

**KOBALT ESASLI NANOYAPILI HEUSLER
ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ, YAPISAL VE
MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ,
RADYASYON ZIRHLAMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Emine NARMANLI HAN

Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

Doktora Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2024

(Her hakkı saklıdır.)

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

**KOBALT ESASLI NANOYAPILI HEUSLER ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ, YAPISAL
VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, RADYASYON
ZIRHLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

(Production of Cobalt Based Nano-Structure Heusler Alloys, Investigation of Their Structural
and Morphological Properties, Determination of Radiation Shielding Characteristics)

DOKTORA TEZİ

Emine NARMANLI HAN

Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

Erzurum
Eylül, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Emine NARMANLI HAN tarafından hazırlanan “**Kobalt Esaslı Nanoyapılı Heusler Alaşımların Üretimi, Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Radyasyon Zırhlama Karakteristiklerinin Belirlenmesi**” başlıklı çalışması 26 / 08 / 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Yavuz ONGANER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Elif BOYDAŞ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL <i>Giresun Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mehmet BÜYÜKYILDIZ <i>Bursa Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Erdem ŞAKAR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

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

Aslı Islak İmzalıdır

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

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

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Elif BOYDAŞ* danışmanlığında sunulan “**Kobalt Esaslı Nanoyapılı Heusler Alaşımların Üretimi, Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Radyasyon Zırhlama Karakteristiklerinin Belirlenmesi**” 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	14	30
Kuramsal Temeller	12	30
Materyal ve Yöntem	13	35
Araştırma Bulguları	1	20
Tartışma ve Sonuç	0	20
Tezin Geneli	8	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	Tez Danışmanı
Emine NARMANLI HAN	Prof. Dr. Elif BOYDAŞ
26.8.2024	26.8.2024
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

Tez çalışmam süresince yol göstericiliği için tez danışmanım sayın Prof. Dr. Elif BOYDAŞ'a, anlayış ve olumlu tutumları dolayısı ile tez izleme komitesi üyelerim sayın Prof. Dr. Yavuz ONGANER ve Sayın Prof. Dr. Lütfü DEMİR'e, katkı ve yönlendirmeleri için sayın Doç. Dr. Bünyamin ALIM ve sayın Dr. Hasan Feyzi BUDAK'a, titiz okumaları ve düzeltmeleri için sayın Prof. Dr. Mehmet BÜYÜKYILDIZ, sayın Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL ve sayın Doç. Dr. Erdem ŞAKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmaları için imkân sağlayan Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Merkezi Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı yönetimine teşekkür ederim.

Emine NARMANLI HAN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KOBALT ESASLI NANOYAPILI HEUSLER ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ, YAPISAL VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, RADYASYON ZIRHLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Emine NARMANLI HAN

Danışman: Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

Amaç: Bu çalışmada, farklı kompozisyonlarda kobalt esaslı nanoyapılı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımlarının toz metalurjisi-basamak sinterleme yöntemi ile üretilmesi ve üretilen alaşımların yapısal, morfolojik özelliklerinin ve radyasyon zırhlama kapasitelerinin araştırılması amaçlanmıştır. Sinterleme tekniği ile söz konusu alaşımların ilk defa üretimi, bu tekniğin üretim için uygunluğunun değerlendirilmesi, farklı sistemler ile yapılacak analizler ışığında üretilen alaşımların karakteristiklerinin ortaya konulması bu çalışmanın planlanmış hedefleridir.

Yöntem: Deneyisel çalışmanın ilk adımı olarak üretim aşamasında alaşımlar için gerekli sarf ve üretim parametrelerinin belirlenmesini takiben, toz metalurjisi-basamak sinterleme tekniği kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Ardından üretimi yapılan Heusler alaşımlarının çeşitli karakteristikleri EDS, XRD ve SEM sistemleri ile yapılan analizler ile aydınlatılmış ve son olarak bu alaşımların radyasyon zırhlama kapasiteleri Phy-X/PSD yazılımı ile araştırılmıştır.

Bulgular: Çalışma kapsamında kobalt esaslı nanoyapılı Heusler alaşımların sinterleme tekniği ile üretimi gerçekleştirilebilmiş ve tekniğin içerdiği üretim süreçlerinin üretim başarımındaki rolleri değerlendirilebilmiştir. Alaşımların karakteristikleri yapılan EDS, XRD ve SEM analizleri ile belirlendikten sonra, elde edilen analiz sonuçları her bir alaşım özelinde; alaşım içeriğine ve bileşimine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Alaşımlar için Phy-X/PSD yazılımı ile elde edilen çeşitli radyasyon etkileşim parametreleri sayesinde üretilen alaşımların zırhlama kapasiteleri hakkında fikir sahibi olunmuştur.

Sonuç: Kobalt esaslı nanoyapılı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımları toz metalurjisi-basamak sinterleme yöntemi ile başarılı bir biçimde üretilenmiştir. Bu yöntemle istenilen formda alaşım üretebilmek için tüm üretim süreci boyunca yapılması gerekenler detaylı olarak değerlendirilmiş ve üretimde başarı için yöntemin tüm aşamalarının eksiksiz ve doğru bir şekilde takip edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Üretilen alaşımlar için EDS, XRD ve SEM sistemleri ile yapılan analizler alaşımlamanın gerçekleştiğini desteklemenin yanı sıra, alaşımların özelliklerinin ortaya çıkarılmasına da olanak sağlamıştır. Sonuçlar, üretilen alaşımların çok fazlı polikristal yapıda büyüdüğünü ve her iki alaşım grubu için de yapıda ağırlıklı olarak kübik, tetragonal ve hekzagonal kristal sistemlerin oluştuğunu göstermiştir. Üretilen alaşımların radyasyon zırh ve nükleer yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği, Phy-X/PSD yazılımından elde edilen çeşitli radyasyon-madde etkileşim parametreleri rehberliğinde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heusler, Alaşım, Nanoyapı, Toz metalurjisi, Sinterleme, Zırhlama, XRD, SEM, EDS, EDX.

Eylül 2024, 122 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

PRODUCTION of COBALT BASED NANO-STRUCTURE HEUSLER ALLOYS, INVESTIGATION of THEIR STRUCTURAL and MORPHOLOGICAL PROPERTIES, DETERMINATION of RADIATION SHIELDING CHARACTERISTICS

Emine NARMANLI HAN

Supervisor: Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

Purpose: In this study, it is aimed to produce cobalt based nanostructured $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alloys in different compositions using the powder metallurgy-step sintering method and to investigate the structural, morphological properties and radiation shielding capabilities of the produced alloys. The planned objectives of this study are to produce the mentioned alloys for the first time with the sintering technique, to evaluate the suitability of this technique for production, and to reveal the characteristics of the alloys produced in the light of analyzes to be made with different systems.

Method: As the first step of the experimental study, following the determination of the necessary consumables and production parameters for the alloys during the production phase, production of nanostructured $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alloys were carried out using the powder metallurgy-step sintering method. Then, various characteristics of the produced Heusler alloys were clarified by analyzes made with EDS, XRD and SEM systems, and finally, the radiation shielding capacities of these alloys were investigated with Phy-X/PSD software.

Findings: Within the scope of the study, cobalt-based nanostructured Heusler alloys could be produced using the powder metallurgy-step sintering technique, and the roles of the production processes included in the method in production success have been evaluated. After the characteristics of the alloys are determined by EDX, XRD, and SEM analyses, the results obtained for each alloy were assessed depending on the alloy content and composition. The shielding capacities of the produced alloys were to hold an opinion thanks to various radiation interaction parameters obtained with the Phy-X/PSD software for alloys.

Results: Heusler alloys have been successfully produced by the powder metallurgy-step sintering method. The actions to be taken during the entire production procedure were evaluated in detail in order to produce alloys in the desired form with this method and it has been concluded that all stages of the method must be followed completely and accurately for success in production. The analyzes made with EDS, XRD and SEM systems for the alloys produced not only support that alloying has occurred, but also enabled the characteristics of the alloys to be revealed. The results have been showed that the produced alloys grew in a multiphase polycrystalline structure and that predominantly cubic, tetragonal and hexagonal crystal systems were formed in the structure for both alloy groups. The usability of present alloys as radiation shielding and nuclear building materials has been evaluated guidance of various radiation-matter interaction parameters obtain from Phy-X/PSD software.

Keywords: Heusler, Alloy, Nanostructure, Powder metallurgy, Sintering, Shielding, XRD, SEM, EDS, EDX.

September 2024, 122 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.....	18
Alaşım	18
Toz Metalürjisi	25
Sinterleme	35
MATERYAL ve METOT	45
Numunelerin Belirlenmesi	46
Numune Kompozisyonlarının Belirlenmesi.....	47
Homojenizasyon ve Pellet Yapımı.....	48
Numunelerin Sinterleme İşlemi	50
EDS Analizleri	51
XRD Analizleri	51
SEM Analizleri.....	52
Phy-X/PSD Hesaplamaları.....	53
Foton Madde Etkileşim Parametreleri	54
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	57
Co ₂ Mn _x Ni _{1-x} Al ve Co ₂ Cr _x Ni _{1-x} Al Alaşımlarının Üretimine İlişkin Araştırma Bulguları	60
Co ₂ Mn _x Ni _{1-x} Al ve Co ₂ Cr _x Ni _{1-x} Al Alaşımlarının Karakterizasyon Analizlerine İlişkin Araştırma Bulguları	67
EDS sonuçları	67
XRD sonuçları.....	71
SEM sonuçları.....	77

Co ₂ Mn _x Ni _{1-x} Al ve Co ₂ Cr _x Ni _{1-x} Al Alaşımlarının Radyasyon Zırh Malzemesi	
Olabilirliklerine İlişkin Araştırma Bulguları.....	83
SONUÇLAR.....	97
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	108

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Heusler Alaşımlarını Oluşturan Elementlerin Temel Kompozisyonları, Alaşımların Manyetik Durumları ve Kristal Yapıları	4
Tablo 2. Tozların Bazı Önemli Özellikleri ve Bunların Etki Ettikleri Bazı Önemli Faktörler	28
Tablo 3. Toz İnceliğinin Tanımlanmış Sınıflandırması	29
Tablo 4. Çalışmada Kullanılan Nano-Boyutlu Tozların Bazı Spesifik Özellikleri	57
Tablo 5. Üretimi Gerçekleştirilen Alaşımlar Verilen Kodlar, İçerikleri ve Bazı Özellikleri	58
Tablo 6. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları İçin Değerlik Elektron Konsantrasyonu (e/a) Değerleri	70
Tablo 7. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımları İçin Bazı Pik Pozisyonları ve Karşılık Gelen ($h\ k\ l$), d Değerleri ($2\theta = 30^\circ\text{-}80^\circ$)	73
Tablo 8. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımları İçin Bazı Pik Pozisyonları ve Karşılık Gelen ($h\ k\ l$), d Değerleri ($2\theta = 30^\circ\text{-}80^\circ$)	75
Tablo 9. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımlarının Kütle Azaltma Katsayıları (cm^2/g)	84
Tablo 10. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımlarının Kütle Azaltma Katsayıları (cm^2/g)	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yarı ve tam Heusler alaşımlarının çeşitli yapılarının şematik gösterimi	3
Şekil 2. Alaşımlar için yapısal sınıflandırma	19
Şekil 3. Katı eriyikte yer alan ve ara yer atomları.....	20
Şekil 4. Erime ve katılaşma süreçlerinin gerçekleşme mekanizması.....	22
Şekil 5. A_xB_{100-x} formundaki katı eriyik alaşım için denge diyagramı	23
Şekil 6. Metallere uygulanan yaygın imalat yöntemleri	25
Şekil 7. Toz metalürjisi temel üretim prosedürü.	27
Şekil 8. Tozların olası partikül şekilleri ve adlandırmaları	30
Şekil 9. Metal tozlarının şekil ve büyüklük değişimini gösteren SEM görüntüleri.	31
Şekil 10. Farklı basınç değerlerinde preslenen nikel örneklerine ait SEM görüntüleri	32
Şekil 11. Tek eksenli toz presleme adımlarının şematik gösterimi (a) kalıp boşluğunun önceden hazırlanmış toz ile doldurulması, (b) kalıbın üst diskine uygulanan basınç ile tozun sıkıştırılması, (c) alt diskin yukarı hareketi ile sıkıştırılmış (şekil almış) numunenin (green) çıkarılması	33
Şekil 12. Aglomerasyonun şematik gösterimi a) Parçacık; b) Grain; c) Aglomerat.....	34
Şekil 13. Toplanan aglomeraların SEM resimleri: büyütülmüş görünüm, aglomeraları oluşturan nanometrik parçacıkların yapısı	34
Şekil 14. Katı ve sıvı faz sinterlemeler için faz diyagramı	36
Şekil 15. Sinterleme esnasında partiküller arası boyun büyümesinin iki küre modeliyle açıklanması.....	37
Şekil 16. Sinterleme esnasında olası malzeme taşınım mekanizmaları ve taneler arası boyun büyümesi	38
Şekil 17. Sinterleme öncesi yayınım çiftlerinin durumu (sol kısım) ve sinterleme işleminde meydana gelen yayınım durumu (sağ kısım)	40
Şekil 18. Boşluk (a) ve ara yer (b) difüzyon mekanizmaları.....	41
Şekil 19. Farklı sinterleme koşullarında sinterlenmiş Titanyum (Ti) küçük kompaktlarının enine kesitlerinin mikro yapısı.	44
Şekil 20. Ni-Al toz partiküllerinin sinterleme sırasında mikro yapı değişimine ait SEM görüntüleri.....	44
Şekil 21. Tez kapsamında numune üretimi ve analizi için yapılacak çalışmalar için süreç akış diyagramı	45

Şekil 22. Çalışmada kullanılan hassas terazi.....	48
Şekil 23. Toz karışımlarının homojenizasyonu için kullanılan karıştırıcı.....	49
Şekil 24. Numuneleri şekillendirmek için kullanılan hidrolik pres ve 13 mm çapında dia-set.....	49
Şekil 25. Numunelerin sinterleme işleminde kullanılan fırın	50
Şekil 26. Üretimi gerçekleştirilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ (1–9 numaralı) ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ (10–18 numaralı) alaşımların fotoğrafı	59
Şekil 27. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ $x = 0,5$ alaşımına ait fotoğraflar; (a) homojen toz karışımının presleme öncesi, (b) green (pellet haline getirilmiş) ve (c) sinterleme sonrası.....	60
Şekil 28. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ $x = 0,5$ alaşımı için mikro boyutlu (a) ve nano boyutlu (b) tozlar ile gerçekleştirilen ilk girişimler sonucu üretilen alaşımların fotoğrafları.....	61
Şekil 29. Alaşım hazırlama sırasında die-set içerisinde toz karışımının dağılımının düzgün olmadığı (a), uygulanan basınç değerinin gereğinden fazla veya az olduğu (b) durumlarda üretilen alaşımlardaki kusurlar	62
Şekil 30. Pelletleme sırasında die-setin içerisindeki preslenecek tozun düzgün dağılmadığı durumlarda alaşım üretiminde başarısız olduğunu gösteren fotoğraflar.....	62
Şekil 31. Pelletleme sırasında die-setin kendisinin presteki yerleşiminin dengesiz ve kullanılan die-setin kusurlu olduğu durumlarda alaşım üretiminde başarısız olduğunu gösteren fotoğraflar	63
Şekil 32. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ $x = 0,4$ (a) ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ $x = 0,3$ (b) alaşımlarına ait fotoğraflar	64
Şekil 33. İyi planlanmamış bir sinterleme işleminin $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ $x = 0,4$ alaşımında sebep olduğu yapısal problemleri gösterir fotoğraf.	65
Şekil 34. Üretimi gerçekleştirilen alaşımlar için uygulanan basamak-sinterleme işlemine ait akış diyagramı	66
Şekil 35. Seçilen üç farklı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımı için elde edilen enerji dağılımlı X-ışını spektrumlarının birlikte gösterimi. (a) $x = 0,9$ için, (b) $x = 0,5$ için ve (c) $x = 0,1$ için.....	68
Şekil 36. Seçilen üç farklı $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımı için elde edilen enerji dağılımlı X-ışını spektrumlarının birlikte gösterimi. (a) $x = 0,9$ için, (b) $x = 0,5$ için ve (c) $x = 0,1$ için.....	69
Şekil 37. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının X-ışını kırınım deseni.....	72
Şekil 38. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının X-ışını toz kırınım deseni	74
Şekil 39. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının SEM görüntüleri	78
Şekil 40. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının SEM görüntüleri	80

Şekil 41. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için kütle azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	86
Şekil 42. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için kütle azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	86
Şekil 43. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için kütle azaltma katsayılarının rölatif değişimi	88
Şekil 44. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için kütle azaltma katsayılarının rölatif değişimi.....	89
Şekil 45. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için lineer azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	90
Şekil 46. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için lineer azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	90
Şekil 47. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için yarı değer kalınlıklarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	91
Şekil 48. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için yarı değer kalınlıklarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	92
Şekil 49. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için ortalama serbest yol değerlerinin 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	93
Şekil 50. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için ortalama serbest yol değerlerinin 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	94
Şekil 51. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için etkin atom numaralarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	95
Şekil 52. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için etkin atom numaralarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi	95

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Å	: Angström	—
C1 _b	: Yarı-Heusler alaşımları yapısı	—
DFT / YFT	: Yoğunluk fonksiyonel teorisi	—
DOS	: Durumların yoğunluğu (Density of State)	—
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometre	—
EDX	: Enerji dağılımlı X-ışını	—
FCC	: Yüzey merkezli kübik	—
HVL	: Yarı değer kalınlığı	cm
L2 ₁	: Tam-Heusler alaşımları yapısı	—
LAC	: Lineer azaltma katsayısı	cm ⁻¹
m	: Kütle	g
MAC	: Kütle azaltma katsayısı	cm ² /g
MFP	: Ortalama serbest yol	cm
nm	: Nanometre	—
P	: Basınç	Pa
Phy-X/PSD	Photon Shielding and Dosimetry yazılımı	—
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu	—
t	: Numunenin kütle kalınlığı	g/cm ²
T _c	: Curi Sıcaklığı	K
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu	—
TM	: Toz metalürjisi	—
VSM	: Titreştirmeli manyetometre	—
XPS	: X-ışını foto elektron spektroskopisi	—
XRD	: X-ışını kırınım	—
Z _{eff}	: Etkin atom numarası	—

GİRİŞ

İnsanoğlunun doğada bulunan doğal metalleri keşfi ve onları farklı amaçlar için şekillendirmesi ile başlayan ve sürekli değişip çeşitlenen serüveni, teknolojik ihtiyaçların artması ile gereksinime bağlı olarak günümüzde de sürmektedir. Metaller¹ önceleri tek başına kullanılmış olmasına rağmen ilerleyen zamanlarda ise bazı kaynaklara göre tesadüfen bazı kaynaklara göre de bilinçli bir şekilde karıştırılarak yeni metalürji ürünleri oluşturularak kullanılmıştır. İlk kez Anadolu’da MÖ 3200’lü yıllarda bakıra kalay karıştırılması ile tunç (bronz) elde edilmiş ve Tunç Çağı başlamıştır. Çoğunlukla avlanma ve savunma maksatlı araç gereçler yapmak için kullanılan bronz farklı metallerin bir araya getirilmesi ile daha işlevsel materyaller üretilebileceği fikrinin ilk örneğidir ve günümüzde dahi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Geçmişte insanlığı tunç devrine taşıyan “metalürji” günümüzde metal içeren ham maddelerden, metal cevherlerinden insanların farklı ihtiyaçlarına cevap verebilecek daha üstün özelliklere sahip malzemelerin üretilmesini hedefleyen çok geniş kapsamlı bir teknoloji ve bilim alanına dönüşmüştür. Özellikle sanayi devrimini takiben metalürjide diğer adı ile metal biliminde gerçekleşen büyük gelişme ile metallerin çok farklı kombinasyonları teknolojinin birçok gereksinimini karşılamak üzere üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır.

İnsan hayatını kolaylaştıran, yaşam konforunu artıran, zaman kazancı sağlayan aynı zamanda ekonomik olan daha kullanışlı, verimli, hızlı ve fonksiyonel materyallere duyulan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Farklı oranlarda metallerin çeşitli metalürjik yöntemler ile bir araya getirilmesi ile üretilen ve alaşım olarak adlandırılan kompakt malzemeler birçok teknolojik ve pratik uygulama için kullanım alanına sahip bu tarz fonksiyonel malzemelerdir. Alaşımlar kendilerini oluşturan metallerin özelliklerinden çok daha farklı, üstün ve yeni özellikler gösterebilmektedir. Yine bu özellikler alaşımı oluşturan metallerin konsantrasyonunda meydana getirilecek küçük bir değişim ile üretim yöntemi ile veya fiziksel bir müdahale ile (sıcaklık, basınç vb.) çok muazzam farklılıklar gösterebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Tüm bunlar farklı uygulamalar için en ideal özelliklere sahip malzemenin geliştirilebileceği fikrinin iyice kuvvetlenmesine ve çok çeşitli alaşımların üretilmesine olanak sağlamıştır. Günümüzde metal alaşımları modern teknolojinin gereksinimlerini karşılamak üzere çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmakta olup birçok sektör için önemleri her geçen

¹Metal: yüksek elektrik ve ısı iletkenliği sahip, kendine özgü parlaklığı olan, şekillendirmeye yatkın, katyon oluşturma eğilimi yüksek, oksijenle birleşerek çoğunlukla bazik oksitler veren elementler.

gün artmaktadır. Örneğin metal alaşımları gösterdikleri düşük direnç ve yüksek geçirgenlik sayesinde elektronik sanayinde, özellikle de sensörlerde, manyetik kayıt aygıtlarında, hafıza cihazlarında, elektronik devrelerde ısı kontrolünde, sahip oldukları dayanıklılık ve korozyona karşı yüksek mukavemet dolayısıyla yapı sanayinde yaygın bir biçimde tercih edilmektedirler. Buna bağlı olarak da alaşımlara gösterilen bilimsel ve teknolojik ilgi sayesinde alaşım yelpazesi son derece genişlemiş alaşımlar kullanım amaçları veya sahip oldukları üstün özellikler vb. niteliklerine göre sınıflandırılmış ve özel isimlerle adlandırılan alaşım grupları oluşmuştur. Söz konusu bu alaşım gruplarından biri de 1903 senesinde onları ilk defa üreten Alman bilim insanı Friedrich Heusler'e atfen onun ismi ile anılan Heusler alaşımlarıdır. Friedrich Heusler Cu – Mn – Al alaşımlarının yapısal ve manyetik özelliklerini incelerken, stokiyometrik Cu₂MnAl'nin kendisini oluşturan elementlerin hiçbiri ferromanyetik olmamasına rağmen ferromanyetik olarak düzenlendiğini gözlemlemiştir (Heusler 1903, 1904; Heusler *et al.* 1903).

Kendisini oluşturan elementler ferromanyetik olmadığı halde kendisi ferromanyetik özellik gösteren Heusler alaşımları oldukça ilgi çekmiş ve kısa sürede çeşitlenmeye başlamıştır. Günümüzde Heusler alaşımları özellikle spintronik² (Felser *et al.* 2007; Graf *et al.* 2016), termoelektrik (Soutoh *et al.* 2005; Sakurada and Shutoh, 2005), süper iletken (Wernik *et al.* 1983; Winterlik *et al.* 2008, 2009), katalizör (Kojima *et al.* 2019), optoelektronik (Kieven, 2010), topolojik yalıtkan (Chadov *et al.* 2010), yarı iletken (Tobola *et al.* 1997; Nishino *et al.* 1997), şekil hafızalı materyal (Planes *et al.* 2009; Wang *et al.* 2014) gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Heusler alaşımları atomların sayısına ve değerliklerine (valenslerine³) bağlı olarak dört ayrı grupta sınıflandırılabilirler. Heusler alaşımlarından XYZ kimyasal formülüne sahip olan (NiMnSb gibi) X ve Y'nin geçiş metal atomları veya lantanitler, Z'nin ise bir metaloit⁴ olduğu ve C1_b hacim merkezli kübik⁵ yapıda düzenlenen yarı-Heusler alaşımları olarak adlandırılırlar. İkinci grup; X₂YZ kompozisyonunda ve L2₁ hacim merkezli kübik yapıda düzenlenen (Co₂MnSi gibi) tam-Heusler alaşımlardır. Bu alaşımlarda da X, Y ve Z atomları yarı-Heusler'lere benzerdir ve her iki düzenlemede de genellikle X; Fe, Co, Ni, Cu gibi geçiş metallerinden biri, Y; genellikle Mn veya Ti, Cr gibi ikinci bir geçiş metali, Z ise Al, Ga, In, Sn, Sb gibi III, IV veya V grubu elementlerinden biridir (Webster *et al.* 1988). Ters-Heusler

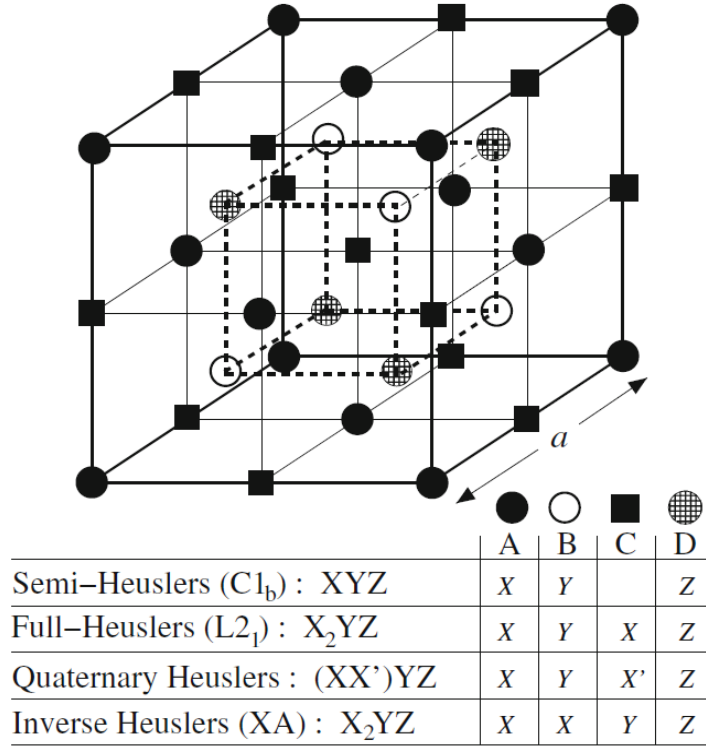
² Spintronik: Spin elektronu ile ilgili olan veya spin yük taşıma elektronu anlamalarına gelen ve elektronların spin (dönüş) durumlarını ve yüklerini kullanarak bilginin depolanması ve aktarılmasını sağlayan günümüzde gelişmekte olan katı-hal aygıtları.

³ Değerlik (Valens): Bir atomun en dış kabuğunda (valens yörüngesinde) bulunan elektronlarının sayısı.

⁴ Metalloit: Yarı metal, özellikleri (işlenebilirlik, süneklik, iletkenlik, parlaklık vb.) metaller ile katı ametaller veya yarı iletkenler arasında olan Periyodik Tablonun 3A – 6A gruplarında yer alan elementler. Metallerle tepkime verirken ametal, ametallerle tepkime verirken metal gibi davranırlar, genellikle kristal yapıda bulunurlar, yarı iletken özellikleri vardır, diyot ve transistör gibi modern elektronuğun temel parçalarının ham maddeleridirler.

⁵ Hacim merkezli kübik (bcc): birim hücresi bir küp biçiminde olan kristal sistemde hacim merkezinde ve her bir köşede bir atom bulunur (Köşelerde bulunana sekiz atomun yanı sıra hacim merkezinde de bir atom). Metallerde yüzey merkezli kübik yapı ile birlikte yaygın olarak bulunan bir kristal yapıdır.

alaşımları; tam Heusler alaşımlarına benzer ancak bunlarda X'in değeri Y'nin değerinden daha küçüktür ve kafes yapıları XA veya $X\alpha$ olarak bilinir. Son olarak (CoFe)TiSi gibi sıralı-dörtlü (ordered-quaternary) Heusler alaşımları $(XX')YZ$ kimyasal formülüne sahiptirler ve LiMgPdSn yapısında kristalleşirler. Tüm gruplarda, Z bir metaloit atomudur. (Ziebeck and Neumann, 2001). Heusler alaşımlarının yapısal şematik gösterimleri Şekil 1'de ve bu alaşımları oluşturan elementlerin temel kompozisyonları, alaşımların manyetik özellikleri ve kristal yapıları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Yarı ve tam Heusler alaşımlarının çeşitli yapılarının şematik gösterimi (Galanakis 2016).

Tablo 1. Heusler Alaşımlarını Oluşturan Elementlerin Temel Kompozisyonları, Alaşımların Manyetik Durumları ve Kristal Yapıları (Galanakis 2016).

Y	X	Z	Manyetik durum	Kristal yapı
V	Mn	Al, Ga	FM*	L2 ₁
	Fe	Al, Ga	FM	L2 ₁
	Fe	Si	PM	L2 ₁
	Co	Al, Ga, Sn	FM	L2 ₁
Cr	Co	Al, Ga	FM	L2 ₁
	Fe	Al, Ga	FM	L2 ₁
Mn	Cu	Al, In, Sn	FM	L2 ₁
	Cu	Sb	AFM	C1 _b
	Ni	Al	AFM	B2
	Ni	Sb	FM	C1 _b
	Ni	Al, Ga, In, Sn, Sb	FM	L2 ₁
	Co	Al, Si, Ga, Ge, Sn	FM	L2 ₁
	Co	Sb	FM*	C1 _b
	Fe	Al, Si	FM	L2 ₁
	Pd	Al	AFM	B2
	Pd	In	AFM	L2 ₁ -B2
	Pd	Ge, Sn, Sb	FM	L2 ₁
	Pd	Sb	FM	C1 _b
	Pd	Te	AFM	C1 _b
	Rh	Al, Ga, In	FM	B2
	Rh	Ge, Sn, Pb	FM	L2 ₁
	Rh	Sb	FM	C1 _b
	Ru	Ga	FM	C1 _b
	Au	Zn, Cu	AFM	B2
	Au	Al, Ga, In	AFM	L2 ₁
	Au	Sb	FM	C1 _b
	Pt	Al, Ga	AFM	L2 ₁
	Pt	Ga	FM	C1 _b
	Ir	Al	AFM	L2 ₁
	Ir	Ga	AFM	C1 _b
Fe	Fe	Al, Si	FM	D0 ₃
	Co	Al, Si, Ga	FM	L2 ₁
Co	Fe	Ga	FM	L2 ₁
Ni	Fe	Al, Ga	PM	L2 ₁

Heusler alaşımlarını oluşturmak üzere bir araya gelen elementler ferromanyetik olmamalarına rağmen bazı Heusler alaşımlarının ferromanyetik özellik göstermeleri ve ferromanyetik özelliklerinin değiştirilebilmesi Heusler tipi alaşımların en önemli üstünlüklerinden biridir. Tam Heusler alaşımları çok çeşitli ve ilginç manyetik özellikler göstermektedirler. Örneğin şekil hafıza etkisine sahip bu alaşımlar uygun bir ısı işlemi ile ilk şekillerine ve boyutlarına geri dönebilme yeteneği sergilemektedirler. Bu özellikleri sayesinde Heusler tipi alaşımlar teknolojiye birçok alanda kullanılmaktadırlar. Öte yandan bazı yarı-

Heusler alaşımları ise metalik özelliğe sahiptirler ve bu özellik spin-kutuplu taşıma için çok aranan bir özelliktir. Spin-kutuplu sistemlerde özdirenç manyetik alanla değiştiğinden bu sistemler uygulanan manyetik alana çok duyarlıdırlar. Uygulanan elektrik ve manyetik alan veya ısısal ya da mekanik enerji ile formlarını değiştirebilme özellikleri sayesinde Heusler alaşımlarının fonksiyonel malzemeler arasında önemi her geçen gün artmaktadır.

Heusler alaşımları içeriğindeki elementler metal olmalarına rağmen, lokalize manyetik özelliklere sahip olduklarından hem atomik bozuklukların hem de elektron konsantrasyonundaki değişikliklerin manyetik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek için ideal model sistemlerdir. Heusler'in çalışmalarında ferromanyetik olmayan Cu – Mn alaşımlarına *sp* elementlerinin (Al, In, Sn, As, Sb, Bi ya da B) eklenmesi ile alaşımın ferromanyetik bir malzemeye dönüştüğünü keşfetmesine rağmen bu alaşımların kristal yapısının belirlenmesi Cu ve Mn'yi X-ışınlarını kullanarak ayırmak zor olduğundan uzun süre mümkün olmamıştır. Heusler'in 1903 yılında keşfettiği Cu₂MnAl'nin yüzey merkezli kübik (fcc)⁶ olarak düzenli bir yapıya sahip olduğu yaklaşık otuz yıl sonra açıklanabilmiştir. Heusler alaşımların yapıları ve kompozisyonları ile ilgili temel özellikleri ilk defa Potter (1929) tarafından araştırılmıştır. Potter'in Cu₂MnAl alaşımı üzerine yaptığı X-ışını analizi çalışması bu sistemlerin bütün bileşenlerinin bir fcc süper örgünün üzerinde düzenlendiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmadan sonra mikro yapının tam olarak anlaşılması ile benzer birim hcreli⁷ diğer Heusler alaşımların araştırılması çalışmaları yapılmaya başlanılmıştır. Otto Heusler (Friedrich Heusler'in oğlu) X-ışınlarını kullanarak Cu₂MnAl yapısında Mn atomlarının düzenlenmesini belirlemiştir (Heusler O., 1934). Bradley and Rodgers (1934), Cu – Mn – Al sistemini ayrıntılı olarak incelemiş ve bu alaşımlarda kimyasal düzenlenme ile manyetik özelliklerin birbirlerine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Webster and Tebble (1967) Pd₂MnIn, Pd₂MnSn ve Pd₂MnSb alaşımlarının manyetik ve kristalografik yapılarını açıklamış,  alaşımın Heusler (L₂₁) yapısına sahip olduklarını ve manyetik yapı sergilediklerini göstermişlerdir. Webster (1969), Heusler alaşımlarının manyetik özelliklerini açıklamak için kullanılan ana teoriler üzerine bir inceleme sunmuş ve önceki bazı çalışmaların sonuçlarını moleküler alan teorisi açısından tartışmıştır. Webster (1971) Co₂MnAl, Co₂MnSi, Co₂MnGa, Co₂MnGe, Co₂MnSn ve Co₂MnSb kompozisyonlarındaki ferromanyetik alaşımlar üzerine manyetik doğgunluk, X-ışını ve nötron kırınım ölçümleri yapmıştır. Bu alaşımlar manyetik momentlerin Mn dışındaki atomlarda kesin biçimde gözlendiği ilk Heusler alaşımı serisidir.

⁶ Yüzey merkezli kübik (fcc): birim hücresi bir küp biçiminde olan kristal yapı, bütün köşelerinde ve yüzey merkezlerinde birer atom barındırır (Köşelerde bulunan sekiz atomun yanında kübün altı yüzeyinde de birer atom).

⁷ Birim hücre: kristalin tekrar eden en küçük ğesi.

Bacon and Plant (1971) A_2BC veya ABC genel formuna sahip Heusler alaşımlarında kimyasal düzenlenme üzerine yaptıkları çalışmalarında X-ışını ve nötron kırınımı analizlerinin Heusler alaşımlarındaki atomların düzenlenmeleri hakkında sadece sınırlı bilgi verebildiğini dolayısı ile deneysel verilerin daha sistematik bir şekilde yorumlanmasına yönelik ilk adım olarak, bir prosedürün tanımlanması ve çeşitli alaşımlara uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Co bazlı alaşımlar Co_2TiSn , Co_2ZrSn ve Co_2HfSn 'de Sn yerleşim alanları ölçülmüş ve elde edilen sonuçların benzerliği bu alaşımların benzer dış elektron yapılarına sahip olmaları açısından yorumlanmıştır (Campbell, 1975). Suits (1976) Rh_2TSn formundaki yeni bir dizi bileşik serisinin kristal yapısı ve manyetik özelliklerini ölçmüş ve $T = Mn, Ni$ veya Cu için oda sıcaklığı yapısının tamamen kübik Heusler yapıda düzenlendiğini belirtmiştir. Ayrıca $T = V, Cr, Fe$ veya Co için Heusler yapısının istisnai derecede büyük bir dörtgen distorsiyonu olan yeni bir yapı gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu dörtgen distorsiyonun görünümü, Jahn-Teller bandının elektronik bir kararsızlığına atfedilmiştir. Webster and Ramadan (1977) $0 \leq x \leq 1$ için $Pd_2MnIn_{1-x}Sn_x$ ve $Pd_2MnSn_{1-x}Sb_x$ Heusler alaşım serileri için mıknatıslanma, duygunluk, X-ışını ve nötron kırınım ölçümleri yapmışlardır. İncelenen alaşımların tamamının Mn atomlarının bir fcc alt kafesini işgal ettiği Heusler $L2_1$ yapısı ile kimyasal olarak düzenlenmiş intermetalik bileşikler olduğunu rapor etmişlerdir. Sn/Sb serisindeki tüm alaşımların ferromanyetik olduğu ve her iki seride de artan elektron konsantrasyonuyla ferromanyetik değişim etkileşimlerinde bir artışın söz konusu olduğunu vurgulamışlardır. Webster and Ramadan (1979) tarafından bir önceki çalışmanın ikinci bölümü olarak yayınlanan çalışmada $Pd_2MnIn_{1-y}Sb_y$ ($0 < y < 1$) Heusler alaşım serisi için de mıknatıslanma, duygunluk, X-ışını ve nötron kırınım ölçümleri yapmışlardır. Tüm alaşımların Mn bölgelerinde yerleşmiş $p \cong 4,2 \mu B$ lik bir moment ile manyetik olarak düzenlendiği ve sonuçların, $Pd_2MnIn_{1-x}Sn_x$ ve $Pd_2MnIn_{1-x}Sb_x$ serilerinde rapor edilenlerle paralel olduğu belirtilmiştir. Webster and Ramadan tarafından ilk iki bölümü 1977 ve 1979'da yayımlanan çalışmanın 1980 yılında yayımlanan üçüncü bölümünde ilk iki bölümde yapılan ölçümler ve sonuçlar teyit edilmiştir. Bu çalışmada öncekilerden farklı olarak aynı alaşımlar için Pd düzeni aynı kalır iken Mn ve In/Sn veya In/Sb bölgeleri arasında maksimum düzensizlik üretmek için tasarlanmış ısısal işlem sonrasında ölçümler yapılmıştır. Bu düzensiz B2 yapıda Mn atomları aynı manyetik momentini koruyacağı ancak şimdi basit bir kübik alt yapıyı işgal edecekleri ve basit bir kübik tip olan yeni bir anti-ferromanyetik yapı oluşturacaklarını belirtmişler ve sonuçları mevcut indirekt çift rezonans değişim etkileşimleri açısından tartışmışlardır (Webster and Ramadan, 1980). Heusler alaşımları Co_2MnSn , Co_2TiSn ve Co_2TiAl 'nin elektronik yapıları SAPW (symmetrized augmented-plane-wave) yöntemi kullanılarak hesaplanmış, bant yapıları temelinde bu üç Heusler alaşımında orbital açısal momentumlarının şiddetlerini azaltıp

azaltmadıkları tartışılmıştır. Bu üç alaşımın yaygın özellikleri ve karakteristikleri onların bant yapılarında açıkça görülebileceği ve Co atomları için açıl momentumun manyetik moment ve dahili manyetik alana katkıda bulunması beklendiği vurgulanmıştır (Ishida *et al.* 1982). Groot *et al.* (1983) Ni – Mn – Sb ve Pt – Mn – Sb yarı Heusler alaşımlarında bant yapısı hesaplamaları neticesinde yarı-metalik ferromanyetizma özelliğini keşfetmişlerdir. Groot *et al.* (1983)'nın bu keşfi ile Heusler alaşımları, spintronikler üzerine çalışan bilim insanlarının da dikkatini çekmiştir. Heusler alaşımlarının yüksek Curie sıcaklıkları ve iç manyetik momentleri sayesinde oda sıcaklığında %100 spin polarizasyonu elde etmek için en iyi yarı metalik ferromanyetlerden olma potansiyeli üzerlerindeki ilgiyi daha da artırmıştır. Kübler *et al.* (1983) X_2MnY formundaki Heusler alaşımlarında manyetik momentlerin oluşumundan ve çiftleniminden sorumlu olan mikroskobik mekanizmaları tanımlamaya çalışmışlardır. Çalışmada X atomlarının (örneğin, Cu, Pd gibi) temel olarak kafes sabitini belirlemeye yararken, Y atomlarının (örneğin, Al, In, Sb gibi) Mn d-durumları arasındaki etkileşime aracılık ettiği anlaşılmıştır. Mn atomları arasında önemli bir doğrudan etkileşim yoktur, ancak Mn'nin dolu d-durumları X atomlarının d-durumları ile güçlü etkileşimleri ile de-lokalize edilmektedirler. Mıknatıslanmanın lokalize karakteri, azınlık-spin elektronların (lokal olarak tanımlanmış) Mn 3d-kabuğundan dışlanmasından kaynaklanır. Çalışmadaki analizler, Co_2MnAl , Co_2MnSn , Ni_2MnSn , Cu_2MnAl , Cu_2MnSn , Pd_2MnIn , Pd_2MnSn ve Pd_2MnSb ve Heusler alaşımları üzerine istikrar, spin-polarizasyon ve enerji-bant hesaplamaları ile yapılmış ve manyetik yapının pd-hibrid durumlarının işgaline olan hassas bağımlılığının; Webster (1971)'in bu işgalin alaşımlama ile değiştiğini ortaya koyduğu deneyleri iyi bir şekilde açıklandığı belirtilmiştir. Webster and Ziebeck (1988) Heusler alaşımların manyetik özellikleri üzerinde 3d (X) ve sp (Z) atomlarının rolünü açıklamak için dörtlü Heusler alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar sp elektron konsantrasyonunun hem manyetik momentin oluşumu hem de manyetik düzenlenmenin saptanmasında önemli olduğu göstermiş ve Ni_2MnGa Heusler alaşımında şekil hafıza etkisini açıklamışlardır. Moran-Lopez *et al.* (1994) tarafından Heusler alaşımlarının manyetik davranışları bir fcc Heisenberg sistemi ile modellenmiş ve bu model $Pd_2MnSb_xIn_{1-x}$ alaşımlarında meydana gelen faz⁸ geçişlerini tanımlamak için uygulanmıştır. Co_2MnZ (Z = sp elementleri) formundaki Heusler alaşımlarının elektronik yapıları, yarı metalik bileşikler keşfetmek için hesaplanmış ve Z'nin Si ve Ge olduğu durumlarda stokiometrik Co_2MnZ bileşiklerinin yarı metalik olduğu gösterilmiştir (Ishida *et al.* 1995). Galanakis *et al.* (2002) Co, Fe, Rh ve Ru tabanlı tam Heusler alaşımlarını incelemişler ve bu bileşiklerin

⁸ Faz: Kristal yapı malzemelerin homojen ve belirli özellikler gösteren bölgeleri, malzemenin tüm fiziksel özelliklerinin her noktada aynı olduğu bölge, belirli bir bileşim ve simetri ile karakterize edilen, kristal yapıdaki atomların belirgin bir düzenlemesi.

çoğunun yarı metalik bir davranış gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, yarı Heusler alaşımlarının aksine azınlık (minority) bandındaki enerji aralığı yarı Heusler bileşiklerinde bulunmayan Co (Fe, Rh veya Ru) bölgelerindeki lokalize durumlar nedeniyle oldukça küçük olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca tam Heusler alaşımları Slater-Pauling⁹ davranışı gösterdiğini ve birim hücre başına toplam spin manyetik momenti (M_t), toplam değerlik elektronları (Z_t) ile $M_t = Z_t - 24$ kuralına göre değiştiğini rapor etmişlerdir. Sakuraba *et al.* (2005) tarafından bir epitaksiyel $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Al} - \text{O}$ bariyeri/polikristal $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$ yapısına sahip manyetik tünel kavşakları (MTJ'ler), bir ultra yüksek vakumlu püskürtme sistemi kullanılarak imal edilmiştir. Bu çalışmada üretilen epitaksiyel Co_2MnSi alt elektrotun, çok düzenli $L2_1$ yapısı ve çok düzgün yüzey morfolojisi sergilediği ve elde edilen sonuçların teorik hesaplamalar ile tahmin edilen yarı metalik bant yapısı ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kallmayer *et al.* (2006) Co_2MnSi filmlerde Mn'nın yerine Fe katkılamanın etkilerini araştırmışlar ve deneysel olarak elde edilen spin manyetik momentlerinin, katkılamanın küçük değerleri için yarı metalik özelliklerle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmışlardır. Şerefoğlu (2006) Co_2MnGe Heusler tipi alaşımı için öz direncinin manyetik alanla değişimi, taşıyıcı yoğunluğu, Hall katsayısı, Hall mobilitesi ve I-V karakteristiklerini bilgisayar kontrollü Lake Shore Yüksek Empedans Sistemi yardımıyla incelemiştir. Galanakis and Dederichs 2006 yılında yayımlanan ve yarı metalik alaşımlar ile ilgili on bölümden oluşan kitapta yer alan kendilerine ait bölümde hem yarı Heusler alaşımları (NiMnSb gibi) hem de tam Heusler alaşımları (Co_2MnGe gibi) üzerine çalışarak her iki Heusler ailesinin temel elektronik ve manyetik özellikleri üzerine çeşitli bilgiler sunmuşlardır. Çok sayıda intermetalik Heusler alaşımının yarı metal olduğu tahmininin motivasyonu ile hazırlandığını belirttikleri bu çalışmada elektronik ve manyetik özelliklerinin anlaşılması için temel parametreleri ab-initio¹⁰ (first-principles calculations: ilk-prensip hesaplamaları olarak da bilinir) sonuçlarına dayanarak tartışılmıştır. Toplam dönme manyetik momenti M_t 'nin, tam Heusler alaşımlar için $M_t = Z_t - 24$ ve yarı Heusler için $M_t = Z_t - 18$ olacak şekilde, toplam değerlik (valens) elektronlarının sayısı, Z_t ile lineer olarak değiştiği, böylece, istenen manyetik özelliklere sahip yeni yarı metalik

⁹ Slater-Pauling kuralı: Fizikçiler [John C. Slater \(1936\)](#) ve [Linus Pauling \(1938\)](#) tarafından ortaya konan kural, birçok geçiş metalinin manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılan yararlı bir yaklaşımdır. Slater ve Pauling, iki öncü makalede ikili manyetik bileşikler durumunda spin-yukarı d-değerlik durumlarının tamamen işgal edildiğini ve bir ekstra değerlik elektronu eklendiğinde bunun sadece spin-aşağı durumlarını işgal ettiğini ve toplam spin manyetik momentinin yaklaşık 1 μ_B azaldığını göstermişlerdir Slater-Pauling kuralı, bir metal alaşımına bir element eklemenin, alaşımın doygunluk manyetizasyonunu; eklenen elementin d kabuğunun dışındaki değerlik elektronlarının sayısı ile orantılı bir miktarda azaltacağını, bunun aksine kısmen dolu bir d kabuğuna sahip elementlerin ise, manyetik momenti eksik elektronların sayısı ile orantılı bir miktarda artıracığını öngörür ([Galanakis 2023](#)).

