapması mümkündür, ancak bunu yapmak için enerji bariyeri gama fazından daha yüksektir. Aynı prensip dislokasyon hareketi için de geçerlidir (Wu *et al.* 2021).

İntermetalikler

γ ve γ' fazlarının bir arada bulunduğu düzenli bir yapıya intermetalik adı verilir Şekil 4. İntermetalikler, katı bileşikler olarak var olan iki veya daha fazla metal ile metal ve/veya metal olmayan atomların birleşiminden oluşan bir malzeme grubudur. Konvansiyonel metaller ve alaşımlarla karşılaştırıldığında, intermetalik bazlı alaşımlar birkaç spesifik özellik sergilerler. Geleneksel malzemeler, metal bir kafes içinde iki veya daha fazla metalik ve/veya metalik olmayan elementin katı çözeltilerinden oluşurlar. Geleneksel alaşımlar da atomlar nispeten zayıf metalik bağlarla bağlanır. Sıralı intermetaliklerde ise, kristal bir kafes içerisinde güçlü iyonik ve kovalent bağlar da bulunur. Dahası, atomlar her zaman kristal bir kafes içinde katı konumlarını alırlar ve kritik bir sıcaklık değerine kadar kararlı uzun menzilli bir düzen ile karakterize edilen düzenli bir süper örgü oluştururlar. Bu yapısal özellikler, intermetaliklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinden, yani nispeten yüksek bir erime noktasından ve yüksek bir mukavemetten (özellikle yüksek sıcaklıkta) sorumludur. Bu özellikleri onları seramiklere benzer kılmaktadır. Bununla birlikte, seramik malzemelerin aksine, intermetalikler metalik bir parlaklığın yanı sıra iyi termal ve elektrik iletkenliğe de sahiptirler (Jozwik *et al.* 2015).

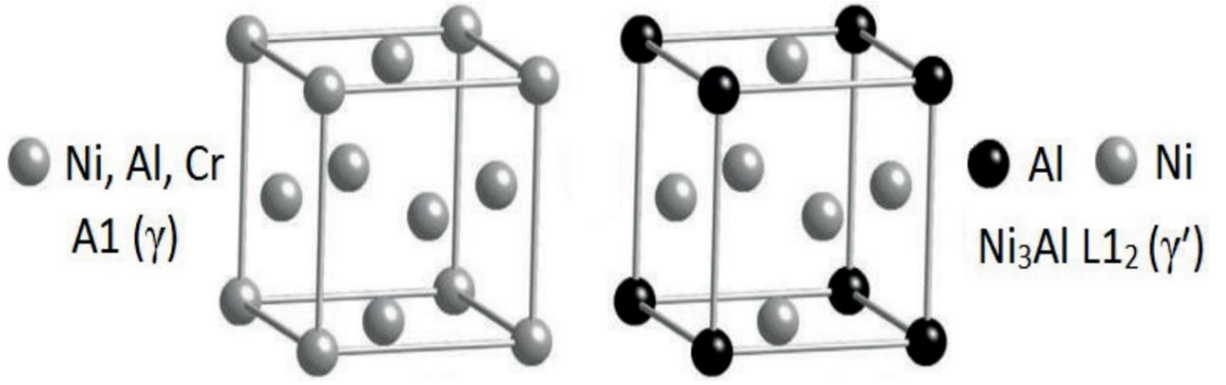
Çok sayıda intermetalik fazın bulunması ve incelenmesi nedeniyle, metalurji ve performans özellikleri alanındaki en ileri çalışmalar, Ni-Al, Fe-Al ve Ti-Al ikili sistemlerinin fazları için gerçekleştirilmiştir. Ana araştırmalar, NiAl, Ni₃Al, FeAl, Fe₃Al, TiAl, Ti₃Al ve TiAl₃ bazlı alaşımlara odaklanmıştır. Sahip olduğu kübik kristal yapısını 1400 °C'lere varan sıcaklık değerlerinde bile koruyabilen Ni-tabanlı alaşımlar, Fe ve Ti-tabanlı alaşımlara göre daha fazla dikkat çekmektedir. Ayrıca Ni-tabanlı süper-alaşımların geniş bir sıcaklık aralığında sahip oldukları yüksek sürünme dayanımları ve mekanik mukavemetleri, bu alaşımların yüksek sıcaklık gerektiren havacılık ve nükleer enerji sistemlerinde kullanılabilirliğini artırmaktadır. Uçak motorlarında bulunan türbin kanadı ve kompresör gibi temel ekipmanlarda, tabanı Ni olan süper-alaşımlar kullanılmaktadır. Bu süper-alaşımlar için literatürde kesin belirlenmiş sınırlar olmamakla birlikte, genellikle yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen üstün sürünmeye, iyi korozyon direncine, sertliğe ve iyi mekanik mukavemete sahip olan ve sayıları 10'a kadar ulaşabilen elementlerin farklı kombinasyonlarından oluşan malzemelerdir.



Şekil 4. γ ve γ' fazlarından oluşan intermetalik yapının temsili gösterimi

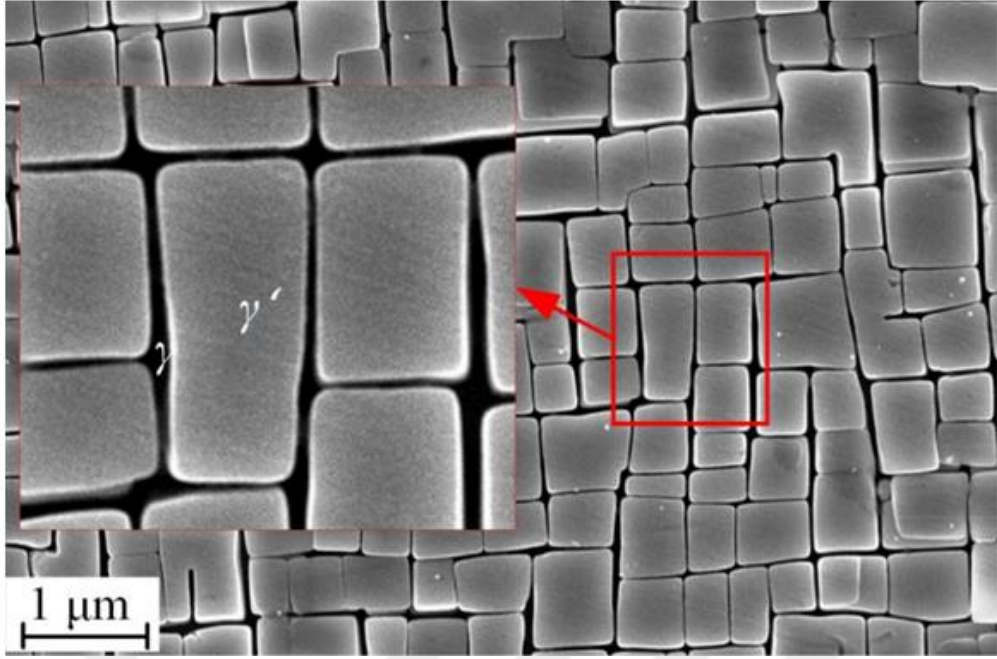
Ni₃Al Alaşımları

Ni₃Al alaşımları, yaklaşık %50 hacim oranına sahip, düzenli L₁₂- γ' (Ni₃Al) çökelti fazlarının düzensiz yüzey merkezli kübik γ (FCC-Ni) matris fazlarına uyumlu bir şekilde gömülü olan mikro yapılarıdır (Arora *et al.* 2017; Long *et al.* 2018; Reed, 2008; Yuan *et al.* 2018). Şekil 5'te Ni metali ve Ni₃Al intermetalığının kafes yapısı gösterilmiştir. Bu alaşımlar, erime noktalarının yarı değerinin üstündeki sıcaklıklarda plastik deformasyona maruz kalırlar ve kırılırlar (Hafez Haghghat *et al.* 2013). 650 °C' den 760 °C' ye kadar, güçlendirme mekanizması γ' fazının deformasyon ikizlenmesidir. Daha yüksek sıcaklıklarda, güçlendirme performansı iki mekanizma ile açıklanmaktadır. Bunlardan ilki γ' fazının Shockley kısmi çıkıklarının kaymasına karşı direnci, ikincisi ise, bitişik [111] γ' düzlemleri üzerinde eşleşmeye bağlı olarak azalan deformasyon hızıdır. Bu nedenle, γ' çökeltisi, süper-alaşımların yüksek sıcaklık direnci üzerindeki kilit faktörlerinden biridir. Yüksek sıcaklık ve yükleme gerilimine sahip bir süreç olan sürünme, Ni-tabanlı süper-alaşımları tahrip edebilir, çünkü L₁₂- γ' çökeltisi yönlü olarak kabalaşacak ve salları yükleme yönüne dik olarak biçimlendirecektir (Cao *et al.* 2018). Bu nedenle, L₁₂ yapısının γ' çökelti stabilitesini iyileştirmek, Ni-tabanlı süper-alaşımlar için sürünme direncini iyileştirmenin etkili bir yoludur. Bu süper-alaşımların γ' çökeltisi A₃B geometrik olarak sıkı paketlenmiş fazdır ve genellikle Ni₃(Al, Ti) olarak sıralanır (Sato *et al.* 2006). Uçak motorlarının performansını artırmak için, Ni₃(Al, Ti)'den daha kararlı bir γ' çökeltisi tasarlamak mümkündür ve daha sonra sürünme direncini iyileştirmek için mikro yapının optimize edilmesi gereklidir. Alaşımlama, mikro yapıyı ayarlamak ve mekanik davranışı geliştirmek için olanaklar sağlayan metalurjik sistemler için her zaman gerekli olmuştur (Z. Zhu *et al.* 2015).



Şekil 5. Ni metali ve Ni₃Al intermetalığının kafes yapısı

Daha farklı bir ifadeyle, γ' düzenli bir faz olduğu için atomlar yapı içinde düzensiz γ fazında olduğu kadar kolay hareket edemezler. Sonuç olarak bu γ' aşaması ilk bakışta γ aşamasından daha iyi görünüyor. Dislokasyon hareketini ve atomik difüzyonu bastırmak isteyerek işe başladık ve her ikisini de γ yı γ' 'a çevirerek yapabiliriz. Ama bu tür aşamada karşılaşılan büyük bir problem ortaya çıkmaktadır. Düşük sıcaklıklarda metalleri sünek yapan etki dislokasyon hareketidir ve γ' fazında dislokasyon hareketi olmadığından oluşan alaşım oldukça kırılımandır. Bu nedenle elde edilen bu basit yapı, halâ bir metal olmasına rağmen mekanik özellikler açısından oda sıcaklığında seramik veya cam malzeme gibidir. Özetle yapının sadece γ' fazından oluşuyor olması da istenen bir durum değildir (Jozwik *et al.* 2015; Wu *et al.* 2021; Xu *et al.* 2022). Dolayısıyla, malzemelerin üstün özellikler sergileyebilmesinin yolu, γ ve γ' fazlarının bir arada olduğu düzenli bir yapıya sahip olmasından geçmektedir. γ ve γ' fazları ile oluşturulan yüksek dayanımlı bir yapıyı, tuğla ve harç üzerinden örneklendirecek olursak, γ fazı harç gibi davranırken, γ' fazı tuğlalar gibi davranmaktadırlar. Ni tabanlı alaşımlarda, Al, Mo, Cr, Co ve Fe gibi metaller genel olarak gama fazının oluşumunu destekliyorken, Ti, Nb, Ta ve V gibi metaller γ' fazını desteklerler. Şekil 6'da gama ve gama prime fazlarının temsili gösterimleri verilmiştir.



Şekil 6. γ ve γ' fazları (Feng *et al.* 2022)

Ni_3Al alaşımlarının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ni_3Al Alaşımlarının Temel Özellikleri

Kristal yapısı	:	Kübik L_{12}
Örgü sabiti (Å)	:	3,559
Yoğunluk (g/cm^3)	:	7,16
Akma dayanımı (MPa)	:	855
Termal iletkenliği (W/m.K)	:	76
Erime noktası ($^{\circ}C$)	:	1395
Termal genleşme katsayısı ($10^{-6}/K$)	:	12,5
Elektriksel özdirenci ($10^{-8}\Omega m$)	:	32,59

Son yıllarda önemi giderek artan Ni_3Al alaşımları;

- 650-1100 $^{\circ}C$ sıcaklık değerleri arasında yüksek çekme ve basma mukavemetine
- sürekli bir yüzey alümina tabakasının oluşması nedeniyle oksijen ve karbonla zenginleştirilmiş atmosferlerde 1100 $^{\circ}C$ 'ye kadar yüksek korozyon direncine
- organik asitlerde (oksalik ve asetik asitler), bazlarda (sodyum ve amonyum hidroksitler) ve sodyum klorür çözeltilisinde yüksek korozyon direncine
- yüksek sürünme direncine
- yüksek sıcaklıkta (600 $^{\circ}C$ 'nin üzerinde) mükemmel aşınma direncine

sahiptirler. Tablo 2'de ticari uygulamalar ve geleneksel yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan Ni-Al-tabanlı alaşımların kimyasal bileşimleri verilmiştir.

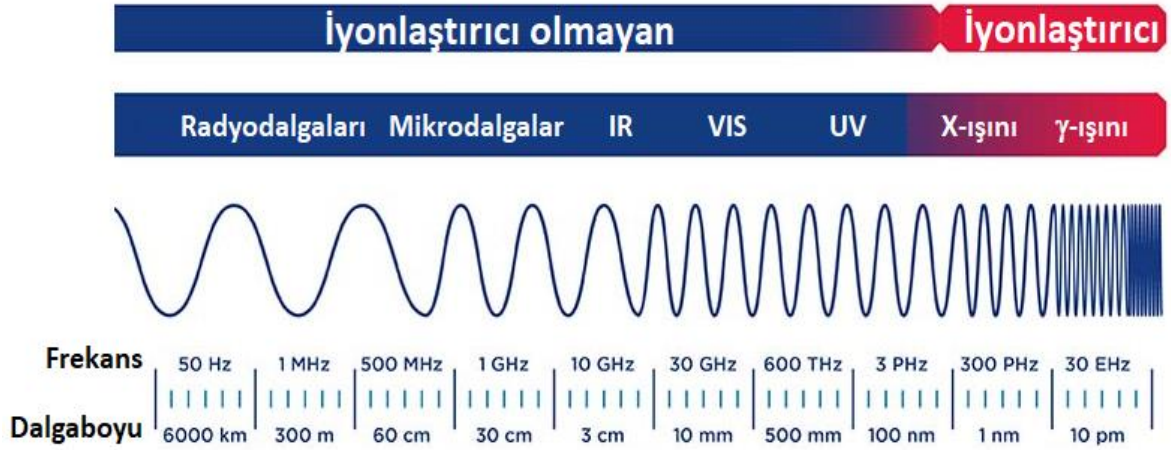
Tablo 2. Ticari Olarak Kullanılan Bazı Ni-Al Süper-Alaşımalarının Kompozisyonları (Jozwik *et al.* 2015)

Alaşım	Kimyasal Kompozisyon (ağırlıkça %)										
	Al	Cr	Mo	Zr	B	C	Fe	Ti	W	Si	Ni
IC-50	11,3	–	–	0,6	0,02	–	–	–	–	–	balans
IC-221M	8	7,7	1,43	1,7	0,008	–	–	–	–	–	balans
IC-218	8,65	7,87	–	0,86	0,02	–	–	–	–	–	balans
IC-396	7,98	7,72	3,02	0,85	0,005	–	–	–	–	–	balans
IC-438	8,1	5,23	7,02	0,13	0,005	–	–	–	–	–	balans
IC-6	7,8÷8,5	–	14	–	0,03÷0,15	–	–	–	–	–	balans÷balans
VKNA-1V	8,83	5,58	3,5	0,45	–	0,03	–	1,54	2,82	–	balans
Haynes 214	4,5	16	–	–	–	0,03	3	–	–	0,1	balans
FeNiCr (HU)	–	18	–	–	–	0,55	42,45	–	–	–	balans
Alloy 800	0,4	21	–	–	–	0,05	45,5	0,4	–	–	balans

Radyasyon

Bir kaynaktan yayımlanan ve uzayda ışık hızıyla hareket eden enerjiye radyasyon denilir. Esasen radyo dalgalarından başlayıp gama ışınlarına kadar uzanan geniş bir dalga boyu yelpazesinde bulunan tüm elektromanyetik ışınım radyasyon olarak anılmaktadır. Bununla birlikte bu ışınımın her biri farklı frekanslara dolayısıyla da farklı enerjilere sahiptirler. Elektromanyetik ışınımın bu özelliği, onların farklı uygulama alanlarında kullanımına olanak sağlamaktadır. Işınım şeklinde olan radyasyonlardan X-ışınları ve gama ışınları, iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılırken, radyo dalgaları ile UV ışınlar arasında kalan ışınım, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak tanımlanırlar. Işınım türündeki radyasyonlara ek olarak, iyonlaştırıcı özellik sergileyebilen parçacık radyasyonları da mevcuttur. Bunlar genel olarak alfa ve beta parçacıkları, elektronlar ve hızlı nötronlardır. Ayrıca tüm elementlerin yüksek hızlandırma potansiyelleri altında hızlandırılmasıyla elde edilebilecek parçacık radyasyon türleri de mevcuttur. Şekil 7’de, belirtilen radyasyon türlerinin genel bir şeması verilmiştir.

Enerji

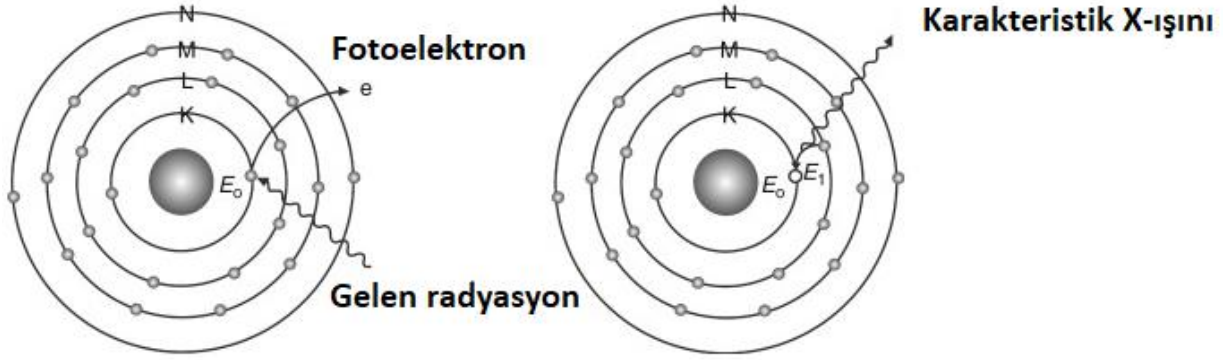


Şekil 7. Radyasyon türleri

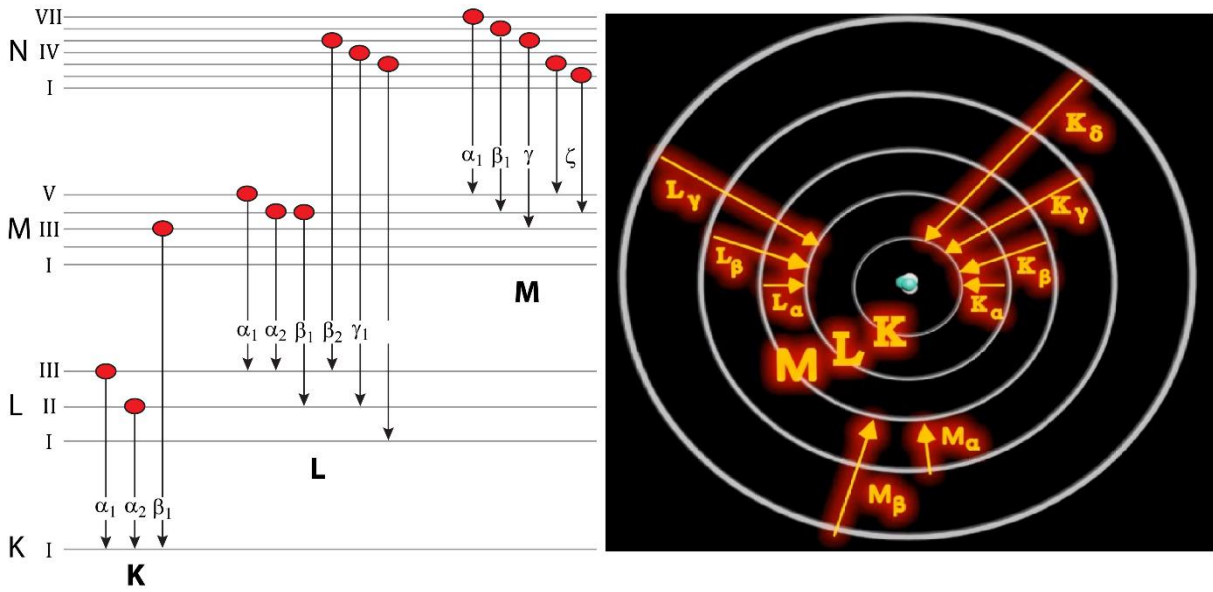
Radyasyonla ilgili çalışmalarda, ortak bir terminoloji, uluslararası standart enstitüsü tarafından belirlenmiştir. Buna göre, aktivite birimi olarak Becquerel (Bq), soğurulmuş doz düzeyi Gray (Gy) ve doz eşdeğeri olarak Sievert (Sv) belirlenmiştir. 1 Bq, aktivitesi 1 olan yani, saniyede 1 parçalanma yapan atomun aktivitesi olarak tanımlanırken, 1 Gy, radyasyona maruz kalan maddenin 1 kg'ına 1 joule'lük enerji veren radyasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır. 1 Sv ise, 1 Gray'lik X ve gama-ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır.

X ve gama ışınları

Elektromanyetik spektrumun en yüksek enerji bölgesinde bulunan X ve gama ışınları sahip oldukları yüksek giricilik özellikleri nedeniyle hem akademik araştırmalarda hem de tıbbi uygulamalarda tanı ve tedavide önemli bir yere sahiptir. X-ışınlarının dalga boyları 0.01 nm 10 nm arasında olup enerjileri 100 eV ile 100 keV arasında olabilir. Bu ışınlar, hem yüklü parçacıkların ivmeli hareketlerinden hem de atomik yörüngelerde bulunan elektronların yeniden düzenlenmesi ile oluşturulabilirler. Hızlandırılmış yüklü parçacıkların bir metal hedefe doğru ilerlerken çarpışma yoluyla ivmeli harekete zorlanmaları neticesinde ortaya çıkan ışınlar Bremsstrahlung diye de adlandırılabilen sürekli X-ışınlarıdır. Herhangi bir elementin atomik orbitallerinde bulunan elektronların uyarılma ve yeniden düzenlenmesi sonucu oluşan ışınlar ise, ilgili elementin doğrudan karakteristik özelliklerini yansıttığından, karakteristik X-ışınları olarak adlandırılırlar. Şekil 8 ve 9'da sırasıyla, karakteristik X-ışınlarının oluşumunun temsili bir gösterimi ve karakteristik X-ışınlarının adlandırma terminolojisine ait gösterim verilmiştir.



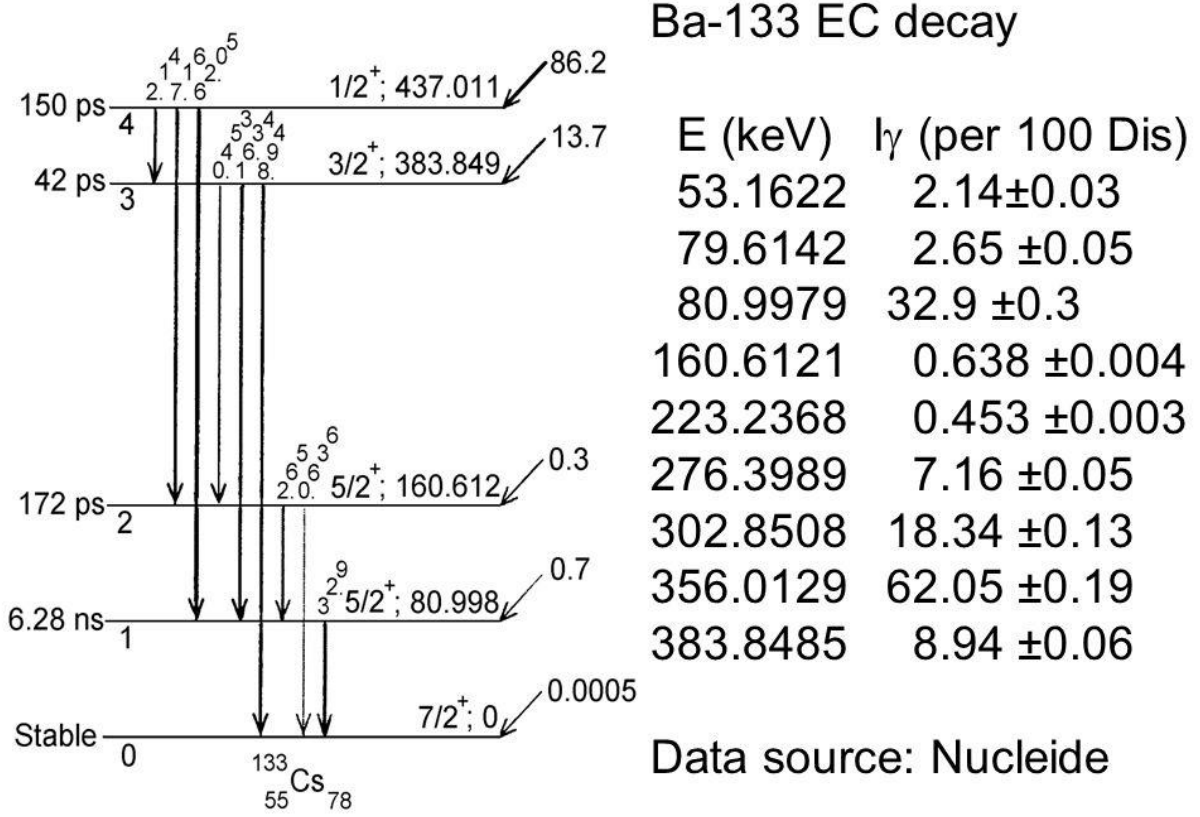
Şekil 8. Karakteristik X-ışınlarının oluşumunun temsili gösterimi



Şekil 9. Karakteristik X ışınlarının adlandırma terminolojisine ait şematik gösterim

X ışınlarından daha yüksek bir enerjiye sahip olan gama ışınları, genel olarak nükleer bozunmalar neticesinde ortaya çıkarlar. Kararsız yapıda bulunan çekirdekler, alfa ve beta gibi bozunmalar yaparak veya elektron yakalayarak kararlı hale geçmek isterler. Ancak bu bozunma işlemleri sırasında genel olarak, yarı kararlı enerji seviyeleri oluşturur. Bu enerji seviyelerinden temel hale geçişlerde, bir gama fotonu yayınlanmasıyla meydana gelir. Buna ek olarak, (α, Be) gibi nükleer reaksiyonlar sonucunda da gama ışınları yayınlanabilir. Böyle bir nükleer reaksiyonda ortaya çıkan gama ışınlarının enerjisi genelde MeV düzeyindedir. Diğer elektromanyetik dalgalar gibi yüksüz olan X ve gama ışınları, elektrik ve manyetik alandan etkilenmezler ve diğer radyasyon türlerine göre, madde içinde çok daha uzun yollar alabilirler. Dolayısıyla bu iki ışınım türü de canlı organizmalarda kalıcı tahribat yapabilirler. Bununla birlikte bu ışınlar, medikal tedavide ve görüntüleme sistemlerinde, elementel araştırmalarda ve sterilizasyon uygulamalarında geniş bir yere sahiptirler. Bu tez çalışmasında üretilen

alaşımın foton-madde etkileşim parametreleri ^{133}Ba radyoizotopundan yayınlanan gama ışınları ile elde edildiğinden Şekil 10'da, bu kaynağın bozunma şeması verilmiştir.



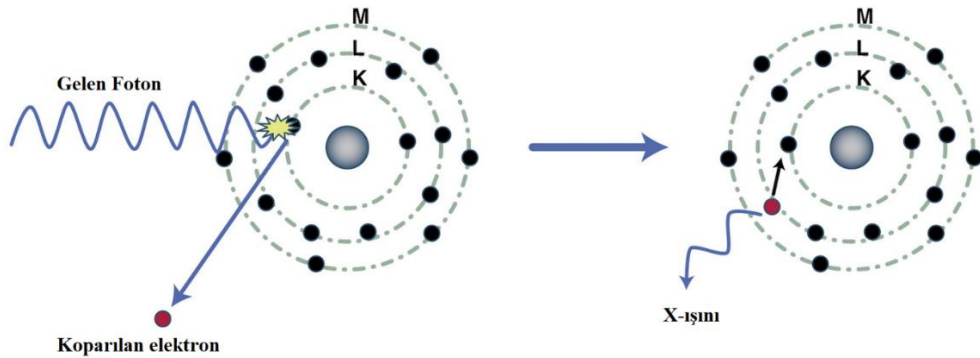
Şekil 10. ^{133}Ba bozunma şeması

Yüksek enerjili fotonların maddeyle etkileşimleri

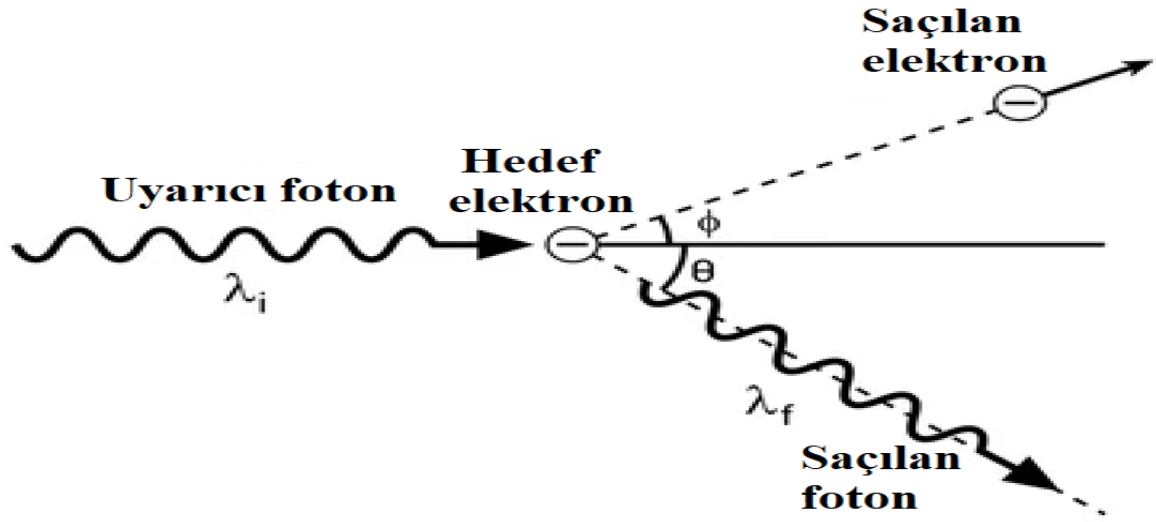
X ve Gama ışını gibi yüksek enerjili fotonlar herhangi bir madde üzerine geldiğinde, bu fotonlar malzeme tarafından soğrulabilir, saçılabilir ve etkileşmeden geçebilirler. Bu olayların meydana gelme olasılıkları, gelen fotonların enerjisine, maddenin türüne ve foton kaynağı ile madde arasındaki açıya bağlıdır. Açı parametresi, her ne kadar sadece saçılma olaylarında önemli gibi görünse de soğurma olayında da açı önem arz eder. Yüksek enerjili fotonların madde ile yaptıkları etkileşimler tesir kesiti adı verilen parametre ile incelenir. Fotonların soğrulması durumunda soğrulma tesir kesitleri kullanılırken, saçılma durumunda saçılma tesir kesitleri kullanılır. Tesir kesiti cm^2/g veya barn birimine sahip olup, incelenen olayın meydana gelme olasılığı hakkında bilgi verir.

Foton-madde etkileşimlerinde en temel üç olay, fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Bu olayların tümü, fotonların enerjisine doğrudan bağımlılık gösterirler. Nitekim, düşük enerjili fotonların madde üzerine gelmesi durumunda, süreç genel olarak fotoelektrik olay tarafından kontrol edilir ve saçılma olasılığı oldukça düşer. Ancak artan

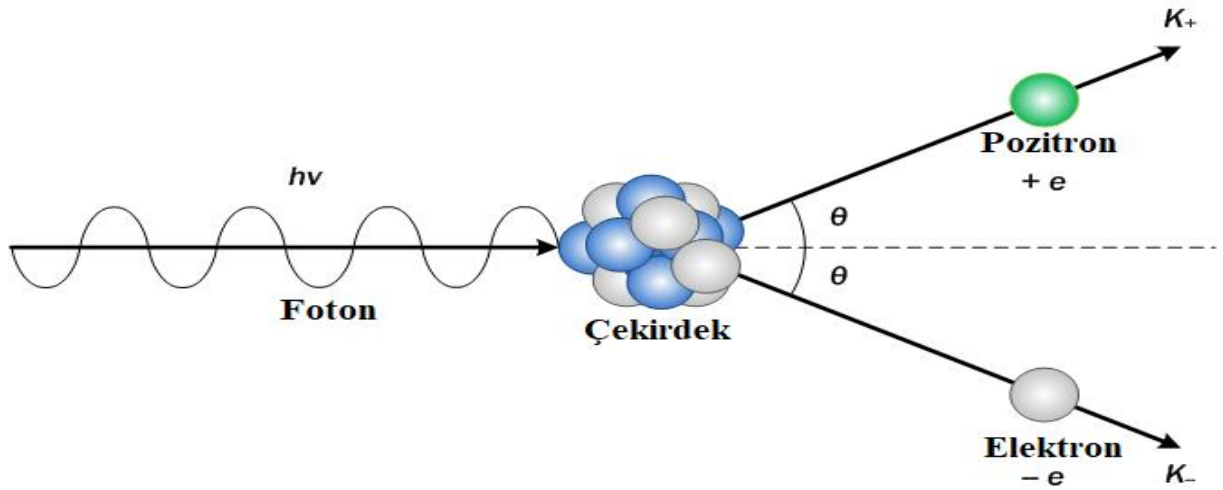
enerjiye bağı olarak, soğrulma ihtimaliyetinin baskınlığı yerini saçılma ihtimaliyetinin baskınlığına bırakır. Böyle bir durumda, maddede bulunan elektronlar üzerine gelen fotonlar, elektronu yörüngeden çıkararak saçılabilir ve foton da momentum korunumu çerçevesinde farklı bir doğrultuda saçılır. Bu saçılma olayına Compton saçılması adı verilir. Artan enerjile birlikte, fotonlar maddenin çekirdeğinin Coulomb alanına kadar ilerleyebilirler. Böyle bir durumda, atom çekirdeği ile etkileşen fotonlar, + ve – yüklü iki parçacığın üretilmesine neden olurlar. Bu olay çift oluşumu (üretimi) olarak adlandırılır. Çift oluşumunun meydana gelmesi için uyarıcı fotonların minimum 1,02 MeV’lik bir enerjiye sahip olması gerekir. Bu enerji değerinin altında çift oluşumu gözlenmez. Nitekim oluşan parçacıkların elektron ve pozitron oldukları gerçeğinden, bu parçacıkların durgun kütle enerjilerinin 0.511 MeV olması, bu parçacıkların oluşumu için minimum enerjinin belirtilen değerde olmasının gerekliliği de ortaya çıkmaktadır. Şayet atom çekirdeği üzerine gelen fotonların enerjisi 1,02 MeV’den daha büyükse, bu enerji elektron ve pozitronun kinetik enerjilerinin artmasına neden olur. Çift oluşumu 1,02 MeV’lik eşik enerjisine sahip olsa da bu enerji değerinden daha büyük enerjilerde baskın hale gelmektedir. Şekil 11, 12 ve 13’de sırasıyla, fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumun temsili gösterimleri verilmiştir. Belirtilen üç temel foton-madde etkileşim tesir kesitleri, Z, hedef malzemenin atom numarası ve E, uyarı fotonun enerjisi olmak kaydıyla, fotoelektrik olay için $Z^4 E^{-7/2}$, Compton saçılması için ZE^{-1} ve çift oluşumu için $Z^2 \ln(E)$ ile orantılı olarak değişim gösterir (Abdalsalam *et al.* 2019; Alim, 2020; Alim, 2020; Alim *et al.* 2022; Han and Demir, 2009; İçelli *et al.* 2005; Sakar *et al.* 2023; Şakar *et al.* 2022, 2021, 2019; M.I. Sayyed *et al.* 2020).



