

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

CANTOR YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN METAL KATKISIYLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ataberk YILDIZ

AĞUSTOS 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CANTOR YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN METAL KATKISIYLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

Ataberk YILDIZ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 08 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 26 / 08 / 2024

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi KÜRŞAT İÇİN

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Cantor Yüksek Entropili Alaşımın Manyetik Özelliklerinin Metal Katkısıyla Değişiminin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi KÜRŞAT İÇİN’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Sultan Öztürk’e, Sayın Arş. Gör. Dr. Sefa Emre Sünbül’e, Sayın Arş. Gör. Sümran Bilgine ve Doç. Dr. Hüseyin SÖZERİ’ye eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Sayın Selmine ÜNVER, Sayın Furkan ALPTEKİN ve Sayın Seda DERİCİ’ye teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında bana sağlamış oldukları imkanlar ve esneklikler için başta Müdürüm Sayın Ahmet Turan Alnıaçık ve Şefim Sayın Tayfun Hüyükpınar olmak üzere Ekinciler Demir ve Çelik San. A.Ş.’de birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum tüm yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Kezban YILDIZ, babam Tayyar YILDIZ, kardeşlerim İrem YILDIZ ve Himmet YILDIZ, dedelerim Himmet YILDIZ ve Muharrem ERKAYA, babaannem Meliş YILDIZ, anneannem Makbule ERKAYA ve amcam Tamer YILDIZ’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Ataberk YILDIZ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Cantor Yüksek Entropili Alaşımın Manyetik Özelliklerinin Metal Katkısıyla Değişiminin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi KÜRŞAT İÇİN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/08/2024

Ataberk YILDIZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Yüksek Entropili Alaşımlar.....	2
1.2. Yüksek Entropili Alaşımlar Kavramı.....	5
1.3. Yüksek Entropili Alaşımlarda Dört Ana Etki.....	7
1.3.1. Yüksek Entropi Etkisi.....	7
1.3.2. Kafes Distorsiyon Etkisi.....	8
1.3.3. Yavaş Difüzyon Etkisi.....	9
1.3.4. Kokteyl Etkisi.....	11
1.4. Yüksek Entropili Alaşımların Tasarımı.....	12
1.4.1. Ampirik Hesaplama Yöntemi.....	13
1.4.2. Atomistik Yaklaşımlar.....	13
1.4.3. Thermo-Calc Yazılımı.....	14
1.5. Yüksek Entropili Alaşımların Özellikleri.....	15
1.5.1. Mekanik Özellikler.....	15
1.5.2. Elektriksel Özellikler.....	17
1.5.3. Termal Özellikler.....	18
1.5.4. Korozyon Özellikleri.....	19
1.5.5. Manyetik Özellikler.....	21
1.6. Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Yöntemleri.....	22
1.6.1. Ergitme ve Döküm Yöntemleri.....	23
1.6.2. Katı Hal Üretim Yöntemleri.....	28
1.6.3. YEA Esaslı Kaplamalar.....	30
1.7. Literatür Özeti.....	31

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35
2.1. Vakum Ark Ergitme Sistemi ile Alaşımların Üretimi.....	35
2.2. Alaşımların Yapısal Analizleri.....	36
2.3. Alaşımların Mikroyapısal Analizleri.....	37
2.4. Alaşımların Manyetik Özelliklerinin Belirlenmesi	38
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
3.1. Üretilen Alaşımların Faz Yapısının İncelenmesi	39
3.2. Üretilen Alaşımların Mikroyapılarının İncelenmesi	42
3.3. Üretilen Alaşımların Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi	58
4. SONUÇLAR.....	68
5. ÖNERİLER.....	70
6. KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

CANTOR YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN METAL KATKISIYLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Ataberk YILDIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi KÜRŞAT İÇİN

2024, 80 Sayfa

Bu çalışmanın amacı, yüksek sıcaklıklarda ayrışan Cr yerine alternatif bir metal atomu ekleyerek Cr'suz yüksek entropili alaşıma (Cr'suz YEA) ferromanyetik özellikler kazandırmaktır. Bu doğrultuda, Cr'suz YEA'ya antiferromanyetik ve paramanyetik elementler içeren varyantlara farklı oranlarda metal katkısı ($x=0.0-0.5$) eklenmiş ve manyetik özelliklerdeki değişim incelenmiştir. Antiferromanyetik element içeren Cr'suz YEA, Cantor alaşımı ile benzerlikler gösterirken, paramanyetik element eklenmesi yeni fazların oluşumuna yol açmıştır. Metal katkıları faz yapısını büyük ölçüde değiştirmese de bazı mikroyapısal iyileşmeler sağlamıştır. Manyetik özellikler açısından, antiferromanyetik element içeren varyantlar daha yüksek doygunluk mıknatıslanması ve zorlayıcılık sergilerken, paramanyetik element içerenler daha düşük değerler göstermiştir. Metal katkısı, alaşımların yumuşak veya sert manyetik özelliklerini değiştirerek bu değerlerde önemli farklılıklara neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek entropi alaşımları, Manyetik özellikler, Titanyum etkisi

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE CHANGE IN THE MAGNETIC PROPERTIES OF CANTOR HIGH ENTROPY ALLOY WITH METAL DOPING

Ataberk YILDIZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Materials Engineering Program
Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi KÜRŞAT İÇİN
2024, 80 Pages

The aim of this study is to introduce ferromagnetic properties to Cr-free high entropy alloys (Cr-free HEA) by incorporating an alternative metal atom instead of Cr, which decomposes at high temperatures. Cr-free HEAs with antiferromagnetic and paramagnetic elements were studied by adding varying amounts of metal additives ($x=0.0-0.5$) to observe changes in magnetic properties. Cr-free HEA with antiferromagnetic elements showed similarities to the Cantor alloy, while the addition of paramagnetic elements led to the formation of new phases. Metal additives did not significantly alter the phase structure but provided some microstructural improvements. In terms of magnetic properties, variants with antiferromagnetic elements exhibited higher saturation magnetization and coercivity, whereas those with paramagnetic elements showed lower values. Metal additives caused significant changes in the soft or hard magnetic properties of the alloys, resulting in noticeable differences in these values.

Key Words: High entropy alloys; Magnetic properties; Titanium effect

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Alaşımların sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.2. İkili sistem içerisinde eş atomlu bileşimde maksimuma ulaşan konfigürasyonel entropi.	6
Şekil 1.3. Çözelti halindeki eş atomlu alaşımlar için element sayısının bir fonksiyonu olarak konfigürasyonel entropisi).	7
Şekil 1.4. Bir katı çözeltinin 10 farklı birincil element ve iki boşluk içeren deforme olmuş kafesi.....	9
Şekil 1.5. $Al_xCoCrCuFeNi$ 'nin sertliğinin Al içeriğinin değişimi ile değişimi.....	12
Şekil 1.6. Vakum ark ergitme sistemi şematik gösterimi).....	24
Şekil 1.7. Ark ergitme ile üretilen $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ alaşımının mikroyapısı	25
Şekil 1.8. Bridgman katılaşma yöntemi şematik gösterim	26
Şekil 1.9. $FeCoNiAlSi$ alaşımının Bridgman prosesi ile 200 $\mu m/s$ çekme hızında hazırlanan numunenin optik mikroyapı evrimi ve kristal büyümesinin şematik diyagramı	26
Şekil 1.10. Lens yöntemi şematik gösterim.....	28
Şekil 1.11. Mekanik alaşımlama şematik gösterimi	29
Şekil 1.12. SPS yöntemi şematik gösterimi.....	29
Şekil 1.13. RF ve DC püskürtme yöntemlerinin şematik diyagramı.....	30
Şekil 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan vakumlu ark ergitme fırını.....	35
Şekil 2.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan x-ışını difraktometresi	37
Şekil 2.3. Deneysel çalışmalarda mikro yapı analizlerinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu	37
Şekil 2.4. Deneysel çalışmalarda manyetik özellikleri karakterize etmek için kullanılan titreşimli örnek manyetometresi	38
Şekil 3.1. $FeCoCuNiMnTi_x$ alaşımının XRD desenleri	40
Şekil 3.2. $FeCoCuNiAlTi_x$ alaşımlarının XRD desenleri.	42
Şekil 3.3. Ark ergitme ile üretilen $FeCoCuNiMn$ alaşımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	43
Şekil 3.4. $FeCoCuNiMn$ alaşımının EDS harita analizi	44
Şekil 3.5. Ark ergitme ile üretilen $FeCoCuNiMnTi_{0.1}$ alaşımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	45
Şekil 3.6. $FeCoCuNiMnTi_{0.1}$ alaşımının EDS harita analizi	45

Şekil 3.7.	Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiMnTi _{0.3} alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	46
Şekil 3.8.	FeCoCuNiMnTi _{0.3} alaşımasının mavi dikdörtgenle sınırlandırılmış alanının EDS harita analizi	46
Şekil 3.9.	Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiMnTi _{0.5} alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	47
Şekil 3.10.	FeCoCuNiMnTi _{0.5} alaşımasının mavi dikdörtgenle sınırlandırılmış alanının EDS harita analizi	47
Şekil 3.11.	FeCoCuNiMnTi _x mikroyapısında farklı fazlardaki bazı elementlerin değişimi.....	50
Şekil 3.12.	Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAl alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	52
Şekil 3.13.	FeCoCuNiAl alaşımasının EDS harita analizi.....	52
Şekil 3.14.	Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAlTi _{0.1} alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	53
Şekil 3.15.	FeCoCuNiAlTi _{0.1} alaşımasının EDS harita analizi.....	53
Şekil 3.16.	Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAlTi _{0.3} alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	54
Şekil 3.17.	FeCoCuNiAlTi _{0.3} alaşımasının EDS harita analizi.....	54
Şekil 3.18.	Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAlTi _{0.5} alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları.....	55
Şekil 3.19.	FeCoCuNiAlTi _{0.5} alaşımasının EDS harita analizi	55
Şekil 3.20.	FeCoCuNiAlTi _x mikroyapısında farklı fazlardaki bazı elementlerin değişimi.....	58
Şekil 3.21.	Oda sıcaklığında FeCoCuNiMnTi _x YEA'ların manyetik histerezis eğrileri.....	60
Şekil 3.22.	Oda sıcaklığında FeCoCuNiAlTi _x YEA'ların manyetik histerezis eğrileri.....	61

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Eşatomik alaşımların ΔS_{conf} değerleri	4
Tablo 2. Elementel fazlar, bileşikler, ara fazlar ve rastgele katı çözeltiler için konfigürasyonel değerler karşılaştırılmıştır	8
Tablo 3. Farklı HMK matrislerinde nikel için difüzyon parametreleri.	11
Tablo 4. Cu ve Fe'nin AlNiCo alaşımının manyetik özellikleri üzerindeki etkisi.....	22



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

YEA	: Yüksek Entropili Alaşım
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
Al	: Alüminyum
Mn	: Mangan
Ti	: Titanyum
Ni	: Nikel
Co	: Kobalt
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
Hc	: Koersivite
Mr	: Kalıcı Mıknatıslanma
Ms	: Doygunluk Manyetizasyonu

1. GENEL BİLGİLER

İnsanlık varolduğu ilk günden beri sürekli olarak yeni malzemeler keşfetmeye ve keşiflerini geliştirmeye odaklanmıştır. İlk çağlardan başlayarak modern döneme kadar bu süreç durmaksızın devam etmiştir ve bu sayede metaller, polimerler ve kompozitler gibi modern dünyanın vazgeçilmezi olan birçok temel malzeme gurubu bulunmuş ve geliştirilmiştir. Ancak teknolojinin hızla gelişmesi ve taleplerinin her geçen gün artmasıyla bu temel malzeme grupları insanlığın ihtiyaçlarını karşılayamamaya başlamıştır. Yirminci ve yirmibirinci yüzyılda malzeme biliminin ana hedefi hızla gelişen teknolojinin yol açtığı bu ihtiyaçları karşılayabilecek yeni malzeme türleri geliştirmeye odaklanmak olmuştur.

Bu kapsamda son 20 yıldır bilim dünyasında çok büyük ilgi ve merak oluşturan Yüksek Entropili Alaşımlar(YEA) Cantor ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır (Cantor vd., 2004). Geleneksel alaşımlardan farklı olarak en az 5 veya daha fazla elementin bileşimlerini geliştirmek amacıyla ortaya atılmıştır (MacDonald vd., 2019). Temel element kavramından kaçınılan yüksek entropili alaşımları oluşturmak için yalnızca eş molar veya eş molarlara yakın atom yüzdelere sahip bileşimde birden fazla elementin karıştırılmasını içerir. Yüksek entropili alaşımların keşfinden önce birçok sayıda alaşım üretilmiştir. Yüksek entropili alaşımlar (High Entropy Alloys, HEAs) veya Çok Esaslı Element Alaşımları (Multi-Principal-Element Alloys, MPEAs), Prof. Dr. Yeh ve Prof. Dr. Cantor' un çalışmaları sonucu ortaya çıkan yeni nesil alaşımlardır.

Yüksek Entropili Alaşımlar alanında önemli bir yere sahip olan Cantor alaşımı (CrMnFeCoNi), son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgisini çekmiştir. Ancak, bu alaşımın yüksek sıcaklıklarda Cr ayrışması ve sınırlı ferromanyetik özellikleri, bazı uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır. Bu tez çalışması, bu sınırlamaları aşmak ve Cantor alaşımının manyetik özelliklerini geliştirmek amacıyla yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın temel amacı, Cantor alaşımının yapısını modifiye ederek daha güçlü ferromanyetik özellikler elde etmektir. Bu doğrultuda, yüksek sıcaklıklarda ayrışma eğilimi gösteren Cr yerine alternatif metal atomları eklenerek alaşımın manyetik performansının artırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, FeCoCuNi alaşımı temel alınarak iki farklı modifikasyon serisi oluşturulmuştur:

1. $MnTi_x$ ($x=0.0, 0.1, 0.3$ ve 0.5) ilaveli alaşımlar.
2. $AlTi_x$ ($x=0.0, 0.1, 0.3$ ve 0.5) ilaveli alaşımlar

bu alaşım serileri, vakum ark ergitme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Vakum ark ergitme yöntemi, geleneksel üretim tekniklerine kıyasla daha kısa sürelerde üretim yapabilme avantajı sunarak, alaşımın nanokristalin yapısını korumayı amaçlamaktadır. Çalışmada, üretilen alaşımların yapısal ve manyetik özellikleri arasındaki ilişki detaylı olarak incelenmiştir. Alaşımların mikroyapısal özellikleri x-ışını kırınım analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizleri ile karakterize edilmiştir. Manyetik özellikleri titreşimli numune manyetometresi (VSM) ile ölçülmüştür.

1.1. Yüksek Entropili Alaşımlar

Geçen yüzyılda, metallerin alaşımlanması bilim dünyasında oldukça popüler bir araştırma konusuydu ancak geleneksel yöntemler ana metale az miktarda ikinci bir element eklemeyi içeriyordu ve bu çalışmalar, esasen ana metalin özelliklerini geliştirmeye odaklanmıştı.

Ancak, Yeh ve arkadaşları (J.-W. Yeh vd., 2004) ve Cantor ve arkadaşları (Cantor vd., 2004) tarafından yapılan çalışmalar, çok bileşenli rastgele katı çözeltiler alanında yeni bir bakış açısı sundu. Yüksek konfigürasyon entropisine sahip olmaları nedeniyle, YEA'lar, çok bileşenli katı çözeltiler alaşımlarında yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Yeh ve arkadaşları, yüksek yapı entropileri nedeniyle çok bileşenli eşit atomlu alaşımlarda katı çözeltiler fazlarının oluşumunu açıklamak için "yüksek entropili alaşım" (YEA) terimini önermişlerdir (Q. He vd., 2017). Geleneksel alaşımlara kıyasla YEA'lardaki yüksek karıştırma entropisinin başlangıçta katı çözeltiler fazı oluşumunun birincil nedeni olduğuna inanılırken (M.-H. Tsai ve J.-W. J. M. R. L. Yeh, 2014; Ye vd., 2016; J.-W. J. J. Yeh, 2013), sonraki araştırmalar bunun tek veya hatta birincil faktör olmadığını göstermektedir (Sheng ve Liu, 2011). Aslında deneyler, yüksek karıştırma entropisinin basit yapılara sahip katı çözeltilerin fazlarının oluşumunu teşvik ettiğini ve diğer çeşitli fazlarda bir azalmaya yol açtığını göstermektedir (M.-H. Tsai ve J.-W. J. M. R. L. Yeh, 2014).

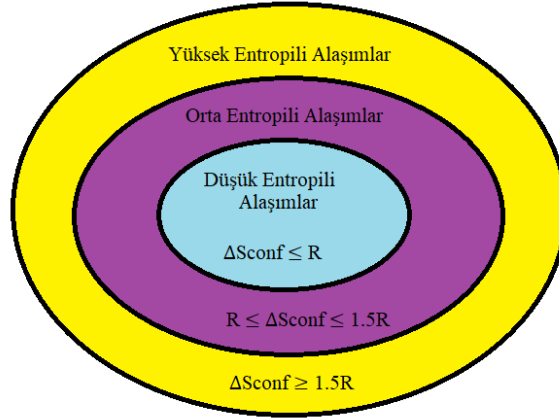
Çok bileşenli alaşımların karışım entropisi, faz diyagramında ideal olarak bir çözeltiler fazını temsil etmelidir (Y. Zhang vd., 2014). Yüksek entropili alaşımdaki (YEA) farklı fazların kararlılığını belirlemek için termodinamik denge yöntemi, entalpi (H) ve entropi (S)

tarafından belirlenen Gibbs serbest enerjisini; $G=H-TS$ denklemine göre hesaplar (Koželj vd., 2014). Amaç, Gibbs serbest enerjisini minimize eden bu değişkenlerin kombinasyonunu bulmaktır. Yüksek entropili alaşımların tanımlarından biri entropi kavramına dayanır ve konfigürasyonel karışım entropisinin katı çözelti durumunda $1.5R$ 'den büyük olması gerektiğini belirtir , burada R gaz sabitidir (Yong Zhang, 2023). Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, YEA'lar için karışım entropisi aralığı tanımlanır. Saf elementler neredeyse sıfır entropiye sahiptir ve ultra saf malzemeler olarak adlandırılır. Bir veya iki element içeren alaşımlar, $\Delta S_{conf} \leq R$ entropili düşük entropili alaşımlar kategorisine girer. Orta entropili alaşımlar 2 ila 4 element içerir ve $R \leq \Delta S_{conf} \leq 1.5R$ arasında bir entropiye sahiptir. Beş veya daha fazla element birleştirilerek alaşım oluşturulduğunda, konfigürasyonel entropinin sonucu $\Delta S_{conf} \geq 1.5R$ olur ve buna yüksek entropili alaşımlar denir. YEA durumunda, ekstra bir bileşimin eklenmesi karışım entropisini artırabilir ve intermetalik fazlar yerine katı çözelti fazının oluşumunu destekler (Mishra vd., 2019). Burada belirtilenleri özetlemek gerekirse, eş atomlu alaşımlar, Tablo 1'de görüldüğü gibi değişken konfigürasyonel entropilere sahiptir. Bileşimlerin karıştırılması, çok bileşenli alaşımlarda bir yöntemle $\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix}$ değerini oluşturur. Bu değer Boltzmann teorisine göre, r elementi içeren ideal bir gazın karışımının konfigürasyonel entropisidir (Koželj vd., 2014). Her bir mol için konfigürasyon entropisi, $R \ln n$ ile belirlenebilir ve bunun için aynı zamanda Boltzmann hipotezine dayalı olarak bir sistemin karmaşıklığı ve entropisi arasındaki ilişkiyi de ele alan şu iki formülden biri kullanılır;

$$\Delta S_{conf} = -k \ln w = -R \left(\frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} + \dots \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} \right) \quad (1)$$

$$\Delta S_{conf} = -R \sum_{i=1}^n X_i \ln X_i \quad (2)$$

burada gaz sabiti $R= 8.314 \text{ J/K mol}$, n element sayısıdır (B. S. Murty vd., 2019) k Boltzmann sabiti ve w sistemin parçacıkları arasında kullanılabilen enerjinin birleştirilebileceği veya değiştirilebileceği yolların sayısıdır.