¹⁰ Ab-initio: Deneysel verilerin kullanılmadığı, teorik ilkeler üzerine kurulu hesaplamalara genellikle ab-initio hesaplamalar veya ilk-prensip hesaplamaları denir.

alaşımlar üretmenin yolunun açıldığını vurgulamışlardır. Ayrıca yüzeylerde ve ara yüzeylerde yarı metalik karakter genel olarak kaybolursa da metalik element olarak Cr'li bileşikler için Cr yüzey momentinin büyük artışının yüzeyde yüksek bir polarizasyona yol açabileceği sonucuna ulaştıklarını paylaşmışlardır. Yarı metalik karakterleri nedeniyle en çok çalışılan Heusler alaşımları arasında olan ve yüksek Curie sıcaklıkları ile ferromanyetizma sağladığı iyi bilinen Co_2CrAl ve Co_2CrSi alaşımları Özdoğan *et al.* (2007) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada Cr anti-merkezlerinin (Co bölgelerindeki Cr atomları) yaratılmasının, bu alaşımların yarı metalik karakterini tahrip etmeden ferromanyetizmayı tetiklediği ilk prensip hesaplamaları kullanarak gösterilmiştir. Manyetik olmayan 3d-atomların, yarı metalik yarı Heusler alaşımları $\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x\text{MnSb}$ ve $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{MnSb}$ ($0 \leq x \leq 1$)'nin manyetik özellikleri üzerindeki etkisi ilk-prensip hesaplamaları kullanılarak araştırılmıştır. Her iki sistemin de manyetik faz diyagramı sıfır sıcaklıkta belirlenmiş ve ferromanyetikten anti-ferromanyetik duruma faz geçişi elde edilmiştir. Anti-ferromanyetik süper değişim çiftlenimi, gözlenen manyetik faz geçişine yol açan daha büyük Cu içeriği için önemli hale gelirken düşük Cu konsantrasyonları için ferromanyetik RKKY (Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida interaction model) benzeri değişim mekanizması hâkimdir. Her iki sistemde de manyetizmanın, yarı metalik boşluğu içindeki Fermi seviyesinin konumuna kuvvetli bir şekilde bağımlılığı gözlenmiştir ve elde edilen sonuçlar mevcut deneysel verilerle tam bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir (Galanakis *et al.* 2008). Şaşıoğlu *et al.* (2008)'e göre Heusler alaşımlarında Mn atomlarının büyük uzaysal dağılımından dolayı, farklı atomlara ait Mn 3d-durumları önemli ölçüde örtüşmez. Bu nedenle, Mn atomları arasındaki dolaylı bir değişim etkileşimi, sistemlerin ferromanyetizmasında önemli bir rol oynamalıdır. Bu düşünceden hareketle çeşitli Mn tabanlı yarı ve tam Heusler alaşımlarının ferromanyetizmasının doğasını incelemek için, bu malzemelerdeki değişim etkileşimlerinin sistematik bir ilk-prensip hesaplaması yapmışlardır. Hesaplamalar, Mn esaslı Heusler alaşımlarının manyetizmasının, iletken sp elektronlarının sayısına, spin polarizasyonlarına ve Fermi seviyesine göre işgal edilmemiş Mn 3d-durumlarının pozisyonuna güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. Hesaplamaların sonuçları, mevcut deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu vurgulamışlardır. Özdoğan (2009) tarafından Co ve Mn içeren yarı-metalik ferromanyetik Heusler alaşımların manyetik özellikleri üzerinde katkı ve düzensizliğin etkisi Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) kullanılarak çalışılmıştır. Co_2MnZ ($Z = \text{Si, Ge ve Sn}$) Heusler alaşımlarında Mn yerine Cr ve Fe eklenmesiyle yapılan küçük miktarda katkı yarı metalik özelliğin neredeyse hiç etkilenmediği sonucunu rapor etmiştir. Kafes parametrelerini ve manyetik momentlerini tahmin etmek için Toplam 810 tam Heusler alaşımlarının bir kombinasyonel taraması, sözde-potansiyeller ve düzlem dalgalar kullanarak ilk-prensipler toplam enerji hesaplamaları temelinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada

incelenen intermetaliklerin yaklaşık %60'ının içeriği oluşturan elementlere göre termokimyasal olarak kararlı olduğu ortaya çıktığı belirtilmiştir. Hesaplanan manyetik momentlerin tam Heusler fazlarının periyodik bir sistemi şeklinde sunulmuş, kompozisyonlarının ve değerlik-elektron konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak fiziksel özelliklerin periyodik trendleri verilmiştir (Gilleßen and Dronskowski, 2009). Yüce (2010) gösterdikleri çeşitli manyetik özelliklerinden dolayı yarı-Heusler alaşımlarının manyetokalorik özellikleri incelemiş, yaptığı ön çalışmalarda CoMnGe sisteminde, manyetik özelliğin Mn ve Co atomunda taşındığı bilgisine ulaşmış ve buradan hareketle CoMnGe, CoFeGe ve CoCrGe alaşımlarının manyetik, ısısal, elektriksel ve manyetokalorik özelliklerini incelemiştir. Gürlük (2012) ark ergitme yöntemi kullanarak üretilen $Ni_{54-x}Co_xFe_{19}Ga_{27}$ ($x = 3, 4$) Heusler alaşımlarının homojenliklerini TEM ile kompozisyonlarını EDX ile ve yapısal karakteristiklerini XRD ile belirlemiş daha sonra sıcaklık ve manyetik alana bağlı mıknatıslanma ölçümleri yaparak incelenen alaşımların manyetik özelliklerini elde etmiştir. Özmen (2012) magnetron saçtırma tekniğiyle farklı kalınlıklarda Si/SiO₂ alttaş¹¹ üzerine büyütülen $Co_2MnAl_{1-x}Sn_x$ ($x = 0,25; 0,5; 0,75$ ve 1) Heusler alaşım ince filmlerin manyetik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada öncelikle oda sıcaklığında ferromanyetik rezonans (FMR) ve titreştirmeli manyetometre (VSM) teknikleriyle $Co_2MnAl_{1-x}Sn_x$ ince filmlerin özelliklerinin kalınlığa bağımlılığı incelenmiştir. Daha sonra, 50 nm kalınlığa sahip filmler kristal yapı ve tavlama etkisinin manyetik özellikler üzerine etkisini araştırmak için çeşitli sıcaklıklarda tavllanmış ve üretilen alaşımların yapısal özellikleri XRD ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile elde edilmiştir. İncelenen alaşımlarda film kalınlığı ne kadar artarsa efektif mıknatıslanmanın da o kadar düşeceği ve tavlama işlemi sonucunda, $Co_2MnAl_{0,25}Sn_{0,75}$ ve $Co_2MnAl_{0,5}Sn_{0,5}$ ince filmlerinin 400°C ve 500°C 'de B2 yapısına sahip olurken, Co_2MnSn ve $Co_2MnAl_{0,75}Sn_{0,25}$ ince filmlerin hiçbir tavlama sıcaklığı değerinde B2 yapısına sahip olmadıkları sonuçlarına ulaşılmıştır. Co_2MnGe ve Co_2MnSn alaşımlarında elektronik yapı ve manyetik özelliklerin hesaplanarak yapısal optimizasyonları araştırılmıştır. Elektronik yapının hesaplanması, yerel spin yoğunluğu yaklaşımı kullanılarak FP-LAPW (full potential linearized augmented plane wave) yöntemine dayandırılarak yapılmıştır. Bant yapıları ve durumlar için yoğunluk hesaplamaları, Co_2MnGe ve Co_2MnSn 'nin yarı metalik ferromanyetik karakterde olduklarını göstermiştir (Rai and Thapa, 2012). Skaftouros *et al.* (2013) tarafından X_2YZ kimyasal formülüne sahip (burada $X = Sc, Ti, V, Cr$ veya Mn ; $Z = Al, Si$, veya As 'dir ve Y ise Ti 'dan Zn 'ye kadar değişir) ters-tam Heusler bileşikleri üzerine kapsamlı ilk-prensip hesaplamaları sunulmuştur. Bu bileşiklerin birçoğunun yarı metalik

¹¹ Alttaş: taban malzemesi, yarıiletken aygıtların imalinde kullanılan ve işlevsel üst katmanların üzerinde oluşturulduğu malzeme,

mıknatıslar olduğu belirlenmiştir ve yarı metalik görünümün tüm durumlarda toplam spin-manyetik momentin Slater-Pauling davranışlarıyla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Ana geçiş metali atomlarının kimyasal tipine bağlı olarak ters-Heusler bileşikleri için bu kuralın üç farklı çeşidi olduğu, komşu atomların d yörüngelerinin hibridizasyonu ile ilgili basit argümanlar ile bu kuralların açıklanabileceği belirtilmiştir. Heusler alaşımı Co_2FeAl (CFA) nanopartikülleri $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nin bir karışımının H_2 atmosferi altında indirgenmesiyle sentezlenmiş ve hazırlanan malzemenin karakterizasyonları XRD, SEM ve TEM teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Alaşımın L_{21} , B_2 ve A_2 tipi kristal yapısının karışık fazlarından oluştuğu ve parçacık büyüklüğünün, 10 nm ila 50 nm aralığında olduğu ve alaşımı oluşturan elementlerin kimyasal bileşiminin Co: Fe: Al için sırası ile 2,12: 1,06: 0,81 şeklinde olduğu elde edilmiştir (Kumar and Srivastava, 2013). Özdoğan *et al.* (2013) 60 adet LiMgPdSn tipi (LiMgPdSb tipi olarak da bilinirler) dörtlü Heusler bileşiğini incelemek için ab-initio elektronik yapı hesaplamalarını kullanılmışlardır. Çalışmada tüm bileşiklerin, çeşitli elektronik ve manyetik özellikler ile Slater-Pauling kuralına uyduğu, incelenen dörtlü Heusler bileşiklerinden 41 tanesinin yarı metal, 8 tanesinin çiftlenmiş sipinli yarıiletken ve 9 tanesinin yarıiletken olduğu bulunmuştur. Tüm manyetik bileşiklerin, spintronik/maniyeto-elektronik uygulamaları için uygun olmasını sağlayan yüksek Curie sıcaklıklarına sahip olmasının beklendiği belirtilmiştir. Aydoğan (2014) $\text{Pd} - \text{Mn} - \text{Sb}$ tabanlı Heusler alaşım kompozisyonları; $\text{Pd}_{50}\text{Mn}_{25+x}\text{Sb}_{25-x}$ ($x = 0, 7, 10, 13, 15$) ve $\text{Pd}_{50}\text{Mn}_{25-y}\text{Sb}_{25+y}$ ($y = 0, 5, 15$) için yapısal ve manyetik özellikleri araştırmıştır. Çalışmada ark ergitme cihazı ile hazırlanan örneklerin kompozisyonları EDX analizi ile belirlenmiş, oda sıcaklığında alınan XRD ölçümler ile kristal yapıları ve örgü parametreleri belirlenmiştir. $-8000 \text{ Oe} < H < +8000 \text{ Oe}$ manyetik alan aralığında mıknatıslanma ölçümleri ve $5 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ sıcaklık aralığında sıcaklığa ve manyetik alana (50 mT ve 150 mT) bağlı mıknatıslanma ölçümleri ile örneklerin manyetik özellikleri belirlenmiştir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçümleri ile $175 \text{ K} < T < 375 \text{ K}$ sıcaklık aralığında örneklerin ısı özellikleri incelenmiştir. Turgut (2014) tarafından L_{21} yapıdaki Ni_2XGa ($X = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Ni}, \text{Sc}, \text{Ti}, \text{V}$ ve Zn) Heusler alaşımlarının elastik, elektronik ve fonon özellikleri genelleştirilmiş eğim yaklaşım ile incelenmiş, örgü sabiti, hacim modülleri belirlenmiş, alaşımların elektronik bant yapıları spin polarize durumları da dâhil edilerek sunulmuştur. Çalışmada toplam manyetik moment değerlerinin sadece Ni_2CoGa için $1,90 \mu\text{B}$ diğer tüm alaşımlar için ise 0 olarak hesaplandığı ve tüm malzemelerin fonon özellikleri açısından dinamik olarak kararsız olduğu rapor edilmiştir. Yıldırım (2014) tarafından $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34-x}\text{Cu}_x\text{In}_{16}$ ($x = 1, 3$ ve $1,5$) Heusler alaşımlarının yapısal ve manyetik özellikleri deneysel olarak incelenmiş, ulaşılan sonuçlardan hareketle manyetokalorik özelliklerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada hacimsel alaşımlar ark

ergitme fırınında saf elementlerden argon atmosferi altında su soğutmalı bakır pota kullanılarak elde edilmiş ve üretimi takiben bu alaşımların kristal yapıları XRD kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada melt spinning yöntemi ile şerit şeklinde üretilen alaşımların kompozisyon analizleri ise SEM-EDX ile yapılmıştır. Hacimsel ve şerit örneklerin mıknatıslanma ölçümlerine göre, alaşımlarda hem yapısal hem de manyetik faz geçişi gözlemlendiği, hacimsel örneklerde artan Cu miktarı ile yapısal geçiş sıcaklıkları artarken, doyum mıknatıslanması değerinde azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Ak (2014) tarafından $\text{Co}_2\text{Mn}_{1-x}\text{V}_x\text{Sb}$ ($x = 0 < x < 1$) yapısındaki Heusler bileşiklerinin kristal yapısı ve manyetik özellikleri XRD ve mıknatıslanma ölçümleri ile incelenmiş ve tüm bileşiklerin $Fm - 3m$ uzay grubuna sahip kübik AlCu_2Mn tipi kristal yapıda kristalleştiği, Co_2VSb bileşiği dışındaki tüm numunelerin ferromanyetik davranış gösterdikleri rapor edilmiştir. Ulusu (2016) Cu_2MnZ ($Z = \text{Al, Si, Ge, Ga, In, Sn, Sb}$) alaşımlarının elektronik, manyetik, elastik, yapı ve fonon özelliklerini DFT hesaplamalarından hareketle araştırmıştır. Hesaplanan örgü sabitleri, yığın modülleri, toplam manyetik momentleri ve elastik sabitlerinin mevcut deneysel sonuçlar ve daha önceki teorik sonuçlar ile uyumlu olduğunu belirtmiş, Cu_2MnAl ve Cu_2MnIn için hesaplanan fonon dispersiyon eğrilerinden bu iki alaşımların $L2_1$ tipi yapıda dinamik olarak kararlı olduğunu vurgulamıştır. Umucu (2016) tarafından $\text{Fe} - \text{Ti} - \text{Si}$ yarı ve tam Heusler alaşımlarının yapısal, elektronik, manyetik ve mekanik özellikleri genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı kullanılarak DFT MedeA paket programı ile incelenmiştir. Çalışmada yarı Heusler tipi alaşımların metalik, tam Heusler tipi alaşımların ise yarıiletken özellik gösterdiği, yarı Heusler alaşımlar manyetik özelliğe sahip iken tam Heusler tipinde alaşımların herhangi bir manyetik özelliğe sahip olmadığı ayrıca yarı Heusler tipi alaşımların sünek yapıda, tam Heusler tipi alaşımların ise kırılgan olduğu sonuçları paylaşılmıştır. $L2_1$ fazındaki Os_2YPb ($Y = \text{Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn}$) Heusler bileşiklerinin yapısal, elektronik, manyetik, elastik ve fonon özellikleri, sözde-potansiyel dalga metodu içerisinde korelasyon ve değiş tokuş potansiyelleri için Yerel Yoğunluk Yaklaşımı (YYY) ve Genelleştirilmiş Gradyent Yaklaşımı (GGY) kullanılarak incelemiştir. Os_2YPb 'nin hesaplanan örgü sabitleri ve toplam manyetik momentleri literatürde bulunan teorik sonuçlarla uyumlu olduğu, bileşikler elektronik bant yapısı ve durum yoğunluğu sonuçlarına göre iletken oldukları belirtilmiştir (Nazlı, 2016). Galanakis *et al.* (2016)'in ters-Heusler bileşikleri ve düzenli dörtlü Heusler bileşikleri (ayrıca LiMgPdSn -tipi olarak bilinen) üzerine geçmiş ilk-prinsip hesaplama sonuçlarını gözden geçirdikleri çalışmada tam Heusler bileşiklerinin bu iki alt ailesi arasında, birçoğunun manyetik yarı iletkenler olduğu gösterilmiştir. Bu tür materyallerin manyetik tünel kavşaklarında spin-filtre malzemeleri olarak kullanımı gibi çok yönlü uygulamalarda yer bulabileceğini vurgulamışlardır. Çiçek (2017) ark ergitme yöntemiyle ürettiği $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{46-x}\text{Al}_x\text{In}_{11}$ ($x = 0,5; 1$) Heusler alaşımlarına ısı işlem uygulamıştır. TEM

ile kompozisyonlarını kontrol ettiği alaşımların kristal yapılarını XRD ile analiz etmiş ve $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{45,5}\text{Al}_{0,5}\text{In}_{11}$ alaşımının oda sıcaklığında tetragonal yapıda kristalleşirken, $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{46}\text{Al}_1\text{In}_{11}$ alaşımının ise oda sıcaklığında kübik ve tetragonal olmak üzere iki faz içerdiğini gözlemiştir. Al katkısı alaşımların manyetik değiş tokuş parametrelerinin azaldığı, Al katkılanma oranının artması ile yapısal geçiş sıcaklıkları ve ısısal histerisizi azaldığı ve mıknatıslanma değerinde artış görüldüğü sonuçlarını rapor etmiştir. Sarıtaş (2017) ark ergitme fırını kullanılarak elde ettiği $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{46-x}\text{Cu}_x\text{In}_{11}$ ($x = 0,9; 1,3$ ve $2,3$) alaşımlarında Mn elementi yerine katkılanan farklı Cu oranlarının yapısal, manyetik ve manyetokalorik özelliklere etkilerini araştırmıştır. Çalışmada ısıtma işlemi uygulanan alaşımların kompozisyon analizi SEM-EDX ile yapılmış, kristal yapıları XRD ile tespit edilmiş, manyetik ve manyetokalorik özelliklerinin analizi ise Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) kullanılarak yapılmıştır. Kaya (2017) tarafından sırası ile ark fırını ile eriyik eğirme sistemi ile ve mekanik öğütme sistemi ile elde edilmiş külçe, şerit ve nanoparçacık formundaki $\text{Ni}(\text{Mn}, \text{X})\text{In}$ ($x = \text{Al}, \text{Cu}, \text{Si}$) Heusler alaşımlarının yapısal ve manyetik soğutma özellikleri incelenmiştir. Çalışmada şerit alaşımlara uygulanan ısıtma işlemlerinin ardından uygulanan farklı soğutma prosedürlerinin yapısal ve manyetik özellikleri fark edilir ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Şerit ve nanoparçacık alaşımlarının oda sıcaklığında hem kübik hem de tetragonal fazda kristallendiği bulunmuştur. Çalışmada alaşımların manyetik ve yapısal özellikleri PPMS (fiziksel özellikler ölçüm sistemi) ve VSM (titreşimli örnek manyetometresi) kullanılarak incelenmiş, yapısal faz dönüşümü sıcaklıklarının Mn yerine katkılanan elemente, soğutma işlemi prosedürüne ve öğütme süresine bağlılıkları incelenmiştir. Jakobsson *et al.* (2017) frozen-magnon metot ile birlikte ilk-prensip elektronik yapı hesaplamalarını uygulayarak spin boşluksuz yarı iletken (SGS: spin gapless semiconductor) tabanlı ters Heusler alaşımları Mn_2CoAl , Ti_2MnAl , Cr_2ZnSi , Ti_2CoSi ve Ti_2VAs 'da değişim etkileşimlerini, spin-dalga dağılımını, spin-dalga değişmezlik sabitlerini hesaplamışlardır. Manyetik davranışlarının yarı metalik ferromanyetik tam Heusler alaşımlarına benzer olduğu ve alt-kafesler arası değişim etkileşimlerinin manyetik temel durumun oluşumunda ve Curie sıcaklığının (T_c) belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirlemişlerdir. Çalışmada araştırmacılar ayrıca Ti_2CoSi hariç tüm bileşiklerin ferromanyetik bir temel duruma sahip oldukları, tüm bileşiklerin Curie sıcaklıklarının oda sıcaklığının çok üzerinde olduğu, Curie sıcaklığının yanı sıra Mn_2CoAl için hesaplanan mıknatıslanma eğrisinin mevcut deneysel verilerle çok iyi uyum içinde olduğunu ve bu çalışmanın, ters-Heusler tabanlı SGS'lerin manyetik özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasının önünü açmasını, spintronik ve manyeto-elektronik cihazlarda kullanım için bu malzemelere olan ilgiyi arttırmasını beklediklerini belirtmişlerdir. Ma *et al.* (2017) tarafından 378 adet XYZ yarı Heusler bileşiklerinin ($X = \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Ru}, \text{Rh}; Y = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ni}; Z = \text{Al}, \text{Ga},$

In, Si, Ge, Sn, P, As, Sb) elektronik yapıları, manyetizmaları ve yapısal kararlılıkları ilk-prensip DFT hesaplamalar ile sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar birçok parametre açısından ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Toraman (2018) manyetik soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere Ni-tabanlı Heusler alaşımların geliştirilmesini amaçlamıştır. Bu amaçla öncelikle NiMnC manyetokalorik malzemelerin geliştirilmesi için en uygun alaşım elementini ve kompozisyonu belirlemek için çeşitli teorik hesaplamalar yapmıştır. Bu hesaplama sonuçlarından hareketle, Ni – Mn – In alaşım sistemini seçerek $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{34}\text{In}_{15}$ alaşım kompozisyonu için yapısal ve manyetik analizler yapmış ve ısıtma işlem süreçlerinin $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{34}\text{In}_{15}$ Heusler alaşımının yapısal ve manyetik özelliklerine etkisini XRD, SEM, EDS ve VSM sistemleri ile analiz etmiştir. Hüsem (2018) AlCuFe ve AlCuNi tipi Heusler alaşımları kontrollü atmosfer ortamında ergitmek sureti ile dökmüş ve döküm sonrasında EDX ile kompozisyonlarını kontrol etmiştir. Dökülen alaşımlara 30, 60, 90, 120 ve 150 dk yaşlandırma işlemi uygulamış daha sonra basma, sertlik, mikroyapı, aşınma, elektriksel öz direnç ve korozyon testlerine tabi tutmuş ve elde ettiği sonuçları değerlendirerek sunmuştur. Ayhan (2018) LiX_2Y ($\text{X} = \text{Rh, Ni, Cu, Pd}$; $\text{Y} = \text{Si, Ge}$) Heusler bileşiklerinin yapı, elektronik ve manyetik özelliklerini DFT ile araştırmıştır. Dört farklı potansiyel değeri için gerçekleştirilen yapısal optimizasyondan hareketle bileşikler için birim hücre parametrelerini, toplam enerjileri ve bulk modülünü belirlemiş, en iyi sonucu veren potansiyeli tespit etmiştir. Ayhan (2018) yaptığı bu hesaplama sonuçlarından hareketle tüm alaşımların her iki spin yönelimi için metalik özellik gösterdiğini, toplam manyetik momentlerinin küçük değerler aldığını, LiRh_2Ge , LiRh_2Si , ve LiPd_2Si yapıları diyamanyetik, LiPd_2Ge , LiCu_2Ge , LiCu_2Si , LiNi_2Si ve LiNi_2Ge 'nin ise paramanyetik özellik gösterdiğini elde etmiştir. LiX_2Y yapısındaki tüm alaşımların mekanik olarak kararlı olduklarını ve bu çalışmada elde edilen sonuçların hem deneysel veriler ile hem de önceki çalışmalar ile uyumlu olduğunu rapor etmiştir. Ma *et al.* (2018) spintronik uygulamalarında kullanılabilir bileşiklerin belirlenmesi amacıyla X_2YZ kimyasal formülüne sahip ters-Heusler bileşiklerinin elektronik yapı, manyetizma ve yapısal stabilitelerini birinci prensip hesaplamaları ile elde etmişlerdir. Çalışmada incelenen Heusler bileşiklerinde X ve Y sırası ile 3d-elementlerinden Sc ve Zn, Z ise IIIA-VA elementlerinden (Al, Ga, In, Si, Ge, Sn, P, As veya Sb) biridir. Her bileşiğin atomu başına oluşum enerjisi hesaplanmış, X, Y ve Z elementleri değiştikçe oluşum enerjisinde gözlenen eğilimler ve göreceli yapısal stabilite tarif edilmiştir. Sonuçlar gelecekteki spintronik uygulamaları için potansiyel adaylarla sonuçlanan uygun sentez koşulları altında deneysel olarak gerçekleştirilebilirlik açısından değerlendirilmiştir. Ni *et al.* (2018) tarafından tamamı ile d-metalali Heusler alaşımları Zn_2YMn ($\text{Y} = \text{Fe, Co, Ni, Cu}$)'nin bölgesel tercihi, elektronik yapı, manyetik özellikler ve martensitik transformasyonu ilk-prensip hesaplamaları ile incelenmiştir.

Hesaplamalar tetragonal martensitik tip Zn_2YMn ($Y = Fe, Co, Ni, Cu$) toplam enerjiyi gevşetebileceğini ve kübik fazdan daha kararlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca kübik östenit ve tetragonal martensitik arasındaki enerji farkı, Zn_2FeMn 'de 0,31 eV kadar yüksektir ve Y atomu Fe'den Ni'ye değişirken azalmaktadır. Mn – Ni – Co – Ti alaşımları martensitik dönüşüm ve yüksek hacimli süreksizlik ile indüklenen manyetik alana sahip yeni d-metal Heusler alaşımları olarak rapor edilmiştir. Sonraki yıl Ni *et al.* (2019) $Mn_2Ni_{1,5}Ti_{0,5}$ ve $Mn_2Ni_{1,5}Co_{0,25}Ti_{0,5}$ 'deki elektronik yapı ve manyetik yapısal geçişi teorik olarak incelemiştir. Ni *et al.* (2019)'a göre bu alaşımlarda Ti için ekstra Ni / Co ikame edildiğinde, aynı sayıda Mn atomu, D (0,75; 0,75 ve 0,75) bölgesine girer. Mn (D) dönme (spin) momenti, kübik östenit fazda B (0,25; 0,25 ve 0,25) bölgesinde Mn'ninkine paraleldir ancak tetragonal martensitik fazda anti-paralel hale gelir. Daha sonra martensitik geçiş sırasında, toplam manyetik moment açıkça azalır. $Mn_2Ni_{1,5}Ti_{0,5}$ ile karşılaştırıldığında, Co'nun $Mn_2Ni_{1,5}Co_{0,25}Ti_{0,5}$ 'deki katkılanması, Mn (B) ve Mn (D) momentlerinin anti-paralel ve paralel konfigürasyonları arasındaki enerji farkını artırabilir ve böylece östenit durumda bunlar arasındaki ferromanyetik kuplajı stabilize edebilir. Durumların yoğunluğu (DOS: Density of State), yapısı ve yük yoğunluğu farkı, bunun en yakın komşulardaki Co – Mn arasındaki güçlü d-d hibridizasyonu ile ilgili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum Co-katkılamamanın ferromanyetik aktivasyon etkisinin kaynağıdır. Özdoğan *et al.* (2019) sadece 3d geçiş metal atomlarından oluşan Fe_2CrZ ve Co_2CrZ gibi (burada Z; Sc, Ti veya V gibi önceki 3d metallerinden birdir) yeni bir manyetik Heusler alaşım sınıfını ab-initio elektronik yapı hesaplamalarını kullanarak incelemiştir. Co_2CrTi ve Co_2CrV bileşiklerinin, kısa menzilli manyetik değişim etkileşimleri ve dolayısıyla oda sıcaklığının çok üzerinde nispeten yüksek Curie sıcaklığı değerleri nedeniyle sağlam manyetik özellikler gösterdikleri sonucuna varmışlardır. Dahası, bu iki bileşiğin sahip oldukları özellikler sayesinde spintronik ve manyeto-elektronik uygulamalar için çok umut verici malzemeler olduklarını belirtmişlerdir. Luo *et al.* (2020) tarafından $Fe_2V_{1-x}Ru_xSi$ ($x = 0,25; 0,5; 0,75$ ve 1) Heusler alaşımı serisi argon atmosferinde ark ergitme metodu ile sentezlenmiş ve atomik düzen, elektronik yapı ve manyetik özellikleri teorik ve deneysel olarak incelenmiş, alaşımların yapıları hem yapısal optimizasyon hem de XRD ölçümleri ile analiz edilmiştir. DOS yapısının $Fe_2V_{1-x}Ru_xSi$ 'de normal bir ferromanyetik metal karakterini gösterdiği belirlenmiştir.

Alaşım oluşturmak üzere bir araya gelen elementler ferromanyetik olmamalarına rağmen bazı Heusler alaşımlarının ferromanyetik özellik göstermeleri ve ferromanyetik özelliklerinin değiştirilebilmeleri, Heusler tipi alaşımların en önemli üstünlüklerinden biridir. Tam Heusler alaşımları çok çeşitli ve ilginç manyetik özellikler göstermektedirler ve bu

özellikleri sayesinde teknolojide birçok alanda kullanılmaktadırlar. Heusler tipi alaşımların kullanım alanları gün geçtikçe artmakta ve buna bağlı olarak bu alaşımların çeşitli özelliklerini araştırmak amacı ile birçok çalışma yapılmaktadır. Yukarıda önemli bir kısmı incelenen bu çalışmalar çoğunlukla DFT (bazı çalışmalarda YFT olarak da gösterilir) temelli geliştirilmiş özel bilgisayar programları ile tasarlanmış Heusler tipi alaşımların yapısal, elektronik ve manyetik özelliklerini belirlemek için gerekli parametrelerin hesaplanması ile ilgilidirler. Heusler alaşımları üzerine deneysel çalışmaların sayısı nispeten az olmakla birlikte son yıllarda geniş uygulama alanları bu alaşımlara ilgiyi artırmış ve deneysel çalışmaların sayısı da artmaya başlamıştır. Söz konusu deneysel çalışmalar çoğunlukla ince film formunda bu bileşikler sentezleme, yapısal optimizasyonları, termal ve mekanik özelliklerinin araştırılması, spintroniklere bunları entegre etme ve benzeri manyeto elektronik uygulamaları için modifikasyonları üzerine yoğunlaşmaktadır.

Yapılan çalışmalar ışığında, Heusler alaşımlarının manyetik, elektrik, mekanik başta olmak üzere birçok karakteristik özelliklerinin alaşım kompozisyonu ve/veya ısıl işlemle değiştirilebileceği ve kontrol edilebileceği fikri önem kazanmaktadır. Farklı ve üstün özellikleri sayesinde gün geçtikçe kullanım alanı genişleyen ve çeşitlenen Heusler alaşımları farklı sınıflara ayrılarak çalışılmaya başlanmıştır. Bu sınıflar arasında kobalt (Co) esaslı olanlar sergiledikleri üstün manyetik, elastik, elektronik ve termoelektrik özellikler, sahip olabildikleri iyi elektriksel iletkenlik, mekanik kararlılık, yüksek manyetik moment ve Curie sıcaklıkları (Kubota *et al.* 2009; Zafar *et al.* 2020; Shakil *et al.* 2020; Berri ,2020; Hoat and Naseri, 2020; Krimi and Masrour, 2022), sahip oldukları iyi termoelektrik parametreler dolayısı ile spin bazlı elektroniklerde ve yeşil enerji teknolojisinde tercih edilme olasılıkları, (Priyanka *et al.* 2022), spintronik ve termoelektrik uygulamalardaki yaygın kullanımları (Hashemifar *et al.* 2005; Saito *et al.* 2013; Ikhtiar *et al.* 2014; Bhat and Gupta, 2018; Chatterjee *et al.* 2019) gibi etkenler dolayısı ile çok ilgi çekmekte ve yoğun bir biçimde araştırılmaktadırlar. Bu tez kapsamında farklı kompozisyonlara sahip kobalt esaslı nanoyapılı yeni seri Heusler alaşımların üretimi ve karakterizasyonlarının yapılması önemsenmiştir. Üretimi planlanan bu yeni kobalt esaslı Heusler alaşımlarının $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) formlarında olmaları planlanmıştır. Bu serilerde kobalt (Co) ve alüminyum (Al) mol kesri olarak 2:1 oranında iken birinci seride mangan (Mn) ile nikel (Ni) ikinci seride ise krom (Cr) ile Ni toplamda 1 mol olacak şekilde 0,1 den 0,9'a kadar karşılıklı olarak değişmektedirler. Mangan (Mn) yer aldığı malzemenin mukavemet, işlenebilirlik ve aşınma direncini artırma gibi etkileri dolayısıyla endüstriyel alaşımların üretiminde çok tercih edilen bir geçiş metalidir. Krom (Cr) çok sert ve erime noktasının yüksek olması nedeniyle malzemelerin sertliğini artırmak için kullanılan diğer bir geçiş metalidir. Cr özellikle Ni ile birlikte kullanıldığında oluşturduğu

kromoksit tabaka sayesinde çelik yüzeylerinin film tabakası gibi kaplanmasını sağlar ve bu sayede korozyona karşı direnci artırır. Bu tür üstün nitelikleri dolayısı ile üretimi planlanan yeni alaşımlarda bu katkı elementleri özellikle seçilmişlerdir. Tercih edilen bu elementlerin yeni kombinasyonlarının sistemin manyetik özelliklerini çeşitlendireceği ve üretilecek alaşımların farklı uygulamalar için ideal birer aday olmalarını sağlayacağı beklenmektedir.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımları için alaşım yapısında bulunması gereken elementlerin farklı molar konsantrasyon bileşimleri Hume–Rothery kuralları çerçevesinde her bir alaşım özelinde belirlenmiştir. Söz konusu bu yeni seri alaşımların toz metalurjisi-basamak sinterlemesi tekniği ile üretimi planlanmıştır. Yapılan literatür araştırmasından yöntemin bu yeni alaşımları üretmek için ilk defa kullanılacağı anlaşılmıştır. Toz metalurjisi-basamak sinterlemesi tekniğinin üretim başarısında gerekliliklerin, belirleyici olabilecek işlem basamaklarının ve bu işlem basamaklarının alaşımlar üzerinde olası etkilerinin değerlendirilmesi de amaçlanmıştır. Bu sayede Heusler alaşımları üretilirken sinterleme tekniği kullanılacak ise doğru formda alaşım üretebilmek için takip edilmesi gereken prosedür ve proseslerin belirlenmesi ve paylaşılması planlanmıştır. Bu nedenle tez çalışması üretim ve karakterizasyon olmak üzere iki aşamalı olarak planlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında üretimi gerçekleştirilen nanoyapılı¹² $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımlarını karakterize edebilmek amacı ile alaşımlar Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometre (EDS), X-Işını Kırınım Difraktometre (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile analiz edilmişlerdir. Son olarak üretimi gerçekleştirilen alaşımların radyasyon zırh veya nükleer yapı materyali olarak kullanılabilirliğini değerlendirebilmek için farklı foton enerjilerinde çeşitli foton–madde etkileşim parametreleri Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) alaşımlarının belirlenen tüm karakteristikleri, özellikler üzerinde etkili olması muhtemel; alaşım içeriği ve kompozisyonu, sinterleme sıcaklığı ve basamakları ve radyasyon enerjisi vb. parametrelerin fonksiyonu olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme ışığında kobalt esaslı nanoyapılı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımların üretim proseslerine ve özelliklerine ilişkin kapsamlı bilgiler sunarak teknolojik ihtiyaçlara göre yeni alaşım tasarlama çalışmalarına ve bağlı olarak teknolojik ilerlemelere katkı sağlamak amaçlanmıştır.

¹² Nano ön eki bu malzemelerin boyutlarının nanometre (10^{-9} m) boyutunda ve kural olarak 100 nm'nin altında olduğunu belirtir. Nanoboyutlu malzemeler herhangi bir malzeme sınıfına (metal, kompozit, seramik, polimer gibi) ait olabilirler. Nano öne eki herhangi bir kimyasal ayrım kastetmeyip sadece boyut açısından bir ayrım belirtir.

KURAMSAL TEMELLER

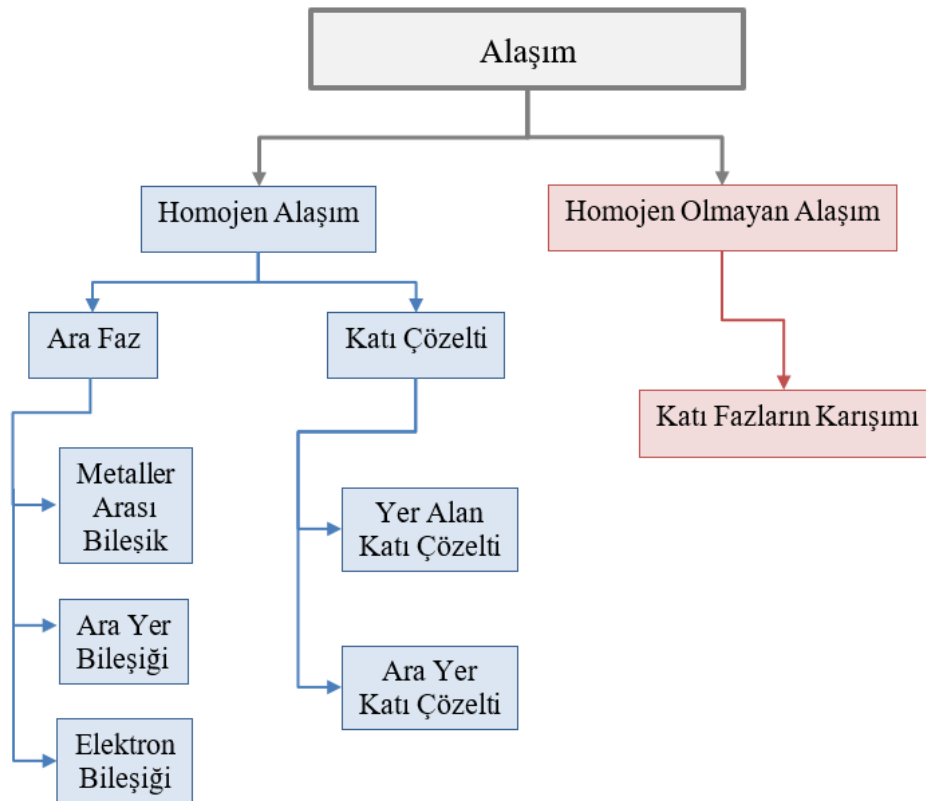
Bu tez çalışmasında üretimi yapılan ve incelenen nano-boyutlu kobalt esaslı Heusler alaşımları çok geniş bir Heusler alaşımları ailesinin sadece özel bir kısmıdır. Bu tez kapsamında $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ tipinde olan Heusler alaşımları çalışılmıştır. Heusler alaşımları ile ilgili kuramsal bilgi bir önceki bölüm olan GİRİŞ bölümünde verilmiş, teknolojik açıdan sahip oldukları önemiyet literatür taraması ile birlikte irdelenmiştir. Bununla birlikte tezin önceki bölümde belirtilen amacı doğrultusunda yapılan çalışmalar ve elde edilen bulguların değerlendirebilmesi açısından öncelikle alaşım, alaşımlama ve alaşım üretim tekniklerine ilişkin bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Bu nedenle takip eden kısımda öncelikli olarak bu kavramlar hakkında bilgi verilmiştir.

Alaşım

Alaşım, bir metalin bir veya daha fazla element (metal veya ametal) ile belirli teknikler yoluyla muhtelif oranlarda birleştirilmesi ile oluşan ve metal karakteristiği gösteren maddedir. Alaşımların yapılarına giren yani kendilerini oluşturan metallerin mevcut özelliklerinden farklı, yeni ve üstün özellikler göstermeleri onları birçok sektör için kıymetli kılmaktadır. En eski ve bilinen alaşımlar; bakır-kalay (Cu – Sn) alaşımı olan tunç ve bakır-çinko (Cu – Zn) alaşımı olan pirinçtir. Metaller sahip oldukları özellikler sayesinde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Esasen alaşım üretme işlemlerinde metallerin bazı özelliklerini değiştirmek, daha da iyileştirmek veya yeni özellikler kazandırmak için gerçekleştirilen metalürji faaliyetleridir. Bu sayede uygulamaların gerektirdiği özelliklere sahip materyaller üretilmesi mümkün olabilmektedir. Çünkü alaşımlama işlemi ile saf metallerin çeşitli özelliklerinin (fiziksel, kimyasal, mekanik vb.) değiştirilmesi ve amaca yönelik olarak düzenlenmesi gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin endüstrinin birçok uygulama için gerektirdiği daha iyi mukavemet, daha kolay şekil alma, uzama, daha göz alıcı yüzey parlaklığı, daha iyi elektriksel ve/veya ısı iletkenlik gibi özellikler, alaşımlama sırasında uygulanan işlemler (özellikle ısıtma işlemleri) ile alaşımlara kazandırılabilir. Alaşımların kullanım yeri ve amacına göre uygun malzeme seçimine olanak sağlamaları, sanayi ve teknolojik gelişmelerde önemli bir rol edinmelerine ve kullanım alanlarının her geçen gün artmasına sebep olmaktadır.

Alaşımların kazanacakları yeni özelliklerde; alaşımı oluşturan ana metal ve alaşım elementlerinin karışım oranları yanı sıra alaşım üretilirken kullanılan yönteminde etkisi söz konusudur. Yönteme bağlı olarak alaşımın oluşturulduğu ortamdaki fiziksel faktörler ve işlem

süreçleri farklılıklar gösterebilmektedir. Bu süreçlerde uygulanan işlemlerdeki küçük farklılıklar dahi alaşım özelliklerini etkileyecektir. Örneğin; toz metalürjisi ile alaşım üretilirken, alaşımlar aynı kompozisyona sahip olmasına karşın farklı basınç değerleri uygulanır ise alaşımlar farklı karakteristiklere sahip olacaktır. Alaşımlama sürecindeki benzer fiziksel faktörler kristal yapısında da değişimlere yol açabilir. Kristal yapısı farklı iki alaşım, yine kompozisyonları aynı olsa da farklı karakteristik özellikler (örneğin farklı mukavemetler) gösterecektir. Tüm metal komplekslerinde olduğu gibi alaşımlamada da farklı üretim parametrelerinin uygulanmasıyla alaşımın özelliklerinin (fiziksel ve/veya kimyasal) değişiklik göstermesinin en önemli nedenlerinden birisi bu işlemlerin atomlar arasındaki mesafenin değişmesine sebep olmasıdır. Öyle ki bir metal kompleksi üretilirken; üretim öncesi uygulanan ısı işlemler, karışımın homojenize edilme süreci, presleme sürecinde uygulanan basınç, sonrasında maruz bırakılan sıcaklık ve/veya soğutma prosesi gibi birçok parametre atomlar arasındaki mesafe üzerinde dikkate değer değişimlere neden olabilir. Metal kompleksleri üretimlerinde uygulanan parametrelere bağlı olarak bileşik veya alaşım formunda şekillenebilmektedirler. Alaşımlar homojen (tek bir fazdan oluşan) ve homojen olmayan (heterojen, faz¹³ karışımı, birden fazla faz içeren) alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Alaşımları için yapısal bir sınıflandırma Şekil 2’de verilmiştir.

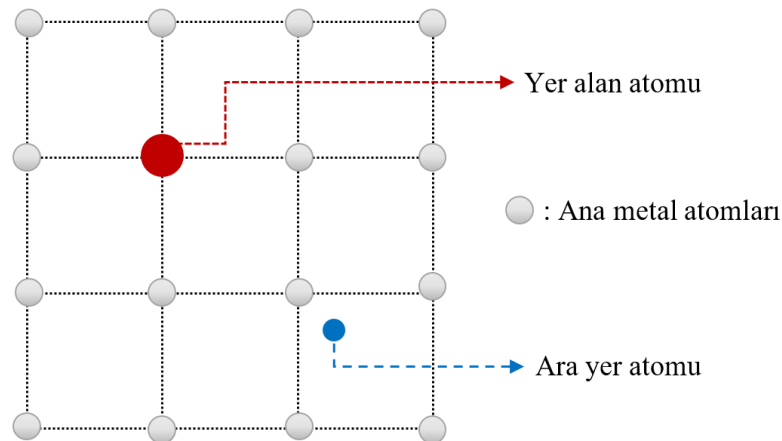


Şekil 2. Alaşımlar için yapısal sınıflandırma

¹³ Faz: Bir malzemede denge şartları altında, belirli sınırlar içinde yapı ve özellikleri aynı olan homojen bölge.

Alaşımanın nihai özelliklerini belirleyebilmek veya amaca yönelik alaşım üretebilmek için alaşıma oluşturacak elementlerin özelliklerinin de iyi bilinmesi önemlidir. Çünkü alaşım içyapısının düzenlenmesi ve hangi fazlardan oluşacağı alaşıma oluşturan elementlerin çeşitli özelliklerine (elektron konfigürasyonu, elektronegatiflik, atomik çap, kafes yapısı vb.) bağlı olarak ortaya çıkacaktır. Alaşım elementlerinin alaşım içerisindeki miktarları (oranları) da alaşımanın kazanacağı özellikler üzerinde etkili olacaktır. Alaşımların oluşurken sözü edilen bu özelliklere ve üretim biçimine bağlı olarak içyapıları katı eriyik, ayrı ayrı kristaller veya katılaşma biçiminde meydana gelebilir.

Katı formdaki maddelerin çözeltileri de uygun sıcaklıklarda tıpkı sıvı ve gaz çözeltilerde olduğu gibi homojen bir çözelti halini alabilirler. Katı eriyik olarak da adlandırılan bu yapılar, iki ya da daha fazla elementin tek fazlı bir yapı içerisinde çözünmesiyle oluşan ve belirli bir kristal yapıya sahip olan katı malzemelerdir. Bir çözelti içerisindeki yüzde oranı yüksek olan ve çözücü (veya çözen) ve oranı düşük olup çözünen olarak adlandırılan iki bileşenden oluşur. Katı eriyik oluşurken ana elementin (çözücünün) çözebileceği element için bir üst sınır vardır ve bu sınır ancak dış bir fiziksel müdahale (örneğin sıcaklık artışı) ile değiştirilebilir. Bu sınırlamadan dolayı alaşım oluşumunda çözücü ana metal kafes¹⁴ yapısı içerisinde ancak belirli sayıda çözünen element barındırabilir. Çözünen atomlarının, çözücünün (ana metalin) kafes sistemindeki yerleşimi iki şekilde olabilir (Şekil 3). Bu yerleşime göre metalik katı eriyikler; ara yer katı eriyiği ve yer alan katı eriyiği olmak üzere iki tip olurlar. Yer alan katı eriyiği (asal yer katı eriyiği olarak da adlandırılır) çözünenin atomlarının çözen atomlarının yerini aldığı durumdur. Bununla birlikte çözünen metal atomlarının yarıçapının çözücü atomlarının yarıçapından çok küçük olduğu durumda ara yer katı çözeltisi meydana gelir.



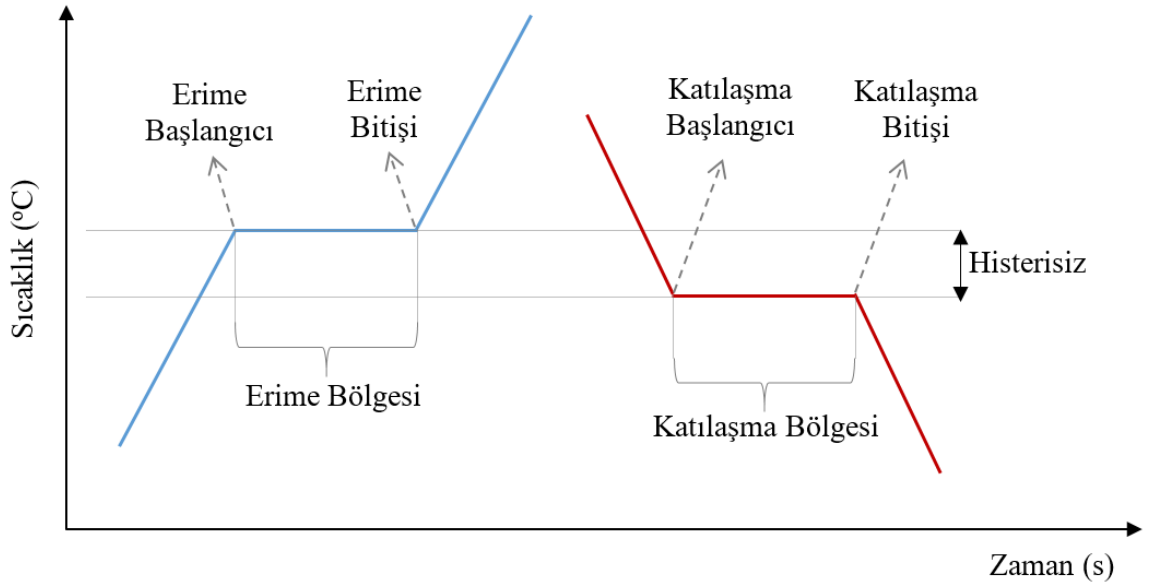
Şekil 3. Katı eriyikte yer alan ve ara yer atomları

¹⁴ Kafes kavramı kristal yapılardan bahsederken kullanılır ve kristal yapılarda atomların üç boyutlu dizilişlerinde bulundukları yerlere (ya da küre merkezlerine) karşılık gelen noktaları ifade eder.

Ana fazda (denge halinde) malzemenin kristal yapısı değişmez. Bu denge halinde homojen bir biçimde dizilmiş olan atomlar belirli bir faz meydana getirirler. Bununla birlikte katı eriyikler, bileşim (içerik), sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişik fazlarda bulunabilirler. Çünkü fazların oluşmasında ve dönüşümündeki temel etken enerjidir ve bu parametrelerin her birindeki değişim enerji içeriğini değiştirecektir. Koşullardaki bu değişim ile mevcut denge bozulur ve atomların daha düşük enerji gerektiren başka denge konumlarına geçerek farklı biçimde dizilmesi ile yeni bir faz oluşur.