Şekil 11. Fotoelektrik olayın temsili gösterimi



Şekil 12. Compton saçılmasının temsili gösterimi



Şekil 13. Çift oluşumun temsili gösterimi

Foton madde etkileşim parametreleri

Beer-Lambert yasası Eşitlik 1, herhangi bir enerji değerinde, t kalınlığında bir malzeme üzerine gelen fotonların şiddeti ile malzemeyi geçtikten sonraki şiddetleri hakkında bilgi vermektedir. Aynı foton enerjisinde, aynı kalınlıktaki farklı malzemelerin farklı sayıda foton soğrulabileceği basit fiziksel bir gerçekliktir. Foton soğurma deneylerinde, ölçülen iki nicelik vardır. Bunlar kaynak ve numune arasında numune yokken alınan ve boş ölçüm diye adlandırılan I_0 , diğeri ise numune varken dedektöre ulaşan foton sayısını belirten I 'dir. Literatürde bu iki nicelik orijinal isimleriyle un-attenuated ve attenuated foton sayıları olarak adlandırılmaktadır. Deneylerden elde edilen $\ln(I_0/I)$ değeri malzemenin kalınlığına bölünürse $(\ln(I_0/I)/t)$, malzemenin birim uzunluk başına soğurma kabiliyetini sunan lineer azaltma katsayısı (LAC) Eşitlik 2, malzemenin yoğunluğu ile kalınlığının çarpımına bölünürse $(\ln(I_0/I)/\rho t)$, birim kütle başına etkileşim tesir kesitini veren kütle azaltma katsayısı (MAC) Eşitlik 3 elde edilir (Alım *et al.* 2022). Foton soğurma deneylerinden sadece bu iki niceliğe ait

bilgiler elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu iki parametreden türetilen ve maddenin yapısı hakkında ve gelen radyasyon karşısındaki davranışı hakkında bilgi veren birkaç parametre daha vardır. Bu parametreler, yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), atomik tesir kesiti (ACS), elektronik tesir kesiti (ECS), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğudur (N_{eff}). Takip eden bölümde bu parametrelerin manaları ve hesaplanma formülleri belirtilmiştir.

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

$$MAC = \mu_m = (\mu/\rho) = \frac{\ln(I_0/I)}{\rho t} = \frac{\ln(I_0/I)}{t_m} \quad (3)$$

bu ifadede, ρ malzemenin yoğunluğunu ve $t_m = m/A$ ise kütle kalınlığını temsil etmektedir. Birden fazla elementten meydana gelen herhangi bir malzeme için toplam MAC değeri Eşitlik 4 ile hesaplanır. Bu eşitlikte w_i , i 'nci elementin ağırlık yüzdesidir (Bünyamin Alım *et al.* 2020; Şakar, 2020).

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (4)$$

Herhangi bir zırhlayıcı malzemenin maruz kaldığı radyasyon miktarını yarı şiddete düşürmesi için gerekli olan kalınlık yarı değer kalınlığı HVL Eşitlik 5 ile hesaplanır. Bu parametre, üretilen zırh malzemesinin kaplayacağı hacim hakkında bilgi sunmasının yanında, maliyet hesabında da oldukça önemli bir yere sahiptir (Alım, 2020; El-Soad *et al.* 2019; Kurudirek, 2017; M.I. Sayyed *et al.* 2020).

$$X_{\frac{1}{2}} = HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (5)$$

Ortalama serbest yol (MFP), malzeme içinde ilerleyen fotonların, ardışık iki etkileşme arasında aldıkları yolu temsil eder. Dolayısıyla bu mesafenin kısa olması, fotonların madde içerisinde daha fazla etkileşim yapmasından yani daha iyi soğurulmalarından kaynaklanmaktadır. LAC değerinin doğrudan tersi olan bu parametre, artan enerjiyle birlikte, soğurma kıyıları haricinde azalır. Yüksek enerjili fotonların düşük dalga boyları, onların elektronlarla daha az etkileşime girmesine neden olduğundan, MFP değeri artan enerjiyle birlikte düşük değerlere sahip olur.

$$MFP = \lambda = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\mu t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt} = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

Foton madde olaylarında, birim atom ve birim elektron başına etkileşim ihtimaliyetleri sırasıyla atomik ve elektronik tesir kesitlerinden elde edilir. Bu iki niceliğin birimleri sırasıyla cm^2/atom ve $\text{cm}^2/\text{elektron}$ dur. Bu parametrelerin hesaplanmasında, yapıyı oluşturan

elementlerin molce yüzdeleri, atom ağırlıkları ve atom numaraları gibi parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. EŖitlik 7 ve 8’de atomik ve elektronik tesir kesitlerinin hesaplanması için gerekli formüller verilmiŖtir. Bu eŖikliklerde, i alt indisi ile simgelenen nicelikler, malzemede bulunan i ’nci elementin mol kesrini (f_i), atomik numarasını (A_i) ve kütle numarasını (Z_i) simgelemektedir. N_A ise Avogadro sayıdır. A_m niceliği ise $\sum_i f_i A_i = A_m$ formülünden hesaplanan toplam atomik kütleyi temsil etmektedir (Sakar *et al.* 2023).

$$ACS = \sigma_T = \frac{\sum_i f_i A_i}{N_A} \mu_m = \frac{A_m}{N_A} \mu_m \quad (7)$$

$$ECS = \sigma_e = \left(\frac{1}{N_A}\right) \sum_i \left(\frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i\right) \quad (8)$$

Çok sayıda elementin farklı oranlarda bir araya gelerek oluŖturduđu herhangi bir bileŖik, alaŖım, polimer veya kompozit gibi malzemelerin, uyarıcı bir radyasyon karŖısında hangi atommuŖ gibi davranacağını belirleyen parametre etkin atom numarası (Z_{eff}) dır. Bu parametre, periyodik cetvelde olmayan ve genelde tam sayılı değer alamayan sanal bir atom numarasını simgeler. Z_{eff} değerı atomik tesir kesitinin elektronik tesir kesitine oranlanmasıyla elde edilir ve periyodik cetvelde yer alan elementlerin atom numaraları gibi birimsizdir. Bu parametrenin yüksek elde edilmesi durumunda, üretilen malzemenin yüksek foton soğurma kapasitesine sahip olduğu söylenebilir (Ersundu *et al.* 2018).

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_T}{\sigma_e} \quad (9)$$

Tıpkı Z_{eff} gibi, uyarıcı foton enerjisine bağlı olarak deđiŖim gösteren ve MAC değerinin ECS’ye bölünmesinden elde edilen etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}), EŖitlik 10 ile hesaplanır. Bu parametrenin birimi elektron/g olup, malzemenin birim kütlesindeki elektron sayısını verir. Bir malzemenin N_{eff} değerine bakılarak doğrudan iyi veya kötü soğurucu olduğuna karar verilemez. Sadece aynı türden elementlerin kombinasyonlarından elde edilen malzemeler için N_{eff} sıralaması anlamlı sonuçlar verebilir.

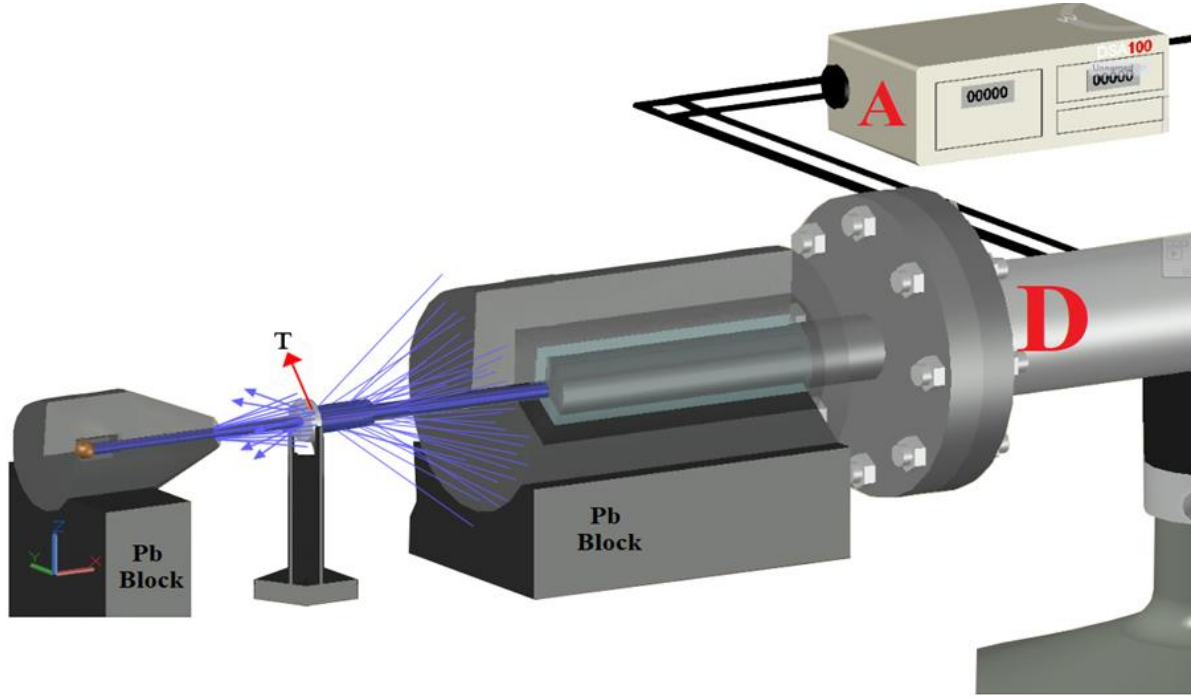
$$N_{eff} = \frac{N_A}{\sum_i f_i A_i} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{N_A}{A_m} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad (10)$$

Bu eŖitlikte $\sum_i n_i$ malzemede bulunan toplam atom sayısını temsil etmektedir (Bünyamin Alım *et al.* 2020; Ŗakar *et al.* 2021).

Beer-Lambert yasaı ($I(x) = I_0 e^{-\mu x}$) yalnızca ideal geometri koŖullarında tek frekanslı ıŖınlar için geçerlidir. Yani bu yasa, ince bir soğurucu malzemedен etkilenmeden geçen ve dedektöre ulaŖan tek frekanslı fotonlar için geçerlidir. İdeal geometri koŖulları karŖılanmıyorsa

Şekil 14 Beer-Lambert yasasında bir değişiklik yapılmalıdır. Bu sebeple, Beer-Lambert yasası “foton kuvvetlendirme faktörü, B (build-up faktör) olarak adlandırılan bir düzeltme faktörünün eklenmesiyle yeniden yazılabilir. Bu denklem aşağıdaki gibi verilir (B. Alım *et al.* 2020).

$$I(x) = BI_0e^{-\mu x} \quad (11)$$



Şekil 14. Zayıf ışın geometrisinin temsili gösterimi

Foton kuvvetlendirme faktörü (B), maruz kalma build-up faktörü (EBF) ve enerji soğurma build-up faktörü (EABF) olarak iki türe ayrılır. EBF değerleri, radyasyonun havadaki soğurulması ile ilgili iken EABF değerleri, hedef malzeme tarafından absorbe edilen veya depolanan enerji ile ilgilidir. Literatürde foton kuvvetlendirme faktörlerinin hesaplanmasında kullanılan Monte Carlo yöntemi (Sardari *et al.* 2011), yinelemeli yöntem (Suteau and Chiron, 2005) ve G-P fit etme gibi birkaç mevcut yöntem vardır (Harima *et al.* 1986). G-P fit etme yöntemi bu yöntemlerin en kullanışlı olanlarından birisidir. Koruyucu zırh malzemeleri, hızlandırıcılarda, nükleer reaktörlerde ve diğer radyasyon veya nükleer tesislerde farklı radyasyon türleri için kullanılmaktadır. Bu nedenle, foton kuvvetlendirme faktörlerinin elde edilmesi, herhangi bir zırh malzemesinin zırhlama performansının değerlendirilmesi için son derece önemlidir. Literatürde G-P fit etme yöntemini kullanarak çeşitli radyasyon koruyucu malzemeler için birikme faktörlerini elde etmeye yönelik birçok çalışma bulunmaktadır (Lokhande *et al.* 2017; Manjunatha and Rudraswamy, 2011; Mansy and Desoky, 2022; Sabry *et al.* 2021). Herhangi bir malzemenin foton kuvvetlendirme faktörlerinin hesaplanması için aşağıda verilen dört adım sırasıyla uygulanır.

İnkoherent saçılma tesir kesiti/toplam zayıflama oranı (R_{inc}/R_{toplam})

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

$$R_{inc/total} = \frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Compton}}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Total}} \quad (12)$$

Eşdeğer atom numarası (Z_{eq})

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, $R_{inc/toplam}$ değerlerinin bu malzemelerde bulunan elementlerin aynı foton enerjisindeki karşılık gelen $R_{inc/toplam}$ oranları ile eşleşmesi ile hesaplanır. Bu eşleşme metoduna enterpolasyon işlemi adı verilir ve aşağıdaki formül ile enterpolasyon işlemi gerçekleştirilerek Z_{eq} değerleri hesaplanır:

$$Z_{eq} = \frac{Z_1(\log R_2 - \log R_{inc/total}) + Z_2(\log R_{inc/total} - \log R_1)}{\log R_2 - \log R_1} \quad (13)$$

burada Z_1 ve Z_2 , sırasıyla R_1 ve R_2 oranlarına karşılık gelen elementlerin atom numaralarıdır. Herhangi bir malzeme için hesaplanan Z_{eq} değerleri ne kadar yüksek ise ilgilenilen enerjide o malzemenin foton saçma tesir kesiti o kadar yüksektir anlamına gelir.

Geometrik progresyon parametrelerinin belirlenmesi (G-P fit etme parametreleri)

G-P fit etme parametreleri (a, b, c, d ve X_K katsayıları) yukarıda izah edilen enterpolasyon metoduna benzer bir logaritmik interpolasyon prosedürü ile hesaplanır. Bu hesaplama işlemi, aşağıdaki gibi verilir:

$$P = \frac{P_1(\log Z_2 - \log Z_{eq}) + P_2(\log Z_{eq} - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1} \quad (14)$$

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.

Maruz kalma ve Enerji soğurma foton kuvvetlendirme faktörleri (EBF ve EABF)

Eşitlik 14 ile elde edilen G-P fit etme parametreleri yardımıyla aşağıdaki Eşitlikler kullanılarak EBF ve EABF değerleri hesaplanır:

$$B(E, X) = \begin{cases} 1 + \frac{(b-1)(K^X-1)}{K-1} & \text{for } K \neq 1 \\ 1 + (b-1)X & \text{for } K = 1 \end{cases} \quad (15)$$

burada b; 1 MFP'deki foton kuvvetlendirme faktörüdür, E; gelen foton enerjisidir, X (cm); fotonun hedef malzemeye nüfuz edebilme (penetrasyon) derinliğidir. Aşağıdaki Eşitlik 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.

$$K(E, X) = cX^a + d \frac{\tanh(\frac{X}{X_K}) - 2 - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \text{ penetrasyonderinliği } (X) \leq 40 \text{ mfp} \quad (16)$$

Bragg Yasası ve X-ışınları Kırınım (XRD) Yöntemi

Daha önce de izah edildiği üzere, X-ışınları 0,1 nm düzeyinde çok küçük dalga boylarına sahip olan elektromanyetik dalgalardır. Max Von Laue (1913); X-ışınlarının dalga boylarının kristallerin dalga boylarına yakın mertebelerde olabileceği fikrinden yola çıkarak, kristal atomlarının X-ışınları için kırınım ağı gibi davranabileceğini öne sürdü. Laue'nin bu fikri sonraki yıllarda gerçekleştirilen deneylerle doğrulanarak atomik yapıların X-ışınları ile analiz edilmesine olanak sağladı.

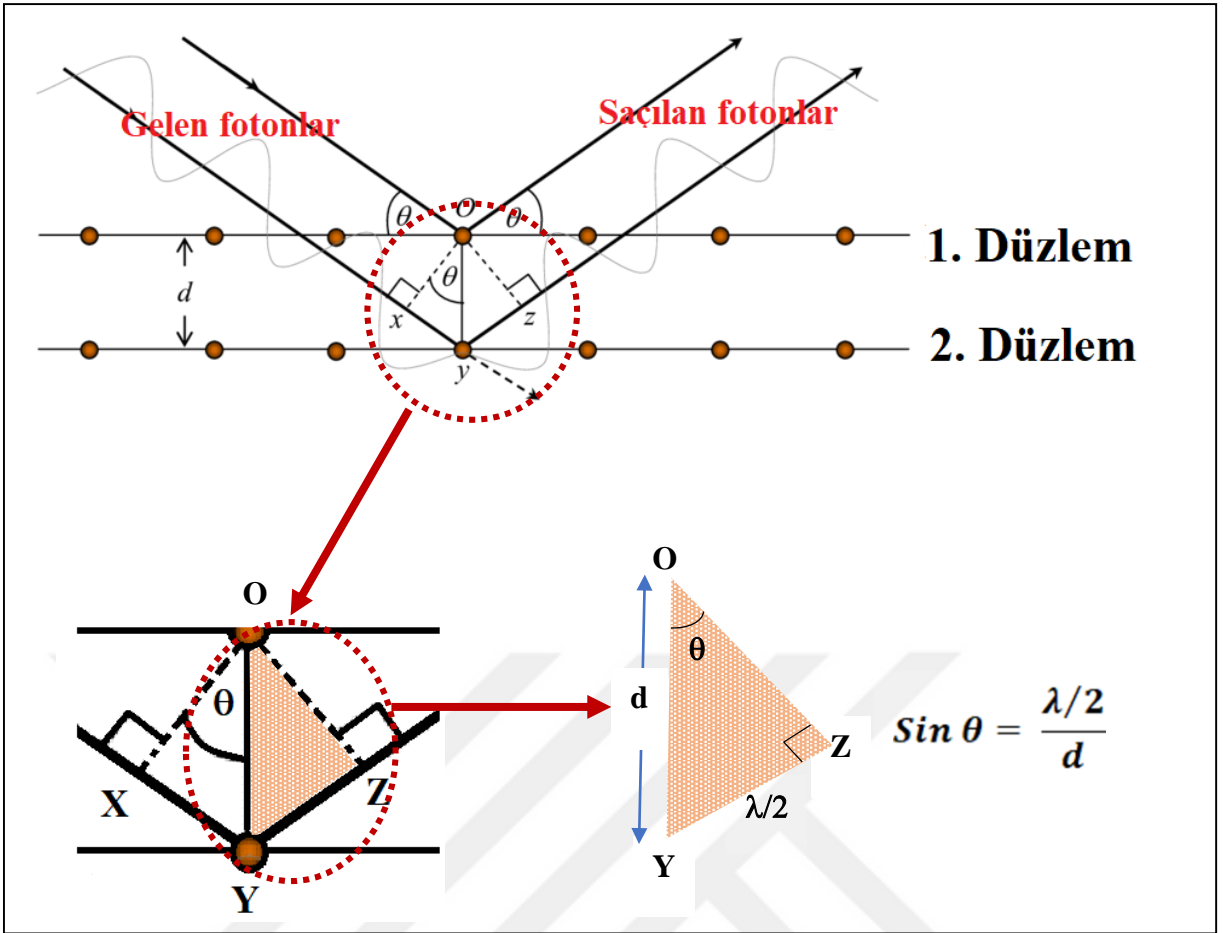
Doğada birçok malzeme atomların belirli bir düzende sıralanması ile oluşan kristalografik yapıya sahiptirler. Herhangi bir polikristal yapıda farklı türden düzlemler mevcuttur. Bu kristallerin hangi düzlemlere sahip olduğu, düzlemlerin hangi yoğunlukta olduğu ve düzlemler arası mesafeler X-ışınlarının kırınımından elde edilebilir. Kristal üzerine gelen X-ışınları, düzleme gelme açısına bağlı olarak yapıcı veya yıkıcı girişim yapabilir. Atom üzerine gönderilen düşük enerjili X-ışınlarının enerjisi (genelde Cu K α : 1,54 nm), elektronlar tarafından soğrularak, elektronların yeni özel enerji seviyelerine yerleşmesine neden olur. Kristaller üzerine gönderilen X-ışınlarının enerjileri düşük olduğundan, elektronlar atomdan ayrılamazlar. Böyle bir durumda, elektronlar dışarıdan aldıkları bu enerjiyi yayınlamaya kararlı hallerine geri dönerler. Bu süreç literatürde, X-ışınlarının elastik saçılımı olarak adlandırılır. Atomların düzenli bir şekilde düzenlendiği (kristal) malzeme üzerine gelen ışınlar, elastik saçılma yaparak, sadece belirli açı değerlerinde girişim yaparak, daha yüksek sinyallerin elde edilmesine neden olurlar. Bu nedenle bir malzemenin kristal yapılı olup olmadığının ve hangi kristalografik düzlemlere sahip olduğunun belirlenmesi için, düşük enerjili X-ışınları

malzemeye farklı açılarda gönderilerek, kırınımına uğrayan fotonların dedekte edilmesi gereklidir.

William Henry Bragg ve oğlu William Lawrence Bragg (1913) X-ışınlarının neden sadece belirli açılarda yapıcı girişim yapabildiğini açıklamak için Eşitlik 17 ile verilen bağıntıyı geliştirdiler (1915 Nobel fizik ödülü):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (17)$$

burada, d ; kristal düzlemleri arasındaki uzaklığı, λ ; dalga boyunu, n ; kırınım mertebesini veren tamsayı değerlerini (1,2,3, ...) ve θ ise kristalin normaliyle gelen ışınlar arasındaki açıyı temsil ederler. Şekil 15'te, X-ışınlarının kırınımının temsili bir gösterimi verilmiştir. Büyütülmüş görüntüde, OY hipotenüslü bir dik üçgen görülmektedir. YZ noktaları arasındaki uzaklık, gelen X-ışınlarının dalga boyunun yarı boyuna $\lambda/2$ (karşılık geliyorken, OY uzaklığı ise düzlemler arasındaki mesafe olan d 'yi temsil etmektedir. Basit bir geometri uygulamasıyla $\sin\theta = (\frac{\lambda}{2})/d$ olduğu görülebilir. Yapıcı girişimin oluşabilme şartının, girişim yapacak dalgaların eş fazlı olması gerekliliğinden, tabakalardan kırınımına uğrayarak gelen ışınların dalga boylarının uyumlu olmaları gereklidir. Bu nedenle Bragg ifadesinde n (tamsayı) değerleri, dalga boylarının tam katlarının gerekliliğinden yer almaktadır. Şekil 15'te verilen temsili gösterime göre 1. ve 2. düzlemlerden saçılan X-ışınları yapıcı girişim yapmaktadırlar.



Şekil 15. X-ışınlarının kırınımının temsili gösterimi

XRD yöntemi ile, üretilen malzemelerin kristal yapıda olup olmadıkları, kristalse kristalografik düzlemleri, kristalit boyutları ve elementel bileşenleri belirlenebilir. Bu metottan, neredeyse tüm fen bilimleri ailesi farklı amaçlar doğrultusunda faydalanmaktadır. XRD cihazları, düşük enerjili X-ışını kaynağı, numune tutucu ve bir dedektörden oluşmaktadır. Deneylede belirli açı adım aralıklarıyla, kaynak ve dedektör hareket ettirilirken, numune genelde sabit konumda kalır. Deneylede açığa bağlı şiddet dağılımı verileri elde edilir. Elde edilen verilerden oluşan spektrumda, şayet keskin pik tepeleri mevcutsa, o malzemede bir kristalografik yönelimin olduğu söylenir. Şayet malzeme çoklu kristal düzlemine sahipse, şiddet-açı grafiğinde birden fazla keskin pik mevcuttur. XRD spektrumlarında olan piklere aşağıda maddeler halinde sıralanmış olan etkiler katkıda bulunurlar.

1. Sisteminin çözünürlüğü
2. Kristalit büyüklüğü
3. Mikro yapılar
 - Düzensiz örgü deformasyonları
 - Örgüdeki kusurlar
 - Domain sınırları

4. Malzeme yüzeyinin pürüzsüzlüğü (piklerde kaymaya neden olabilir)
5. Ortam sıcaklığı

XRD yönteminde doğru verilerin eldesi için yukarıda verilen parametrelerin dikkate alınması gereklidir. Piklerde kristal boyutuna bağlı olan pik genişlemesi olan β (FWHM: yarı yükseklikteki tam genişlik) takip eden eşitliğine göre göz önüne alınmalıdır.

$$\beta(2\theta) = \frac{K\lambda}{D\cos\theta} \quad (18)$$

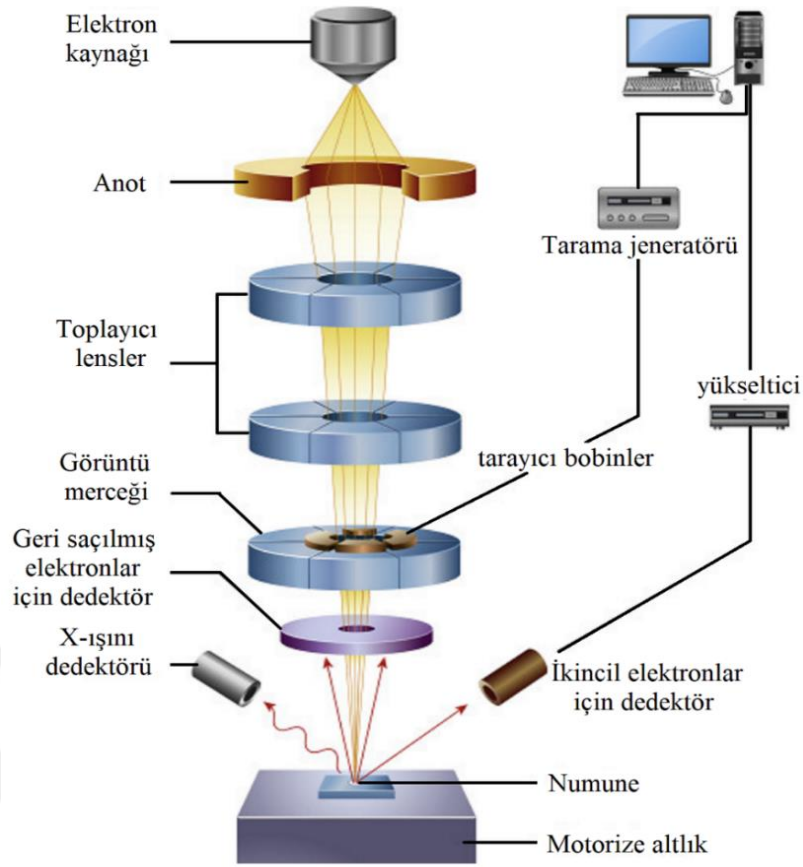
Bu eşitlikte; K , kristalin türüne bağlı olan sabit değeri (0,62 ile 2,08 arasında değişir) temsil eder. Debye-Scherrer bağıntısı olarak adlandırılan bu bağıntı yardımıyla kristalit büyüklüğü belirlenebilir. Geometri faktörü olan K değeri kübik küresel kristallerde sırasıyla 0,92 ve 1,18 olarak alınır (Valério and Morelhaio, 2019). XRD'den kristal boyutları hesaplanırken eşitliğinde B parametresi yerine ilgilenilen pikin FWHM değeri yazılır.

$$D = \frac{0,92\lambda}{B\cos\theta} \quad (19)$$

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM, çözünürlüğü 1 nm'ye kadar uzanan, 1×10^6 kez büyütme yapabilen ve malzemelerin yapılarını elektronlar yardımıyla gözlemlemek için kullanılan cihazdır. Malzemeye gönderilen elektronların yüzeyle yaptığı etkileşmeler sonucunda oluşan elektron ya da X-ışınlarından SEM görüntüleri meydana gelir. Dedekte edilen elektronlar/X-ışınları, bir malzemenin, kimyasal bileşimi ve yüzey yapısı hakkında bilgi verir.

SEM cihazlarında, numune yüzeyi sürekli hızlandırılmış elektronlarla bombardıman edildiğinden, bazı numunelerde elektriksel olarak yüklenmeler olabilir. SEM ölçümleri alınırken, aşırı yüklenmeyi önlemek için numunelerin elektriksel olarak iletken olması gerekir. Yalıtkan numuneler ise aşırı yüklenme nedeniyle kötü görüntüler verebilirler. Bu yüklenme sorununun üstesinden gelmek için yalıtkan malzemeler Au ya da Pt gibi metallerle püskürtme kullanılarak kaplanmaktadır. Numuneye gönderilen elektronların, dış etkenlerden (havadan) saçılmasını engellemek adına, SEM cihazı daima yüksek vakum altında çalışmaktadır. Numune yüzeyine gelen elektronların, numuneye çarpması sonucunda oluşan ikincil elektronların dedeksiyonu ile SEM görüntüleri meydana getirilir. Bir SEM cihazının ana bileşenleri, elektron kaynağı, kaynaktan gelen elektronları toplayan ve odaklayan lensler, yüzeyde gezinti yapabilmek için kullanılan tarama bobini, odaklayıcı lensler ve dedektördür. Taramalı elektron mikroskop cihazlarında çok büyük oranda yarı iletken dedektörleri kullanılmaktadır. Şekil 16'da SEM cihazının ana bileşenleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 16. SEM cihazının ana bileşenlerinin temsili gösterimi

SEM cihazlarında kullanılan elektron kaynakları termoiyonik ve alan yayınlayıcısı olarak iki türdür. Alan yayınlayıcısının kullanıldığı SEM cihazlarına FESEM (Field effect SEM) adı verilir. FESEM cihazları, SEM'lere nazaran daha iyi çözünürlük sunmaktadırlar. FESEM yalıtkan malzemelerde yüklenme etkisini minimize eder.

MATERYAL VE METOT

Malzeme Seçimi ve Alaşımın Üretilmesi

Bu tez çalışmasında, ağır metal katkılanmasının Ni_3Al tabanlı süper-alaşımın yapısal ve gama-ışını soğurma kapasiteleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla saf Ni_3Al ve ağır metal katkılı süper-alaşım üretilmiştir. Fe, Ni veya Co tabanlı bir süper-alaşım üretilirken, katkılanan elementlerin sayısına ve katkılanma yüzdelere bağlı olarak 10^9 - 10^{12} düzeyinde alaşım ihtimaliyeti ortaya çıkmaktadır. Böylesine yüksek sayıdaki kombinasyonun deneysel ve teorik araştırılması olanaksızdır. Bu durum, hem çok miktarda sarf malzeme tüketimine hem de ciddi zaman kaybına neden olacaktır. Araştırmacılar bu problemin üstesinden gelebilmek adına, çeşitli teorik ve simülasyon çalışmaları yürütmektedirler. Bu çalışmalarda, ana metale katkılanabilecek elementlerin çeşitli fiziksel, kimyasal, kristalografik ve termodinamik özellikleri dikkate alınarak çoklu kombinasyonlar oluşturulmaktadır. Bu kombinasyonların sayısı bazı sınırlamalar konularak azaltılmaktadır. Örneğin yoğunluk, erime noktası ve sürünme gibi simüle edilebilecek parametrelere belirli sayısal sınırlamalar konularak, olası alaşım kompozisyonları belirlenmektedir. Böylesine bir ön araştırma, alaşım sayısını üretilebilir sayılara düşürmektedir. Bu çalışmaların ürettikleri teorik ve simülasyon sonuçlarının doğruluk testleri, daha önce sentezlenmiş ve tüm karakterizasyonları tamamlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada, (Xu *et al.* 2022) tarafından, Ni-tabanlı alaşım için optimum özelliklere sahip olabileceği teorik olarak öngörülen ağır metal katkılı 12 farklı alaşım ve saf Ni_3Al alaşımı üretilmiştir. (Xu *et al.* 2022) yaptıkları çalışmada farklı alaşım kombinasyonları için yaptıkları hesaplamada 779625 alaşım arasından 12 alaşım kompozisyonunun optimal özelliklere sahip olabileceğini belirtmişlerdir. Yazarlar, yapı içerisinde kütlece %1 düzeyinde talyum ve renyum bulunması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ancak bu elementlerin oldukça yüksek maliyete sahip olmaları, proje kapsamında temin edilmesini olanaksız kılmıştır. Bu nedenle sunulan bu tez çalışmasında bu iki element olmadan elde edilen alaşımın yapısal ve gama-ışını soğurma parametreleri sunulmuştur.