Şekil 1.1. Alaşımların sınıflandırılması

Yüksek entropili alaşımlar genellikle Cr, Fe, M ve V (Hacim merkezli kubik yapı), Al, Cu ve Ni (Yüzey merkezli kubik yapı) ve Co ve Ti (Hekzagonal sıkı paket yapı) gibi elementler içerir (Guo vd., 2011). YEA'lardaki yüksek karışım entropisi, karmaşık yapıya ve büyük birim hücrelere sahip düzenli intermetalik fazlar yerine HMK veya YMK gibi basit yapılara sahip düzensiz katı çözeltilerini stabilize eder (Koželj vd., 2014; Urban ve Feuerbacher, 2004). Sonuç olarak, YEA'larda genellikle HMK, YMK veya karışık HMK-YMK fazları gözlemlenir (Guo vd., 2011; Sheng ve Liu, 2011).

Bunların yanı sıra, birçok makale ΔH_{mix} 'in kristal yapıyı belirlemek için kritik bir parametre gibi davrandığını tespit etmiştir. ΔH_{mix} 'in çok pozitif veya çok negatif bir değerine sahip YEA'ların faz ayrılmasına yol açması ve böylece çok fazlı alaşımlara katkıda bulunması beklenir (Otto vd., 2013; Troparevsky vd., 2015). Çok elementli alaşımlar için termodinamik analiz, konfigürasyon dışı entropi ve entalpinin fazların kararlılığında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Yine de, sadece tek bir faz gözlemlendiğinde, yalnızca konfigürasyon entropisi kritik bir rol oynar (Praveen ve Kim, 2018). Daha düşük sıcaklıklarda, entropi nedeniyle faz stabilizasyonları azalır.

Tablo 1. Eşatomik alaşımların ΔS_{conf} değerleri (Praveen ve Kim, 2018)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta S_{conf}(R)$	0	0.069	1.1	1.39	1.61	1.79	1.95	2.08	2.2	2.3	2.4	2.49	2.57

Ayrıca, YEA seçimi kesinlikle egzotik sistemlerin daha iyi anlaşılması ve bilinmesi, aşama oluşturulması ve çok bileşenli sistemlerimizde karmaşık mikro yapıları tahmin etme yeteneği konusunda önemli ölçüde yardımcı olacaktır (Pickering ve Jones, 2016). Birçok muhtemel YEA vardır ve deneme yanılma yöntemiyle herhangi bir alaşım bileşimini inceleyerek değerli alaşımlar bulmak oldukça zordur (Ye vd., 2016; Y. Zhang vd., 2014). Bir alaşımın bileşen sayısı arttıkça, faz diyagramı oluşturmak giderek karmaşıklaşır. Teorik modellemenin yanı sıra (Takeuchi vd., 2013; Ye vd., 2015), yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) hesaplamaları gibi hesaplamalı yöntemle (Kohn ve Sham, 1965) de bu sistemleri analiz etmek için kullanılır. Simülasyonlar, YEA'larda faz oluşumunu incelemek için kullanılır. YEA'larda entropi katkılarına dair anlama, gelişimleri için temeldir (Y. Zhang vd., 2014). CrMnFeCoNi, iyi bilinen bir YEA örneğidir, ancak tüm sıcaklıklarda tek fazlı olarak termodinamik açıdan kararlı değildir. Tek bir HMK katı çözeltisi olarak işlenebilse de, bu durumda test edildiğinde ilgi çekici özellikler gösterir (Pickering ve Jones, 2016).

Ayrı çözünen atomlar tarafından engellenen bir matris içindeki dislokasyonları düşünmek yerine, ortalama bir etki direnci oluşturan etkili bir ortamdan geçiyor olabilecekleri önerilmiştir. Bu nedenle, Wu ve arkadaşları (Zhenggang Wu vd., 2014), CrMnFeCoNi'deki dislokasyon aralığı üzerindeki sıcaklık etkisinin, termal aktivasyon olan akma modeli davranışı ile açıklandığını bildirmiştir.

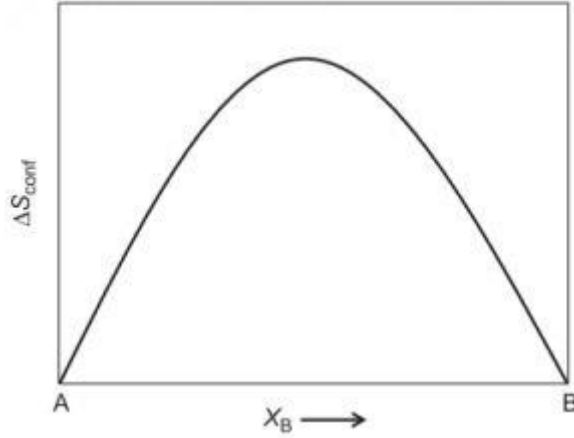
1.2. Yüksek Entropili Alaşımlar Kavramı

İkili alaşım sistemlerinde çözücü ve çözen atomların kuarlları Hume-Rotary ile belirlenmektedir. Bu kurallar dört tanedir:

1. Metal atomlarının yarıçapları farklı %15'ten büyük olmamalıdır.
2. Metaller aynı kristal yapıya sahip olmalıdır.
3. Metal atomları aynı valansa sahip olmalıdır.
4. Metal atomları yaklaşık aynı elektronegatifliğe sahip olmalıdır.

Bu kurallar aynı zamanda farklı elementler arasındaki etkileşimi de etkilemektedir, dolayısıyla karışım entalpisini negatif (düzenlemeye ve metaller arası bileşikler oluşumuna yol açar), pozitif (ayrışmaya ve kümelenmeye yol açan itici etken) veya sıfıra yakın (düzensiz katı çözeltilerin oluşumu) olmasına neden olur. Geleneksel alaşım üretimi yöntemlerinden ayrı olarak Cantor ve arkadaşları (Cantor vd., 2004) ve Yeh ve arkadaşları (J. W. Yeh vd.,

2004) birbirlerinden bağımsız olarak eş atomlu veya eş atomlu çok bileşenli alaşımlar hazırlamı fikrini önermişlerdir(3). Yeh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ikili bir konfigürasyonel entropisinin $\Delta S_{conf} = -R(X_A \ln X_A + X_B \ln X_B)$ olarak hesaplamıştır. Buna göre elementler eş atomlu oranlarda olduğunda maksimum olduğu bilinen termodinamik gerçeğe işaret ederek bu alışımları “Yüksek Entropili Alaşımlar” olarak tanımladı (J. W. Yeh vd., 2004)(Şekil 1.2)



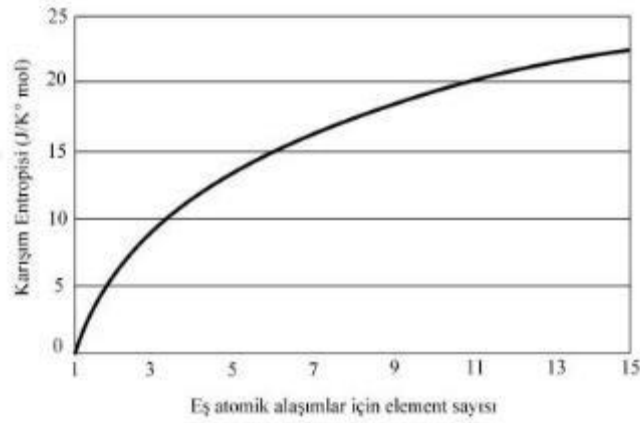
Şekil 1.2. İkili sistem içerisinde eş atomlu bileşimde maksimuma ulaşan konfigürasyonel entropi (B. Murty vd., 2014).

Termodinamik bir sistem şartlar uygun olduğu zaman Gibbs serbest enerjisini (G) düşürme eğilimindedir. Gibbs serbest enerjisi en düşük değeri sistemde dengeyi oluşturur. Aşağıdaki denklemden sistemin serbest enerjisiyle arasındaki denklem verilmiştir:

$$G = H - TS \quad (3)$$

burada G Gibbs serbest enerjisini, S entropiyi ve H entalpiyi göstermektedir.

Herhangi bir sistemdeki maksimum konfigürasyon entropisi $\Delta S_{confmax} = R \ln N$ şeklinde hesaplanır. Bu denkleme göre sistemdeki eleman sayısı (N) arttıkça karışım entropisi artar (Şekil 1.3)



Şekil 1.3. Çözelti halindeki eş atomlu alaşımlar için element sayısının bir fonksiyonu olarak konfigürasyonel entropisi (B. Murty vd., 2014).

1.3. Yüksek Entropili Alaşımlarda Dört Ana Etki

Yüksek entropili alaşımların mekanik, yapısal ve diğer özellikleri birçok faktörden etkilenir. Ana etkenler arasında yüksek entropi etkisi, yavaş difüzyon, şiddetli kafes distorsiyonu ve kokteyl etkisi bulunur (J.-W. J. J. Yeh, 2013; Y. Zhang vd., 2014).

Yüksek entropi etkisi mikro yapıyı basitleştirir ve katı çözelti oluşumu için HMK ve YMK yapıları tercih edilir. Kafes distorsiyonu mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri etkiler. Yavaş difüzyon amorf veya nanokristalin yapıların oluşumunu destekler. Farklı elementler arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan kokteyl etkisi, kompozit benzeri bir davranış oluşturur. Bu faktörler birlikte HEA'ların çeşitli özelliklerine ve geniş uygulama alanlarına katkıda bulunur (Yong Zhang ve Zhang, 2019).

1.3.1. Yüksek Entropi Etkisi

Yüksek entropi etkisi, yüksek entropili alaşımlarda basit katı çözelti fazlarının oluşumunu tetikleyen ve onları geleneksel alaşımlardan ayıran birincil faktördür (B. S. Murty vd., 2019). Bu fenomen, YEA'larla ilişkili artan konfigürasyonel entropi (S_{conf}) nedeniyle ortaya çıkar ve katı çözeltilerin serbest enerjisini düşürerek, özellikle yüksek sıcaklıklarda kararlılıklarını artırır. Bileşen elementlerin çözünürlüğü arttıkça, alaşım içinde birden fazla faz oluşma olasılığı azalır.

Geleneksel alaşımlarda bulunan intermetalik bileşiklere kıyasla, YEA'lardaki katı çözeltiler önemli ölçüde daha yüksek karışım entropisine sahiptir (Tablo 2). Bu önemli entropi farkı, özellikle yüksek sıcaklıklarda YEA'lardaki katı çözeltilerin olağanüstü kararlılığına katkıda bulunur. Döküm halinde düzenli yapılar mevcut olsa da sıcaklık yükseldikçe düzensiz bir katı çözelti fazına dönüşme eğilimindedirler.

Ancak, yüksek entropi etkisinin baskınlığı, intermetalik bileşiklerin oluşum entalpisi tarafından baskılanabilir. Bu bileşiklerin oluşum entalpisi yeterince yüksekse, entropi stabilizasyonunu aşabilir ve katı çözeltiler yerine intermetalik fazların oluşumuna yol açabilir (M.-H. Tsai ve J.-W. Yeh, 2014).

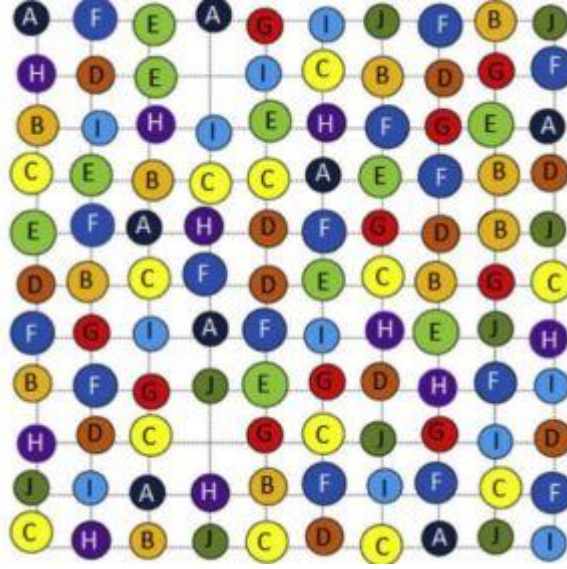
Tablo 2. Elementel fazlar, bileşikler, ara fazlar ve rastgele katı çözeltiler için konfigürasyonel değerler karşılaştırılmıştır(J.-W. J. H.-e. a. f. Yeh ve applications, 2016).

Karşılaştırmalı durumlar	Element Fazları	Bileşikler	Ara fazlar	Rastgele Katı Çözeltiler
ΔH_{mix}	0	Büyük Negatif	Daha Az Büyük Negatif	Orta Negatif
ΔS_{mix}	0	0	Orta Negatif	$-R \sum_i^n X_i \ln(X_i)$
ΔG_{mix}	0	Büyük Negatif	Büyük Negatif	Büyük Negatif

1.3.2. Kafes Distorsiyon Etkisi

Yüksek entropili alaşımların çok bileşenli yapısı, geleneksel tek veya ikili element temelli yapısal modellere kullanma gerekliliğini ortadan kaldırarak, çoklu elementli bir yapısal bakış açısına geçişi zorunlu kılar.

Geleneksel alaşımlardan farklı olarak, YEA'lar benzersiz bir mikro yapısal özelliğe sahiptir: önemli ölçüde distorsiyona uğramış bir kafes. Bu distorsiyon, alaşım matrisi içinde birden fazla elementin tamamen çözünmesi sonucunda farklı atomik yarıçaplara sahip atomların komşu haline gelmesiyle ortaya çıkar. Sonuç olarak, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, birden fazla element ve boşluktan oluşan distorsiyona uğramış bir kafese sahip bir katı çözelti görülebilir (Ng vd., 2012; Senkov vd., 2010).



Şekil 1.4. Bir katı çözeltinin 10 farklı birincil element ve iki boşluk içeren deforme olmuş kafesi (M.-H. Tsai ve J.-W. J. M. R. L. Yeh, 2014)

Bileşen elementlerin bağlanma enerjilerindeki, kristal yapılarındaki ve atomik yarıçaplarındaki farklılıklar, kafes distorsiyonunu daha da artırır. Senkov vd. (Senkov vd., 2010) tarafından yapılan araştırma, kafes distorsiyonu ile mekanik özellikler arasındaki korelasyonu vurgular. Örneğin, YMK yapıya sahip FeCoCrNiMn eş atomlu YEA, karışım kuralı tahminlerine yakın bir sertlik gösterirken, HMK yapıya sahip MoNbTaVW eş atomlu refrakter YEA, 1596 MPa'lık tahmini değerin yaklaşık üç katı olan 5250 MPa'lık çok daha belirgin bir sertlik artışı göstermiştir. Bu bulgular, katı çözelti sertleşmesi ile kafes distorsiyonu arasındaki ilişkinin YMK alaşımlara kıyasla HMK kristal yapıları alaşımlarda daha güçlü olduğunu göstermektedir.

1.3.3. Yavaş Difüzyon Etkisi

Difüzyon, atomların sıcaklık etkisiyle yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Saf metallerde, homojen atomik çevre nedeniyle atomların hareketliliği nispeten yüksektir. Atomik düzenin karmaşıklığı arttıkça, bu hareketlilik azalır. Ancak, yüksek entropili alaşımlar, hem saf metaller hem de geleneksel alaşımlara kıyasla difüzyon hızlarında belirgin bir düşüş gösterir (Gao, Zhang, vd., 2016).

YEA'larda yavaş difüzyon fenomeni, benzersiz mikro yapısal özellikleriyle yakından ilişkilidir. Atomik difüzyon yoluyla elementlerin yeniden dağılımına bağlı olan faz dönüşümleri, YEA'larda önemli ölçüde engellenir. Bu, öncelikle bu alaşımların karakteristik

özelliği olan şiddetli kafes distorsiyonundan kaynaklanır. Bozulmuş kafes, atomların difüzyonel sıçramaları için farklı aktivasyon enerjileri yaşadığı enerjetik olarak heterojen bir ortam oluşturur (Yong Zhang ve Zhang, 2019). Sonuç olarak, atomik hareketlilik önemli ölçüde azalır, uzun menzilli difüzyon ve faz dönüşümleri engellenir.

Ayrıca, YEA'lardaki karmaşık atomik düzen, çok çeşitli yerel atomik konfigürasyonlara yol açar. Bu heterojenlik, farklı kafes noktalarında bağ kuvvetlerinde ve atomik bağlanma enerjilerinde farklılıklara neden olur. Sonuç olarak, atomlar düşük enerjili konfigürasyonlarda sıkışma eğilimindedir ve atomik sıçramalar için enerji bariyerlerini aşmak için önemli bir enerji girişi gerektirir. Tersine, yüksek enerjili noktaları işgal eden atomlar, orijinal konumlarına geri dönme eğilimi daha yüksektir ve net atomik akıyı daha da engeller. Bu birleşik faktörler, YEA'larda gözlenen genel yavaş difüzyon davranışına katkıda bulunur (M.-H. Tsai ve J.-W. J. M. R. L. Yeh, 2014).

YEA'lardaki düşük difüzyon hızları, işlemleri, mikro yapı evrimi ve mekanik özellikleri için önemli sonuçlara sahiptir. Örneğin, katılaşma sırasında faz dönüşümlerinin bastırılması, nanoyapılı fazlar da dahil olmak üzere metastabil mikro yapıların oluşumuna yol açabilir ve bu da YEA'ların mekanik performansını artırabilir. Bununla birlikte, yavaş difüzyon, çökeltme sertleşmesi gibi bazı güçlendirme mekanizmalarının kinetiğini de sınırlayabilir ve böylece genel alaşım özelliklerini etkileyebilir (Ye vd., 2016). Bu nedenle, YEA'lardaki difüzyon davranışını anlamak, mikro yapıları uyarlamak ve belirli uygulamalar için performanslarını optimize etmek için çok önemlidir.

Yüksek entropili alaşımlarda farklı elementlerin difüzyon hızları arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bazı elementler belirgin şekilde daha düşük hareketliliğe sahip olup, boş kafes noktalarını işgal etme kabiliyetleri sınırlıdır. Bu difüzyon hızlarındaki farklılık, istenen bileşim değişikliklerini elde etmek için kordineli atomik hareket gerektiren faz dönüşümleri sırasında kritik hale gelir. Örneğin, yeni bir fazın çekirdeklenmesi ve büyümesi, istenen bileşime ulaşmak için elementlerin hassas bir şekilde yeniden dağılımını gerektirirken, tane büyümesi tüm elementlerin tane sınırlarından başarılı bir şekilde birleşmesini ve taşınmasını gerektirir. Bu nedenle, bazı elementlerin yavaş hareketliliği bu süreçlerde hız sınırlayıcı bir adım olarak hareket eder. Tablo 3'de, farklı matrislerde nikel atomunun difüzyon parametrelerini karşılaştırmaktadır.

Tablo 3. Farklı HMK matrislerinde nikel için difüzyon parametreleri. (M.-H. Tsai ve J.-W. J. M. R. L. Yeh, 2014)

Çözünen	Alaşıım Sistemi	D_0 ($10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)	Q (kJ/mol)	T_m (K)	Q/ T_m	D_{T_m} ($10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)
Ni	CoCrFeMnNi	19.7	317.5	1607	1.1975	0.95
	Fe-15Cr-20Ni-Si	4.8	310	1705	0.1818	1.53
	YMK Fe	3	314	1812	0.1733	2.66
	Co	0.43	282.2	1768	0.1596	1.98
	Ni	1.77	285.3	1728	0.1651	4.21
	Fe-15Cr-20Ni	1.5	300	1731	0.1733	1.33

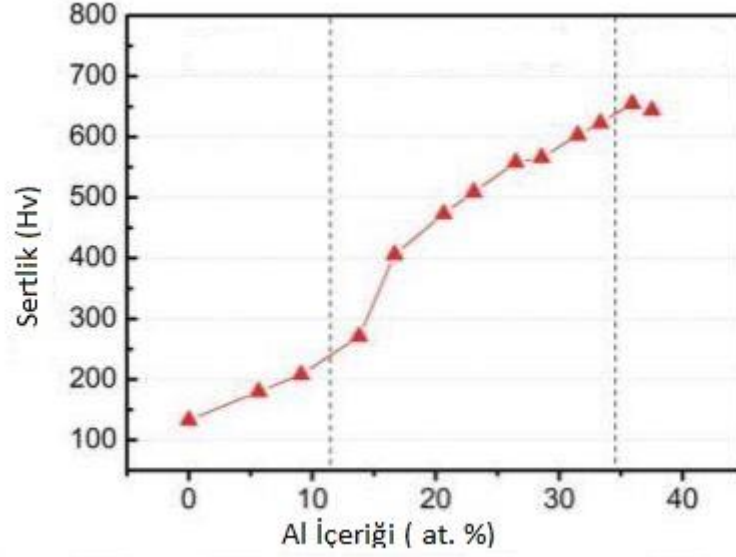
1.3.4. Kokteyl Etkisi

Kokteyl etkisi, yüksek entropili alaşımların tek tek bileşenlerinin özelliklerini aşan özelliklere sahip olma yeteneğini ifade eder. Alaşıım elementlerinin özellikleri, YEA'nın genel özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Alaşıım bileşimini manipüle ederek, kokteyl etkisi yoluyla alaşıımın özelliklerini ince ayar yapmak mümkündür. Bununla birlikte, sadece elementlerin bireysel özelliklerini değil, aynı zamanda alaşıım içindeki etkileşimlerini de göz önünde bulundurmak önemlidir (Miracle vd., 2014; Y. Zhang vd., 2014).