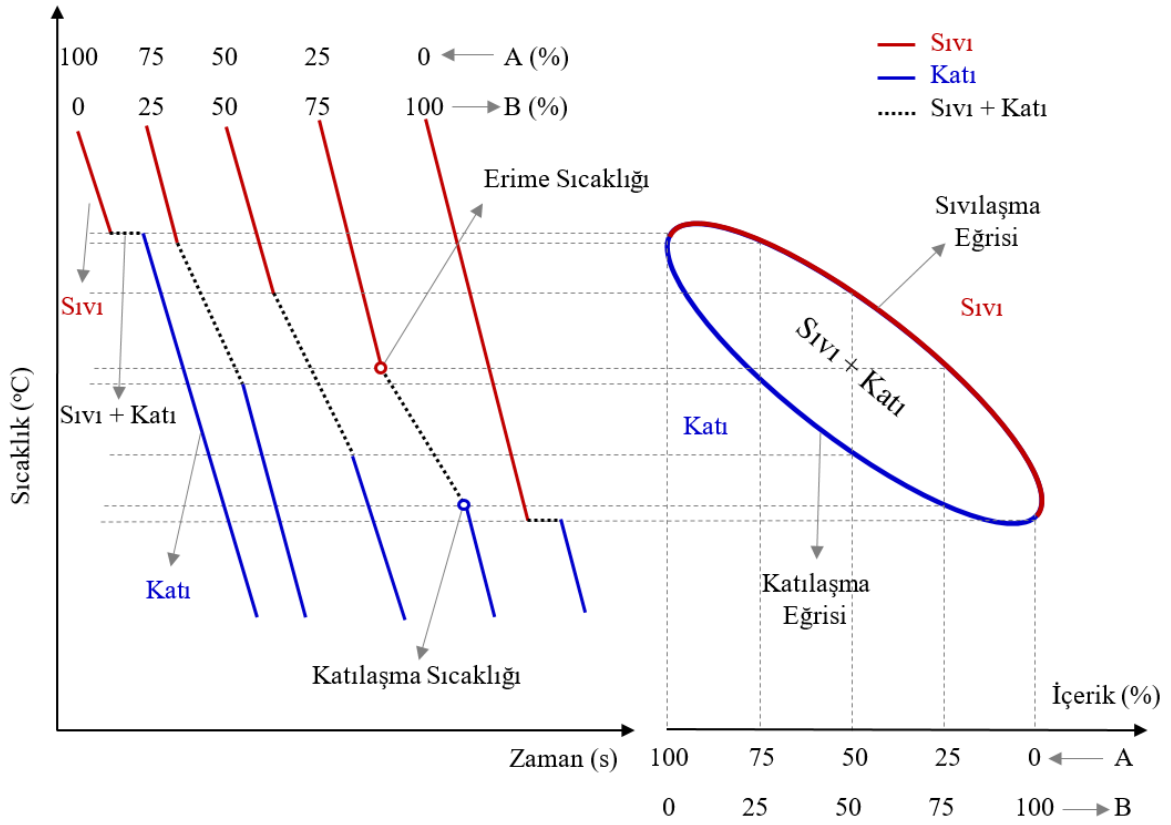
Bir metale dışardan ısı verildiğinde metal atomları daha fazla titreşecek yani atomun kinetik enerjisi artacaktır. Doğal olarak daha geniş bir hacme ihtiyaç duyacak olan madde genişleyecektir. Isıl işlem sırasında metal ergime sıcaklığına ulaştığında çok fazla artan atomik titreşim atomları belirli bir kafes yapıda tutan kuvvetleri yenecek ve atomları düzensiz bir yapıya itecektir. Artık sıcaklığın sabit kaldığı ve tamamlanması için belirli bir sürenin geçmesi gereken ergime işlemi başlamıştır. Eriğin çevresinden alması gereken ısıнын kaynağı aslında titreşim hareketi yapan atomlardır. Dolayısı ile biraz önce kinetik enerjilerinin olabileceği en üst değerine ulaşan atomlar artık kinetik enerji kaybetmeye başlayacaktır. Süreç devam ederken katılaşma noktasına varıldığında hareketlilik artık çok azalacak ve katılaşma başlayacaktır.

Sıcaklık; katılaşma sıcaklığı altında iken, titreşim hareketi yavaşlayan (hareketsizleşen) atomlar, bir merkez etrafında toplanarak kristal kafesini oluştururlar. Bu esnada toplam atom sayısı devamlı artar ve bağlı olarak kristal yapı büyür. Söz konusu bu büyüme, yapıdaki bir kristal tanesi, bir diğer komşu kristalle temas edinceye kadar sürer. Kafes yapı içerisinde ancak sınırlı ve küçük hareketler yapabilen eriyik atomları büyümekte olan bir kristale bağlandıklarında, titreşim hareketleri aniden azalır ve kinetik enerji düşer. Enerji kaybolmayacağından atomların hareketinden kaynaklı mekanik enerjinin bir kısmı kalacaktır. İlgili malzeme için kristalizasyon enerjisi olarak adlandırılan bu kalan enerji eriyik içerisinde ilk kristal oluşmaya başlayınca bir miktar sıcaklık artışına neden olur. Sıcaklık artışına bağlı olarak artık katılaşma sıcaklık noktasının üzerine çıkılır kristal oluşumu ve büyümesi durur. Erime ve katılaşma süreçlerinin gerçekleşme mekanizması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Erime ve katılma süreçlerinin gerçekleşme mekanizması

Birçok metal ve alaşım katılma işlemi sonrasında kristal yapılarını değiştirirler ve bu esnada bir değişim ısı ortaya çıkar. Söz konusu bu ısı değişimlerinin gerçekleştiği sıcaklıklar belirlenerek ilgilenilen materyal analiz edilebilir. Bu analizde (termik analiz olarak adlandırılabilir) metal veya alaşım tamamen eriyene kadar çok yavaş bir biçimde ısıtılırken belirli aralıklar ile sıcaklık ölçümleri yapılır. Materyal tamamen eridikten sonra bu kez çok yavaş bir soğutma işlemi başlatılır ve yine belirli aralıklarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilir. Daha sonra ölçüm değerleri ile ilgili malzeme için Sıcaklık – Zaman diyagramı oluşturulur. Bu diyagramlar ilgilenilen malzeme için denge diyagramı olarak adlandırılır. Bu diyagramda ısıtma ve soğutma esnasında değişim eğrisinde oluşan yatay kısımlara durak noktası denir. Isıtma ve soğutma işlemleri çok yavaş bir şekilde gerçekleştirildiğinde erime ve katılma bölgeleri (Şekil 4’de değişim eğrisinin yatay kısmı) hemen hemen eşittir. Bununla birlikte aradaki küçük fark histerisiz bölgesini oluşturur. Bir katı eriyik alaşım (örneğin A_xB_{100-x} formunda) için denge diyagramları iki dönüm noktasına sahip olur. Şekil 5’te gösterildiği gibi denge diyagramında oluşan alanda katı ve sıvı fazlar birlikte bulunurlar.



Şekil 5. A_xB_{100-x} formundaki katı eriyik alaşım için denge diyagramı

Kapalı alanın üst sınırını oluşturan eğri sıvılaşma, alt sınırını oluşturan eğri ise katılma sınırlarını belirler (Şekil 5). Bu bölgenin üstünde bulunana kısımda tamamen sıvı halde bulunan alaşım soğuma ile kristalleşmeye başlar. Devam eden soğuma ile birlikte kristalleşme oranı giderek artar ve bölgenin altına inildiğinde alaşım artık tamamen katılaşır. Alaşım formatındaki metal malzemelerin karakteristik özellikleri katılma (kristalleşme) sırasında oluşan içyapı ile belirlenir. Bir fazın başka bir faza dönüşmesi esnasında değişen dış koşullar nedeni ile atomik denge bozulur, içyapı değişir ve başlangıçtakinden farklı yeni bir faza geçilir. Alaşımın özellikleri katılma süreci iyi bilinerek kontrol edilebilir. Katı eriyik alaşım kendinin oluşturan elementlerden farklı özellikler gösterirler. Örneğin, Bakır – Nikel (Cu – Ni) katı eriyik alaşımında bakırın kafes yapısına, nikel ara yer atomlarının girmesiyle bakırdan daha yüksek bir mukavemet elde edilir.

Alaşımın üretilirken genellikle içerikte miktarı fazla olan metal asıl metal ve alaşımı oluşturmak üzere içeriğe karıştırılan diğer elementler ise alaşım elementleri (veya elemanları) olarak adlandırılırlar. Herhangi bir metalin başka bir elementi hangi oranda çözebileceği (veya bir elementin bir metal içerisinde hangi oranda çözünebileceği) sonuçta oluşacak malzemenin türü ve yapısı üzerinde belirleyici olacaktır. Çözme (veya çözünme) koşulları metal alaşımları üzerine yaptığı önemli çalışmalar ile bilinen William Hume Rothery (1899 – 1968) tarafından

geliştirilen ve Hume–Rothery kuralları olarak bilinen kurallar ile belirlenir. Bu kurallar bir metalin başka bir metali eritme yeteneğini (veya bir kristalin başka bir kristali ne oranda çözeceğini) ve sonuçta ne tür bir malzeme üretileceğini tayin edici etkenleri tanımlar. Hume–Rothery kurallarına göre aşağıda sıralanan faktörleri yerine getiren en az iki metal her bileşim¹⁵ oranında katı eriyik oluşturabilirler.

1. Kafes veya kristal yapı faktörü (kafes yapısı benzerliği)
2. Atomik boyut faktörü (atomik yarıçapların yakınlığı)
3. Elektronegatiflik faktörü (elektronegatiflikler arasındaki fark)
4. Değerlik faktörü (valens elektron sayılarının aynılığı)

İlk sırada verilen Hume–Rothery kuralına göre alaşımı oluşturacak metallerin birbirlerini her oranda eritebilen katı eriyik oluşturabilmeleri için, bu metallere ait kristallerin aynı kafes yapılarına sahip olmaları gerekir. İlgili kristallerin kafes yapılarının (kristal yapılarının) yakınlık derecesi çözme (çözünme) mertebesini belirleyen en önemli faktördür. Kafes yapıları bağlı olarak atomlar arasındaki çap farkı artarken katı eriyik alanı daralacak ve çözme yeteneği azalacaktır. Kristal yapıları aynı olan çözen ve çözünen iyi bir alaşım oluştururken, kristal yapıları birbirinden tamamen farklı iki element ise alaşım oluşturmaz. İkinci sırada verilen Hume–Rothery kuralına göre alaşımı oluşturan bileşenlerin atomik boyutları (yani yarıçapları) arasındaki fark ne kadar küçük olursa alaşım oluşumu o denli kolay olur. Katı çözeltide kayda değer miktarda çözünen atom elde edebilmek için atomik yarıçaplar arasındaki fark için üst sınır %15 olarak kabul edilir ($[(r_{\text{çözünen}} - r_{\text{çözen}})/r_{\text{çözen}}] * 100 \% \leq 15 \%$). Aynı atomik yarıçaplara sahip elementler alaşım oluşumu ihtimali hayli fazla iken fark arttıkça bu ihtimal azalır ve boyut farkı %15'i geçtiğinde artık iki elementin birbiri içinde çözünmesi (veya yer değiştirme miktarı) çok sınırlı olur ve alaşım oluşma ihtimali neredeyse ortadan kalkar. Alaşım oluşturacak metallerin (çözen ve çözünen atomlarının) elektronegatiflik¹⁶ değerlerinin birbirine yakın olması gerekir. Üçüncü Hume–Rothery kuralına göre; alaşımı oluşturacak atomların elektronegatiflikleri ne kadar yakın ise kimyasal ilgileri o oranda az ve katı eriyik oluşturma eğilimleri de o kadar fazla olacaktır. Söz konusu atomların elektronegatiflik değerleri arasındaki farkın büyük olması durumunda ise atomlar katı çözelti oluşturmak yerine kimyasal bileşik oluşturacaklardır. Dördüncü Hume–Rothery kuralına göre; çözücü ve çözünen atomların değerliklerinin

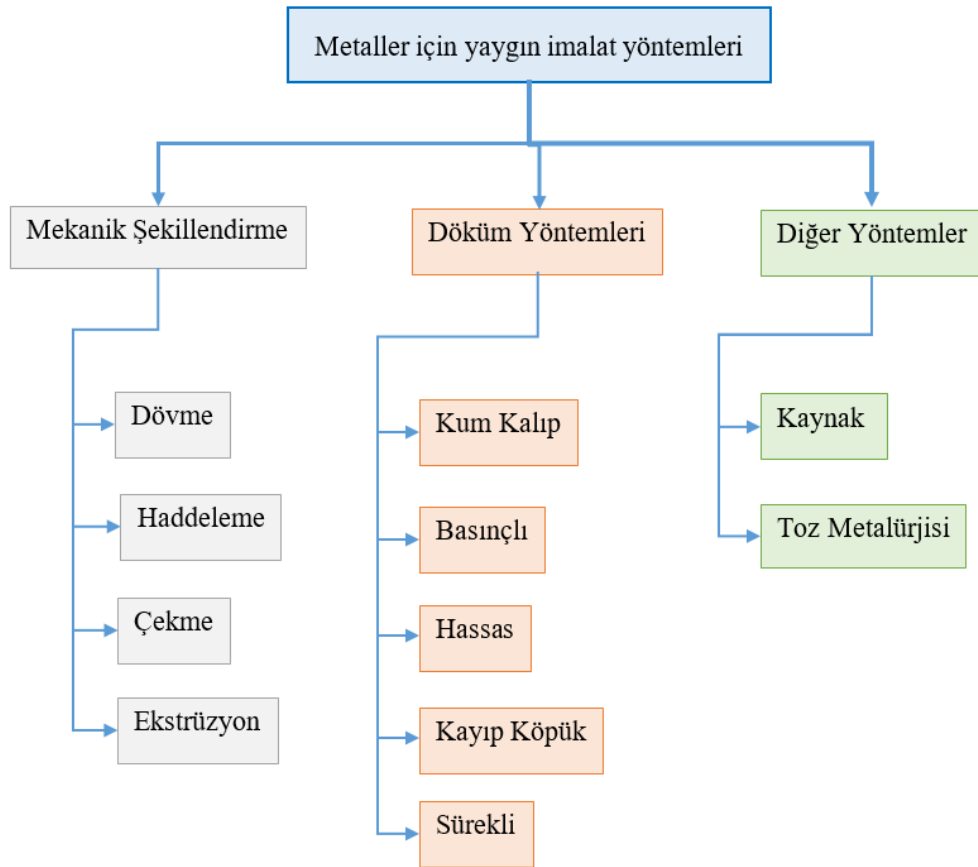
¹⁵ Tezin tamamında bileşim, konsantrasyon, içerik, kompozisyon terimlerinin aynı anlama sahip oldukları kabul edilerek zaman zaman birbirleri yerine kullanılmışlardır. Bu terimler ile belirli bir elementin toplam alaşım içindeki bağl oranı kastedilmiştir.

¹⁶ Elektronegatiflik: bir bağın oluşumunda kullanılan elektronların bağı oluşturan atomların her biri tarafından çekilme gücünün bir ifadesidir.

(valenslerinin) aynı veya mümkün olduğu kadar yakın olması gerekir. Değerliklerin aynı olduğu durumda maksimum çözünürlük sağlanır ve değerlikler arasındaki fark büyüdükçe çözünürlük o ölçekte azalır. Bununla birlikte diğer faktörler sağlandığında bir metal değerliği kendinden daha yüksek olan diğer bir metali çözmeye daha yatkındır. Yani alaşım oluşurken düşük değerlikli bir metal içerisinde yer alan daha yüksek değerlikli bir metali daha fazla eritir. Bu durumda değerlik elektron sayılarının artması katı eriyik bölgesinin genişlemesine yol açacağından daha iyi bir katı eriyik elde edilir.

Toz Metalürjisi

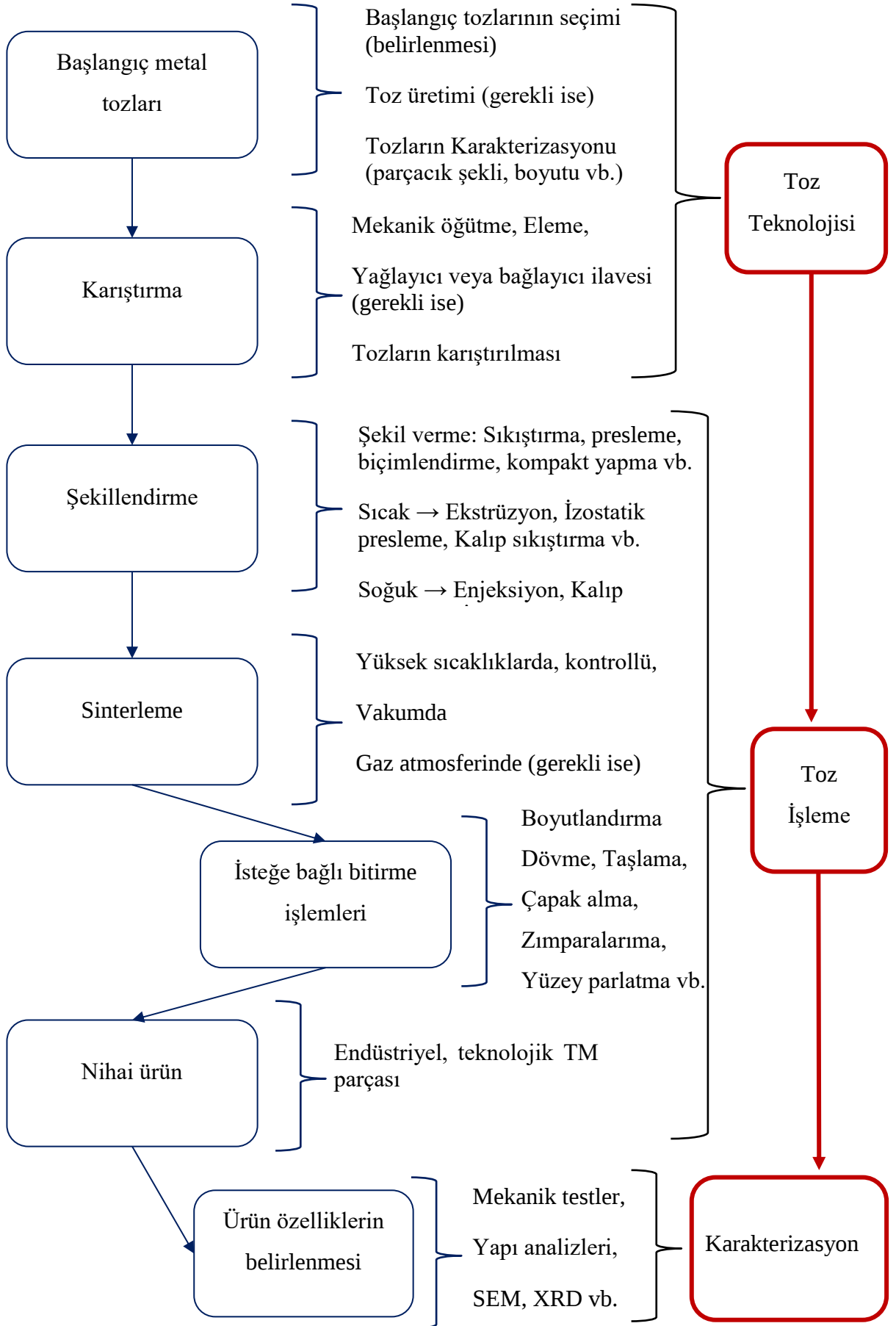
Metallerin (metal tozlarının) çeşitli amaçlar ile kullanımı dünya tarihinin çok erken dönemlerine kadar gitmektedir. Metallerden daha fonksiyonel malzemeler üretmek amacı ile uygulanan çok çeşitli imalat yöntemleri vardır (Şekil 6).



Şekil 6. Metallerde uygulanan yaygın imalat yöntemleri

Metaller için yaygın olarak kullanılan ve iyi bilinen imalat yöntemlerinden Toz metalürjisi (TM) tarihsel olarak en eski imal usullerinden biridir. İnkalar mücevhercilik için altın tozlarını erittiler, Mısırlılar milattan önce 3000 yıllarında demir tozlarını kullandılar. TM 1800’lü yıllarda kullanımı başladı ve zamanla sağladığı ekonomik fayda, çok zor ve kompleks parçaların üretimindeki başarısı, amaca uygun şekillendirebilme imkânı gibi etkenler, TM’nin

önemini artırdı (German, 1997). TM toz halindeki metallerin üretimini ve çeşitli işlemler (sinterleme olarak bilinen işlem gibi) bu tür tozlardan faydalı nesnelerin üretilmesini kapsar. Günümüzde birçok durumda sinterlenmiş bileşenler, sinterlenmiş parçalar veya TM parçalar olarak adlandırılan münferit mühendislik bileşenleri, ayrım gözetmeksizin doğrudan TM süreçleri ile üretilmektedir. Buna bağlı olarak, son zamanlarda büyük endüstriyel potansiyele sahip TM alanında bilimsel ve teknolojik gelişmeler hızlanmıştır. TM işlemi, tozun normalde bir kap içinde sıkıştırılarak, güvenli bir şekilde işlenmesini sağlamak için yeterli kohezyona sahip bir kompaktın üretilmesini ve ardından kompaktın, genellikle koruyucu bir atmosferde, ana maddenin erime noktasının altındaki bir sıcaklığa ısıtılmasını içerir. Sinterleme olarak adlandırılan bu ısıtma adımı sırasında bireysel parçacıkların birbirine kaynaklanır ve amaçlanan kullanım için malzemeye yeterli mukavemet vb. Üstün özellikler kazandırılır. TM ürünlerinin imalatındaki temel prosedür Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Toz metalürjisi temel üretim prosedürü.

TM'nin genellikle toz teknolojisi olarak adlandırılan ilk aşaması başlangıç tozlarının morfolojisi ile ilgilidir ve bu aşamada tozların üretim teknikleri, büyüklükleri, şekilleri, sınıflandırmaları ve karakterizasyonları önemlidir. Çünkü TM'de kullanılan tozların sahip oldukları başlangıç özellikleri bu yöntem ile imal edilen parçaların nihai özelliklerinde belirleyici bir role sahip olacaktır. Tozların bazı önemli özellikleri ve bunların etki ettikleri bazı önemli faktörler Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. Tozların Bazı Önemli Özellikleri ve Bunların Etki Ettikleri Bazı Önemli Faktörler

Önemli toz özelliği	Etki ettiği faktörler
Parçacık (toz) boyutu	→ Görünür yoğunluk
Boyutsal dağılım	→ Toz akışkanlığı
Parçacık (toz) şekli	→ Görünür yoğunluk, görünür dayanım
Kimyasal kompozisyon	→ Sinterleme sonrası malzeme mukavemeti ve sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	→ Sinterleme
Mikro yapı	→ Şekillendirilebilirlik ve tokluk

Tozlar, parçacık büyüklüğü, yüzey yapısı, yüzey özellikleri, sıkıştırılabilirlik, akışkanlık, karışabilirlik gibi birçok parametre ile karakterize edilmektedir. Parçacıkların sahip olduğu akışkanlık numunenin toz olarak tanımlanabilmesi için önemlidir. İnce toz parçacıkları belli bir hareket kabiliyetine sahip olmalıdır. Bu sebeple TM'de kullanılacak tozların karakterizasyonu ve özelliklerinin anlaşılması önemli bir basamaktır. Tozların özellikleri genellikle fiziksel özellikler ve teknolojik özellikler olmak üzere iki grup altında toplanarak değerlendirilir.

Tozun şekli, büyüklük dağılımı, safsızlığı ve yüzey alanı vb. fiziksel, tozun akıcılığı, sıkıştırılabilirliği, görünür ve vurgu yoğunluğu gibi parametreleri ise teknolojik özelliklerini oluşturur. Bu özellikler üretilen malzemenin üretim sonrası davranışlarına (mukavemet gibi) doğrudan etki edebilirler. Toz karakterizasyonunda ortalama parçacık büyüklüğü, büyüklük dağılımı ve parçacık şekli de önemlidir. Genellikle toz, birbirinden farklı büyüklük ve şekle sahip parçacıklardan meydana gelmektedir ve doğru karakterizasyon için toz parçacıklarının bu bilgileri doğru tespit edilmelidir (Arai, 2012). Özellikle toz parçacıklarının şekli, tozun akışkanlığını, yoğunluğunu ve paketlenilebilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir (Alım, 2017). Düşük sıcaklıklarda tane boyutunun malzemelerin mekanik davranışları üzerine etkisi olumlu yöndedir. İnce taneli yapı hem dayanımı hem de tokluğu artırır. İnce taneli bir metalin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri (mukavemet, tokluk gibi) genellikle kaba taneli haline göre daha yüksektir.

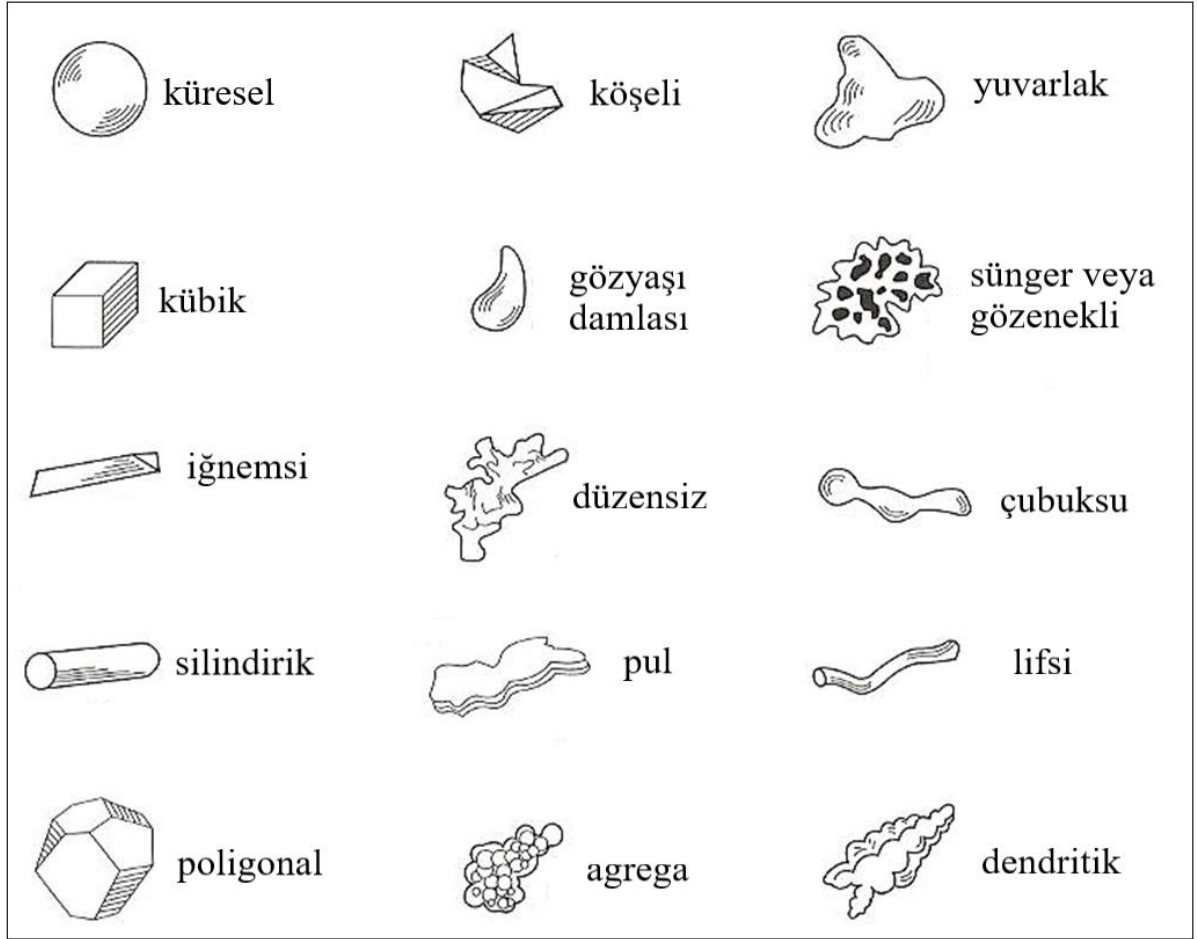
Tozların parçacık büyüklüklerine göre sınıflandırılması ile ilgili olarak çeşitli kurum ve kuruluşlarca farklı değerlendirmelere göre elde edilmiş ve onaylanmış sınıflandırmaları vardır. Bu sınıflandırmalar birçok sektörde doğrudan kullanılabilirken özellikle bazı endüstriyel sektörlerde özel olarak tekrar tanımlanmaları gerekebilmektedir. USP (*United States Pharmacopeial*) tarafından yapılan toz inceliğine göre düzenlenmiş bir standart “Toz İnceliğinin Tanımlanmış Sınıflandırması” (<811> Powder Fineness) ismi ile yayınlanmıştır (USP 2012). Toz inceliğinin tanımlanmış sınıflandırması, parçacık boyutunun aksine elek açıklığına dayalıdır ve tozun içerdiği parçacık büyüklüklerinin kümülatif dağılımından yola çıkılarak yapılmaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. Toz İnceliğinin Tanımlanmış Sınıflandırması (USP, 2012)

Açıklayıcı terim (Adlandırma)	Medyan parçacık büyüklüğü ¹⁷ (μm)
<i>Kalın (coarse)</i>	> 355
<i>Kısmen ince (moderately fine)</i>	180 – 355
<i>İnce (fine)</i>	125 – 180
<i>Çok ince (very fine)</i>	≤ 125

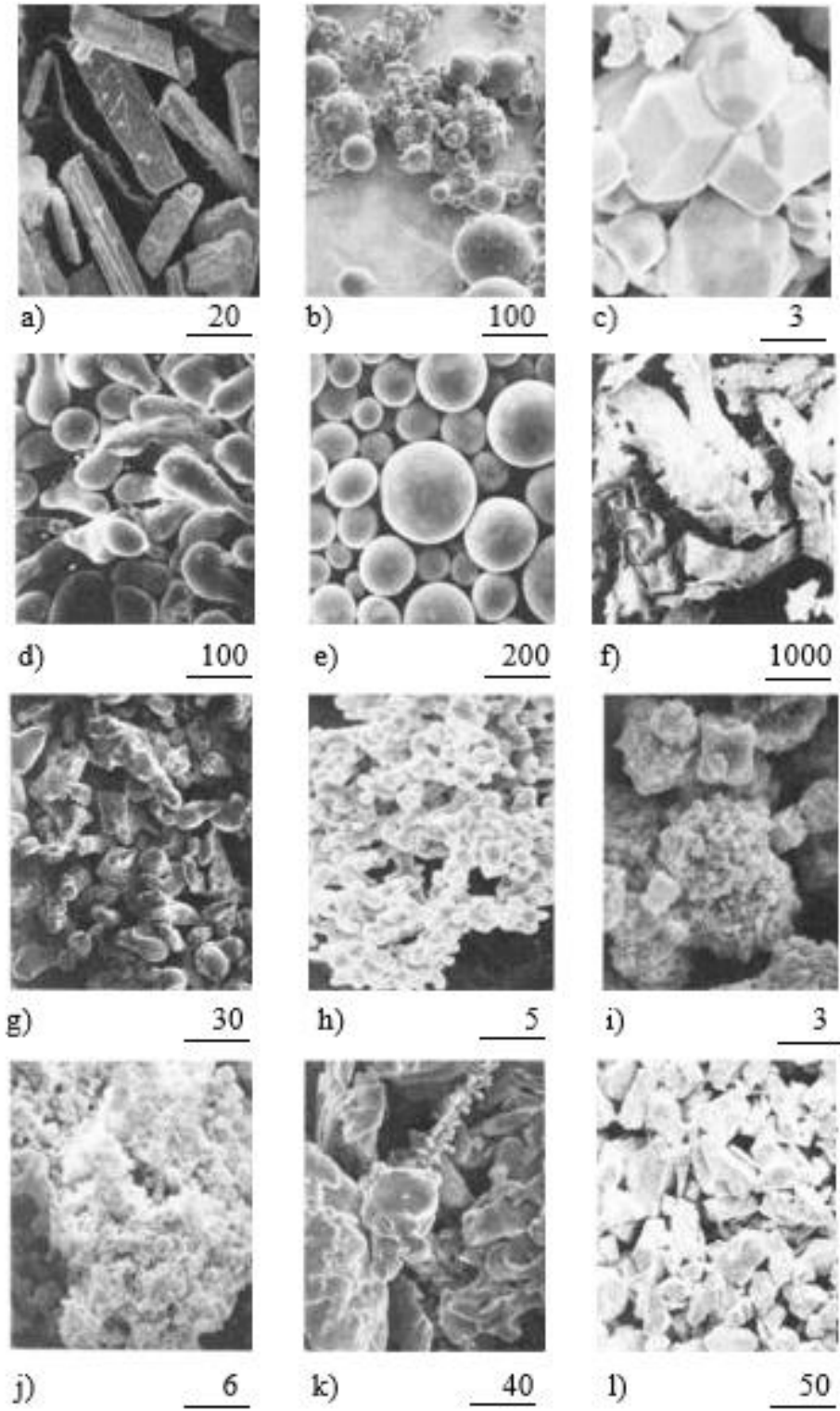
Toz parçacıkları için German (2007) tarafından önerilen olası partikül şekilleri ve adlandırmaları Şekil 8’de gösterilmiştir.

¹⁷ Medyan parçacık büyüklüğü (μm) parçacıkların yarısının verilen büyüklükten küçük; diğer yarısının ise verilen büyüklükten büyük olduğunu göstermektedir.



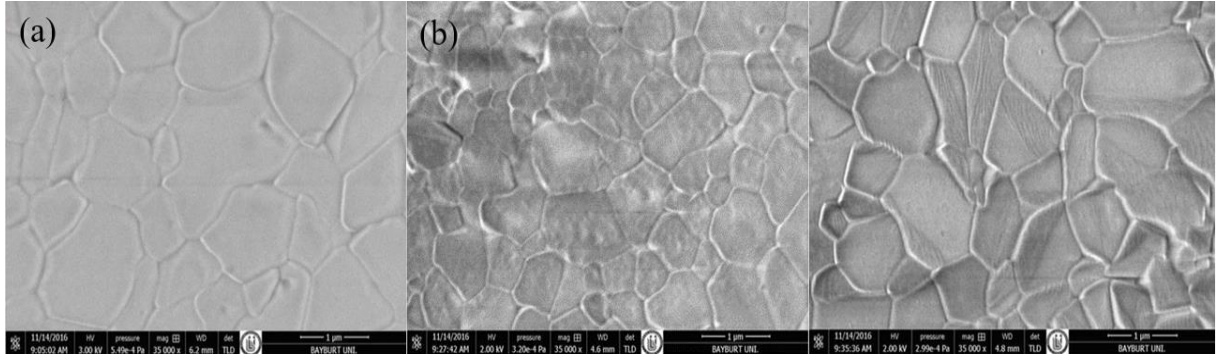
Şekil 8. Tozların olası partikül şekilleri ve adlandırmaları (German 2007)

TM’de kullanılan tozlar genel olarak metaliktir ve boyutları 1 mm’den daha küçüktür. Toz parçacıkları genellikle katı ile sıvı arasında davranış gösterirler. Tozlar tıpkı sıvılarda olduğu gibi yer çekimi etkisi ile bir kap veya kalıbı doldurabilir, gaz gibi sıkıştırılabilir, ancak deformasyona uğradıklarında katı gibi davranış sergilerler. Tozların birçoğu kolaylıkla tek parça şekline getirilebilir (bazen bir ilave ile), ancak kolay deformasyona uğramaları beklenemez. Şekil 9’da farklı metal tozlarının şekil ve büyüklük değişimini gösteren bazı SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 9. Metal tozlarının şekil ve büyüklük değişimini gösteren SEM görüntüleri. Her mikro-grafın altında mikron ölçeği verilmiştir. Materyallerin üretim yöntemi ve şekilleri; a) telleryum; öğütülmüş, iğnemsî b) nikel alaşımı; argon atomize, küresel, aglomerasyon c) tungsten; gaz indirgenmiş, poligonal agrega (kümelenmiş) d) kalay; hava atomize, yuvarlak ve ligamental e) demir alaşımı; santrifüj atomize, yuvarlak ve düzensiz f) kalay; aralıklı su verilmiş, pul g) paslanmaz çelik, su atomize, yuvarlak ve düzensiz h) paladyum; elektrolize, sünger i) nikel; karbonil ayrışma, gözenekli ve kübik j) tantalum; elektroliz, agrega k) titanyum; elektroliz, dentritik ve düzensiz l) niyobyum; öğütülmüş, açısız (German 2007)

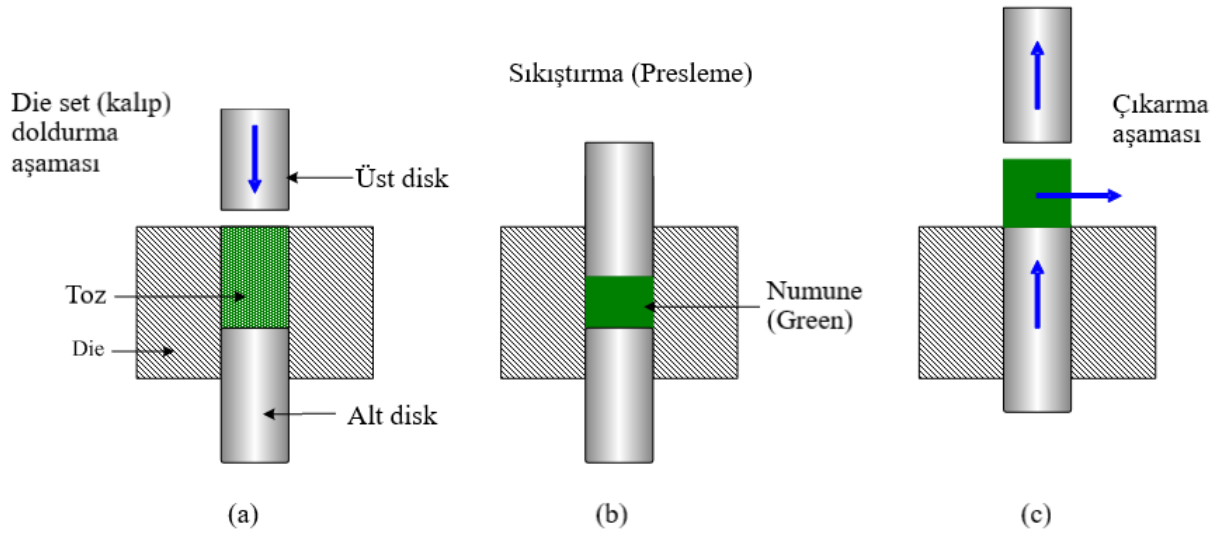
TM'nin ikinci aşamasında tozlar işlenmeye başlanır. Bu aşamada gerekli ise bağlayıcı da ilave edilerek önceden karıştırılmış tozlar şekillendirilir. Başlangıçta toz parçacıkları arasında boşluklar bulunur ve basınç uygulanmaya başladığı anda bu boşluklar belli bir mesafeye kadar azaltılır. Toz parçacıklarında sertlik arttıkça sıkıştırmak için gerekli basınç da artar. Uygulanan basınç değerine bağlı olarak örnekler arasında önemli morfolojik farklar oluşabilir. Şekil 10'da verilen SEM görüntülerinden farklı basınç değerleri altında yapılan presleme işlemi sonucunda nikel (Ni) numunelerinde ortaya çıkan farklılıklar açıkça görülmektedir.



Şekil 10. Farklı basınç değerlerinde preslenen nikel örneklerine ait SEM görüntüleri. (a) $P = 370$ MPa (b) $P = 740$ MPa (c) $P = 1110$ MPa. Sinterleme sıcaklığı $T = 1000^{\circ}\text{C}$ (Alım, 2017).

Şekillendirme işlemi oda sıcaklığında (soğuk şekillendirme) veya yüksek sıcaklıklarda (sıcak şekillendirme) yapılır. Şekillendirme (presleme) istenilen geometrideki kalıplarda yapılır ve bu işlem esnasında dağınık halde bulunan tozlar kalıbın şeklini alır. Soğuk şekillendirmede, numune ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltarak numunenin zarar görmeden kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırmak ve kalıp ömrünü uzatmak için zaman zaman yağlayıcı adı verilen katkıları kullanılır. Tek eksenli toz presleme adımlarının şematik gösterimi Şekil 11'de verilmiştir.

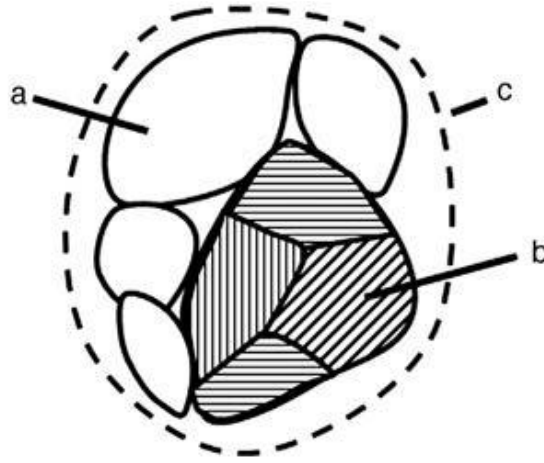
Toz presleme aşamaları



Şekil 11. Tek eksenli toz presleme adımlarının şematik gösterimi (a) kalıp boşluğunun önceden hazırlanmış toz ile doldurulması, (b) kalıbın üst diskine uygulanan basınç ile tozun sıkıştırılması, (c) alt diskin yukarı hareketi ile sıkıştırılmış (şekil almış) numunenin (green) çıkarılması

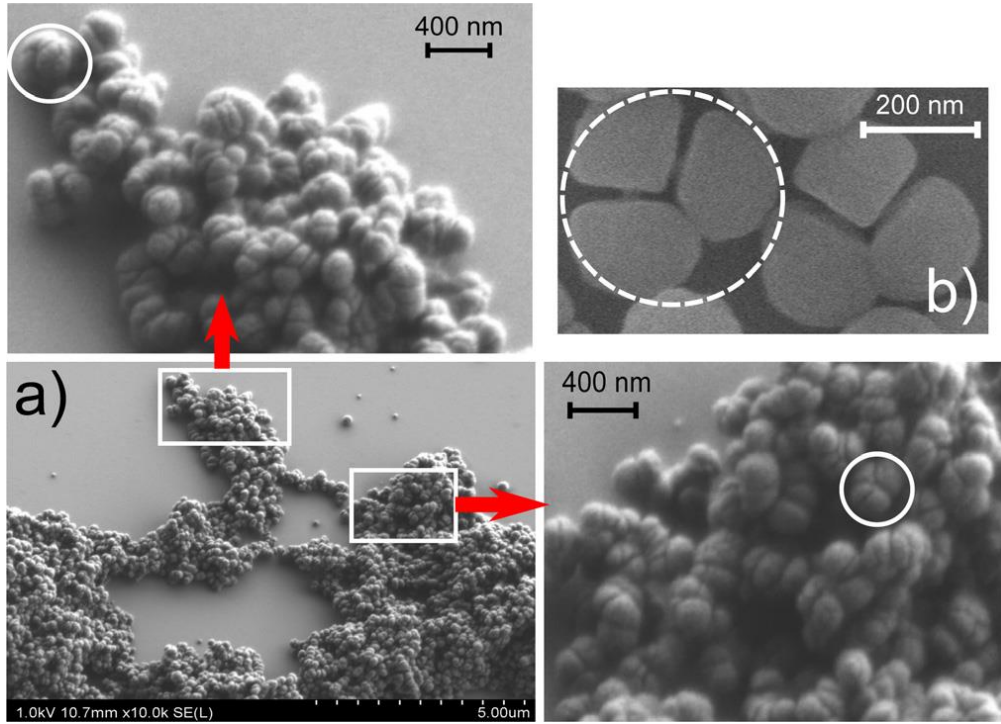
Bu aşamada elde edilen parçalar düşük mukavemet değerine sahiptir ve bu işlem malzemenin yalnızca güvenli bir şekilde ele alınmasını ve bir sonraki aşamaya aktarılmasını sağlayabilir. Sıkıştırmadan sonra fakat sinterlemeden önceki bu mukavemet değerine ham mukavemet (green strength) ve bu aşamadaki numuneye de genellikle ham veya green denir. Kalıptan çıkartılan parçanın sahip olduğu ham mukavemet değeri parça üzerine işlem yapmak için (örneğin uygulanacak yüksek değerlerdeki kuvvetleri taşımak için) yeterli değildir. Bu nedenle ham parçanın mukavemet değeri sonraki aşamada uygulanan sinterleme işlemi ile artırılır. Bu aşamada parça, genellikle koruyucu bir atmosferde, ana bileşenin erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılır böylece toz partikülleri birbirine kaynaşır ve amaçlanan kullanım için nesneye yeterli güç verir. Bazı özel durumlarda şekillendirme (sıkıştırma) işlemi sinterleme sırasında meydana gelecek şekilde yüksek bir sıcaklıkta yapılır (sıcak presleme). Çoğu durumda sinterlenmiş parça isteğe bağlı olarak; kaplama, parlatma, boyutlandırma, infiltrasyon gibi ek sonlandırma işlemlerine tabi tutulur.

Toz parçacıklarının bir araya gelerek topaklanması aglomerasyon olarak tanımlanmaktadır. Aglomerasyon için şematik bir gösterim Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Aglomerasyonun şematik gösterimi a) Parçacık; b) Grain; c) Aglomerat

Aglomerasyon, çoğunlukla kontrol edilemeyen toz üretim süreçlerinde istem dışı oluşur. Bununla birlikte ince parçacıkların, yüksek sıcaklıktaki fırınlarda, hava ile teması sonucunda ortamda kalabilmeleri için kontrollü olarak da gerçekleştirilebilir. Katı parçacıkların sıvı içerisinde aglomere edilmesi, farmakoloji, materyal ve yiyecek üretimi gibi endüstriyel kullanımlarda oldukça yaygındır. Sıvı içerisinde gerçekleştirilen aglomerasyon işleyiş prensiplerinin anlaşılması, katı parçacıkların birleştirilmesi ve aglomerasyon sürecinin kontrol edilebilmesi için oldukça önemlidir. Şekil 13'de bir örnek için toplanan aglomeraların SEM fotoğrafları görülebilir (Dap *et al.* 2013).



Şekil 13. Toplanan aglomeraların SEM resimleri: büyütülmüş görünüm aglomeraları oluşturan nanometrik parçacıkların yapısı. (a)'da ve buna karşılık gelen büyütme, aglomeraları oluşturan nanometrik tozun yapısı değerlendirilebilir (b) substrat üzerinde izole edilmiş nano parçacıkların bir örneğini göstermektedir (Dap *et al.* 2013)

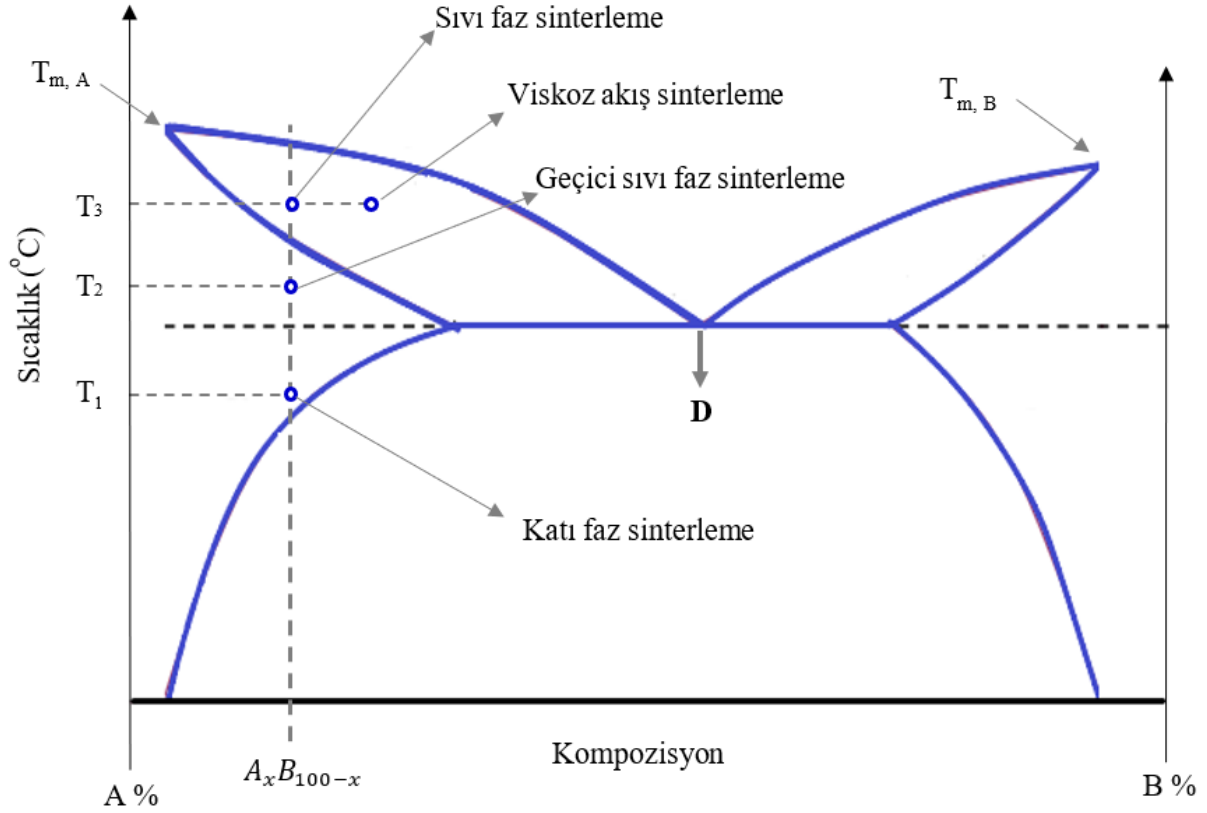
Toz parçacıkları kristal veya amorf¹⁸ yapıda bulunabilir. Kristal yapılar belli örgü parametrelerine sahiptir ve bu örgü parametreleri ($\text{\AA}$) veya uzay grubu, yoğunluğu ($\rho; \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) ve toplam manyetik moment (μ_B) gibi özellikler malzemenin yapısal özelliklerini temsil etmektedir (Umucu, 2016). Malzemeye ait uzay grubu veya örgü parametreleri gibi kristal yapı parametreleri, X-ışını kırınımı (XRD) teknikleri ile tespit edilebilmektedir (Özpolat, 2021).