Alaşımın üretilmesinde kullanılan metal tozları Ege Nanotek firmasından temin edilmiştir. Metal tozların parçacık boyutları $10\mu m$ ve saflıkları %99,999'dur. Basamak sinterlemesi ve toz metalürjisi kullanılarak üretilen alaşımlarda yer alan elementlerin yoğunluk, erime noktası, kaynama noktası, mekanik dayanım, termal genleşme, termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik gibi bazı temel fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

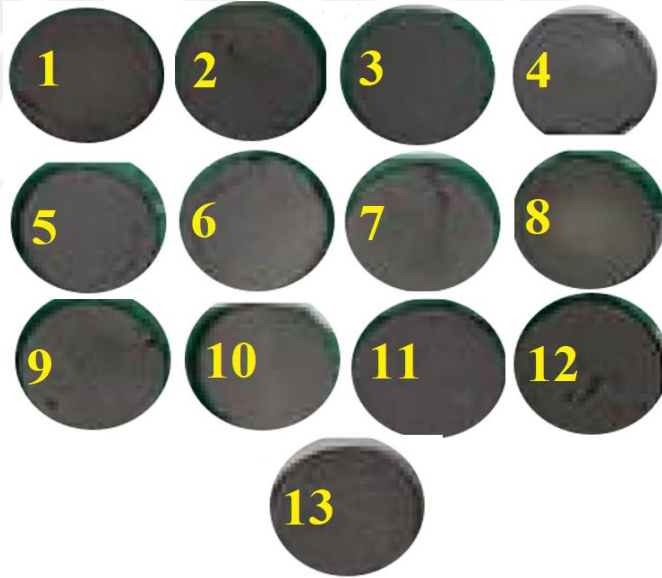
Tablo 3. Alaşım Üretiminde Kullanılan Elementlerin Temel Özellikleri

	Ni	Al	Cr	Mo	Nb	W
Atom numarası	28	13	24	42	41	74
Atomik kütlesi (g/mol)	58,71	26,98	51,99	95,95	92,9	183,84
Yoğunluk	8,9	2,7	7,19	10,28	8,57	19,25
Atomik yarıçap (nm)	0,124	0,143	0,13	0,145	0,146	0,141
İyonik yarıçap (nm)	0,69	0,184	0,2	0,068	0,207	0,064
Elektronik konfigürasyonu	[Ar]3d ⁸ 4s ²	[Ne]3s ² 3p ¹	[Ar]3d ⁵ 4s ¹	[Kr]4d ⁵ 5s ¹	[Kr]4d ⁴ 5s ¹	[Xe]4f ⁴ 5d ⁴ 6s ²
Elektronegatifliği	1,8	1,61	1,66	2,16	1,6	2,36
Erime noktası °C	1453	660	1907	2623	2477	3410
Kaynama noktası °C	2913	2519	2671	4639	4927	5555
Elektriksel Özdirenç x10 ⁻⁸ (ohm.m)	1,59	2,82	13	5,2	15,1	5,65
Tensile Strength (MPa)	345	90	413	380	600	980
Termal iletkenlik (W/m.K)	67-91	235	94	129-147	54	173
Termal Genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	12-13,5	23,1	4,9	4,8-5,5	7,3	4,5

Alaşımın üretilmesinde toz metalürjisi ve sinterleme teknikleri birlikte kullanılmıştır. Tablo 4’de kütlece yüzdeleri verilen metallere katı yapıyla alaşım formunda malzemelerin üretilmeleri için, atomik yüzdeler kütlece yüzdeye dönüştürülmüştür. Elde edilen kütlece oranlar, toplam alaşım miktarı 1 g olacak şekilde normalize edilmiştir. Metal tozlarının kütlelerinin belirlenmesinde, hassasiyeti 10⁻⁵ g olan hassas terazi kullanılmıştır. Aynı bir karıştırma kabında bir araya getirilen metal tozları, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan karıştırıcıda 3 saat boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem homojen yapıyla alaşımın elde edilmesi için son derece önemlidir. Karışım haline getirilen metal tozlarının katı yapıyla bir forma getirilebilmesi için, Fizik bölümünde bulunan hidrolik pres yardımıyla sıkıştırılmıştır. Presleme işleminde, 13 mm çapında dairesel bir die set içerisine konulan numunelere 30 dk boyunca 10 ton’luk bir basınç uygulanmıştır. Uygulanan basınç, katı yapı haline getirilen karışımların yüzeylerinde ve iç kısımlarda kırılma oluşmaması için kademeli olarak düşürülmüştür. Presleme sonrası üretilen numunelerin görünüşleri Şekil 17’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Üretilen Alaşımların Kütlece Element Yüzdeleri (wt.%) ve Yoğunlukları

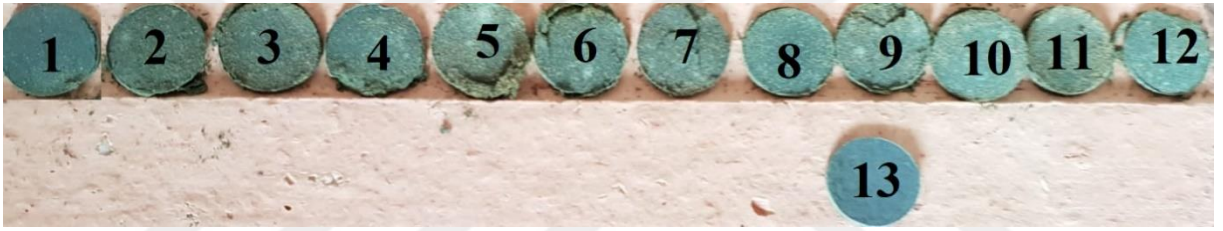
Numune kodu	Al	Cr	Nb	Mo	W	Ni	Yoğunluk (g/cm ³)
1	0,082	0,265	0,030	0,031	0,059	0,534	6,829
2	0,085	0,245	0,029	0,030	0,058	0,553	6,827
3	0,077	0,296	0,031	0,032	0,062	0,502	6,838
4	0,082	0,259	0,030	0,031	0,059	0,538	6,832
5	0,085	0,239	0,029	0,03	0,058	0,558	6,831
6	0,078	0,290	0,031	0,032	0,062	0,506	6,841
7	0,081	0,268	0,031	0,032	0,061	0,527	6,840
8	0,088	0,225	0,029	0,030	0,057	0,572	6,826
9	0,083	0,253	0,030	0,031	0,060	0,543	6,835
10	0,078	0,284	0,032	0,033	0,063	0,511	6,845
11	0,086	0,232	0,030	0,031	0,059	0,562	6,834
12	0,083	0,243	0,030	0,046	0,059	0,539	6,859
13	0,133	-	-	-	-	0,867	6,615

**Şekil 17.** Presleme sonrası numunelerin görüntüleri

Pellet haline getirilen numuneler, 250°C (30 dk), 500 °C (30 dk), 750°C (30 dk) ve 1200°C (30 dk) sıcaklık değerlerinde kademeli olarak kontrollü atmosferde, difüzyon yoluyla birbirine geçerek çözünen metallere oluşan yeterli dayanıma sahip katı bir yapı oluşuncaya kadar Şekil 18’de görünümü verilen Mikrotek marka MFX1010 model fırın yardımıyla ısıtılmıştır. Isıtılan pellet numuneler kristal yapıyı süper-alaşım oluşumu için yine kontrollü atmosferde kademeli soğutma işlemine tabi tutularak sinterleme işlemi tamamlanmıştır. Üretilen alaşımların görüntüleri Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 18. Sinterlemede kullanılan Mikrotek marka MFX1010 model fırın

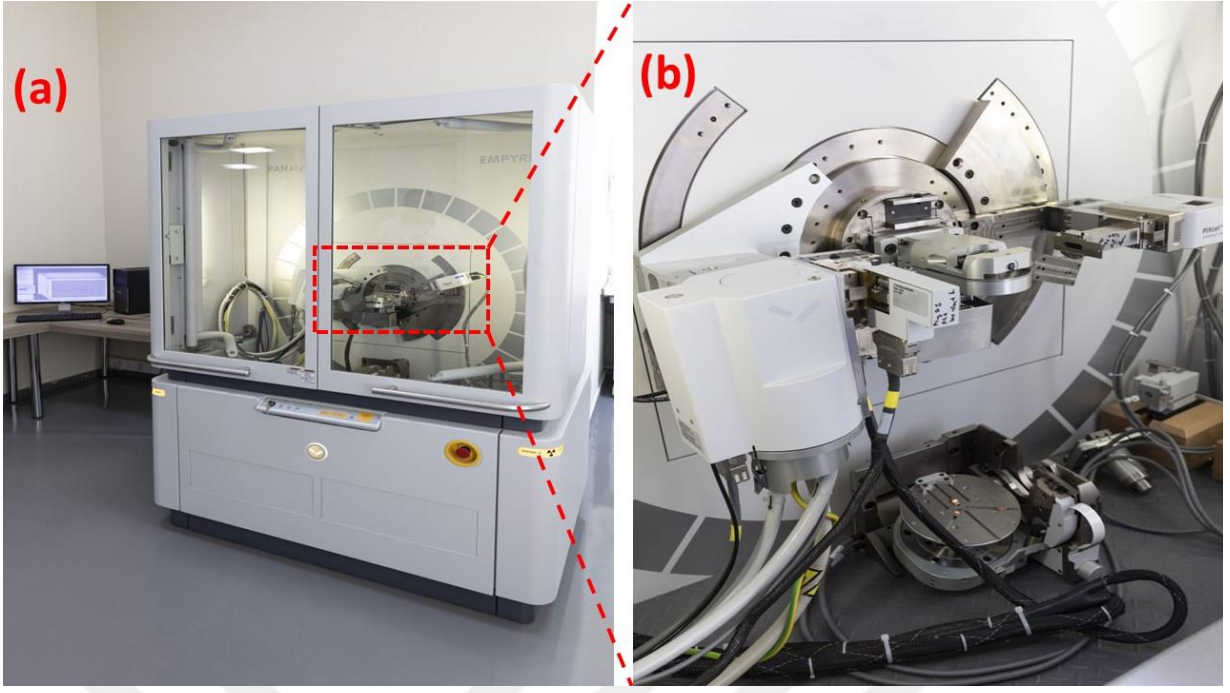


Şekil 19. Sinterleme sonrası alaşımların görünüşleri

Katı metal formuna getirilen numunelerin kristalografik yapıları X-ışını kırınım tekniği (XRD) ile belirlenmiştir. XRD ölçümleri $2\theta=10-95^\circ$ arasında 0.01° lik adım aralıkları ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen alaşımların yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. SEM analizleri DAYTAM’da bulunan Zeiss Sigma 300 modeli cihaz ile yapılmıştır.

X-Işını Kırınım (XRD) Ölçümleri

Ağır metal katkılı Ni_3Al alaşımlarının kristalografik yapılarının belirlenmesi amacıyla XRD analizleri DAYTAM bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde PANalytical/Empryeen markalı XRD cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 4kW (maks 60 kV, maks 100 mA) güç üretebilmektedir. Cihazın ortalama açısal çözünürlüğü $0,026^\circ$ dir. XRD ölçümlerinde, X-ışınlarının üretilmesinde 1,54 nm ($K\alpha$) dalga boylu Ni filtreli Cu kaynağı kullanılmıştır. Ölçümler, $0,01^\circ$ lik adım aralığıyla $10^\circ-95^\circ$ açıları arasında elde edilmiştir. Şekil 20’de çalışmada kullanılan XRD sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 20. X-ışını kırınım ölçüm sistemi (a) genel görüntü, (b) Numune tutucu, X-ışını tüpü ve dedektör

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri

Üretilen alaşımların yüzey morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla numunelerin SEM ile görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerin eldesinde DAYTAM bünyesinde bulunan Zeiss Sigma 300 modelli SEM cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz elektron kaynağı olarak alan yayınlıyıcıları kullandığından FESEM (Alan etkili taramalı elektron mikroskobu) olarak da adlandırılabilir. FESEM, 15 kV ve 1 kV hızlandırma potansiyelleri için sırasıyla 2,2 ve 1,2 nm çözünürlüğe, 10 ns/piksel değerinde maksimum tarama hızına, 1-30 kV arasında değişen hızlandırma potansiyellerine, 10X ile 1000000X aralığında büyütme oranına ve 2-133 Pa aralığında değişebilen vakum seviyesine sahiptir. Bu çalışmada elektronların hızlandırma potansiyelleri 5 kV ve 10 kV olacak şekilde 10KX ile 20KX büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Çalışmada kullanılan FESEM cihazının görüntüsü Şekil 21’de verilmiştir.

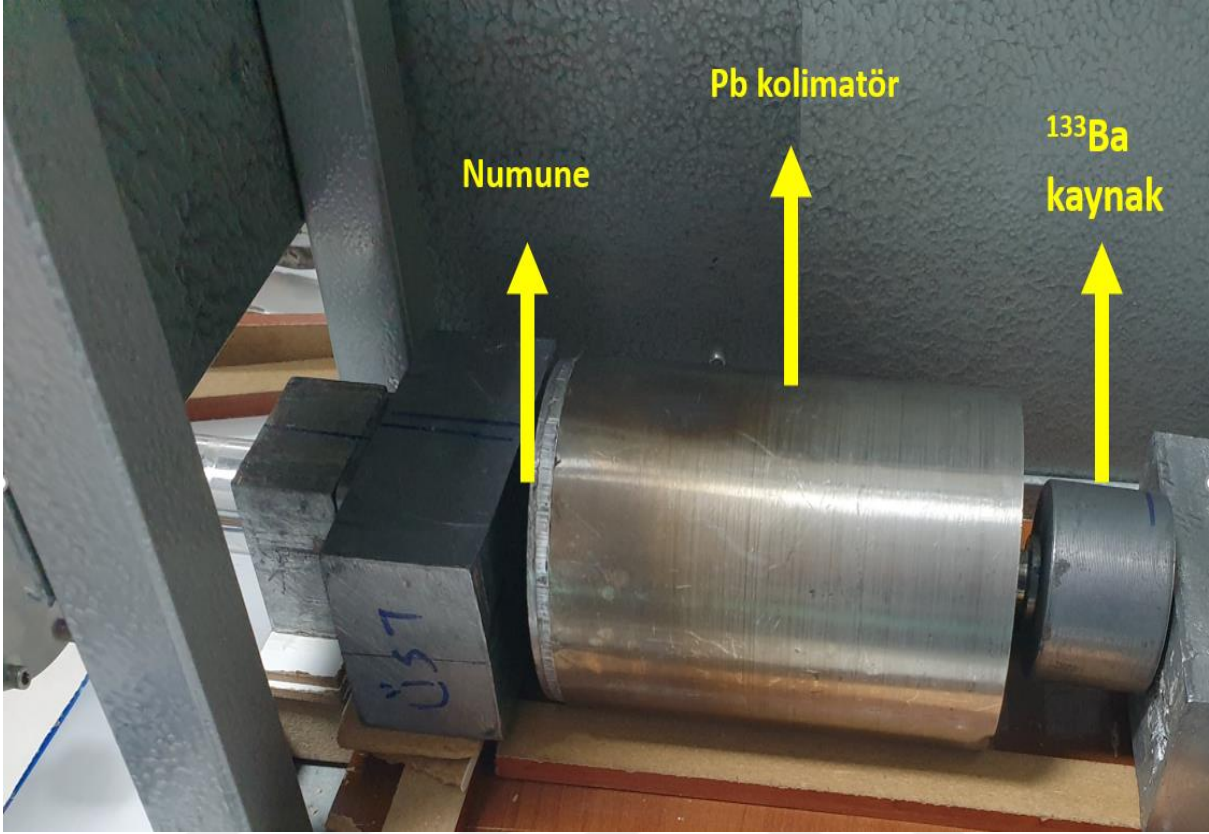


Şekil 21. FESEM cihazının genel görünümü

Gama Işını Soğurma Deneyleri

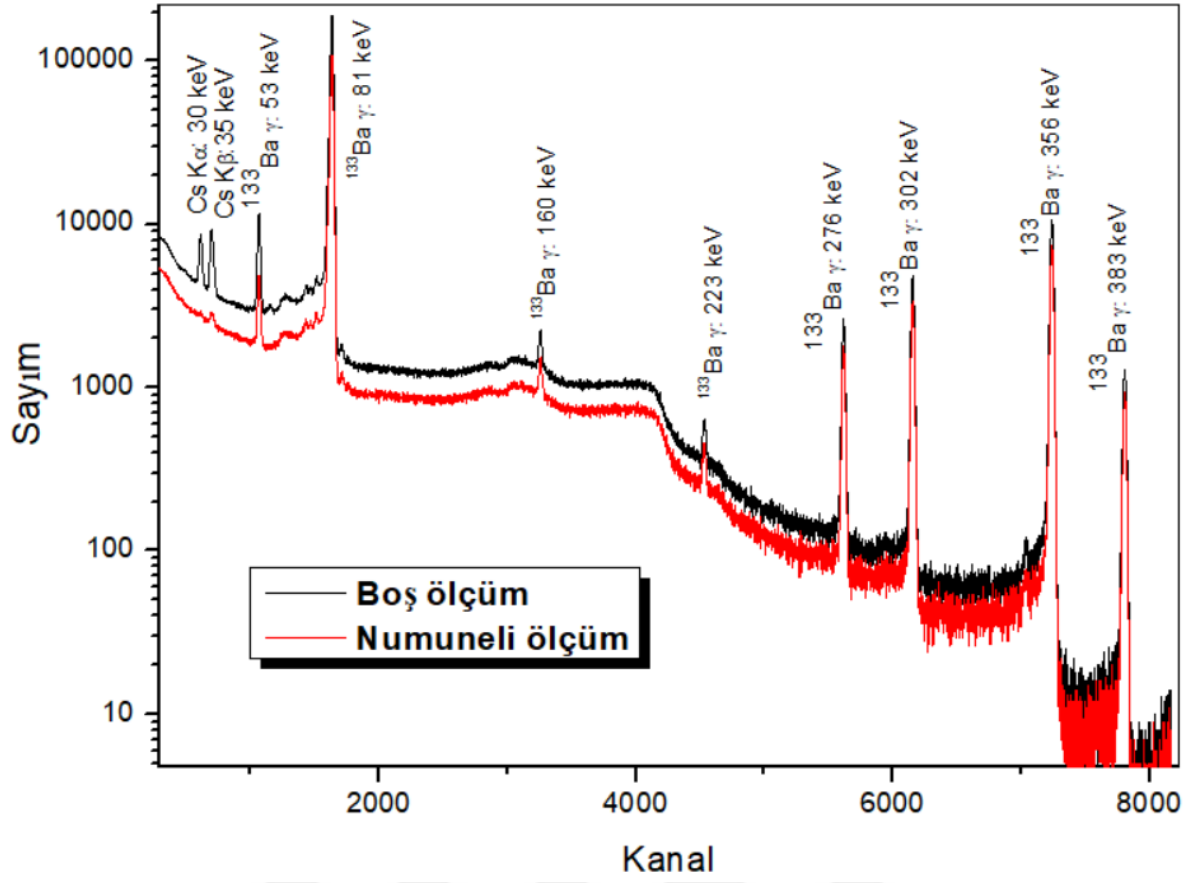
Numunelerin kristalografik ve morfolojik yapılarının belirlenmesini takiben gama-ışını soğurma deneyleri Fizik bölümü Wolf Weyrich yüksek enerji fiziği araştırma laboratuvarında bulunan soğurma spektrometresinde yapılmıştır. Bu deneylerde ^{133}Ba radyoaktif kaynağı ve HPGe dedektör kullanılmıştır. Fotonların dar bir şua boyunca numuneye gelmesi ve numuneden geçen fotonların yine dar bir şua ile dedektöre ulaşması için dar ışın geçiş geometrisi (ideal geometri) diye adlandırılan deney geometrisi kullanılmıştır Şekil 22. Bu geometri, deney sistemi çevresinde bulunan çeşitli metallere ve/veya havadan saçılarak gelen fotonların sayısını minimize etmektedir. Kolimasyon işlemlerinde tamamı kurşun olan ve içinde çok küçük (~ 5 mm) açıklıkları bulunan kolimatörler kullanılmıştır. Gama-ışını soğurma deneylerinden elde edilen veriler OriginPro 8.5 yazılımı yardımıyla analiz edilmiştir. Bu analizlerde ^{133}Ba kaynağından yayınlanan, 53, 81, 276, 302, 356 ve 383 keV'lik gama piklerinin altında kalan alanlar hassas bir şekilde belirlenerek incelenen alaşımların deneysel foton zırhlama parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca üretilen tüm alaşımların teorik gama-ışını soğurma parametreleri (Şakar *et al.* 2020) tarafından geliştirilen Phy-X/PSD (Photon Shielding and Dosimetry) yazılımı aracılığıyla belirlenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Foton-madde etkileşim süreçlerini temel olarak kontrol eden üç temel olayın (fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve Çift oluşumu) enerjiye bağlı detaylı analizinin yapılabilmesi

için, teorik parametrelerin hesaplanmasında, deneysel enerjilere ek olarak, 15 keV-15 MeV enerji aralığındaki sonuçlar da verilmiştir.



Şekil 22. Gama-ışını soğurma geometrisi

Gama-ışını soğurma deneylerinden elde edilen boş ve numuneli ölçümlere ait piklerden elde edilen veriler Beer-Lambert yasasında yerine konularak, alaşımların LAC ve MAC değerleri elde edilmiştir. Bu parametrelerin elde edilmesini takiben, diğer foton zırhlama parametreleri kuramsal temeller bölümünde izah edilen formüller aracılığıyla belirlenmiştir. Dar ışın geometrisinde ^{133}Ba radyoaktif kaynağı ve HPGe dedektör kullanılarak elde edilen Ni_3Al alaşımı için elde edilen örnek bir spektrum Şekil 23’de gösterilmiştir. Ölçümlerde analiz edilecek piklerin yeterli istatistiğe sahip olması için çok sayıda deneme ölçümü alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen spektrumlar analiz edilerek, gerekli istatistiğin oluşup oluşmadığı ve deneysel verilerin ne denli teorik verilerle uyduğu belirlenmiştir. Düşük ölçüm zamanlarında, 81 ve 356 keV’lik piklerde yeterli sayımlar elde edilmesine rağmen, özellikle 160 ve 223 keV’lik fotonlara ait piklerde doğru sonuçlar elde edilememiştir. Bu nedenle ölçümler her bir numune için 21600 s olacak şekilde alınmıştır.



Şekil 23. Örnek spektrum

Bu spektrumda ^{133}Ba radyoaktif kaynağından yayınlanan gama-ışınları ve bazı karakteristik X-ışını pikleri görülmektedir. Bilindiği üzere, ^{133}Ba çekirdeği, radyoaktif bozunmaya maruz kalarak Cs elementine dönüşmektedir. Ba çekirdekten yayınlanan yüksek enerjili fotonlar, ürün çekirdeğin K, L ve M orbitallerinde bulunan elektronları koparabilir. Böyle bir durumda, ürün çekirdekteki elektronların yeniden düzenlenmesiyle, ürün çekirdeğin karakteristik X-ışınları yayınlanır. Şekil 23’de görülen ve yaklaşık 30 ve 35 keV enerjilerine karşılık gelen pikler, Cs elementinden yayınlanan karakteristik X-ışını pikleridir.

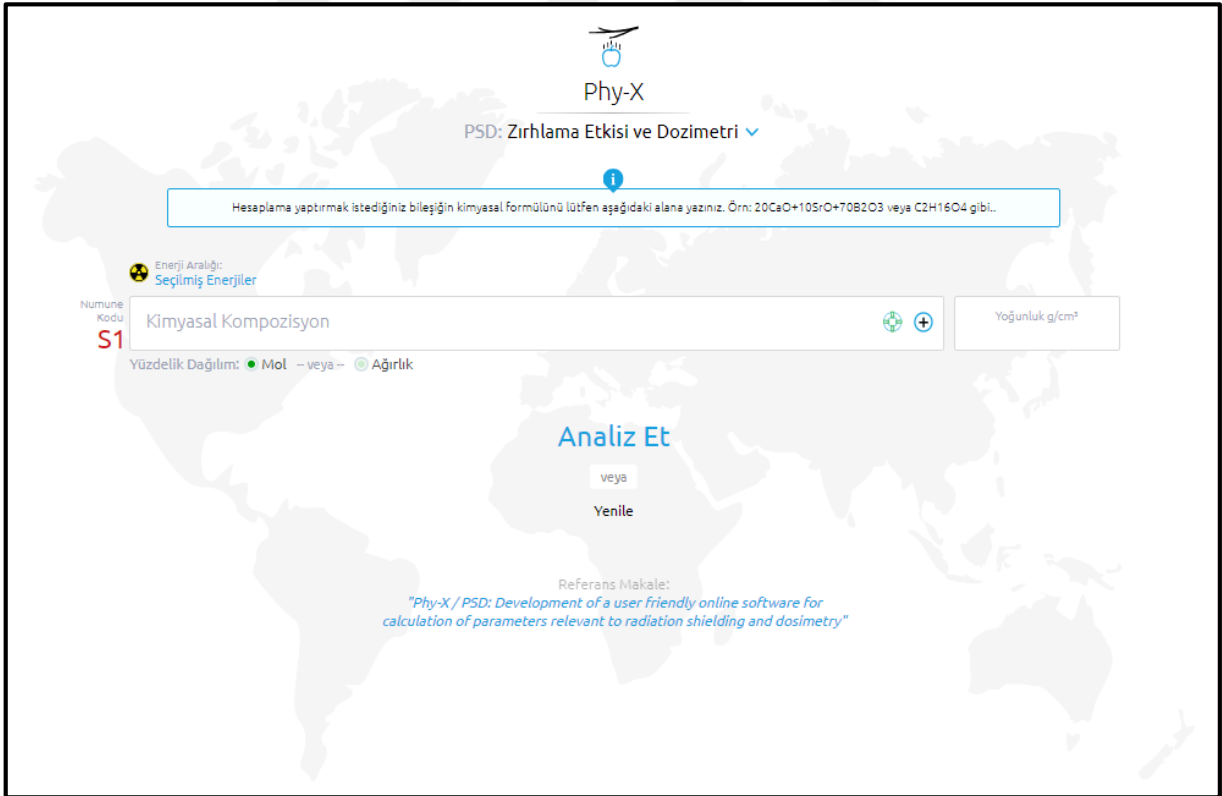
Teorik hesaplamalarda kullanılan Phy-X/PSD yazılımı

Dünyada artan radyasyon zırlama çalışmalarında, hızlı ve güvenilir bir yazılımın gerekliliğini karşılamak amacıyla 2020 yılında (Şakar *et al.* 2020) tarafından geliştirilen Phy-X/PSD (Photon Shielding and Dosimetry) programı, saçılma etkilerini de içerecek şekilde tüm soğurma parametrelerini hesaplayabilen online bir yazılımdır. Bu yazılım, kullanıcıdan sadece molce veya kütlece yüzdeye bağlı olarak kimyasal kompozisyon ve malzemenin tümünün yoğunluk değerini isteyerek zırlama parametrelerini hesaplamaktadır. Bu parametreler doğrusal ve kütle zayıflama katsayılarını (LAC, MAC), yarı ve onda bir değer kalınlığı (HVL, TVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunu (Z_{eff} , N_{eff}), enerji soğurma ve maruz kalma Build-up (EABF, EBF) faktörleridir. Yazılım, sürekli enerji

bölgesindeki (1 keV-100 GeV) zırhlama parametrelerine ilişkin veriler üretebilmektedir. Ayrıca bazı iyi bilinen radyoaktif kaynakların (^{22}Na , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{131}I , ^{13}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am) enerjileri ve Cu, Rb, Mo, Ag, Ba ve Tb elementlerinin karakteristik X-ışını enerjileri yazılımda mevcut olup kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Böylece, önceden tanımlanmış enerjiler için mevcut foton enerjilerinde zırhlama parametreleri elde edilebilir. Ayrıca, zırhlamayla ilgili başka bir parametre olan hızlı nötron azaltma tesir kesiti (FNRCs), bu yazılımı kullanarak bir bileşik veya karışım için hesaplanabilir. Yazılım, Phy-X platformuna kaydolduktan sonra çevrimiçi olarak ücretsiz olarak kullanılabilir. Bu programın öne çıkan özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Hızlı, doğru, pratik ve ücretsiz bir yazılımdır
- Tüm X-ışını ve gama-ışını soğurma parametrelerini hesaplayabilir
- Herhangi bir element, bileşik veya karışım analiz edilebilir.
- Mol fraksiyonu veya ağırlık fraksiyonu seçilebilir.
- Aynı anda farklı malzemeler için hesaplamalar yapılabilir.

Phy-X/PSD yazılımının görsel ara yüzü Şekil 24’te gösterilmiştir.



Şekil 24. Phy-X/PSD yazılımının görsel ara yüzü

Deneysel Verilerin Hata Analizi

Bu tez çalışmasında ilk olarak incelenen numunelerin kütleleri (m ; gram) hassas terazi yardımıyla belirlendi. Ardından çapı 1,3 cm olan alaşımın yüzey alanı hesaplandı

($A = \pi r^2$; cm^2). Kütle ve yüzey alanı kullanılarak; $t_m = m/A$ (g/cm^2) eşitliği yardımıyla alaşımların kütle kalınlıkları hesaplandı. Daha sonra Eşitlik 3 kullanılarak alaşımların deneysel MAC değerleri belirlendi. Herhangi bir enerjide MAC parametresinin hesaplanmasında, I , I_0 ve kütle kalınlığı parametrelerine ihtiyaç duyulduğundan, hata analizinin bu parametrelere bağlı olarak yapılması gereklidir. Eşitlik 20 kullanılarak deneysel olarak ölçülen MAC değerlerinin hata analizleri yapılmıştır (Alım, 2020).

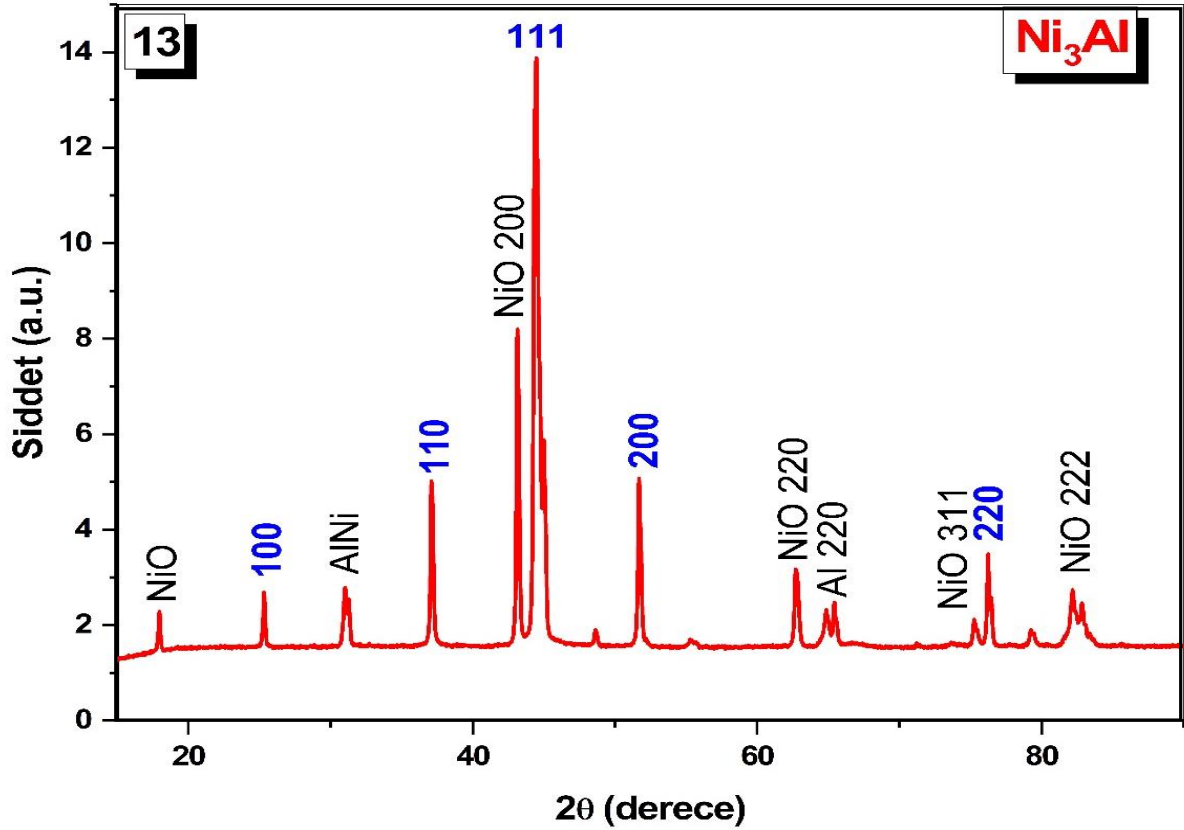
$$\Delta(\mu_m) = \frac{1}{t_m} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\ln \frac{I_0}{I}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta t_m}{t_m}\right)^2} \quad (20)$$

ARAŞTIRMA BULGULARI

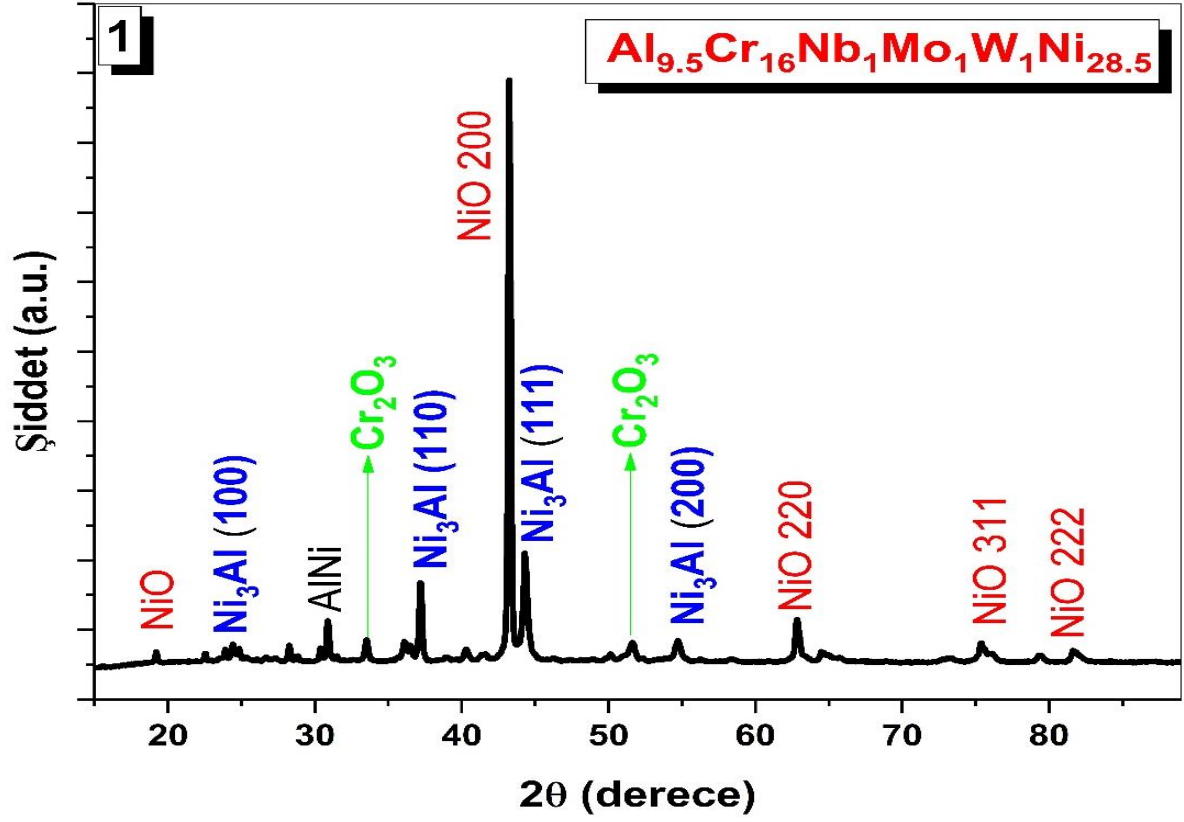
Bu bölümde, hazırlanan tez çalışması kapsamında üretilen alaşımların, yapısal ve gama-ışını soğurma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan XRD, SEM ve soğurma analizleri verilmiştir. İlk olarak üretilen alaşımların kristal yapıda olup olmadıklarının belirlenmesi için XRD analizleri sunulmuştur. Takip eden kısımda, üretilen alaşımların yüzey morfolojilerinin nasıl olduğunun belirlenmesi amacıyla elde edilen FESEM görüntüleri ve son olarak gama-ışını soğurma deneylerinden ve teorik hesaplamalardan elde edilen veriler sunulmuştur.

XRD Sonuçları

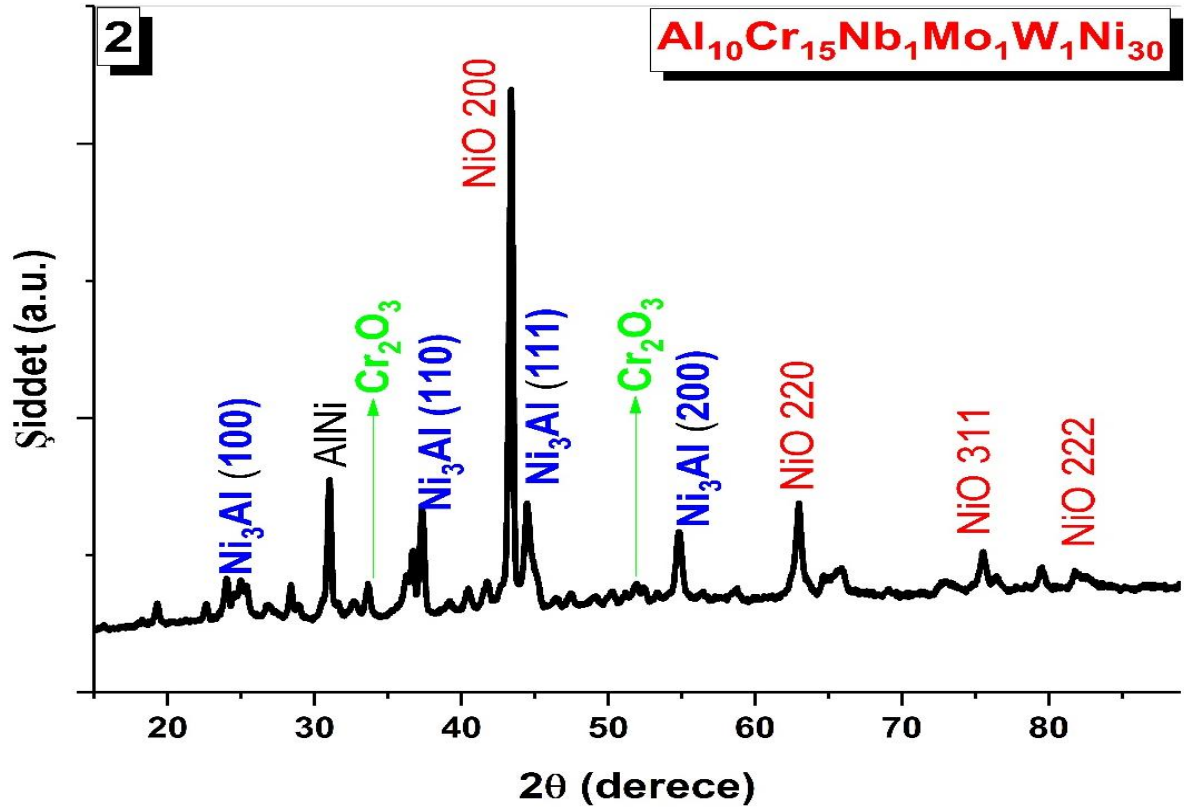
1,54 nm ($K\alpha$) dalga boylu Ni filtreli Cu kaynağı kullanılarak, $0,01^\circ$ lik adım aralığıyla 10° – 95° açı aralığından elde edilen XRD spektrumları Şekil 25-38 arasında sunulmuştur. İlk olarak, Tablo 3'te numune kodlamasında 13 ile temsil edilen Ni_3Al alaşımının XRD profili Şekil 25'te verilmiştir. Ağır metal katkılı olarak üretilen diğer alaşımların spektrumları ise Şekil 26-37 arasında verilmiştir.