Yüksek entropili alaşımlarda kokteyl etkisi, alaşıımın bileşimi, kristal yapısı, kafes bozulması ve mikro yapısı arasındaki karmaşık etkileşimden kaynaklanır. Geleneksel alaşıımlardan farklı olarak, YEA'lar basitçe bileşen elementlerinin özelliklerinin toplamı olarak anlaşılamaz. Bunun yerine, bu faktörlerin kombinasyonu benzersiz özellikler yaratır. Örneğin, hafif elementlerin eklenmesi alaşıım yoğunluğunu düşürürken, refrakter elementler erime noktasını yükseltir. Benzer şekilde, Al, Cr veya Si gibi elementlerin eklenmesi oksidasyon direncini artırabilir (Cheng vd., 2017).

YEA'ların özellikleri, sadece bileşen elementlerin bireysel özelliklerine göre belirlenmez. Bu elementler arasındaki etkileşimler, alaşıımın genel davranışını önemli ölçüde etkiler. Örneğin, alüminyum (Al) tipik olarak yumuşak ve düşük erime noktasına sahip bir elementtir. Fakat bir YEA'ya eklendiğinde, beklenmedik şekilde sertliği artırabilir. Bu olgu, Şekil 1.5'te $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ alaşıımları için gösterilmiştir ve büyük atomik boyutu nedeniyle alüminyum ile diğer elementler arasındaki güçlü bağlanma etkileşimleri ve sert HMK fazının

oluşumuna atfedilmektedir. Sonuç olarak, YEA'ların özellikleri, elementsel özellikler, elementler arası etkileşimler ve ortaya çıkan mikro yapısal özelliklerin karmaşık bir etkileşimidir (M.-H. Tsai ve J.-W. J. M. R. L. Yeh, 2014).



Şekil 1.5. $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ 'nin sertliğinin Al içeriğinin değişimi ile değişimi (Mishra vd., 2019)

1.4. Yüksek Entropili Alaşımların Tasarımı

Yüksek entropili alaşımlarının geniş kompozisyon aralığı, çok çeşitli özelliklere sahip yeni malzemeler tasarlamada muazzam bir fırsat sunar. Ancak bu aynı zamanda önemli bir zorluğu da beraberinde getirir: Bu geniş kompozisyonlardan istenen özelliklere sahip YEA'ları tanımlamak. Araştırmacılar, bu zorluğu aşmak ve YEA'ların davranışlarını tahmin etmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemler ampirik yaklaşımları, termodinamik modellemeyi ve atomistik simülasyonları kapsar. Ampirik yaklaşımlar, alaşım tasarımına rehberlik etmek için yerleşik eğilimlere ve gözlemlere dayanır. Termodinamik modelleme, bir YEA'nın kompozisyonuna bağlı olarak farklı fazların kararlılığını temel ilkelerden yararlanarak tahmin eder. Son olarak, atomistik simülasyonlar, YEA kafes içindeki tek tek atomların davranışlarını modeller, mikro yapı evrimi ve mekanik özellikler hakkında ayrıntılı bilgi sağlamayı amaçlar. Araştırmacılar, bu birleşik yaklaşımları kullanarak, belirli uygulamalar için YEA'ların keşfini ve optimizasyonunu hızlandırabilir.

1.4.1. Ampirik Hesaplama Yöntemi

Bu bölümde, yüksek entropili alaşımlarda (HEA'larda) katı çözelti oluşum koşullarını tanımlamak için kullanılan kritik termodinamik parametreler ele alınmıştır. Bu parametreler arasında, ΔS_{mix} (karışma entropisi) ve ΔH_{mix} (karışma entalpisi), çok bileşenli bir sistemde katı çözelti oluşumunu tahmin etmede hayati önem taşır. Yang ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yapılan bir çalışmada, bu parametrelere ek olarak yeni bir parametre olan Ω tanımlanmıştır (X. Yang vd., 2012). Bu yeni tanımlanan Ω parametresi, çalışmada çok bileşenli alaşımlarda faz oluşum olasılığını tahmin etmek için kullanılmıştır.

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{|\Delta H_{mix}|} \quad (4)$$

Denklemin içindeki " T_m " terimi önemlidir çünkü entropi kavramının uygulandığı alaşımlar, erime sıcaklığına yakın fazlar oluştururlar. Bu terim, karışım kuralına göre hesaplanır.

$$T_m = \sum_{i=1}^n C_i(T_m) i \quad (5)$$

Temel termodinamik kriterlerin ötesinde, Ω parametresi, çok bileşenli alaşım sistemlerinde katı çözelti oluşumunu tahmin etmek için kritik bir gösterge olarak hizmet eder. Ω 'nın 1'den büyük olması, alaşım mikro yapısında bir katı çözelti fazının gelişme olasılığının yüksek olduğunu gösterir. Öte yandan, Ω 'nın 1'e eşit veya daha küçük olması, intermetalik fazların oluşma eğilimini gösterir. Bu ampirik Ω parametresi YEA'ların tasarımında önemli bir rol oynar (Yao vd., 2016; Zheng vd., 2019).

1.4.2. Atomistik Yaklaşımlar

Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi'nden (DFT) faydalanan Ab-initio Moleküler Dinamikler (AIMD), geleneksel moleküler dinamik simülasyonları ile elektronik yapı hesaplamaları arasındaki boşluğu dolduran güçlü bir yöntemdir. Bu yöntem, DFT çerçevesinde katı ve moleküllerin enerji hesaplamalarına dayanarak, bir malzemenin

elektronik yapısını hesaplamayı ve aynı anda atomların hareketlerini simüle etmeyi mümkün kılar.

AIMD simülasyonları, araştırmacılar için temel bir araç olup, genellikle deneylerden önce bir ön çalışma olarak kullanılır. Geniş bir sıcaklık aralığında çeşitli malzeme özelliklerini incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellikler, bir malzemenin termodinamik özelliklerini, atomik yapısını, dinamiklerini, optimal geometrilerini, elektronik bant yapılarını, toplam enerjilerini ve hatta manyetizasyonunu kapsar (Kresse ve Hafner, 1993; G. Lin vd., 2021).

AIMD simülasyonlarının benzersiz avantajlarından biri de yüksek entropili alaşımlarının geniş bileşim uzayını keşfetme yeteneğidir. Örneğin, Gao ve arkadaşları çalışmasında, belirli yüksek entropili alaşımlarının araştırılmasında ilk adım olarak AIMD simülasyonlarını kullanmıştır (Gao ve Alman, 2013).

1.4.3. Thermo-Calc Yazılımı

Thermo-Calc yazılımı, malzemenin bileşimi, yapısı ve özelliklerini tahmin etmek için kullanılan hesaplamalı bir yöntemdir. Bu yöntem, CALPHAD yöntemine dayanır. Hesaplama, termodinamik ve kinetik prensipleri birleştirilerek gerçekleştirilir. Thermo-Calc'ın veritabanları, alanında uzman malzeme mühendisleri tarafından kapsamlı bilimsel çalışmalar, deneysel veriler ve teorik bilgiler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu veritabanları sayesinde malzemenin bileşimi, mikro yapısı ve genel özellikleri tahmin edilebilir. CALPHAD yöntemi, yüksek entropi alaşımlarının faz yapısı, bileşimi ve mikro yapısı hakkında önemli bilgiler elde etmek için kullanılan bir diğer değerli araçtır. Bu yaklaşım, mevcut ikili ve üçlü denge diyagramlarına dayalı termodinamik ekstrapolasyonları kullanır. Böylece CALPHAD, dörtlü, beşli veya hatta daha yüksek düzeyli dengeleri kapsayan daha fazla bileşenli YEA sistemlerindeki fazların tahmin edilmesini sağlar (F. Zhang vd., 2014).

Çok bileşenli sistemler için termodinamik hesaplamalar ve faz diyagramları oluşturmada günümüzde yaygın olarak kullanılan bilgisayar yazılımları CALPHAD yöntemini kullanır. Bu yaklaşım, bir sistemdeki çeşitli fazların termodinamik fonksiyonlarının matematiksel tanımına dayanır ve Gibbs serbest enerjisini minimize etmeyi amaçlar. Her fazın toplam serbest enerjisini hesaplamak için yöntem, saf bileşenlerin serbest enerjisini, ideal karışım katkısını ve katı çözelti fazlasının serbest enerjisini birleştirir. CALPHAD yöntemi, karmaşık kimyasal bileşimlere sahip malzemeler için faz dengelerini

doğru bir şekilde hesaplayabilme yeteneği nedeniyle, geleneksel faz diyagramı oluşturma tekniklerinin yerini büyük ölçüde almıştır. Ancak bu hassasiyet, son derece doğru termodinamik verilere ihtiyaç duyar. Termodinamik özelliklerle ilgili verilerin toplanması, işlenmesi ve doğrulanması ile çeşitli malzemeler (metal alaşımları, cürufur, seramikler, erimiş tuzlar ve sulu çözeltiler dahil) için denge diyagramlarının hesaplanması sorumluluğu, önde gelen araştırma kurumlarındaki ekiplere düşer. SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) veritabanı, termodinamik hesaplamalarda kullanılan ticari yazılımlar için küresel standart haline gelmiştir. Bu tür yazılım paketlerinden biri olan Thermo-Calc, bu hesaplamaları kolaylaştırmak için çeşitli modüller içerir. Bunlar arasında termodinamik veritabanı (TDB) modülü, tablo oluşturma (TAB) modülü, denge hesaplamaları için POLY_3 modülü, Gibbs enerji sistemi (GES) modülü, sonuç işleme için POST modülü ve deneysel veri değerlendirme ve optimizasyon için PARROT modülü bulunur (Zyska vd., 2017).

1.5. Yüksek Entropili Alaşımların Özellikleri

Bu bölümde, yüksek entropili alaşımların başlıca sahip olduğu özellikleri açıklanmış ve bu yeni alaşımlama alanının öneminin gösterilmesi hedeflenmiştir. Listelenen özellikler mekanik, elektriksel, termal, korozyon ve manyetik özelliklerini içerir.

1.5.1. Mekanik Özellikler

Mekanik özellikler, uzama, nihai mukavemet, sertlik, elastik modül, yorulma direnci, sürünme davranışı ve akma dayanımı gibi geniş bir özellik yelpazesini kapsar. Bu özellikler, malzemelerin çeşitli yapısal uygulamalar için uygunluğunu belirlemede kritik öneme sahiptir. Geleneksel alaşımlar ile yüksek entropili alaşımları karşılaştırırken, mekanik özelliklerin incelenmesi özellikle önem kazanır. Bu araştırma, YEA'ların geleneksel alaşımlardan daha iyi performans gösterebileceği potansiyel uygulamaları belirlemek açısından hayati önem taşır. Malzemelerin mekanik özellikleri büyük ölçüde mikroyapıları ve kompozisyonları tarafından etkilenir (B. S. Murty vd., 2019). Örneğin, elastik özellikler atomik etkileşimler ve dislokasyon davranışı tarafından belirlenir. Bir alaşımdaki elementlerin oranı, mevcut fazları ve bunların hacim fraksiyonlarını tanımlar; bu da kendi içsel özellikleri aracılığıyla malzemenin genel özelliklerini etkiler. Mikroyapısal unsurlar,

bir malzemenin mekanik davranışını şekillendirmede kritik bir rol oynar. Bunlar, boşluklar ve dislokasyonlar gibi atomik ölçekli kusurları ve ayrıca tane sınırları, gözenekler, çatlaklar, kimyasal ayrışma ve kalıntı gerilmeler gibi daha büyük ölçekli özellikleri içerir. Bu faktörleri anlamak, mekanik özelliklerin kapsamlı bir şekilde kavranması için esastır. Mekanik özellikleri etkili bir şekilde incelemek için bilim insanları, çeşitli karakterizasyon teknikleri aracılığıyla mikroyapıları dikkatle incelemelidir. Termal veya termo-mekanik işlemler genellikle malzemelerde mukavemet ve süneklik arasındaki dengeyi optimize etmek için kullanılır. Özetle, özellikle YEA'lar bağlamında mekanik özelliklerin incelenmesi, kompozisyon, mikroyapı ve işleme süreçlerinin karmaşık bir etkileşimini içerir (Miracle ve Senkov, 2017). Bu araştırma, belirli uygulamalar için gelişmiş performansla sahip malzemeler geliştirmek açısından çok önemlidir.

Alaşımlarda çeşitli atomik bileşenlerin kombinasyonu, ikincil fazların oluşumuna yol açabilir ve bu da çökelme sertleşmesine katkıda bulunur. Bu olgu, YEA'lar üzerine yapılan birçok çalışmada gözlemlenmiştir. Örneğin, Li ve arkadaşları on farklı alaşım sistemini incelemiş ve daha büyük atom boyutlarına sahip Zr ve Ti ile katkılamanın 566 HV ile en yüksek sertliği sağladığını bulmuşlardır. Bu artan sertlik, ikincil fazların çökmesine atfedilmiştir (Li vd., 2017). Başka bir çalışmada, Ma ve Zhang AlCoCrFeNb_xNi alaşım sistemine Nb ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Nb içeriğini $x = 0$ ile 0.5 aralığında değiştirmenin sertlikte önemli bir artışa, 500 HV'den 750 HV'ye yükselmeye yol açtığını keşfetmişlerdir (S. Ma vd., 2012). Razuan ve arkadaşları tarafından 2013 yılında yapılan daha ileri bir araştırma, bu alaşımlara hem Ti hem de Nb eklemenin birleşik etkisini incelemiştir. Bulguları, sertlikte daha da önemli bir artış olduğunu, 797 HV'ye ulaştığını ortaya koymuştur. Bu değer, Ti veya Nb'un tek başına eklendiği durumlara göre önemli ölçüde daha yüksekti (Razuan vd., 2013). Bu çalışmalar toplu olarak, alaşım elementlerinin dikkatli seçimi ve kombinasyonu yoluyla, özellikle ikincil fazların oluşumunu teşvik eden ve çökelme sertleşmesine katkıda bulunan elementlerle, YEA'ların mekanik özelliklerinin uyarlanabilme potansiyelini göstermektedir.

Mevcut YEA'ların analizi, mikroyapısal inceleme ve mekanizma temelli tasarım ilkelerini içeren sistematik bir kompozisyonel yaklaşımla en iyi şekilde yapılmaktadır. Bu metodoloji, çelik ve alüminyum alaşımları gibi geleneksel yük taşıyıcı malzemelerle paralellik gösterir. Bu malzemelerde, karşılaştıkları sıcaklık ve gerilme-gerinim yoğunluğuna göre özel güçlendirme teknikleri kullanırlar (George vd., 2019). YEA'lardaki mekanik özellikler alanı, bilim camiasında önemli bir ilgi ve tartışma konusu olmuş, bu da

kapsamlı bir literatürün oluşmasına yol açmıştır. Bu genel bakış, konuya özlü bir giriş sağlarken, bu karmaşık konunun sadece yüzeyini çizdiğini belirtmek önemlidir. YEA'ların mekanik özellikleri hakkında daha kapsamlı bilgi için, mikroyapısal etkileri, güçlendirme mekanizmalarını ve performans özelliklerini içeren detaylı tartışmalar içeren zengin bir kaynak yelpazesi mevcuttur.

YEA'ların geleneksel alaşımlarla karşılaştırıldığında sunduğu potansiyel avantajlar, bu alandaki araştırmaların hızla ilerlemesine neden olmuştur. Mikroyapı, kompozisyon ve işleme süreçlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin anlaşılması, gelecekteki malzeme tasarımı ve optimizasyonu için kritik öneme sahiptir. Çökelme sertleşmesi ve ikincil faz oluşumu gibi mekanizmaların YEA'ların performansını nasıl etkilediğine dair artan bilgi birikimi, bu alaşımların özel uygulamalar için özelleştirilmiş tasarımına olanak sağlamaktadır. Gelecekte, sistematik kompozisyonel yaklaşımlar ve mekanizma temelli tasarım ilkeleri, YEA'ların potansiyelini daha da açığa çıkararak, yeni nesil yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesine öncülük edecektir. Bu alandaki sürekli araştırma ve geliştirme çabaları, malzeme bilimi ve mühendisliğinde yeni ufuklar açmaya devam edecektir.

1.5.2. Elektriksel Özellikler

Elektriksel direnç, yüksek entropili alaşımların önemli bir özelliğidir ve bu konudaki çalışmalar 2009'da Chou ve arkadaşları tarafından başlatılmıştır. Araştırmacılar, $Al_xCoCrFeNi$ alaşımlarında Al oranını 0'dan 2'ye kadar artırarak, özellikle güçlü HMK yapısı ve daha büyük atom boyutu nedeniyle Al'nin etkisine odaklanmışlardır (Chou vd., 2009). $Al_xCoCrFeNi$ alaşımında sıcaklığa bağlı olarak direnç değişimleri gözlemlenmiştir. Döküm metoduyla üretilen YEA'ların elektriksel direnci genellikle 100 ile 220 $\mu\Omega/cm$ arasında değişmektedir (Kao vd., 2011). Geleneksel alaşımlarda olduğu gibi, $Al_xCoCrFeNi$ alaşımlarının direnci de sıcaklık artışıyla yükselmektedir. Sıcaklık-direnç grafiğinin eğimi, sıcaklık katsayısı direncini (TCR) verir ve bu değer genellikle geleneksel alaşımlardan bir miktar daha düşüktür (Tsai, 2013).

Mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda YEA'ların direnç seviyesi, geleneksel alaşımlara (1100 $\mu\Omega/cm$) kıyasla yüksektir. Bu yüksek elektriksel direnç, aşırı kafes distorsiyonlarından kaynaklanabilir. Elektriksel iletkenlik, tek fazlı bölgelerde artan Al miktarıyla (x) azalır ve çift fazlı bölgede daha düşüktür (Chou vd., 2009). Bu durum, Al miktarının artmasıyla oluşan

aşırı kafes distorsiyonu ve elektron saçılması teorisi ile açıklanabilir. YMK ve HMK fazları arasındaki arayüzey, elektron saçılmasını azaltır. Karşılaştırmalı olarak, HMK fazı YMK fazına göre daha iletkenidir.

$\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşım sistemi üzerinde yapılan çalışmalar, kompozisyon ve sıcaklığın elektriksel direnç üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. YEA'ların geleneksel alaşımlara kıyasla gösterdiği farklı elektriksel davranışlar, özellikle yüksek direnç seviyeleri ve düşük sıcaklık katsayısı direnci, bu malzemelerin benzersiz mikroyapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kafes distorsiyonları, faz geçişleri ve elektron saçılma mekanizmaları, YEA'ların elektriksel özelliklerini şekillendiren temel faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu bilgiler, YEA'ların elektriksel uygulamalarda kullanımı için yeni fırsatlar sunmakta ve gelecekteki malzeme tasarımları için yol gösterici olmaktadır. İlerleyen araştırmalar, YEA'ların elektriksel özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını ve optimize edilmesini sağlayarak, bu alaşımların elektronik ve enerji sektörlerindeki potansiyel uygulamalarını genişletecektir.

1.5.3. Termal Özellikler

Birçok araştırmacı, $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ve $\text{Al}_x\text{CrFe}_{1.5}\text{MnNi}_{0.5}\text{Mo}_y$ gibi alaşımlar üzerinde çalışarak termal iletkenlik veya yayılımı incelemiştir. Yüksek entropili alaşımlarda termal iletkenlik (κ), sıcaklık artışıyla birlikte metal alaşımlarına benzer şekilde değişir. Sıcaklık arttıkça, elektronların kafes fononlarıyla çarpışma sıklığı artar ve bu durum, saf metallere kıyasla daha kısa serbest yol uzunluklarına neden olur (Chou vd., 2009). $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımlarında termal iletkenlik değeri 10 ile 27 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ arasında değişmektedir. Bu değerler, saf metallerden çok daha düşük olmakla birlikte, yüksek alaşımlı çelik veya nikel bazlı süper alaşımlar gibi yüksek alaşımlı geleneksel metallerin seviyelerine yakındır (Ujah vd., 2023). YEA'ların termal iletkenliği, sıcaklık 27°C 'den 300°C 'ye yükseldiğinde bazı değişiklikler gösterir (Chou vd., 2009).