Sinterleme

Sinterleme isminin Türkçe sözlük karşılığı pekiştirme, külçeleme, toplıştırma, pişirme gibi anlamlara gelen İngilizce “sinter/ing” fiilinin Türkçe’ye girmiş halidir. Alaşımlar üretilirken sinterleme; alaşımı oluşturacak farklı elementlerin belli oranlarda birleştirilmiş kompozisyonunun belli bir sıcaklık değerinde ısıtılarak yeni yoğun malzemeler elde etme işlemi olarak değerlendirilir. Sinterleme öncesinde sıkıştırma işlemi ile şekillendirilen toz içerisindeki tanecikler artık birbirleri ile temas halinde olsalar da bu tanecikler halen daha birbirlerinden bağımsızdırlar. Sinterleme ile toz içerisindeki tanelerin temas eden yüzeylerindeki temas noktaları artar ve temas eden atomlar arasında güçlü bir bağ oluşur. Sinterleme tek fazlı sistemlerde ergime sıcaklığının altında katı halde atomlar arası difüzyon hareketleriyle tamamen katı fazda gerçekleşir. Bununla birlikte pek çok durumda özellikle çok fazlı sistemlerde sinterlemede sıvı faz oluşumu meydana gelir. Sıvı fazda gerçekleşen sinterlemede de sıkıştırılmış paketin katı formu (iskeleti) korunur. Uygulanan yönteme göre adlandırılan birçok farklı modern sinterleme tekniği olmakla birlikte genel olarak sinterleme “katı-hal sinterleme” ve “sıvı faz sinterleme” olarak iki gruba ayrılır. Katı-hal sinterlemede şekillendirilmiş ham malzemeye uygulanan belirli bir sinterleme sıcaklığı ile malzemenin atomları arası difüzyon meydana gelmesi ve malzemenin katı haldeyken yoğunlaşmasıdır. Sıvı faz sinterlemede; sinterleme işlemi sırasında malzemede sıvı faz oluşur ve malzemenin geometrisi değişerek daha fazla küçülür. Bu iki sinterleme yönteminin dışında viskoz akış sinterleme ve geçici sıvı faz sinterleme gibi yöntemlerde tercih edilebilmektedir (Kang, 2005). Sinterleme mekanizmalarına ait faz diyagramı¹⁹ Şekil 14’te verilmiştir.

¹⁸ Amorf: Formu ya da şekli olmayan. Atomların kararlı bir kristal yapıya sahip olmadığı katı. Kristal dışı katılarda atomsal ölçekte nispeten uzun mesafelerde sistematik ve düzenli bir atom dizilişi bulunmaz ve böyle malzemeler amorf olarak adlandırılır.

¹⁹ Faz diyagramı: farklı fazlar arasında denge hallerini ve birbirinden termodinamik anlamda farklı fazların oluşum koşullarını gösteren grafik.

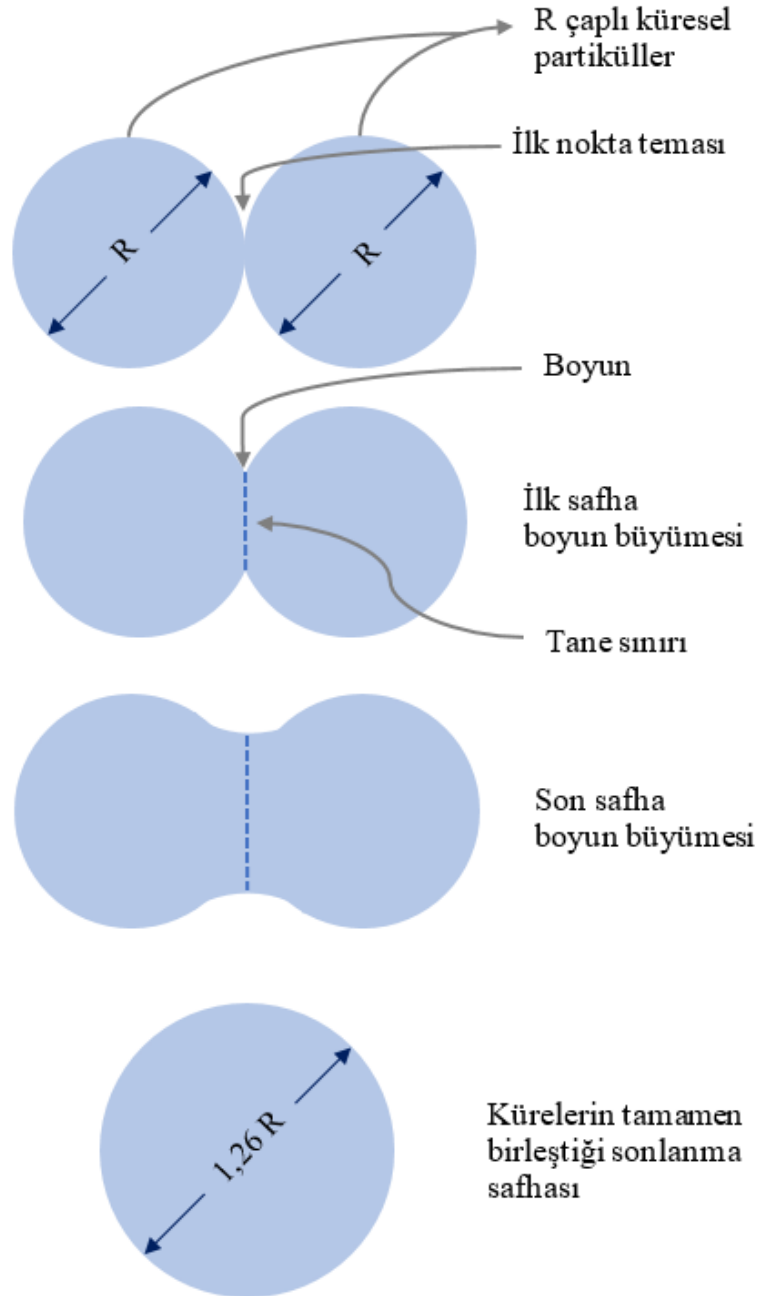


Şekil 14. Katı ve sıvı faz sinterlemeler için faz diyagramı

Diyagram üzerinde, aynı içeriğe sahip iki yapı için farklı sıcaklık değerlerinde sinterleme türünün de değiştiği görülmektedir (Şekil 14). Bir $A_x B_{100-x}$ toz kompozisyonu için T_1 sıcaklığında katı-hal sinterleme, T_3 sıcaklığında ise aynı toz kompakt için sıvı faz sinterleme meydana gelmektedir. Katı-hal ve sıvı faz sinterlemeye ek olarak, diğer sinterleme türleri, örneğin, geçici sıvı faz sinterleme ve viskoz akışlı sinterlemede olabilir. Şekil 14'te eğrilerin üstünde kalan bölge sistemin yüksek sıcaklık bölgesidir ve bu bölgede tüm sistem sıvı haldedir. Orta kısımda bulunan bölgeler iki fazlı (katı-sıvı) bölgelerdir. En altta kalan bölgede ise tüm sistem katı haldedir ve katı halde hem A hem de B saf halde bulunmaktadır. $A_x B_{100-x}$ gibi ikili bir kompleks için bu grafiğin en önemli yeri grafikte “D” ile işaretlenen ve “ötektik nokta” olarak adlandırılan noktadır. Erime ve katılaşma noktalarının tek bir sıcaklık olduğu bu noktada sistem tam bir katı-sıvı dengesindedir ve kompozit (alaşım) tek bir malzeme gibi davranır. Bu noktanın sıcaklığı sistemin “ötektik sıcaklığı” ve bileşim ise sistemin “ötektik bileşimi” olarak adlandırılır.

Sinterlemede özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısı işlem ile atomlar arası difüzyon (taşıma) gözenekli yapıdaki paketin (tozların) yüzey alanının küçülmesine, parçacık temas noktalarının büyümesine ve sonuç olarak gözenek (por) hacminin küçülmesine neden olur. Sinterleme ile sinterleme öncesi şekillendirilmiş ancak halen gözenekli yapıda olan toz parçalarına gözeneksiz yapıya sahip malzeme özelliği kazandırılır. Bununla birlikte sinterleme

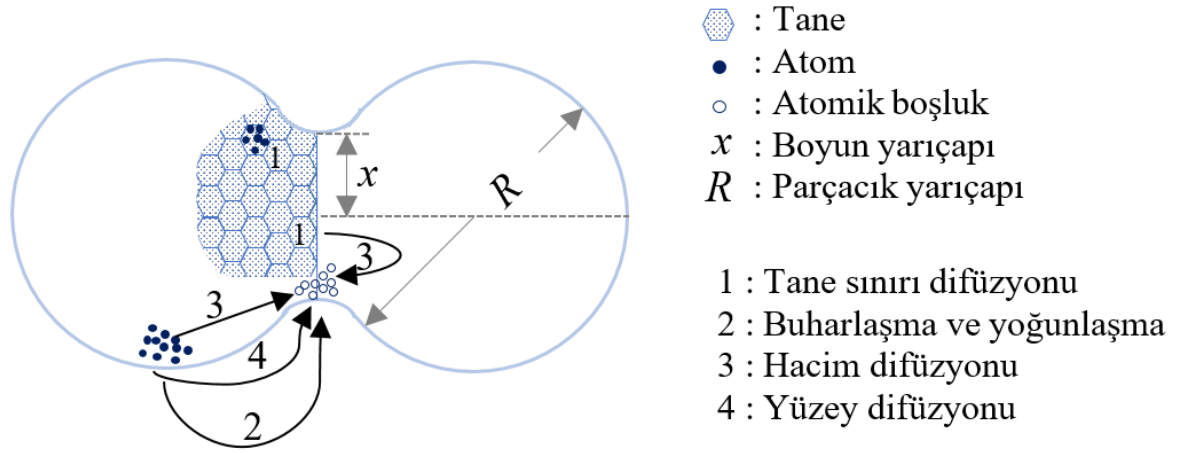
süreci birçok malzeme taşınım olayının gerçekleştiği karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Sinterleme öncesi tozun yüzey atomları arasında sadece temastan ibaret olan bağ sinterleme ile birlikte katı–hal bağına dönüşmeye başlar ve artık toz tanelerinin yüzey atomları diğer taneler tarafından da paylaşılır. Mikroskobik ölçekte, bağlanma olayı birbirleri ile temas halinde olan atomlar arasında “boyun verme” adı verilen değişim ile kendini gösterir. Şekil 15’te bu süreç sinterlemenin farklı kademeleri için birbirine noktasal olarak temas eden iki küre için gösterilmiştir.



Şekil 15. Sinterleme esnasında partiküller arası boyun büyümesinin iki küre modeliyle açıklanması

Hacmin korunması ve yüzey enerjisinin indirgenmesinin etkisi ile en son aşamada başlangıç çapının 1,26 katı çapa sahip tek bir küre oluşur (Şekil 15). Sinterlemeyi etkileyen

unsurları oluşturan çeşitli mekanizma ve aşamalar söz konusudur. Sinterlemeyi etkileyen bu ana unsurlar tarafından tanımlanan bağlanmaya neden olan mikroskobik eğrilikler ve yine bu unsurlara tepki olarak oluşan atomik hareketlerin yolu gibi tüm durumlar sinterleme mekanizmaları ile tanımlanır. Temel sinterleme mekanizmaları genellikle yüzey, tane sınırı²⁰ veya kristal kafesinde meydana gelen yayılım olaylarıdır. Sinterlemede malzemenin çok sayıda atomu belli sıcaklıklarda komşu atomlar ile olan bağlarını kopararak yeni bağlar ve yapılar oluşturacak kadar veya daha fazla enerjiye sahiptirler. Sinterleme sonrası malzemenin fiziki şeklindeki değişimler atomların hareketini sağlayan sıcaklığın etkisi ile gerçekleşir. Sinterleme esnasında olası malzeme taşınım mekanizmaları Şekil 16'da verilmiştir.



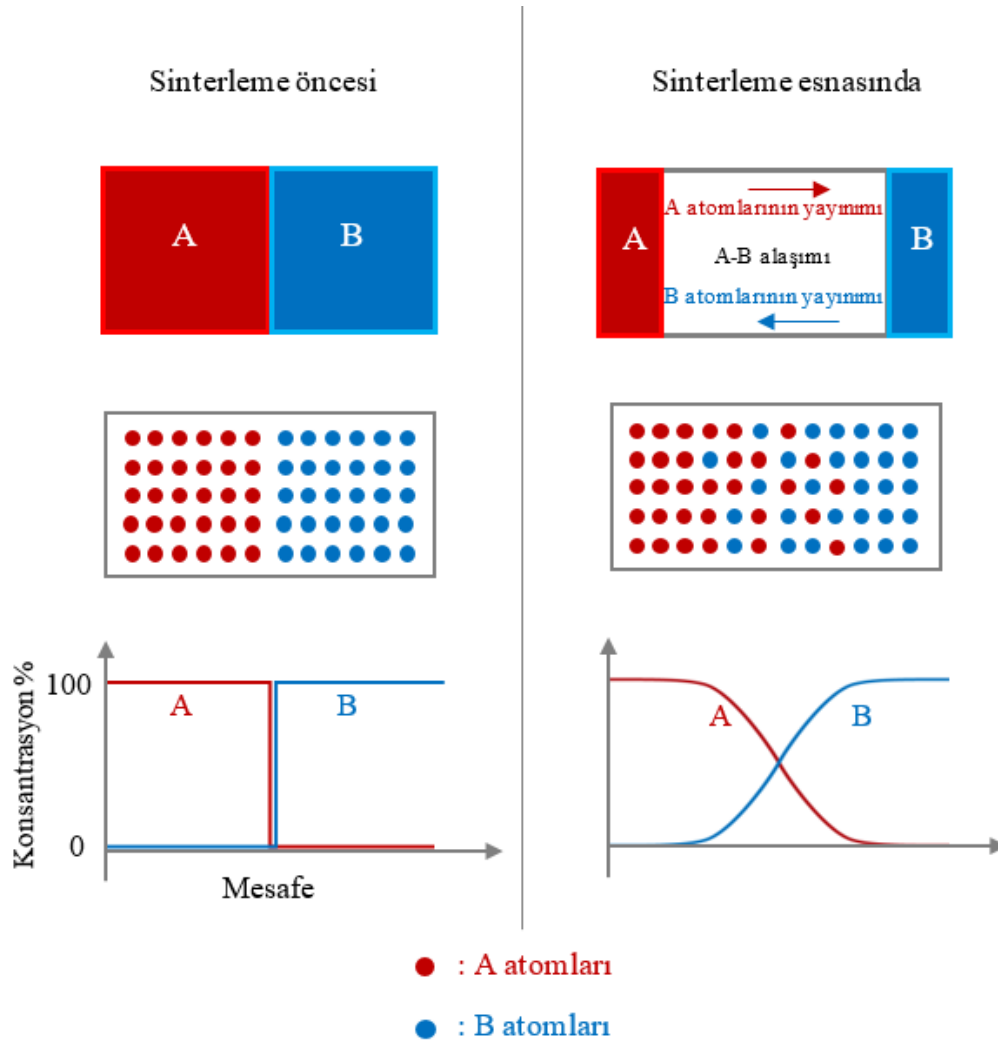
Şekil 16. Sinterleme esnasında olası malzeme taşınım mekanizmaları ve taneler arası boyun büyümesi

Sinterleme sırasında meydana gelen taşınım mekanizmalarından **tane sınırı difüzyonu** (1) ile dış yüzey atomları atomik boşluk mekanizması ile tane sınırı boyunca boyun bölgesine veya porlara (gözeneklere) yayınarak; porların yuvarlaklaşıp küçülmesine neden olurlar. Sinterleme sırasında genelde buhar basıncı yüksek malzemelerde görülen **buharlaşma ve yoğunlaşma** (2) mekanizmasında boyun büyümesi, gözeneklerin yuvarlaklaşması ve kapanması gerçekleşir. Boyun bölgesine nazaran buhar basıncı daha yüksek olduğu dış bükey yüzeylerden boyun bölgesine doğru buhar taşınımı mümkün olabilmektedir. **Hacim difüzyonu** (3) katı kristal malzeme içinde atomların hareketidir ve metalik malzemelerin sinterlenmesinde önemli kütle taşınım mekanizmasıdır. Bu mekanizmada en önemli atom hareketi atomların hacim (latis) içerisindeki boşluklara yerleştiği atomik boşluk yer değiştirmesidir. Yapı içerisinde eğer konsantrasyon dağılımı homojen değilse, sıcaklık belli bir değere ulaştığında atom ve boşluk hareketi başlar. Artan sıcaklık aynı zamanda boşluk konsantrasyonunu artırır

²⁰ Kristal katıların çoğu çok sayıda taneden (kristalden) meydana gelmiş çok kristalli malzemelerdir. Bu tanelerin birbirlerine temas ettikleri bölgelerde atomsal olarak düzensizlik söz konusudur ve bu bölgeler tane sınırı olarak adlandırılır.

ve atomlar boşluk konsantrasyonunun fazla olduğu boyun bölgesi gibi kısımlara doğru hareket ederler. Bu durumda boşlukların hareketi ise ters yönde olur. Atom taşınımı için bir diğer mekanizma olan **yüzey difüzyonunda (4)** yüzeydeki boşluklar sayesinde boyun bölgesine hareket eden dış yüzey atomları boyun büyümesine neden olurlar. Yoğunlaşmaya katkısı olmayan bu yayılım por yuvarlaklaşmasına ve por kanallarının kapanmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte latis ve tane sınırı difüzyon mekanizmaları yüzey difüzyon mekanizmasına kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda etkin rol oynarlar ve gözenek küçülmesine, giderilmesine ve yoğunlaşmaya neden olabilirler. Yüzey difüzyonunda atom taşınımı boyun bölgesi yakınındaki gözenek yüzeylerine atom taşınımı ile başlar. Hacim difüzyonunda ise tane içi ve sınırlarındaki atomlar boyun bölgesinde yeniden konumlandırılır. Yüzey difüzyonu birçok malzemenin düşük sıcaklık sinterlenmesinde baskın mekanizmadır. Hacim taşınım mekanizmaları; hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, plastik ve viskoz akışı içerir. Plastik akış özellikle preslenmiş tozlarda ısıtma sırasında görülür ve yüksek sıcaklıklara çıkıldığında önemini kaybeder. Metallerde viskoz akış, tane sınırında sıvı fazların olması durumunda mümkündür. Kristal yapıli malzemelerin yoğunlaşmasında oldukça önemli olan tane sınırı difüzyonu ise birçok metalin yoğunlaşmasında esas yayılım mekanizmasıdır. Tüm hacim yayılım mekanizmaları genelde yüksek sıcaklıklarda etkilidir.

Sinterleme işleminde meydana gelen taşınım (veya yayılım) işlemleri malzemeler arasında gerçekleşen kütle transferine dayanır. Yayılım olayı bir yüzeyleri birbirleri ile çok iyi temas halinde olan ve yayılım çifti olarak adlandırılan; A ve B gibi iki metal göz önünde bulundurularak izah edilebilir. Böyle bir yayılım çifti için çiftin durumu, ara yüzey boyunca atomların konumu ve konsantrasyonların kesit içerisinde mesafe ile değişimi hem sinterleme öncesi durum (sol kısım) hem de sinterleme sonrası için (sağ kısım) Şekil 17’de şematik olarak temsil edilmiştir.

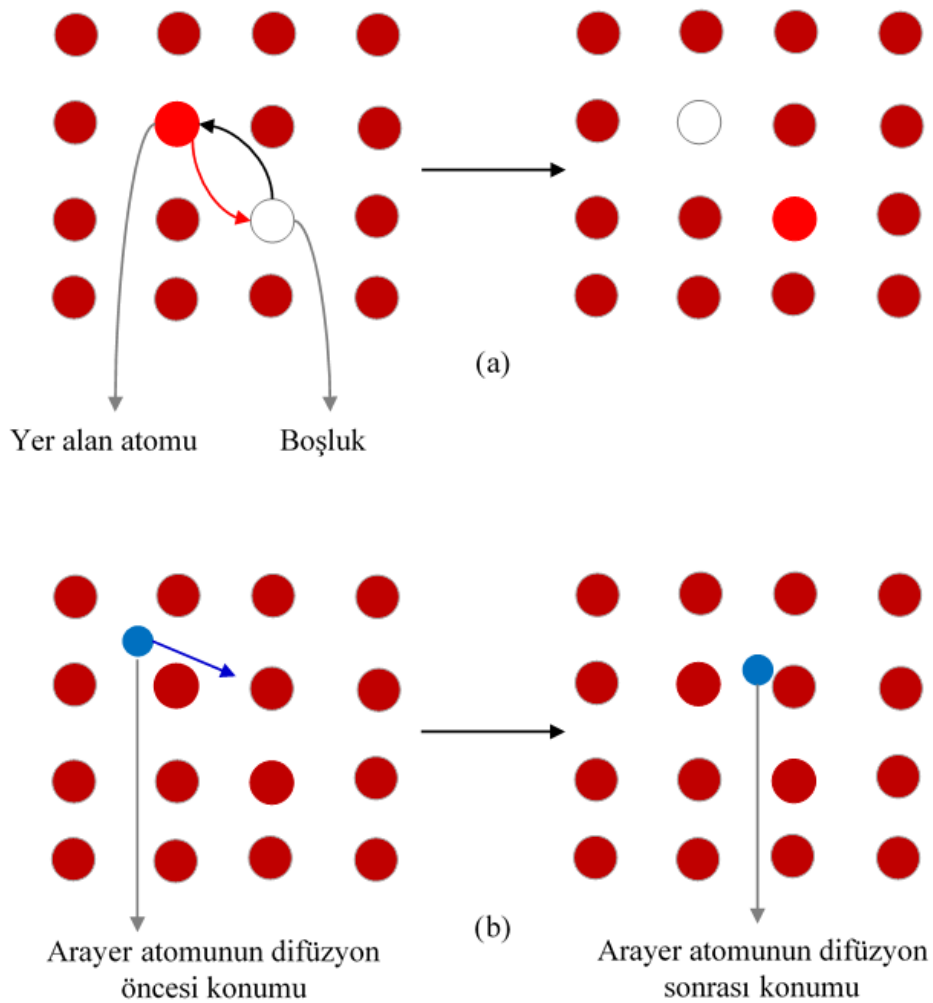


Şekil 17. Sinterleme öncesi yayınım çiftlerinin durumu (sol kısım) ve sinterleme işleminde meydana gelen yayınım durumu (sağ kısım)

A ve B metallerinden oluşan yayınım çifti, bu metallerin her ikisinin de erime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta, ısıtılma işlemine tabi tutulduğunda (sinterleme) yayınım çiftinde A ve B metal atomlarının bir arada bulunduğu bir alaşım bölgesi oluşur. A ve B atomlarının konsantrasyonları mesafe ile değişir ve A, B atomları birbirlerinin atomları içerisine doğru yayınırlar (Şekil 17). Bir metale ait atomların diğer metal içerisine karşılıklı yayınımı şeklinde gerçekleşen bu olay “birbirinde yayınma” veya “empürite yayınması” olarak adlandırılır. Birbirinde yayınmada atomların yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye taşınımı söz konusudur ve böyle bir taşınım ancak uzun bir süre sonra konsantrasyonda oluşan değişim ile fark edilebilir. Yayınma olayı saf metallerde de gerçekleşebilir. Bu durumda konum değiştiren atomların hepsi aynı tür olacaklarından böyle bir yayınım “kendinde yayınma” olarak adlandırılır (Callister and Rethwisch, 2020).

Katı malzemelerde sürekli hareket halinde olan atomlar hızlı bir şekilde konumlarını değiştirirler. Yayınım atomik anlamda; atomların bir kafes boşluğundan bir diğerine adım-adım

gerçekleştirdikleri yer değiştirme olarak düşünülebilir. Hemen bitişiğinde geçebileceği boş bir yer olan ve süreci tamamlamak için yeterli enerjiye sahip olan tüm atomlar böyle bir hareketi yapabilirler. Atomun sahip olması gereken enerji en azından komşu atomlar arasındaki bağı koparabilecek ve devamında yer değiştirme hareketi sırasında meydana gelecek kafes çarpışmalarını alt edecek kadar olmalıdır. Bu enerji atomların titreşim hareketleri yapmasını sağlayan enerjidir. Belirli bir sıcaklıkta, atomların küçük bir kısmı sahip oldukları titreşim enerjilerinden dolayı yayınma hareketi yapabilirken sıcaklığın yükselmesiyle bu atomların sayısı da artar. Metalik malzemelerde boşluk ve ara-yer yayınımları en belirgin ve kabul gören mekanizmalardır. Bu mekanizmalar Şekil 18’de temsili olarak görselleştirilmişlerdir.



Şekil 18. Boşluk (a) ve ara yer (b) difüzyon mekanizmaları

Boşluk yayınımda malzemede normal bir kafes noktasında yer alan bir atom ile komşu kafes noktasında yer alan bir boşluğun yer değiştirmesi şeklinde gerçekleşir (Şekil 18). Boşluk yayılım mekanizmasının gerçekleşmesi uygun boş yerlerin (yani boşlukların) varlığına ve

yayınımın etkinliği ise var olan boşlukların²¹ (kusurların) sayısına bağlı olarak değişecektir. Metaller yüksek sıcaklıklarda çok yüksek oranda boşluk konsantrasyonuna sahiptirler. Boşluk yayılımı sırasında boşluklar ile atomların yer değişimleri dolayısı ile boşlukların bir yöndeki hareketine karşılık atomların aksi yönde hareketi söz konusudur. Kendinde yayınma ve birbirinde yayınma olarak adlandırılan olaylar da bu mekanizmayla gerçekleşirler. Bazen, kristali oluşturan atomlardan biri normal şartlarda atomların bulunmadığı ara yer boşluklarına girebilmektedir. Bu olaya kendinde yayınma, bu tip atomlara da kendinde ara yer atomu denir. Birbirinde yayınmada ise empürite (yabancı element) atomları, matris atomlarının yerini alır. **Ara yer yayınma** mekanizmasında, halihazırda ara yer konumunda bulunan bir atom, komşu bir ara yer boşluğuna yayılır (Şekil 18). Bir ara yer boşluğuna yerleşebilecek kadar küçük empürite atomlarının (hidrojen, karbon, azot ve oksijen gibi) yayınması bu mekanizmayla gerçekleşir. Matris veya yer alan empürite atomları nadiren ara yer konumunda bulunduklarından bu atomlar normalde ara yer yayınması mekanizması ile yer değiştirmezler. Ara yer atomları daha küçük ve dolayısı ile hareket kabiliyetleri daha büyük olduğundan çoğunlukla metal alaşımlarında ara yer yayınması, boşluk yayınmasından çok daha hızlıdır. Metal alaşımlarında ara yer boşluklarının sayısının atomik boşluk sayısına kıyasla daha fazla olmasından kaynaklı olarak ara yer atom hareketinin gerçekleşme olasılığı, boşluk yayınmasının gerçekleşme olasılığından daha büyüktür (Genel, 2014).

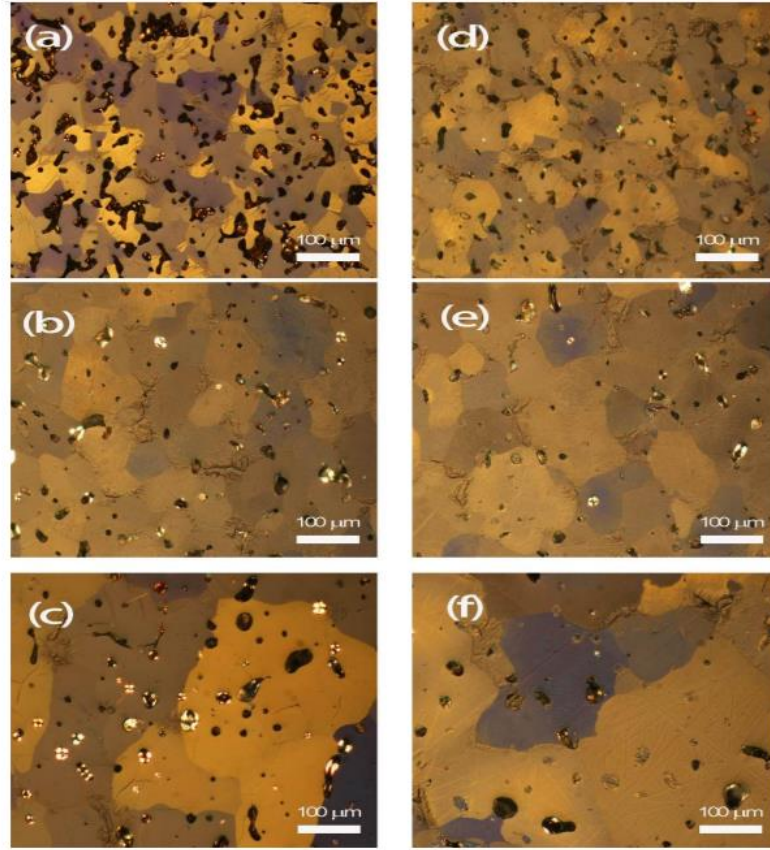
Sinterleme yönteminde alaşımda bulunması gereken oranları önceden belirlenmiş metal veya alaşım tozları önceden homojen bir dağılım için karıştırılır. Karışım istenen geometriye sahip kalıplarda uygulanan basınç ile sıkıştırılarak şekillendirilir. Şekil verme işleminden sonra numune sinterleme ile yüksek sıcaklıklarda ve kontrollü atmosfer ortamında yeterince uzun bir süre ısıtılarak numune içerisindeki metallerin difüzyon yoluyla birbirine geçip çözünerek yeterli mukavemete sahip yeni bir katı yapıya ulaşması sağlanır. Birçok durumda sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde malzemenin erime sıcaklığının %70–90'ı arasında iken alaşımlarda sinterleme işlemi alaşımı oluşturan elementlerden erime sıcaklığı en düşük olanın hemen altında gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte sinterleme sıcaklığı alaşımı oluşturacak elementlerin içerikteki miktarları, elektronegatiflikleri gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Dolayısıyla sinterleme sıcaklığı ve basamakları üretilecek her bir alaşım için özel olarak belirlenir. Sinterleme işleminde sinterleme sıcaklığı kadar sinterleme

²¹ Kristal malzemeler değerlendirilirken genelde atomsal ölçekte mükemmel bir düzenin bulunduğu varsayılır. Bununla birlikte gerçekte böyle mükemmel kristaller yoktur ve bütün kristallerde çeşitli türde çok sayıda kusur bulunur. En çok görülen kusur tipleri noktasal (bir ya da iki atomun konumu ile ilgili olan), çizgisel (bir boyutlu), ara yüz ya da sınır (iki boyutlu) kusurlarıdır. Normalde bir atom bulunması gerekirken boş kalan atomsal boşluk (boş yer veya boş kafes noktası) en basit noktasal kusurdur.

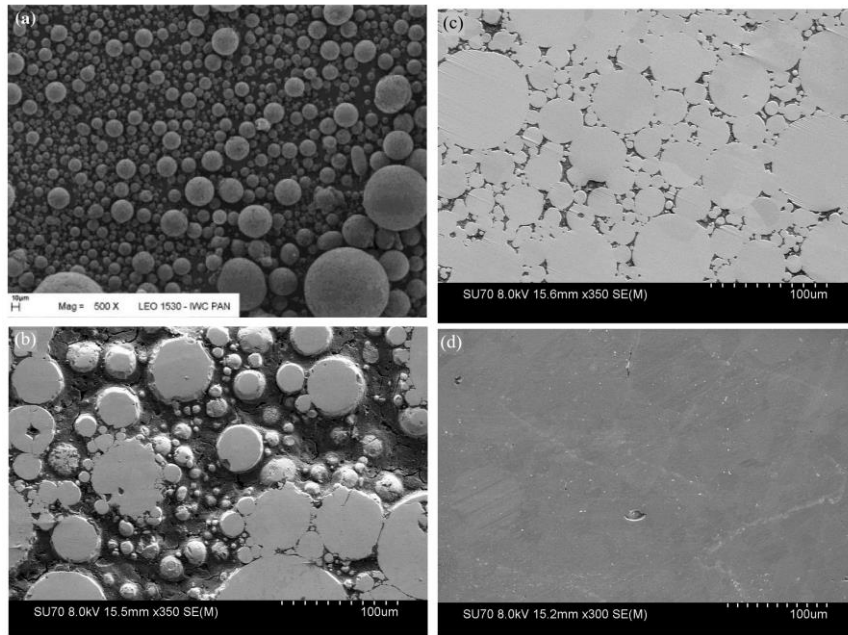
basamakları (ısıtma soğutma sıcaklık değerleri ve süreleri) de önemlidir ve dikkatli planlanması gerekir. Bu işlemlerin üretimi gerçekleştirilecek her bir alaşım için optimum değerleri vardır ve farklı bir uygulama sinterleme sonucunu olumsuz etkileyebilir. Çünkü işlem sonucunda elde edilmesi amaçlanan kristal yapıya ulaşıp ulaşılamaması büyük oranda uygulanan ısıtma işlem sürecine bağlıdır. Sinterleme, aktive edilmiş atom sayısının fazlalığı ve boş alanların çokluğu nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşir. Buradan hareketle sinterleme işleminde en önemli parametrenin sıcaklık olduğu söylenebilir. Diğer önemli parametreler ise; partikül boyutu, uygulanan basınç, sıvı faz oluşumu, sinterleme süresi, ısıtma hızı ve atmosferi olarak sayılabilir.

Sinterleme prosesinde uygulanan ısıtma işlemi süresince atomlarda meydana gelen titreşim, atomların ısı ile transfer edilen enerjiden kurtulma çabalarının bir sonucudur. Herhangi bir sisteme aktarılan enerji sonrasında kararlı yapı bozulur ve atomlar tarafından yeniden denge konumuna ulaşmaya dek konumlarını değiştirir. Atomların yeniden konumlanmaları veya difüze olmaları, 1855 yılında Dr. Adolf Fick tarafından Fick Kanunları ile matematiksel olarak ifade edilerek; değişimin teorik olarak öngörülebilmesi sağlanmıştır. Birinci Fick kanunu, belirli zaman aralığında oluşacak madde akımını; ikinci Fick kanunu ise yer değiştirmenin (*difüzyonun*) sonucunda oluşacak konsantrasyonu zamana bağlı olarak tahmin edebilmeyi sağlamaktadır (Fick, 1855). Sinterleme işlemi sonrasında yeniden denge konumuna gelen yapı artık analiz ve karakterizasyon için hazır olacaktır.

Katı-hal sinterlemede; sinterleme sürecinde sıcaklık değerinin sürekli artırılması sonucunda moleküller arası bağlar kopar ve yapı daha serbest bir forma sahip olur. Bu durumda yapıyı oluşturan kristal yapıdaki atomlar da yer değiştirmeye başlayacaktır. Uygulanan ısıtma işlem süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak yapıda dikkate değer değişimler görülebilir. Bu durum Şekil 19’da preslenerek pellet haline getirilmiş titanyum (Ti) için ve nikel-alüminyum (Ni – Al) toz partikülü için Şekil 20’de görülebilir.



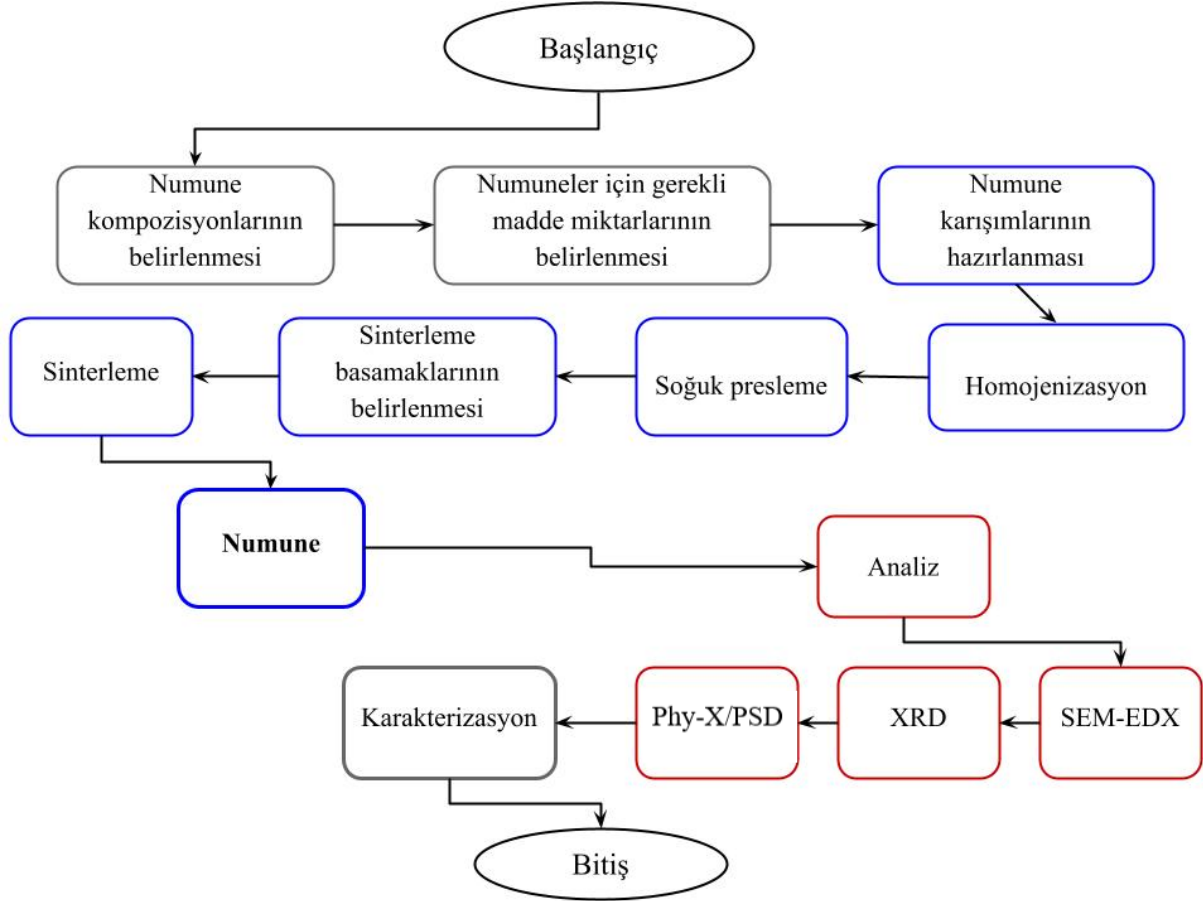
Şekil 19. Farklı sinterleme koşullarında sinterlenmiş Titanyum (Ti) küçük kompaktlarının enine kesitlerinin mikro yapısı. Mikro-graflar polarize ışık mikroskobu altında çekilmiştir. Titanyum kompaktlar, farklı bekletme süreleri için çeşitli sıcaklıklarda sinterlenmiştir: (a) 1100 °C / 4 saat; (b) 1250 °C / 4 saat; (c) 1400 °C / 4 saat; (d) 1100 °C / 8 saat; (e) 1250 °C / 8 saat ve (f) 1250 °C / 8 saat (Yu *et al.* 2017)



Şekil 20. Ni-Al toz partiküllerinin sinterleme sırasında mikro yapı değişimine ait SEM görüntüleri. Ni-Al farklı koşullarda sinterlenmiştir: (a) Başlangıç materyali; (b) $T_s = 1300$ °C, $t_s = 10$ dak, $p = 5$ Mpa ; (c) $T_s = 1400$ °C, $t_s = 10$ min, $p = 5$ Mpa; (d) $T_s = 1400$ °C, $t_s = 30$ dk, $p = 30$ Mpa (Chmielewski *et al.* 2014)

MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışması için kullanılacak materyal ve metot numunelerin belirlenmesinden, üretilip, analiz edilmesine kadar yönetilecek bir süreci kapsamaktadır. Bu süreç Şekil 21’de yer alan akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 21. Tez kapsamında numune üretimi ve analizi için yapılacak çalışmalar için süreç akış diyagramı

Kullanılacak materyaller ve takip edilecek metot daha kolay kurgulanabilmesi açısından; üretim ve analiz olmak üzere iki kategoride (iki aşamada) incelenmiştir. 1. kategoride Şekil 21’de verilen süreç akış diyagramına göre üretim için izlenecek adımlar, 2. kategoride ise üretimi başarı ile gerçekleştiren alaşımlar için karakteristikleri ortaya çıkarmak için yapılacak analizler tanımlanmıştır.

Kategorisel ayırım, numunelerin üretim ve analizinde izlenecek adımların birbirinden ayırımı için tanımlanmıştır. 1. kategoride üretim için gerçekleştirilen deneysel çalışma basamakları:

1. Üretimi planlanan kobalt esaslı Heusler alaşımları için gerekli yüksek saflıkta nano-boyutlu tozların tedariki,
2. Alaşım kompozisyonlarına bağlı olarak ilgili kurallar çerçevesinde numune içerisinde yer alması gereken saf metal tozlarının miktarlarının hesaplanması,
3. Belirlenen miktarlar dikkate alınarak alaşımı oluşturacak toz karışımının hazırlanması (10^{-4} g hassasiyetinde terazi ile çalışılmıştır),
4. Toz karışımının homojenizasyonu için karıştırma (tüm alaşım tozları 30/s devirde 30 dakika boyunca karıştırılmıştır),
5. Homojen toz karışımından alınan belirli miktar toz (iki numune için 0,4000 g diğerleri için ise 0,3000 g) 13 mm çapında die-set ile 980 mega paskal (MPa) basınç altında preslenerek pellet haline getirilmesi, kütlesinin ve kalınlığının belirlenmesi,
6. Pellet (green) haline getirilen alaşımın içeriğine bağlı olarak ona özgü belirlenen sinterleme sıcaklığı ve basamaklarında sinterlenmesi,
7. Sinterleme işlemi tamamlanan alaşım için kütle, kalınlık, yoğunluk vb. özelliklerin belirlenmesi,

2. kategoride karakterizasyon için gerekli analizler için gerçekleştirilen deneysel çalışma basamakları:

8. EDS ile alaşımlar için karakteristik spektrumların alınması elementel kompozisyonların değerlendirilmesi,
9. XRD analizlerinin yapılması, elde edilen spektrumların değerlendirilmesi, analiz sonuçlarından hareketle kristal yapı ve örgü parametrelerinin belirlenmesi,
10. Üretilen alaşımların morfoloji ve yüzey analizleri için SEM görüntülerinin alınması ve sonuçların değerlendirilmesi,
11. Üretilen alaşım serilerinin radyasyon zırh ve nükleer yapı materyali olma kapasitelerini değerlendirebilmek için Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak çeşitli foton-madde etkileşim parametrelerinin hesaplanması,

şeklinde sıralanabilir. Gerek duyulduğunda veya herhangi bir aksaklık durumunda işlem basamakları tekrarlanmıştır. Ayrıca alaşımlar için elde edilen sonuçları değerlendirirken kullanılmak üzere mikro boyutlu tozlar ile de tüm işlem basamakları tekrarlanarak numuneler hazırlanmıştır.

Numunelerin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında GİRİŞ bölümünde de gerekçelendirildiği üzere kobalt esaslı Heusler alaşımları incelenmeye değer bulunmuştur. İncelenmesi planlanan alaşımlar için

üretim yöntemi olarak toz metalurjisi-basamak sinterleme metodu tercih edilmiştir. Bu metot birçok alaşım ve alaşım grubu için yaygın bir biçimde kullanılmakla birlikte söz konusu alaşımlar için ilk defa kullanılacaktır. Bu nedenle incelenmesi planlanan alaşımlar belirlenirken özellikle sinterleme aşaması dikkate alınması gereken en önemli aşamadır. Alaşımı oluşturan elementlerin erime sıcaklıkları; elementlerin birbiri içerisine difüze olmasını, parçacık boyutları ise atomların birleşim yüzey alanlarını etkileyeceğinden; üretilen numunenin alaşım formuna sahip olma imkânlarını etkileyecektir. Bu nedenle erime sıcaklıkları ve parçacık boyutları birbirine yakın elementleri tercih etmek önemlidir²². Numuneler belirlenirken KURAMSAL TEMELLER bölümünde verilen sinterleme yöntemine ilişkin önemli hususlar göz önünde bulundurularak hareket edilmiştir. Bu bilgiler ışığında çalışılması planlanan nanoyapılı Heusler alaşımları üretmek için aşağıda detayları ve özellikleri verilen numune hazırlık ekipmanları kullanılmıştır.

Numune Kompozisyonlarının Belirlenmesi

Öncelikle üretilmesi planlanan Heusler alaşımını oluşturacak toz kütlelerinin homojen karıştırma işlemi yapılmadan önce karışıma girmesi gereken toz miktarlarının belirlenmesi gerekmektedir. Kullanılacak toz miktarları; alaşım oluşturacak toz karışımı pellet (green veya bulk) haline getirildiğinde kırılmayacak şekilde yeterli kalınlıkta ancak çok da kalın olmayacak biçimde olmasını sağlayacak miktarda olmasına dikkat edilmeli ve gerekli hesaplamalar ışığında belirlenmelidir.

Alaşım kimyasal kompozisyonları belirlenirken; içerikteki madde miktarları molce veya ağırlıkça ifade edilebilmektedir. Ağırlıkça yüzde hesaplamaları, molce hesaplamalara göre daha kolay olsa da sonuçların anlamlandırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, madde miktarlarının molce ve adım adım belirlenmesi daha doğrudur. Örneğin hazırlanacak $\text{Co}_2\text{Mn}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}\text{Al}$ formundaki bir Heusler alaşımında alt indisler alaşımı oluşturan elementlerin mol kesirlerini göstermektedir. Alaşımı oluşturan elementlerin ağırlık kesirleri elde edilirken bu mol kesirlerine göre belirlenen atomik kütle dikkate alınmalıdır.

Molce yüzde değerleri bilinen numuneler için, ağırlıkça yüzde değerleri de hesaplandıktan sonra karışımı oluşturacak elementlerin her birinin karışımdaki kütleleri elde edilebilir. Miktarları belirlenen tozlar hassasiyeti 10^{-4} g olan bir terazi (Şekil 22) ile tartılarak uygun bir karıştırma kabında bir araya getirilmiştir²³. Alaşım toz karışımları hazırlanırken

²² Tozların parça boyutları tam olarak bilinmiyor ise en yakın ve mümkün olan en küçük aralığa sahip elek kullanılarak boyutlarının kontrol edilmesi önerilebilir.

²³ Kullanılan tozların çok küçük parçacık boyutlarına (nm boyutlarında) sahip olmaları nedeniyle kolayca uçucu hale gelmesi muhtemeldir. Bu nedenle, çalışmanın bu aşamasından itibaren tüm aşamalarında gözlük, maske ve

katkılanan toz miktarları; daha sonra uygulanacak prosedürlerin (pelletleme, sinterleme gibi) ardından, bu prosedürler veya çevresel faktörler nedeniyle azalabileceği için; numune ağırlıkları, bu işlem adımlarından sonra tekrar ölçülmüştür.



Şekil 22. Çalışmada kullanılan hassas terazi.

Homojenizasyon ve Pellet Yapımı

Alaşım oluşumunda iyi bir homojenlik elde etmek en önemli parametrelerden biri olduğundan; ağırlıkları ölçülerek karıştırılan toz haldeki katkıları, uygun karıştırma kaplarına (sağlam plastik tüplere) yerleştirilerek bir mikser yardımıyla uzun süre karıştırılmalıdır (titreşim ve/veya dönme hareketine maruz bırakılmalıdır). Bu adımda plastik tüplerin içerisine bilye yerleştirmek ve deney sonrası adımlarda kıyaslamaların anlamlı olabilmesi için tüm karışımların aynı süre homojenize edilmesi uygun olacaktır. Karıştırma zamanı homojenliğin sağlanması için çok önemli bir parametredir ve yeterli bir süre olmalıdır. Bununla birlikte homojenizasyon için kullanılan tüplerin plastik, bilyenin de cam olması durumunda; titreşim ve/veya dönme hareketine maruz kalan tüp içerisinde ısı artacaktır. Uzun süreli homojenizasyon adımı uygulanacaksa, artan ısıнын etkileri de mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada bütün alaşım toz karışımları 30/s devirde 30 dakika boyunca bir mikser ile karıştırılmıştır (Şekil 23).

eldiven gibi kişisel koruyucu donanımların kullanılması çalışma esnasında veya ilerde oluşabilecek tozlar kaynaklı solunum yolu hastalıkları vb. etkilere karşı korunabilmek açısından son derece önemlidir.



Şekil 23. Toz karışımlarının homojenizasyonu için kullanılan karıştırıcı

Homojen hale getirilen karışımlar 13 mm çapında bir die-set (*dyeset*) kullanılarak ve 1470 MPa değerine kadar basınç uygulayabilen bir pres makinası ile belli basınç değerlerinde sıkıştırılarak pellet haline getirilmiştir (Şekil 24).