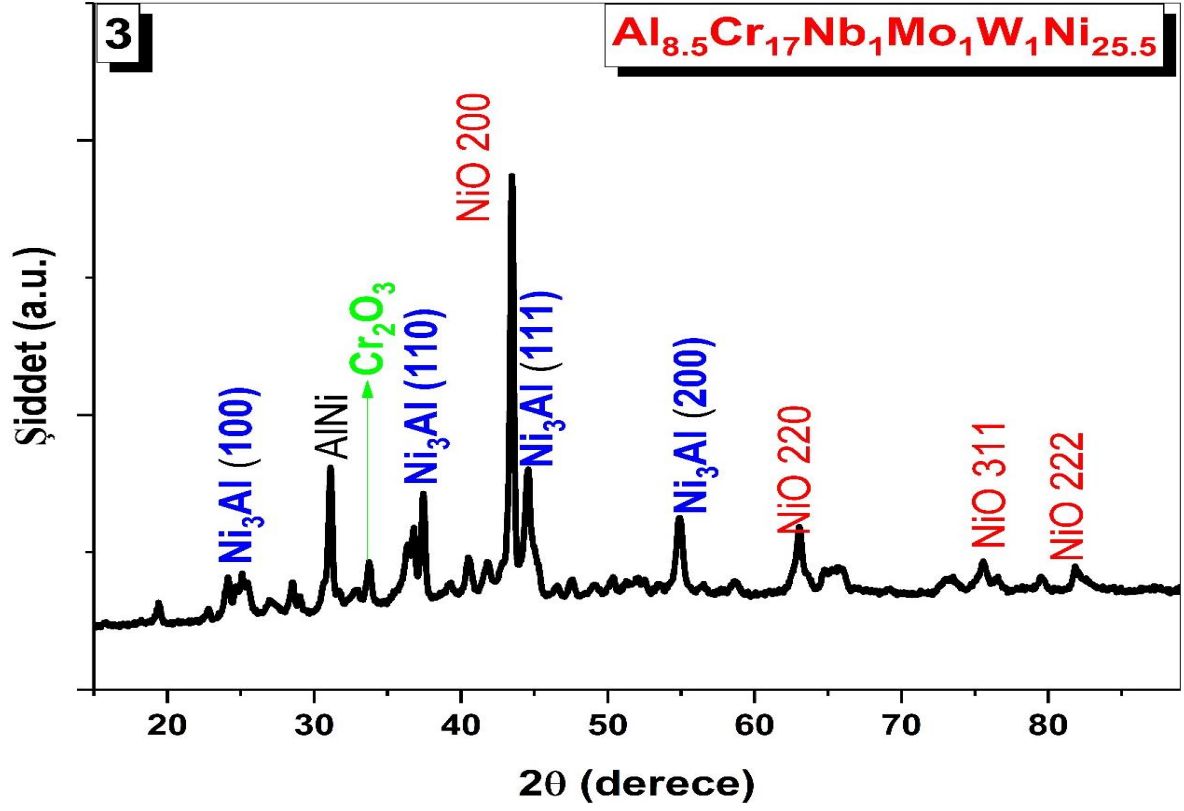
Şekil 25. Ni_3Al alaşımının XRD profili



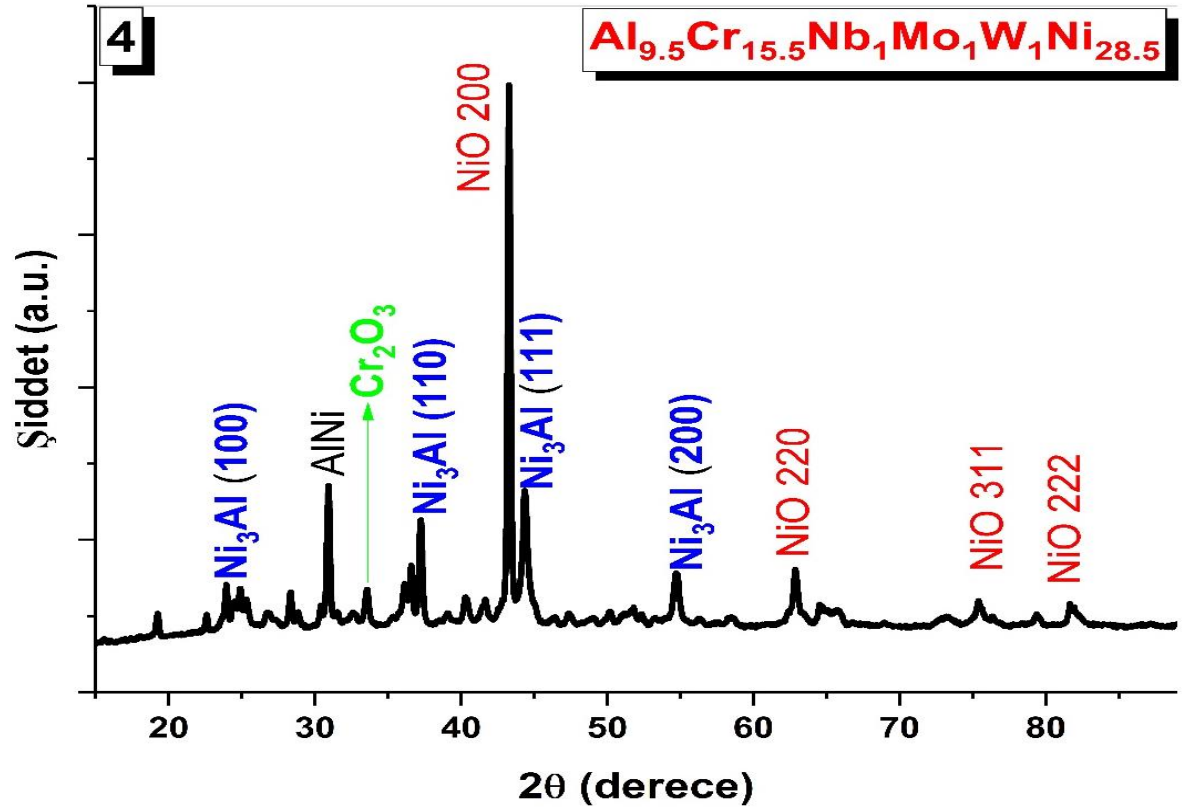
Şekil 26. $Al_{9.5}Cr_{16}Nb_1Mo_1W_1Ni_{28.5}$ alaşımının XRD profili



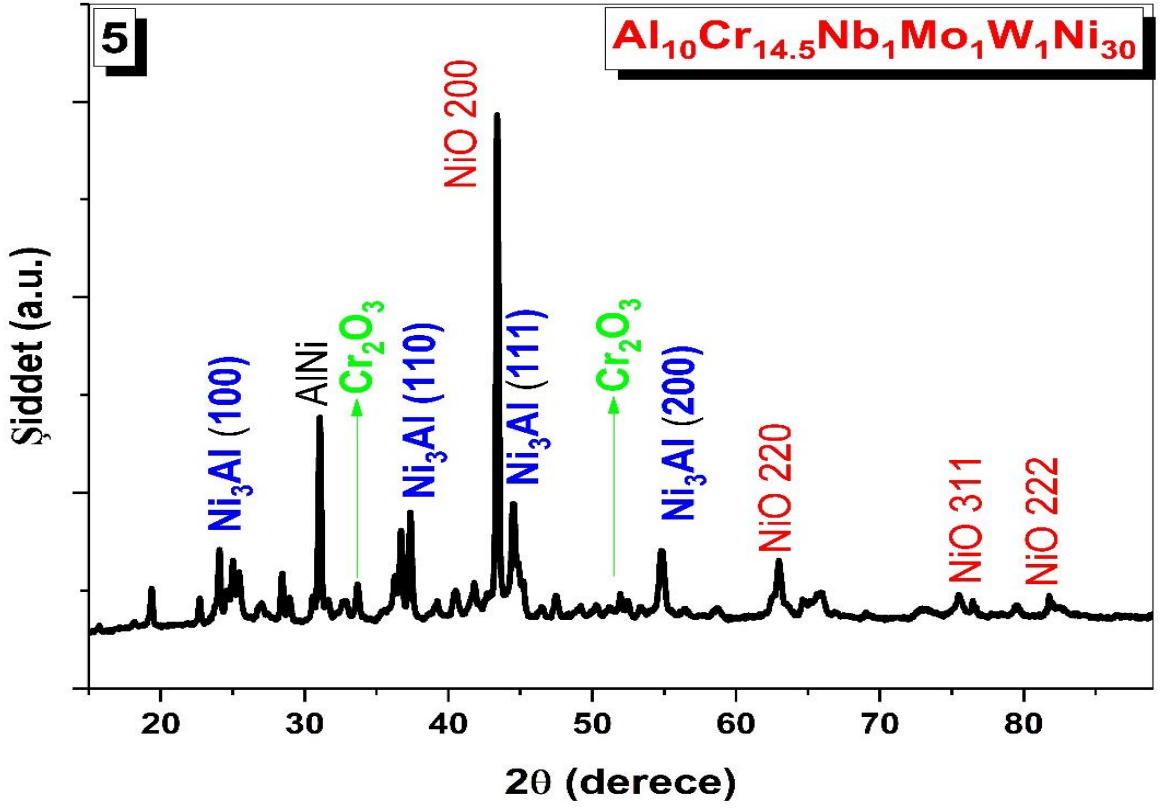
Şekil 27. $Al_{10}Cr_{15}Nb_1Mo_1W_1Ni_{30}$ alaşımının XRD profili



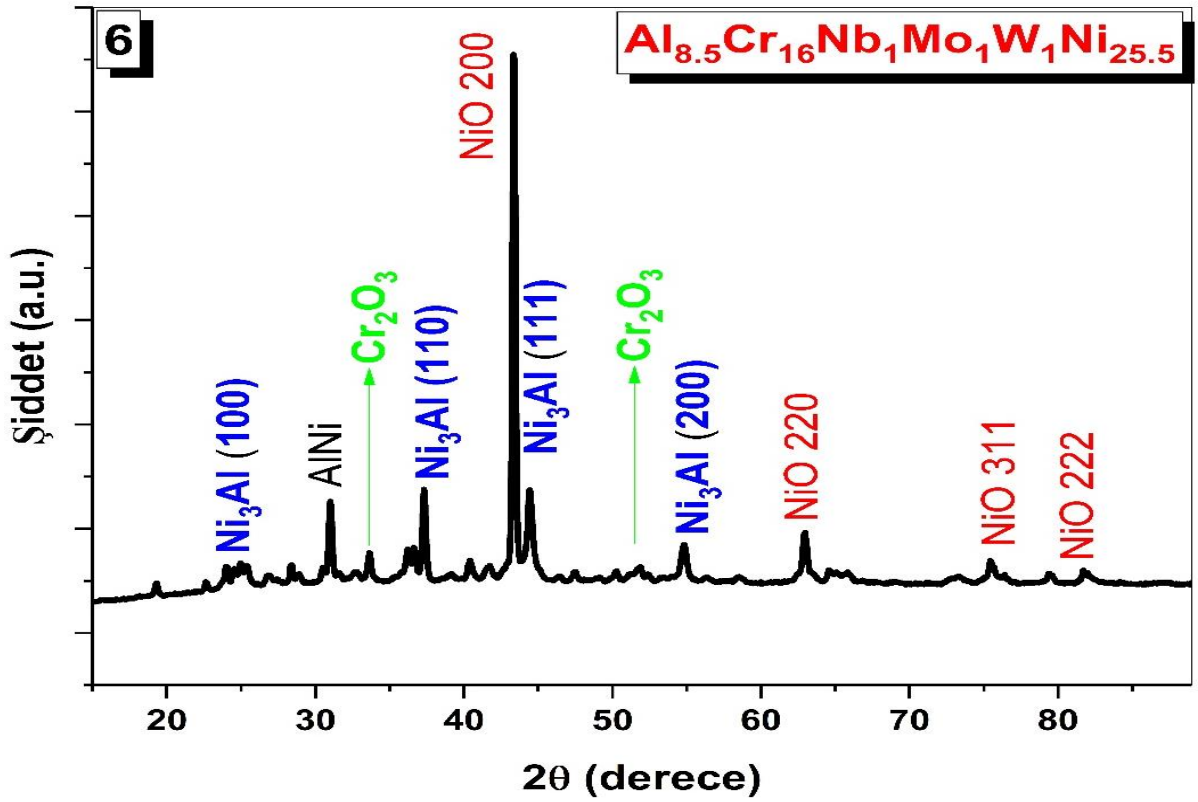
Şekil 28. $\text{Al}_{8.5}\text{Cr}_{17}\text{Nb}_1\text{Mo}_1\text{W}_1\text{Ni}_{25.5}$ alaşımının XRD profili



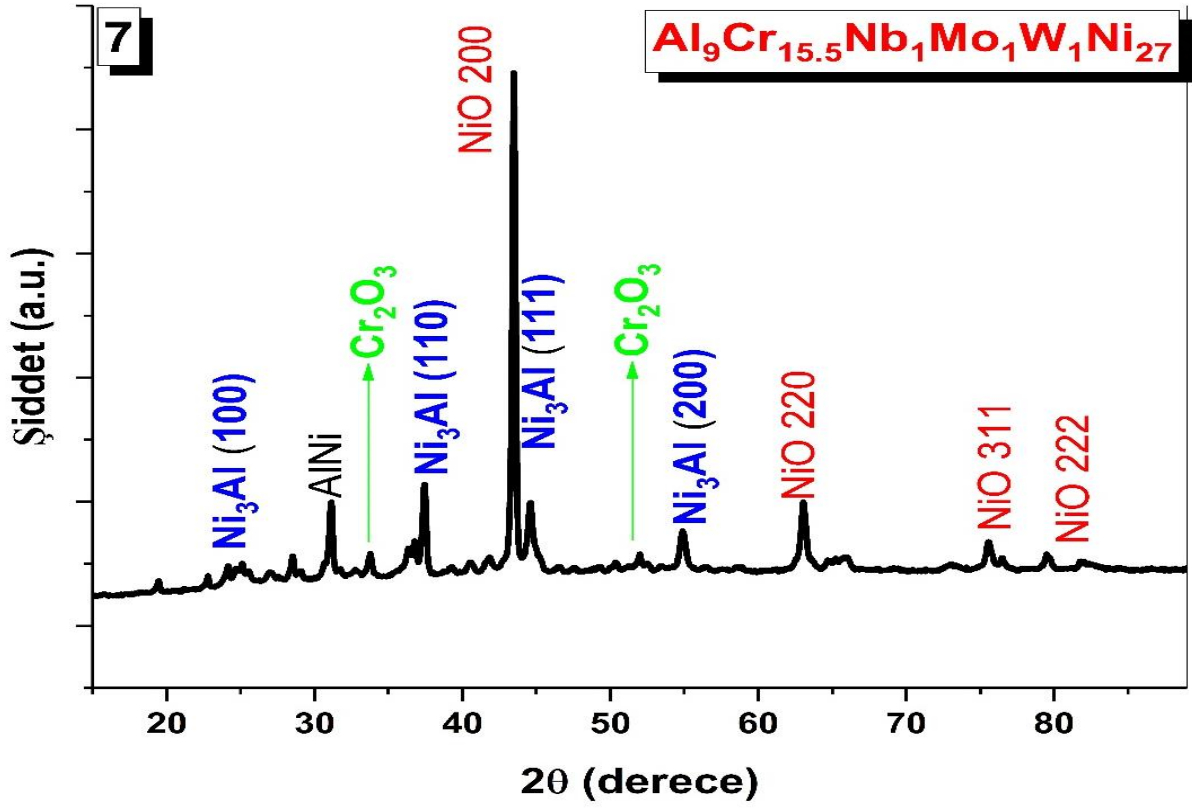
Şekil 29. $\text{Al}_{9.5}\text{Cr}_{15.5}\text{Nb}_1\text{Mo}_1\text{W}_1\text{Ni}_{28.5}$ alaşımının XRD profili



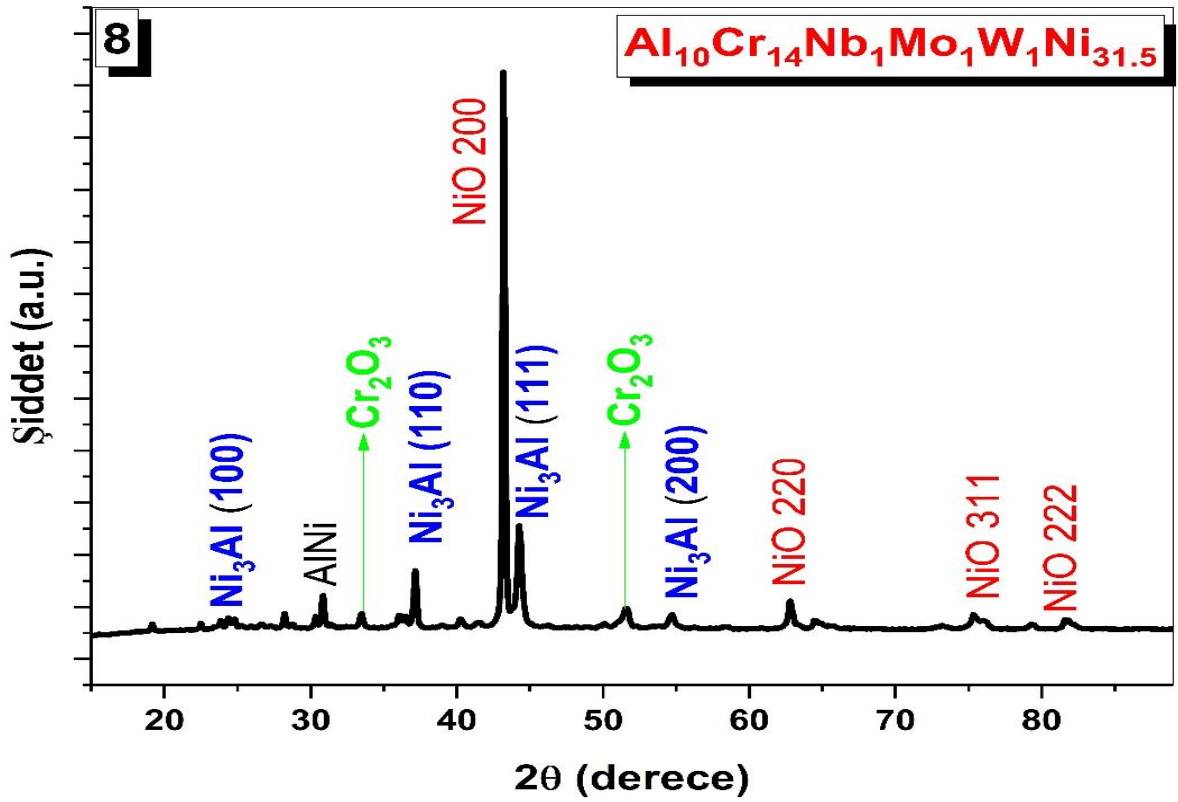
Şekil 30. $\text{Al}_{10}\text{Cr}_{14.5}\text{Nb}_1\text{Mo}_1\text{W}_1\text{Ni}_{30}$ alaşımının XRD profili



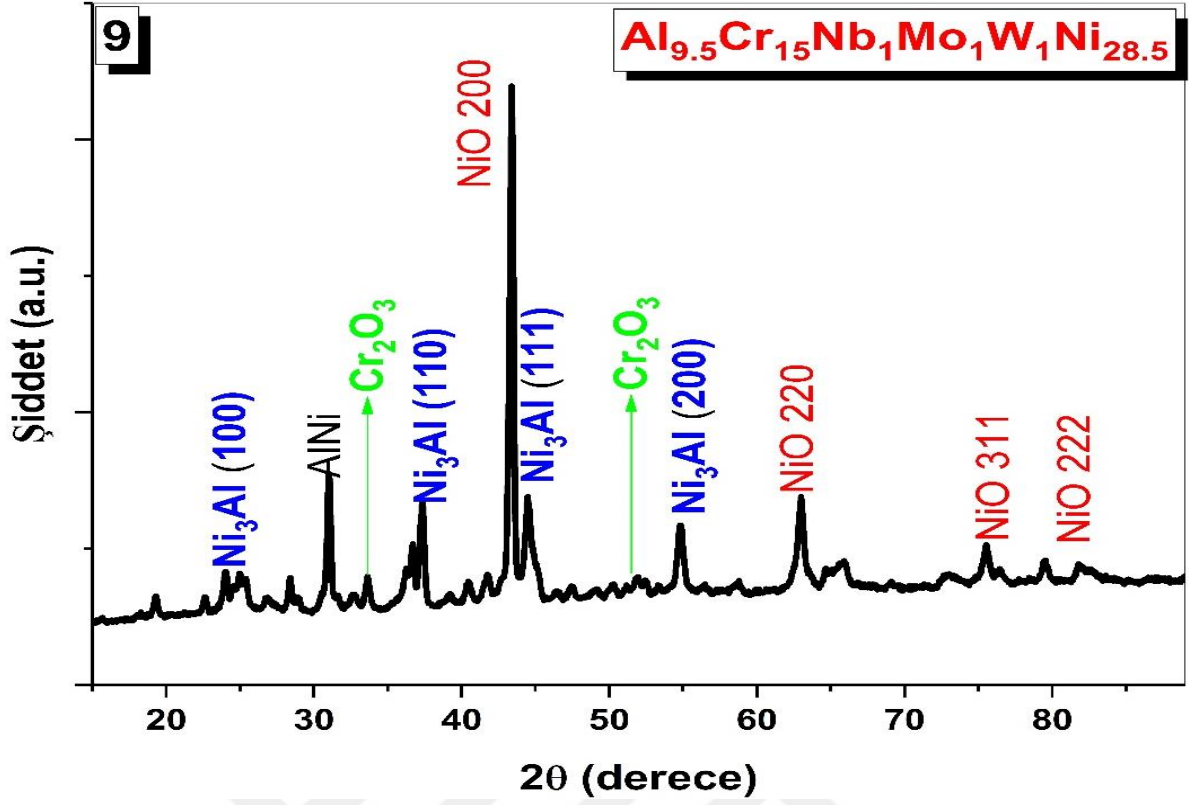
Şekil 31. $\text{Al}_{8.5}\text{Cr}_{16}\text{Nb}_1\text{Mo}_1\text{W}_1\text{Ni}_{25.5}$ alaşımının XRD profili



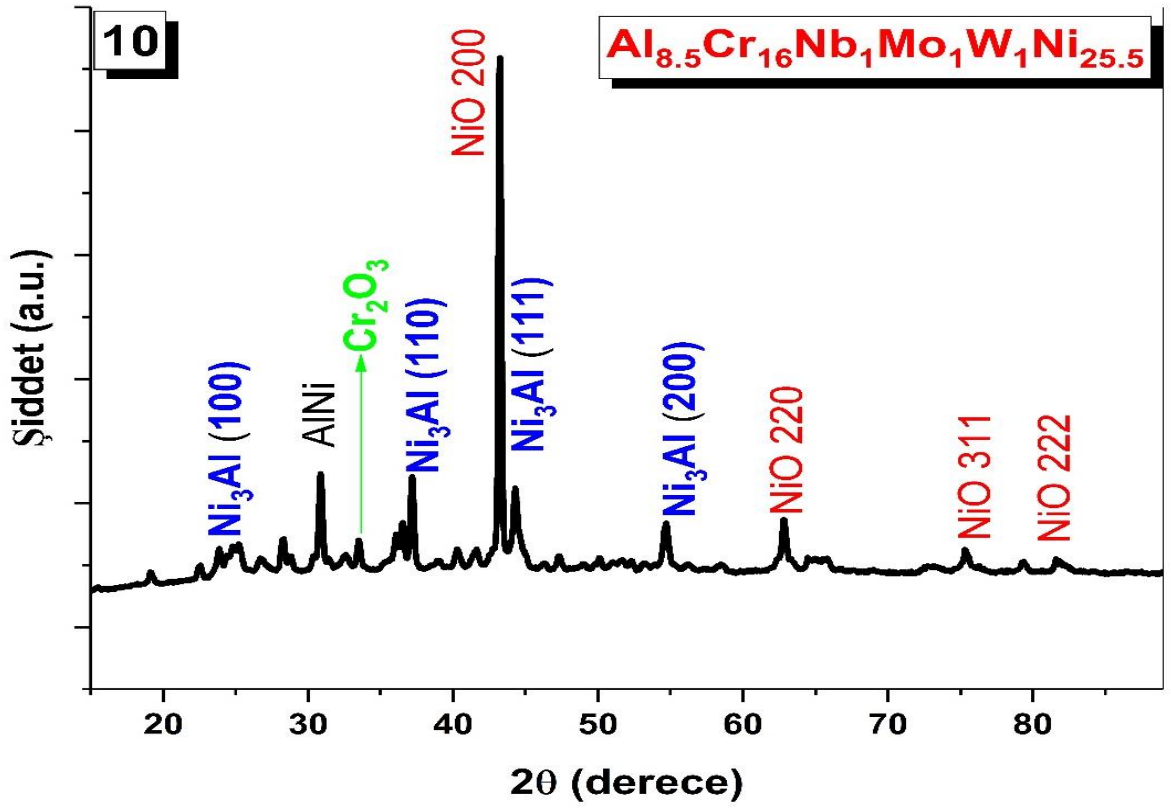
Şekil 32. $\text{Al}_9\text{Cr}_{15.5}\text{Nb}_1\text{Mo}_1\text{W}_1\text{Ni}_{27}$ alaşımının XRD profili



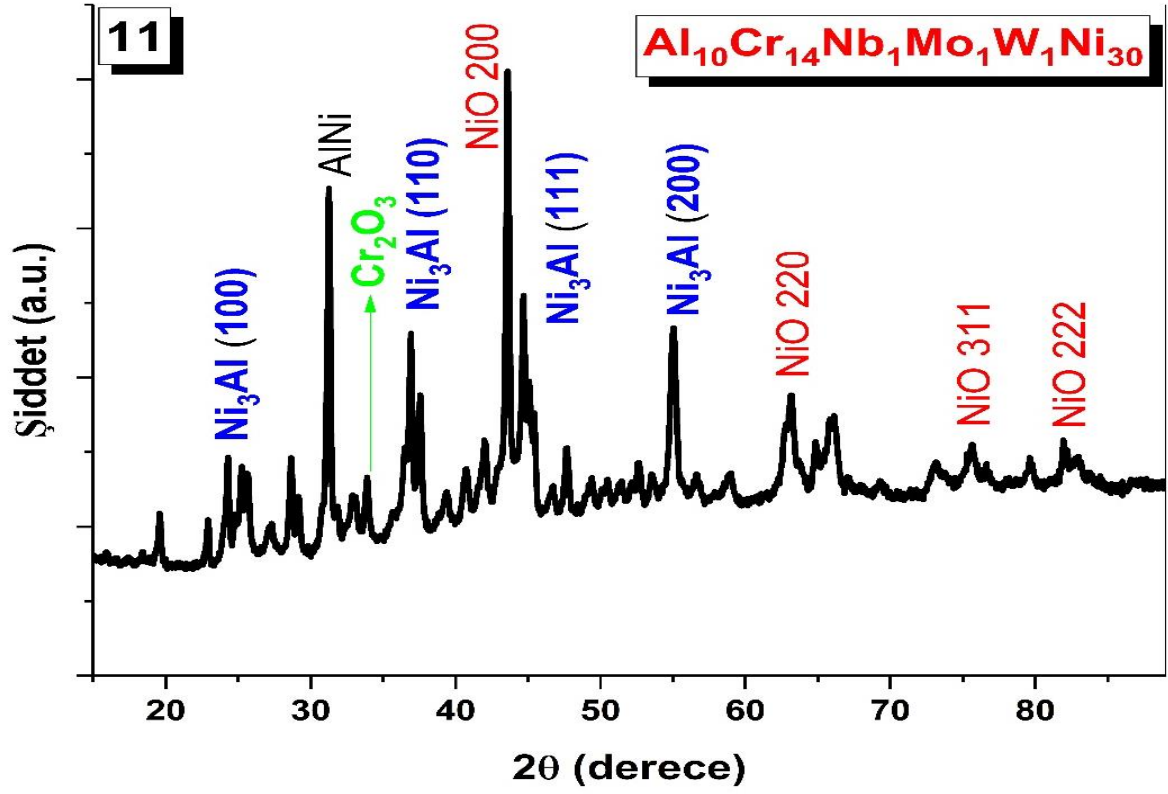
Şekil 33. $\text{Al}_{10.5}\text{Cr}_{14}\text{Nb}_1\text{Mo}_1\text{W}_1\text{Ni}_{31.5}$ alaşımının XRD profili



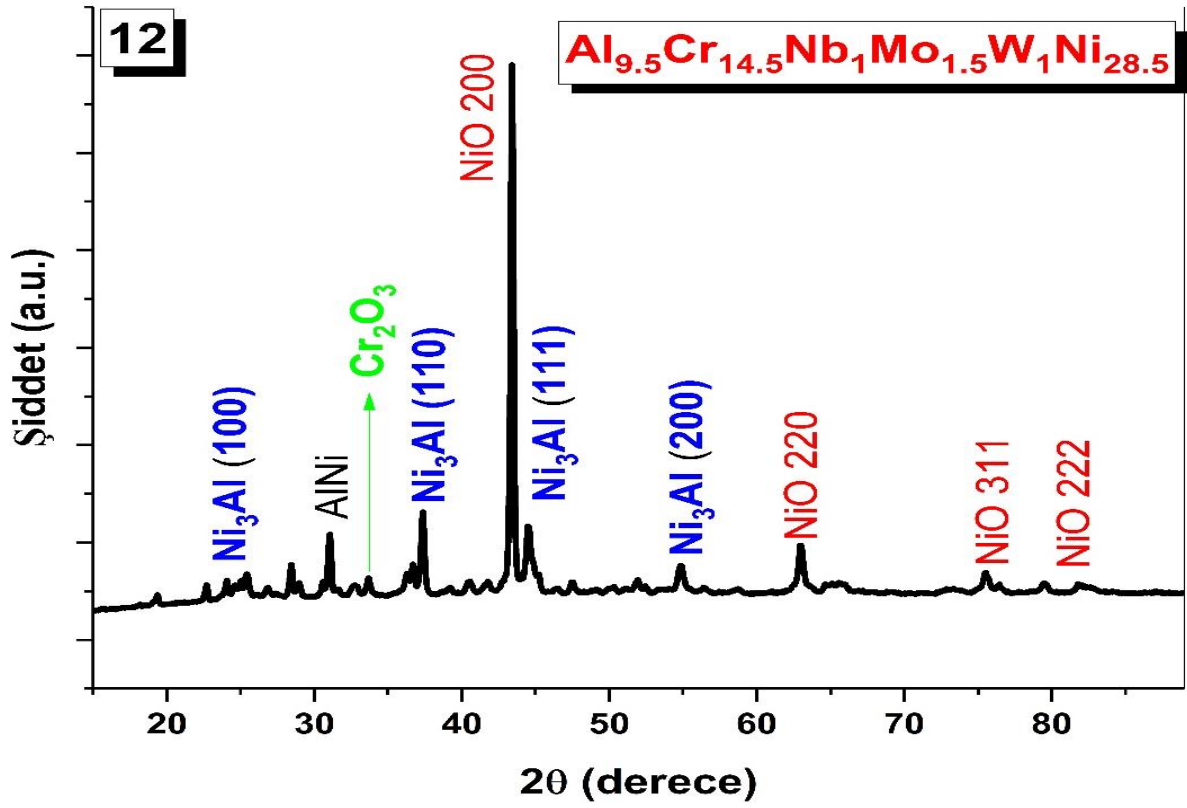
Şekil 34. $Al_{9.5}Cr_{15}Nb_1Mo_1W_1Ni_{28.5}$ alaşımının XRD profili



Şekil 35. $Al_{8.5}Cr_{16}Nb_1Mo_1W_1Ni_{25.5}$ alaşımının XRD profili

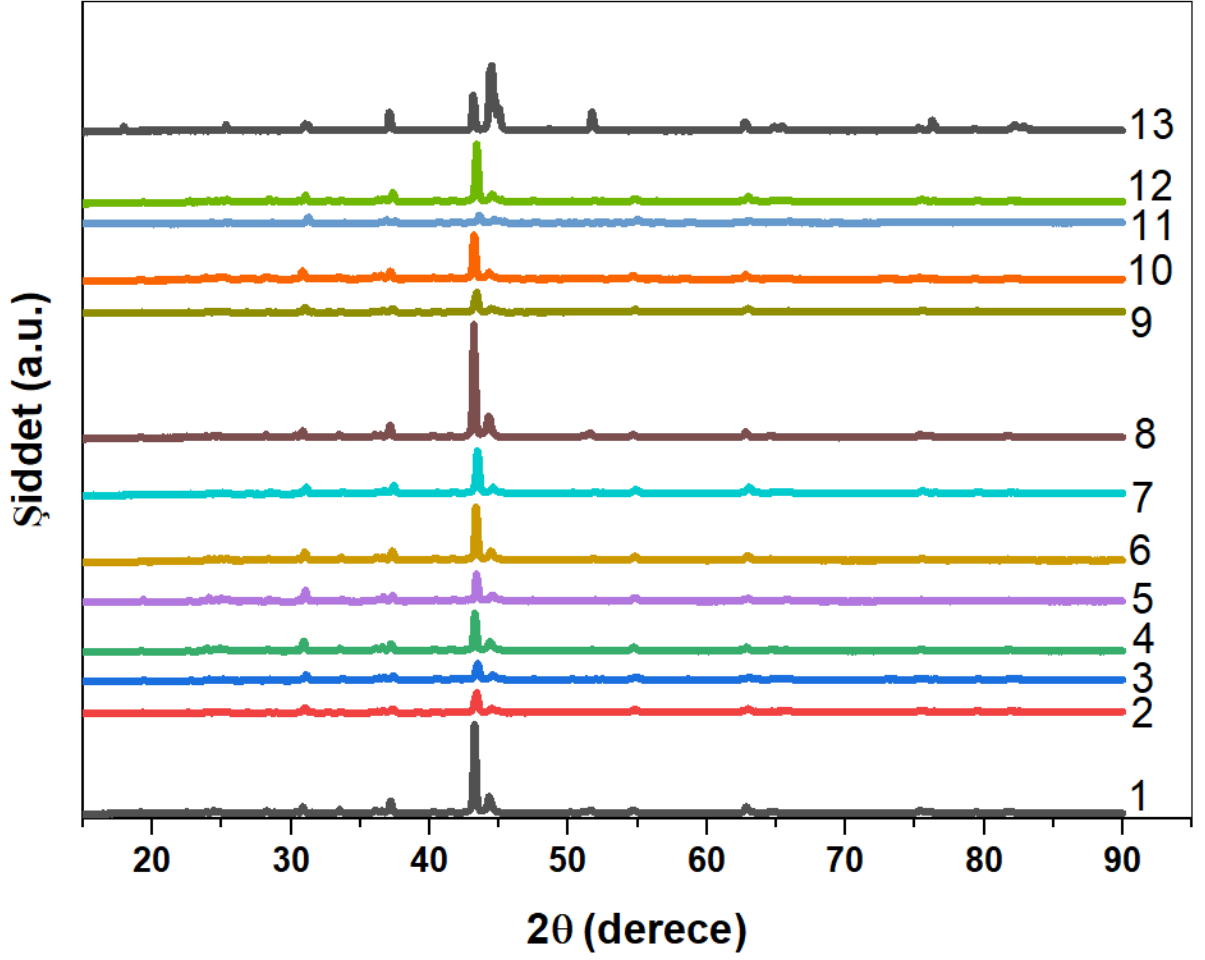


Şekil 36. $Al_{10}Cr_{14}Nb_1Mo_1W_1Ni_{30}$ alaşımının XRD profili



Şekil 37. $Al_{9.5}Cr_{14.5}Nb_1Mo_{1.5}W_1Ni_{28.5}$ alaşımının XRD profili

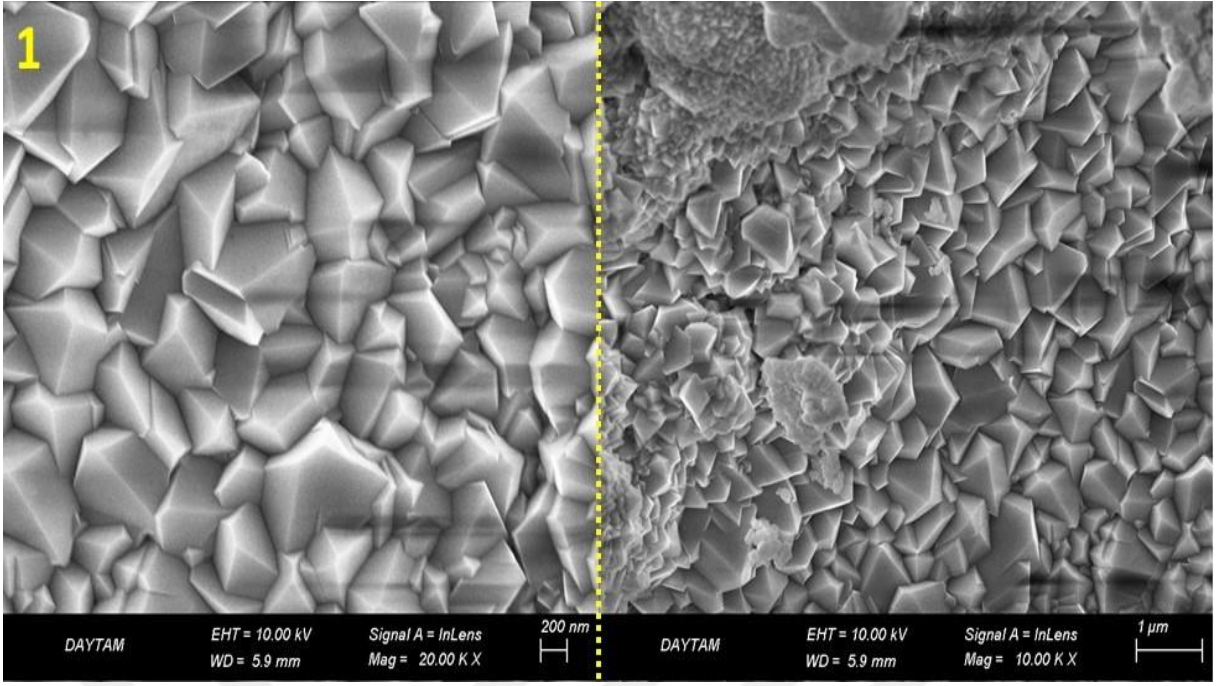
Tez çalışması kapsamında üretilen 13 farklı alaşımın XRD datalarından elde edilen karşılaştırmalı spektrumları Şekil 38’de gösterilmiştir.