Termal genleşme katsayısı (TGK) verileri $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımları içinde geçerlidir. Al oranı arttıkça, bu alaşımların TGK'sı 8.84×10^{-6} 'dan $11.25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 'e değişir. Bu değişim, Al'nin HMK fazının oluşumuna neden olmasıyla ilişkilidir ve alaşım yapısı YMK'dan HMK'ya geçtiğinde TGK azalır (Tsai, 2013). Birçok YEA, yüksek sıcaklıklarda önemli bir sertlik/mukavemet gösterir ve bu özellik termal yumuşamaya karşı direnç sağlar. Hsu ve arkadaşları, $\text{AlCoCr}_x\text{FeMo}_{0.5}\text{Ni}$ alaşımlarında geçiş sıcaklıklarının üzerinde, yüksek sıcaklıklardaki yumuşama katsayısını sıcaklık-sertlik grafikleriyle incelemiş ve bu değer

geleneksel yüksek sıcaklık alaşımlarından (Inconel-718 ve T-800) daha düşük olduğunu bulmuşlardır (C.-Y. Hsu vd., 2011).

$Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti$ ve $AlCoCr_2FeMo_{0.5}Ni$ gibi alaşımlarda sıcaklık arttıkça sertlik düzenli bir şekilde azalır, ancak bu alaşımlar oda sıcaklığında genellikle yüksek sertliğe sahiptir (IBRAHİM, 2022). YEA'lardaki termal yumuşamaya karşı direncin temel nedeni, yavaş difüzyon olarak görülmektedir. Geçiş sıcaklığının üzerindeki deformasyon süreçleri difüzyon mekanizmaları aracılığıyla gerçekleşir. YEA'lardaki yavaş difüzyon, termal yumuşamayı etkili bir şekilde minimize eder (Hamdi vd., 2023).

$Al_xCoCrFeNi$ ve benzeri alaşım sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar, YEA'ların termal iletkenlik, termal genleşme ve yüksek sıcaklık davranışları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. YEA'ların geleneksel alaşımlara kıyasla gösterdiği düşük termal iletkenlik, değişken termal genleşme katsayıları ve özellikle yüksek sıcaklıklarda sergiledikleri üstün mekanik özellikler, bu malzemelerin benzersiz mikroyapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri termal yumuşamaya karşı direnç, YEA'ları yüksek sıcaklık uygulamaları için cazip kılmaktadır. Bu bulgular, YEA'ların termal özellikleri kontrol edilerek özel uygulamalar için tasarlanabileceğini göstermektedir. Gelecekteki araştırmalar, YEA'ların termal davranışlarının daha derinlemesine anlaşılmasını sağlayarak, bu alaşımların havacılık, enerji ve diğer yüksek teknoloji sektörlerindeki potansiyel uygulamalarını genişletecektir. YEA'ların termal özelliklerinin optimizasyonu, gelecekte daha verimli ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine öncülük edecektir.

1.5.4. Korozyon Özellikleri

Herhangi bir malzemenin korozyon davranışını incelemek için, potansiyodinamik polarizasyon testi adı verilen standart bir elektrokimyasal süreç kullanılır (Shi vd., 2017). Yüksek entropili alaşımlar genellikle NaCl ve H_2SO_4 çözeltilerinde korozyon direnci açısından test edilmiştir. YEA'lar, 304-SS ve 304L-SS paslanmaz çeliklerine kıyasla her iki çözeltide de daha yüksek korozyon özelliği ve güçlü çukurcuk korozyonu direnci göstermiştir (YY Chen vd., 2005). Alaşım bileşimleri ve mikroyapıları, özellikle korozyona dirençli elementlerin (örneğin Cr) miktarı ve dağılımı ile galvanik korozyona katılım, korozyon davranışını etkileyen temel faktörlerdir. İncelenen alaşımların çoğu Fe, Co, Ni ve Cr bazlıdır.

NaCl çözeltilerindeki korozyona bakıldığında tek fazlı Co-Cr-Fe-Ni alaşımı, bu çözeltilerde 304L-SS'den önemli ölçüde daha iyi korozyon direnci göstermiştir (Y.-J. Hsu vd., 2005). Bu durumun arkasındaki faktör, yüksek miktarda Ni ve Cr içeriğidir. Cu ilavesi, Cu açısından zengin ve interdendritik faz oluşumuna neden olarak galvanik korozyona yol açar ve korozyon direncini önemli ölçüde düşürür. Yüksek sıcaklıkta yapılan ısıtıl işlemlerle Cu açısından zengin fazın oranını azaltarak korozyon direnci iyileştirilebilir. Ayrıca, $Al_xCrFe_{1.5}MnNi_{0.5}$ alaşımlarında Al oranının artması korozyon direncini olumsuz etkiler. Bu durum, NaCl çözeltisinde Al'nin çukurcuk potansiyelini düşürür ve bu alaşımların çukurcuk/lokalize korozyon bölgesini genişletir (Lee vd., 2008).

H_2SO_4 çözeltilerindeki korozyon davranışı, YEA'lar için önemli bir araştırma konusudur. Bu tür çözeltilerde, CoCrFeNi alaşımı özellikle dikkat çekici bir korozyon direnci göstermiştir. Bu alaşımın performansı, yaygın olarak kullanılan 304-SS paslanmaz çeliğine kıyasla oldukça üstündür (Kao vd., 2010). Ancak, Co-Cr-Fe-Ni alaşımına Cu eklenmesi, korozyon özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bu durum, Cu açısından zengin fazın oluşması ve bu fazın NaCl çözeltisindeki benzer bir davranış sergilemesi ile açıklanabilir. Sonuç olarak, pasif bölgenin genişliği sınırlanır (YY Chen vd., 2005). Benzer şekilde, Al ilaveleri de korozyon direnci açısından riskli ve zararlı olabilir. Al eklenmesi, alaşımda hem YMK hem de HMK/B2 fazlarının oluşmasına neden olur. Bu durumda, Al ve Ni açısından zengin bölgelerde YMK/B2 fazının seçici olarak çözünmesi gözlenir (Lee vd., 2008).

Sonuç olarak, yüksek entropili alaşımların korozyon davranışı, bileşim ve mikroyapı gibi faktörlere büyük ölçüde bağlıdır. NaCl ve H_2SO_4 çözeltilerinde yapılan testler, bu alaşımların geleneksel paslanmaz çeliklere kıyasla genellikle daha iyi korozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle Cr ve Ni gibi elementlerin yüksek miktarda bulunması, korozyon direncini olumlu yönde etkilerken, Cu ve Al gibi elementlerin eklenmesi bazı durumlarda olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Gelecekteki araştırmalar, element seçimi ve oranlarının optimize edilmesi, ısıtıl işlem yöntemlerinin geliştirilmesi ve mikroyapı kontrolü üzerine yoğunlaşarak, yüksek entropili alaşımların korozyon direncini daha da artırmayı hedeflemelidir. Bu çalışmalar, endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

1.5.5. Manyetik Özellikler

Yüksek entropili alaşımlar, benzersiz mekanik, termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Son araştırmalar, YEA'ların aynı zamanda önemli manyetik özelliklere de sahip olduğunu ortaya koymuştur. Teknolojik gelişmeler nedeniyle yeni manyetik malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. 1980'lerden 2020'lere kadar olan dönemde kalıcı mıknatısların yıllık satış miktarları incelendiğinde, manyetik malzemelere olan talebin yıldan yıla arttığı açıkça görülmektedir. Örneğin, 2020 yılında 16 milyon doların üzerinde satış gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde en yaygın kullanılan güçlü mıknatıslar, nadir toprak (RE) elementi bazlı olanlardır. RE elementlerinin varlığı nedeniyle, endüstride yaygın olarak kullanılan yüksek enerjili mıknatısların üretim maliyeti oldukça yüksektir (Constantinides, 2012). Bu nedenle, yeni manyetik malzemelerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır ve YEA'ların manyetik özelliklerinin araştırılmasına yönelik yoğun çabalar sarf edilmektedir. Son çalışmalar, YEA'ların cezbedici manyetik özelliklerini ortaya koymuş ve bu özellikler nedeniyle bu alaşımlar "Manyetik Yüksek Entropili Alaşımlar" olarak adlandırılmaya başlanmıştır (Chaudhary vd., 2021).

Manyetik alaşımlar genellikle %50'den fazla oranda Fe, Co ve Ni gibi ferromanyetik elementler içerir. FeCoNi gibi ferromanyetik geçiş metallerinden oluşan manyetik alaşımlar genellikle yumuşak manyetik özellikler gösterir (Li vd., 2017). Kulkarni ve arkadaşları, Fe ve Cu'nun AlNiCo alaşımının manyetik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmalarında, Cu ilavesinin alaşımın koersivitesini (H_c) yaklaşık 0 Oe'den 650 Oe'ye ve kalıcı manyetizmasını (M_r) yaklaşık 0 emu/g'den 2.6 emu/g'ye yükselttiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, sadece Fe ilavesinin alaşımın manyetik doyumunu (M_s) 97 emu/g'ye çıkardığını göstermiştir. Araştırmacılar, Cu ve Fe'nin birlikte ilave edilmesiyle AlNiCo alaşımının manyetik özelliklerinin daha da iyileştiğini belirtmişlerdir. Bu durumda, alaşımın manyetik doyumu (M_s) 84 emu/g'ye, koersivitesi (H_c) 162 Oe'ye ve kalıcı manyetizması (M_r) 5.2 emu/g'ye ulaşmıştır (Kulkarni vd., 2018) .

Tablo 4. Cu ve Fe'nin AlNiCo alaşımlarının manyetik özellikleri üzerindeki etkisi (Kulkarni vd., 2018)

Alaşım	M_s (emu/g)	H_c (Oe)	M_r (emu/g)
AlNiCo	Doygun Değil	~ 0	~ 0
AlNiCoCu	5.9	650	2.3
AlNiCoFe	97	~ 0	~ 0
AlNiCoCuFe	84	~ 162	5.3

Sonuç olarak, yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar), manyetik özellikler de dahil olmak üzere geniş bir yelpazede özgün ve arzu edilir özelliklere sahip yeni nesil malzemeler olarak ortaya çıkmaktadır. Nadir toprak elementleri (RE) bazlı mıknatısların yüksek maliyetinin ve sınırlı bulunabilirliğinin bir alternatifi olarak, YEA'lar manyetik alanlarda devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Araştırmacılar, YEA'ların manyetik özelliklerini inceleyerek ve optimize ederek, kalıcı mıknatıslar, sensörler, aktüatörler ve transformatörler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilecek yeni ve gelişmiş manyetik malzemeler geliştirmeye devam etmektedir. Bu alandaki yoğun çalışmalar, gelecekte yeni teknolojilere ve yeniliklere yol açma potansiyeline sahiptir.

1.6. Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Yöntemleri

Yüksek Entropili Alaşımların üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu alaşımlar döküm, toz metalurjisi ve ince film gibi farklı formlarda sentezlenebilmektedir. Üretim süreçleri temel olarak üç ana kategoriye ayrılır: ergitme ve döküm, toz metalurjisi yöntemleri ve biriktirme teknikleri (Gao, Yeh, vd., 2016; B. S. Murty vd., 2019). Ergitme ve döküm teknikleri hem dengeli hem de dengesiz soğutma koşullarında çeşitli YEA'ların üretiminde kullanılır. Bu alanda en yaygın kullanılan yöntemler vakum ark ergitme ve vakum indüksiyon ergitmedir. Bu yöntemler, farklı soğutma hızları ve koşulları altında çeşitli mikroyapı ve özelliklere sahip YEA'ların üretilmesine olanak tanır.

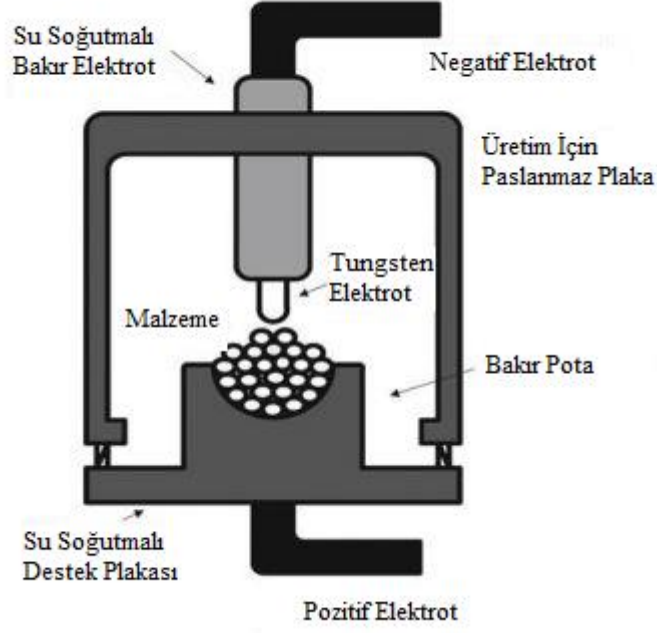
Toz metalurjisi alanında, mekanik alaşımlama ve sonrasında uygulanan sinterleme işlemi, YEA'ların katı hal üretiminde başlıca yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle yüksek erime noktasına sahip elementlerin alaşımlanmasında ve nano yapıları malzemelerin üretiminde avantajlar sağlar. Yüzey modifikasyon teknikleri arasında yer alan

püskürtme, plazma nitrürleme ve kaplama yöntemleri, çeşitli alt tabakalar üzerinde YEA ince filmlerinin üretilmesinde kullanılır (B. S. Murty vd., 2019). Bu teknikler, yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve özel uygulamalar için ince film YEA kaplamalarının oluşturulmasında önemli rol oynar.

Bu üretim yöntemleri, YEA'ların çeşitli uygulama alanlarına yönelik olarak farklı form ve özelliklerde üretilmesine imkân tanıyarak, bu yenilikçi malzeme sınıfının gelişimini ve kullanım alanlarının genişlemesini sağlamaktadır.

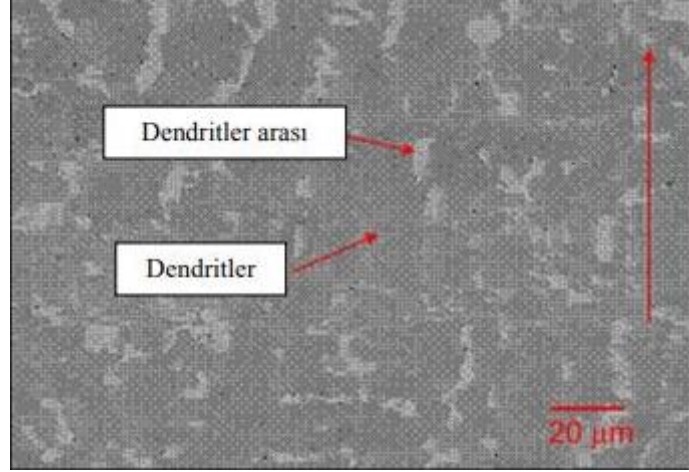
1.6.1. Ergitme ve Döküm Yöntemleri

Yüksek Entropili Alaşımların üretiminde en yaygın kullanılan yöntem ergitme ve döküm tekniğidir. Literatürdeki çalışmaların yaklaşık %75'inin bu yöntemi kullandığı görülmektedir. Ergitme yöntemleri arasında ise vakum ark ergitme öne çıkmaktadır. Vakum ark ergitme yönteminin en büyük avantajı, 3000°C'ye kadar ulaşabilen yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesidir. Bu özellik, çok yüksek ergime noktasına sahip metallerin bile işlenebilmesine olanak tanır. Ancak yöntemin önemli bir dezavantajı, düşük ergime ve kaynama noktasına sahip bazı metallerin buharlaşma riski taşımasıdır. Bu nedenle, alaşım hazırlama aşamasında kompozisyon kontrolünün titizlikle yapılması gerekmektedir. Düşük ergime ve kaynama noktalı metallerin kullanıldığı durumlarda, indüksiyon ve direnç ısıtma fırınları alternatif yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Bu fırınlar, daha kontrollü bir ısıtma sağlayarak buharlaşma riskini azaltır ve alaşım kompozisyonunun daha hassas bir şekilde korunmasına yardımcı olur. Her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları olduğundan, YEA üretiminde kullanılacak yöntemin seçimi, hedeflenen alaşım kompozisyonuna ve istenen özelliklere göre yapılmalıdır. Bu yaklaşım, YEA'ların çeşitli uygulama alanlarına yönelik olarak optimize edilmiş özelliklerde üretilmesini sağlar (Şekil 1.6) (Gao, Yeh, vd., 2016; B. S. Murty vd., 2019; Y. Zhang vd., 2014).



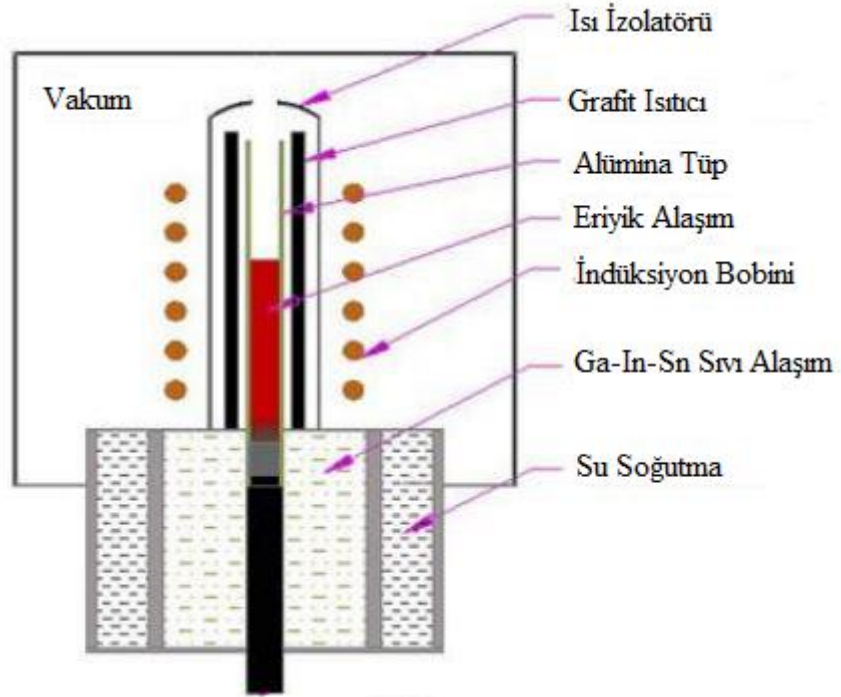
Şekil 1.6. Vakum ark ergitme sistemi şematik gösterimi (Yong Zhang ve Zhang, 2019)

Ergitme ve döküm yönteminde karşılaşılan temel bir sorun, yavaş katılaşma hızı nedeniyle oluşan segregasyon mekanizmalarıdır. Bu durum, heterojen bir mikroyapının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Şekil 1.7’de, ark ergitme ile üretilen bir YEA’nın katılaşma sonrası tipik dendritik ve dendritler arası segregasyonu gösterilmektedir. Benzer dendritik mikroyapılar, indüksiyon ergitme ile üretilen AlCoCrCuFeNi alaşımında da gözlemlenmiştir (Singh vd., 2011). Bu alaşımda, dendritik ve dendritler arası bölgelerin yanı sıra, bir miktar düzenli çökelti fazları (B2 ve L12) da bulunmaktadır. Aynı alaşım yüksek hızda soğutulduğunda, düzenli B2 fazı ile HMK yapı sergilemektedir. Bu durum, hızlı soğutmanın ikincil fazların çökmesini bastırarak tek fazlı alaşımların oluşumuna yol açtığını göstermektedir. Ergitme ve döküm yöntemlerinde daha hızlı soğumayı sağlayan teknikler, benzer şekilde tek fazlı mikroyapıların oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Bu, YEA’larda tek fazlı yapıların elde edilmesinde önemli bir noktadır ve bu yapıların kinetik olarak tercih edilebileceği veya termodinamik olarak stabilize edilebileceği konusunda önemli bir içgörü sağlamaktadır. Bu bulgular, YEA’ların mikroyapı kontrolünde soğutma hızının kritik bir rol oynadığını ve istenilen özelliklere sahip alaşımların üretiminde proses parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Guo vd., 2013; U. Hsu vd., 2007).