Şekil 24. Numuneleri şekillendirmek için kullanılan hidrolik pres ve 13 mm çapında dia-set

Bu işlemlerin tüm numuneler için aynı koşullarda tekrarlanması, ekipmanın temizliğine dikkat edilmesi özellikle de tüm numuneler için aynı basınç miktarının uygulanması ciddi öneme sahiptir²⁴. KURAMSAL TEMELLER bölümünde de belirtildiği gibi üretim prosesleri (presleme işlemi gibi) alaşım özelliklerini doğrudan etkileyebilecek süreçlerdir.

²⁴ Presleme işlemi sonrası *dyset* parçalarının (tozla temas eden yüzeylerinin) alkol kullanılarak temizlenmesi, deney sonuçlarının doğruluğunu arttıracaktır. Ayrıca; manuel preslerde maruz bırakılan basınç değerinin aynı olması için, uygulanan kol çekme işlemi sayısı sabit tutulabilir.

Numunelerin Sinterleme İşlemi

Presleme aşamasından sonra bütün numuneler katı hale gelmiş (bulk) sabit formda 13 mm çapında, ince dairesel diskler olarak sinterlemeye hazır hale gelmişlerdir. Tez kapsamında ayrıntıları KURAMSAL TEMELLER bölümünde verilen toz metalurjisi-basamak sinterleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde tavlama işlemi basamaklar şeklinde adım adım uygulanabilir. Bu durum kristal yapının oluşumu ihtimalini artıracaktır. Çalışmada öncelikle sıcaklık artış basamakları alaşım grubu için özel olarak belirlenmiş ve basamaklı sinterleme işlem gerçekleştirilmiştir. Alaşım için en yüksek sıcaklığa kadar ara sıcaklık değerlerinde belirli süre bekletilen numuneler; en yüksek sıcaklıkta yine belirli bir süre bekletilerek tavlama gerçekleştirilmiştir. Tavlama işlemi sonrası uygulanacak soğutma süreci, üretilen malzemenin amorf veya kristal yapıda olma durumunu doğrudan etkileyeceği için bu süreç de yine kontrollü gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan tüm numuneler, sinterleme işleminin ardından uzun süreli soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası fiziksel formlarının son hallerine ulaşan numunelerin, kalınlık, yüzey alanı ve ağırlıkları gibi fiziksel özellikleri tekrar ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçülen bu fiziksel parametreler, sonraki adımlarda “kütle kalınlığı” hesaplarında kullanılmaktadır. Sinterleme işlemi çift zonlu, zaman ayarlı sensörü olan, sıcaklığı sabitleyen termostata sahip, dakikadaki sıcaklık artış hızı ayarlanabilen bir rezistansı bulunan ve termokupl aygıtlarını yapısında barındıran maksimum 1600°C sıcaklık uygulayabilen Protherm marka PTF 16/75/450 model fırın ile yapılmıştır (Şekil 25). Sinterleme işlemi vakum ortamında ve argon atmosferi altında gerçekleştirilerek numunelerin oksitlenmesi engellenmeye çalışılmıştır.



Şekil 25. Numunelerin sinterleme işleminde kullanılan fırın

Sinterleme işlemi sonrasında üretim aşaması tamamlanan ve yeniden denge konumuna gelen alaşımlar artık analiz ve karakterizasyon için hazır hale gelmişlerdir. Bu tez çalışmasında üretimi gerçekleştirilen Heusler alaşımlarının karakterizasyonu için EDS, XRD ve SEM ile yapılan analizlerin sonuçları kullanılmıştır. Bu sebeple aşağıda bu sistemlerin çalışma metotlarına kısaca değinilmiştir.

EDS Analizleri

Bu tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen nanoyapılı Co-esaslı Heusler alaşımların EDS ile analizi yapılmak sureti ile elementel kompozisyonları teyit edilmiştir. Enerji Ayrımlı X-ışını Spektrometresi (EDXS) incelenen malzemenin elementel yapısını ve bileşimini belirlemek için kullanılan rutin bir tekniktir. EDXS; ekipmandan bahsederken, EDS (Enerji Dağılım Spektrometre) veya analizden bahsederken ise EDX (Enerji Ayrımlı X-ışını) olarak kısaltılır ancak EDS ve EDX terimlerinin her ikisi de (çoğunlukla birbirinin yerine) aynı yöntem veya aynı ekipmandan bahsetmek için kullanılır. Günümüzde SEM ve EDS ekipmanlarının entegre olarak tasarlandığı cihazlar üretilmekte ve malzemeler için yüksek çözünürlüklü, yüksek alan derinliğine sahip bir görüntü elde etme yanı sıra, bu malzemenin temel bir bileşimini elde etmek için yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. EDS/EDX elektron ışınlaması tarafından malzemede üretilen X-ışınlarından elde edilen bilgilere dayanan elementel ve bileşimsel analiz için bir tekniktir. Bir atomun iç kabuğunun elektron yörüngesinde gelen bir elektron tarafından bir boşluk oluşturulduğunda, atom iyonize olur ve temel duruma dönmek için daha yüksek elektron düzeyindeki (dış kabuklardaki) elektron, daha düşük elektron düzeyindeki (iç kabuktaki) bu boşluğu doldurur. Bunun sonucunda, enerjinin korunumu yasasına göre, meydana gelen kabuk geçişinin özelliği olan ve kuantum mekaniği kurallarıyla tanımlandığı gibi "kuantize" olan bir X-ışını (foton) yayınlanır. Bu süreçte yayınlan X ışınlarına karakteristik X ışınları denir ve her element için belirli bir enerji (frekans / dalga boyu) değeri vardır. İncelenen malzemeden yayımlanan karakteristik X-ışınlarının enerjisinden, numunedeki öğelerin varlığı (kalitatif analiz), karakteristik X-ışınlarının şiddetinden ise numune içerisindeki her bir öğenin miktarı (kantitatif analiz) elde edilebilir. EDS ile aynı zamanda numunenin element dağılımının dinamik görüntülenmesi de alınabilmektedir.

XRD Analizleri

Malzemelerin, kristal yapıları hakkında bilgi edinmek için X-ışını toz kırınımı (XRD) yöntemi yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. X-ışını kırınımı yöntemi, istenilen doğru fazın oluştuğunu doğrulamak ve hazırlanan malzemenin örgü parametrelerinin bulunması için kullanılan bir yöntemdir. Kullanılan X-ışınları dalga boyu, aynı zamanda bir atomun da boyutu

kadar yani 1Å civarında olan elektromanyetik dalgalarıdır. 1895 yılında X-ışınlarının bulunması bilim adamlarına malzemelerin kristal yapılarını atomik boyutta inceleme olanağı vermiştir. Kristal örgü, birbirini düzenli olarak tekrar eden ve içinde birim hücrenin simetrisine göre yerleşmiş atomların olduğu düzlemlerden oluşur. İngiliz fizikçi W.H. Bragg tarafından 1913 yılında herhangi bir malzeme üzerine; bu malzemenin atomları arası mesafesi ile aynı mertebede dalga boyuna sahip X-ışınları gönderildiğinde, X-ışınlarının malzemenin düzlem yapıdaki atomlardan kırınıma uğradıkları ortaya konmuştur. Bragg Yasası olarak adlandırılan bu kırınım olayı için matematiksel ifade; $2d \sin \theta = n\lambda$ şeklinde yazılabilir. Bu ifade de d ; yapının paralel örgü düzlemleri arasındaki mesafe, θ ; gelen ve yansıyan X-ışınlarının söz konusu düzlem ile yaptıkları açı, λ ; X-ışınlarının dalga boyu, n ise 1, 2, 3 gibi değerleri alabilen bir tam sayıdır. Buna göre böyle bir karşılaşmada yapıcı bir girişim oluşabilmesi için, yapıdaki ardışık iki düzlemden saçılan X-ışınları arasındaki yol farkının ($2d \sin \theta$) X-ışını dalga boyunun tam katına ($n\lambda$) eşit olması gerekir.

XRD yöntemi bir malzemedeki atomik veya moleküler düzenlenmeyi araştırmak için en çok tercih edilen yoldur. Bir XRD sisteminde kırınıma uğratılacak X-ışınları vakum altında kapatılmış bir tüpte üretilir. Tüp içindeki flamandan akım geçirilerek flaman ısıtılır. Sıcaklık arttıkça flamandan salınacak elektron sayısı da artar. Anoda 15 – 60 kV mertebesinde yüksek voltaj uygulanır. Bunun amacı flamandan kopan elektronların hızlanarak, Cu ya da Mo anoda çarpmasıdır. Elektronlar hedefe çarptığında, hedefin karakteristik X-ışınları elde edilir. Üretilen X-ışınları önce monokromatör yardımıyla tek dalga boyuna sahip hale getirilir, paralelleştirici ve yönlendirici yarıklardan geçirilerek analiz için parçacık boyutu 10 mikrondan küçük olarak hazırlanmış toz örnek üzerine gönderilir. Bragg yasasına uygun olarak atomik düzlemlerden kırınıma uğrayan X-ışınları yönlendirici yarıktan geçerek dedektöre ulaşır ve 2θ ya göre sayım değeri olarak kaydedilir. X-ışınlarının λ dalga boyu bilindiğinden θ açısı ölçülerek atom düzlemleri arasındaki d uzaklıkları hesaplanabilmektedir. Böylece X-ışını kırınımından birim hücre parametreleri ve birim hücre hacmi hesaplanabilir. Ayrıca, X-ışınları, atomların elektronlarından saçılmaya uğradığından saçılan X-ışınlarının şiddetinden bir kristal yapı içindeki elektron yoğunluk dağılımı da bulunabilmektedir.

SEM Analizleri

Bu tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen nanoyapılı kobalt esaslı Heusler alaşımların yüksek çözünürlüklü bir Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntülerinin alınması planlanmıştır. SEM numune yüzeylerinin hedefe yönelik analizine olanak tanır ve malzeme yüzey analizi, ürün arızalarının araştırılması, tersine mühendislik, kirletici madde tanımlama, lehim bağlantı analizi vb. için yaygın olarak kullanılmaktadır. SEM incelenen örneklerin

yapısal karakterizasyonlarını ortaya çıkarmak için odaklanmış bir elektron demeti göndermek suretiyle örneğin yüzeyini tarayarak görüntü elde etmeye yarayan bir elektron mikroskopudur. Numune üzerine gönderilen elektronların numune atomları ile etkileşmesi ile ortaya çıkan bu görüntüler numune yüzeyinin topografyası, morfolojisi ve kompozisyon ile ilgili kıymetli bilgiler verir. Bu açıdan üretimi yapılan numunelerin topografik ve kompozisyon analizleri için oldukça kullanışlıdır. SEM cihazlarında incelenecek numunenin türüne ve meydana gelmesi istenen olaya göre hızlanma potansiyeli ayarlanmak suretiyle elektronların kinetik enerjileri değiştirilebilir. Genel olarak bu elektronların enerjisi eV mertebesinde keV mertebesine kadar değiştirilebilir. Bir V_H hızlandırma potansiyeli ile oluşturulan elektrik alan altında elektron eV_H , kinetik enerjisini kazanır. Enerji kazanan elektronlar yoğunlaştırıcı elektromanyetik merceklerle (*condenser lense*) toplanır ve objektif merceklerle elektromanyetik bobinlerin ortasından geçecek şekilde odaklandırılırlar. Elektromanyetik bobinler merkezine düşen hareketli elektronlara dıştan merkeze doğru manyetik kuvvet uygulanarak iyice numunenin tek bir bölgesine düşecek şekilde yönlendirilirler. Böylece, numune yüzeyine düşen elektronlar numune atomları ile etkileşirler. Bu işlem numune yüzeyinin birçok yerine odaklama mercekleri kontrollü bir bilgisayar ile ayarlanarak elektron gönderimi ile gerçekleştirilir ve tarama işlemi (*scanning*) yapılmış olur. Tarama işlemi sonunda numuneden çıkan sinyaller (saçılan elektronlar, ikincil elektronlar, karakteristik ve sürekli X-ışınları gibi) dedektör vasıtasıyla toplanması ve incelenmesi sonucu numunenin mikroskobik görüntüsü alınmış olur.

Phy-X/PSD Hesaplamaları

Üretilen Heusler alaşımların radyasyon zırh materyali olarak kullanılabilirliklerini değerlendirebilmek için Phy-X/PSD (Şakar *et al.*, 2020) yazılımı kullanılarak çeşitli radyasyon madde etkileşim parametreleri elde edilmiştir. Bir materyalin radyasyondan korunmanın gerekli olduğu alanlarda kullanılabilirliğini değerlendirmede oldukça faydalı olan söz konusu bu parametreler vasıtası ile üretimi gerçekleştirilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının alternatif nükleer yapı ve zırh materyali olabilirlikleri değerlendirilmiştir. Phy-X/PSD yazılımı tüm zırhlama ve dozimetri parametrelerini birden fazla malzeme için eş zamanlı olarak hesaplama, sonuçları grafik ve sayısal veri formunda karşılaştırmalı bir biçimde sunma gibi avantajları yanı sıra çevrimiçi ücretsiz bir uygulama olması dolayısı ile geniş bir kullanım alanına sahiptir. Programın çalışma prensipleri için program Web sayfasından (<https://phy-x.net>) ve kullanılan metodoloji için Şakar *et al.* (2020)'den faydalanılabilir.

Foton Madde Etkileşim Parametreleri

Herhangi bir radyasyon kaynağından gelen fotonlar bir malzemeye girdiğinde, fotonların bir kısmı maddeyle herhangi bir etkileşme yapmadan geçerken, etkileşenlerden bir kısmı madde tarafından soğrulur ve bir kısmı da farklı yönlerde saçılır. Bu etkileşimlerin meydana gelme olasılığı büyük ölçüde malzeme türüne ve gelen radyasyonun enerji ve türüne bağlıdır. Fotonlar bir malzemeden geçerken, fotonlar ve malzemenin atomları arasındaki etkileşimler sonucunda foton demetinin şiddetinin gitgide azalacağı açıktır. Bir foton ışınının şiddetinin bir malzeme tarafından zayıflatılması gibi bir süreç; çalışma koşullarına bağlı olarak deneysel ölçümlerle veya çeşitli simülasyon ve hesaplamalı süreçlerle değerlendirilebilir. Her iki durumda da öncelikle foton ve madde arasındaki etkileşimi temsil edebilen çeşitli radyasyon etkileşim parametreleri belirlenir ve daha sonra bu parametreler ışığında bir değerlendirme yapılır. Bu radyasyon-etkileşim parametreleri temel fizik kavramlardır ve her biri söz konusu malzemenin radyasyona maruz kalma altındaki davranışını değerlendirmek için kullanılabilir.

Bu tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen alaşımlar için çeşitli foton-madde etkileşim parametrelerine ait sonuçlar (15 keV'den 15 MeV'e kadar olan enerji aralığı için) elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Üretilen alaşımlar için öncelikli olarak materyalin radyasyon tutuculuk kabiliyeti hakkında tatmin edici bilgiler sunan kütle azaltma katsayıları (İngilizce karşılığının kısaltması olan MAC: Mass Attenuation Coefficient ile sembolize edilmiştir, cm^2/g biriminde) ve daha sonra radyasyondan korunmanın gerekli olduğu birçok uygulamada direkt kullanılabilen parametrelerden; lineer azaltma katsayısı (LAC: Linear Attenuation Coefficient; cm^{-1}), yarı kalınlık değeri (HVL: Half Value Layer; cm), ortalama serbest yol (MFP: Mean Free Path; cm) ve etkin atom numarası (Z_{eff} : Effective Atomic Number) değerleri de hesaplanmış ve her birinin enerjiye bağlı değişimleri verilmiştir. Söz konusu bu parametrelerin hesaplama prosedürlerine ve sahip oldukları fiziksel anlamlara aşağıda kısaca değinilmiştir.

Günümüzde foton-madde etkileşim parametreleri, WinXCOM (Gerward *et al.* 2004) gibi enterpolasyon programları, Phy-X/PSD (Şakar *et al.* 2020) gibi kişisel yazılımlar veya transmisyon deneyleri (Han *et al.* 2011; Büyükyıldız *et al.* 2017; Alım *et al.* 2022) kullanılarak elde edilebilir. Tüm bu yöntemler aynı temel fizik yasasına dayanmaktadır. Bir foton ışını herhangi bir malzemeden geçerken, yoğunluğu aşağıdaki gibi malzeme kalınlığının azalan bir fonksiyonu olarak değişir.

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (1)$$

Eşitlik 1’de μ ; aynı enerjili uyarıcı foton demeti için LAC değerini temsil eder. Bu durumda, gelen mono-enerjili fotonlardan malzeme ile etkileşmeyenlerin sayısı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de, I_0 ve I sırasıyla zayıflatılmamış (numuneye gelen) ve x kalınlığındaki numune tarafından zayıflatılan (numuneden çıkan) mono-enerjili fotonlarının şiddetidir. LAC (veya μ ; cm^{-1}), mevcut malzemede birim kalınlık başına toplam etkileşim olasılığıdır.

Malzemelerin radyasyon etkileşim özelliklerini belirlemede kütle soğurma katsayısı (MAC veya μ/ρ ; cm^2/g), malzemenin yoğunluğunu (ρ : g/cm^3)’da dikkate aldığı için çoğu durumda LAC’dan daha anlamlıdır ve

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

şeklinde ifade edilebilir. Burada I_0 ve I Eşitlik 2’deki ile aynı anlamları taşırlar ve numunenin kütle kalınlığı olan $t_m = \frac{m}{A}$ (g/cm^2 birimiyle) birim alan başına kütledir. Böylece herhangi bir malzeme için MAC; birim kütle başına radyasyonla etkileşim olasılığı olur ve gelen foton ile madde arasındaki ortalama etkileşim sayısının bir ölçüsü olarak düşünülebilir. MAC hem soğurucu malzemenin içeriğine hem de gelen radyasyonun enerjisine bağlıdır ve saçılma etkileşimleri de dahil olmak üzere tüm etkileşim süreçlerini hesaba katar (Han and Demir, 2009; Büyükyıldız *et al.* 2017; Kaçal *et al.* 2019; Alım, 2020).

Herhangi bir malzemenin radyasyon ile etkileşim karakteristiklerini değerlendirmede kullanılabilecek diğer birçok değerli parametre (bu tez kapsamında hesaplanan HVL ve MFP gibi) LAC ile ilişkilendirilirler ve herhangi bir malzemenin LAC değerleri kullanılarak kolayca türetilirler. HVL ilgilenilen bir malzemenin maruz kaldığı radyasyon miktarını yarı şiddete düşürmesi için sahip olması gereken kalınlıktır ve aşağıda verilen ifadeden elde edilebilir.

$$HVL = x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4)$$

MFP bir malzeme içinde ilerleyen fotonların, ardışık iki etkileşme arasında aldıkları yolu temsil eder ve

$$MFP = \lambda = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. MFP'de HVL gibi *cm* birimindedir. Bir malzeme için MFP değerinin küçük olması; malzeme içerisinde ilerleyen fotonların bu malzeme içerisinde art arda çok sayıda etkileşim yaptığı yani daha iyi soğruldukları anlamına gelir.

Etkin atom numarası (Z_{eff}) çok sayıda elementin farklı oranlarda bir araya gelerek oluşturduğu kompakt malzemeleri (bileşik, alaşım, polimer veya kompozit gibi) fotonlarla etkileşmesi sırasında; bu malzemeyi sanki bir tek elementmiş gibi değerlendirmeye imkân sağlayan kullanışlı, temsili bir sayıdır. Bir kompakt malzeme için Z_{eff} değeri, o malzemenin atomik tesir kesitinin (σ_T) elektronik tesir kesitine (σ_e) oranlanmasıyla elde edilir

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_T}{\sigma_e} \quad (6)$$

Z_{eff} malzeme için temsili bir atom numarası olduğu için tıpkı periyodik cetvelde yer alan elementlerin atom numaraları gibi birimsizdir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez kapsamında $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) formunda yeni Heusler alaşımların toz metalurjisi-basamak sinterleme yöntemi kullanılarak üretimi ve karakterize edilmeleri amaçlanmıştır. Üretim ve analiz olmak üzere iki aşamalı kurgulanan deneysel çalışmalara, üretimi planlanan alaşımların kimyasal içeriklerinin ve miktarlarının belirlenmesi sonrasında nano boyutta toz numunelerin karıştırılarak homojenize edilmesi ile başlanılmıştır. Daha sonra basınç uygulanarak sıkıştırılan ve pellet (green) haline getirilen numuneler için, sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretim aşaması için takip edilen prosedüre ilişkin detay ve ayrıntılar için bir önceki MATERYAL ve METOT bölümüne tekrar bakılabilir.

Üretilen alaşımların içeriğinde yer alan metallerin bazı genel özellikleri ile bu çalışma özelinde kullanılan nano-boyutlu tozların parçacık boyutu ve saflık gibi spesifik özellikleri Tablo 4’de birlikte verilmiştir. Kullanılan nano-boyutlu tozlar için seçim yapılırken saflık derecelerinin mümkün olduğu kadar yüksek olmasına ve alaşım üretiminde parçacık boyut belirleyici bir parametre olduğundan parçacık boyutlarının da tutarlı olmasına özellikle dikkat edilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada Kullanılan Nano-Boyutlu Tozların Bazı Spesifik Özellikleri

Özellik	Birim	Element				
		Alüminyum	Krom	Mangan	Kobalt	Nikel
Sembol		Al	Cr	Mn	Co	Ni
Atom numarası		13	24	25	27	28
Parçacık boyutu*	nm	68	30-40	20-70	28	18
Saflık*	%	99,99	99,95	99,99	99,85	99,95
Atomik ağırlığı	u	26,98	52,00	54,94	58,93	58,70
Elektron dizilimi		[Ne] 3s ² 3p ¹	[Ar]4s ¹ 3d ⁵	[Ar] 4s ² 3d ⁵	[Ar] 3d ⁷ 4s ²	[Ar] 3d ⁸ 4s ²
Elektron sayıları (enerji seviyesi başına)		2, 8, 3	2,8,13,1	2, 8, 13, 2	2, 8, 15, 2	2, 8, 16, 2
Oksidasyon durumları		3	2,3,6	2,3,4,6,7	2,3	2,3
Yoğunluk	$\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$	2,70	7,19	7,21	8,90	8,91

Tablo 4. (devamı)

Elektronegatiflik	Pauling	1,61	1,66	1,55	1,88	1,91
Atomik yarıçapı	Å	1,82	1,85	1,79	1,67	1,62
Kovalent yarıçap	Å	1,18	1,18	1,17	1,16	1,15
Ergime noktası	°C	660	1857	1246	1495	1453
Kaynama noktası	°C	2467	2672	1962	2870	2732
Ergime ısısı	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	10,79	16,90	12,05	16,19	17,47
Buharlaştırma ısısı	$\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	293,40	344,30	226,00	376,50	370,40
Özısı	$\frac{\text{J}}{\text{grK}}$	0,90	0,45	0,48	0,42	0,44
Isıl (Termal) iletkenlik	$\frac{\text{W}}{\text{cmK}}$	237,00	93,70	7,82	100,00	90,70
Atom hacmi	$\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$	10,00	7,23	1,39	6,70	6,59
İlk iyonlaşma Enerjisi	eV	5,99	6,77	7,46	7,86	7,64
Elektriksel özdirenç (20 °C'de)	$\cdot 10^{-8}\Omega\text{m}$	2,82	12,90	44,00	5,60	7,00
Elektriksel iletkenlik (20 °C'de)	$\frac{10^7}{\Omega\text{m}}$	3,77	0,79	0,23	1,72	1,43

* Bu değerler bu tez çalışmasında kullanılan element tozları içindir.

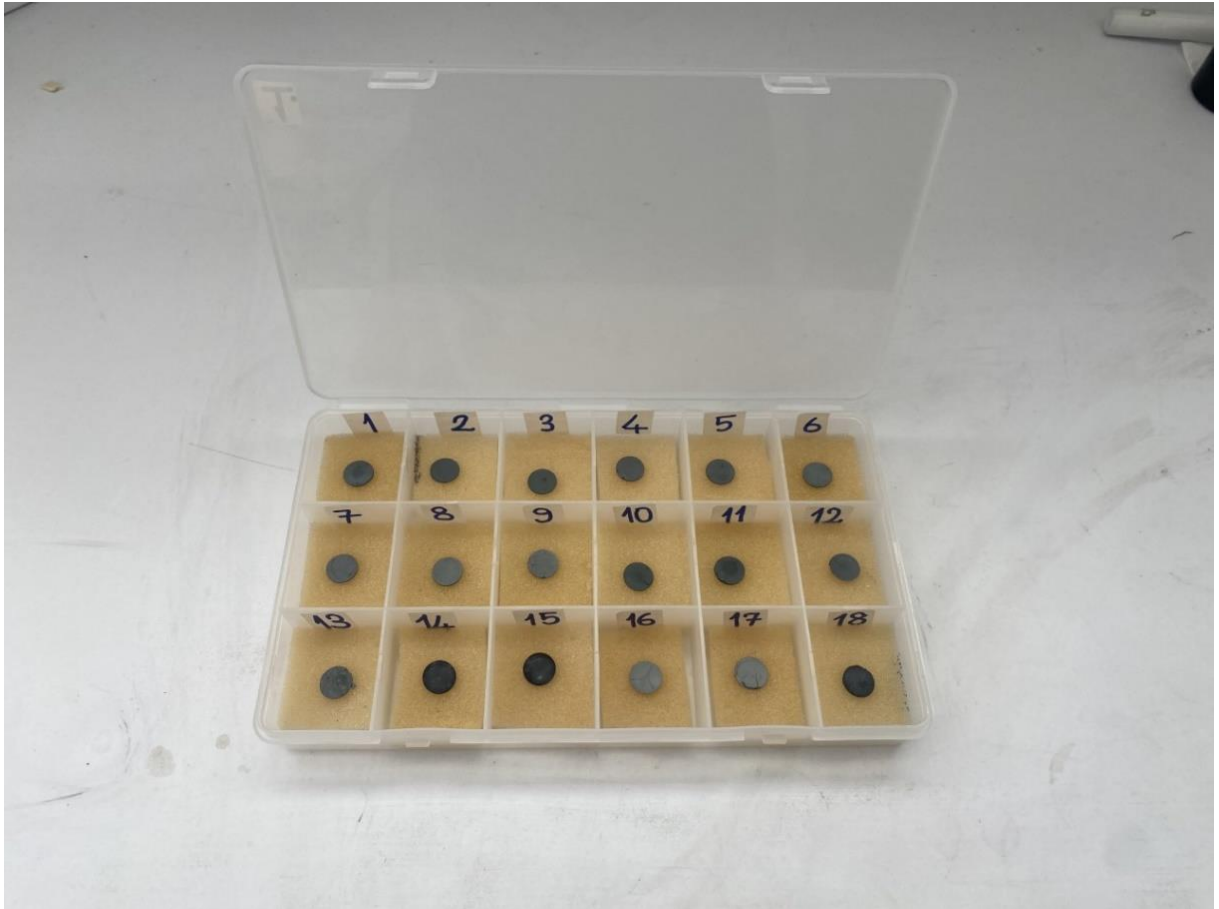
Üretimi planlanan Hesuler alaşımlarından $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşım grubunda Mn ve Ni $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşım grubunda ise Cr ve Ni içerikleri anlamlandırılabilir molar değişimlerin kombinasyonları olarak belirlenmiş ve her iki grupta x molar kesri 0,9'dan 0,1'e kadar 0,1'lik adımlar ile değiştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen alaşımlar, kendilerine verilen kodlar ve içerikleri ile birlikte Tablo 5'de analizler öncesi fotoğrafları ise Şekil 26'da verilmiştir.

Tablo 5. Üretimi Gerçekleştirilen Alaşımlar Verilen Kodlar, İçerikleri ve Bazı Özellikleri

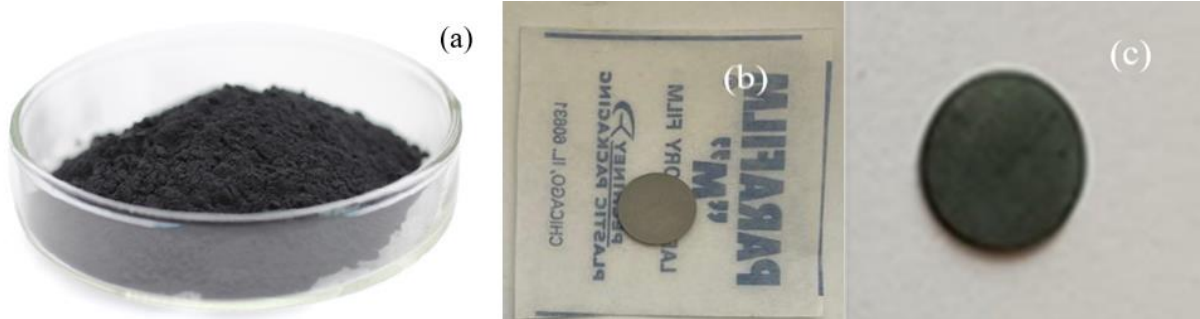
Alaşım Kodu	Formül	İçerik (molce %)					Kütle (g)	Yoğunluk ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)
		Co	Mn	Cr	Ni	Al		
H-1	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}\text{Al}$	0,500	0,225		0,025	0,250	0,2977	7,7014
H-2	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}\text{Al}$	0,500	0,200		0,050	0,250	0,2973	7,7442
H-3	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,7}\text{Ni}_{0,3}\text{Al}$	0,500	0,175		0,075	0,250	0,2907	7,7869
H-4	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,6}\text{Ni}_{0,4}\text{Al}$	0,500	0,150		0,100	0,250	0,2975	7,8294

Tablo 5. (devamı)

H-5	Co ₂ Mn _{0,5} Ni _{0,5} Al	0,500	0,125	0,125	0,250	0,2950	7,8717
H-6	Co ₂ Mn _{0,4} Ni _{0,6} Al	0,500	0,100	0,150	0,250	0,2999	7,9139
H-7	Co ₂ Mn _{0,3} Ni _{0,7} Al	0,500	0,075	0,175	0,250	0,2977	7,9559
H-8	Co ₂ Mn _{0,2} Ni _{0,8} Al	0,500	0,050	0,200	0,250	0,2972	7,9977
H-9	Co ₂ Mn _{0,1} Ni _{0,9} Al	0,500	0,025	0,225	0,250	0,2933	8,0395
H-10	Co ₂ Cr _{0,9} Ni _{0,1} Al	0,500	0,225	0,025	0,250	0,2937	7,6482
H-11	Co ₂ Cr _{0,8} Ni _{0,2} Al	0,500	0,200	0,050	0,250	0,2983	7,6976
H-12	Co ₂ Cr _{0,7} Ni _{0,3} Al	0,500	0,175	0,075	0,250	0,2917	7,7466
H-13	Co ₂ Cr _{0,6} Ni _{0,4} Al	0,500	0,150	0,100	0,250	0,2975	7,7954
H-14	Co ₂ Cr _{0,5} Ni _{0,5} Al	0,500	0,125	0,125	0,250	0,3956	7,8438
H-15	Co ₂ Cr _{0,4} Ni _{0,6} Al	0,500	0,100	0,150	0,250	0,3999	7,8919
H-16	Co ₂ Cr _{0,3} Ni _{0,7} Al	0,500	0,075	0,175	0,250	0,2977	7,9396
H-17	Co ₂ Cr _{0,2} Ni _{0,8} Al	0,500	0,050	0,200	0,250	0,2972	7,9871
H-18	Co ₂ Cr _{0,1} Ni _{0,9} Al	0,500	0,025	0,225	0,250	0,2983	8,0342

**Şekil 26.** Üretimi gerçekleştirilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ (1–9 numaralı) ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ (10–18 numaralı) alaşımların fotoğrafı

Alaşımlar 980 MPa basınç uygulanarak pellet haline getirildikten sonra her bir grup için belirlenen sinterleme basamakları uygulanarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,5$) alaşımına ait homojen toz karışımın presleme öncesi, pellet (green) haline getirilmiş ve sinterleme sonrası fotoğrafları Şekil 27’de paylaşılmıştır.



Şekil 27. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,5$) alaşımına ait fotoğraflar; (a) homojen toz karışımın presleme öncesi, (b) green (pellet haline getirilmiş) ve (c) sinterleme sonrası

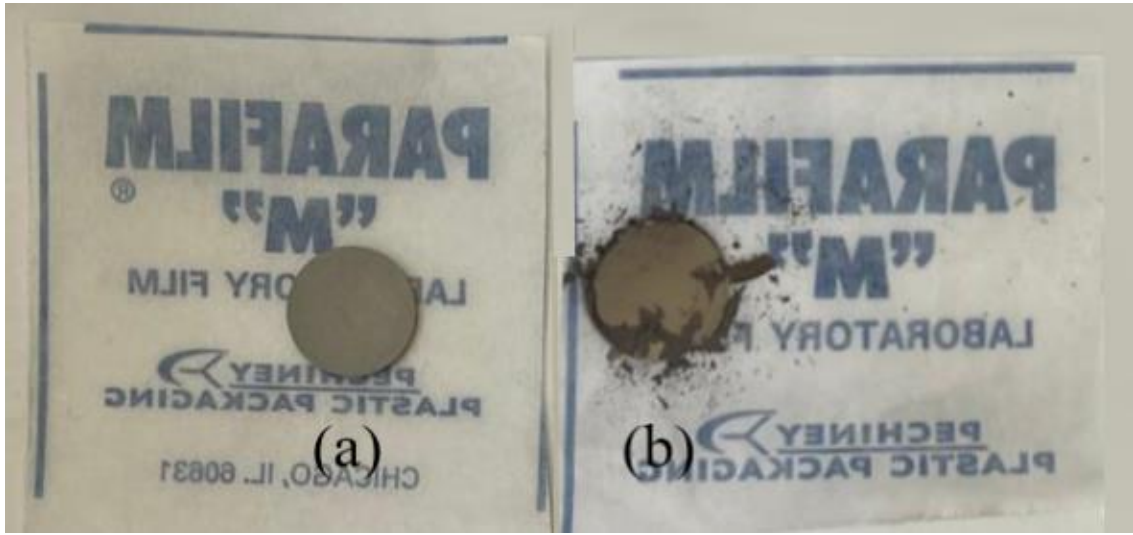
$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımlarının Üretimine İlişkin Araştırma Bulguları

Bu tez çalışmasında kobalt esaslı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımların üretimi toz metalurjisi-basamak sinterlemesi tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Sinterleme toz metalurjisinin devamı olarak alaşım üretiminde çeşitli avantajlarından dolayı yaygın bir biçimde tercih edilen bir yöntemdir. Alaşımların üretimi ve karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesine odaklanılan çalışmada ayrıca tercih edilen sinterleme yönteminin gerektirdiği işlem basamaklarının da alaşımlar üzerinde olası etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Toz metalurjisi yönteminde alaşım içeriğinde yer alacak tozların seçiminde Hume–Rothery kurallarının dikkate alınması alaşım üretimi için önem arz etmektedir. Bu kurallara göre bir araya getirilecek metallerin kafes yapılarının benzerliği, atomik yarıçaplarının yakınlığı, elektronegatiflikleri arasındaki farkın küçüklüğü ve valens elektron sayılarının aynılığı alaşım oluşumu hususunda belirleyicidir. Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Heusler alaşım serileri için kullanılan elementlerin parçacık boyutu Al, Cr, Mn, Co ve Ni için sırası ile 68; 30 – 40; 20 – 70; 28 ve 18 nm, atomik yarıçapları yine aynı sıra ile 1,82; 1,85; 1,79; 1,67 ve 1,62 Å, elektronegatiflikleri ise 1,61; 1,66; 1,55; 1,88 ve 1,91 Pauling’dir (Tablo 4). Görüldüğü üzere kullanılan elementlerin parçacık boyutları, atomik yarıçapları ve elektronegatiflikleri oldukça yakındır. Seçilen elementlerin saflıklarının yüksek olmasına da özellikle dikkat edilmiş ve %99,9’un üzerinde saflığa sahip elementler kullanılmıştır.

Tez çalışmasında üretilecek alaşımlar için sağlayacaklar olası avantajlar göz önünde bulundurularak nano boyutlu tozlar özellikle tercih edilmiştir. Çok küçük tane boyutlarından

dolayı, nano boyutlu tozlardan üretilmiş malzemeler, geleneksel iri taneli polikristal malzemelerle karşılaştırıldığında, daha farklı ve genellikle çok iyileştirilmiş özellikler gösterirler. Nanoboyutlara inildiğinde artan mukavemet/sertlik, yüksek yayınım, düşük yoğunluk, daha yüksek elektrik direnci, artan özgül ısı, daha yüksek termal genleşme katsayısı, daha düşük termal iletkenlik ve üstün nitelikli yumuşak manyetik davranış bu özelliklerden en belirgin olanlarıdır. Toz metalurjisinde parçacık boyutunun numune üretimi başarısı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,5$) alaşımı ayrıca tamamı 325 mesh (44 mikron) boyutunda olan tozlar kullanılarak da hazırlanmıştır. Şekil 28’de söz konusu alaşım için mikro boyutlu tozlar ile hazırlanan alaşımın presleme sonrası fotoğrafı (a) ile aynı koşullar altında nano boyutlu tozlar ile aynı alaşımı üretmek için gerçekleştirilen ilk deneme sonrası üretilen alaşımın fotoğrafı (b) birlikte verilmiştir.

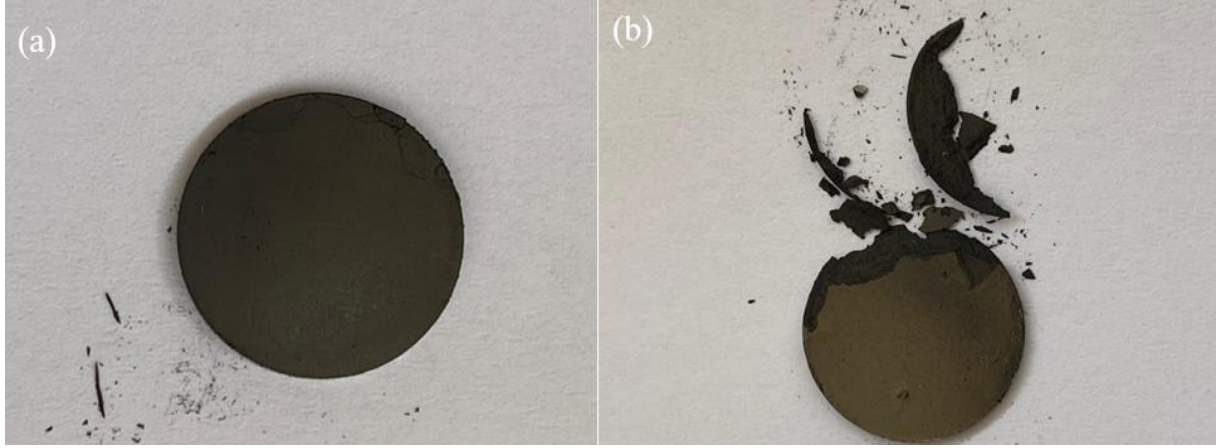


Şekil 28. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,5$) alaşımı için mikro boyutlu (a) ve nano boyutlu (b) tozlar ile gerçekleştirilen ilk girişimler sonucu üretilen alaşımların fotoğrafları

Şekil 28’den aynı koşullar altında mikro boyutlu tozlar ile ilk denemede başarılı bir biçimde numune üretilebilirken nano boyutlu tozlar ile numune üretimi birkaç deneme gerektirebilmiştir. Aynı durum farklı numuneler için de tecrübe edilmiştir. Buradan hareketle toz metalurjisinde alaşım üretmek için kullanılan tozların parçacık boyutları nano boyutlara indiğinde alaşım üretiminin nispeten zorlaştığı kanaatine varılabilir.

Toz metalurjisinde oranları belirlendikten sonra uygun bir karıştırıcıda makul bir süre karıştırılarak (Şekil 23) homojen hale getirilen toz karışımı belli bir şekil vermek maksadı ile uygun bir die-set içinde belli basınç değeri uygulanabilen bir preste sıkıştırılır (Şekil 24). Çalışmada die-set içerisinde toz karışımının dağılımının düzgün olmasının, die-setin presteki yerleşiminin, uygulanan basınç değerinin iyi belirlenmesinin, kullanılan die-setin kusursuzluğunun ve deneyci hassasiyetinin de numune üretiminde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Şekil 29’da die-set içerisinde toz karışımının dağılımının düzgün olmadığı (a),

uygulanan basınç değerin gereğinden fazla / az veya dengesiz olduğu (b) durumlarda alaşım üretiminin istenilen kalitede gerçekleştirilemediğini ortaya koyan fotoğraflar verilmiştir. Şekil 30'da die-setin içerisindeki preslenecek tozun düzgün dağılmadığı, Şekil 31'de ise die-setin kendisinin presteki yerleşiminin dengesiz ve kullanılan die-setin kusurlu olduğu durumlarda üretimde başarısız olduğunu gösteren fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 29. Alaşım hazırlama sırasında die-set içinde toz karışımının dağılımının düzgün olmadığı (a), uygulanan basınç değerin gereğinden fazla veya az olduğu (b) durumlarda üretilen alaşımlardaki kusurlar

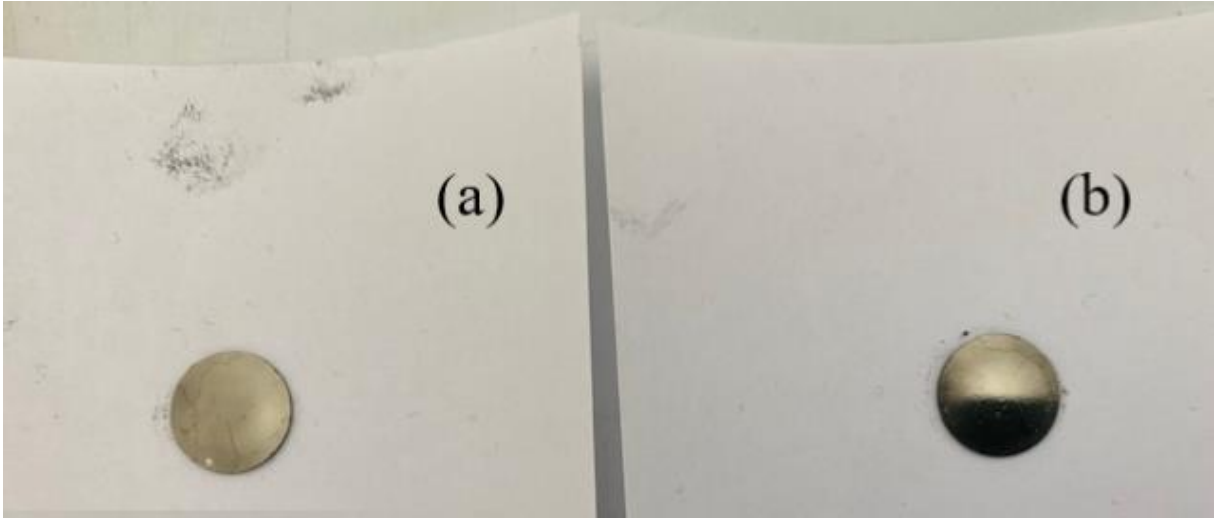


Şekil 30. Pelletleme sırasında die-setin içerisindeki preslenecek tozun düzgün dağılmadığı durumlarda alaşım üretiminde başarısız olduğunu gösteren fotoğraflar



Şekil 31. Pelletleme sırasında die-setin kendisinin presteki yerleşiminin dengesiz ve kullanılan die-setin kusurlu olduğu durumlarda alaşım üretiminde başarısız olduğunu gösteren fotoğraflar

Yukarıda verilen bulgular göstermektedir ki toz metalurjisi avantajlı ve temiz bir üretim yöntemi olmakla birlikte, bu yöntem ile alaşım üretimi için takip edilen işlem basamakları, uygulama biçimi ve kullanılan ekipmanın üretilecek alaşımın kalitesi üzerinde doğrudan bir etkisi söz konusudur. Toz metalurjisinde üretimi amaçlanan alaşım için içerikte yer alacak tozların oranları belirlendikten sonra homojen toz karışımı haline getirilmesinden sonraki aşama olan pelletleme veya green olarak da adlandırılan ham numunenin oluşturulması süreci oldukça dikkatli planlanmalı ve hassas bir biçimde yerine getirilmelidir. Bu aşamada özellikle nano tozlar ile çalışılırken kullanılan ekipmanın kalitesi ve kusursuzluğu, uygulanan basınç değerinin yeterliliği, toz karışımının kalıp içerisindeki dağılımının düzgünlüğü, kalıbın pres altında yerleşimi ve kuvvetin uygulanış biçimi ile deneycinin hassasiyeti alaşım üretiminin başarısı için önem arz etmektedir. Tüm bu etkenler için optimum koşulların sağlanması ile istenilen formda bir alaşım üretimi gerçekleştirilebilecektir. Bu hususlara dikkat edilerek hazırlanan $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,4$) (a) ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,3$) (b) alaşımlarına ait fotoğraflar Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,4$) (a) ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,3$) (b) alaşımlarına ait fotoğraflar

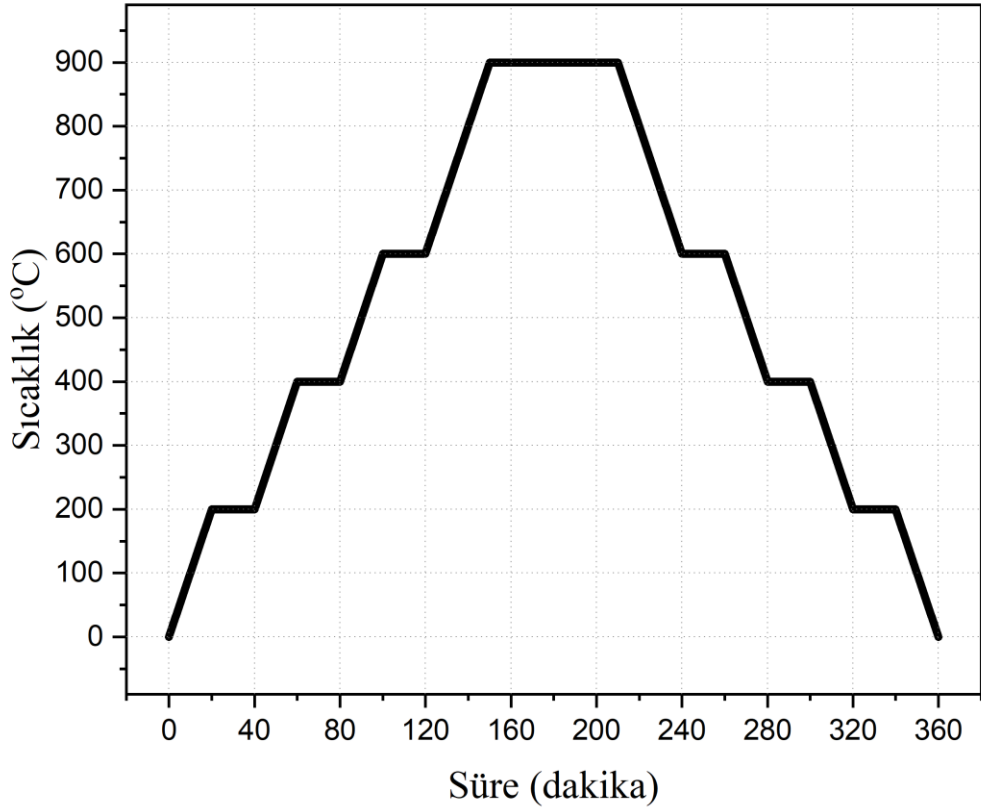
Toz metalürjisi ile malzeme üretiminde çoğunlukla oda sıcaklığında kalıp içerisinde sıkıştırma neticesinde belirli bir forma sokulan ham parça, toz tanecikleri arasındaki metalurjik bağların sağlanabilmesi amacıyla bir fırında kontrollü sıcaklıklarda (kullanılan metal tozunun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta) ya da koruyucu bir atmosferde sinterlenmektedir. Sinterleme öncesinde sıkıştırılmış toz parçalar arasındaki bağlantı mekanik bir bağlanma olup sinterleme ile elde edilen kristal kafes içerisindeki bağlanmaya kıyasla halen daha çok zayıf kalmaktadır. Dolayısı ile malzemenin dayanım sınırları ve kullanılabilirliği oldukça sınırlıdır. Sinterleme işlemi ile ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı gözenekli yapıda belirli bir form kazandırılmış tozların yüzey alanının küçülmesine, partikül temas noktalarının büyümesine ve bunlara bağlı olarak yapısal iyileşmelere (yeterli mukavemet gibi) neden olmaktadır. Sinterleme tekniğinde alaşıma uygulanacak ısı işlem basamakları en optimum alaşım üretimini sağlayabileceği gibi, yanlış planlanan bir ısı işlem alaşımında kırılma, çatlama, şekil bozukluğu gibi istenmeyen durumlara da sebep olabilmektedir. Sinterleme basamaklarının doğru planlanması ve uygulanmasının etkisini gözlemlemek üzere üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarından bir sete içerik göz önünde bulundurulmadan, erime sıcaklıkları ve süreleri dikkate alınmaksızın, rastgele bir sinterleme uygulanmıştır. Bu durumda üretilen alaşımlarda beklenildiği gibi şekil bozuklukları ve kusurlar gözlenmiştir. İyi planlanmamış bir sinterleme işleminin üretilen alaşımlarda sebep olabileceği yapısal problemlere ilişkin örneklerin görülebileceği $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,4$) alaşımına ait fotoğraflar Şekil 33’de verilmiştir.