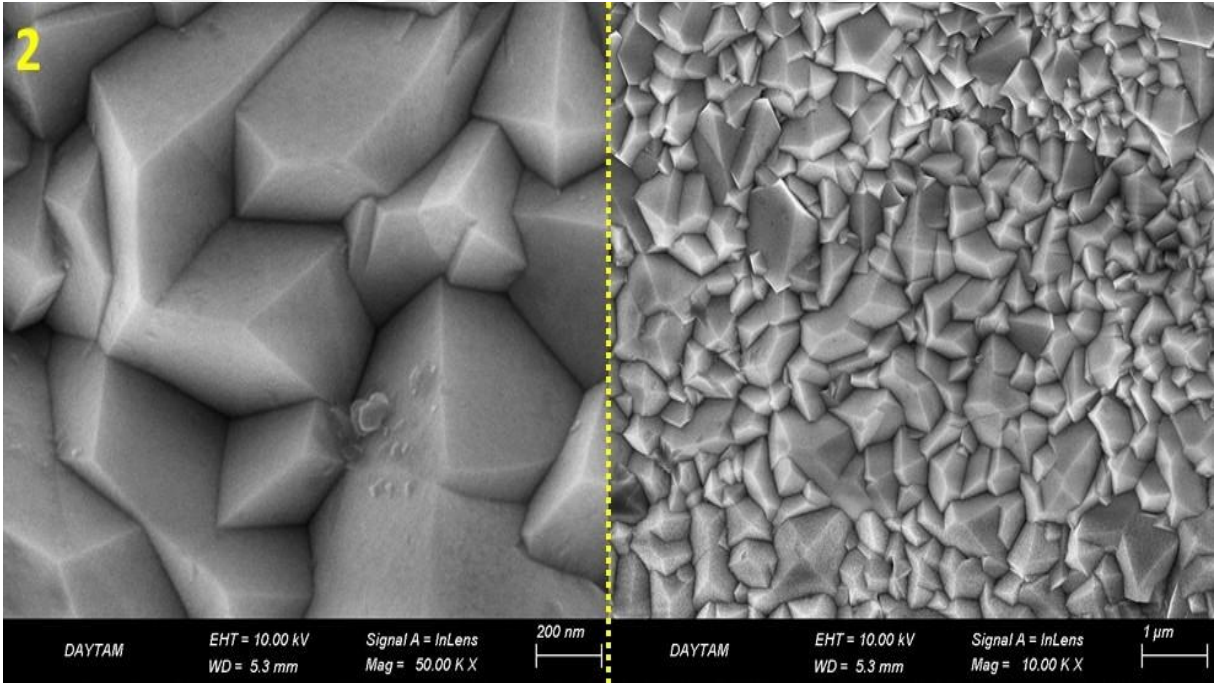
Şekil 38. Üretilen alaşımların karşılaştırmalı XRD profilleri

SEM Görüntüleri

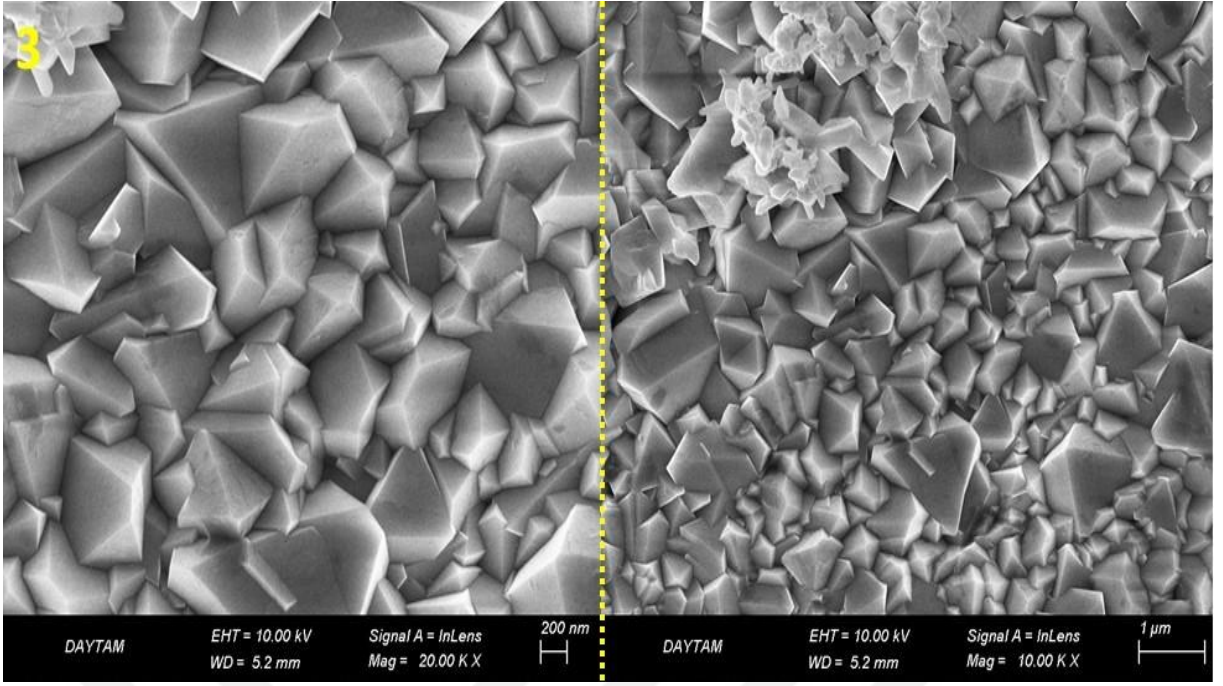
Ni_3Al tabanlı olarak sinterleme tekniği kullanılarak üretilen alaşımların, yüzey morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla elde edilen SEM görüntüleri Şekil 39-51 arasında verilmiştir. Bu görüntülerin elde edilmesinde 10KX ve 20 KX'lik büyütme oranları kullanılmıştır. Verilen şekillerin sol taraflarında verilen görüntüler 20KX'lik büyütme oranlarına sahipken, sağ tarafta verilen görüntüler 10KX'lik görüntülere aittir. 20 KX'lik görüntülerin çözünürlüğü $1\mu m$ iken, 10 KX'lik görüntülerin çözünürlüğü 200 nm'dir.



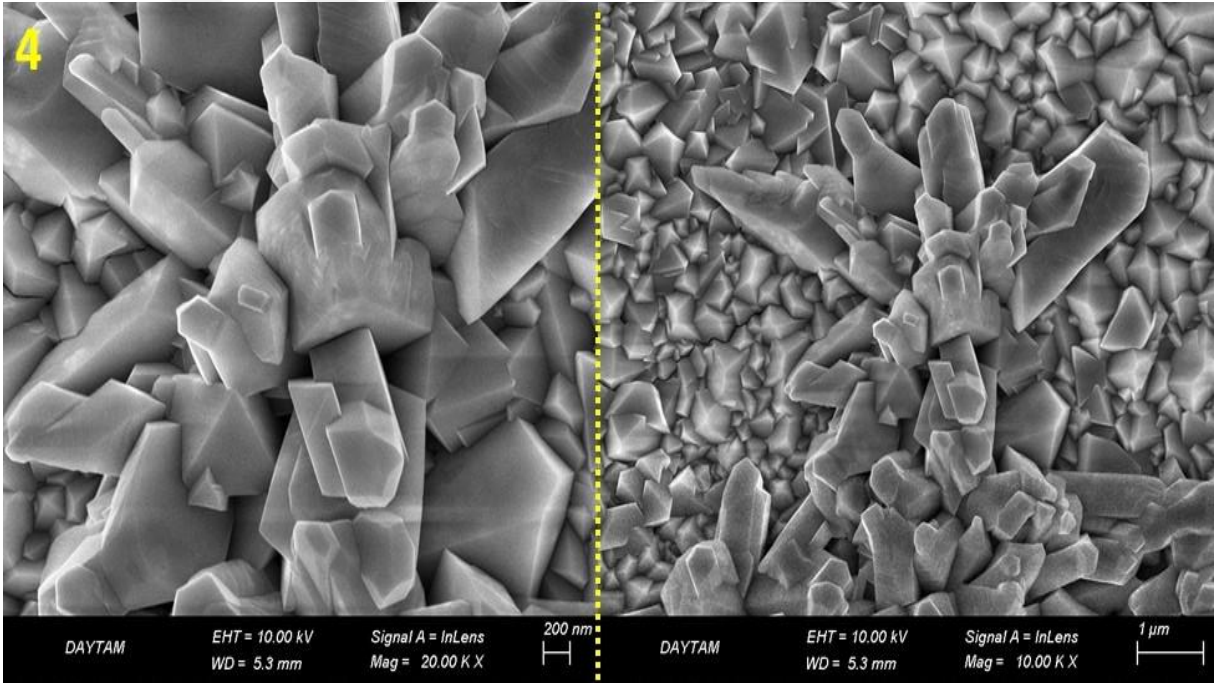
Şekil 39. S₁ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



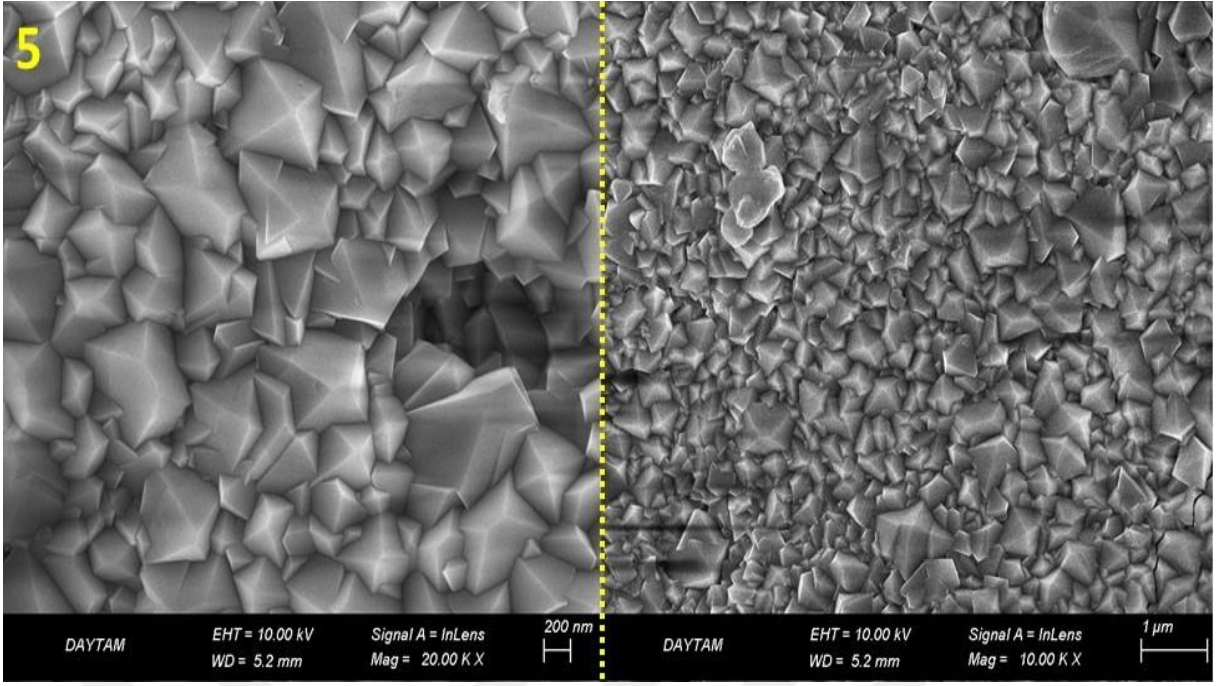
Şekil 40. S₂ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



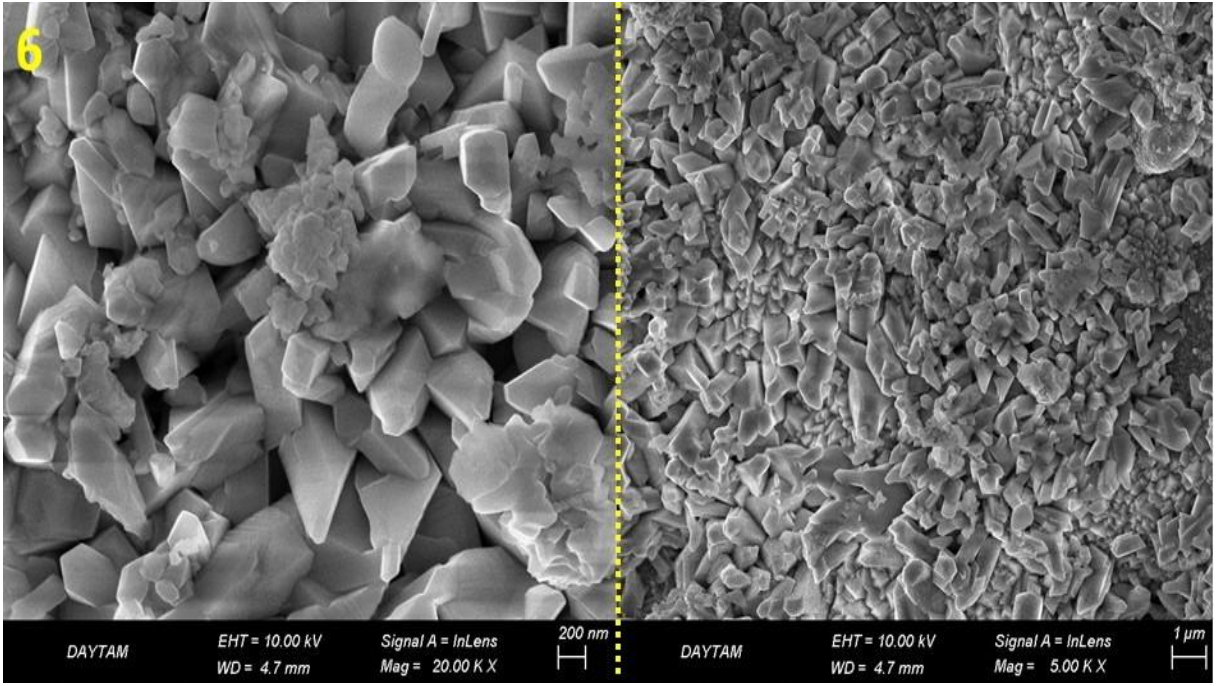
Şekil 41. S₃ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



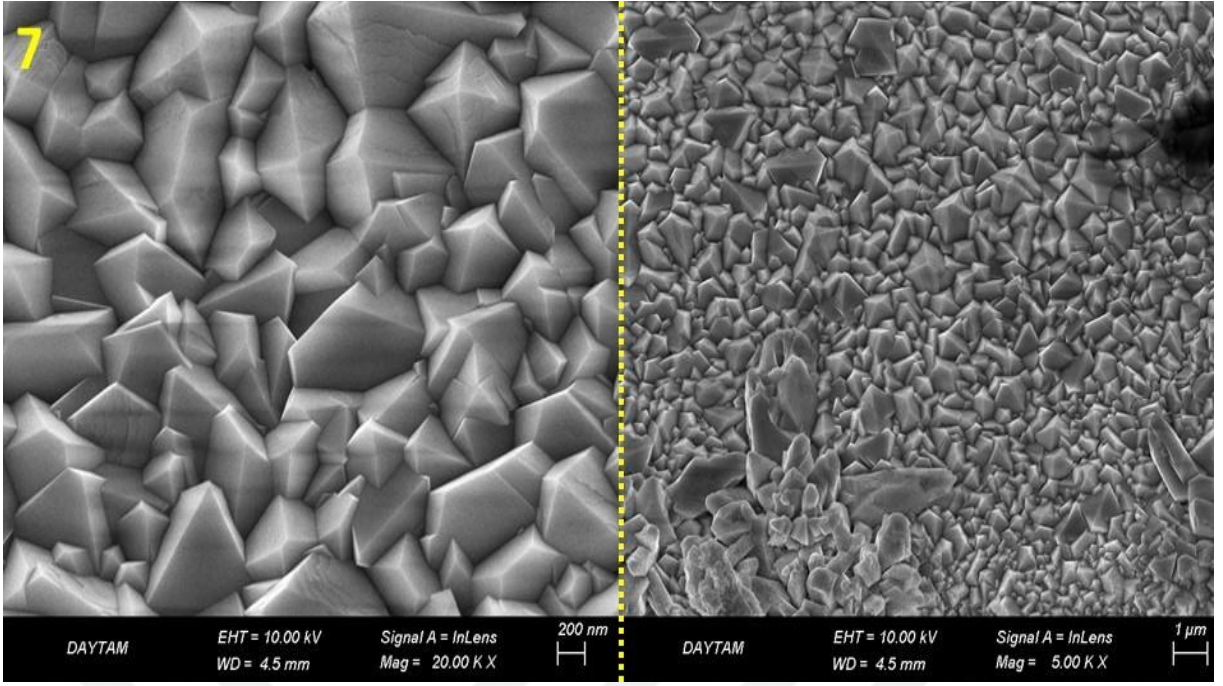
Şekil 42. S₄ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



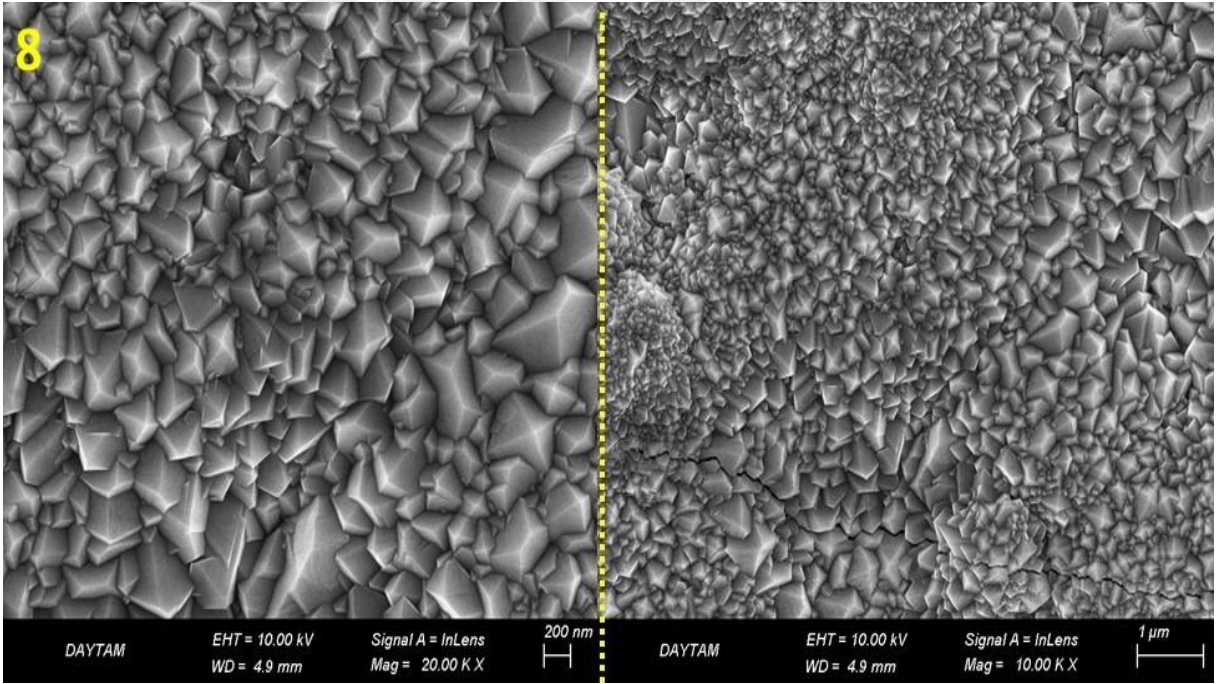
Şekil 43. S₅ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 µm'lik görüntüleri



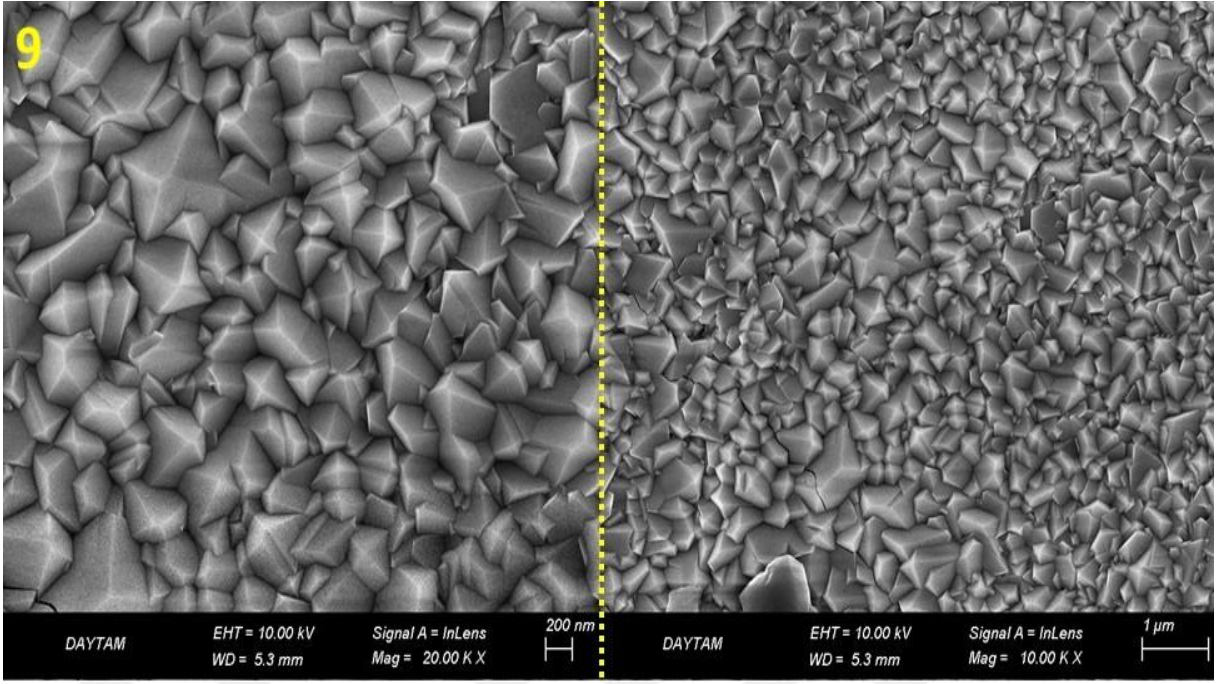
Şekil 44. S₆ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 µm'lik görüntüleri



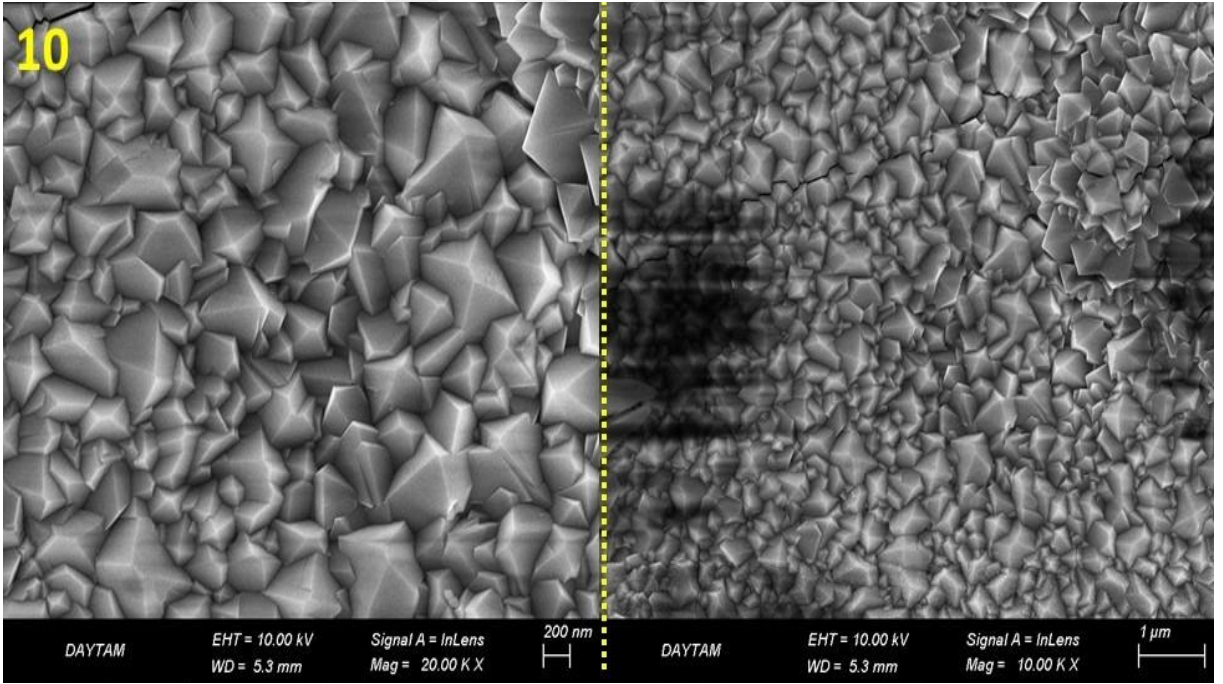
Şekil 45. S₇ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



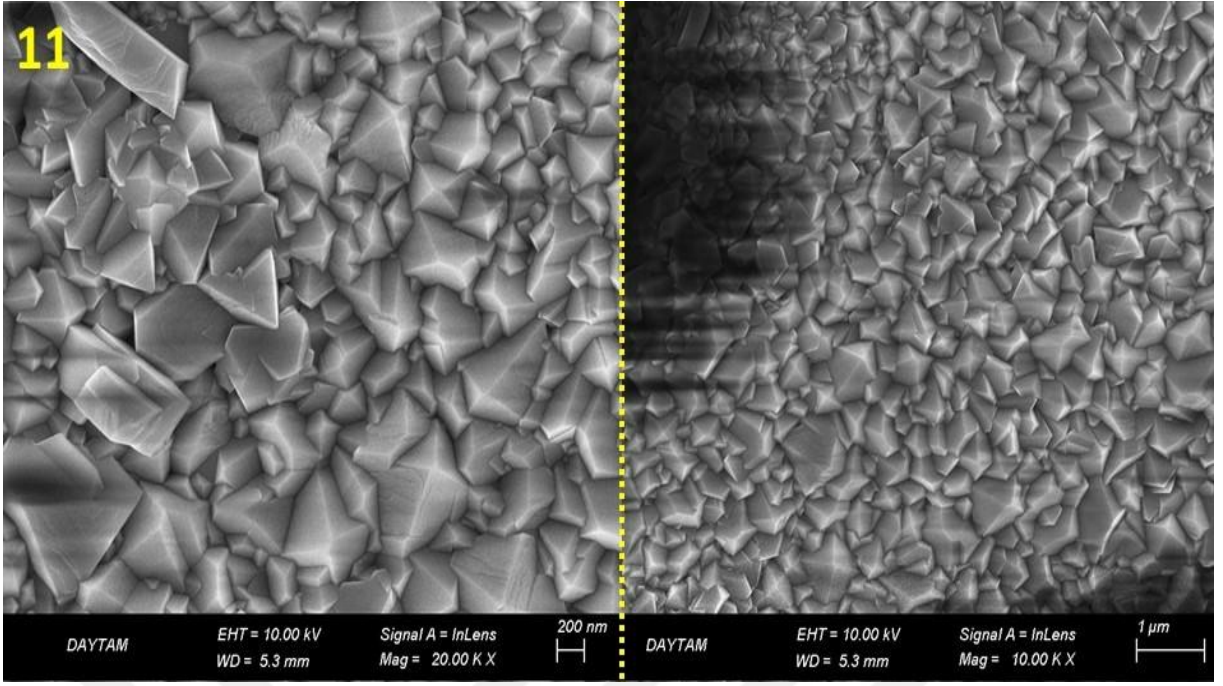
Şekil 46. S₈ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



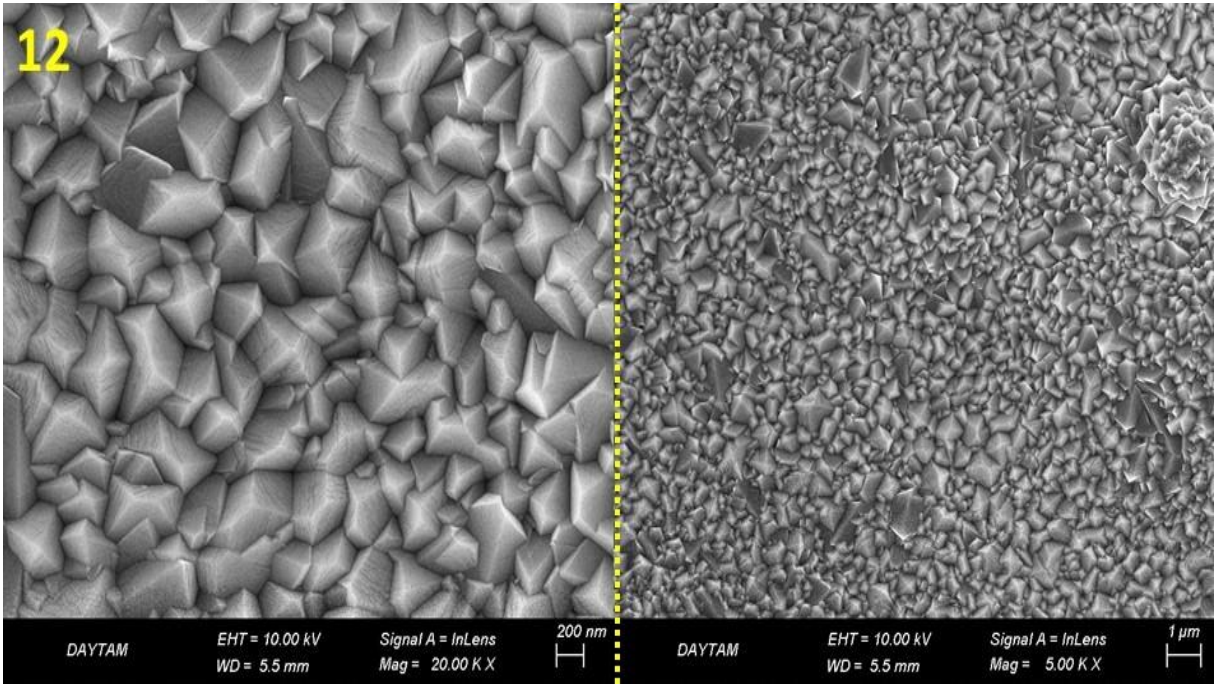
Şekil 47. S₉ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopta alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



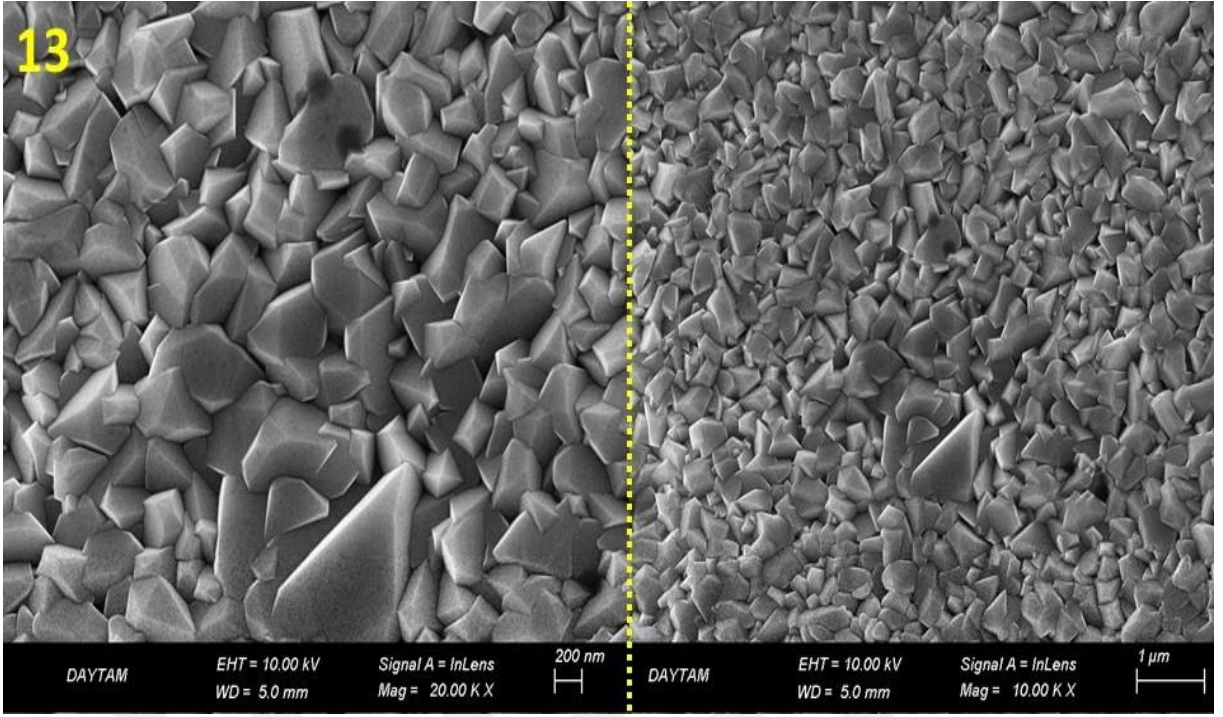
Şekil 48. S₁₀ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopta alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



Şekil 49. S₁₁ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopa alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



Şekil 50. S₁₂ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopa alınan 200 nm ve 1 μm'lik görüntüleri



Şekil 51. S₁₃ kodlu alaşımın taramalı elektron mikroskopla alınan 200 nm ve 1µm'lik görüntüleri

Deneysel ve Teorik Gama Işını Soğurma Parametreleri

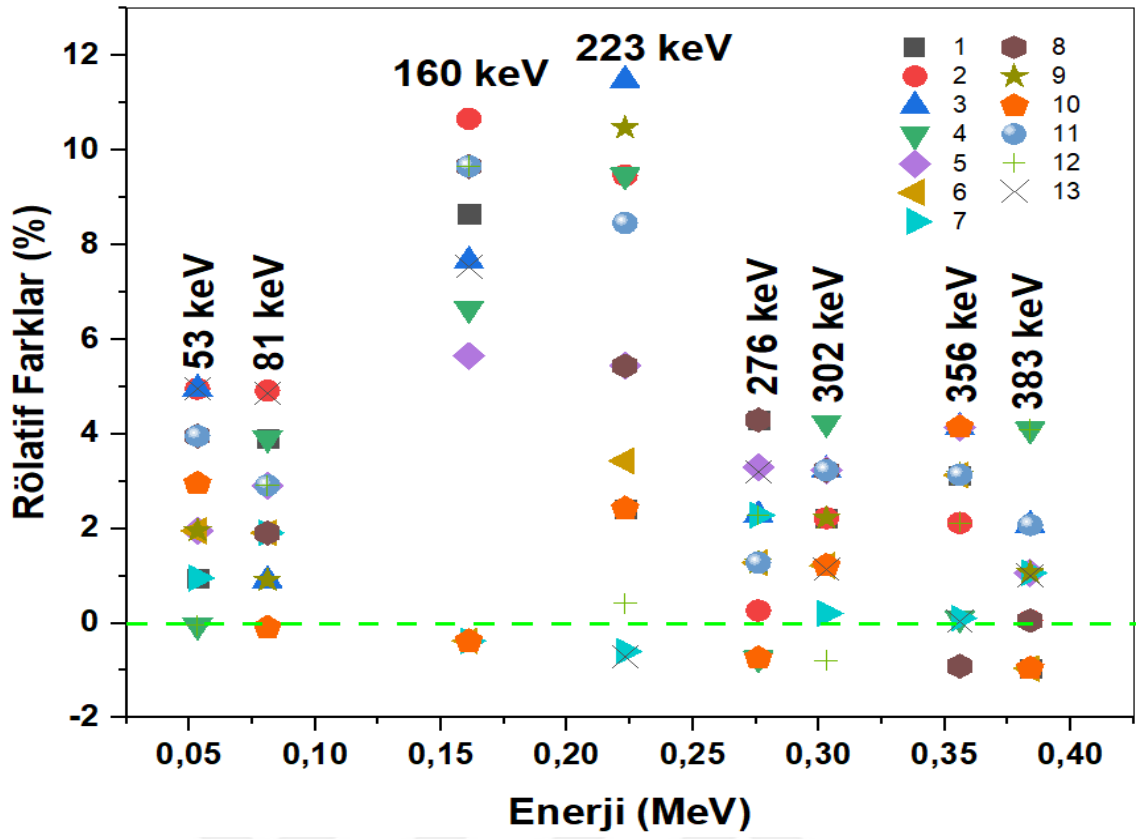
Şekil 22'de görüntüsü verilen dar ışını kullanılarak alınan gama-ışını soğurma spektrumlarından elde edilen deneysel ve Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak elde edilen teorik gama-ışını soğurma parametrelerine ait sonuçlar bu başlık altında sunulmuştur. Tablo 5'te deneysel ve teorik olarak elde edilen kütle azaltma katsayılarının enerjiye bağlı sayısal değerleri, Tablo 6'da ise hem deneysel değerlerin hata değerleri hem de teorik verilere göre rölatif farkları sunulmuştur. Deneysel ve teorik verilerin yüksek derecede uyumluluk göstermesinden dolayı, gama-ışını parametreleri daha geniş enerji aralığında daha kapsamlı bir değerlendirmenin yapılabilmesi için 15 keV-15 MeV enerji aralığında grafize edilmiştir. Kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, atomik tesir kesiti, elektronik tesir kesiti ve etkin elektron yoğunluğu parametrelerinin enerjiye bağlı değişimleri Şekil 52-62 arasında verilmiştir. Bölümün son kısmında ise, saçılma etkilerinin daha iyi anlaşılmasında kullanılan foton kuvvetlendirme parametreleri olan maruz kalma build-up faktörü ve enerji soğurma build-up faktörüne ait sonuçlar ve grafikler verilmiştir.