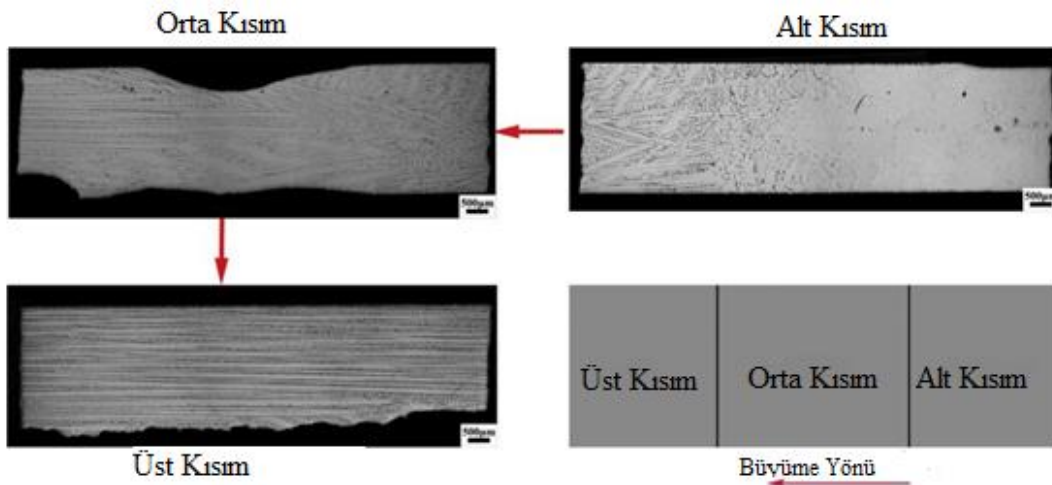


Şekil 1.7. Ark ergitme ile üretilen Al_{0.5}CoCrCuFeNi alaşımasının mikroyapısı (Hemphill vd., 2012)

Bridgman katılaşma yöntemi (Şekil 1.8), diğer adıyla Bridgman-Stockbarger tekniği, sıvı hal üretim yöntemleri arasında önemli bir yer tutar. Bu yöntem, öncelikle tek kristal ingotların üretiminde kullanılmakla birlikte, çok kristalli malzemelerin işlenmesinde de etkilidir. Proses, malzemenin ergime sıcaklığına kadar ısıtılmasını ve ardından konteynerin çekirdek kristalinin bulunduğu uç kısmından başlayarak yavaşça soğutulmasını içerir. Bu süreçte, çekirdek malzemesi ile aynı kristalografik yönlenmeye sahip tek kristal, çekirdek üzerinde gelişmeye başlar ve kademeli olarak hazne boyunca uzayarak şekillenir. Bridgman yöntemi, dikey veya yatay yönde uygulanabilir, bu da farklı geometrilerde ve boyutlarda kristallerin üretilmesine olanak tanır. Özellikle yarı iletken kristallerin üretiminde, Czochralski yönteminin uygulanmasının zor olduğu durumlarda tercih edilen popüler bir tekniktir. Bu yöntem, kontrollü soğutma hızı ve yönlenmiş katılaşma sayesinde, yüksek kaliteli ve homojen yapıda kristallerin elde edilmesini sağlar. Bu özelliği, özellikle elektronik ve optik uygulamalar için kritik öneme sahip malzemelerin üretiminde Bridgman yöntemini değerli kılar (S. Ma vd., 2013; Y. Zhang vd., 2014). Bridgman katılaşma yöntemi, YEA'ların üretiminde de potansiyel bir teknik olarak dikkat çekmektedir. Bu yöntem, YEA'ların mikroyapı kontrolünde ve özelliklerinin optimize edilmesinde yeni fırsatlar sunabilir.



Şekil 1.8. Bridgman katılaşma yöntemi şematik gösterim (S. Ma vd., 2013)

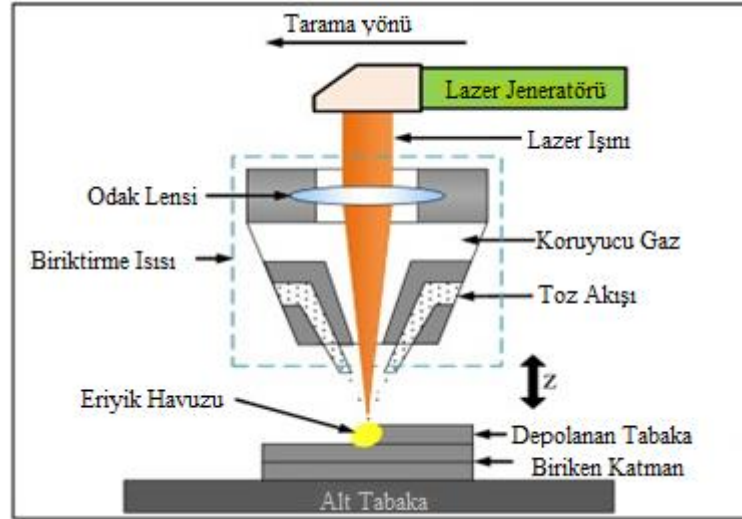


Şekil 1.9. FeCoNiAlSi alaşımlarının Bridgman prosesi ile 200 $\mu\text{m/s}$ çekme hızında hazırlanan numunenin optik mikroyapı evrimi ve kristal büyümesinin şematik diyagramı (Zuo vd., 2015)

Cui ve arkadaşlarının AlCoCrFeNi ve CoCrCuFeNi yüksek entropili alaşımları üzerinde yaptıkları çalışma, Bridgman yöntemi kullanılarak dikey yönlü katılaştırma sürecini incelemiştir. Araştırmacılar, büyüme hızının artmasıyla alaşımların mikroyapısının düzlemselden hücresele doğru evrildiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmanın sonuçları, yönlü katılaştırmanın iri dendritik yapı oluşumuna yol açtığını ve bu süreçte dendritik ve dendritler

arası bölgelerdeki konsantrasyon farkının azaldığını ortaya koymuştur (H. B. Cui vd., 2011). Zhang ve arkadaşlarının AlCoCrFeNi alaşımı üzerinde yaptıkları araştırma ise Bridgman yönteminin mikroyapı üzerindeki etkisini farklı bir açıdan ele almıştır. Geleneksel bakır kalıba döküm yöntemine kıyasla, Bridgman yöntemi ile üretilen alaşımın mikroyapısının dendritik yapıdan eşeksenli yapıya dönüştüğünü tespit etmişlerdir (Y Zhang vd., 2012). Bu çalışmalar, Bridgman yönteminin yüksek entropili alaşımların mikroyapı kontrolünde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Yöntem, büyüme hızı ve soğutma koşulları gibi parametrelerin ayarlanmasıyla, istenilen mikroyapı özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bulgular, YEA'ların üretim süreçlerinin optimize edilmesi ve özelliklerin iyileştirilmesi açısından değerli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, bu araştırmalar Bridgman yönteminin, geleneksel döküm yöntemlerine göre daha kontrollü ve yönlendirilmiş bir mikroyapı oluşumuna imkân tanıdığını vurgulamaktadır. Bu özellik, YEA'ların çeşitli uygulama alanlarında kullanımı için özel olarak tasarlanmış mikroyapıların elde edilmesinde önemli bir avantaj sağlayabilir.

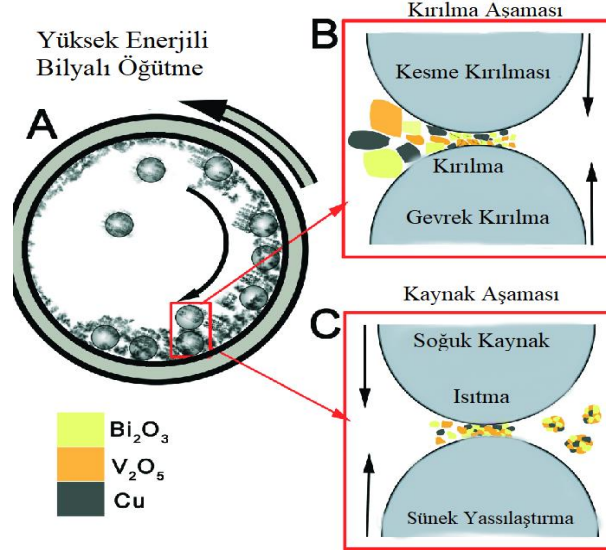
Laser-engineered net shaping (LENS) (Şekil 1.10), kütleli YEA üretiminde kullanılan ileri bir tekniktir. Bu yöntem, güçlü bir lazer demeti kullanarak metal tozlarından, bilgisayar destekli tasarım yardımıyla hızlı ve hassas bir şekilde katı metalik parçalar üretir. Bu teknikte, metal tozu odaklanmış bir lazer ışınına eşeksenli olarak yerleştirilmiş bir biriktirme başlığı aracılığıyla beslenir. İstenilen şekil ve boyutta bileşenler oluşturmak için, X-Y tablası ve birikim kafası çeşitli serbestlik derecelerinde hareket eder. Proses sırasında oluşan metal tozunun ve eriyik havuzun oksidasyonunu önlemek amacıyla koruyucu bir gaz kullanılır. Bu, üretilen parçaların yüksek kalitede ve istenen özelliklerde olmasını sağlar. LENS tekniği, YEA'ların geliştirilmesinde özellikle değişen bileşimlere sahip katmanlı YEA'ların üretiminde kullanılmaya devam etmektedir. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine olanak tanırken, aynı zamanda malzeme kompozisyonunun hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu tekniğin sunduğu avantajlar arasında hızlı prototipleme, düşük malzeme israfı ve yüksek hassasiyet bulunmaktadır. Ayrıca, LENS yöntemi ile üretilen YEA'lar, geleneksel yöntemlerle üretilenlere kıyasla daha ince tane yapısı ve daha homojen bir element dağılımı sergileyebilir (Kunce vd., 2013; Miracle vd., 2014). LENS teknolojisi, YEA araştırma ve geliştirme çalışmalarında yeni fırsatlar sunmakta ve bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda kullanımını kolaylaştırmaktadır.



Şekil 1.10. Lens yöntemi şematik gösterim (Maharubin vd., 2019)

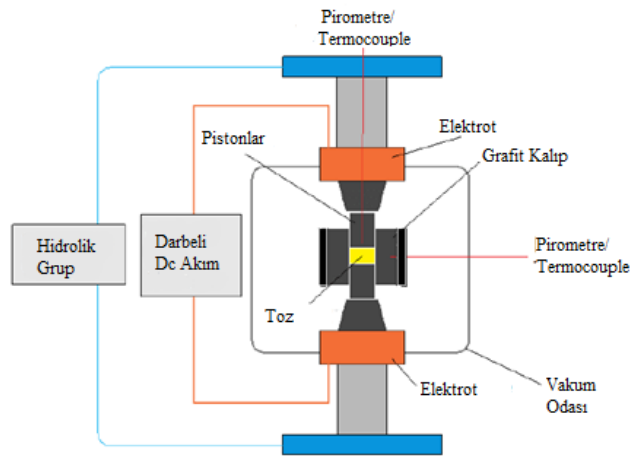
1.6.2. Katı Hal Üretim Yöntemleri

Rapor edilen YEA'ların yaklaşık %5'i katı hal prosesleriyle üretilmiştir. Bu yöntemler genellikle mekanik alaşımlama ve element karışımının yoğunlaştırılması ile açıklanabilir. Mekanik alaşımlama, farklı türdeki elementel tozların yüksek enerjili değirmenlerde işlenerek difüzyon yoluyla homojen bir yapı elde edilmesini içerir. Şekil 1.11'de bu yöntemin şematik görüntüsü yer almaktadır. Şemada, bilyalar ve tozlar arasındaki yüksek enerjili etkileşim sonucunda partiküllerin sürekli deformasyon, kırılma ve birleşme süreçlerinin gerçekleştiği görülmektedir. Bu etkileşimler, nanokristalizasyon ve hatta amorfizasyon işlemlerini de içermektedir (Y. Zhang vd., 2014).



Şekil 1.11. Mekanik alaşımlama şematik gösterimi (Merupo vd., 2015)

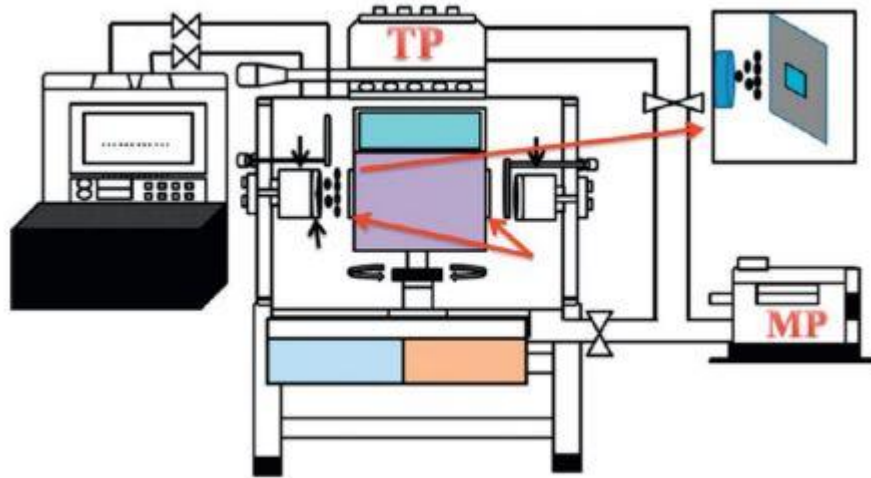
YEA'ların yoğun malzeme haline gelmesi için sinterleme gereklidir. Ancak geleneksel yöntemler, nanokristalin alaşımlarda tane büyümesine yol açabilir. Bu sorunu aşmak için spark plazma sinterleme (SPS) kullanılır (Şekil 1.12). SPS'de, grafit kalıp içindeki örneğe yüksek amperli darbeli akım (5000 A'a kadar) ve eşzamanlı basınç (yaklaşık 100 MPa) uygulanır. Darbeli akım, parçacık arayüzlerinde kıvılcım plazması oluşturarak tozları hızla ısıtır. Bu yöntem, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha hızlıdır- saatler yerine dakikalar içinde tamamlanır. Böylece tane büyümesi için yeterli süre olmaz ve mekanik alaşımlamayla elde edilen nanoyapılar korunur. (Fang vd., 2014; Z. Fu vd., 2013).



Şekil 1.12. SPS yöntemi şematik gösterimi (Yushin vd., 2015)

1.6.3. YEA Esaslı Kaplamalar

Yüksek Entropili Alaşımların (YEA) üretiminde ince film ve kaplama yöntemleri önemli bir yer tutar. Raporlanan YEA'ların yaklaşık beşte biri bu yöntemlerle elde edilmiştir. Gaz fazı yüzey modifikasyonu tekniklerinden özellikle magnetron püskürtme ve plazma nitrüleme ön plana çıkmaktadır. Püskürtme ile biriktirme, altlık üzerine atomların püskürtülmesiyle ince film oluşturmada kullanılan yaygın bir yöntemdir. En basit formu olan doğru akım (DC) püskürtmede, hedef ile altlık arasında uygulanan voltaj biriktirmeyi sağlar. Biriktirme oranı; güç, voltaj ve argon basıncı gibi parametrelerle kontrol edilebilir. Yalıtkan malzemelerin biriktirilmesinde ise radyo frekans (RF) püskürtme tercih edilir. DC püskürtmede yalıtkan film üretimi için gereken aşırı yüksek voltaj (1012 V civarı), RF püskürtme ile aşılabılır. Magnetron püskürtme, elektrik ve manyetik alanları kullanarak elektron yolunu uzatır. Bu sayede düşük argon basıncında bile yüksek püskürtme ve biriktirme oranları elde edilebilir. Hem DC hem de RF modlarında çalışabilen magnetron püskürtme, YEA'lar için en yaygın kullanılan kaplama yöntemidir. Plazma nitrüleme ise sertleştirilmiş yüzey oluşturmada magnetron püskürtmeye göre daha az tercih edilir. Bu yöntemle ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, plazma nitrüleme daha kalın tabakaların üretiminde magnetron püskürtmeye göre avantaj sağlayabilir. Bu yöntemlerin her birinin kendine özgü avantajları ve uygulama alanları vardır. Seçim, istenilen film özellikleri, altlık malzemesi ve üretim koşulları gibi faktörlere bağlı olarak yapılır. (Lai ve ark., 2006; Feng ve ark., 2013; Murty ve ark., 2014).



Şekil 1.13. RF ve DC püskürtme yöntemlerinin şematik diyagramı(H.-C. Chen vd., 2013)

1.7. Literatür Özeti

Yüksek Entropili Alaşımların keşfi, çok bileşenli alaşımların termodinamiği, karakterizasyonu ve üretilebilirliği konularına olan ilgiyi artırmıştır. Son on yılda, YEA'larla ilgili literatür çalışmaları 500 kat artış göstermiştir. Araştırmacılar, bu alaşımların potansiyel üretimi ve fizibilitesi, yapısal/fonksiyonel özellikleri, maliyeti, işlenebilirliği ve çeşitli özellikleri (mekanik, termal, manyetik, korozyon vb.) üzerine çalışmalarını sürdürmektedir. Literatürde, özellikle maliyet-performans ilişkisi göz önüne alındığında, AlCrCuFeMnNi, AlCrCuFeNi, AlCrFeNi, AlCrCuFeNiTi, AlCrFeMnNi, AlFeMoNi, CrCuFeMnNi, CrFeMnNi ve CrFeNi gibi alaşım sistemleri uygun olarak rapor edilmiştir (X. Fu vd., 2017).

Literatürdeki çalışmaların çoğu, YEA'larda element türü ve miktarının özelliklere etkisi ile malzemenin mukavemetini artırmak için çökelti oluşumu üzerine odaklanmıştır. Örneğin, Gwalani ve arkadaşları (Gwalani vd., 2017) yaptıkları bir çalışmada, yüksek entropili YMK yapılı $Al_{0.3}CuCrFeNi_2$ alaşımlarında bakırın çökeltme sertleşmesi yoluyla mukavemeti artırmadaki rolü incelenmiştir. Bu araştırmalar, YEA'ların çeşitli uygulamalar için potansiyelini ortaya koymakta ve gelecekteki malzeme geliştirme çalışmalarına yön vermektedir. YEA'ların karmaşık yapısı ve çok yönlü özellikleri, malzeme bilimi alanında yeni ufuklar açmaya devam etmektedir.

Cantor alaşımı olarak bilinen CrMnFeCoNi yüksek entropili alaşımı, yüzey merkezli kübik yapıda bir katı çözeltilidir. Bu alaşımın plastik deformasyonu genellikle dislokasyon kayması ve deformasyon ikizlenmesi ile gerçekleşir. Ancak, TEM deneyleri, ultra ince taneli Cantor alaşımında ilginç bir fenomen ortaya çıkarmıştır: kristalden amorf faza dönüşüm. Bu katı hal amorfizasyonu iki ana faktörden kaynaklanmaktadır:

1. Yüksek kafes sürtünmesi
2. Ultra ince taneli mikro yapılarda dislokasyon kaymasına karşı yüksek tane sınırı direnci

Çatlak ucu bölgesinde çıkık dislokasyon yoğunluğunun artması, yüksek gerilmelerin birikmesine neden olur. Bu birikmiş gerilmeler, kristalden amorf faza dönüşümü tetikler. Ayrıca, çatlak izi boyunca amorf nano köprülerin oluşumu gözlemlenmiştir. Bu amorfizasyon süreçleri, gerinim enerjilerinin dağılımını sağlayarak YEA'lar için etkili bir sertleştirme mekanizması oluşturur. Bu mekanizma, alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirerek, malzemenin dayanıklılığını ve performansını artırır. Bu bulgular, Cantor

alaşımı gibi YEA'ların mikro yapısal davranışlarının karmaşıklığını ve bu malzemelerin gelişmiş mekanik özelliklere sahip olma potansiyelini göstermektedir. Ayrıca, bu çalışmalar YEA'ların gelecekteki mühendislik uygulamaları için önemli ipuçları sunmaktadır (H. Wang vd., 2021).

Araştırmacılar, Cantor alaşımının (CoCrFeMnNi) çökelme sertleşmesi potansiyelini incelemek için ilginç bir yaklaşım benimsediler. Bu çalışmada, alaşıma çözünürlük sınırının üzerinde titanyum ilave edilmesinin etkisi araştırıldı. YEA'ların günümüzde artan popüleritesi göz önüne alındığında, bu yöntem, bu alaşımların zaten dikkat çekici olan özelliklerini daha da geliştirmek için umut verici bir strateji olarak görüldü. Araştırmacılar, alaşımı üç aşamalı bir ısıtılma işlemi tabi tuttular:

1. Homojenizasyon
2. Çözelti tavlama
3. Çöktürme tavlama

Bu ısıtılma işlemi sonrasında, alaşımın sertliğinde önemli bir artış gözlemlendi. TEM analizleri, bu sertlik artışının nanometre boyutundaki çöktürmelerden kaynaklandığını ortaya koydu. Yapılan bu çalışma, YEA'ların mekanik özelliklerini iyileştirmede çökelme sertleşmesinin etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, YEA'ların özelliklerinin daha da geliştirilebileceğini ve bu malzemelerin gelecekteki mühendislik uygulamaları için potansiyelini artırdığını ortaya koymaktadır (Eißmann vd., 2021).