Şekil 33. İyi planlanmamış bir sinterleme işleminin $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($x = 0,4$) alaşımında sebep olduğu yapısal problemleri gösterir fotoğraf.

Bu aşamada elde edilen bulgulara dayanarak sinterleme tekniği ile alaşım üretiminde sinterleme prosedürlerinin iyi planlanmış olması gerektiği anlaşılmaktadır. Alaşımlar gibi ikiden fazla elementin belirli koşullar altında bir araya getirilmesi ile oluşturulan sistemlerde sinterleme sıcaklığı alaşımı oluşturan bu elementlerin ergime sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Sinterleme işlemi alaşımı oluşturan elementlerden ergime sıcaklığı en düşük olanın ergime sıcaklığının üstünde bununla birlikte ergime sıcaklığı en yüksek olan elementin ergime sıcaklığının ise altında olmalıdır. Bununla birlikte sinterleme sıcaklığı alaşımı oluşturan elementlerin içerikteki miktarları, elektronegatiflikleri vb. parametrelere de bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle sinterleme işlemi için gerekli sinterleme sıcaklığı ve bunun uygulama basamakları üretilecek her bir alaşım özelinde belirlenmeli ve planlanmalıdır. Sinterleme işleminde sinterleme sıcaklığı kadar sinterleme basamakları (ısıtma soğutma sıcaklık değerleri ve süreleri gibi) de önemlidir ve dikkatli planlanması gerekir. Bu işlemlerin üretimi gerçekleştirilecek her bir alaşım için optimum değerleri vardır ve farklı bir uygulama sinterleme sonucunu olumsuz etkileyebilir. Çünkü işlem sonucunda elde edilmesi amaçlanan kristal yapıya ulaşıp ulaşılamaması büyük oranda uygulanan ısı işlem sürecine bağlıdır. Bu çalışmada sinterleme sıcaklıkları ve süreleri açısından en optimum sinterleme koşulları her bir alaşım için önceden yapılan hesaplamalar ve deneysel denemeler neticesinde belirlenmiş ve uygulanmıştır. Alaşımlarda kristal yapının oluşumu ihtimalini artırmak için tavlama işlemi basamaklar şeklinde adım adım uygulanmıştır. Basamaklı sinterleme işlemi için sıcaklık artış basamakları alaşım grupları için özel olarak belirlenmiştir.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için uygulanan sinterleme işlemine ait akış diyagramı (ilk ve son laboratuvar sıcaklıkları grafikte sıfır olarak işaretlenmiştir) Şekil 34’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 34. Üretimi gerçekleştirilen alaşımlar için uygulanan basamak-sinterleme işlemine ait akış diyagramı (ilk ve son laboratuvar sıcaklıkları grafikte sıfır olarak işaretlenmiştir)

Sinterleme işlemi akış diyagramından (Şekil 34)’da görüleceği üzere; bu işlemde en yüksek sıcaklığa kadar ara sıcaklık değerlerinde belirli süreler bekletilen numune; en yüksek sıcaklıkta yine belirli bir süre bekletilerek tavlama gerçekleştirilmiştir. Alaşımlar için sinterleme sıcaklığı alaşımı oluşturan elementlerin özellikleri (erime sıcaklığı, atomik çap vb.) göz önünde bulundurularak KURAMSAL TEMLER bölümünde bahsi geçen ilkeler doğrultusunda belirlenmiştir. Daha sonra en iyi formda alaşımı üretmek için yapılan birçok deneme neticesinde en uygun süre-sıcaklık artış miktarları ve bekleme süreleri belirlenmiştir. Basamak-sinterlemesi için kullanılan ve elektronik olarak kontrol edilebilir fırın (Şekil 25) sıcaklık artış basamakları için dakikada 10°C (10°C/dk) artış gerçekleşecek şekilde kodlanmıştır. Basamak-sinterleme süreci; ilk 20 dakika da 200°C’ye çıkıp, bu sıcaklıkta 20 dakika bekleyecek, sonraki 20 dakika da 400°C’ye çıkıp, bu sıcaklıkta 20 dakika bekleyecek, bir sonraki 20 dakika da 600°C’ye çıkıp, bu sıcaklıkta 20 dakika bekleyecek ve sonraki 30 dakikada bu kez 900°C’ye çıkıp, bu sıcaklıkta 60 dakika bekleyecek ve aynı süre ve oranlarda tekrar geriye dönecek şekilde programlanmıştır. Tavlama işlemi sonrası uygulanacak soğutma

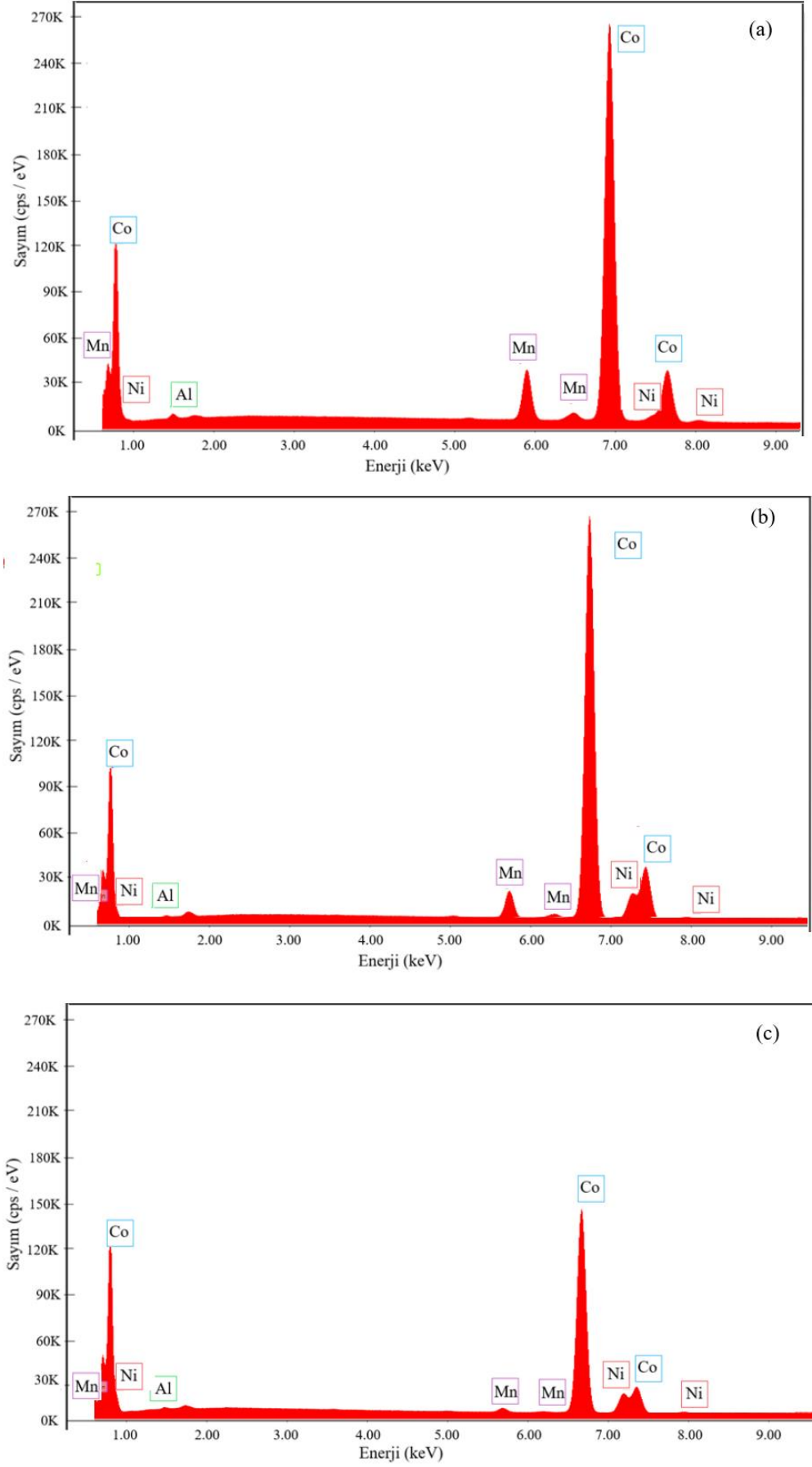
süreci, üretilen malzemenin amorf veya kristal yapıda olma durumunu doğrudan etkileyeceği için bu süreç de yine kontrollü gerçekleştirilmiştir. Böylece her bir alaşım için toplamda altı saat süren sinterleme işleminin ardından uzun süreli soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının sahip oldukları bazı özellikler Tablo 5’de ve fotoğrafları Şekil 26’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki sinterleme tekniği kullanılarak Heusler alaşımları üretilirken doğru formda alaşım üretebilmek için takip edilmesi gereken prosedür ve proseslerin doğru bir biçimde belirlenmesi ve hassasiyetle uygulanması önem arz etmektedir.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımlarının Karakterizasyon Analizlerine İlişkin Araştırma Bulguları

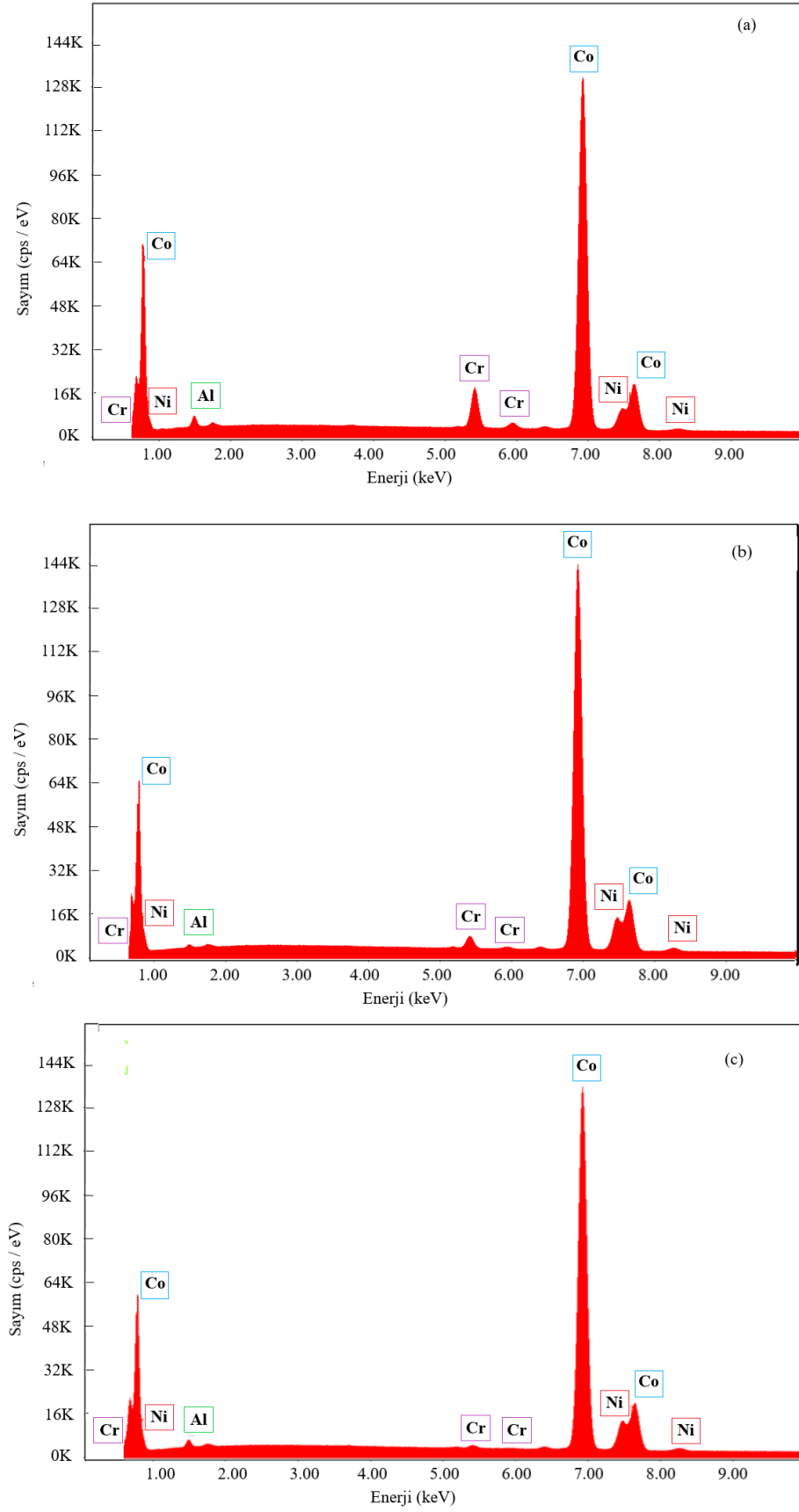
Tez kapsamında toz metalurjisi-basamak sinterleme yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) alaşım gruplarının özellikleri farklı sistemler ile yapılan analizler neticesinde ulaşılan veriler ışığında belirlenmiştir. Alaşımların karakteristik X-ışını spektrumları enerji ayırmalı spektrometre (EDS) ile alınmış ve kompozisyonların değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Alaşımların kristal yapı, faz tipi ve örgü parametreleri gibi özellikleri X-ışını kırınım (XRD) ölçümlerinden belirlenmiştir. Alaşımların yüzey morfolojilerinin ve yapısal özellikleri tespiti için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu üç sistem ile yapılan analizler neticesinde ulaşılan veriler, spektrumlar, fotoğraflar ve sonuçlar aşağıda ayrı ayrı verilmiş ve tartışılmıştır.

EDS sonuçları

Üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için elde edilen karakteristik X-ışını spektrumlarından seçilen birkaçı karşılaştırma için sırası ile Şekil 35 ve Şekil 36’da verilmiştir. Her iki alaşım seti için spektrumlar arasında kıyaslama yapabilmek amacı ile $x = 0,9 ; 0,5$ ve $0,1$ değerlerine karşılık gelen alaşımların spektrumları seçilmiştir.



Şekil 35. Seçilen üç farklı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımı için elde edilen enerji dağılımlı X-ışını spektrumlarının birlikte gösterimi. (a) $x = 0,9$ için, (b) $x = 0,5$ için ve (c) $x = 0,1$ için



Şekil 36. Seçilen üç farklı $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımı için elde edilen enerji dağılımlı X-ışını spektrumlarının birlikte gösterimi. (a) $x = 0,9$ için, (b) $x = 0,5$ için ve (c) $x = 0,1$ için

EDS analizleri $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının planlanan kompozisyonlara çok yakın üretilbildiğini ortaya koymuştur. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşım setlerine ait grafiklerde ilk göze çarpan korelasyon alaşımı meydana getiren element atomlarından yayınlanan karakteristik pik şiddetlerinin, elementin atom numarasının büyüklüğü ile olan doğrusal ilişkisidir. Yine Şekil 35 ve Şekil 36’da verilen karakteristik spektrumlardan da görülebilen bir diğer korelasyon ise alaşımdaki elementin konsantrasyonu ile pik şiddeti arasındaki doğrusal ilişkidir. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında (Tablo 5’de H-1’den H-9’a kadar kodlanan) Mn miktarı $x = 0,9$ dan $x = 0,1$ e kadar sırası ile 0,1 lik adımlar ile azalırken, Ni miktarı aynı adımlar ile atmaktadır. Alaşımlar için elde edilen spektrumlardan da görüldüğü gibi alaşım içerisindeki Mn miktarı azalırken Mn’a ait karakteristik X-ışını piklerinin şiddeti azalmakta buna karşın miktarı artan Ni’e ait karakteristik X-ışını pikleri ise daha da şiddetlenmektedir (Şekil 35). Üretilen $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında ise alaşımdaki Cr miktarındaki $x = 0,1$ ’ lik her bir değişime zıt yönde aynı miktarda bir Ni artışı eşlik etmektedir. Bu alaşım grubu içinde alaşımdaki elementel konsantrasyona bağlı olarak karakteristik X-ışını pikleri şiddeti aynı yönlü değişim göstermektedir (Şekil 36).

Üretilen alaşımlar için değerlik elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 6’da verilmiştir.

$$e/a = \frac{1}{100} [(e_1 \cdot \%at_1) + (e_2 \cdot \%at_2) + (e_3 \cdot \%at_3) + \dots] \quad (7)$$

Bu denklemde e_i alaşımda yer alan her bir elementin değerlik elektron sayısı ve $\%at_i$ bu elementlerin her birinin alaşım içerisindeki ağırlık kesirleridir.

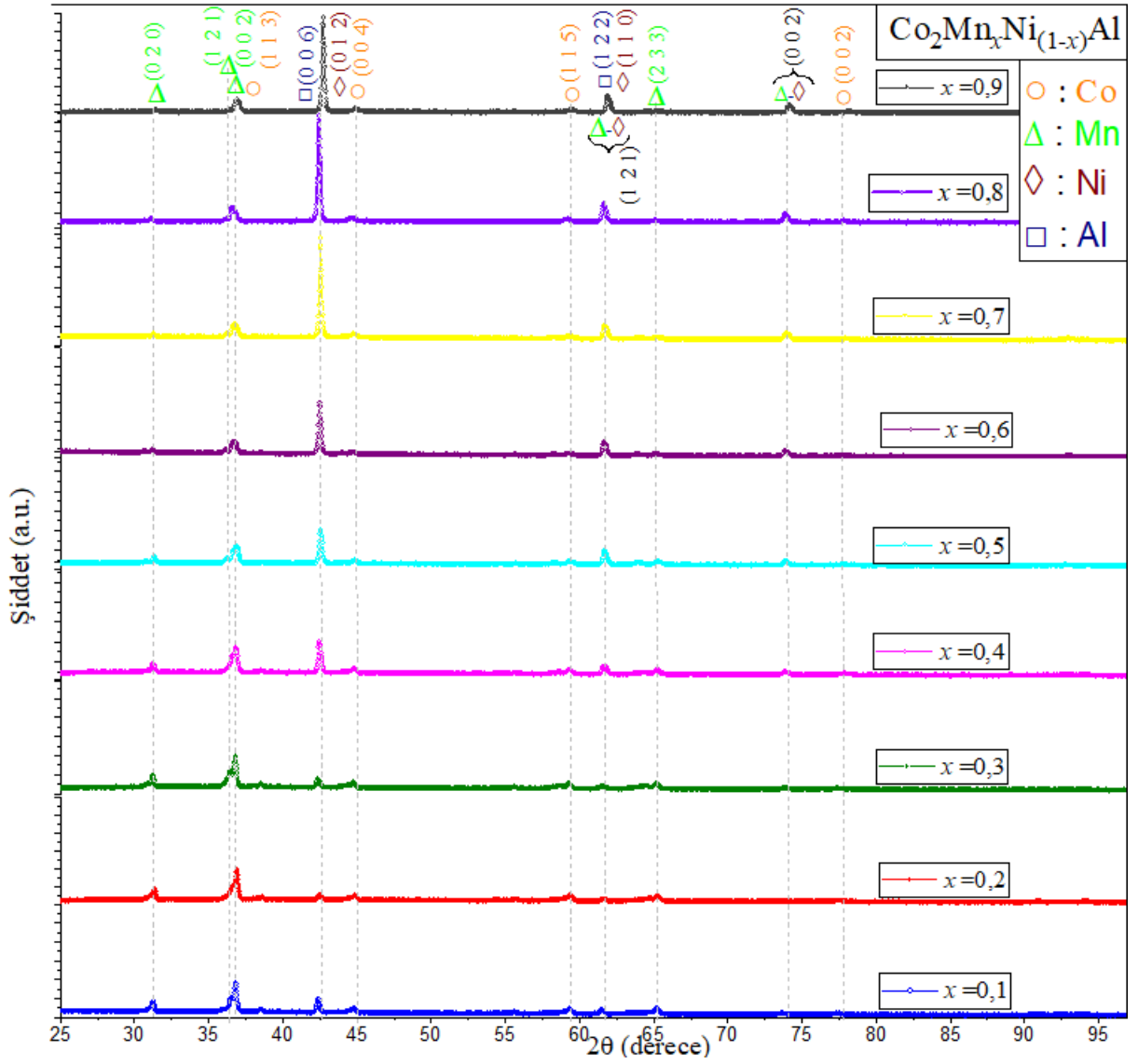
Tablo 6. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları İçin Değerlik Elektron Konsantrasyonu (e/a) Değerleri

Alaşım Kodu	Formül	e/a	Alaşım Kodu	Formül	e/a
H-1	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}\text{Al}$	7,08	H-10	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}\text{Al}$	6,85
H-2	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}\text{Al}$	7,15	H-11	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}\text{Al}$	6,95
H-3	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,7}\text{Ni}_{0,3}\text{Al}$	7,23	H-12	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,7}\text{Ni}_{0,3}\text{Al}$	7,05
H-4	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,6}\text{Ni}_{0,4}\text{Al}$	7,30	H-13	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,6}\text{Ni}_{0,4}\text{Al}$	7,15
H-5	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Al}$	7,38	H-14	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Al}$	7,25
H-6	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,4}\text{Ni}_{0,6}\text{Al}$	7,45	H-15	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,4}\text{Ni}_{0,6}\text{Al}$	7,35
H-7	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,3}\text{Ni}_{0,7}\text{Al}$	7,53	H-16	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,3}\text{Ni}_{0,7}\text{Al}$	7,45
H-8	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}\text{Al}$	7,60	H-17	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}\text{Al}$	7,55
H-9	$\text{Co}_2\text{Mn}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}\text{Al}$	7,68	H-18	$\text{Co}_2\text{Cr}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}\text{Al}$	7,65

Alaşımlarda Co elementinin miktarı sabit kaldığından, alaşımın e/a oranını büyütücü yöndeki en önemli katkı değerlik elektron sayısı en büyük olan Ni elementinden gelmektedir (alaşımlardaki elementlerin değerlik elektron sayıları için Tablo 5'e bakılabilir). $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında artan Ni konsantrasyonu ile e/a değerleri lineer olarak artmaktadır. Heusler alaşımlılarında martensit faz geçişleri üzerindeki en belirleyici parametreler; alaşımın kompozisyonu ile değerlik elektron konsantrasyonu (e/a) değeridir (Entel *et al.*, 2006). e/a değerleri martensit geçiş sıcaklığını kontrol etmeyi sağlamak için kullanılabilir. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ tipi Heusler alaşımlarında da alaşımları oluşturan elementlerin katkı miktarlarındaki değişim; kompozisyon değişimi ile birlikte e/a oranını da değiştireceğinden, bu durum alaşımın yapısı ve özellikleri üzerinde önemli rol oynayacaktır.

XRD sonuçları

Tez çalışması kapsamında üretilen nanoyapılı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Heusler alaşımların kristal yapılarını ve birim hücre parametrelerini belirlemek amacı ile $15^\circ \leq 2\theta \leq 110^\circ$ aralığında 0,026 adımlarla oda sıcaklığında Cu ($\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$) anod materyaline sahip X-ışını toz kırınım metresi (XRD) kullanılarak ölçümler alınmıştır. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ setinde yer alan alaşımlar için elde edilen XRD spektrumları Şekil 37'de verilmiştir. Spektrumlar üzerinde sağlıklı ve anlaşılır bir karşılaştırma yapabilmek maksadı ile tüm alaşım spektrumları aynı ölçekli skalalar ile çizilmiştir.



Şekil 37. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının X-ışını kırınım deseni

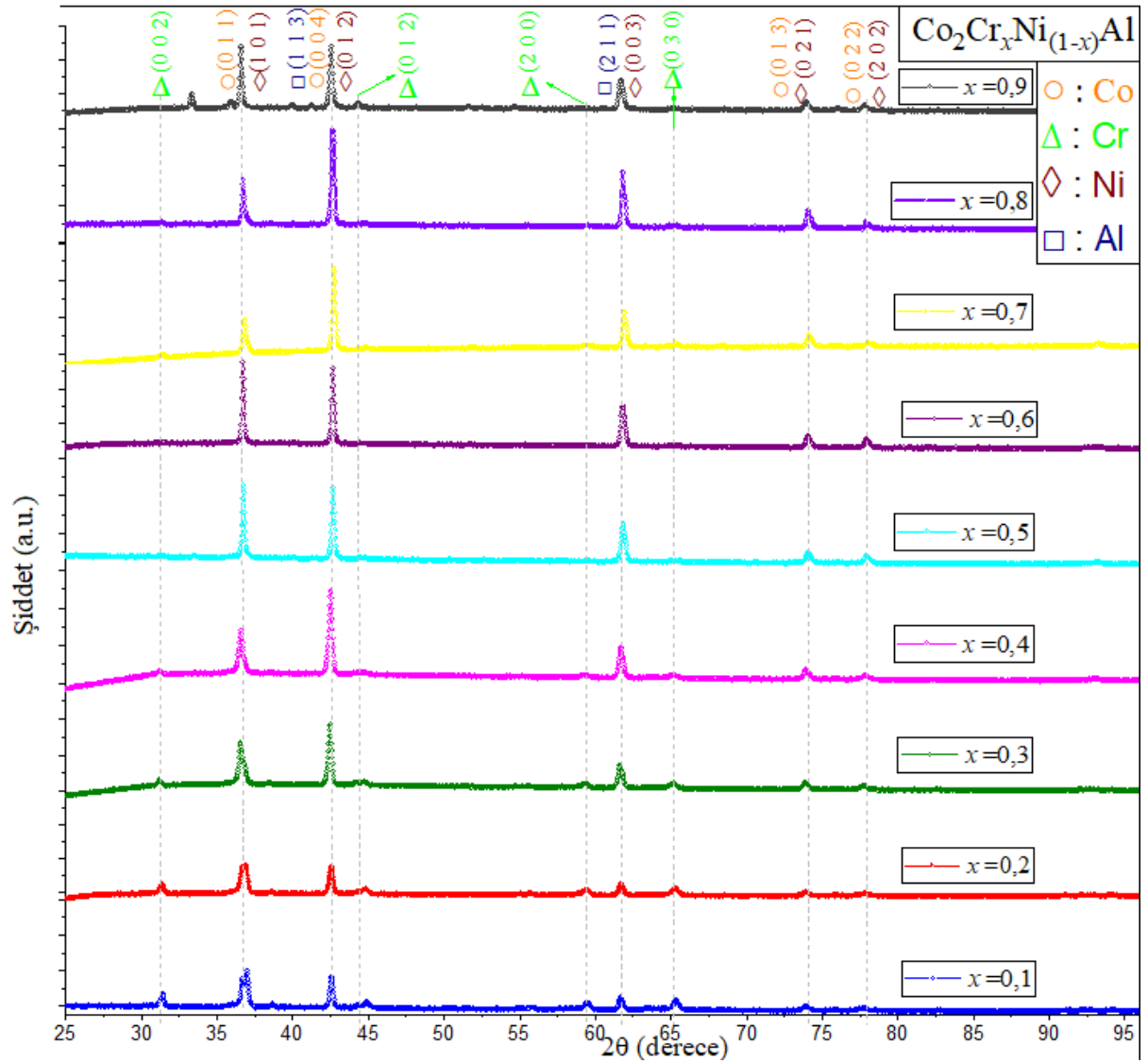
$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için XRD verilerinden yapı içerisinde bir çok farklı düzenleme olduğu ve alaşımların polikristal yapıda oldukları sonucuna ulaşılmıştır. Alaşımlarda çoğunlukla kübik yapıda kristal düzenlemeleri olmakla birlikte, tetragonal ve hekzagonal yapılar da oluşmuştur. Şekil 37 incelendiğinde $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında; alaşımı oluşturan elementlere ait kristal düzlemlere ek olarak yapı içerisinde, alaşımlama etkisinden kaynaklanan ve farklı atomlarında bağ yaptığını ortaya koyan farklı kristal düzlemlerinin de söz konusu olduğu görülebilmektedir. XRD spektrumlarında $2\theta = 31^\circ$ ve $2\theta = 38^\circ$ de Mn için elde edilen pik; alaşımda yer alan Mn miktarı azaldıkça (Şekil 37’de aşağıdan yukarıya doğru gidildikçe) buna bağlı olarak şiddetini kaybetmektedir. Yine $2\theta = 36^\circ$ civarlarında başlangıçta birbiri içerisine girmiş Mn ve Co pikleri Mn miktarı azaldıkça önce birbirinden ayrılmakta ve yerini daha net bir Co pikine bırakmaktadır. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının XRD spektrumlarında bir diğer belirgin değişim $2\theta = 42^\circ$ civarında gözlenmektedir. Bu açıda gözlemlenen Ni elementine ait pik alaşımdaki Ni miktarı arttıkça

şiddetlenerek keskinleşmektedir. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında x değişimi ile birlikte belirgin bir farklılık gösteren bir diğer pik yaklaşık $2\theta = 61^\circ$ civarında konumlanmıştır. Bu açıda alaşımdaki Ni oranı arttıkça şiddetlenen ve farklı düzlemlerden Ni (NiO) ve Al (Al_2O_3) katkısı yanı sıra (1 2 1) düzleminde bir Mn – Ni katkısı gözlemlenmiştir. Buradan $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında; alaşımlama etkisinden kaynaklı olarak Mn – Ni atomları arasında bir etkileşmenin ve yeni bir düzenlenmenin olduğu anlaşılmaktadır. Aynı durum $2\theta = 73^\circ$ civarında konumlanan pikte de söz konusudur. Değişimi artan Ni miktarına bağlı olarak şiddetlenen bu pik; (0 0 2) düzleminde, tetragonal yapıda ve Mn – Ni ye ait olarak elde edilmiştir. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında çeşitli açılarda farklı düzlemlerden elde edilen belirgin pikler için pik pozisyonları, karşılık gelen miller indisleri ($h k l$) ve düzlemler arası mesafe değerleri (d) Tablo 7’de verilmiştir. Tablo 7’de verilen pik pozisyonları alaşımlardan biri için belirlenen pozisyon olmakla birlikte diğer alaşımlardaki pik pozisyonu da hemen hemen bu açı veya çok yakınında yer almaktadır.

Tablo 7. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımları İçin Bazı Pik Pozisyonları ve Karşılık Gelen ($h k l$), d Değerleri ($2\theta = 30^\circ - 80^\circ$)

2θ (derece)	h	k	l	d (Å)
31,38	0	2	0	2,75586
36,23	1	2	1	2,48071
36,50	0	0	2	2,45396
36,80	1	1	3	2,43802
42,27	0	0	6	2,11287
42,70	0	1	2	2,11287
44,78	0	0	4	2,02150
55,60	2	2	4	1,65055
59,45	1	1	5	1,55615
61,50	1	1	0	1,50001
61,50	1	2	2	1,50136
61,50	1	2	1	1,50510
65,60	2	3	3	1,42189
73,80	0	0	2	1,27889

$\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ setinde yer alan alaşımlar için elde edilen XRD spektrumları Şekil 38’de verilmiştir.



Şekil 38. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının X-ışını toz kırınım deseni

$\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarına ait XRD spektrumları üzerinde, alaşım yapı içerisinde oluşan kristal düzlemleri belirlenmiştir. Kristal düzlemleri incelendiğinde, $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında da çok sayıda farklı düzlem oluştuğu ve alaşımların polikristal yapıda olduğu tespit edilmiştir. XRD sonuçlarına göre $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için de en belirgin kristal yapılar yine kübik, tetragonal ve hekzagonal olmakla birlikte $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarından farklı olarak bu alaşımlarda tetragonal düzenlenme daha fazladır. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında çeşitli açılarda farklı düzlemlerden elde edilen pikler için pik pozisyonları, karşılık gelen miller indisleri (h k l) ve düzlemler arası mesafe değerleri Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımları İçin Bazı Pik Pozisyonları ve Karşılık Gelen ($h k l$), d Değerleri ($2\theta = 30^\circ - 80^\circ$)

2θ (derece)	h	k	l	d (Å)
31,22	0	0	2	2,86000
36,69	0	1	1	2,45875
36,69	1	0	1	2,44085
42,65	0	0	2	2,12700
42,65	0	1	2	2,11287
42,65	1	1	3	2,11701
44,88	0	1	2	2,03214
59,45	2	0	0	1,56129
61,80	0	0	3	1,50842
61,80	2	1	1	1,50313
65,18	0	3	0	1,43212
74,00	0	1	3	1,28301
74,00	0	2	1	1,27490
77,66	0	2	2	1,22938
77,66	2	0	2	1,22042

Tablo 8’de verilen pik pozisyonları grupta yer alan alaşımlardan biri için belirlenen pozisyonudur. Alaşımlar için pik pozisyonları alaşımların yüzeylerinde tam düz olmamasından ve oksitlenmeden kaynaklandığı öngörülen küçük sapmalar gösterebilmektedir. Alaşımların manyetik özelliklerine bağlı olarak sistematik bir pik kayması gerçekleşmesi beklenmekle birlikte mevcut kayma bu çerçevede anlamlandırılmamıştır.

Şekil 37 ve Şekil 38’de spektrumlar üzerine eklenen dikey kesikli çizgiler okuyucuya pik pozisyonlarını değerlendirme ve karşılaştırmada yardımcı olması maksadı ile eklenmiştir ve başka bir anlam içermemektedir. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için de elde edilen ve Şekil 38’de birlikte verilen spektrumlardaki gözlenen piklerinde tıpkı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında olduğu gibi oksitlenme nedeni ile genellikle oksitli bağ yapılarında olduğu saptanmıştır. Örneğin kromun oksitlenmesi nedeniyle oluşan Cr_2O_3 molekülü bağ yapısına ait çok sayıda kristal düzlemler $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarına ait numunelerin XRD spektrumu grafiklerinde sırası ile $2\theta = 31,2^\circ$ ve $2\theta = 65^\circ$ açılarında görülebilir. Bunun yanı sıra XRD spektrumlarında CrO_2 , CrO_3 ve Cr_3O ’a ait piklerde gözlemlenmiştir. Cr elementi ile ilgili olarak XRD spektrumlarında tespit edilen bu kristal düzlemlerin sayısının fazla olması, Cr elementinin oksidasyon sayısının fazla olması ve dolayısıyla yapabildiği bağ sayısının da fazla

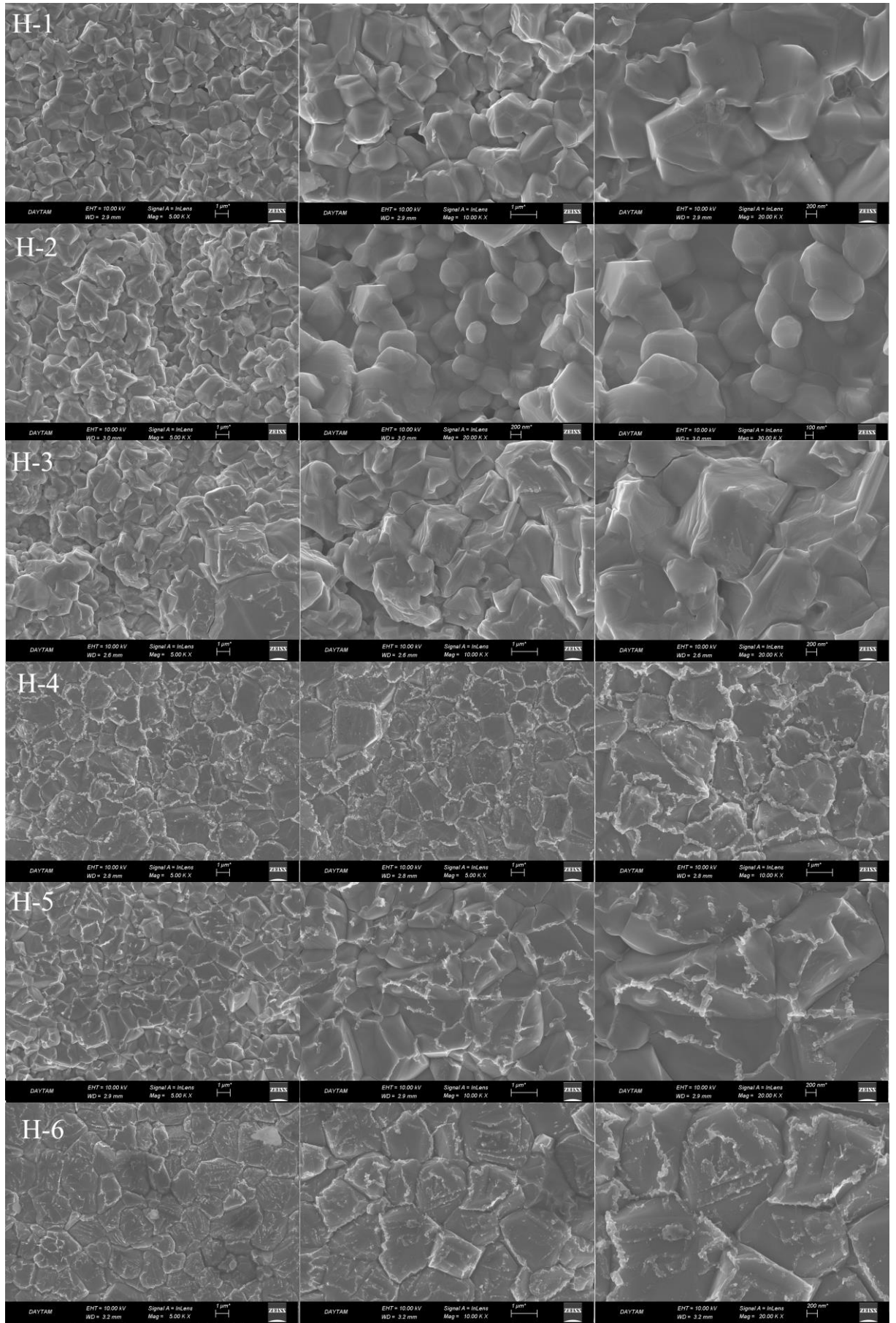
olmasından kaynaklanmaktadır. Cr elementinin çoklu bağ yapabilen diğer 3d grubu elementlerinden farklı olarak yeni kristal düzlemler oluşturması, bu elementin bir alaşımda yer alması halinde, alaşımda valens elektron yapısında önemli değişikliklere sebep olacağını göstermektedir. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarına ait XRD spektrumlarının x 'in aşağıdan yukarıya doğru azaldığı düzende verildiği Şekil 38'de Cr elementinin pikleri sırası ile $2\theta = 31^\circ$, $2\theta = 44^\circ$, $2\theta = 59,5^\circ$ ve $2\theta = 65^\circ$ açıları civarında gözlenmektedir. Bu piklerin hepsinin ortak özelliği alaşımdaki Cr miktarı oranı azaldıkça (Şekil 38'de aşağıdan yukarıya doğru gidildikçe) buna bağlı olarak şiddetlerinin kayda değer oranda azalmasıdır. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarına $2\theta = 37^\circ$ civarlarında Co ve Ni elementlerinin farklı düzlemlerden gelen katkıları ile x 'in büyük olduğu (alaşımdaki Ni oranının az olduğu) alaşımlarda başlangıçta geniş ve çift tepeli olan pik, x 'in artması ile (alaşımdaki Ni miktarı oranının artışı ile) yerini daha net bir pike bırakmaktadır. Yine $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının XRD spektrumlarında bir diğer belirgin değişime yaklaşık $2\theta = 42^\circ$ ve $2\theta = 62^\circ$ civarında gözlenen piklerde rastlanmaktadır. Bu açıda gözlemlenen Ni elementine ait pik alaşımdaki Ni miktarı arttıkça şiddetlenmektedir. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında da genel olarak alaşımda yer alan elementin oranındaki değişim ile spektrumda elde edilen ilgili piklerin şiddetleri aynı yönlü olarak değişmektedir. Bununla birlikte bu alaşımlarda elementlerin oranlarındaki değişime hassasiyet ve seyir $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarındaki kadar düzenli değildir. Örneğin azalan x değerleri (spektrumda aşağıdan yukarıya doğru) ile yaklaşık $2\theta = 37^\circ$ değerinde (0 1 1) ve (1 0 1) düzlemlerinden gelen pik ile $2\theta = 42^\circ$ pozisyonunda (0 0 2) (0 1 2) ve (1 1 3) düzlemlerinden gelen piklerin değişimi $x = 0,5$ ve $x = 0,6$ (H-14 ve H-15 kodlu alaşımlar) alaşımlarında düzenden saparak farklı oranlarda değişmektedirler. XRD kütüphanesinde her ne kadar bu düzlemlerde Cr elementine ait bir pik yer almasa da bu grupta gözlenen sıra dışı davranışların Cr elementinden kaynaklandığı ön görülebilir. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarındaki Mn – Ni düzenlenmesine benzer bir Cr – Ni düzenlenmesi gözlenememiştir. Bununla birlikte $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında element atomları birbirleriyle karışık bir yapı oluşturmakta ve Cr elementi kristal yapı içerisinde yer almasa bile varlığı ve sergilediği özellikleri dolayısı ile bu yapıları etkilemektedir.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için ulaşılan XRD analiz verilerinden tespit edilen ve XRD spektrumlarında da gözlemlenen bu yeni kristal düzlemleri, alaşımların üretimi aşamasında uygulanan basamak sinterlemesi tekniğinin ve soğutma prosesinin doğru uygulandığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar ayrıca, polikristal yapı oluşturmak istenen malzemelerin üretimi için basamak sinterlemesini tercih edilebilir kılmaktadır. Her iki alaşım serisi için XRD spektrumlarında pik pozisyonlarında düzenli olmayan kaymalar

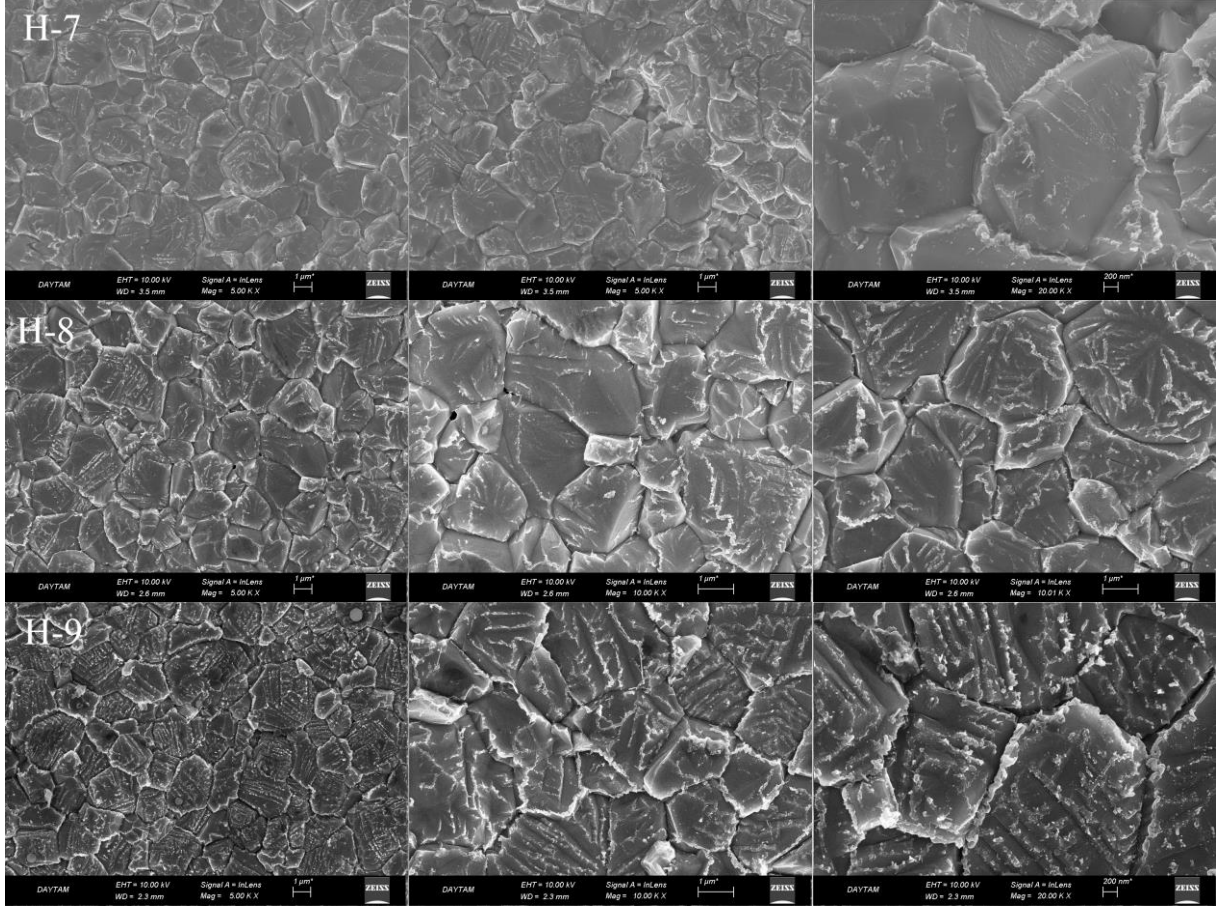
($\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi için Şekil 37'den ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi için Şekil 38'den de görülebileceği üzere) söz konusudur. Bu kaymalar düzenli olmadığından alaşımların manyetik özellikleri ile ilişkilendirilememiş, alaşımların yüzeylerinde yer alan olası düzensizliklerden ve oksitlenmeden kaynaklandıkları öngörülmüştür. Alaşımlar için alaşımı oluşturan elementlere ait hemen hemen tüm pikler oksitli yapılar olarak elde edilmiştir. Bu tarz alaşımların toz metalurjisi-basamak sinterlemesi tekniği ile üretimi sonrası oksitlenme uygulamada en önemli problem olarak değerlendirilebilir ve alaşımların farklı amaçlar doğrultusunda olası kullanımını kısıtlayıcı bir etken olabilir. Bu nedenle oksitlenme eğilimi söz konusu olan bu tür alaşımlar için oksitlenmenin olası olumsuz etkilerini giderici tedbirler alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

SEM sonuçları

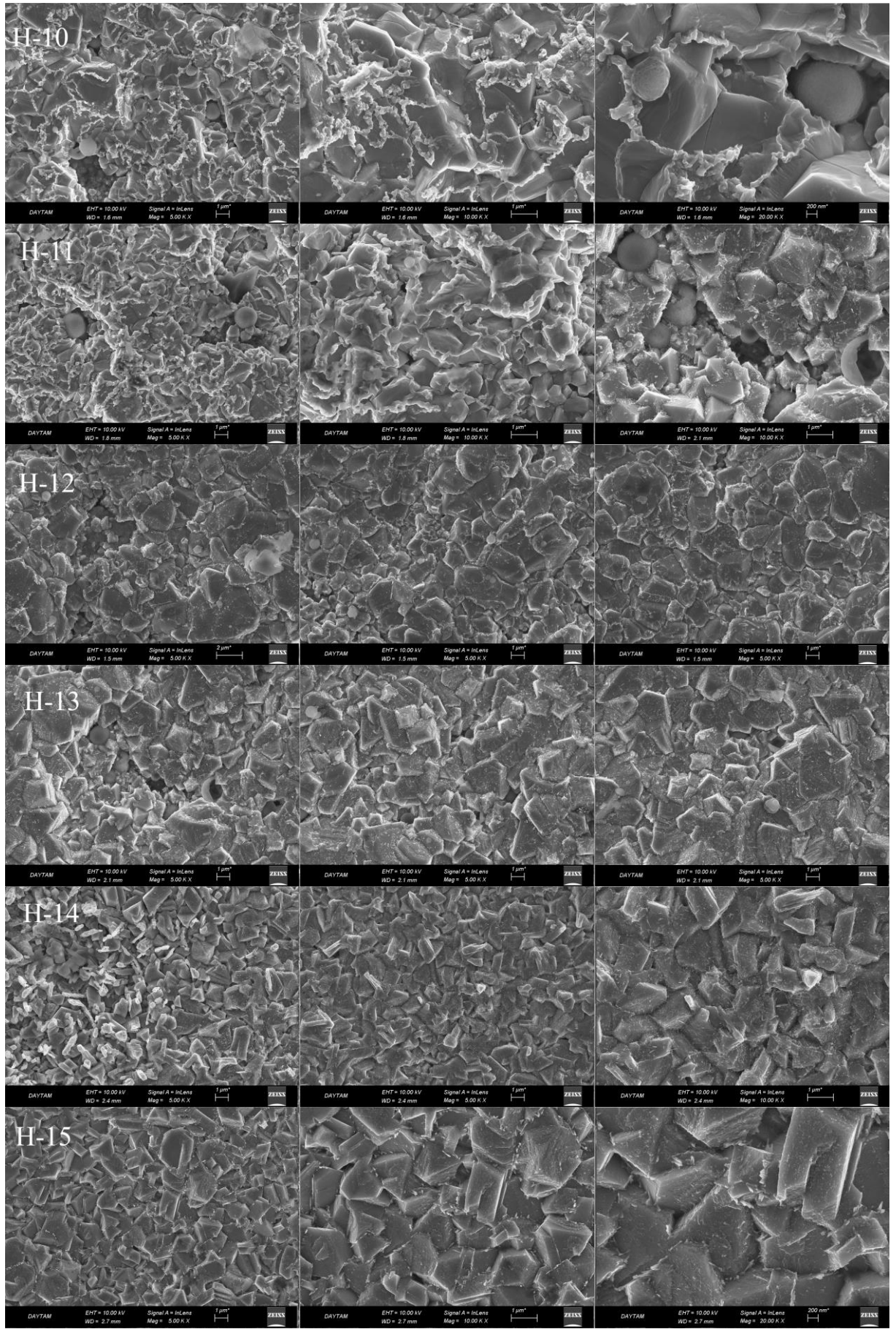
Bu tez çalışması kapsamında toz metalurjisi-basamak sinterleme metodu kullanılarak üretimi gerçekleştirilen nanoyapılı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ tipi Heusler alaşımlarının yüzey morfolojilerini anlamak amacı ile alınan taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri sırası ile Şekil 39 ve Şekil 40'da verilmiştir. Bu görüntülerin elde edilmesinde 5, 10 20 ve 30 KX'lik büyütme oranları kullanılmış ve 10 μm , 1 μm ve 200 nm çözünürlükler ayarlanmıştır. Her bir alaşım için alınan SEM görüntülerinden seçilen sadece üç tanesi yan yana verilmiştir. Görsellerde her bir alaşım için soldan sağa doğru büyütme oranı artarken, çözünürlük değerleri küçülmekte olup, bu değerler kıyaslama için her bir desenin altında yer almaktadır. Görsellerin sol üst köşesinde alaşımlara verilen kod numaraları yer almaktadır. Kod numarası büyüdükçe alaşım için x değeri düzenli olarak küçülmektedir.