Tablo 5. Kütle Azaltma Katsayılarının Teorik ve Deneysel Sonuçları

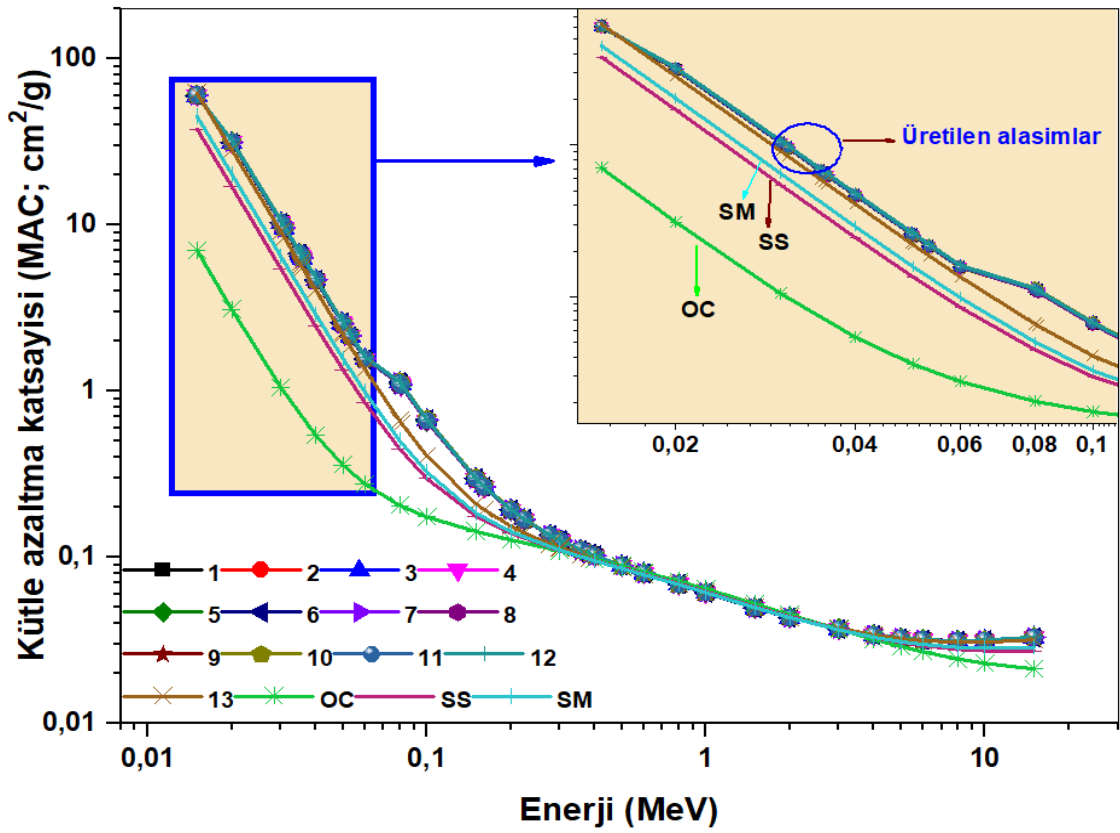
Enerji (MeV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Teorik kütle azaltma katsayıları (cm²/g)													
5,32E-02	2,146	2,144	2,145	2,147	2,146	2,146	2,157	2,153	2,154	2,165	2,162	2,217	1,858
8,10E-02	1,081	1,074	1,098	1,081	1,075	1,098	1,096	1,071	1,089	1,110	1,086	1,102	0,642
1,61E-01	0,263	0,262	0,266	0,263	0,262	0,266	0,266	0,262	0,265	0,268	0,264	0,266	0,193
2,23E-01	0,168	0,167	0,169	0,168	0,167	0,169	0,169	0,167	0,168	0,170	0,168	0,169	0,140
2,76E-01	0,135	0,135	0,136	0,135	0,135	0,136	0,136	0,135	0,135	0,136	0,135	0,136	0,120
3,03E-01	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,126	0,125	0,125	0,113
3,56E-01	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,111	0,110	0,111	0,103
3,84E-01	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,099
Deneysel kütle azaltma katsayıları (cm²/g)													
5,32E-02	2,126	2,038	2,039	2,148	2,104	2,104	2,136	2,068	2,112	2,101	2,077	2,218	1,766
8,10E-02	1,038	1,021	1,088	1,038	1,043	1,077	1,075	1,050	1,079	1,111	1,054	1,070	0,610
1,61E-01	0,241	0,234	0,246	0,246	0,247	0,267	0,267	0,237	0,266	0,269	0,239	0,241	0,178
2,23E-01	0,164	0,151	0,149	0,152	0,158	0,163	0,170	0,158	0,151	0,166	0,154	0,168	0,141
2,76E-01	0,129	0,135	0,133	0,136	0,130	0,134	0,133	0,129	0,134	0,137	0,134	0,133	0,116
3,03E-01	0,122	0,122	0,121	0,119	0,121	0,124	0,125	0,121	0,122	0,124	0,121	0,126	0,112
3,56E-01	0,107	0,108	0,106	0,110	0,106	0,107	0,110	0,111	0,107	0,106	0,107	0,108	0,103
3,84E-01	0,106	0,105	0,103	0,100	0,103	0,106	0,104	0,105	0,104	0,106	0,103	0,101	0,098

Tablo 6. Kütle Azaltma Katsayılarının Deneysel Sonuçlarının Standart Sapmaları ve Teorik Değerlere Göre Rölatif Farkları

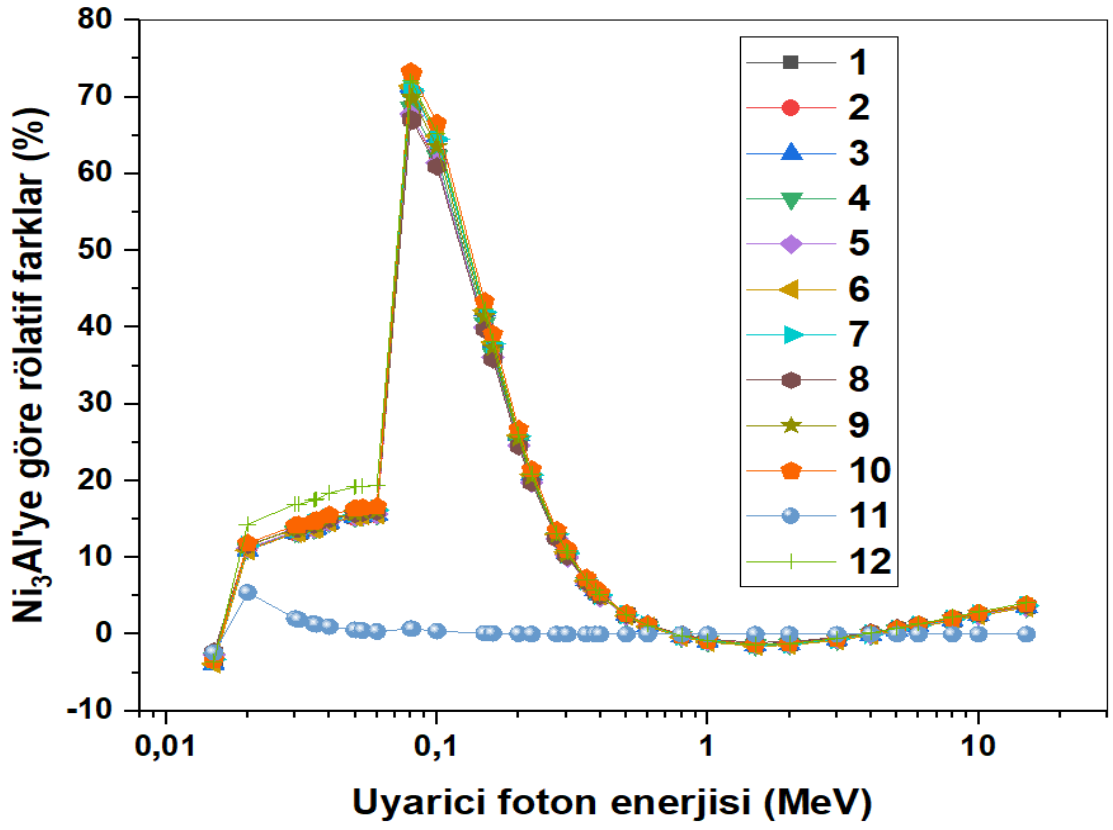
Enerji (MeV)	Standart Sapma x (10 ⁻¹)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5,32E-02	1,998	1,916	1,917	2,019	1,978	1,978	2,008	1,944	1,985	1,975	1,952	2,085	1,660
8,10E-02	0,976	0,960	1,023	0,976	0,980	1,012	1,011	0,987	1,014	1,044	0,991	1,006	0,573
1,61E-01	0,227	0,220	0,231	0,231	0,232	0,251	0,251	0,223	0,250	0,253	0,225	0,227	0,167
2,23E-01	0,154	0,142	0,140	0,143	0,149	0,153	0,160	0,149	0,142	0,156	0,145	0,158	0,133
2,76E-01	0,121	0,127	0,125	0,128	0,122	0,126	0,125	0,121	0,126	0,129	0,126	0,125	0,109
3,03E-01	0,115	0,115	0,114	0,112	0,114	0,117	0,118	0,114	0,115	0,117	0,114	0,118	0,105
3,56E-01	0,101	0,102	0,100	0,103	0,100	0,101	0,103	0,104	0,101	0,100	0,101	0,102	0,097
3,84E-01	0,100	0,099	0,097	0,094	0,097	0,100	0,098	0,099	0,098	0,100	0,097	0,095	0,092
Rölatif farklar (%): 100x(Den.-Teo.)/Den.													
5,32E-02	0,954	4,956	4,956	-0,047	1,954	1,954	0,954	3,955	1,955	2,955	3,956	-0,045	4,949
8,10E-02	3,911	4,912	0,910	3,911	2,910	1,911	1,911	1,908	0,909	-0,090	2,911	2,912	4,852
1,61E-01	8,654	10,661	7,654	6,647	5,642	-0,376	-0,376	9,656	-0,378	-0,373	9,659	9,662	7,523
2,23E-01	2,422	9,462	11,479	9,463	5,438	3,431	-0,593	5,438	10,471	2,428	8,459	0,414	-0,716
2,76E-01	4,297	0,266	2,285	-0,741	3,288	1,277	2,285	4,296	1,276	-0,734	1,276	2,285	3,199
3,03E-01	2,223	2,222	3,233	4,238	3,230	1,217	0,209	3,230	2,224	1,220	3,232	-0,798	1,135
3,56E-01	3,130	2,120	4,140	0,101	4,137	3,130	0,104	-0,907	3,131	4,143	3,131	2,123	0,041
3,84E-01	-0,955	0,053	2,074	4,091	1,062	-0,955	1,065	0,054	1,065	-0,952	2,074	4,094	1,011



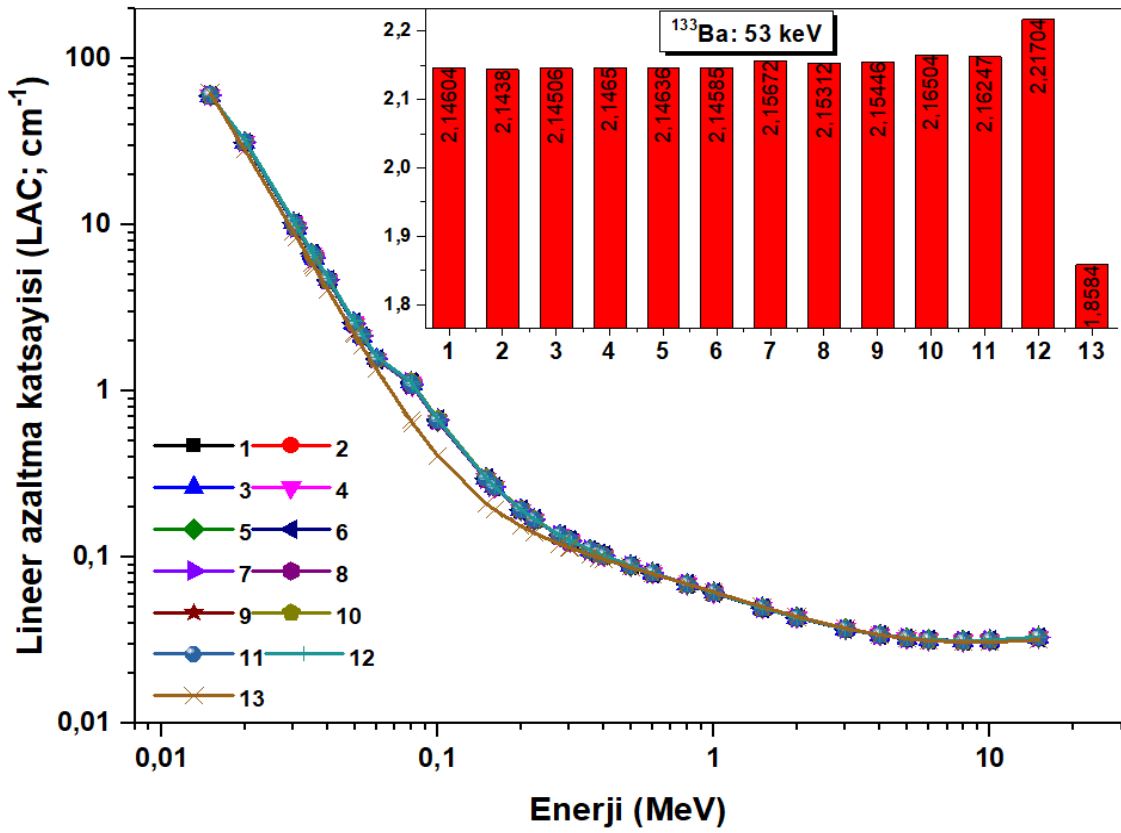
Şekil 52. Deneysel ve teorik MAC değerleri arasındaki rölatif farklar



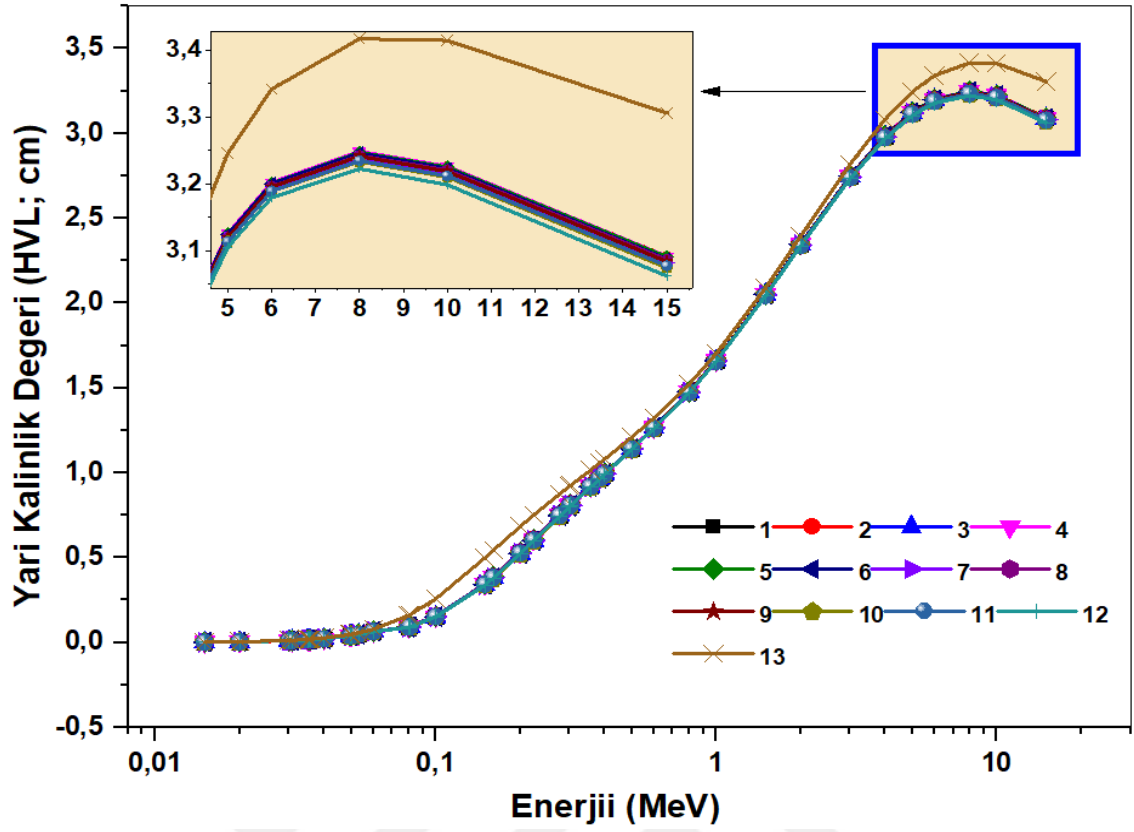
Şekil 53. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayılarının değişimi



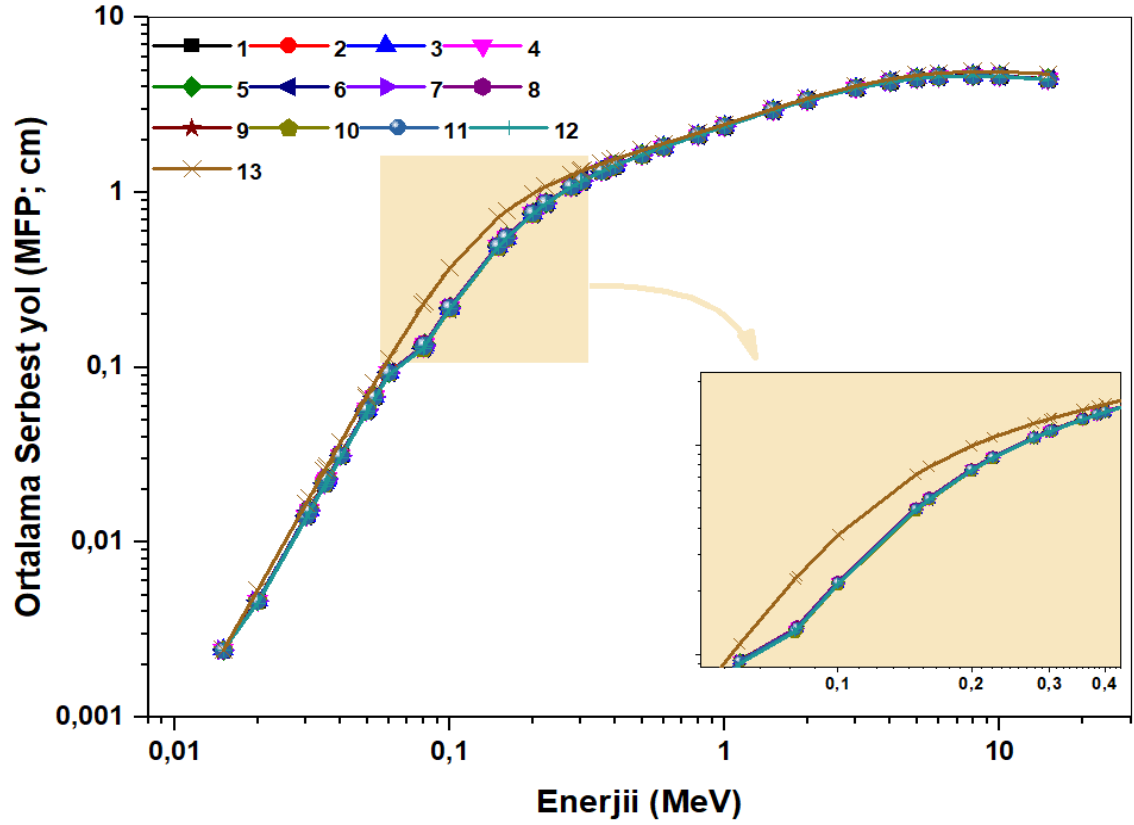
Şekil 54. Üretilen alaşımların MAC değerlerinin Ni₃Al'ye göre rölatif farkları



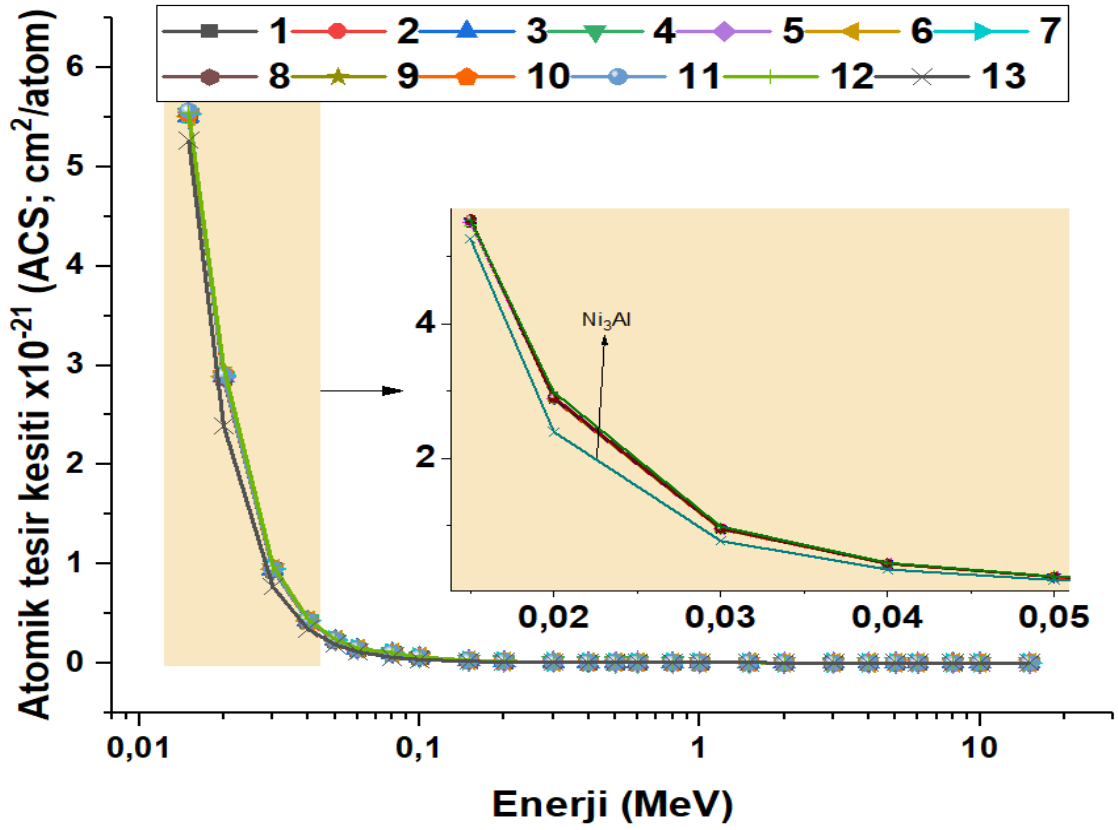
Şekil 55. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında lineer azaltma katsayılarının değışimi



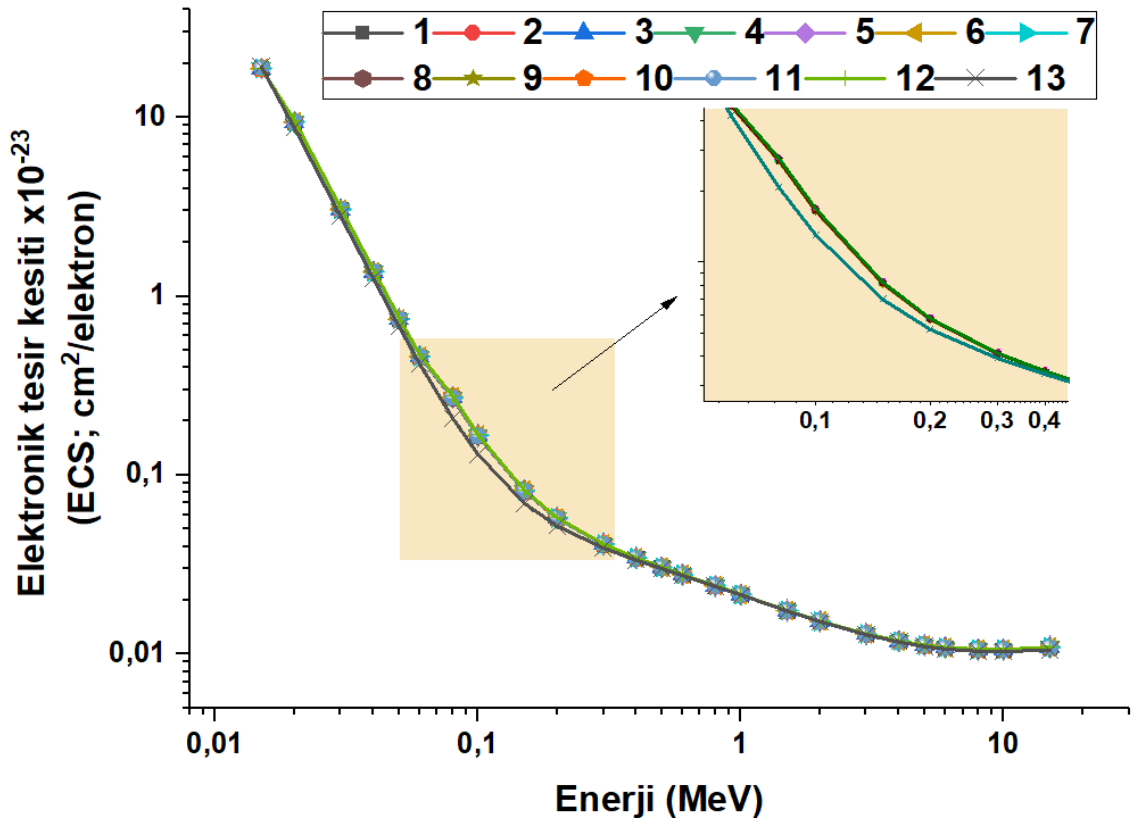
Şekil 56. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında yarı değer kalınlıklarının değişimi



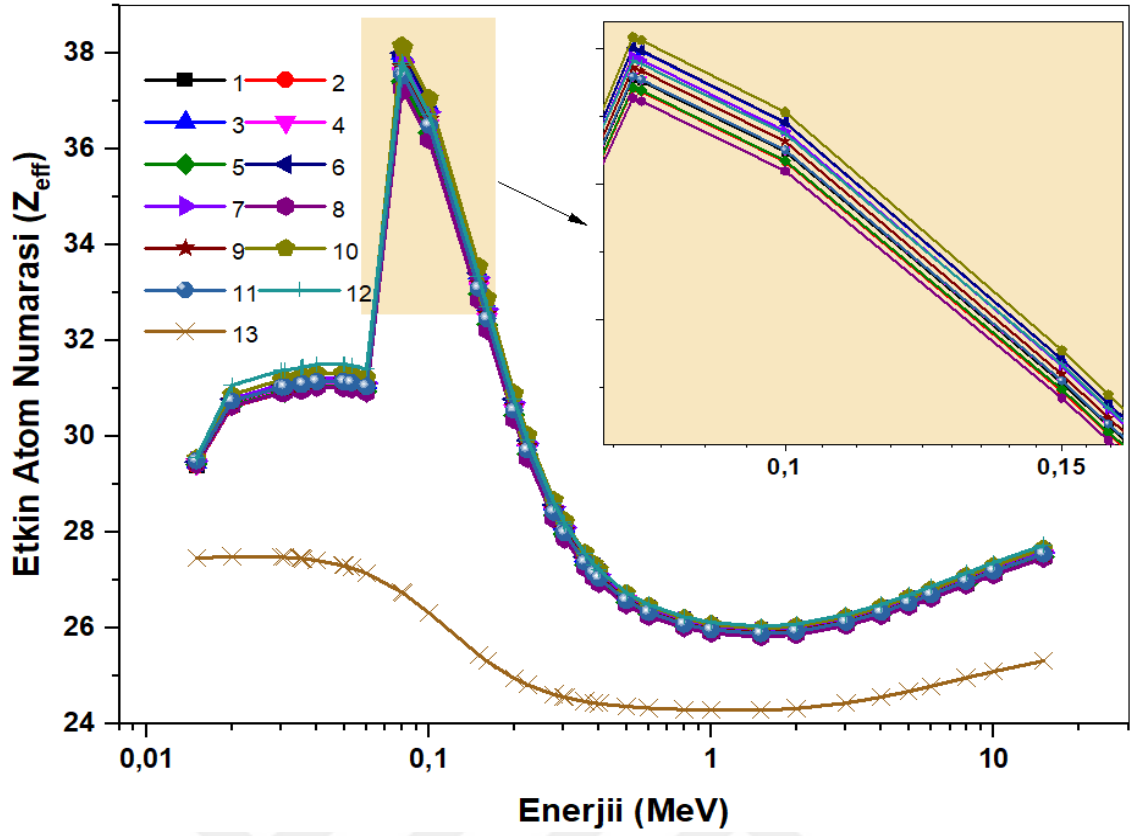
Şekil 57. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında ortalama serbest yol değerlerinin değişimi



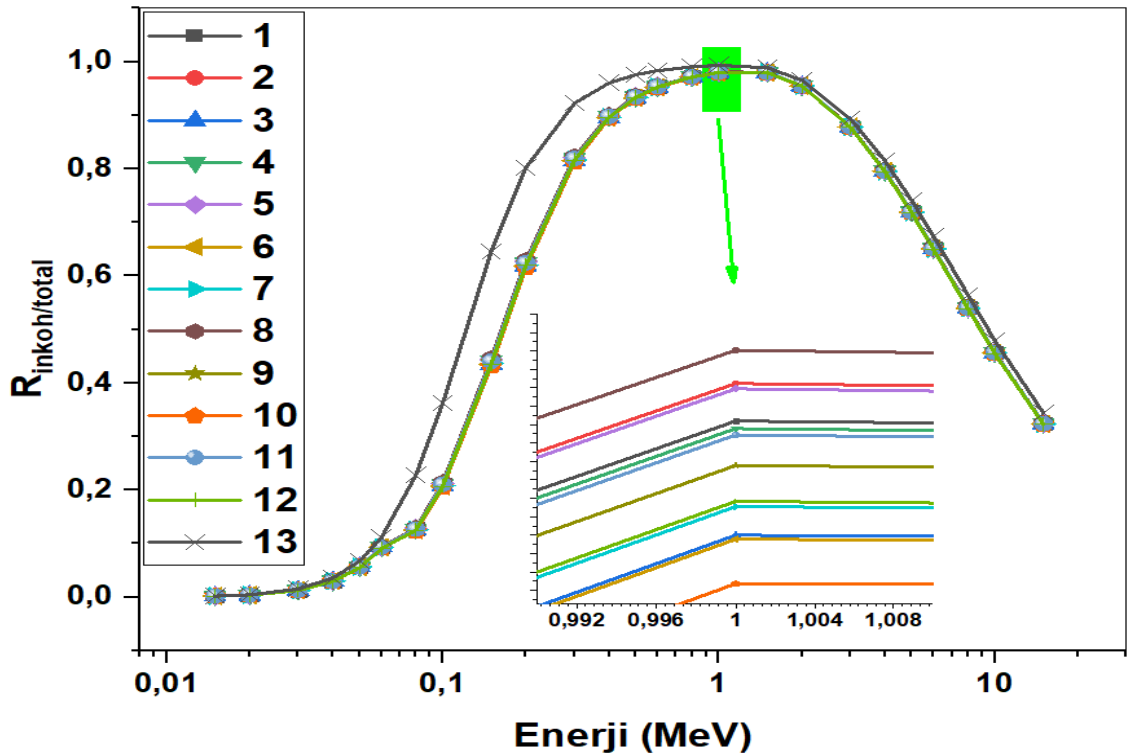
Şekil 58. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında atomik tesir kesitlerin değişimi