Shams ve arkadaşları, karbon içeren CoCrFeMnNi yüksek entropi alaşımlarının mekanik özellikleri üzerine tane boyutunun etkisi incelenmiştir. Araştırmacılar, çekme ve döngüsel deformasyon davranışlarını farklı tane boyutlarında analiz etmişlerdir. Alaşım numuneleri, sıcak haddeleme ve soğuk haddeleme işlemlerinden geçirildikten sonra çeşitli ısıtılma işlemlere tabi tutulmuştur. Bu işlemler sonucunda, ortalama tane boyutu 4 ile 66 μm arasında değişen farklı mikro yapılar elde edilmiştir. Araştırmannın sonucunda, ince taneli numuneler ($d \leq 15 \mu\text{m}$) benzer çekme deformasyon davranışları sergilemiştir, iri taneli numune ($d \sim 66 \mu\text{m}$), mekanik ikizlenmenin yoğunluğu nedeniyle farklı bir gerinim sertleşmesi davranışı göstermiştir, sıcak haddeleme sonrası ısıtılma işlem sıcaklığının düşürülmesiyle tane boyutu 10 μm 'ye kadar inceltilebilmiş, bu da mukavemeti artırmış ve düşük döngü yorulma ömrünü uzatmıştır, benzer plastik gerinim genliklerinde yorulma döngü sayısında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir ve soğuk haddelenmiş ve 800 °C'de tavllanmış numune, en küçük tane boyutunu ($\sim 4 \mu\text{m}$) ve en iyi akma mukavemetini

sağlamıştır. Ancak bu işlem, mikro yapıda kaba karbürlerin oluşmasına neden olmuştur. Bu çalışma, Cantor alaşımlarında tane boyutunun mekanik özelliklere etkisini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yüksek entropi alaşımlarının performansını optimize etmek için mikro yapı kontrolünün önemini vurgulamaktadır (Shams vd., 2021).

Xiaotao ve arkadaşları, borun yüksek entropili alaşımların bileşimleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacılar, $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ alaşımına farklı oranlarda ($x=0.0\sim1.0$) bor ekleyerek etkilerini gözlemlemişlerdir. XRD sonuçlarına göre, bor içermeyen alaşımda basit bir HMK katı çözeltili fazı oluşurken, bor içeren bileşimlerde HMK kristal yapısına ek olarak borit çözeltili pikleri de elde edilmiştir. Çalışmanın öne çıkan bulgularına göre bor içeriği arttıkça, borit yapılarının boyutu büyümüştür, bakırca zengin dendritik fazlar, bor ilavesiyle kaybolmamıştır, bor içermeyen alaşımda dendritik yapı ve HMK örgü sabiti değişmemiştir, borit çökeltileri, alaşımın sertliğini artırmıştır ve sertlikteki bu artış, bor oranıyla güçlü bir korelasyon göstermiştir. Bor elementinin yüksek entropili alaşımların mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yüksek entropili alaşımların özelliklerinin kontrolü ve optimizasyonu için bor gibi elementlerin kullanımının potansiyelini göstermektedir (Xiaotao vd., 2016).

2012 yılında Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2012), ark ergitme yöntemiyle $FeCoCuNi$ yüksek entropili alaşımları üzerine bir araştırma gerçekleştirdi. Bu çalışmada, yüksek entropili alaşıma kalay eklemenin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelendi. Araştırma sonunda düşük Sn konsantrasyonuna sahip alaşımlar tek bir yüzey merkezli kübik çözeltili fazı göstermiştir, Sn içeriği arttıkça, alaşımların mikroyapısında HMK çözeltilinin yanı sıra $Cu_{81}Sn_{22}$ intermetalik bileşikler de ortaya çıkmıştır, bu alaşımların yüksek çekme dayanımı ve plastik deformasyon kabiliyeti gösterdiği tespit edilmiştir. Liu ve arkadaşlarının 2012'de yaptığı bu çalışma, kalay elementinin $FeCoCuNi$ yüksek entropili alaşım sisteminde mikroyapı ve mekanik özellikleri nasıl etkilediğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, yüksek entropili alaşımların özelliklerinin kontrolü ve geliştirilmesi için alaşım elementlerinin etkisinin anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu tür alaşımların potansiyel uygulama alanlarının genişletilmesi açısından da değerli bilgiler sunmaktadır.

T. Borkar ve arkadaşları (Borkar vd., 2017), $AlFeNiCo_xCr_{1-x}$ alaşımında Co/Cr oranının değişmesiyle manyetik doyumun önemli ölçüde arttığını rapor etmiştir. Co miktarının artışı, alaşımın M_s değerini 18.48 emu/g'dan 117.8 emu/g'a yükseltmiştir. C. Liu ve ekibi, $AlCoCuFeNi_x$ alaşımını incelemiş ve Ni artışının M_s değerini düşürürken (89.21

emu/g'dan 54.69 emu/g'a), Hc değerini artırdığını (7.30 Oe'den 24.81 Oe'ye) gözlemlemiştir (C. Liu vd., 2019). V. Chaudhary ve arkadaşları (Chaudhary vd., 2021), $\text{FeCoNiAl}_x\text{Cr}$ ve FeNiCoAl_x alaşımlarında HMK fazının oluşumunun, YMK fazına kıyasla Ms ve Curie sıcaklığı (Tc) değerlerini artırdığını belirtmiştir. C. Zhao ve ekibi de HMK fazının Ms değerinin YMK fazından daha yüksek olduğunu doğrulamıştır (Zhao vd., 2021). Bazı elementlerin HMK fazının oluşumunu kolaylaştırdığı ve böylece alaşımların manyetik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği rapor edilmiştir. J. He ve arkadaşları (J. He vd., 2014), $(\text{FeCoCrMnNi})_{100-x}\text{Al}_x$ alaşımında Al ilavesinin HMK fazı oluşumuna etkisini incelemiştir. Al konsantrasyonu %8 'den az olduğunda YMK fazı, %8-16 arasında HMK fazı %16'dan fazla olduğunda B2 (düzenli HMK) fazı oluştuğunu göstermişlerdir. W. Wang ve ekibi, $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımında Al'nin HMK oluşumu için tetikleyici etkisini göstermiştir (J. He vd., 2014). J. Cieslak ve arkadaşları (Cieslak vd., 2020) ise $\text{Al}_x\text{FeCoCrNi}$ alaşımında Al içeriği arttıkça Ms ve Tc değerlerinin yükseldiğini gözlemlemiştir. Bu çalışmalar, yüksek entropili alaşımların manyetik özelliklerinin kompozisyon ve kristal yapı kontrolü ile önemli ölçüde değiştirilebileceğini ve optimize edilebileceğini göstermektedir.

R. Mishra ve arkadaşları (Mishra vd., 2019), AlCrFeMnNiTi alaşımının manyetik özelliklerini hem döküm halinde hem de izotermal tavlama sonrasında incelemiştir. Araştırmacılar, döküm halindeki alaşımın iyi yumuşak manyetik özellikler gösterdiğini rapor etmişlerdir. Ancak tavlama işlemi sonrasında, manyetik faz miktarındaki değişim ve manyetik elementlerin dağılımındaki farklılaşma nedeniyle manyetizasyonun azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca, tavllanmış alaşımın yüzeyinde oluşan koruyucu tabaka sayesinde daha iyi korozyon direnci gösterdiğini belirtmişlerdir.

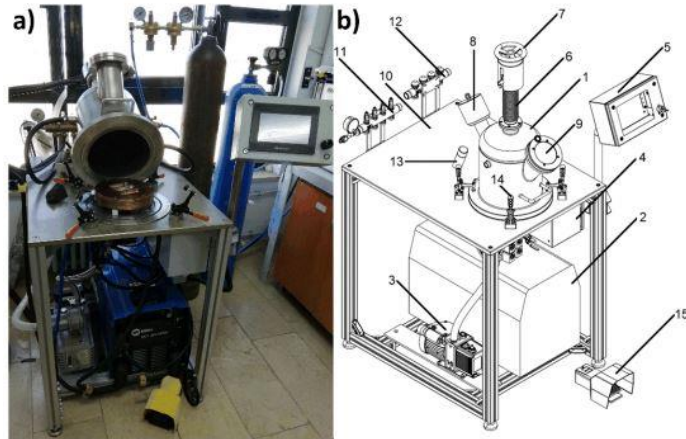
Wu ve ekibi ise FeCoNiCuAl alaşımına çok düşük miktarlarda seryum (Ce) eklenmesinin korozyon ve manyetik özellikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. FeCoNiCuAlCe_x ($x = 0-0.09$) alaşımında, $x=0.09$ olduğunda manyetik özelliklerin en yüksek seviyeye ulaştığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, Ce ilavesiyle alaşımın korozyon direncinin arttığı ve hatta 304 paslanmaz çeliklerden daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Araştırmacılar, Ce ilavesinin alaşımın yüksek sıcaklık stabilitesini de iyileştirdiğini öne sürmüşlerdir (Zhongyuan Wu vd., 2022). Bu bulgular, yüksek entropili alaşımların manyetik ve korozyon özelliklerinin, küçük miktarlarda element ilaveleriyle bile önemli ölçüde değiştirilebileceğini ve geliştirilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmalar, yüksek entropili alaşımların özelliklerinin ince ayarlanması ve spesifik uygulamalar için optimize edilmesi konusunda değerli bilgiler sunmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

CoCuFeNiAlTix ve CoCuFeNiMnTix ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) nominal bileşimli külçeler vakum ark ergitme yöntemiyle üretildi. Ağırlıkça %99,5'ten yüksek saflıktaki elementler, su soğutmalı Cu potada yüksek saflıkta argon atmosferinde işlendi. Homojenliği artırmak için alaşımlar beş kez yeniden eritildi ve her ergitme öncesi döndürüldü. Ark ergitme fırını 10^{-3} mbar basınçta çalıştırıldı, ergitme 400 mbar basınçlı yüksek saflıkta argon gazıyla gerçekleştirildi. İngot alaşımlar, yapısal incelemeler için $4 \times 4,5 \times 2$ mm boyutlarında tel erozyonla kesildi. Seçili yüksek entropili alaşım örneklerine mikroyapı ve manyetik analizler uygulandı. İncelemeler öncesi numuneler taşlandı, parlatıldı ve dağlandı. Taşlama #600 ila #2000 zımpara ile yapıldı. Parlatmada 1 μ m elmas çözeltisi kullanıldı.

2.1. Vakum Ark Ergitme Sistemi ile Alaşımların Üretimi

Bu tez çalışmasında, alaşımları ingot haline getirmek için özel tasarlanmış bir vakumlu ark ergitme cihazı kullanıldı. Cihaz, özel bir firma ve laboratuvar ekibi tarafından geliştirildi. Cihazın görüntüsü ve şematik çizimi Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan vakumlu ark ergitme fırını. a) Vakum Ark ergitme cihazı, b) Şematik Resmi (1: Paslanmaz çelik gövde, 2: Güç ünitesi (jeneratör), 3: Vakum pompası, 4: Kontrol panosu elektrik aksamı, 5: Kontrol ünitesi, 6: Körük, 7: Elektrot hareket tekerleği, 8: Aydınlatma penceresi, 9: Gözetleme penceresi, 10: Tabla, 11: Su girişi kontrol devresi, 12: Su çıkışı kontrol devresi, 13: Destekleme aparatı, 14: Sabitleyici menteşe, 15: Ark kontrol pedalı)

Cihaz üç ana bölümden oluşmaktadır:

1. Masa üstü bölümü: Paslanmaz çelik gövde (kule), bakır pota, tungsten elektrot, soğutma sistemi, elektrot tutucu, O-ring, dört adet manivelalı klemp ve taban kısmını içerir. Gövde üzerindeki camlı pencere, ergitme işleminin gözlemlenmesine olanak sağlar.
2. Masa altı bölümü: Güç kaynağı jeneratörü, vakum pompası, basınç ventili, valf sistemi, argon gazı tüpü ve ark kontrol pedalından oluşur.
3. Kontrol paneli: PLC tabanlı kontrol paneli, vakum değeri, soğutma suyu sıcaklıkları, akım ve voltaj değerleri ile argon gazı basıncının ayarlanmasını sağlar.

Bu tasarım, alaşımların etkin ve kontrollü bir şekilde ergitilmesini mümkün kılar.

Tez çalışmasındaki alaşımlar, saf metal parçaları kullanılarak hazırlandı. Küçük parçalar halinde hazırlanan metaller hassas terazide tartıldı ve vakum ark ergitme cihazının bakır potasına yerleştirildi. Ardından, vakum sistemi kapatılarak vakumlama işlemi gerçekleştirildi. Alaşımın oksitlenmesini önlemek için, vakum odası yüksek saflıkta argon gazı ile 400 mbar basınçta dolduruldu. Ergitme işlemi, tungsten elektrodun elementlerle teması sonucu oluşan ark vasıtasıyla gerçekleştirildi.

2.2. Alaşımların Yapısal Analizleri

Tez kapsamında ark ergitme yöntemiyle üretilen alaşım ingotların faz yapıları XRD analizleriyle incelendi. Analizler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'ndaki PANalytical X'pert Powder3 model XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan x-ışını difraktometresi

2.3. Alaşımların Mikroyapısal Analizleri

Tez kapsamında üretilen alaşım ingotların mikroyapı incelemeleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'ndaki Zeiss Marka Evo LS model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirildi. Ayrıca, fazların kimyasal bileşimlerini belirlemek için bu elektron mikroskobuna bir Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) dedektörü dahil edilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Deneysel çalışmamalarda mikro yapı analizlerinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu

2.4. Alaşımların Manyetik zelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen sekiz adet alaşımın manyetik özelliklerinin belirlenmesi için Karadeniz Teknik Üniversitesi Manyetik Malzemeler Tasarım ve retim Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvaru bünyesinde bulunan Lakeshore marka titreşimli numune manyetometresi (VSM) kullanılmıştır. Ölçümler oda sıcaklığında ve 10.000 Oe manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir (şekil 2.4).



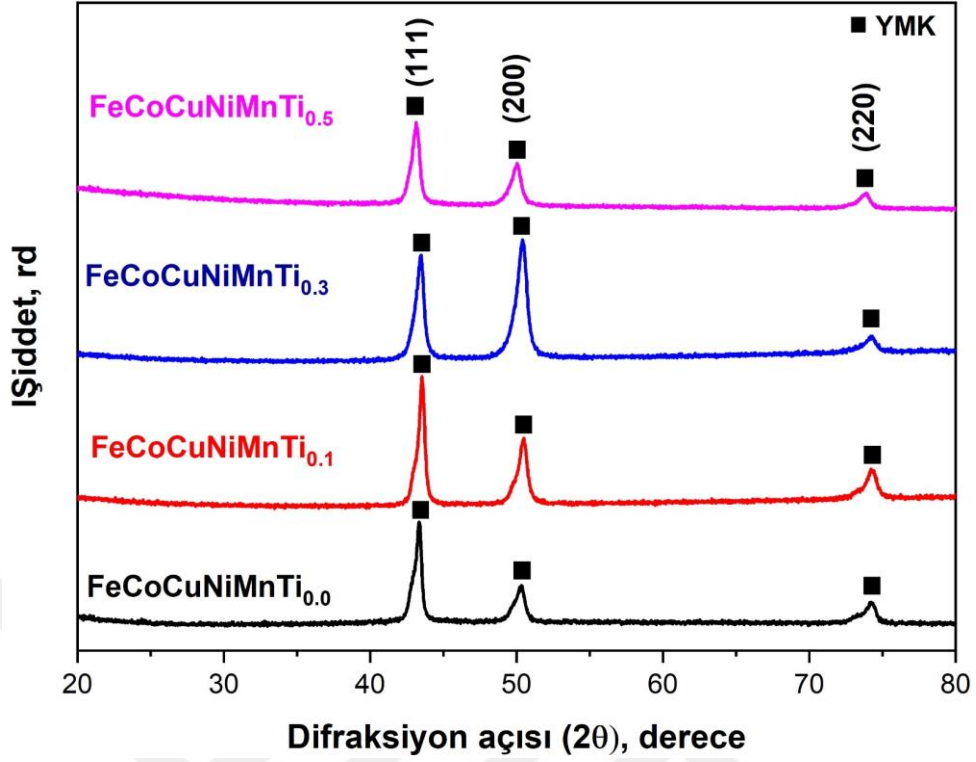
şekil 2.4. Deneysel çalışmalarda manyetik özellikleri karakterize etmek için kullanılan titreşimli örnek manyetometresi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Üretilen Alaşımların Faz Yapısının İncelenmesi

CoCuFeNiMTi_x (M= Al, Mn) (x= 0.0, 0.1, 0.3, 0.5) alaşımları vakum ark ergitme fırınında üretildi ve x-ışını kırınım desenleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Alaşım yüzeylerinden elde edilen kırınım desenleri, yüzey merkezli kübik (YMK) ve hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapıların birlikte var olduğunu göstermektedir.

CoCuFeNiMnTi_x alaşımlarının yapısal analizi, (111), (200) ve (220) düzlemlerinde üç kırınım yoğunluğu ortaya çıkardı. Ancak, tam kristal yapılara ait belirgin pik yoğunlukları gözlenmedi. Bu durum, ark ergitme cihazındaki su soğutmalı bakır kalıbın neden olduğu hızlı katılaşma süreciyle ilişkilendirilebilir. MnTi_x alaşımlarında, artan Ti içeriğiyle birlikte kırınım desenlerindeki pik yoğunluklarında önemli bir azalma gözlemlendi. Bu fenomen, titanyumun tane inceltici etkisiyle açıklanabilir. Titanyum ilavesi, katılaşma sırasında daha küçük ve dağınık tanelerin oluşumunu teşvik eder, bu da x-ışını saçılmasını azaltarak daha düşük pik yoğunluklarına yol açar. Titanyumun bu etkisi, Ti-zengin parçacıkların heterojen çekirdeklenme bölgeleri olarak işlev görmesine ve birincil kristallerin büyümesini engellemesine bağlanabilir. Sonuç olarak, küçülen kristal boyutu ve artan tane sınırları, x-ışını kırınımını azaltır ve pik yoğunluklarını düşürür. Bu etki, MnTi_x alaşımlarında özellikle belirgindir; en yüksek pik $2\theta = 43^\circ$ 'de gözlenirken, diğer iki pik Şekil 3.1'de $2\theta = 50,1^\circ$ ve $74,1^\circ$ 'de tespit edilmiştir.