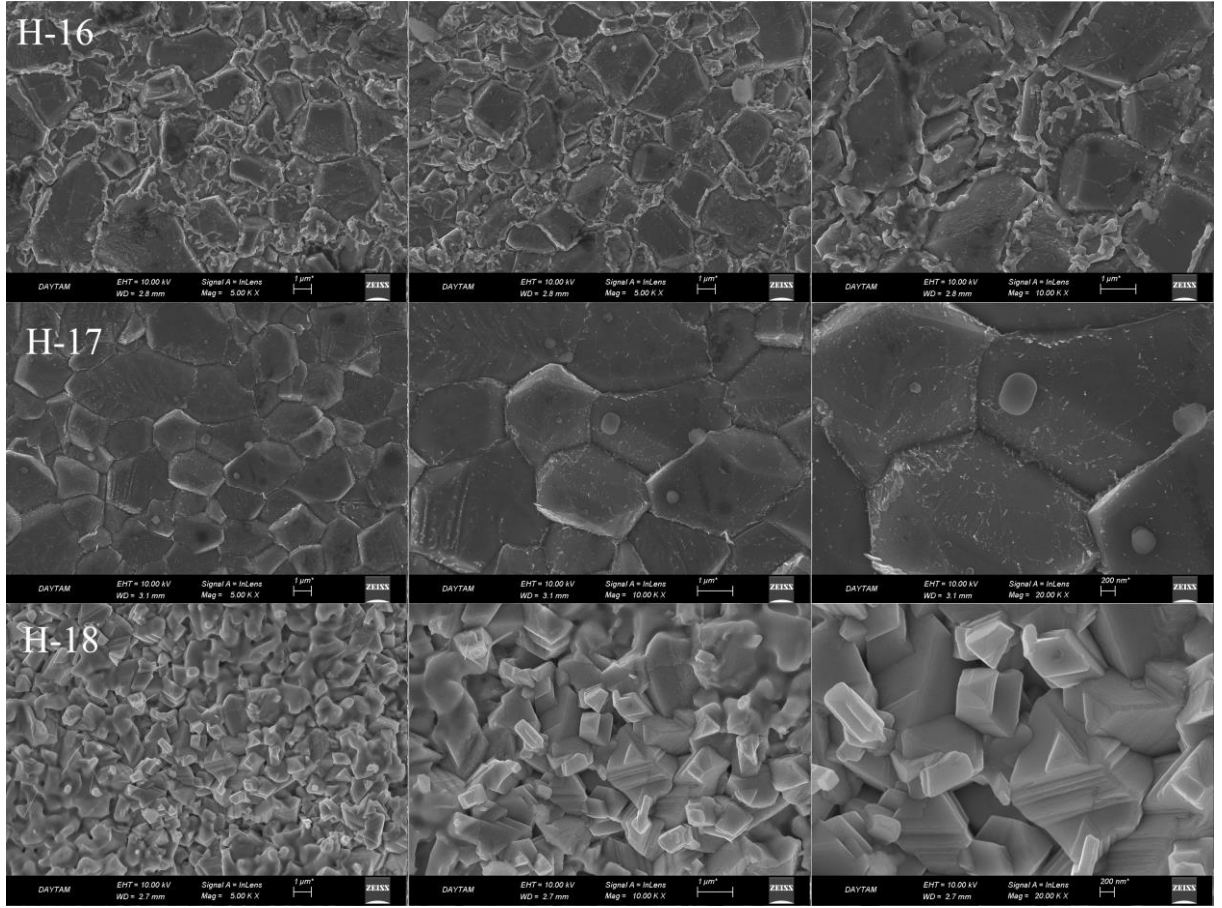
Şekil 39. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının SEM görüntüleri



Şekil 40. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının SEM görüntüleri (devamı)



Şekil 41. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının SEM görüntüleri



Şekil 42. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının SEM görüntüleri (devamı)

Bu tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarına ait SEM görüntülerinde (Şekil 39 ve Şekil 40) kayda değer bir düzeyde kontrast farkının olmaması alaşımların homojen olarak üretilebildiğini göstermektedir. SEM görüntüleri üretilen alaşımlar için XRD analizlerinden elde edilen yapıları destekler niteliktedir. XRD analizlerinden elde edildiği gibi SEM analizlerinden de alaşımların polikristal yapıda çok fazlı olarak büyüdüğü görülmüştür. Her iki alaşım grubu için de XRD analizlerinden elde edilen kübik, tetragonal ve hekzagonal kristal sistemleri alaşımların SEM görüntülerinde de net bir şekilde kendilerini göstermektedirler. Üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için alınan SEM görüntüleri ışığında alaşımlama etkisi nedeniyle taneler arasındaki boşlukların azaldığı, tane sınırlarının (grain bölgelerinin) oluştuğu ve alaşımların polikristal yapıda oldukları söylenebilir. Yapılan bu olumlu çıkarımlar ile birlikte, bazı alaşımlarda yüzey kirliliğinden kaynaklı kusurların, küçük kırıkların ve özellikle tane sınırlarında yoğunlaşan oksitlenmenin de olduğu gözlemlenmiştir.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için Şekil 39’da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde H-1 ile kodlanan alaşımda (Şekil 39’da en üstte) tane sınırlarının oluştuğu, az miktarda boşluk kusuru ve çok az aglomerasyonun ile birlikte kübik yapının ön planda olduğu polikristal yapıya sahip olduğu görülmektedir. SEM görüntüsünden H-2 alaşımı için de H-1 alaşımı ile aynı

Çıkarımlarda bulunulabilir. H-3 alaşımında ise H-1 ve H-2 alaşımlarının sergilediği kübik yapı ile birlikte hekzagonal yapıda ön planda ve aglomerasyon yok denecek kadar azdır. H-3 alaşımında önceki iki alaşımdan biraz farklı olarak oksitlenme tane sınırlarında yoğunlaşmış ve yüzeyde küçük kırıklar oluşmuştur. Grain bölgelerinin yaklaşık eşit büyüklüklerde olduğu H-4 alaşımında ise tane sınırları daha belirgin olmakla birlikte tane sınırları boyunca oksitlenme daha yoğun, boşluk kusuru ve aglomerasyon yok denecek kadar az ve kübik yapı ön plandadır. SEM görüntülerinden hareketle H-5 – H-8 alaşımları içinde; H-6 alaşımında grain bölgelerinin yaklaşık aynı büyüklüklerde olmaması dışında H-4 alaşımına benzer çıkarımlar yapmak mümkündür.

$\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ grubu alaşımları da polikristal olarak şekillenmiş ve çoğunlukla kübik, tetragonal, hekzagonal biçimde kristalleşmişlerdir. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için şekil 40’da verilen SEM görüntülerinden de görülebileceği üzere özellikle ilk iki alaşımda (H-10 ve H-11) yüzeyde ve özellikle oluşmaya başlayan tane sınırlarında yoğun oksitlenme ile birlikte çeşitli boşluk kusurları ve yüzey kirliliklerinden kaynaklı kusurlar bulunmaktadır. Bu alaşımlar polikristal yapıda olmakla birlikte oluşan grain bölgeleri farklı büyüklüklerde, her nde de bir miktar aglomerasyon oluşmuş ve kübik yapı ön plandadır. Oksitlenme ve aglomerasyonun en fazla olduğu H-10 alaşımında bağlanmaların zayıf olmasından dolayı tane sınırları da en az belirgin haldedir. H-10 ve H-11 alaşımlarında ayrıca yapı içerisinde küresel formda farklı tip atomlardan oluşan granüller yer almakta ve bağ kurmadan bireysel formda kalmışlar ve yapısal kırılmaları gözükmektedir. H-12 alaşımında yine tane sınırlarında ve yüzey çıkıntılarında çok miktarda oksitlenme var, bununla birlikte tane sınırları oluşmuş, boşluk kusuru çok çok az, aglomerasyon yok denecek kadar az, grain bölgeleri göreceli olarak farklı büyüklükte, alaşım polikrsital ve kübik yapı ön plandadır. Bu seride H-13 alaşımından itibaren alaşımlama etkisi SEM görüntülerinde daha belirgin olarak görülmeye başlamıştır. Bu alaşımdan itibaren alaşımlarda tane sınırları, grain bölgeleri ve kristal simetrisi giderek daha netleşmektedir. Bununla birlikte serinin H-13, H-14 ve H-15 kodlu alaşımlarında halen daha tane sınırlarında önemli ölçüde oksitlenme söz konusudur, boşluk kusuru ve aglomerasyon yok denecek kadar az, tane sınırları daha belirgin, polikristal yapı net, grainler farklı büyüklükte ve üçgen piramit, hekzagonal yapı ön plandadır. Bu seride H-16, H-17 ve H-18 alaşımlarında oksitlenmede nispeten daha az, tane sınırları (grain bölgeleri) ok daha belirgin, boşluk kusuru ve aglomerasyon yok denecek kadar az, grain büyüklükleri nispeten birbirine daha yakın ve polikristaller. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında alaşım kod numarası büyüdükçe alaşım yapılarında hissedilir iyileşmeler kod numaraları ile paralel olarak alaşım içeriğinde artan Ni oranına atfedilebilir. Buradan hareketle incelenen alaşımlarda; artan Ni varlığı ile alaşımlamanın daha başarılı olarak gerçekleştiği sonucuna varılabilir. Bu Ni’in bir alaşım elementi olarak sergilediği

çeşitli üstün özelliklerden kaynaklanır. Ni bir alaşım elementi olarak bilinir ve bir çok ticari alaşım ile manyetik ve şekil hafızalı alaşımlar gibi özel amaçlı alaşımların üretiminde kullanılmaktadır (Everhart, 1971). Nikelin alaşım elementi olarak kullanılmasının başlıca nedenlerinden en önemlisi; özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında mukavemeti ve korozyon direncini artırma yeteneğidir. Ni ayrıca diğer elementlerle (Cr gibi) kolayca alaşım yapar ve bu da söz konusu alaşımların üretimini daha başarılı hale getirir (Ezugwu and Wang 1999). Ni yüz merkezli kübik kristal (fcc) yapısına sahiptir ve bu sayede mükemmel süneklik ve tokluk sergiler ve birçok alaşım elementi için kapsamlı katı çözünürlüğe sahiptir. Böylece, sert, sünek fcc matrisi, çözültü sertleşmesinin yanı sıra iyileştirilmiş korozyon ve oksidasyon direnci sağlamak için çeşitli kombinasyonlarda geniş miktarda elementi çözebilir. Örneğin bakırla tam bir katı çözültü oluşturur, demiri (Fe) neredeyse tam çözer, Cr'un yaklaşık %35'ini ve alüminyumun (Al) yaklaşık %5 – %10'unu çözebilir (Smith and Baker 2005). Çözültü sertleşmesinin derecesi, Ni ile alaşım elementi arasındaki atom boyutu farkıyla ve dolayısıyla çözünenin dislokasyon hareketine müdahale etme yeteneğiyle ilişkilendirilmiştir. Katı çözültü oluşturan elementler, öncelikle dislokasyonların hareketine karşı direnci artırarak çözültünün mukavemetini artırır (Mankins and Lamb 1990). Ni ile çözünen arasındaki atom boyutu farkından kaynaklanan ortalama kafes bozulması, alaşımlama sonucu nikel açısından zengin matrisin kafes parametresindeki değişimle verilir (Jena and Chaturvedi, 1984).

Co₂Mn_xNi_{1-x}Al ve Co₂Cr_xNi_{1-x}Al Alaşımlarının Radyasyon Zırh Malzemesi Olabilirliklerine İlişkin Araştırma Bulguları

Üretilen Co₂Mn_xNi_{1-x}Al ve Co₂Cr_xNi_{1-x}Al Heusler alaşımların radyasyondan korunmanın gerekli olduğu alanlarda da kullanılabilirliklerine dair fikir edinebilmek açısından radyasyon zırhlama kabiliyetlerini değerlendirmek faydalı olacaktır. Bu düşünceden hareketle MATERYAL ve METOT bölümünün son kısmında detayları verilen Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak üretilen alaşımlar için elde edilen çeşitli madde-radyasyon etkileşim parametrelerine ait sonuçlar bu kısımda sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Bu konuda kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmesi için söz konusu parametreler 15 keV'den 15 MeV'e kadar uzanan geniş bir enerji aralığı için elde edilmiştir.

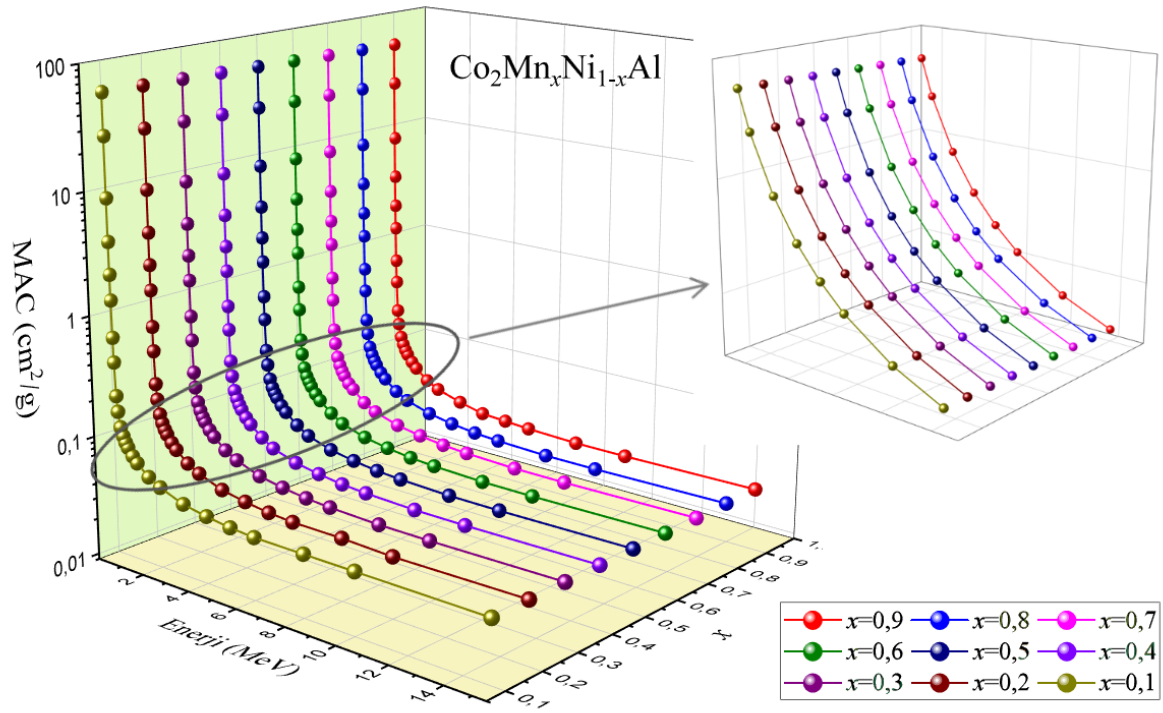
Üretilen alaşımlar için öncelikli olarak kütle azaltma katsayıları (MAC) elde edilmiş ve değerleri Co₂Mn_xNi_{1-x}Al alaşımları için Tablo 9'da, Co₂Cr_xNi_{1-x}Al alaşımları için ise Tablo 10'da sunulmuştur. Yine MAC değerlerinin enerjiye bağlı değişim eğrileri Co₂Mn_xNi_{1-x}Al alaşım serisi için Şekil 41'de, Co₂Cr_xNi_{1-x}Al alaşım serisi için ise Şekil 42'de grafik olarak çizilmiştir.

Tablo 9. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımlarının Kütle Azaltma Katsayıları (cm^2/g)

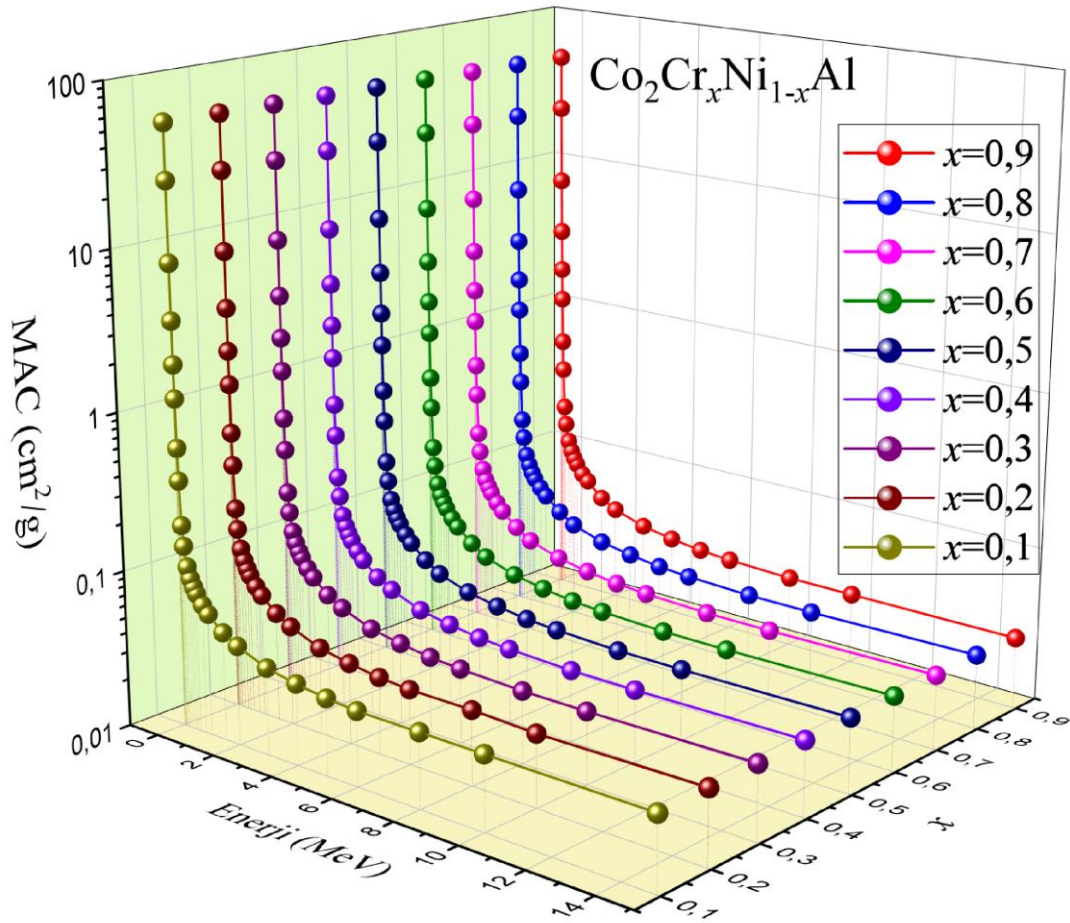
Enerji (MeV)	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7	H-8	H-9
1,50E-02	52,081	52,678	53,274	53,867	54,458	55,047	55,634	56,218	56,801
2,00E-02	23,477	23,758	24,039	24,318	24,596	24,874	25,150	25,425	25,699
3,00E-02	7,497	7,590	7,682	7,775	7,867	7,958	8,050	8,141	8,231
4,00E-02	3,338	3,380	3,421	3,462	3,504	3,545	3,585	3,626	3,666
5,00E-02	1,808	1,830	1,852	1,874	1,896	1,918	1,939	1,961	1,983
6,00E-02	1,117	1,130	1,143	1,156	1,169	1,182	1,195	1,208	1,221
8,00E-02	0,557	0,563	0,569	0,575	0,580	0,586	0,592	0,598	0,603
1,00E-01	0,352	0,355	0,358	0,361	0,364	0,367	0,370	0,373	0,376
1,50E-01	0,190	0,191	0,192	0,193	0,194	0,195	0,196	0,197	0,198
2,00E-01	0,142	0,143	0,144	0,144	0,145	0,145	0,146	0,146	0,147
3,00E-01	0,108	0,108	0,109	0,109	0,109	0,109	0,110	0,110	0,110
4,00E-01	0,093	0,093	0,093	0,093	0,093	0,094	0,094	0,094	0,094
5,00E-01	0,083	0,083	0,083	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
6,00E-01	0,076	0,076	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
8,00E-01	0,066	0,066	0,066	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
1,00E+00	0,059	0,059	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
1,50E+00	0,048	0,048	0,048	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
2,00E+00	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,043	0,043	0,043
3,00E+00	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
4,00E+00	0,032	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
5,00E+00	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
6,00E+00	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
8,00E+00	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030	0,030
1,00E+01	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
1,50E+01	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030

Tablo 10. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ Alaşımlarının Kütle Azaltma Katsayıları (cm^2/g)

Enerji (MeV)	H-10	H-11	H-12	H-13	H-14	H-15	H-16	H-17	H-18
1,50E-02	51,026	51,751	52,471	53,187	53,897	54,603	55,305	56,001	56,693
2,00E-02	22,981	23,323	23,662	23,998	24,333	24,665	24,995	25,323	25,649
3,00E-02	7,334	7,446	7,558	7,670	7,780	7,890	7,999	8,107	8,215
4,00E-02	3,266	3,316	3,366	3,416	3,465	3,514	3,563	3,611	3,659
5,00E-02	1,771	1,798	1,824	1,850	1,876	1,902	1,928	1,953	1,979
6,00E-02	1,095	1,111	1,127	1,142	1,158	1,173	1,188	1,204	1,219
8,00E-02	0,548	0,555	0,562	0,569	0,576	0,582	0,589	0,596	0,602
1,00E-01	0,347	0,351	0,354	0,358	0,362	0,365	0,369	0,372	0,376
1,50E-01	0,188	0,190	0,191	0,192	0,193	0,194	0,196	0,197	0,198
2,00E-01	0,142	0,143	0,143	0,144	0,144	0,145	0,146	0,146	0,147
3,00E-01	0,108	0,108	0,109	0,109	0,109	0,109	0,110	0,110	0,110
4,00E-01	0,093	0,093	0,093	0,093	0,094	0,094	0,094	0,094	0,094
5,00E-01	0,083	0,083	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
6,00E-01	0,076	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
8,00E-01	0,066	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
1,00E+00	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
1,50E+00	0,048	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
2,00E+00	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,043	0,043	0,043	0,043
3,00E+00	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
4,00E+00	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
5,00E+00	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
6,00E+00	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
8,00E+00	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030	0,030
1,00E+01	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
1,50E+01	0,029	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030



Şekil 43. Co₂Mn_xNi_{1-x}Al alaşımları için kütle azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi



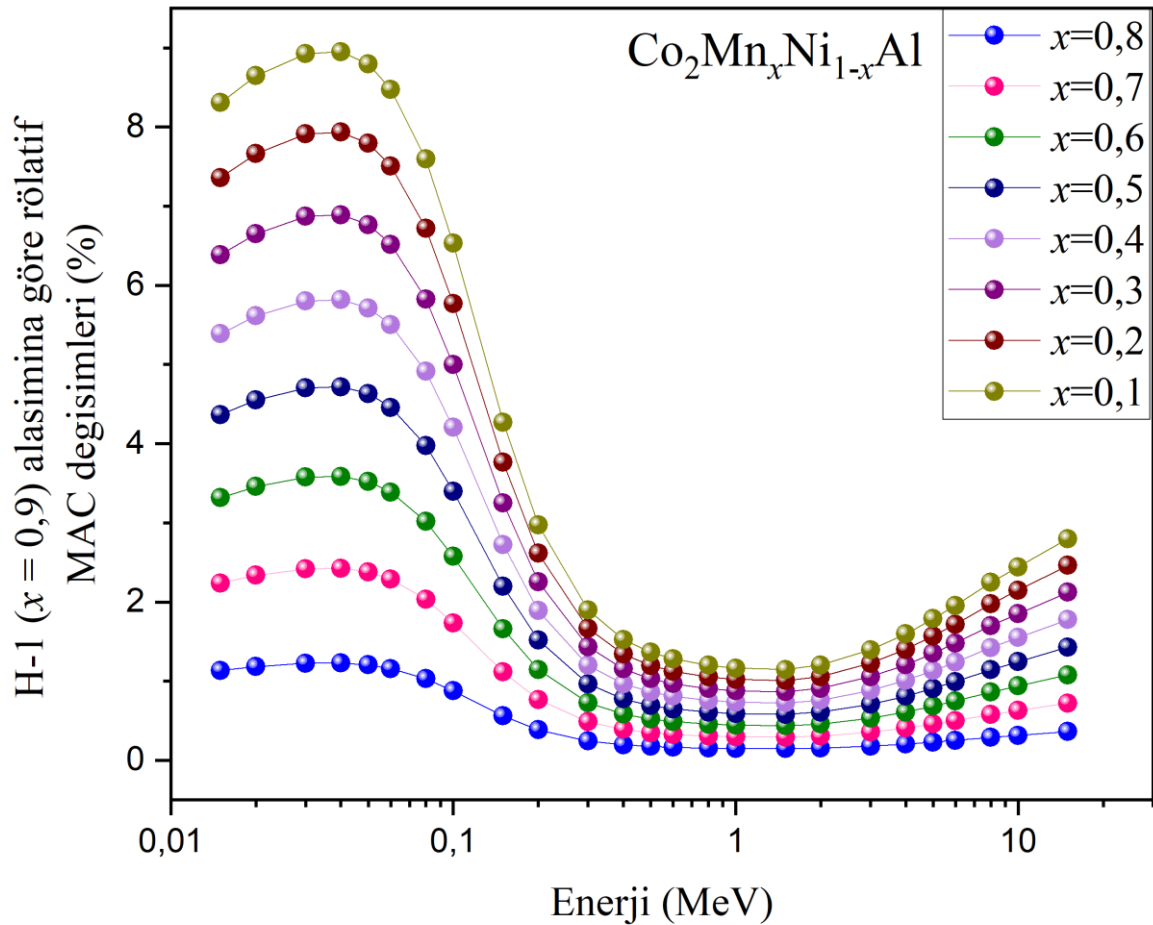
Şekil 44. Co₂Cr_xNi_{1-x}Al alaşımları için kütle azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

Her iki alaşım grubunda da tüm alaşımlar için; bu tablolar ve grafiklerden ilk olarak, artan foton enerjisine bağlı olarak, MAC değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Yine herhangi bir enerji değeri için MAC değerleri alaşımlardaki x değerine bağlı değerlendirildiğinde; x deki azalışa karşın ($\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisinde H-1 kodlu alaşımdan H-9 kodlu alaşıma ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisinde H-10 kodlu alaşımdan H-18 kodlu alaşıma doğru) MAC değerleri büyümektedirler.

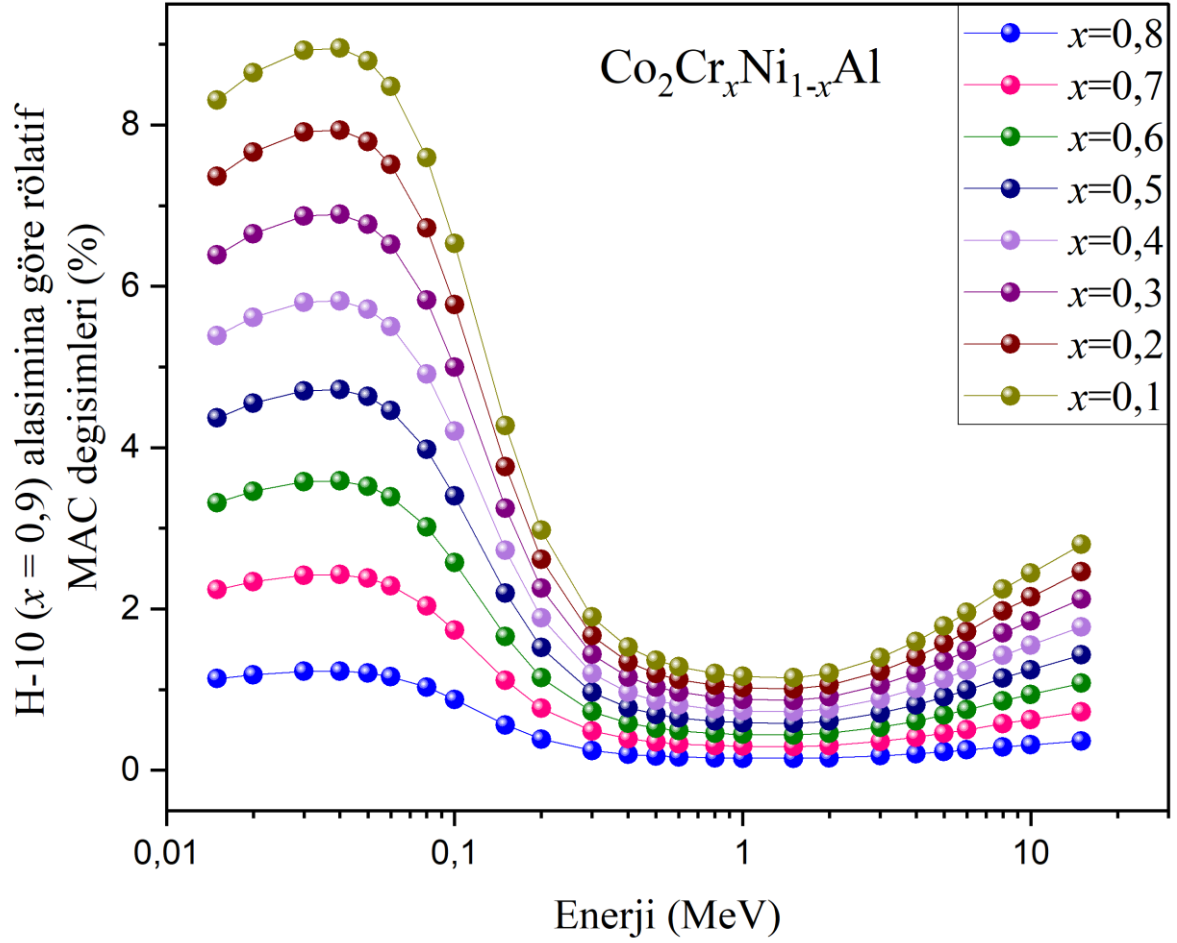
Alaşımlar için MAC–Enerji grafiklerinden (şekil 41 ve şekil 42) grldğı üzere, fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde (şekil 41’de bu bölge büyütülmüş olarak gösterilmiştir), MAC değerlerinin enerji ile değişimi beklenildiği gibi neredeyse eksponansiyel bir azalışa sahiptir. Fotoelektrik soğrulma tesir kesiti; bu enerji bölgesinde $Z^{4,5}/E^{3,5}$ ile değiştiğinden, artan enerjiyle birlikte, tüm numunelerin MAC değerleri doğal olarak bu oranda bir şiddetle azalmaktadırlar. Düşük enerjilerde üretilen alaşımlardaki Ni miktarı artıkça, alaşımın o enerjideki MAC değeri de artmaktadır. Bu durum $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için Tablo 9’dan ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için Tablo 10’dan görülebilir. Bu tablolarda her iki grup için de soldan sağa doğru gidildikçe alaşımlardaki, Ni oranı aynı adımlar ile artmakta buna karşın Mn (veya Cr) oranı karşılık olarak azalmaktadır. Ancak artan enerji ile birlikte alaşımların MAC değerleri birbirlerine giderek yaklaşmakta ve yaklaşık 0,5 MeV foton enerji değerinden sonra, bu fark da ortadan kalkmaktadır. MAC değerlerinin alaşımdaki elementlerin oranından yani malzemenin kompozisyonundan bağımsızlaşmasının yegne sebebi artan enerjiyle birlikte fotoelektrik soğurmanın etkinliğini yitirip artık Compton saçılmasının baskınlığının artmasıdır. Çalışılan 15 keV–15 MeV enerji aralığında hemen hemen orta enerji bölgelerini kapsayan Compton saçılmasında fotonlar artık soğurulmak yerine saçılmaya daha fazla maruz kalırlar. Bu nedenle, artık MAC değerleri için malzemenin içerik ve kompozisyonunun neredeyse bir önemi kalmamaktadır. Bu durum her iki alaşım grubu için hem Tablo 9 ve 10’dan hem de şekil 41 ve 42’den açıkça görülebilmektedir. Compton saçılma bölgesinde, artan foton enerjisi ile MAC değerlerindeki azalma çift oluşum olayının baskın etkileşim olmaya başladığı enerjilere kadar devam etmektedir. Compton saçılma bölgesinde en düşük değerlere ulaşan soğurulma ihtimaliyeti artan foton enerjisi ile çift oluşumu ihtimaliyetinin artması sebebi ile yeniden artış eğilimine girmektedir. İncelen alaşımlar için de bu gerçeğe uygun olarak MAC değerleri çok yüksek enerjilerde artış göstermiştir ancak bu artış hem Tablo 9 ve 10’dan hem de şekil 41 ve 42’den grldğı üzere çok çok küçüktür.

Üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımların elementel içerik ve kompozisyonları (Tablo 5) buna bağlı olarak da yoğunlukları birbirlerine yakındır. Dolayısı ile, her iki alaşım grubu için kütle soğurma katsayılarının değerlendirilmesinden de elde edildiği

üzere zırlama kabiliyetleri ve davranışları benzer ve birbirine yakındır. Bununla birlikte alaşımlar için x değerlerine yani $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında Mn ve Ni'in yine $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarında bu kez Cr ve Ni'in alaşımdaki oranlarına bağlı olarak MAC değerlerinde dikkate değer değişiklikler söz konusudur. Alaşımların MAC değerlerinin x 'e bağlı değişimlerini daha net değerlendirebilmek için her iki seride $x = 0,9$ olan alaşımlar ($\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi için H-1 kodlu ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi için H-10 kodlu alaşım) referans alınarak rölaf MAC değişimleri grafiksel olarak çizilmiştir. Söz konusu bu rölaf fark grafikleri $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için sırası ile Şekil 43 ve Şekil 44'te verilmiştir. Bu rölaf fark grafiklerinden de görülebildiği üzere her iki alaşım serisinde de alaşımlardaki x değeri küçüldükçe yani alaşımdaki Ni oranı arttıkça MAC değeri giderek büyümektedir. Yine düşük enerji bölgesinde nispeten büyük olan rölaf fark orta enerji bölgesinde oldukça küçülmektedir. MAC değerleri arasındaki rölaf farkın giderek ortadan kalkışı; MAC değerleri için alaşımın içerik ve kompozisyonunun önemini kaybettiği bu enerji bölgesinde alaşımların soğurma kabiliyetleri açısından önemli bir farklılığın olmadığını göstermektedir. Takip eden enerjilerde rölaf fark az da olsa tekrar artış eğilimine girmekte ve rölaf fark artan enerji ile artmaktadır.



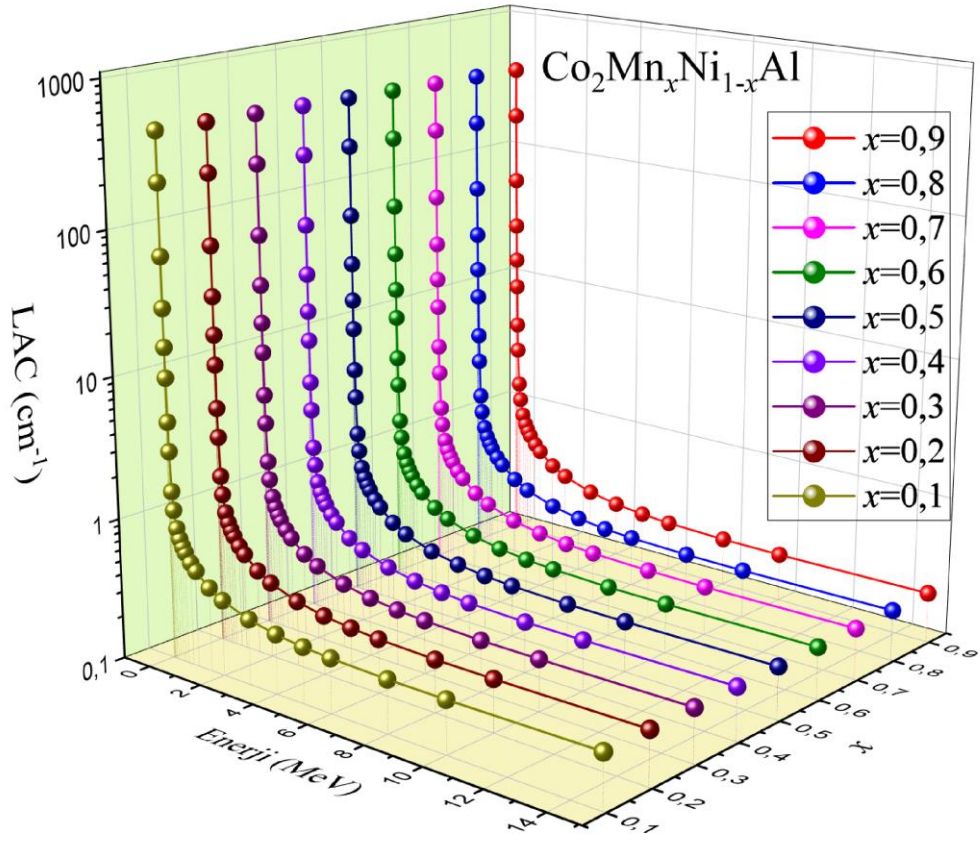
Şekil 45. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için kütle azaltma katsayılarının rölaf değişimi



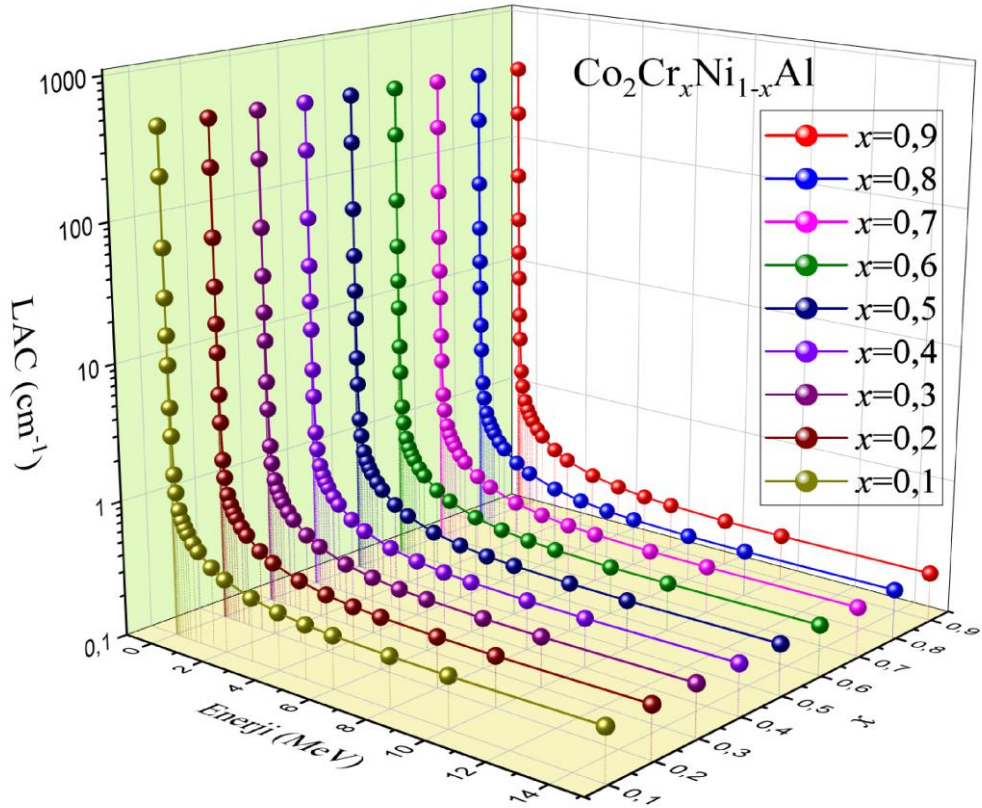
Şekil 46. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için kütle azaltma katsayılarının rölâtif değışimi

İncelenen alaşımlar için radyasyondan korunmanın gerekli olduğu birçok uygulamada direkt kullanılabilen radyasyon etkileşim parametrelerinden lineer azaltma katsayısı (LAC; cm^{-1}), yarı kalınlık değeri (HVL; cm; bu parametre için İngilizce karşılığının baş harflerinin kısaltması kullanılır ve karşılığı yarı değeri kalınlığı olmakla birlikte çoğu durumda yarı kalınlık değeri olarak da ifade edilir), ortalama serbest yol (MFP; cm) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) değeri de hesaplanmıştır. Söz konusu bu parametrelerin her birinin enerjiye bağlı değışimleri yine 15 keV–15 MeV enerji aralığında değeriendirilmiştir.

Üretilen alaşımlardan $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi için Şekil 45’te $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi için ise Şekil 46’da gelen foton enerjisine bağlı değışimleri çizilen lineer azaltma katsayıları (LAC; cm^{-1}) bu alaşımların ilgili enerjide birim uzunluk başına foton azaltma yeteneklerinin bir ölçüsüdür.



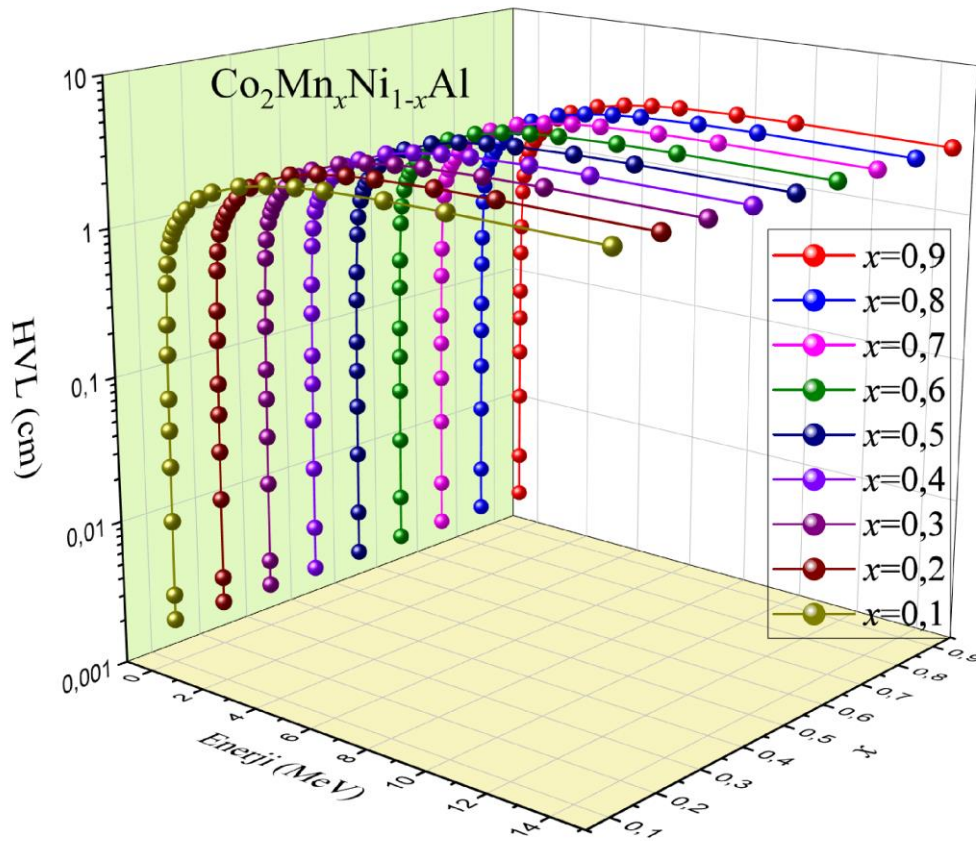
Şekil 47. Co₂Mn_xNi_{1-x}Al alaşımları için lineer azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi



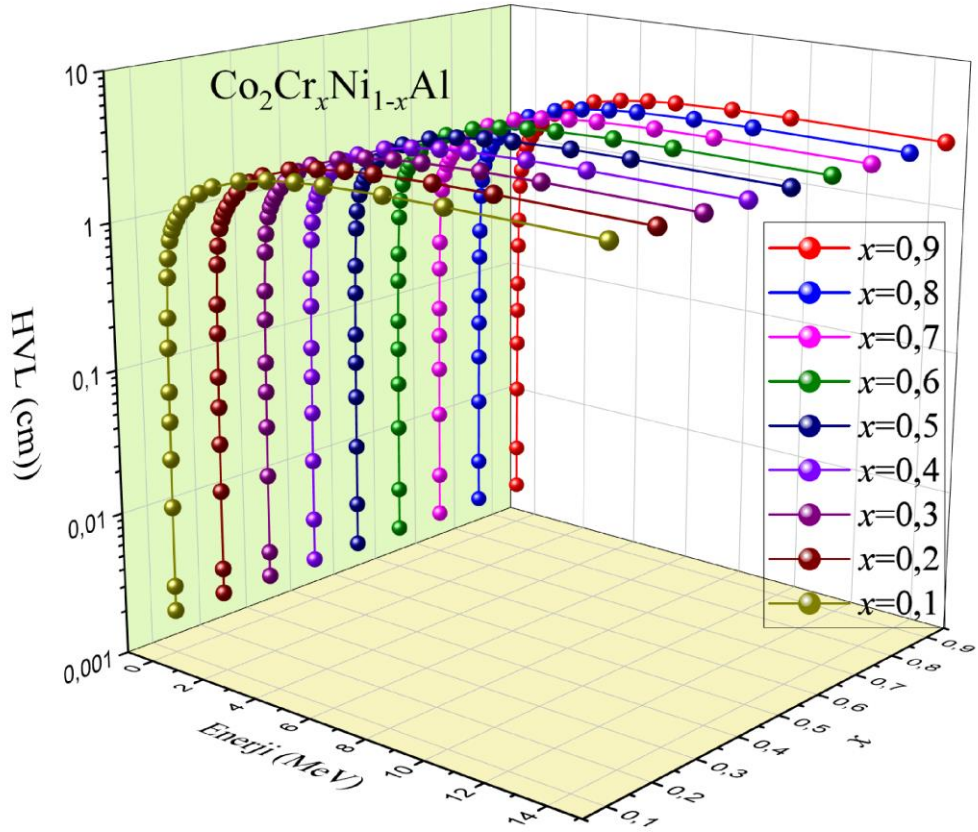
Şekil 48. Co₂Cr_xNi_{1-x}Al alaşımları için lineer azaltma katsayılarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

LAC'ın fiziksel manada MAC'dan farkı malzemenin yoğunluğuna bağlı olmamasıdır ve bu sebepten malzemeye ilişkin daha az bilgi içerir. Bununla birlikte LAC değerleri incelenen malzeme için; yarı değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) gibi temel parametrelerin hesaplanmasında doğrudan kullanılır. Şekil 45' ve Şekil 46'dan da görüldüğü üzere alaşımlar için LAC değerleri de enerjiye bağlı olarak beklenildiği gibi MAC değerleri ile aynı tabiatlı bir değişim göstermektedirler. Alaşımlar için ölçülen MAC değerleri üzerinden yapılan değerlendirmenin benzeri LAC değerleri kullanılarak da rahatlıkla yapılabilir. Artan foton enerjisi ile LAC değerlerinin azalması; enerjileri artan fotonların madde içerisinde etkileşme girmeden (dolaysı ile soğurulmadan) daha uzun yollar alabilmeleri şeklinde anlaşılabilmektedir.

Üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi alaşımlar için yarı kalınlık değerlerinin (mfp; cm) gelen foton enerjisine bağlı değişimlerinin grafikleri sırası ile Şekil 47 ve Şekil 48'de çizilmiştir.