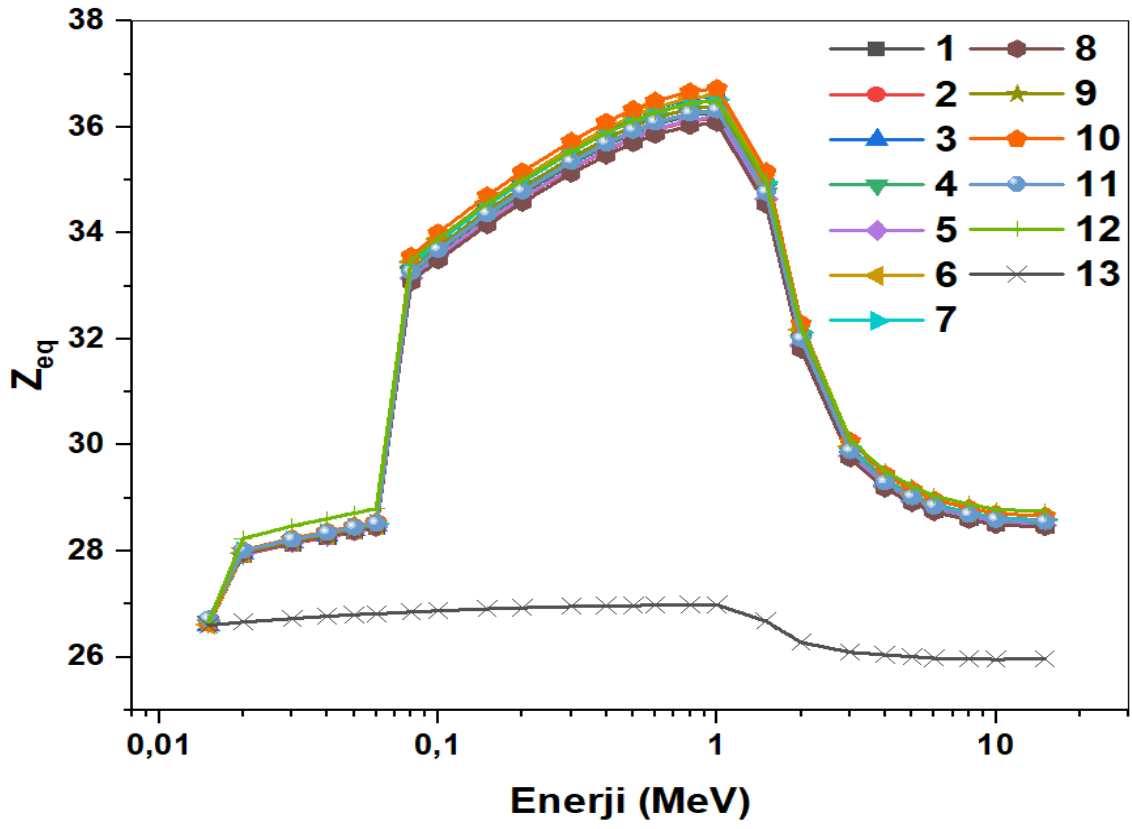
Şekil 59. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında elektronik tesir kesitlerinin değişimi



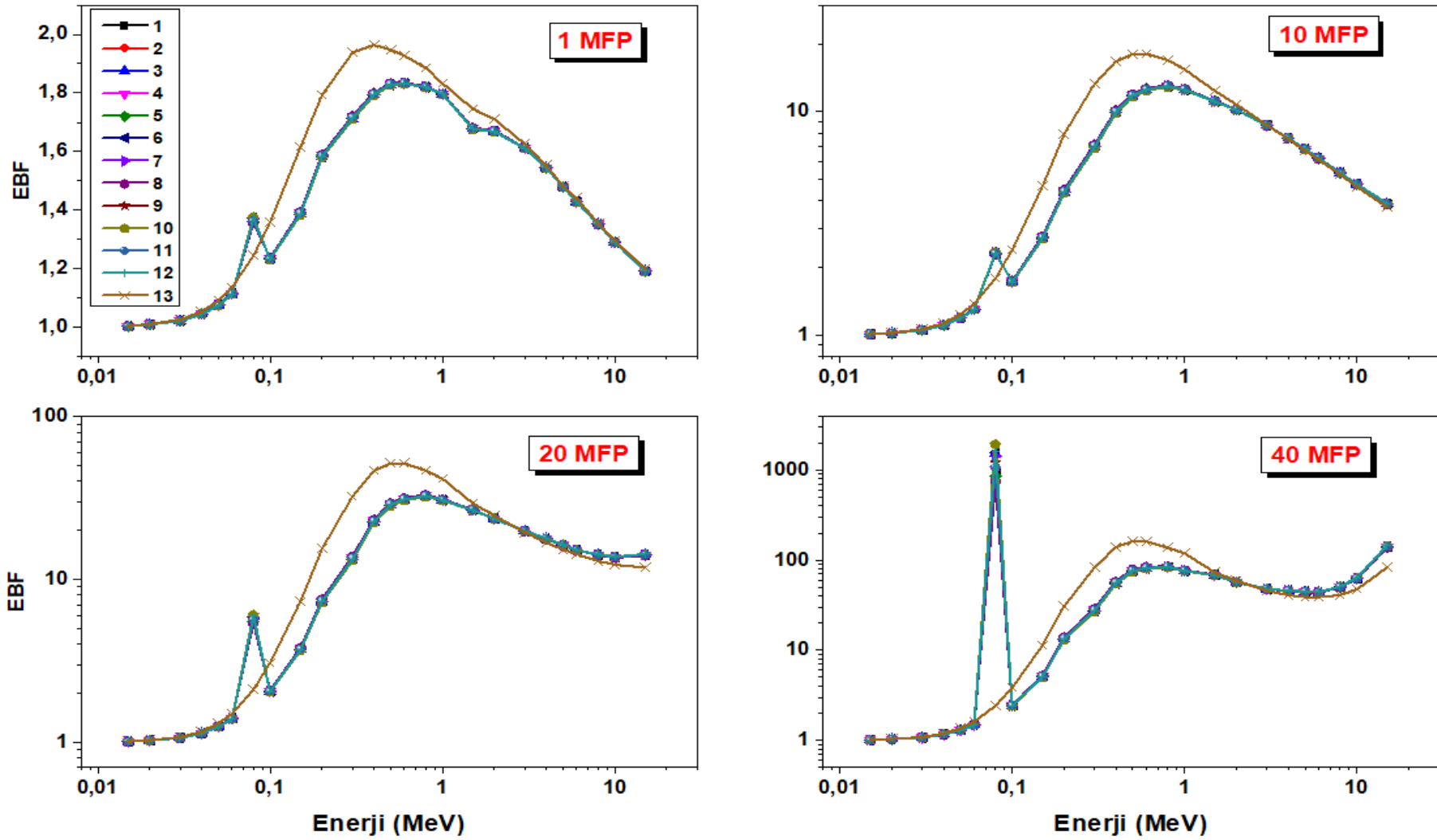
Şekil 60. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında etkin atom numarasının değişimi



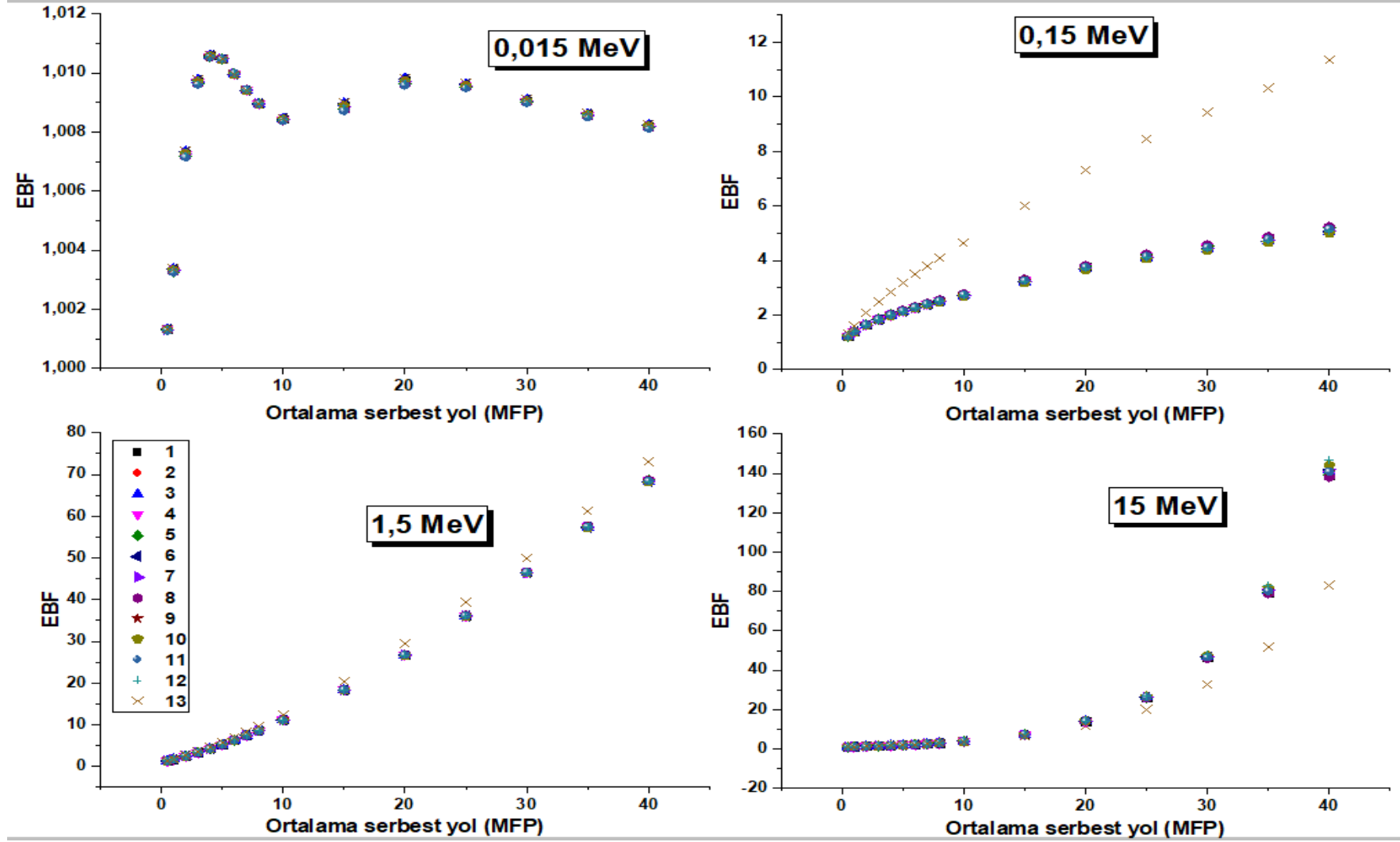
Şekil 61. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında Rinc/Rtot değişimi



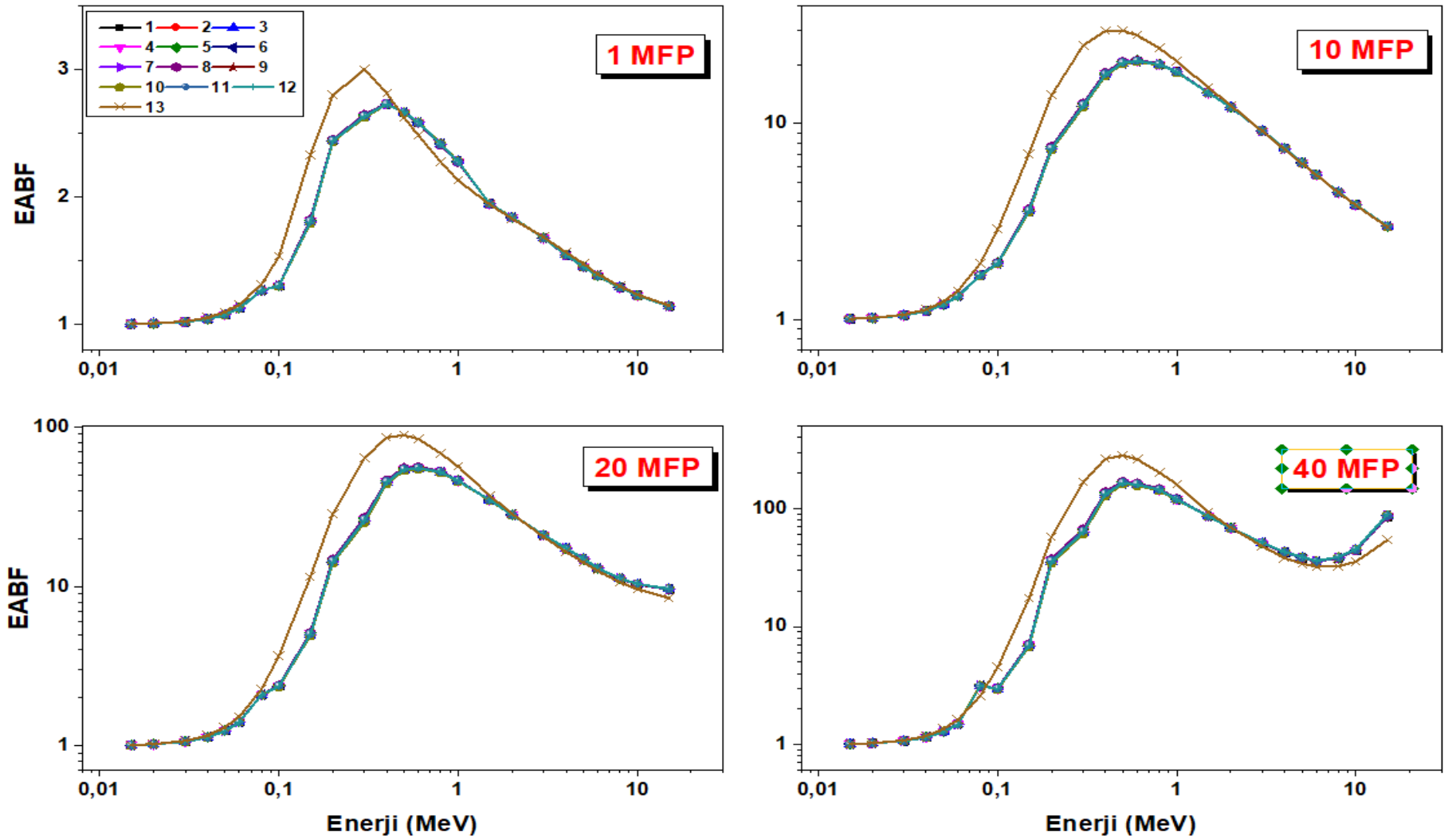
Şekil 62. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında eşlenik atom numaralarının değişimi



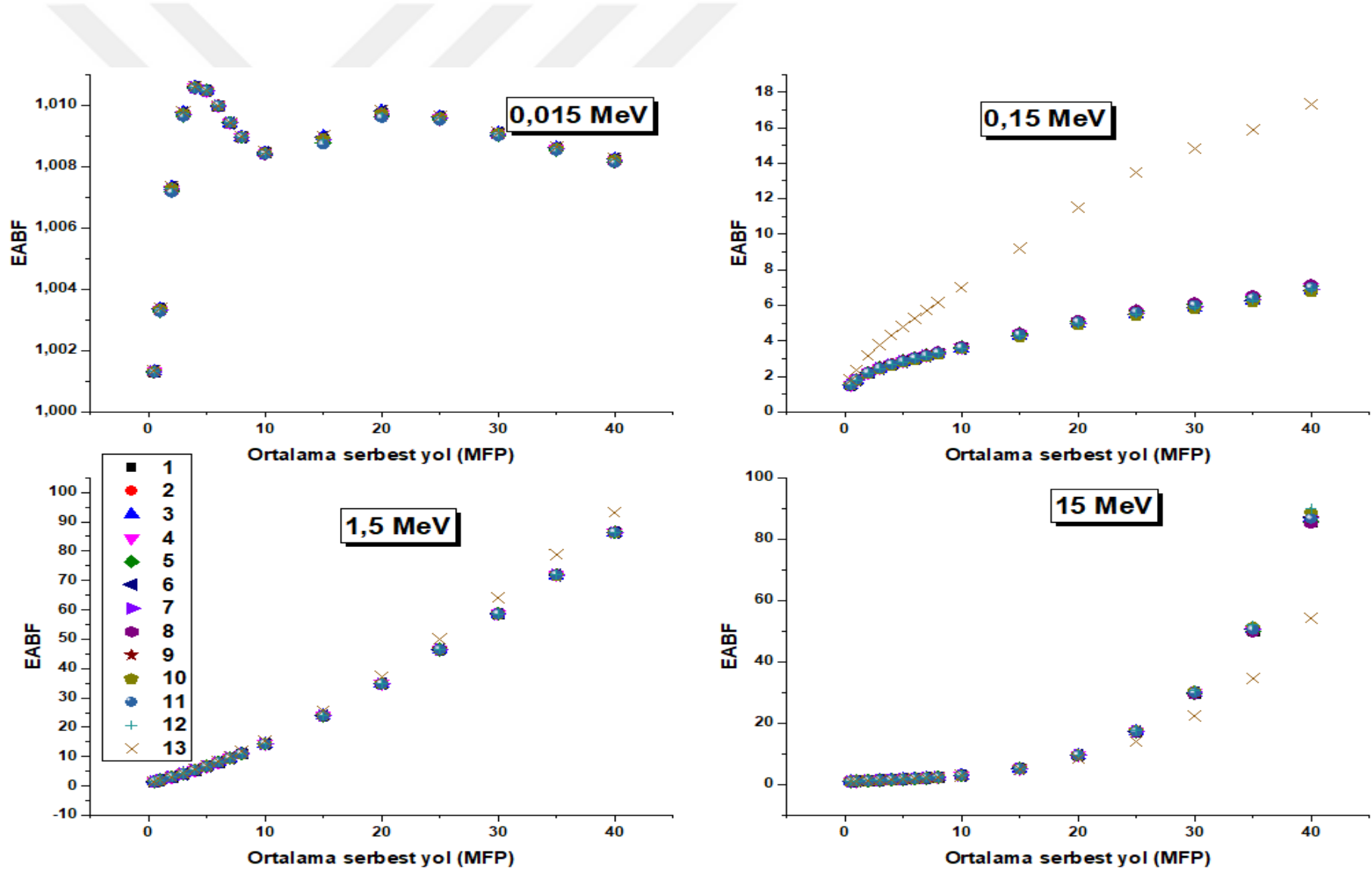
Şekil 63. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında EBF değerlerinin değişimi a) 1 MFP b) 10 MFP c) 20 MFP d) 40 MFP



Şekil 64. Farklı penetrasyon derinliklerinde EBF değerlerinin değişimi a) 0,015 MeV b) 0,15 MeV c) 1,5 MeV d) 15 MeV



Şekil 65. 15 keV- 15 MeV enerji aralığında EABF değerlerinin değişimi a) 1 MFP b) 10 MFP c) 20 MFP d) 40 MFP



Şekil 66. Farklı penetrasyon derinliklerinde EABF değerlerinin değişimi a) 0,015 MeV b) 0,15 MeV c) 1,5 MeV d) 15 MeV

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, çeşitli iyi tribolojik özelliklere sahip olabileceği simülasyon programları tarafından önerilen Ni_3Al tabanlı alaşımlar üretilmiştir. Çalışmada üretilen alaşımların kristalografik yapıda olup olmadıklarının belirlenmesi amacıyla elde edilen XRD profilleri Şekil 25-37 arasında verilmiştir. Şekil 25’de saf Ni_3Al alaşımının XRD spektrumu sunulmuştur. Bu spektrumdan, üretilen Ni_3Al alaşımının XRD düzlemlerinin, Q. Zhu *et al.* (2015) tarafından raporlanan piklerle oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Spektrum üzerinde mavi renkle işaretlenmiş olan pikler Ni_3Al yapısına ait (100), (110), (111), (200) ve (220) düzlemlerine ait olan karakteristik piklerdir. Bu piklere ek olarak, yapıda NiO ve AlNi’ye ait bazı pikler mevcuttur. Bu durum, yapıda en yüksek kütlece yüzeye sahip olan Ni atomlarından bazılarının Al ile istenilen bağlanmayı yapamayarak, oksitli bir bileşik olan NiO bileşiğinin oluşmasına neden olmuştur. Ancak bu piklerin şiddetleri oldukça düşüktür dolayısıyla üretilen alaşımın genel olarak Ni_3Al yapısına sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca verilen spektrum üzerinde çok sayıda düzleme ait pikin bulunması, bu alaşımın polikristal yapıda olduğunu göstermektedir.

Şekil 26’da $Al_{9.5}Cr_{16}Nb_1Mo_1W_1Ni_{28.5}$ alaşımının XRD spektrumu verilmiştir. Bu spektrum, ağır metal katkılanmasıyla birlikte yapının XRD profilinin açıkça değiştiğini ortaya koymaktadır. Grafikten, yapıya Cr (yaklaşık %26) ilavesiyle birlikte Cr_2O_3 bileşiğinin oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte, Ni_3Al ’ye ait en baskın pik olan (111) düzlemine ait pik şiddetinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Saf Ni_3Al alaşımında Ni elementinin kütlece yüzdesi %87 düzeylerinde iken, bu alaşımda bu değer %53 düzeylerine düşmektedir. Buna ek olarak Al yüzdesi de %13’lerden %8 düzeylerine düşmüştür. Bu iki ana elementin alaşım içerisinde azalan kütlece yüzdelerinden dolayı Ni_3Al ’ye ait pik şiddetleri önemli ölçüde azalmıştır. Yapıya katılan Nb, Mo ve W elementlerinin kütlece yüzdelerinin %3-5 aralığında olması, bu elementlere ait herhangi pikin oluşmamasına neden olmuştur. Şekil 27 ile 37 arasındaki XRD profilleri bir arada incelendiğinde, üretilen tüm alaşımların polikristal yapıda oldukları ve pik yönelimlerinin katkılanmaya bağlı olarak önemli düzeyde değişmediği görülebilir. Üretilen tüm ağır metal katkılı alaşımlarda, Ni_3Al ’ye ait piklerin şiddetleri önemli ölçüde azalmıştır. Üretilen alaşımların vakum ortamında üretilmemesi ve kademeli soğutmaya tabi tutulması esnasında, atmosferde bulunan oksijen yapı içine girerek, henüz tam bağlanma yapmamış metaller oksitli bileşikler oluşturmuştur. Bu oluşumlar esasen çok istenen bir durum olmamasına rağmen, vakum ortamında bu alaşım kompozisyonlarının üretilmesi ile ortadan

kaldırılabilir. Böylesine bir durumda, üretilen alaşımların sadece yüzeylerinde oksitlenme sözkonusu olabilir. Verilen XRD spektrumlarından, üretilen alaşımların gamma double prime fazına sahip oldukları söylenebilir. Ayrıca Şekil 38’de verilen karşılaştırmalı XRD spektrumlarından da, üretilen tüm alaşımların benzer kristalografik yapılara sahip oldukları ve ağır metal katkılanması durumunda, Ni_3Al ’nin düzlemlerine ait karakteristik piklerin şiddetlerinin belirgin ölçüde azaldığı görülmektedir. $Al_{10.5}Cr_{14}Nb_1Mo_1W_1Ni_{31.5}$ bileşimli ve 8 kodlu alaşımın hem Şekil 33’te hem de Şekil 38’de verilen spektrumu incelendiğinde, en iyi kristallenmenin bu alaşımda olduğu söylenebilir. Çünkü bu alaşımın XRD spektrumunda, $AlNi$, NiO ve Cr_2O_3 bileşiklerine ait pik şiddetleri önemli ölçüde azalmıştır. Dolayısıyla, bu alaşımların tek kristal alaşım olarak sentezlenmesinin planlanmasında bu kompozisyon değeri öncelikli olarak dikkate alınabilir.

Üretilen alaşımların yüzey morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 39 ile 51 arasında verilmiştir. Bu şekillerin sağ kısımlarında bulunan görüntüler yüzeyin daha genel bir görüntüsünü veren 1 mikronluk skalada iken, sol taraftaki görüntüler 200 nm’lik skalada alınan görüntülerdir. Şekil 51’de Ni_3Al için verilen SEM görüntüsünden, Ni_3Al yapısının yüzeyde oldukça homojen bir dağılıma sahip olduğu 1 mikronluk görüntüden görülebilir. Yapıda herhangi bir boşluğun oluşmaması ve alaşımın belirli bir bölgede toplanmaması, numune üretiminde yapılan karıştırma işleminin yeterli homojenizasyonu sağladığının bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca yapının benzer geometrik şekillere ve hemen hemen eşit grain bölgelerine sahip olması da bu durumu desteklemektedir. Verilen SEM görüntüsü, Ni_3Al alaşımının polikristal yapıda olduğunu desteklemektedir. Ağır metal katkılanmasıyla elde edilen alaşımların SEM görüntüleri Şekil 39 ile Şekil 50 arasında verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde ilk olarak alaşımların yüzey morfolojilerinin oldukça homojen olduğu görülebilir. Bununla birlikte, alaşımları oluşturan element içeriklerinin oldukça yakın değerlerde olması benzer yapıların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu durum, alaşımların üretilmesinde kullanılan sinterleme yönteminin sistematik bir şekilde uygulandığının kanıtı olarak düşünülebilir. Ayrıca, yüzeyde toplanmaların olmaması katkılanma yapılan metallerin de kristal yapı içinde yer aldığı bir göstergesidir. Kübik yapılara düşük düzeyde yapılan metal katkılanma işlemlerinde, metal atomları genel olarak kübik yapının köşe noktalarına yerleşme eğilimindedir. Bu da, kübik yapıda eşit olan a,b ve c örgü sabitlerinin farklılaşmasına yani yapının dikdörtgen prizma şekline dönüşmesine neden olmaktadır. Ayrıca katkılanma düzeyi çok düşük olduğunda, yapı, katkılanan metalin atomik yarıçapına bağlı olarak dışarı doğru veya içeri doğru bir bükülmeye sahip olabilir. Ağır metal katkılanması durumunda, artan atomik yarıçaptan ötürü kristaller dışarı doğru bükülme yaparlar. Bu durum esasen gamma double prime fazının varlığıdır. Ni_3Al tabanlı alaşımlara,

ağır metal katkılanmasıyla elde edilen alaşımların SEM görüntülerinde, yüzeyden dışarı doğru yönelen üçgen piramit şeklinde yapılar görülmektedir. Bu durum gamma double prime fazının varlığının bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, yüzeyde oluşan üçgen piramit şeklindeki yapıların hem taban alanları hem de vadi derinlikleri farklılıklar teşkil etmektedir. Bu farklılığın, kullanılan metal tozlarının parçacık büyüklüklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nano düzeyde parçacık büyüklüğüne sahip metal tozlarının kullanılmasıyla, bu farklılıklar minimize edilebilir. Ayrıca, alaşım üretiminde yönlü katılma sisteminin kullanılabilmesi durumunda, bu alaşımların tek kristal olarak üretilebilmeleri mümkün olabilir.

Bu tez kapsamında, üretilen Ni₃Al tabanlı 13 farklı alaşımın dar ışın geometrisi kullanılarak elde edilen gama-ışını soğurma parametrelerine ait sonuçlar takip eden bölümde sunulmuştur. ¹³³Ba radyoaktif kaynağından yayınlanan 53, 81, 160, 223, 276, 302, 356 ve 383 keV foton enerjisinde elde edilen deneysel ve Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak elde edilen teorik kütle azaltma katsayılarının nümerik değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 6'da ise deneysel değerlerin hata değerleri ve rölatif farkları verilmiştir. Bu tablolardan ilk olarak, deneysel ve teorik verilerin oldukça uyumlu oldukları açıkça görülebilir. Deneysel ve teorik sonuçların yüksek derecede uyumlu olmaları, numune üretim aşamasının doğru bir şekilde yapıldığının, yoğunlukların ve kalınlıkların doğru ölçüldüğünün ve gama-ışını deneylerinin doğru bir şekilde yapıldığının açık bir kanıtıdır. Ayrıca Tablo 6'da verilen deneysel sonuçların hata değerlerinin de çok küçük olması, bu deneylerin başarılı bir şekilde yapıldığının bir kanıtı olarak gösterilebilir. Tablo 6'da verilen rölatif fark değerlerinin enerjiye bağlı değişimi Şekil 52'de gösterilmiştir. Bu şekilden, 53 ve 81 keV foton enerjilerinde rölatif farklılıkların maksimum %5 düzeyinde olduğu ve 276, 302, 356 ve 383 keV foton enerjilerinde ise maksimum% 4,5 düzeyinde olduğu açıktır. Bu grafikte en yüksek rölatif fark değerleri 160 ve 223 keV'lik fotonlarda yaklaşık % 11 olarak elde edilmiştir. 160 ve 223 keV'lik fotonlar, ¹³³Ba kaynağından en düşük yayınlanma ihtimaliyeti ile yayınlanan fotonlardır. Dolayısıyla aynı deney süresi içerisinde, 53 veya 81 keV gibi yüksek yayınlanma ihtimaliyetli fotonların aksine, bu enerjilerde çok düşük sayımlar elde edilmektedir. Bu durumda, bu iki foton enerjisi için yeterli istatistiğin oluşmamasına ve MAC değerlerinin teorik değerlerden farklı elde edilmesine neden olmuştur. Deneylerde 53 ile 383 keV arasında 8 farklı foton enerjisinde inceleme yapılmasına rağmen, daha geniş bir enerji aralığında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmesi için, foton soğurma parametreleri 15 keV ile 15 MeV enerji aralığında sunulmuştur. Üretilen alaşımların kütle azaltma katsayılarının bu enerji aralığındaki değişim eğrileri Şekil 53'de gösterilmiştir. Grafikten ilk olarak, artan foton enerjisine paralel olarak, kütle azaltma katsayılarının incelenen tüm numunelerde azaldığı açıkça görülebilir. Buna karşın, ağır metal katkılı 1-12 kodlu alaşımlarda, bazı foton enerjilerinde, MAC değerlerinin

değişim eğrisinde farklılaşma söz konusudur. Bu farklılaşmanın sebebi, bu alaşımlarda yapıya katkılanan W, Nb ve Mo metallere varlığıdır. Bilinmektedir ki, herhangi bir malzemenin soğurma kıyısına karşılık gelen foton enerjilerinde, soğurma tesir kesiti ani yükselmeler gösterir. Bu durum, Şekil 53'te ani bir yükselmeden ziyade, değişim eğrisinin farklılaşması olarak göze çarpmaktadır. Bu alaşımlardaki katkılanan ağır metallerin düşük kütlece yüzdeleri bu durumun ana nedenidir. Bu grafikten ayrıca, fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde, incelenen alaşımların MAC değerlerinin neredeyse eksponansiyel bir azalışa sahip oldukları açıktır. Bu enerji bölgesinde fotoelektrik soğrulma tesir kesiti $Z^{4.5}/E^{3.5}$ ile değiştiğinden, artan enerjiyle birlikte, tüm numunelerin MAC değerleri azalmaktadır. Bununla birlikte, fotoelektrik soğrulma bölgesinde, herhangi bir enerji değerinde, Ni₃Al alaşımına ağır metal katkılanmasının, bu alaşımın soğurma kapasitesini artırdığı rahatlıkla söylenebilir. Nitekim Şekil 54'te Ni₃Al'ye göre verilen rölatif fark grafiğinde, özellikle düşük enerji bölgesinde, ağır metal katkılı alaşımların %80'lere varan bir gelişim gösterdiği görülebilir. Yaklaşık 60 keV foton enerjisinden sonra meydana gelen ani yükselme, yapıda bulunan elementlerin soğurma kıyılarından kaynaklanmaktadır. Artan enerjiyle birlikte, MAC değerlerinin aralarındaki farkların giderek azaldığı hem Şekil 53'ten hem de Şekil 54'ten görülebilir. Yaklaşık 0,5 MeV foton enerji değerinden sonra, bu farklılıklar neredeyse sıfıra düşmektedir. Bu durumun sebebi, artan enerjiyle birlikte baskınlığı artan Compton saçılmasıdır. Compton saçılması 15 keV -15 MeV enerji aralığının neredeyse orta enerji bölgelerini temsil eder. Bu olayda, fotonlar soğrulmak yerine saçılmaya daha fazla maruz kalırlar. Bu nedenle, orta enerji bölgesinde, soğurma tesir kesiti minimum seviyelere düşer. Ayrıca, her iki grafikten de görüldüğü üzere, kimyasal kompozisyon, bu enerji aralığında neredeyse önemini kaybetmiştir. Bu durum literatürde daha önce de izah edilen sonuçlarla uyum içerisindedir (Akbaba *et al.* 2022; Bünyamin Alım *et al.* 2020; Şakar *et al.* 2021). Compton saçılma bölgesinde, etkileşim tesir kesiti ZE^{-1} ile değişmektedir. Bu nedenle bu bölgede de artan enerjiyle birlikte malzemelerin MAC değerleri düşüş göstermektedir. Bu düşüş yaklaşık 3,5 MeV foton enerjisine kadar devam etmiştir. Bir diğer temel foton madde etkileşim parametresi olan çift oluşumu olayı, her ne kadar 1,02 MeV'lik eşik enerjiye sahip olsa da, bu olayın baskınlığı 2-3 MeV enerjisinden sonra başlar. Çift oluşumunun etkileşim tesir kesiti $Z^2 \ln(E)$ ile değişmektedir. Bu tesir kesitine göre, artan enerjiyle, çift oluşumu ihtimaliyetinin artması, Compton saçılma bölgesinde minimum seviyeye düşen, foton soğrulma ihtimaliyetinin, tekrar rölatif bir artış göstermesine neden olur. Nitekim Hem Şekil 53 hem de Şekil 54'ten yaklaşık 3 MeV enerji değerinden sonra MAC değerlerinin rölatif bir artışa sahip olduğu görülebilir. Bu bölgedeki fotonlar, aynı malzeme türü için Compton saçılma bölgesine göre, daha fazla foton-madde etkileşimi yaparak daha fazla soğrulurlar. Şekil 53'te ayrıca, Bashter (1997) tarafından,

zırhlama uygulamalarında kullanılabileceği raporlanan 3 farklı önemli beton türünün (OC, SS ve SM) teorik zırhlama kapasitelerinin değişimleri de, anlamlı bir karşılaştırma yapılabilmesi için verilmiştir. Bu betonlar ve üretilen alaşımlar arasında yapılan değerlendirmeye göre, Ni₃Al dahil tüm üretilen alaşımların bu betonlardan çok daha yüksek MAC değerlerine sahip oldukları bu şekilde görülebilir. Örneğin 0,08 MeV foton enerjisinden, üretilen ağır metal katkılı alaşımların ortalama MAC değeri 1,122 cm²/g iken, bu değer, Ni₃Al alaşımı ve OC, SS ve SM betonları için sırasıyla 0,660, 0,020, 0,446, 0,502 cm²/g olarak elde edilmiştir. Şekil 53'ten üretilen ağır metal katkılı alaşımların tüm foton enerjisi boyunca benzer zırhlama karakteristiği gösterdiği de açıktır. Tablo 4'te içerikleri verilen alaşım kompozisyonları incelendiğinde, tüm alaşımların benzer element konsantrasyonlarına ve yoğunluğa sahip oldukları belirtilmişti. Bu nedenle, bu alaşımların zırhlama kapasiteleri beklendiği üzere birbirlerine yakın çıkmıştır.