Şekil 3.1. FeCoCuNiMnTi_x alaşımlarının XRD desenleri

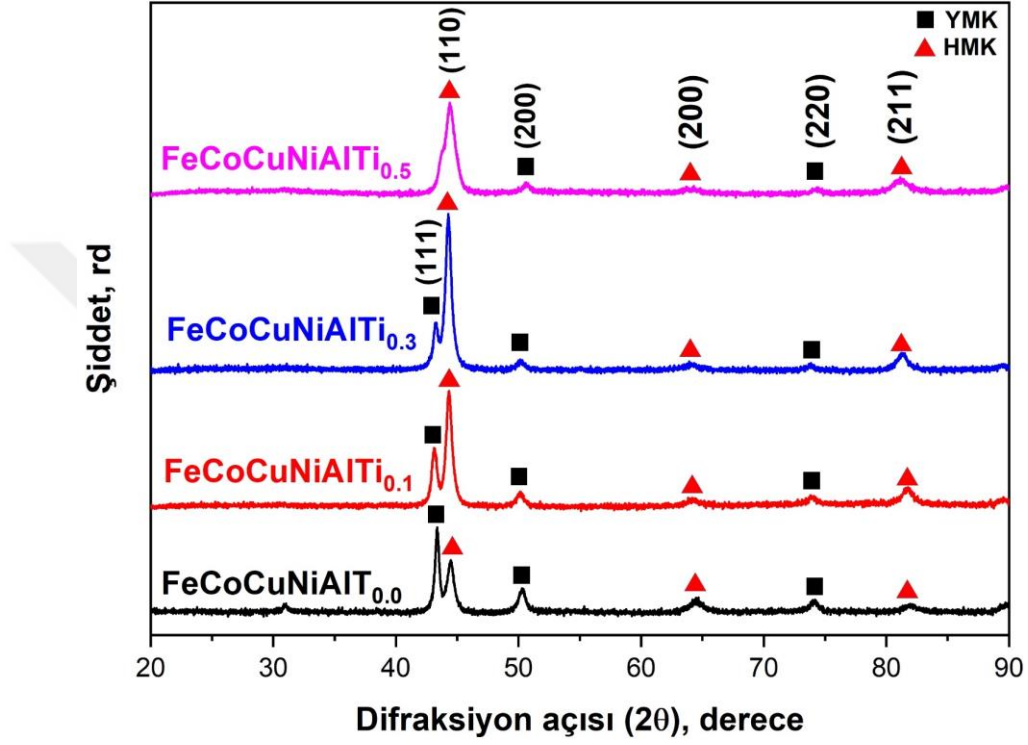
Ti'nin CoCuFeNiMnTi_x alaşımlarının XRD deseni üzerindeki etkisi, alaşımların yapısal özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar. Ti, YEA'nın YMK kristal kafesinde çözünme yeteneğine sahiptir ve artan Ti içeriği, daha fazla Ti atomunun kafese dahil olmasına neden olur. Bu, katı bir çözelti oluşturur ve Ti atomları kafes boyunca dağılarak diğer elementlerin yerini alır. Bu durum, atomların periyodik düzenini bozarak yerel kafes bozulmalarına ve atomik düzensizliğe yol açar, bu da x-ışınlarının saçılmasını artırarak kırınım yoğunluklarını azaltır. M. Karimzadeh ve arkadaşlarının (Karimzadeh vd., 2022) CoCrFeNi alaşımı üzerinde yaptığı çalışma, Ti ilavesinin XRD desenindeki pik yoğunluklarında belirgin bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Bu, Ti atomlarının alaşım kafesinde diğer elementlerin yerini aldığı bir katı çözelti fazının oluşumuna işaret eder. Benzer şekilde, Chen ve ark. (D. Chen vd., 2019) CoCrFeNi-tabanlı alaşıma Ti ve Al eklenmesinin kırınım pik şiddetini azalttığını ve Ti oranı arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiğini bildirmiştir. Öte yandan, Li ve ark. (H. Li vd., 2023) ile Wang ve ark. (Xinyang Wang vd., 2020) tarafından yapılan çalışmalar, CoCrFeNiTi_x (x=0-1.5) alaşımında Ti'nin maksimum çözünürlük sınırının aşılmasının x=0.5, 1 ve 1.5'te YMK yapılı Laves fazlarının oluşumuna yol açtığını göstermiştir. İlginç bir şekilde, bu çalışmalar önceki bulgulardan farklı olarak, artan Ti içeriği ile kırınım piklerinin yoğunluğunun arttığını bildirmiştir. Bu farklılık, alaşım

kompozisyonundaki değişikliklerin ve üretim yöntemlerinin sonuçları etkileyebileceğini göstermektedir.

FeCoCuNiAlTi_x alaşımlarına ait XRD desenleri Şekil 3.2’de verilmiştir. FeCoCuNiAlTi_x yüksek entropili alaşımının kırınım deseni, hem yüzey merkezli kübik (YMK) hem de hacim merkezli kübik (HMK) fazlarının varlığını göstermektedir. Bu fazlara ek olarak, alaşım yaklaşık $2\theta=31^\circ$ ’de bir B2 fazı sergilemektedir. Literatürde, düşük oranda Al’ün kristal yapıyı önemli ölçüde etkilemediği, ancak yüksek oranda Al katkısı veya ikamesinin ikinci bir yapının ortaya çıkmasına neden olduğu iyi bilinmektedir. Lin ve arkadaşlarının (L. Lin vd., 2020) çalışması, Cantor alaşımına 0,75 mol Al eklendiğinde mikroyapıda B2 fazının çökeldiğini göstermiştir. Al’ün etkisini sistematik olarak inceleyen başka bir araştırmada (W.-R. Wang vd., 2012), Al_{0,8}’den sonra eklenen tüm Al oranlarında (0.8-2.0) düzenli HMK’nın, yani B2 fazının çökeldiği bulunmuştur. Bu alaşımda, YMK stabilizatörü olarak bilinen Mn yerine HMK stabilizatörü olan Al’ün kullanılması, yapıda düzenli HMK yapılarının oluşmasına katkıda bulunmuştur. Bu durum, alaşım elementlerinin seçiminin ve oranlarının, elde edilen kristal yapılar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Mn yerine Al ilavesi, YMK yapısının yanı sıra düzenli HMK fazının (110), (200) ve (211) kırınım düzlemlerinde ortaya çıkmasına neden olur. Ti ilavesi ise YMK katı-çözelti fazının yoğunluğunu olumsuz etkiler. AlTi_{0,0}, AlTi_{0,1} ve AlTi_{0,3} alaşımlarında YMK fazının pik yoğunluğu azalırken, HMK fazının pik yoğunluğu artar. AlTi_{0,5} alaşımında ise YMK piki 43° ’den itibaren tamamen kaybolur. Bu eğilim, Ti elementinin atom yarıçapının diğer elementlerden (CoCuFeNiAl) daha büyük olmasıyla açıklanabilir (P. Cui vd., 2018). Atomik paketleme verimliliği teorisi, artan Ti oranıyla YMK yapısından HMK yapısına kademeli geçişi açıklamakta kullanılabilir. YMK yapısının atomik paketleme verimliliği, HMK yapısından %6 daha yüksektir. Al (0,143 nm) ve Ti (0,147 nm) diğer metallere göre daha yüksek atom yarıçapına sahip olduğundan, YMK yapısında daha fazla bozulmaya neden olur. Bu bozulma, birim hücre enerjisini artırarak yarı kararlı bir YMK yapısı oluşturur. Yapı, enerjisini azaltmak için daha düşük atomik paketleme verimliliğine sahip ve daha kararlı olan HMK yapısına dönüşür. Bu dönüşüm, kırınım desenlerine doğrudan yansır. FeCoCuNiAl, FeCoCuNiAlTi_{0,1} ve FeCoCuNiAlTi_{0,3} alaşımlarında, HMK yapısının (110) düzleminin pik yoğunluğu artarken, YMK yapısının (111) düzleminin pik yoğunluğu azalır. AlTi_{0,5} numunesinde sadece HMK yapısı gözlenir ve (110) kırınım düzleminin pikinin genişlemesi, titanyum ilavesinin HMK yapısını da bozduğunu gösterir. Benzer yapısal

dönüşümler başka çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Örneğin, Sui ve arkadaşları, $Al_xCoCrFeNi$ alaşımında Al içeriği arttıkça YMK yapısının HMK yapısına dönüştüğünü bildirmiştir (Sui vd., 2023). Chen ve arkadaşlarının çalışmasında ise $CoCrFeNiMn$ alaşımına Ti katkısı 0,25 ve 0,55 seviyelerine ulaştığında YMK yapısının yanı sıra HMK yapısının da oluştuğu görülmüştür (Yuhua Chen vd., 2022).



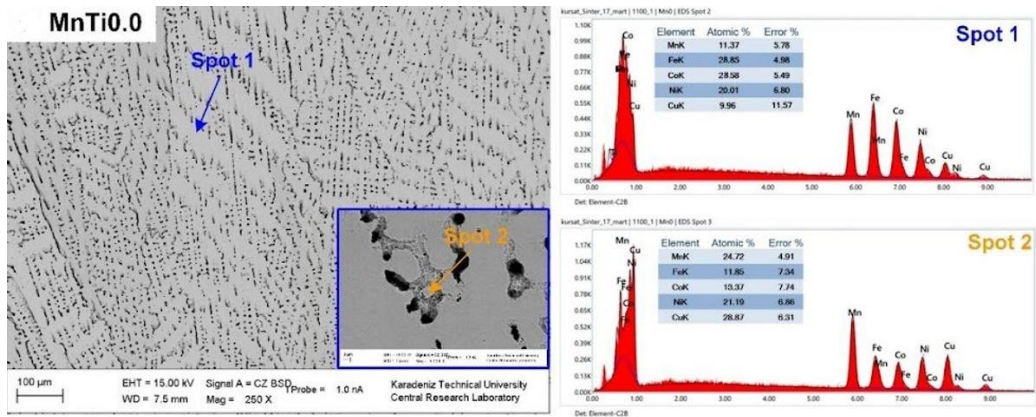
Şekil 3.2. $FeCoCuNiAlTi_x$ alaşımlarının XRD desenleri.

3.2. Üretilen Alaşımların Mikroyapılarının İncelenmesi

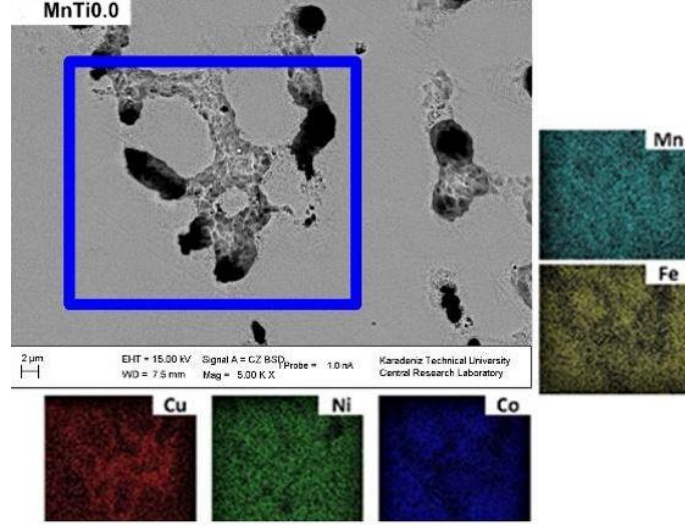
$FeCoCuNiMnTi_x$ yüksek entropili alaşımlarının ($x=0.0, 0.1, 0.3$ ve 0.5 at. %) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde Ti oranından bağımsız olarak, tüm alaşımların üretim sırasında dendritik olarak katılaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, su soğutmalı bakır potaların kullanımına atfedilebilir. Ti içermeyen $FeCoCuNiMn$ alaşımında, gri bölgeler birincil ve ikincil dendritik kolları gösterirken, siyah bölgeler dendritler arası alanı (IDR) temsil etmektedir. Geri saçılan elektron modunda alınan SEM görüntüleri, dendritik bölgenin (DR) homojen bir kimyasal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, dendritler arası bölge farklı bir kimyasal bileşime sahiptir. EDS analizleri, dendritik

kol ve dendritler arası bölgelerde elementlerin farklı dağılımlarını ortaya koymuştur. Dendritik kolda Fe, Co ve Ni yüzdeleri daha yüksekken, dendritler arası bölgede Cu yüzdesi daha yüksektir. Bu ayrışma, Cu'nun diğer elementlerle pozitif karışım entalpisine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Cu-Co, Cu-Fe, Cu-Ni ve Cu-Mn'nin sırasıyla 6, 13, 4 ve 4 kJ/mol karışım entalpilerine sahip olması, mikroyapıda ayrışmaya ve katılaşma sırasında YMK kristal yapısına sahip ikinci bir fazın oluşmasına yol açar. Bu bulgular, literatürdeki diğer çalışmalarla da uyumludur. Xian ve ark. (Xian vd., 2018), CrMnFeCoNiCu_x alaşımında benzer bir (Cu-Mn) bakımından zengin YMK yapısının oluştuğunu göstermiştir. Zhu ve arkadaşları (Zhu vd., 2021), $\text{CoCuFeNi}_x\text{Mn}$ alaşımında interdendritik bölgelerin daha yüksek Cu ve Mn konsantrasyonu sergilediğini gözlemlemiştir. Benzer sonuçlar, CrFeNiAlSiTiCu (X. Li vd., 2023), $\text{CuCrFeNiMn}_{20.5}$ (Gheysarian vd., 2023), CuMnFeCoNi (Yin vd., 2022) ve $\text{Al}_x\text{CoCuFeMn}$ (Yan vd., 2023) gibi bakır içeren diğer yüksek entropili alaşımlarda da rapor edilmiştir.

FeCoCuNiMn Şekil 3.3'de mavi okla gösterilen birincil dendritik kol olan gri bölgede kimyasal bileşim aşağıdaki gibidir: 16,37 at. % Mn, 25,85 at. % Fe, 25,58 at. % Co, 20,01 at. % Ni ve 11,57 at. % Cu. Öte yandan, şekil'de 5.00KX büyütmede SEM fotoğrafında turuncu okla gösterilen dendritler arası bölgede (IDR) kimyasal bileşim farklıdır: %24,72 Mn, %11,85 Fe, %13,37 Co, %21,19 Ni ve %28,87 Cu. Bu alaşımda, bu iki bölge arasındaki kimyasal bileşimde dikkate değer bir fark vardır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de bu alaşıma ait EDS görüntüsü verilmiştir.

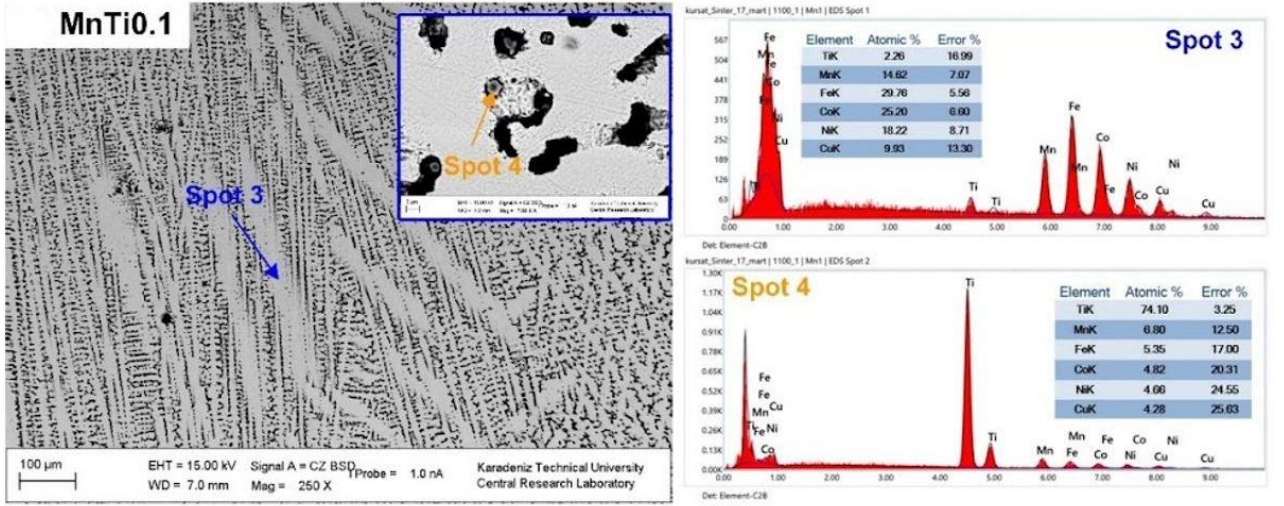


Şekil 3.3. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiMn alaşımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları

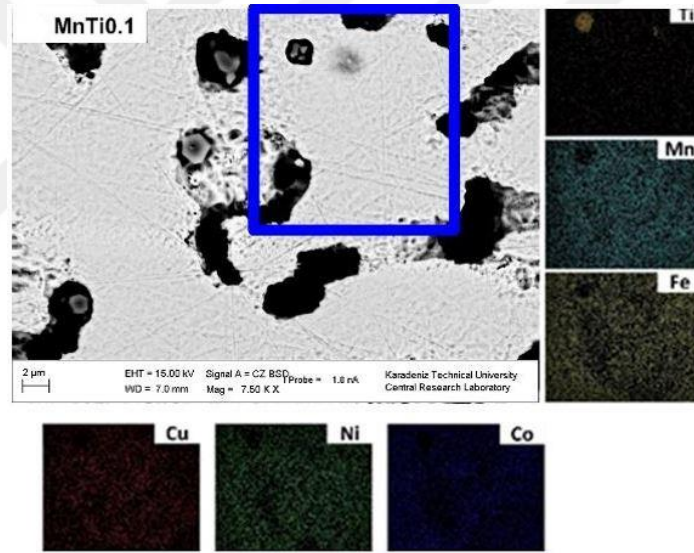


Şekil 3.4. FeCoCuNiMn alaşımasının EDS harita analizi

FeCoCuNiMnTi_{0.1} Şekil 3.5'te mavi okla gösterilen birincil dendritik kol olan gri bölgede kimyasal bileşim aşağıdaki gibidir: 14,62 at. % Mn, 29,76 at.% Fe, 25,20 at.% Co, 18,22 at.% Ni, 9,93 at.% Cu ve 2,26 at.% Ti . Öte yandan, şekil'de 5.00KX büyütmede SEM fotoğrafında turuncu okla gösterilen dendritler arası bölgede (IDR) kimyasal bileşim farklıdır: 6,80 at. % Mn, 5,35 at.% Fe, 4,82 at.% Co, 4,66 at.% Ni, 4,82 at.% Cu ve 74,10 at.% Ti. Bu alaşımda da bu iki bölge arasındaki kimyasal bileşimde dikkate değer bir fark vardır. Şekil 3.6'da bu alaşıma ait EDS görüntüsü verilmiştir.

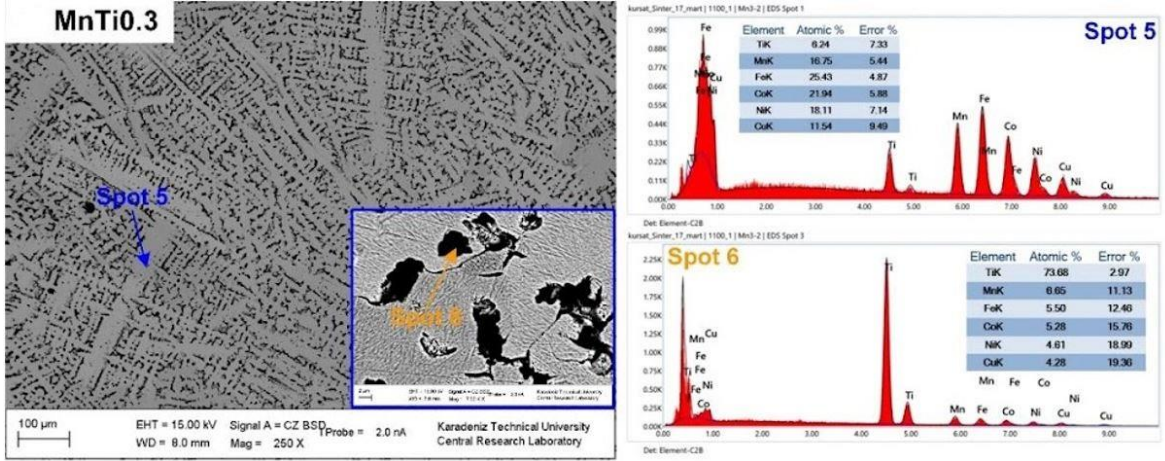


Şekil 3.5. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiMnTi_{0.1} alaışımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları

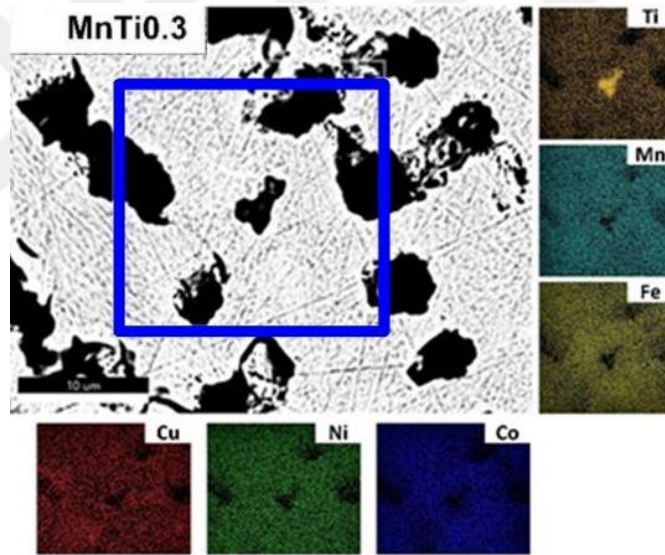


Şekil 3.6. FeCoCuNiMnTi_{0.1} alaışımının EDS harita analizi

FeCoCuNiMnTi_{0.3} Şekil 3.7'de mavi okla gösterilen birincil dendritik kol olan gri bölgede kimyasal bileşim aşağıdaki gibidir: 16,75 at. % Mn, 25,43 at.% Fe, 21,94 at.% Co, 18,11 at.% Ni, 11,54 at.% Cu ve 6,24 at.% Ti . Öte yandan, şekil'de 5.00KX büyütmede SEM fotoğrafında turuncu okla gösterilen dendritler arası bölgede (IDR) kimyasal bileşim farklıdır: 6,65 at. % Mn, 5,50 at.% Fe, 5,28 at.% Co, 4,81 at.% Ni, 4,28 at.% Cu ve 73,68 at.% Ti. Bu alaşımda da bu iki bölge arasındaki kimyasal bileşimde dikkate değer bir fark vardır. Şekil 3.8'de bu alaşıma ait EDS görüntüsü verilmiştir.