Şekil 49. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için yarı değer kalınlıklarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

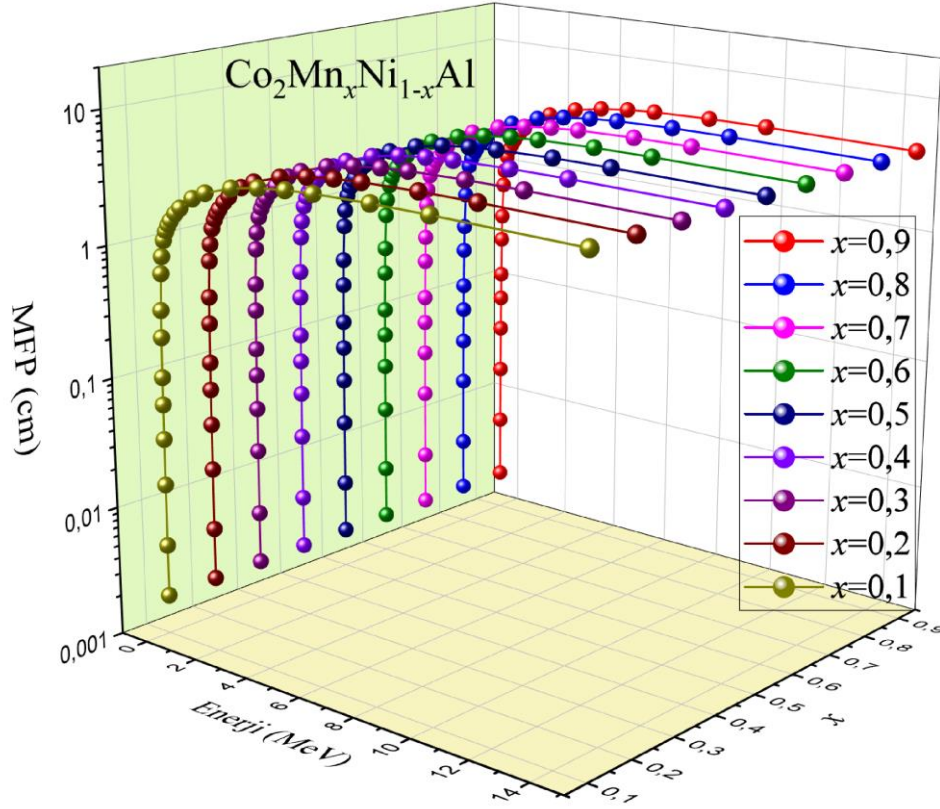


Şekil 50. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için yarı değer kalınlıklarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

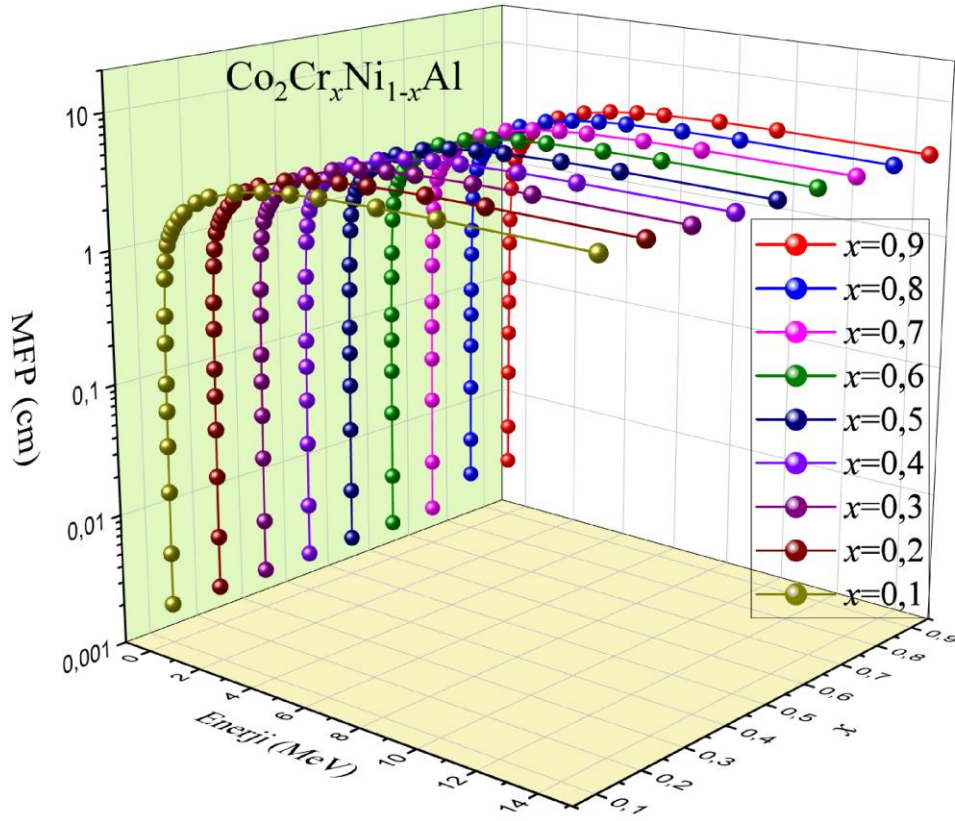
İncelenen bir malzeme için ilgili foton enerjisinde gelen akıyı yarıya düşürmeyi başaran malzeme kalınlığını ifade eden HVL; özellikle radyasyon uygulamalarında malzeme kalınlığını, hacmini ve bağlı olarak maliyetini hesaplamada kullanılmaktadırlar. Bir malzeme için HVL değerleri LAC değerleri ile ters orantılı olarak değişirler. Üretilen alaşımlar için LAC ve HVL değerlerinin enerji ile değişimini veren grafikler ($\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için Şekil 45 ve Şekil 47 ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için Şekil 46 ve Şekil 48) birlikte incelendiğinde bu ters yönlü ilişki rahatlıkla görülebilir. Alaşımlar için artan foton enerjisi ile LAC değerleri küçülürken HVL değerleri büyümektedir. İncelenen alaşımlar için fotonların düşük penetrasyon yeteneklerinden dolayı, HVL değerleri çok küçüktür, bununla birlikte belli bir enerjiden sonra artış eğilimi hızlanmış (yaklaşık 0,05 MeV) ve daha büyük enerjilere ulaşıldığında (yaklaşık 5 MeV) HVL değerleri hızlı bir artış göstererek her iki grup içinde 3 cm civarına kadar yükselmişlerdir. Her iki alaşım serisinde aynı foton enerjisinde alaşımlarda x değerleri küçüldükçe yani alaşımlardaki Ni miktarı artıkça ($\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisinde H-1 kodlu alaşımdan H-9 kodlu alaşıma ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisinde H-10 kodlu alaşımdan H-18 kodlu alaşıma doğru) HVL değerleri küçülmektedirler. Daha açık bir ifade ile incelenen alaşım gruplarında alaşımların içeriğindeki Ni miktarı oranının artışına bağlı olarak ilgilenilen bir enerjideki fotonların akısını yarıya düşürmek için daha küçük kalınlıklı alaşımlar yeterli

olabilecektir. Çünkü Ni alaşımları oluşturan elementler arasında atom numarası ve yoğunluğu en büyük olandır ve dolayısı ile Ni oranı artışı alaşım için etkin atom numarasını ve alaşım yoğunluğunu artıran bir etkiye sahip olacaktır.

Üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi alaşımlar için elde edilen ortalama serbest yol (MFP; cm) değerlerinin gelen foton enerjisine bağlı değişimlerinin grafikleri sırası ile Şekil 49 ve Şekil 50’de verilmiştir.

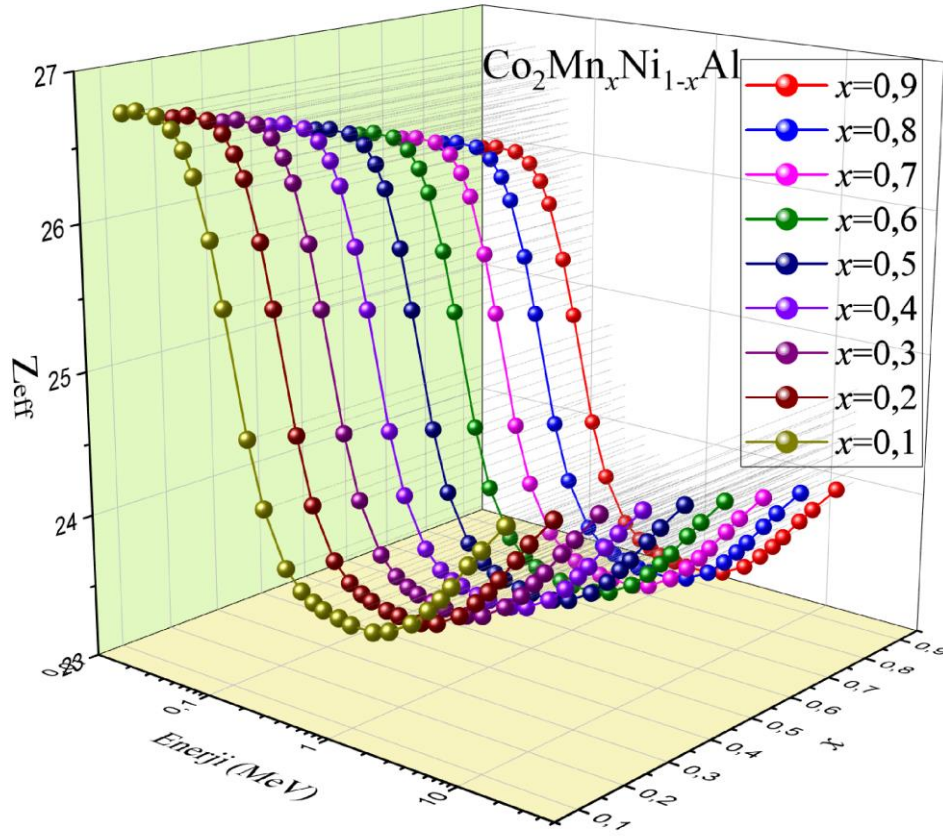


Şekil 51. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için ortalama serbest yol değerlerinin 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

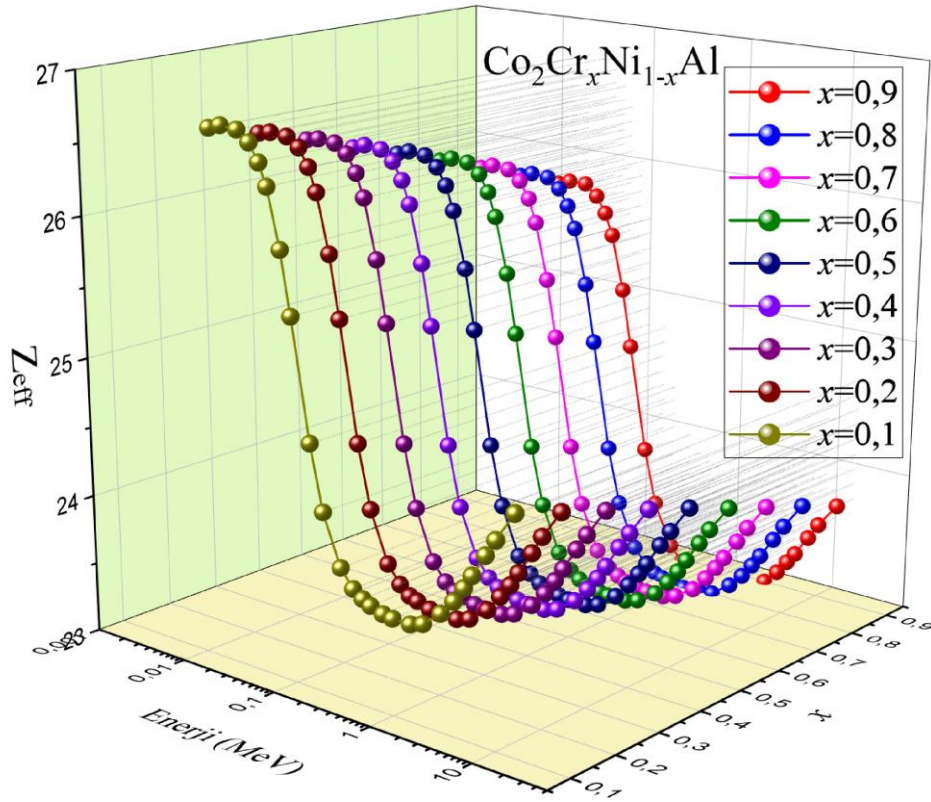


Şekil 52. $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için ortalama serbest yol değerlerinin 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

Şekil 49 ve Şekil 50’de verilen MFP-Enerji grafiklerden görüldüğü üzere MFP değerleri de beklenildiği gibi artan enerji ile artış göstermektedir ve değişimleri HVL değerleri ile çok benzerdir. HVL ile aynı birimli olan MFP değerleri de LAC değerlerinden elde edilmektedir ve değişimi LAC değerlerinin değişiminin tam tersi olmalıdır. Fiziksel anlamda ise belirli bir foton enerjisi için bir malzemenin MFP değerlerinin diğer malzemeler ile kıyaslandığında küçük olması o malzemenin daha iyi bir soğurucu olduğu anlamına gelmektedir. Çünkü MFP malzeme üzerine gelen belirli enerjideki fotonların ardışık başarılı iki etkileşim arasında aldığı yolu temsil eden ortalama bir değerdir ve MFP değeri ne kadar küçük ise bu fotonlar malzeme içerisinde daha kısa mesafelerde başarılı etkileşimler yaparak soğurulmaktadırlar. MFP değerleri soğurucu malzemeleri için küçük olması istenen ve onları karakterize etmede kullanılan faydalı bir parametredir. MFP’lerin enerjiye ve alaşımların kompozisyonlarına bağlı değişimi için HVL’ler ile aynı değerlendirmeler yapılabilir. $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisinde H-9 ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisinde ise H-18 alaşımı en küçük MFP değerlerine sahip olduklarından serilerdeki en iyi soğuruculardır. Üretilen $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ serisi alaşımlar için etkin atom numaralarının (Z_{eff}) gelen foton enerjisine bağlı değişimleri sırası ile Şekil 51 ve Şekil 52’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 53. $Co_2Mn_xNi_{1-x}Al$ alaşımları için etkin atom numaralarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi



Şekil 54. $Co_2Cr_xNi_{1-x}Al$ alaşımları için etkin atom numaralarının 15 keV–15 MeV enerji aralığında değişimi

Etkin atom numarası; iki veya daha fazla elementin çeşitli oran ve yapılarda bir araya gelmesi ile oluşan kompleks nitelikli malzemeleri (alaşımlar gibi) temsil etmek için kullanılmak üzere türetilen ve oldukça kullanışlı olan bir sayıdır. Çünkü bu sayı sayesinde incelenen kompleks malzeme sanki atom numarası Z_{eff} olan tek bir atommuş gibi düşünülebilmektedir ve bu düşünce özellikle foton-madde etkileşim olaylarının değerlendirilmesi sırasında oldukça kullanışlı olmaktadır. Tahmin edilebileceği üzere bir malzeme içerisinde büyük atom numaralı elementlerin oranı ne kadar fazla ise o malzeme için Z_{eff} değeri de o oranda büyük olacak ve bu malzeme yüksek enerjili fotonları daha fazla soğuracaktır. Bu tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen alaşım serilerinin içeriklerindeki elementlerin atom numaraları ve bu elementlerin alaşımlardaki oranları birbirlerine çok yakındır (Tablo 5). Dolayısı ile alaşımlar için etkin atom numaraları birbirlerine çok yakın olarak elde edilmişlerdir. Bununla birlikte her iki seride de alaşımlardaki Ni oranının artışı ile Z_{eff} değerlerinde kayda değer oranlarda artış gerçekleşmiştir. Söz konusu bu artış üretilen $Co_2Mn_xNi_{1-x}Al$ ve $Co_2Cr_xNi_{1-x}Al$ seti alaşımlar için sırası ile Şekil 51 ve Şekil 52’den açıkça görülmektedir. Bu grafiklerde verilen x değerleri küçüldükçe alaşım içerisindeki Ni oranı buna bağlı olarak da Z_{eff} değerleri büyümektedir. $Co_2Mn_xNi_{1-x}Al$ alaşımlar için etkin atom numarasının tüm seride 15 keV’de yaklaşık 26 – 27 iken 15 MeV de bu değer yaklaşık 24’e kadar düşmüştür. Bu bilgi ve etkin atom numarasının tanımından hareketle düşük foton enerjilerinde; fotonlarla etkileşirken hemen hemen kobalt ve daha sonra demir gibi bir davranış sergilemesi beklenen $Co_2Mn_xNi_{1-x}Al$ alaşımları foton enerjileri 15 MeV’lere ulaştığında ancak krom kadar performans gösterebileceklerdir. Benzer durum $Co_2Cr_xNi_{1-x}Al$ seti alaşımlar için de geçerlidir ve aynı değerlendirme onlar içinde yapılabilir.

SONUÇLAR

Tez kapsamında GİRİŞ bölümünde belirtilen amaçlar doğrultusunda nanoyapılı $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) tipi Heusler alaşımların üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma alaşımların üretimi ve analizi olmak üzere iki aşamalı planlanmıştır. Alaşımların üretimi için toz metalurjisi-basamak sinterleme metodu kullanılmış ve nano boyutta tozlar tercih edilmiştir. Heusler alaşımlarının üretimi için çeşitli ve çokça tercih edilen yöntemler (bu yöntemler GİRİŞ bölümünde paylaşılmıştır) bulunmakla birlikte söz konusu alaşımlar için bu yöntem ilk kez kullanılmıştır. Alaşımlama sırasında katkılanan element atomlarının elektronegatiflik değerleri, partikül ve metalik yarıçapları, atom numaralarının büyüklükleri gibi birçok husus göz önünde bulundurularak Hume–Rothery kuralları çerçevesinde hareket edilmiştir.

İlk aşamada toz metalurjisi-basamak sinterleme metodu ile söz konusu alaşımların üretilmesi başarılabilmektedir. Bununla birlikte, ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA bölümünde ayrıntılı olarak verildiği üzere üretim aşamasında; alaşımı oluşturacak tozların ve miktarlarının doğru belirlenmesi, tam bir homojenizasyon, tozların die-set içinde düzgün dağılımı, sıkıştırma için uygulanacak basınç değerinin büyüklüğü, basıncın numunenin tamamına düzgün dağılımı, ilgili alaşım için sinterleme basamaklarının doğru belirlenmesi, uygun tavlama sıcaklığı ve kontrollü soğutma gibi tüm aşamalar üretilecek alaşımın kalitesi açısından son derece önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle nano-boyutlu tozlar ile çalışılırken tüm bu işlem basamaklarının eksiksiz yerine getirilmesi, deneycinin son derece hassas çalışması, üretim süresince aynı koşulların sağlanması ve hatta kullanılan ekipmanın kaliteli olması gibi hususlara dikkat edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu üretim parametrelerinden herhangi birindeki küçük bir hatanın, numunenin yeterince sağlam üretilmemesi, herhangi bir aşamada kırılması, homojenizasyonunun sağlanamaması, çatlaması, oksitlenmesi, patlaması gibi olumsuz durumlara yol açtığı görülmüştür. Üretim sürecinin herhangi bir aşamasındaki olumsuzluk nedeni ile iyi bir alaşımın üretimi için defalarca tekrar yapılması gerekebilmiştir. Kıyaslama için aynı alaşımlar mikro boyutlu tozlar kullanılarak da hazırlanmış ve söz konusu bu zorlukların toz metalurjisi yönteminden ziyade tozların nano-boyutlu olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Üretimde kullanılacak tozların boyutlarının malzemeye çeşitli ve üstün özellikler kazandırma ihtimali söz konusu olmakla birlikte bu durum üretim aşamasında üstesinden gelinmesi gereken çeşitli problemleri de beraberinde getirmektedir. Üretim aşamasına ilişkin bulguları içeren tablo, şekil ve resimler

önceki bölümde verilmiş ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu bulgulardan hareketle toz metalurjisi-basamak sinterleme metodunun Heusler tipi alaşımların üretiminde kullanılabileceği ancak arzu edilen kalitede üretim için metodun gerektirdiği işlemlerin eksiksiz ve doğru biçimde takip edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci aşaması üretimi yapılan alaşımlar için anlamlandırma çalışmalarına ayrılmış ve bu amaçla tüm alaşımlar için aynı koşullarda hazırlanan örnekler Enerji Ayrımlı X-ışını Spektrometresi (EDS), X-ışını Kırınım metresi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmişlerdir. Bu analizlerin sonuçları bir önceki bölümde tablolar ve grafikler olarak sunulmuş ve detaylı olarak değerlendirilmiştir.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları arasından seçilen ve x değerinin 0,9 ; 0,5 ve 0,1 olduğu alaşımlar için EDX spektrumları bir önceki bölümde sırası ile Şekil 35 ve Şekil 36’da verilmiştir. EDS spektrumları ve dataları değerlendirildiğinde; alaşım hazırlama sürecinde nano boyutlu tozlarla çalışılmasından da kaynaklı elementel düzeyde kayıplar söz konusu olduğu bununla birlikte alaşımların arzu edilen kompozisyon ve yapıya çok yakın bir biçimde üretilebildiği anlaşılmaktadır.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için XRD spektrumları sırası ile Şekil 37 ve Şekil 38’de kıyaslama için birlikte çizilmiş ve her iki grup için spektrumdaki önemli pikler için pik pozisyonları, latis parametreleri ve örgü mesafeleri sırası ile Tablo 7 ve Tablo 8’de paylaşılmıştır. XRD analizlerinden tespit edilen yeni kristal düzlemleri, alaşımların üretimi aşamasında uygulanan basamak sinterlemesi tekniğinin ve soğutma prosesinin doğru bir biçimde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Her iki alaşım grubu da polikristal yapıdadır ve büyük oranda kübik, tetragonal ve hekzagonal kristal düzenlenmelerine sahiptirler. Bununla birlikte $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ setinde kübik, $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ setinde ise tetragonal yapı diğer yapılardan daha fazladır. Elde edilen sonuçlar, polikristal yapı oluşturmak istenen malzemelerin üretimi için toz metalurjisi-basamak sinterlemesini tercih edilebilir kılmaktadır.

$\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımları için SEM görüntülerinden farklı büyütme oranları ve çözünürlüklere sahip olanlardan seçilen bazıları sırası ile Şekil 39 ve Şekil 40’da gösterilmiştir. SEM görüntülerinde hiçbir alaşım için fark edilebilir miktarda bir kontrast farkının olmamasından alaşımların homojen olarak üretilebildiği anlaşılmaktadır. SEM görüntülerinden alaşımlamanın gerçekleştiği ve bu sayede taneler arasındaki boşlukların azaldığı, tane sınırlarının belirginleştiği ve grain bölgelerinin oluştuğu görülebilmektedir. SEM görüntüleri de XRD analizlerini destekler nitelikte; alaşımların polikristal olduklarını ve en belirgin kristal sitemlerin kübik, tetragonal ve hekzagonal olduğunu göstermektedir. Alaşımların oksitlenmesi nedeni ile EDS spektrumlarında elementel düzeyde oksijen ve XRD

spektrumlarında oksitli pikler elde edilmiştir. Alaşımlardaki bu oksitlenme SEM görüntülerinde açıkça fark edilebilmiş ve birçok alaşımda özellikle tane sınırlarında yoğunlaşan oksitlenmenin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra bazı alaşımlar için SEM görüntülerinde yüzey kirliliklerinden kaynaklı kusurların, bazı aglomerasyon yapılarının ve küçük ölçekli kırıkların oluştuğu da tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında son olarak $\text{Co}_2\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ ve $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Al}$ alaşımlarının radyasyona karşı olası zırhlama kabiliyetlerini değerlendirebilmek için çeşitli madde-radyasyon etkileşim parametreleri Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak enerjiye bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu parametrelerden kütle soğurma katsayıları, lineer soğurma katsayıları ve etkin atom numaraları artan foton enerjisi ile azalırken, yarı kalınlık ve ortalama serbest yol değerleri artan foton enerjisi ile artmaktadır. Alaşımlar için elde edilen bu parametreler taşıdıkları fiziksel anlamlarda göz önünde bulundurularak değerlendirildiklerinde söz konusu alaşımların özellikle düşük enerji bölgesinde zırh ve/veya nükleer yapı materyali olarak kullanılabilecekleri sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Ak, F., 2014. $\text{Co}_2\text{Mn}_{1-x}\text{V}_x\text{Sb}$ ($0 \leq x \leq 1$) Heusler Bileşiklerinin Manyetik Özellikleri. Y. Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Alım B., 2017. Tavlama sıcaklığı, basınç ve dış manyetik alanın şekil hafızalı nanoalaşımların x-ışını şiddet oranları ve valens elektron yapıları üzerine etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alım, B., 2020. A comprehensive study on radiation shielding characteristics of Tin-Silver, Manganin-R, Hastelloy-B, Hastelloy-X and Dilver-P alloys. *Applied Physics A*, 126, 262.
- Alım, B., Özpolat, Ö.F., Şakar, E., Han, I., Arslan, I., Singh, V.P., Demir, L., 2022. Precipitation-hardening stainless steels: Potential use radiation shielding materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110009.
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, I., Sayyed, M.I., Demir, L. 2020. Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry* 166,108455.
- Alım, B., Şakar, E., Han, I., 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 Volume* 166, 108454.
- Aydoğan, H.C., 2014. Pd–Mn–Sb Heusler Alaşımlarının Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin incelenmesi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ayhan, S., 2018. Yoğunluk Fonksiyoneli Teorisi (YFT) Kullanılarak LiX_2Y (X: Rh, Cu, Pd, Ni, Y: Ge, Si) Heusler Yapıların Yapısal Elektronik ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Bacon, G.E., and Plant, J.S., 1971. Chemical ordering in Heusler alloys with the general formula A_2BC or ABC . *Journal of Physics F: Metal Physics*, 1, (4), 524–532.
- Berri, S., 2020. Computational study of structural, electronic, elastic, half-metallic and thermoelectric properties of CoCrScZ (Z= Al, Si, Ge, and Ga) quaternary Heusler alloys. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 33, (12), 3809–3818.
- Bhat, T.M., and Gupta, D.C., 2018. Magneto-electronic, thermal, and thermoelectric properties of some Co-based quaternary alloys. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 112, 190–199.
- Bradley, A.J., and Rodgers, J.W., 1934. The crystal structure of the heusler alloys. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 144, (852), 340-359.
- Buyukyildiz, M., Kurudirek, M., Ekici, M., Icelli, O., Karabul, Y., 2017. Determination of radiation shielding parameters of 304L stainless steel specimens from welding area for photons of various gamma ray sources. *Progress in Nuclear Energy*, 100, 245–254.
- Callister, W.D. Jr., and Rethwisch, D.G., 2020. *Callister's Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 944 p, New York, United States.
- Campbell, C.C.M., 1975. Hyperfine field systematics in Heusler alloys. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 5, (10), 1931–1945.

- Chadov, S., Qi, X., Kübler, J., Fecher, G.H., Felser, C., and Zhang, S.C. 2010. Tunable multifunctional topological insulators in ternary Heusler compounds. *Nature Materials*, 9, 541–545.
- Chatterjee, S., Das, S., Pramanick, S., Chatterjee, S., Giri, S., Banerjee, A., and Majumdar, S., 2019. Anomalous transport and magnetic behaviours of the quaternary Heusler compounds CoFeTiSn and CoFeVGa. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 478, 155–160.
- Chmielewski, M., Nosewicz, S., Pietrzak, K., Rojek, J., Strojny-Nedza, A., Mackiewicz, S., and Dutkiewicz, J., 2014. Sintering Behavior and Mechanical Properties of NiAl, Al₂O₃, and NiAl-Al₂O₃ Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, (11), 3875–3888.
- Çiçek, M.M., 2017. Ni-(Mn-Al)-In Heusler Alaşımlarının Yapısal, Manyetik ve Manyetokalorik Özelliklerinin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dap, S., Hugon, R., Lacroix, D., de Pouques, L., Briancon, J-L. and Bougdira, J., 2013. Agglomeration processes sustained by dust density waves in Ar/C₂H₂ plasma: From C₂H₂ injection to the formation of an organized structure. *Physics of Plasmas*, 20, 033703, 1–10.
- El Krimi Y., and Masrour, R., 2022. Cobalt-based full Heusler compounds Co₂FeZ (Z = Al, Si, and Ga): A comprehensive study of competition between XA and L21 atomic ordering with ab initio calculation, *Materials Science and Engineering: B*, 284, 115906.
- Entel, P., Buchelnikov, V.D., Khovailo, V.V., Zayak, A.T., Adeagbo, W.A., Gruner, M. E., Herper, H.C. and Wassermann, E.F. 2006. Modelling the phase diagram of magnetic shape memory Heusler alloys. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, (5), 865–889.
- Everhart, J.L., 1971. Nickel. In: *Engineering Properties of Nickel and Nickel Alloys*. Springer, Boston, MA. Print ISBN978-1-4684-1886-6, Online ISBN978-1-4684-1884-2.
- Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., Machado, A.R., 1999. The machinability of nickel-based alloys: a review, *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1–3, 1–16.
- Felser, C., Fecher, G.H., Balke, B., 2007, Spintronics: a challenge for materials science and solid-state chemistry. *Angewandte Chemie*, 46, (5), 680–699.
- Fick, A., 1855. Ueber Diffusion. *Annalen der Physik und Chemie*, 170, (1), 59–86.
- Galanakis, I., 2016. Chapter 1, Theory of Heusler and Full-Heusler Compounds, Pages 3-36 in *Heusler Alloys: Properties, Growth, Applications*, edited by Felser, C., Hirohata, A., Springer Series in Materials Science, ISSN 0933-033X, ISSN 2196-2812 (electronic), ISBN 978-3-319-21448-1, ISBN 978-3-319-21449-8 (eBook), 222, Springer, Berlin.
- Galanakis, I., 2023. Slater–Pauling Behavior in Half-Metallic Heusler Compounds. *Nanomaterials*, 13, 2010.
- Galanakis, I., and Dederichs, P.H., 2006. Half-Metallicity and Slater-Pauling Behavior in the Ferromagnetic Heusler Alloys. *Half-metallic Alloys Fundamentals and Applications*. Part of the Lecture Notes in Physics book series (LNP, volume 676) Galanakis, I., and Dederichs, P.H., Springer, Berlin, Heidelberg, 1–39.
- Galanakis, I., Özdoğan, K., and Şaşıoğlu, E., 2016. Spin-filter and spin-gapless semiconductors: The case of Heusler compounds. *AIP Advances* 6, 055606.
- Galanakis, I., Papanikolaou, N., and Dederichs, P.H., 2002. Slater-Pauling behavior and origin of the half-metallicity of the full-Heusler alloys. *Physical Review B*, 66, 174429.

- Galanakis, I., Şaşıoğlu, E., and Özdoğan, K., 2008. Magnetic phase transition in half-metallic CoMnSb and NiMnSb semi-Heusler alloys upon Cu doping: First-principles calculations. *Physical Review B* 77, 214417.
- Genel, K., Bindal, C., Demirkol, M., Artır, R., Bakkal, M., ve Parasız, A., 2014. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. Nobel, 971 s, Ankara.
- German R.M., 1997. *Powder Metallurgy Science*. Metal Powder Industries Federation, 472p, Princeton New Jersey, United States.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Levring, H., 2004. WinXCom – a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry* 71, 653–654.
- Gilleßen, M., and Dronskowski, R., 2009. A combinatorial study of full Heusler alloys by first-principles computational methods. *Journal of Computational Chemistry*, 30, (8), 1290–1299.
- Graf, T., Felser, C., and Parkin, S.S.P., 2016. Heusler compounds: applications in spintronics. In: Yongbing X, Awschalom DD, Nitta J, editors. *Handbook of spintronics*. Dordrecht: Springer Netherlands; 335–364.
- Graff, T., Parkin, S.S.P., and Felser, C., 2011. Heusler Compounds-A Material Class With Exceptional Properties. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47, (2), 367–373.
- Groot, R.A., Mueller, F.M., Van Engen, P.G., Buschow, K.H.J., 1983. New Class of Materials: Half-Metallic Ferromagnets. *Physical Review Letters*, 50, 2024–2027
- Gürlük, Z., 2012. Bazı Heusler Alaşımlarının Yapısal, Manyetik ve Manyetokalorik Özelliklerinin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Han, I., and Demir, L., 2009. Studies on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients in Ti_xCo_{1-x} and Co_xCu_{1-x} alloys. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 267, 3505–3510.
- Han, I., Aygun, M., Demir, L., Narmanlı, E., 2011. A study on the mean free path and half value layer at various alloys for different photon energies. *Journal of X-Ray Science and Technology* 19, (4), 501–508.
- Hashemifar, S. J., Kratzer, P., and Scheffler, M., 2005. Preserving the Half-Metallicity at the Heusler Alloy Co_2MnSi (001) Surface: A Density Functional Theory Study. *Physical review letters*, 94, (9), 096402.
- Heusler F. 1903. Über magnetische Manganlegierungen. *Verhandlugen der Deutsche Physikalische Gesellschaft*, (in German), 5, 219.
- Heusler, F., 1904. Manganese bronze and synthesis of magnetizable alloys from nonmagnetic metals. *Angewandte Chemie*, (in German), 17, (9), 260–264.
- Heusler, F., Starck, W., Haupt, E., 1903. Magnetisch-Chemische Studien. *Verhandlugen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (in German). 5, 220.
- Heusler, O., 1934. Kristallstruktur und Ferromagnetismus der Mangan-Aluminium-Kupferlegierungen. *Annalen der Physik*, (in German), 411, (2), 155–201.
- Hoat, D.M., and Naseri, M., 2020. Examining the half-metallicity and thermoelectric properties of new equiatomic quaternary Heusler compound $CoVRhGe$ under pressure. *Physica B: Condensed Matter*, 583, 412058.

- Hüsem, F., 2018. Bazı Heusler Alaşımlarının Thermo-Elektriksel ve Termomekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Ikhtiar, I., Kasai, S., Itoh, A., Takahashi, Y. K., Ohkubo, T., Mitani, S., and Hono, K., 2014. Magneto-transport and microstructure of $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})/\text{Cu}$ lateral spin valves prepared by top-down microfabrication process. *Journal of Applied Physics*, 115, (17), 173912.
- Ishida, S. Fujii, S. Kashiwagi, S. and Asano, S. 1995. Search for Half-Metallic Compounds in Co_2MnZ ($Z=\text{IIIb}$, IVb , Vb Element), *Journal of Physical Society of Japan*, 64, 2152–2157.
- Ishida, S., Akazawa, S., Kubo, Y., and Ishida, J., 1982. Band theory of Co_2MnSn , Co_2TiSn and Co_2TiAl . *Journal of Physics F: Metal Physics*, 12, (6), 1111–1122.
- Jackson D.F., and Hawkes D.J., 1981. X-Ray Attenuation Coefficients of Elements and Mixtures, *Phys Rep*, 70, 169–233.
- Jakobsson, A., Mavropoulos, P., Şaşıoğlu, E., Blügel, S., Ležaić, M., Sanyal, B., and Galanakis, I., 2017. First-principles calculations of exchange interactions, spin waves, and temperature dependence of magnetization in inverse-Heusler-based spin gapless semiconductors. *Physical Review B* 91, (17), 174439.
- Jena, A.K., and Chaturvedi, M.C., 1984. The role of alloying elements in the design of nickel-base superalloys. *Journal of Material Science*, 19, 3121–3139.
- Kaçal, M.R., Akman, F., Sayyed, M.I., Akman, F., 2019. Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. *Nuclear Engineering and Technology* 51, (3), 818–824.
- Kallmayer, M., Elmers, H.J., Balke, B., Wurmehl, S., Emmerling, F., Fecher G.H., and Felser C., 2006. Magnetic properties of $\text{Co}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ Heusler alloys. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, (5), 786–792.
- Kang, S.J., 2005. Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 280 p, Amsterdam.
- Kaya, M., 2017. Ni-(Mn,X)-In (X: Al, Cu, Si) Heusler alaşımlarının külçe örneklerinin, nano yapıları şerit ve nanoparçacıklarının yapısal, manyetik ve manyetokalorik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kieven, D., Klenk, R., Naghavi, S., Felser, C., and Gruhn, T., 2010. I-II-V half Heusler compounds for optoelectronics: Ab initio calculations. *Physical Review B*, 81, 208–214, 2010.
- Kojima, T., Kameoka S., and Tsai, A.P., 2019. The emergence of Heusler alloy catalysts, *Science and Technology of Advanced Materials*, 20, (1), 445–455.
- Kubota, T., Tsunegi, S., Oogane, M., Mizukami, S., Miyazaki, T., Naganuma, H., and Ando, Y., 2009. Half-metallicity and Gilbert damping constant in $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ Heusler alloys depending on the film composition. *Applied Physics Letters*, 94, (12), 122504.
- Kumar, A., Srivastava, P.C., 2013. Synthesis and characterization of Co_2FeAl Heusler alloy nanoparticles. *Materials Science-Poland*, 31, (4), 501-505.
- Kübler, J., William, A.R., and Sommers, C.B., 1983. Formation and coupling of magnetic moments in Heusler alloys. *Physical Review B*, 28, 1745–1755.

- Luo, H., Li, Q., Sun, K., Liu, S., and Liang, Z., 2020. Magnetic properties and site preference of Ru in Heusler alloys $\text{Fe}_2\text{V}_{1-x}\text{Ru}_x\text{Si}$ ($x=0.25, 0.5, 0.75, 1$) Journal of Magnetism and Magnetic Materials 496, 165908.
- Ma, J., He, J., Mazumdar, D., Munira, K., Keshavarz, S., Lovorn, T., Wolverton, C., Ghosh, A.W., and Butler, W.H., 2018. Computational investigation of inverse Heusler compounds for spintronics applications Physical Review B 98 (1), 094410.
- Ma, J., Hegde, V.I., Munira, K., Xie, Y., Keshavarz, S., Mildebrath, D.T., Wolverton, C., Ghosh, A.W., and Butler, W.H., 2017. Computational investigation of half-Heusler compounds for spintronics applications. Physical Review B 95 (2), 024411.
- Mankins, W.L., and Lamb, S., 1990. Nickel and Nickel Alloys, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol 2, ASM Handbook, By ASM Handbook Committee, ASM International, 428–445.
- Moran-Lopez, J.L., Rodriiguez-Alba, R., and Aguilera-Granja, F., 1994. Modeling the magnetic properties of Heusler alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 131, (3), 417–426.
- Nazlı, S., 2016. Kübik Yapıdaki Os_2YPb ($\text{Y}=\text{Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn}$) Heusler Bileşiklerinin Yapısal, Elektronik, Elastik ve Titreşim Özelliklerinin Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi ile İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ni, Z., Ma, Y., Liu, X., Luo, H., Liu, H., and Meng, F., 2018. Electronic structure, magnetic properties and martensitic transformation in all-d-metal Heusler alloys Zn_2YMn ($\text{Y} = \text{Fe, Co, Ni, Cu}$). Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 451, 721–726.
- Ni, Z., Guo, X., Liu, X., Jiao, Y., Meng, F., and Luo, H., 2019. Understanding the magnetic structural transition in all-d-metal Heusler alloy $\text{Mn}_2\text{Ni}_{1.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ti}_{0.5}$. Journal of Alloys and Compounds. 775, 427–434.
- Nishino, Y., Kato, M., Asano, S., Soda, K., Hayasaki, M., and Mizutani, U., 1997. Semiconductorlike behavior of electrical resistivity in Heusler-type Fe VAl Compound. Physical Review Letters, 79, 1909–1912.
- Özdoğan, K., 2009. Katkı ve Düzensizliğin Yarı-Metalik Ferromanyetik Heusler Alaşımların Manyetik Özelliklerine Etkisinin Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Özdoğan, K., Galanakis I., Şaşıoğlu E., and Aktaş B., 2007. Defect-induced ferrimagnetism in the half-metallic Co_2CrAl and Co_2CrSi compounds. Physica Status Solidi, 1, (3), 95–97.
- Özdoğan, K., Maznichenko, I.V., Ostanin, S., Şaşıoğlu, E., Ernst, A., Mertig I., and Galanaki, I., 2019. High spin polarization in all-3d-metallic Heusler compounds: the case of Fe_2CrZ and Co_2CrZ ($\text{Z} = \text{Sc, Ti, V}$). Journal of Physics D: Applied Physics 52, (20), 205003.
- Özdoğan, K., Şaşıoğlu, E., and Galanakis, I., 2013. Slater-Pauling behavior in LiMgPdSn -type multifunctional quaternary Heusler materials: Half-metallicity, spin-gapless and magnetic semiconductors Journal of Applied Physics, 113, (19), 193903.
- Özmen, T., 2012. $\text{Co}_2\text{MnAl}_{1-x}\text{Sn}_x$ Heusler Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin Belirlenmesi. Y. Lisans Tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- Özpolat, Ö.F., 2021. Bor katkılı metal komplekslerin üretimi, karakterizasyonu, yapısal özelliklerinin yük transferi ve delokalizasyon fenomenleri kullanılarak nodeJS

platformunda yapay zeka ile incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Pauling, L., 1938. The Nature of the Interatomic Forces in Metals. *Physical Review*, 54, 899–904.
- Planes, A., Mañosa, L., and Acet, M., 2009. Magnetocaloric effect and its relation to shape-memory properties in ferromagnetic Heusler alloys. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21, (23), 233201.
- Potter, H.H., 1929. The X-ray structure and magnetic properties of single crystals of Heusler alloy. *Proceedings of the Physical Society*, 41, 135.
- Priyanka, D.S., Sudharsan, J.B., Srinivasan, M., and Ramasamy, P., 2022. Cobalt based new quaternary Heusler alloys for Spintronic and thermoelectric applications: an Ab-initio study. *Materials Technology*, 37, (11), 1936–1946.
- Rai and Thapa 2012. Electronic structure and magnetic properties of X_2YZ ($X=Co$, $Y=Mn$, $Z=Ge$, Sn) type Heusler compounds: a first principle study. *Phase Transitions: A Multinational Journal*, 85, (7), 608–618.
- Saito, T., Tezuka, N., Matsuura, M., and Sugimoto, S., 2013. Spin injection, transport, and detection at room temperature in a lateral spin transport device with $Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}/n$ -GaAs schottky tunnel junctions. *Applied Physics Express*, 6, (10), 103006.
- Sakuraba, Y., Nakata, J., Oogane, M., Kubota, H., Ando, Y., Sakuma, A., and Miyazaki, T., 2005. Huge Spin-Polarization of L_{21} -Ordered Co_2MnSi Epitaxial Heusler Alloy Film. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44, (2), 33–36.
- Sakurada, S., and Shutoh, N., 2005. Effect of Ti substitution on the thermoelectric properties of $(Zr,Hf)NiSn$ half-Heusler compounds. *Applied Physics Letters*, 86, 105–108.
- Sarıtaş, S., 2017. Ni-(Mn, Cu)-In Heusler Alaşımlarının Yapısal, Manyetik ve Manyetokalorik Özelliklerinin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Shakil, M., Arshad, H., Zafar, M., Rizwan, M., Gillani, S.S.A., and Ahmed, S., 2020. First-principles computation of new series of quaternary Heusler alloys $CoScCrZ$ ($Z=Al$, Ga , Ge , In): a study of structural, magnetic, elastic and thermal response for spintronic devices. *Molecular Physics*, 118, (24), e1789770.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, V., Nathuram, R., Khanna, A., Kumar, R., Bhatti, S.S., Sahota, H.S., 2002. Gamma-ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 194, 1–6.
- Skaftouros, S., Özdoğan, K., Şaşıoğlu, E., and Galanakis, I., 2013. Generalized Slater-Pauling rule for the inverse Heusler compounds *Physical Review B* 87, (2), 024420.
- Slater, J.C., 1936. The Ferromagnetism of Nickel. II. Temperature Effects. *Physical Review*, 49, 931–937.
- Smith, G.D., and Baker, B.A., 2005. Nickel and Its Alloys. In *Mechanical Engineers' Handbook*, M. Kutz (Ed.), Print ISBN:9780471719854, Online ISBN:9780471777441.
- Suits J.C., 1976. Structural instability in new magnetic Heusler compounds. *Solid State Communications* 18, (3), 423–425.
- Şaşıoğlu, E., Sandratskii, L.M., and Bruno, P., 2008. Role of conduction electrons in mediating exchange interactions in Mn-based Heusler alloys. *Physical Review B* 77, 064417.

- Şerefoğlu, H., 2006. Heusler Tipi Alaşımların Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Tobola, J., Pierre, J., Kaprzyk, S., Skolozdra, R.V., and Kouacou, M. A., 1998. Crossover from semiconductor to magnetic metal in semi-Heusler phases as a function of valence electron concentration. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10, 1013–1032.
- Toraman, S., 2018. Manyetik Soğutucular İçin Ni-Tabanlı Heusler Alaşımlarının Tasarlanması ve Geliştirilmesi. Y. Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Turgut, K., 2014. L2₁ Yapısındaki Heusler Tipi Ni₂XGa (X=Co, Cu, Ni, Sc, Ti, V ve Zn) Alaşımlarının Yapısal, Elektronik, Elastik ve Fonon Özelliklerinin Yoğunluk Fonsiyonel Teorisi ile İncelenmesi. Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir.
- Ulus E., 2016. Kübik Yapıdaki Bakır Bazlı Üçlü Heusler Bileşiklerinin Yapısal, Elektronik, Elastik ve Titreşim Özelliklerinin Yoğunluk Fonsiyonel Teorisi ile İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Umucu, R., 2016. Fe-Ti-Si Üçlü Heusler Alaşımların Yapısal, Elektronik, Manyetik ve Mekanik Özelliklerinin Yoğunluk Fonsiyonel Teorisiyle İncelenmesi. Y. Lisans Tezi Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir.
- Wang D.C., Ping L.A., Yang H., 1995. Measurement of the mass attenuation coefficients for SiH₄ and Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 95, 161–165.
- Wang, C., Meyer, J., Teichert, N, Auge, A., Rausch, E., Balke, B., Hütten, A., Fecher, G.H., and Felser, C., 2014. Heusler nanoparticles for spintronics and ferromagnetic shape memory alloys. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 32,(2), 020802.
- Webster, P.J. and Ziebeck K.R.A., 1988. Alloys and Compounds of d- Elements with Main Group Elements Part 2. edited by Wijn, H.R.J., Landolt–Börnstein, New Series Group III, vol. 19, Springer, Berlin, 75–184.
- Webster, P.J., 1969. Heusler alloys. *Contemporary Physics*, 10, (6), 559-577.
- Webster, P.J., 1971. Magnetic and chemical order in Heusler alloys containing cobalt and manganese. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 32 (6), 1221-1231.
- Webster, P.J., and Ramadan, M.R.I., 1977. Magnetic order in palladium-based Heusler alloys Part I: Pd₂MnIn_{1-x}Sn_x and Pd₂MnSn_{1-x}Sb_x. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 5, (1), 51–59.
- Webster, P.J., and Ramadan, M.R.I., 1979. Magnetic order in palladium-based heusler alloys: Part 2: Pd₂MnIn_{1-y}Sb_y. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 13, (3), 301–306
- Webster, P.J., and Ramadan, M.R.I., 1980. Magnetic order in palladium-based Heusler alloys part 3: The effects of disorder in Pd₂MnIn_{1-x}Sn and Pd₂MnIn_{1-y}Sb. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 20, (3), 271–276.
- Webster, P.J., and Tebble R.S., 1967. The magnetic and chemical ordering of the heusler alloys Pd₂MnIn, Pd₂MnSn and Pd₂MnSb. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 16, (140), 347–361.
- Wernick, J.H., Hull, G.W., Geballe, T.H., Bernadini, J.E., and Waszczak, J.V., 1983. Superconductivity in ternary Heusler intermetallic compounds, *Materials Letters*, 2, 90–92.

- Winterlik, J., Fecher, G.H., Thomas, A., and Felser, C., 2009. Superconductivity in ternary Heusler intermetallic compounds. *Physical Review B*, 79, 508–517.
- Yıldırım, S., 2014. Nanoyapıdaki $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34-x}\text{Cu}_x\text{In}_{16}$ ($x = 1.3, 1.5$) Heusler Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yu, C., Cao, P., and Jones, M.I., 2017. Titanium Powder Sintering in a Graphite Furnace and Mechanical Properties of Sintered Parts. *Metals*, 7, (67), 1–14.
- Yüce, S., 2010. Nikel ve Kobalt Tabanlı Heusler Alaşımlarının Manyetik, Isısal, Elektriksel ve Manyetokalorik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Zafar, M., Sadia, H., Rizwan, M., Arshad, H., Ahmad, S., Gillani, S.S.A., ... and Shakil, M., 2020. Theoretical study of the structural, electronic and magnetic properties of equiatomic quaternary CoTcCrZ ($Z = \text{Si, Ge, P}$) Heusler alloys. *Chinese Journal of Physics*, 64, 123–137.
- Ziebeck, K.R.A., and Neumann, K-U., 2001. Magnetic Properties of Metals, Landolt-Börnstein, New Series, Group III vol 32/c. ed Wijn, H.R.J., Springer, Berlin. 64–414.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Emine NARMANLI HAN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-posta:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Yayınlar	
1.	