Üretilen alaşımların birim uzunluk başına foton azaltma yeteneklerini belirleyen lineer azaltma katsayılarının (LAC) uyarıcı foton enerjisine bağlı değişimleri Şekil 55'te gösterilmiştir. Herhangi bir malzemenin LAC değeri, MAC ile malzeme yoğunluğunun çarpımı olduğundan, değişim eğrilerinin benzer olması gereklidir. Bu durum verilen şekilde açıkça görülmektedir. Ayrıca bu parametrenin, yarı değer kalınlığı, dörtte bir değer kalınlığı, onda bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol gibi temel parametrelerin hesaplanmasında kullanılmasından dolayı, değişiminin gösterilmesi önemlidir. Verilen şekilde, LAC değerlerinin 15 keV – 15 MeV enerji aralığında, yaklaşık 415 cm⁻¹ düzeyinden 0.200 cm⁻¹ düzeyine düştüğü görülmektedir. Artan enerjiye paralel olarak, fotonların azalan dalga boyları, hedef maddenin elektronları ile etkileşime girme olasılığını azalttığından, fotonlar malzeme içinde daha uzun yollar alabilirler ve soğrulma ihtimaliyetleri azalır. Bu durum MAC değerlerinin dolayısıyla da LAC değerlerinin azalmasına neden olur. Şekil 55'in iç grafiğinde, ¹³³Ba kaynağından yayınlanan 53 keV enerjili fotonlar için elde edilen LAC değerlerinin sütun grafiği verilmiştir. Bu grafik açıkça ağır metal katkılımasıyla LAC değerlerinin önemli bir artış gösterdiğini belirtmektedir. Nitekim bu enerji değerinde Ni₃Al alaşımının LAC değeri 1,858 cm⁻¹ iken Al_{9,5}Cr_{14,5}Nb₁Mo_{1,5}W₁Ni_{28,5} alaşımının (12 kodlu) LAC değeri 2.217 cm⁻¹ olarak elde edilmiştir. 12 kodlu alaşım içerisinde yer alan, Cr, Nb, W ve Mo elementlerinin yüksek atom numaraları, bu alaşımın aynı kalınlıktaki Ni₃Al'ye göre daha fazla foton soğurmasına neden olmaktadır. Benzer durum 1-11 kodlu diğer alaşımlarda da geçerlidir ve bu alaşımların tümü Ni₃Al'ye göre daha iyi foton soğurma kapasitesine sahiptirler.

Soğurucu bir malzemenin, herhangi bir foton enerjisinde gelen foton akısını yarıya indirmesi için gerekli olan malzeme kalınlığını belirten yarı değer kalınlığı (HVL), maliyet ve hacim hesaplamalarında pratik bilgiler sunmaktadır. Bu parametre LAC değeriyle ters orantılı

olduğundan, artan foton enerjisiyle birlikte artmalıdır. Nitekim Şekil 56'da verilen HVL değişim eğrisinde, artan foton enerjisiyle birlikte HVL değerleri de genel olarak artış göstermiştir. İncelenen alaşımlarda, 0,04 MeV foton enerjisine kadar fotonların düşük penetrasyon yeteneklerinden dolayı, HVL değerleri sıfıra çok yakın değerler almıştır. Bu enerji değerinden sonra HVL değerleri hızlı bir artış göstererek 8 MeV foton enerjisinde 3,2-3,4 cm düzeyine kadar yükselmiştir. Bu enerji değerinden sonra artan çift oluşumu ihtimaliyetine paralel olarak HVL değerleri kısmi bir azalış göstermişlerdir. İncelenen tüm enerji aralığı boyunca, Ni₃Al alaşımı, diğer ağır metal katkılı alaşımlara göre daha büyük HVL değerlerine sahiptir. Bu da aynı foton enerjisindeki foton akısını (şiddetini) yarıya indirmek için gerekli olan kalınlığın Ni₃Al alaşımında daha fazla olduğunu ifade etmektedir. Şekil 56'nın iç grafiğinde verilen genişletilmiş gösterimde 5-15 MeV enerji aralığındaki HVL değişimleri daha açık bir şekilde sunulmuştur. Bu grafikten, 8 MeV'lik fotonların akısını yarıya indirmek için Ni₃Al alaşımı 3,4 cm malzeme kalınlığı gerektiriyorken, diğer alaşımlar yaklaşık 3,2 cm'lik bir malzeme kalınlığı gerektirir. Bu da üretilen katkılı alaşımların yaklaşık %6 düzeyinde daha az kalınlıkta Ni₃Al'ye eşdeğer bir soğurma performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Yarı değer kalınlığı gibi ortalama serbest yol parametresi (MFP) de artan enerjiyle artış göstermektedir. Bu parametre doğrudan LAC değerinin matematiksel tersinden elde edilmektedir. Bu nedenle LAC değişiminin tam tersi bir değişim eğrisine sahip olmalıdır. Foton soğurma olaylarında, ardışık başarılı iki etkileşim arasında alınan yolu temsil eden ve aslında bir ortalama değer olan MFP değerinin düşük olması, iyi soğurucu malzemelerde aranan özelliktir. Daha açık bir ifadeyle, düşük MFP'li malzemelerde, fotonlar daha kısa mesafelerde başarılı etkileşimler yaparlar. Şekil 57'de verilen ortalama serbest yol- enerji grafiğinde, HVL değerlerinde olduğu gibi artan enerjiyle birlikte MFP değerleri de belirgin bir artış göstermiştir. Ağır metal katkılı 1-12 kodlu numunelerle Ni₃Al alaşımı, ağır metal katkılı alaşımların soğurma kıyılarına karşılık gelen enerjiler haricinde neredeyse tüm enerji aralığı boyunca aynı değere sahiptir. Bu grafiğin genişletilmiş iç grafiğinde Ni₃Al alaşımının diğer alaşımlardan belirgin şekilde daha büyük MFP değerlerine sahip olduğu bölge gösterilmiştir. Üretilen tüm alaşımlarda MFP değerleri 0,002 cm düzeyinden 3 cm düzeyine kadar artmıştır.

Atom ve elektron başına etkileşim tesir kesitlerini sunan ve birimleri cm²/atom ve cm²/elektron olan atomik ve elektronik tesir kesitlerinin uyarıcı foton enerjisine bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 58 ve 59'da verilmiştir. Bu grafiklerden açıkça, yüksek enerjili fotonların gerek atomlarla gerekse elektronlarla daha az etkileşme ihtimaliyetine sahip oldukları açıkça görülebilir. Yüksek enerjili fotonların küçük dalga boyları, atom ve elektronlar tarafından oluşturulan alanlarla daha az sayıda etkileşim yapmasına neden olmaktadır. Bu

fotonların düşük etkileşim ihtimaliyetleri, yapı içinde daha uzun yollar almalarına dolayısıyla daha zor soğrulmalarına neden olmaktadır. Buna ek olarak atomik ve elektronik tesir kesitlerinin hem malzemeyi oluşturan elementlerin türlerine hem de bu elementlerin molce yüzdelere doğrudan bağlılığından dolayı, kimyasal içerik, bu parametreler üzerinde çok belirleyici etkiye sahiptir. Üretilen alaşımların benzer mol yüzdelere sahip aynı türden atomlardan oluşmalarından dolayı ACS ve ECS değerleri tüm malzemelerde birbirlerine çok yakın elde edilmiştir. Her iki parametre de, fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde artan enerjiyle birlikte keskin bir düşüş göstermiştir. Ancak artan enerjiyle baskın hale gelen Compton saçılma bölgesinde, bu düşüş hızı oldukça yavaşlamıştır. Grafikler incelendiğinde, artan foton enerjisiyle, ACS değerlerinin $5,5 \times 10^{-21}$ cm²/atom düzeyinden $2,99 \times 10^{-24}$ cm²/atom düzeyine, ECS değerlerinin ise $1,8 \times 10^{-22}$ cm²/elektron düzeyinden $1,0 \times 10^{-25}$ cm²/elektron düzeyine düştüğü görülmektedir.

Atomik tesir kesitinin elektronik tesir kesitine oranlanmasından elde edilen ve etkin atom numarası olarak tanımlanan Z_{eff} , alaşım, cam, beton ve polimer gibi birden fazla elementin bir araya gelmesiyle oluşan kompleks bir malzemeyi tek bir atom numarasıyla temsil eden sanal bir sayıdır. Bu sayı, incelenen foton enerjisinde, kompleks malzemenin tümünün hangi atommuş gibi davranacağını belirttiğinden önem arz etmektedir. İçeriğinde ağır atom bolluğu fazla olan malzemelerin Z_{eff} değerleri genel olarak yüksek çıkar ve bu malzemeler X ve gama ışını gibi yüksek enerjili fotonları daha iyi soğururlar. Şekil 60'da Ni₃Al tabanlı 13 alaşımın Z_{eff} değerlerinin enerjiye bağlı değişimleri gösterilmiştir. Bu grafikten açıkça tüm alaşımların Z_{eff} değerlerinin enerjiye önemli düzeyde bağlılık gösterdiği görülebilir. Nitekim 13 kodlu Ni₃Al alaşımında, düşük foton enerjilerinde Z_{eff} değerleri yaklaşık 27,4 düzeyinde iken, artan enerjiyle bu değer 24,28 düzeyine kadar düşmektedir. Daha açık bir ifadeyle, Ni₃Al alaşımını 15 keV- 40 keV enerji aralığında atom numarası 27 olan Co elementinin soğurma karakteristiklerini yansıtıyorken, 300 keV – 2 MeV enerji aralığında ise atom numarası 24 olan Cr'nin karakteristik özelliğini yansıtmaktadır. Bilindiği üzere, Ni₃Al alaşımının Z_{eff} değeri Ni ve Al atomlarının atom numaraları arasındaki değerlere sahip olabilir.

Dar ışın geometrisinin olmadığı veya numune kalınlığının çok fazla olduğu durumlarda Beer-Lambert yasası geçerliliği kaybeder. Bu durumda, bu yasaya B ile temsil edilen foton çoğaltma veya literatürdeki adı ile Build-up faktörü olan terimin dahil edilmesi gerekir. Bu faktör EBF ve EABF olarak iki türdür. Bu parametrelerin detayları aşağıda verilecektir. Build-up faktörlerinin hesaplanmasında gerekli olan ilk parametre Rinkoh/total parametresidir. Bu değer, inkoherent (inelastik saçılma) saçılma tesir kesitinin toplam tesir kesitine oranını ifade eder. Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak elde edilen R değerlerinin enerjiye bağlı değişimleri

Şekil 61’de gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, R değerlerinin düşük enerji bölgesinde sıfıra çok yakın değerlere sahip olduğu, ancak artan enerjiyle gaussian eğrisine benzer bir eğriye sahip olduğu görülmektedir. İncelenen tüm alaşımlarda R değerleri yaklaşık 1 MeV foton enerjisinde maksimum değere ulaşmıştır. Düşük foton enerji değerlerinde R değerlerinin düşük olması, bu bölgedeki fotonların çok büyük bir kısmının soğrulmasından kaynaklanmaktadır. Orta enerji bölgesinde yer alan fotonlar malzeme üzerine geldiği zaman saçılma olasılıklarının fazla olduğu daha önce izah edilmişti. Bu nedenle R değerlerinin Compton saçılma ihtimaliyetinin fazla olduğu yerde daha büyük değerler alması beklenir. Bu durum Şekil 61’de açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, üretilen ağır metal katkılı alaşımların MAC değerlerinin Ni₃Al alaşımından daha büyük olduğu daha önce belirtilmişti. Ancak saçılma durumu söz konusu olduğunda ilgili şekilden de görüleceği üzere, Ni₃Al alaşımının R değerleri diğer alaşımlardan daha büyüktür. Çift oluşumunun baskın hale gelmesiyle birlikte, R değerleri, azalan saçılma tesir kesitine paralel olarak azalmaktadır.

Soğurma durumunda kompleks yapıdaki bir malzemeyi temsil eden sanal atom numarası Z_{eff} olarak tanımlanmıştı. Benzer şekilde, saçılma durumunda kompleks bir malzemenin bütünü temsil eden sanal atom numarasına eşlenik atom numarası (Z_{eq}) adı verilir. İncelenen alaşımların Z_{eq} değişimleri Şekil 62’de gösterilmiştir. Bu şekilden, ağır metal katkılı 1-12 kodlu alaşımların Z_{eq} değerlerinin Ni₃Al’den önemli ölçüde büyük olduğu görülebilir. Ni₃Al alaşımının Z_{eq} değerleri 1 MeV foton enerjisine kadar yaklaşık 26,5 düzeyinde sabit değerler almıştır. Katkılı alaşımlarda ise, Z_{eq} değerleri 0,02 MeV ve 0,06 MeV enerji değerlerinde ani artışlar göstermiştir. Bu durum, ağır metal katkılı alaşımların yapısında bulunan Cr, Mo, Nb ve W elementlerinin soğurma kıyılarından kaynaklanmaktadır. Ağır metal katkılı alaşımların tümü, incelenen tüm enerji aralığı boyunca benzer karakteristikler sergilemiştir. Bu alaşımların Z_{eq} değerleri 27,5 düzeyinden yaklaşık 37 düzeyine kadar bir artış göstermiş ve ardından 28 düzeylerine kadar düşüş göstermiştir. Ağır metal katkılı alaşımlarda, 1 MeV foton enerjisinde en yüksek Z_{eq} değeri 10 kodlu Al_{8,5}Cr₁₆Nb₁Mo₁W₁Ni_{25,5} alaşımında elde edilmiştir.

Numune ve dedektör arasında yer alan hava ortamından kaynaklanan saçılma etkileri maruz kalma Build-up faktörü olarak adlandırılan ve EBF (Exposure Build-up Factor) olarak kısaltılan parametre ile tanımlanır. Numunedeki soğrulmadan kaynaklanan Build-up faktörü ise, enerji soğurma Build-up (EABF: Energy Absorbtion Build-up Factor) faktörü olarak adlandırılır. Bu iki parametre de, hem foton enerjisine hem de numunenin kalınlığına doğrudan bağlıdır. Numune kalınlığı, fotonların ardışık başarılı etkileşimler yapmasını temsil eden MFP değerleri ile karakterize edilir. Şekil 63’te 1, 10, 20 ve 40 MFP değerleri için EBF

değerlerinin enerjiye bağlı değişimleri gösterilmiştir. Bu grafikten, numune ve dedektör arasındaki mesafenin çok az olması durumunda, yani hava kalınlığının çok az olması durumunda (1 MFP) EBF değerlerinin 1 ile 2 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Böylesine bir durumda EBF'nin katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak numunenin dedektörden uzaklaştırılması durumunda, artan hava kalınlığına paralel olarak daha fazla foton saçılacağından, 10, 20 ve 40 MFP değerlerinde EBF değerleri de artış göstermiştir. Grafikler bir arada değerlendirildiğinde, tüm alaşımların benzer EBF eğrilerine sahip oldukları görülmektedir. EBF değeri saçılma tesir kesiti ile orantılı olduğundan saçılmanın baskın olduğu yerlerde artış göstermektedir. Ayrıca, alaşımlarda yer alan ağır metallerin soğurma kıyılarında çok az bir farkla büyük olan enerji değerinde fotonlar kısmi enerji aktarımı yapamadıkları için daha fazla saçılırlar. Bu saçılma durumunda, EBF değerlerinde ani yükselmeler söz konusu olur. Belirtilen bu iki durumlar, EBF değerlerinin gaussian benzeri bir değişim eğrisine sahip olmalarının ve grafiklerde görülen ani yükselmelerin ana nedenleridir. Şekil 63'te sunulan veriler, gama-ışını soğurma deneylerinde, ideal deney geometrisinin kullanımının gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Numune ve dedektör arasındaki uzaklığın çok fazla olması durumunda saçılma etkileri ihmal edilemez düzeye gelerek, deneysel sonuçların hatalı olarak elde edilmesine neden olur. Uyarıcı foton enerjisinin farklı MFP'lerde EBF üzerindeki etkilerinin detaylıca izah edildiği bu grafiklere ek olarak, farklı enerjilerde penetrasyon derinliğinin EBF üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması için Şekil 64'te verilen grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde 0,015, 0,15, 1,5 ve 15 MeV foton enerjilerinde 1-40 MFP aralığındaki EBF değişimleri sunulmuştur. Bu grafiklerden öncelikli olarak bütün foton enerjilerinde, düşük penetrasyon derinliklerinde EBF değerlerinin çok küçük olduğu ve 1'e yakın değerler aldığı görülebilir. Düşük penetrasyon derinliklerinde fotonlarında daha az saçılma olasılıkları, enerjiden bağımsız olarak EBF değerlerinin çok küçük olmasına neden olur. Beer-Lambert yasasına foton saçılma durumunda ilave edilmesi gereken B parametresi, böylesine küçük EBF değerleri durumunda ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte, 0,15 MeV foton enerjisinden itibaren daha yüksek enerjili fotonlar durumunda, tüm alaşımların EBF değerleri artan penetrasyon derinliği ile birlikte artış göstermektedir. Artan hava kalınlığına paralel olarak fotonlar havada daha fazla saçılıma maruz kalarak EBF değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 0,015 MeV foton enerjisinde incelenen tüm alaşımların EBF değerleri birbirine çok benzer değerler olarak 1,0 ile 1,01 arasında değişmektedir. 0,15 MeV enerjisinde ise Ni₃Al alaşımının EBF değerleri, ağır metal katkılı diğer alaşımlardan daha büyüktür. Ancak Compton saçılmasının en baskın hale geldiği ve neredeyse kimyasal kompozisyonun önemini kaybettiği orta enerji bölgesinde (E yaklaşık 1,5 MeV) tüm alaşımların EBF değerleri yine çok

yakın değerlere sahip olmuştur. 15 MeV foton enerjisinde ise ağır metal katkılamasıyla elde edilen alaşımların EBF değerlerinin Ni₃Al'den daha büyük olduğu görülebilir.

Numunedeki soğrulmadan kaynaklı olarak ortaya çıkan ve EABF değerlerinin değişimleri de bu tez kapsamında incelenmiştir. Farklı penetrasyon derinliklerinde uyarıcı fotonların enerjisi olarak EABF değerlerinin değişimleri Şekil 65'te verilmiştir. Tüm şekiller bir arada incelendiğinde, tüm alaşımların benzer EABF dağılımına sahip olduğu ve düşük enerji değerlerinde 1 civarında değerlere sahip olduğu görülebilir. Artan enerjiyle birlikte, Compton saçılmasının baskın olduğu enerji aralığında, EABF değerleri maksimum değere ulaştıktan sonra tekrar düşüş göstermektedirler. Daha önce de izah edildiği üzere, Build-up etkileri malzemeyi oluşturan elementlerin soğurma kıyılarının çok az üzerindeki enerjilerde ve Compton saçılmasının baskın olduğu enerjilerde en yüksek değerleri alırlar. Penetrasyon derinliğinin fonksiyonu olarak farklı foton enerjilerinde elde edilen EABF grafikleri Şekil 66'da gösterilmiştir. Penetrasyon derinliğinin artışı, daha kalın malzemeyi temsil ettiğinden, numune içine giren fotonlar artan penetrasyon derinliği ile daha fazla saçılırlar ve EABF değerlerinin artmasına neden olurlar. Bu durum özellikle 0,15, 1,5 ve 15 MeV enerjili fotonlarda, daha belirgin olarak göze çarpmaktadır. Çok düşük foton enerjilerinde ise EBF'de olduğu gibi, EABF'de de fotonların giriciliklerinin zayıf olmasına paralel olarak fotonlar çok fazla saçılma maruz kalmadan soğrulduklarından Build-up etkileri ihmal edilebilir düzeydedir. Nitekim belirtilen durum 0,015 MeV foton enerjisi için veriler grafikte açıkça görülmektedir. Bu grafikte EABF değerleri 1 düzeyinde değerlere sahiptir. EABF parametresi hem yüksek penetrasyon derinliklerinde hem de yüksek enerjili fotonların maddeyle etkileşmesi durumunda kesin olarak değerlendirmeye alınmalıdır. Aksi halde, elde edilecek deneysel verilerin teorik verilerle uyuşması söz konusu değildir. EBF ve EABF sonuçlarından elde edilen sonuçlar, hem iyi bir deney geometrisinin uygun mesafelerde konumlandırılması gerekliliğini hem de foton soğurma deneyleri yapılacak numunelerin oldukça ince olacak şekilde tasarlanmalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

REFERANSLAR

- Abdalsalam, A.H., Sayyed, M.I., Ali Hussein, T., Şakar, E., Mhareb, M.H.A., Ceviz Şakar, B., Alim, 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>
- Akbaba, U., Şakar, E., Sayyed, M., Alim, B., Özpolat, Ö.F., 2022. Evaluation of photon interaction parameters of Anti-HIV drugs. *Radiation Physics and Chemistry* 201, 110441.
- Alim, B., 2020. Determination of Radiation Protection Features of the Ag₂O Doped Boro-Tellurite Glasses Using Phy-X / PSD Software. *Journal of the Institute of Science and Technology* 10, 202–213. <https://doi.org/10.21597/jist.640027>
- Alım, B., 2020. A comprehensive study on radiation shielding characteristics of Tin-Silver, Manganin-R, Hastelloy-B, Hastelloy-X and Dilver-P alloys. *Appl. Phys. A* 126, 262. <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, Bünyamin, Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M., Demir, L., 2020. Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry* 166, 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>
- Aoki, K., Izumi, O., 1978. On the Ductility of the Intermetallic Compound Ni₃Al. *Transactions of the Japan Institute of Metals* 19. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.19.203>
- Arora, K., Kishida, K., Tanaka, K., Inui, H., 2017. Effects of lattice misfit on plastic deformation behavior of single-crystalline micropillars of Ni-based superalloys. *Acta Materialia* 138, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.044>
- Aygün, B., 2021. Neutron and gamma radiation shielding Ni based new type super alloys development and production by Monte Carlo Simulation technique. *Radiation Physics and Chemistry* 188, 109630. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109630>
- Bashter, I.I., 1997. Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of Nuclear Energy* 24, 1389–1401. [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(97\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00003-0)
- Cao, L., Wollgramm, P., Bürger, D., Kostka, A., Cailletaud, G., Eggeler, G., 2018. How evolving multiaxial stress states affect the kinetics of rafting during creep of single crystal Ni-base superalloys. *Acta Materialia* 158, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.061>

- Deevi, S.C., Sikka, V.K., 1996. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics* 4, 357–375. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
- Deevi, S.C., Sikka, V.K., Liu, C.T., 1997. Processing, properties, and applications of nickel and iron aluminides. *Progress in Materials Science* 42, 177–192. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(97\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(97)00014-5)
- El-Soad, A.A., Sayyed, M., Mahmoud, K., Şakar, E., Kovaleva, E., 2019. Simulation studies for gamma ray shielding properties of Halloysite nanotubes using MCNP-5 code. *Applied Radiation and Isotopes* 154, 108882.
- Ersundu, A., Büyükyıldız, M., Ersundu, M.Ç., 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.
- Feng, Z., Wen, Z., Lu, G., Zhao, Y., 2022. Influence of Cooling Scenarios on the Evolution of Microstructures in Nickel-Based Single Crystal Superalloys. *Crystals* 12, 74. <https://doi.org/10.3390/cryst12010074>
- George, E.P., Liu, C.T., Pope, D.P., 1992. Environmental embrittlement: The major cause of room-temperature brittleness in polycrystalline Ni₃Al. *Scripta Metallurgica et Materialia* 27, 365–370. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90527-L](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90527-L)
- Gu, Y., Lin, D., Lin, T.L., Guo, J., 1996. Ductilization of Ni₃Al by alloying with zirconium. *Scripta Materialia* 35, 609–613. [https://doi.org/10.1016/1359-6462\(96\)00187-X](https://doi.org/10.1016/1359-6462(96)00187-X)
- Hafez Haghghat, S.M., Eggeler, G., Raabe, D., 2013. Effect of climb on dislocation mechanisms and creep rates in γ' -strengthened Ni base superalloy single crystals: A discrete dislocation dynamics study. *Acta Materialia* 61, 3709–3723. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.003>
- Han, I., Demir, L., 2009. Mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers of Ti and Ni alloys. *Radiation Measurements* 44, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.03.010>
- Harima, Y., Sakamoto, Y., Tanaka, S., Kawai, M., 1986. Validity of the Geometric-Progression Formula in Approximating Gamma-Ray Buildup Factors. *Nuclear Science and Engineering* 94, 24–35. <https://doi.org/10.13182/NSE86-A17113>
- İçelli, O., Erzeneoğlu, S., Karahan, İ.H., Çankaya, G., 2005. Effective atomic numbers for CoCuNi alloys using transmission experiments. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 91, 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.07.006>
- Jozwik, P., Polkowski, W., Bojar, Z., 2015. Applications of Ni₃Al Based Intermetallic Alloys—Current Stage and Potential Perceptivities. *Materials* 8, 2537–2568. <https://doi.org/10.3390/ma8052537>
- Karczewski, K., Jozwiak, S., Bojar, Z., 2007. Mechanisms of strength properties anomaly of Fe-Al sinters by compression tests at elevated temperature. *Archives of Metallurgy and Materials* 52.
- Korkut, T., Aygün, B., Bayram, Ö., Karabulut, A., 2015. Study of neutron attenuation properties of super alloys with added rhenium. *J Radioanal Nucl Chem* 306, 119–122. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4063-z>
- Kurudirek, M., 2017. Heavy metal borate glasses: Potential use for radiation shielding. *Journal of Alloys and Compounds* 727, 1227–1236. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.237>

- Li, Y.F., Guo, J.T., Zhou, L.Z., Ye, H.Q., 2004. Effect of recrystallization on room-temperature mechanical properties of Zr-doped Ni₃Al alloy. *Materials Letters* 58, 1853–1856. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.11.018>
- Li, Z., Gao, W. (Eds.), 2008. *High Temperature Corrosion of Intermetallics*, UK ed. edition. ed. Nova Science Pub Inc, New York.
- Liu, C.T., Stringer, J., Mundy, J.N., Horton, L.L., Angelini, P., 1997. Ordered intermetallic alloys: an assessment. *Intermetallics* 5, 579–596. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(97\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(97)00045-9)
- Liu, C.T., White, C.L., Horton, J.A., 1985. Effect of boron on grain-boundaries in Ni₃Al†. *Acta Metallurgica* 33, 213–229. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(85\)90139-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(85)90139-7)
- Lokhande, R.M., More, C.V., Surung, B.S., Pawar, P.P., 2017. Determination of attenuation parameters and energy absorption build-up factor of amine group materials. *Radiation Physics and Chemistry* 141, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.08.004>
- Long, H., Mao, S., Liu, Y., Zhang, Z., Han, X., 2018. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys — A review. *Journal of Alloys and Compounds* 743, 203–220. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.224>
- Łyszkowski, R., Jerzy, B., 2007. Influence of temperature and strain rate on the microstructure and flow stress of iron aluminides. *Archives of Metallurgy and Materials* 52, 347–350. <https://doi.org/10.2478/amm-2007>
- Mahmoud, S., Mousseau, N., 2018. Long-time point defect diffusion in ordered nickel-based binary alloys: How small kinetic differences can lead to completely long-time structural evolution. *Materialia* 4, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.11.013>
- Manjunatha, H.C., Rudraswamy, B., 2011. Computation of exposure build-up factors in teeth. *Radiation Physics and Chemistry* 80, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.09.004>
- Mansy, M.S., Desoky, W.M., 2022. Investigation of gamma-rays and fast neutrons attenuation parameters for Ni_xCo_{1-x}Fe₂O₄ nickel ferrites. *Progress in Nuclear Energy* 148, 104213. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104213>
- Martin, J.W., 2007. *Concise encyclopedia of the structure of materials*, 1st ed. ed. Elsevier, Amsterdam.
- Paufler, P., 1995. J. H. Westbrook, R. L. Fleischer (eds.). *Intermetallic Compounds. Principles and Practice*. John Wiley & Sons, Chichester 1995. Vol. 1. Principles. 1126 S. ISBN 0–471–94219–7. Vol. 2: Practice. 752 S. ISBN 0–471–93454–2. Set: ISBN 0–471–93453–4. Preis: £ 385.–. *Cryst. Res. Technol.* 30, 920–920. <https://doi.org/10.1002/crat.2170300706>
- Pawłowski, A., Czeppe, T., Major, Ł., Senderowski, C., 2009. Structure morphology of Fe-Al coating detonation sprayed onto carbon steel substrate. *Archives of Metallurgy and Materials*.
- Pei, J., Li, Y., Li, C., Wang, Z., Liu, Y., Li, H., 2020. Microstructure-dependent oxidation behavior of Ni-Al single-crystal alloys. *Journal of Materials Science & Technology* 52, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.006>
- Raju, S.V., Godwal, B.K., Singh, A.K., Jeanloz, R., Saxena, S.K., 2018. High-pressure strengths of Ni₃Al and Ni-Al-Cr. *Journal of Alloys and Compounds* 741, 642–647. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.142>

- Reed, R.C., 2008. The superalloys: fundamentals and applications, Digital printed version. ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Sabry, N., Zahran, H.Y., Yousef, E.S., Algarni, H., Umar, A., Albargi, H.B., Yahia, I.S., 2021. Gamma-ray attenuation, fast neutron removal cross-section and build up factor of Cu₂MnGe[S, Se, Te]₄ semiconductor compounds: Novel approach. *Radiation Physics and Chemistry* 179, 109248. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109248>
- Şakar, E., 2020. Determination of photon-shielding features and build-up factors of nickel–silver alloys. *Radiation Physics and Chemistry* 172, 108778.
- Şakar, E., Alim, B., Fırat Özpolat, Ö., Ceviz Şakar, B., Baltakesmez, A., Akbaba, U., 2021. A surveying of photon and particle radiation interaction characteristics of some perovskite materials. *Radiation Physics and Chemistry* 189. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109719>
- 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.radphyschem.2019.02.042>
- Sakar, E., Guler, O., Alım, 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, 167561. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167561>
- Şakar, E., Özpolat, Ö., Alım, B., Alsaif, N.A., Rammah, Y., 2022. Evaluation of γ -rays and neutron shielding parameters of high dense bismo-boro-tellurite glasses: Comparative study. *Radiation Physics and Chemistry* 196, 110149.
- Şakar, E., Özpolat, Ö.F., Alım, B., Sayyed, M., Kurudirek, M., 2020. Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry* 166, 108496.
- Sardari, D., Saudi, S., Tajik, M., 2011. Evaluation of gamma ray buildup factor data in water with MCNP4C code. *Annals of Nuclear Energy* 38, 628–631. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.09.007>
- Sato, J., Omori, T., Oikawa, K., Ohnuma, I., Kainuma, R., Ishida, K., 2006. Cobalt-Base High-Temperature Alloys. *Science* 312, 90–91. <https://doi.org/10.1126/science.1121738>
- Sayyed, M. I., Mohammed, F.Q., Mahmoud, K.A., Lacomme, E., Kaky, K.M., Khandaker, M.U., Faruque, M.R.I., 2020. Evaluation of Radiation Shielding Features of Co and Ni-Based Superalloys Using MCNP-5 Code: Potential Use in Nuclear Safety. *Applied Sciences* 10, 7680. <https://doi.org/10.3390/app10217680>
- Sayyed, M.I., Tekin, H.O., Taki, M.M., Mhareb, M.H.A., Agar, O., Şakar, E., Kaky, K.M., 2020. Bi₂O₃-B₂O₃-ZnO-BaO-Li₂O glass system for gamma ray shielding applications. *Optik* 201. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163525>
- Senderowski, C., 2014. Nanocomposite Fe-Al Intermetallic Coating Obtained by Gas Detonation Spraying of Milled Self-Decomposing Powder. *J Therm Spray Tech* 23, 1124–1134. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0086-1>
- Shee, S.K., Pradhan, S.K., De, M., 1998. Effect of alloying on the microstructure and mechanical properties of Ni₃Al. *Journal of Alloys and Compounds* 265, 249–256. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00291-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00291-0)
- Sheng, L.Y., Zhang, W., Guo, J.T., Wang, Z.S., Ovcharenko, V.E., Zhou, L.Z., Ye, H.Q., 2009. Microstructure and mechanical properties of Ni₃Al fabricated by thermal explosion and

- hot extrusion. *Intermetallics* 17, 572–577. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2009.01.004>
- Sikka, V.K., Deevi, S.C., Viswanathan, S., Swindeman, R.W., Santella, M.L., 2000. Advances in processing of Ni3Al-based intermetallics and applications. *Intermetallics* 8, 1329–1337. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00078-9)
- Sriwongsa, K., Sirimongkolchaikul, J., Sukrasorn, C., Bussaparoek, T., Kanunghet, S., Phansuea, T., Glumglomchit, P., Limkitjaroenporn, P., Kaewkhao, J., 2022. Radiation and Fast Neutron Shielding Properties of Nickel-Based Superalloys: Inconel 600, 718 and 725 Superalloys. *Integrated Ferroelectrics* 224, 120–133. <https://doi.org/10.1080/10584587.2022.2035602>
- Stoloff, N.S., Liu, C.T., Deevi, S.C., 2000. Emerging applications of intermetallics. *Intermetallics* 8, 1313–1320. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00077-7)
- Suteau, C., Chiron, M., 2005. An iterative method for calculating gamma-ray build-up factors in multi-layer shields. *Radiat Prot Dosimetry* 116, 489–492. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci192>
- Wang, J.-S., 1998. Dislocation nucleation and the intrinsic fracture behavior of L12 intermetallic alloys. *Acta Materialia* 46, 2663–2674. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00468-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00468-0)
- WU Jing, L.Y., 2019. Recent Progress of Microstructure Evolution and Performance of Multiphase Ni3Al-Based Intermetallic Alloy with High Fe and Cr Contents. *Acta Metall Sin* 56, 21–35. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2019.00137>
- Wu, X., 2006. Review of alloy and process development of TiAl alloys. *Intermetallics, EUROMAT 2005 “European Congress on Advanced Materials and Processes”* 14, 1114–1122. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.10.019>
- Wu, Y., Li, C., Li, Y., Wu, J., Xia, X., Liu, Y., 2021. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ni3Al-based superalloys: A review. *Int J Miner Metall Mater* 28, 553–566. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2177-y>
- Xu, B., Yin, H., Jiang, X., Zhang, C., Zhang, R., Wang, Y., Qu, X., 2022. Computational materials design: Composition optimization to develop novel Ni-based single crystal superalloys. *Computational Materials Science* 202, 111021. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.111021>
- Yamaguchi, M., Inui, H., Ito, K., 2000. High-temperature structural intermetallics. *Acta Materialia* 48, 307–322. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00301-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00301-8)
- Yuan, S.Y., Jiang, Z.H., Liu, J.Z., Tang, Y., Zhang, Y., 2018. Nano-twinning in a γ' precipitate strengthened Ni-based superalloy. *Materials Research Letters* 6, 683–688. <https://doi.org/10.1080/21663831.2018.1538021>
- Zhu, Q., Shi, X., Zhai, W., Yang, K., Ibrahim, A.M.M., Xu, Z., Chen, L., Xiao, Y., Zhang, A., Zhang, Q., 2015. Influence of Subsurface Micro/Nano-Structural Evolution on Macroscopic Tribological Behavior of Ni3Al Matrix Composites. *Tribol Lett* 57, 21. <https://doi.org/10.1007/s11249-014-0458-1>
- Zhu, Z., Höglund, L., Larsson, H., Reed, R.C., 2015. Isolation of optimal compositions of single crystal superalloys by mapping of a material’s genome. *Acta Materialia* 90, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.01.040>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı :	Merve DURDAĞ
Doğum tarihi :	
Doğum Yeri :	
Uyruğu :	
Eğitim	
Yüksek Lisans :	
Lisans :	
Lise :	
İngilizce :	Orta
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. DURDAĞ M., ALIM B., ŞAKAR E. Effect of heavy metal doping on the crystallographic and morphological structures of Ni ₃ Al. 6 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE AND ENGINEERING SCIENCES, KEMER, TURKEY, ICOLES 2023, Sözlü Bildiri.	