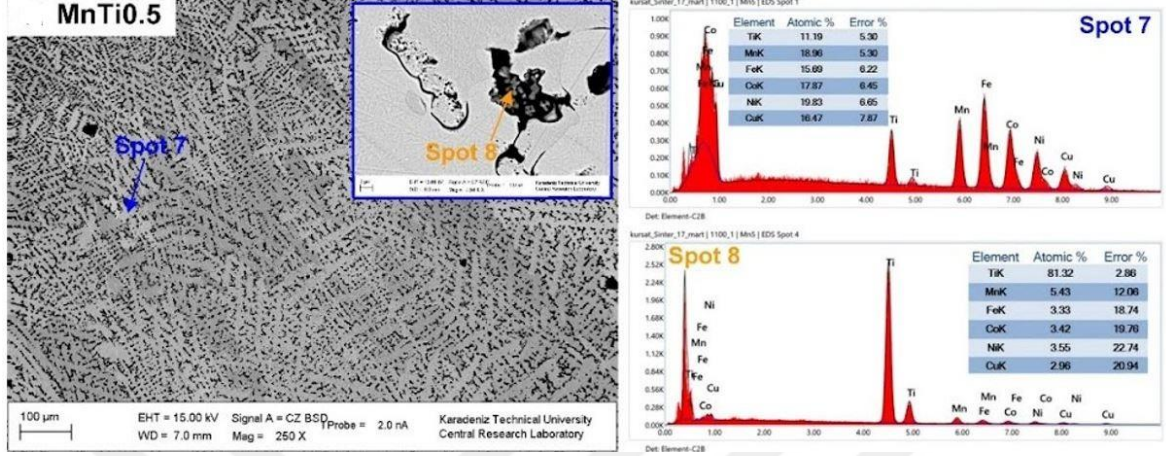
Şekil 3.7. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiMnTi_{0.3} alaışımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları



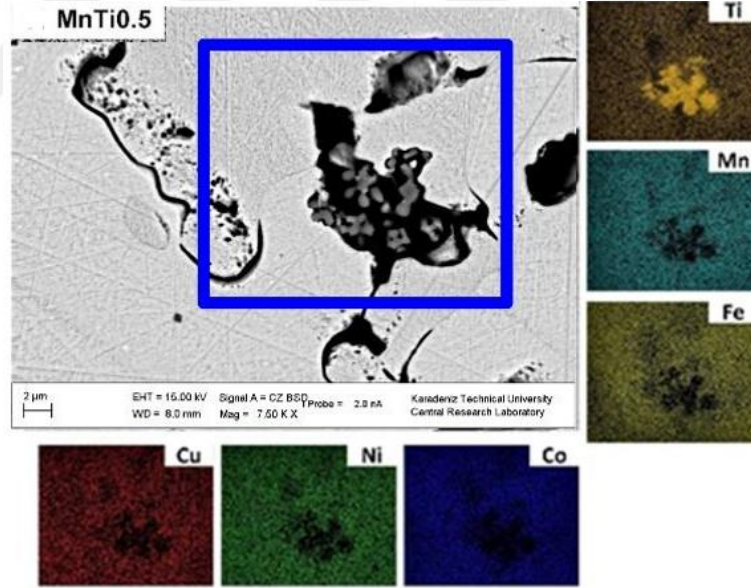
Şekil 3.8. FeCoCuNiMnTi_{0.3} alaışımının mavi dikdörtgenle sınırlandırılmış alanının EDS harita analizi

FeCoCuNiMnTi_{0.5} Şekil 3.9'da mavi okla gösterilen birincil dendritik kol olan gri bölgede kimyasal bileşim aşağıdaki gibidir: 18,96 at. % Mn, 15,69 at.% Fe, 17,87 at.% Co, 19,83 at.% Ni, 16,47 at.% Cu ve 11,19 at.% Ti . Öte yandan, şekil'de 5.00KX büyütmede SEM fotoğrafında turuncu okla gösterilen dendritler arası bölgede (IDR) kimyasal bileşim farklıdır: 5,43 at.% Mn, 3,33 at.% Fe, 3,42 at.% Co, 3,55 at.% Ni, 2,96 at.% Cu ve 81,32

at.% Ti. Bu alaşımda da bu iki bölge arasındaki kimyasal bileşimde dikkate değer bir fark vardır. Şekil 3.10'da bu alaşıma ait EDS görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiMnTi_{0.5} alaışımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları



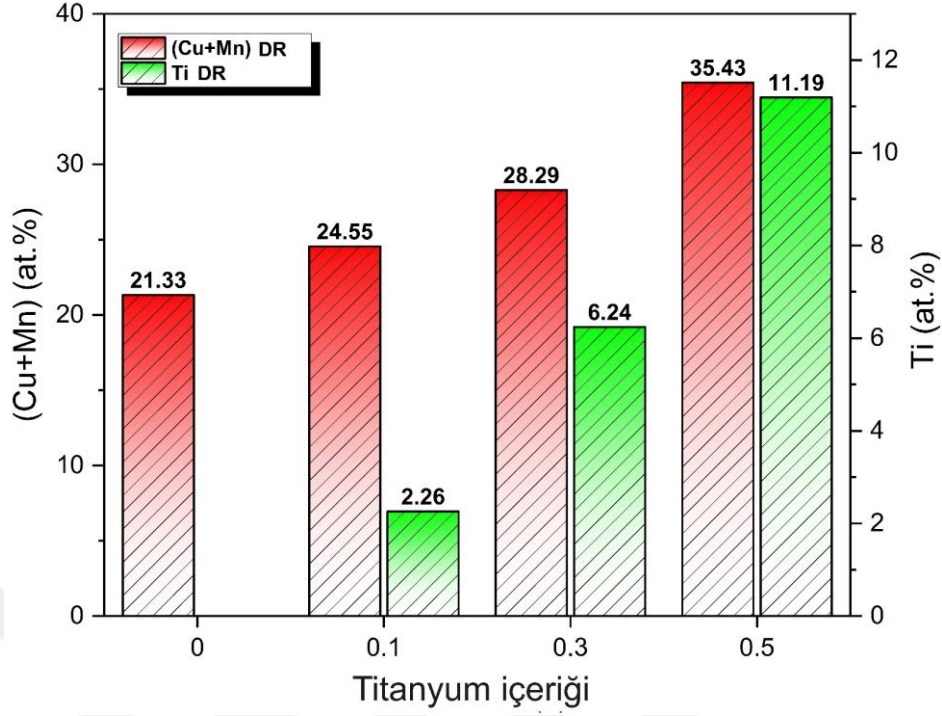
Şekil 3.10. FeCoCuNiMnTi_{0.5} alaışımının mavi dikdörtgenle sınırlandırılmış alanının EDS harita analizi

FeCoCuNiMn alaışımına titanyum (Ti) ilavesi, katılaşma sırasında gözlemlenen mikroyapısal özellikleri üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuştur. Alaşım, Ti içermeyen yüksek entropili alaşıma benzer şekilde dendritik özellikler göstermeye devam etmiştir. Ancak, Ti konsantrasyonu arttıkça hızlı soğutmanın etkisinin kademeli olarak arttığı

gözlemlenmiştir. $MnTi_{0.1}$ ve $MnTi_{0.5}$ alaşımlarının mikroyapıları karşılaştırıldığında, Ti içeriği arttıkça hem birincil hem de ikincil dendrit kollarının kalınlığında belirgin bir azalma olduğu görülmüştür. Bu durum, Ti'nin dendritik büyüme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve daha ince, daha rafine dendritik yapılar oluşturduğunu göstermektedir. $MnTi_{0.5}$ 'teki daha ince dendrit kol kalınlığı, Ti'nin daha hızlı soğuma oranlarını teşvik ettiğini ve mikroyapısal değişikliklere katkıda bulunduğunu işaret etmektedir. Titanyumun yapısal arıtma üzerindeki etkisi hakkında literatürde farklı görüşler bulunmaktadır. Bazı çalışmalar Ti'nin etkisiz olduğunu gösterirken, diğerleri belirgin bir yapısal arıtma etkisi rapor etmektedir. Bu farklılıklar, üretim yöntemlerinden kaynaklanabilir. Ancak, Ti'nin diğer elementlerden daha yüksek atomik yarıçapı ve yüksek negatif karışım entalpisi, mikroyapı üzerinde sinerjik bir etki yaratabilir. Karimzadeh ve arkadaşlarının (Karimzadeh vd., 2022) çalışması, $CoCrFeNi$ alaşımına Ti ilavesinin belirgin bir düşük soğutma fenomenine yol açtığını ve dendritik mikroyapı içindeki dendrit kollarının kalınlığında önemli bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Liu ve ark. (X. Liu vd., 2019) $CoCrNi$ orta entropili alaşımına Ti eklenmesinin, sütunlu tane yapısının eş eksenli bir yapıya dönüşmesine neden olduğunu bulmuşlardır. Bu dönüşüm, soğuma hızında bir artışa işaret etmektedir. Bu bulgular, Ti ilavesinin YEA'ların mikroyapısal özelliklerini ve katılma davranışını etkileme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Titanyumun $FeCoCuNiMn$ yüksek entropi alaşımına eklenmesi, sadece mikroyapıda incelemeye yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda mikroyapıdaki fazların kimyasal kompozisyonunda da değişikliklere neden olmaktadır. Bu durum, nokta EDS analizlerinden ve EDS haritalarından açıkça görülebilmektedir. EDS nokta analizi, dendritik bölgelerin kimyasal bileşimi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. $FeCoCuNiMn$ alaşımına titanyum eklendiğinde, dendritik bölgelerdeki YMK yapı içinde nispeten düşük bir titanyum çözünürlüğü gözlemlenmektedir. Örneğin, ağırlıkça yüzde 0,1 titanyum içeren bir $FeCoCuNiMn$ yüksek entropi alaşımında, dendritik bölgelerdeki titanyum içeriği ağırlıkça yüzde 2,26'dır. Ağırlıkça yüzde 0,3 ve 0,5 titanyum içeren alaşımlarda ise bu bölgelerdeki titanyum oranı sırasıyla ağırlıkça yüzde 6,24 ve 11,19'a yükselmektedir. Buna ek olarak, titanyum ilavesi nedeniyle demir, kobalt ve nikel bakımından zengin bölgelerde bakır ve manganez toplamının oranı düzenli bir artış göstermiştir. Şekil 3.11'de yer alan histogram grafiği, manganez ve bakır oranlarındaki bu değişimleri görsel olarak sunmaktadır. Titanyum içermeyen alaşım incelendiğinde, bakır ve manganezin toplam içeriği yüzde 21,33 olarak tespit edilmiştir. Titanyum içeriğinin artmasıyla birlikte bakır ve manganez

yüzdelерinin de arttığı açıkça görülmektedir. Ağırlıkça yüzde 0,1 titanyum ile bakır ve manganez toplamı yüzde 24,55'e, ağırlıkça yüzde 0,3 titanyum içeriği ile yüzde 28,29'a ve ağırlıkça yüzde 0,5 titanyum ile yüzde 35,43'e yükselmektedir. Mikroyapıdaki dendritik bölgelerin kimyasal bileşiminde gözlemlenen bu değişim, titanyumun diğer elementlerle karışım entalpisinin mutlak değeri olarak daha yüksek olmasına atfedilebilir. Titanyum içermeyen alaşımda bakır, yüksek entropi alaşımı bileşimindeki tüm metal atomları arasında pozitif karışım entalpisi değeri nedeniyle ayrışmaya neden olmuştur. Ancak, bakır-titanyum karışım entalpisi (-9 kJ/mol) bakır ile diğer metallere göre daha negatif olduğu için mikroyapıda ayrışma azalmıştır. Benzer bir durum manganez-titanyum (-8 kJ/mol) arasında da gözlenmiştir. Bunun sonucunda, dendrit bölgelerinde (birincil ve ikincil dendrit kolları) toplam bakır ve manganez oranında bir artış meydana gelmiş ve daha homojen bir yapı ortaya çıkmıştır. EDS haritaları incelendiğinde, ağırlıkça yüzde 0,1 ile 0,5 arasında titanyum içeren yüksek entropi alaşımlarının hem dendrit hem de dendritler arası bölgelerde minimum bakır-manganez ayrışması sergilediğini göstermektedir. Demir atomları, titanyum içeren alaşımların tüm bölgelerinde homojen bir şekilde sarı kontrast oluşturmaktadır. Bazı araştırmacılar, bileşime daha düşük veya negatif karışım entalpisine sahip metaller ekleyerek yüksek veya pozitif karışım entalpisine sahip elementlerin neden olduğu yüksek entropi alaşımı mikroyapısındaki ayrışmayı azaltmak veya ortadan kaldırmak için çalışmalar yürütmüşlerdir. Örneğin, CoCuFeMn alaşımında, bakırın yüksek karışım entalpisinin yol açtığı ayrışma sorununu çözmek amacıyla nikel eklenmiştir (Zhu vd., 2021). Titanyumun çok sayıda olumlu etkisine rağmen hem EDS nokta analizleri hem de harita analizleri, titanyumun önemli derecede ayrışma sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu analizler, EDS nokta analizlerinde 4, 6 ve 8 numaralı noktalarla karakterize edilen ve EDS haritalarında turuncu bir kontrastla vurgulanan, yeni oluşmuş titanyum açısından zengin bir faz bölgesinin ortaya çıkışını net bir şekilde göstermektedir. Bu ayrışma, artan titanyum içeriği ile daha belirgin hale gelmektedir. Titanyumca zengin bölgelerdeki titanyum içeriği, sırasıyla ağırlıkça yüzde 0,1, 0,3 ve 0,5 titanyum içeren alaşımlarda yüzde 74,1, yüzde 73,68 ve yüzde 81,32'dir. EDS nokta analizinden, titanyum içeren alaşımın bileşimindeki diğer metallerin oranlarının neredeyse eşit dağıldığı görülmektedir. Chen ve arkadaşları (M. Yang vd., 2022) yürüttüğü çalışma da benzer sonuçlar ortaya koymuştur. CoCrFeNiMn alaşımına titanyum eklendikçe, titanyum açısından zengin bir faz oluşmuş ve artan titanyum oranıyla bu faz mikroyapıda genişlemiştir.

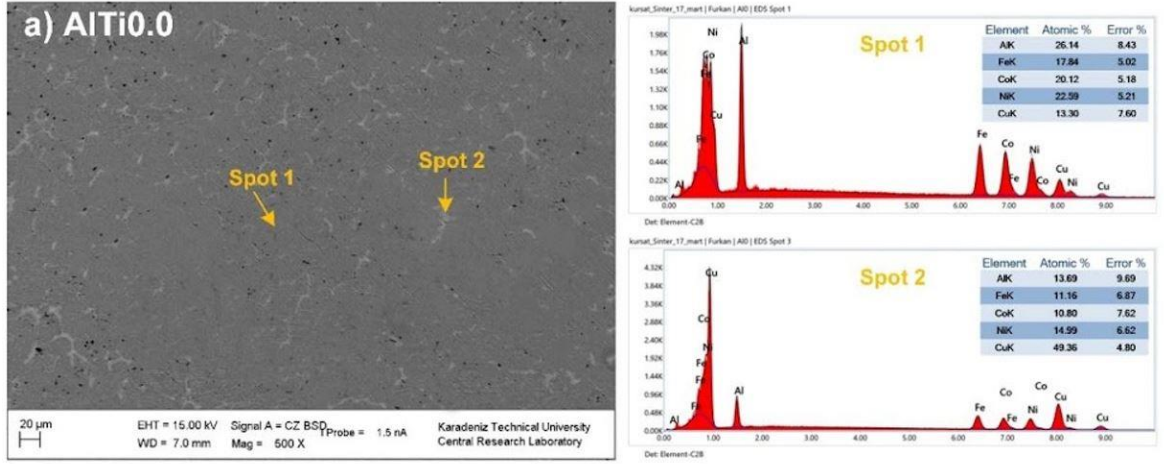


Şekil 3.11. FeCoCuNiMnTi_x mikroyapısında farklı fazlardaki bazı elementlerin değişimi.

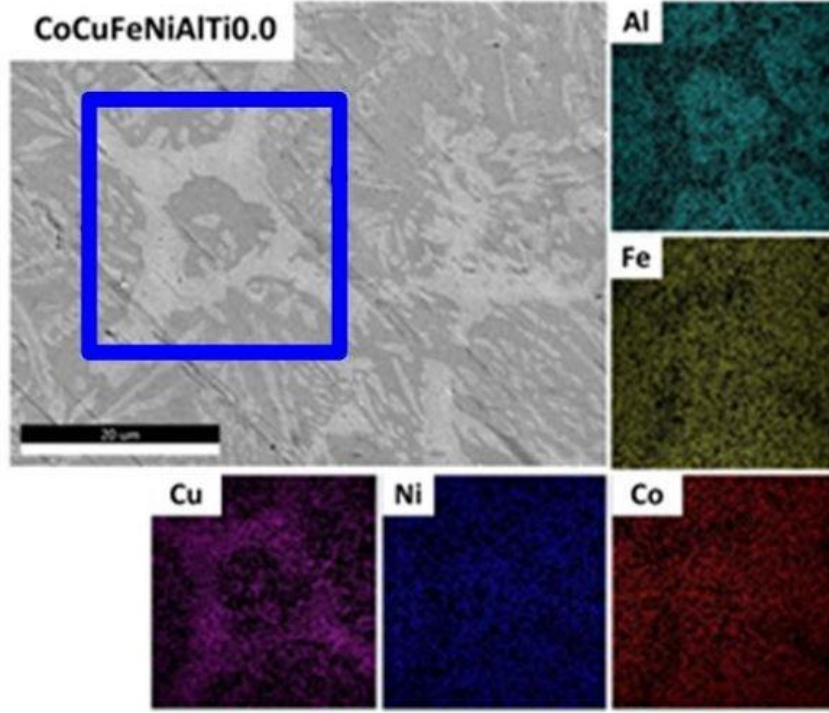
Geri saçılımlı elektron modunda analiz edilen taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, FeCoCuNiAlTi_x yüksek entropili alaşımların mikroyapısını ortaya koymaktadır. Bu YEA'ların detaylı mikroyapısal görünüşleri incelenmiştir. Şekil'de titanyum içermeyen YEA'nın genel mikroyapısını incelediğimizde, iki farklı kontrast bölgesinin oluştuğunu gözlemliyoruz: açık gri ve koyu gri. Bu kontrast, mikroyapıdaki fazların farklı bileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil'deki yüksek büyütme görüntülere daha yakından baktığımızda, açık gri fazın bazı bölgelerde sürekli bölgeler halinde koyu gri fazı sardığını, diğer bölgelerde ise çökelti olarak görüldüğünü görüyoruz. Su soğutmalı bakır pota ile donatılmış bir vakum ark ergitme sistemi kullanılarak üretilmiş olmasına rağmen, FeCoCuNiMn yüksek entropili alaşımı, FeCoCuNiAl alaşımı nispeten daha yüksek bir katılaşma hızı göstermektedir. Katılaşma morfolojisi, soğutma hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir; bu durum, bir önceki başlıkta sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 gösterilen FeCoCuNiMn ve FeCoCuNiAl alaşımlarının X-ışını kırınım desenlerinde görülmektedir. Bu iki alaşımın kırınım desenlerini karşılaştırdığımızda, FeCoCuNiAl alaşımının yarı yükseklikteki pik genişliğinin FeCoCuNiMn alaşımına göre önemli ölçüde daha dar olduğunu fark ediyoruz. Pik yarı genişliğinin bu daralması, FeCoCuNiAl'ın mikroyapısındaki kristallerin FeCoCuNiMn'ye kıyasla daha büyük olduğunu

göstermektedir. Literatürde, Liu ve arkadaşları bakır içeren $Al_xCoCrCuFeNi$ YEA hakkında rapor vermişlerdir (Yuhua Chen vd., 2022). Alüminyum içermeyen $CoCrCuFeNi$ alaşımının dendritik olarak katılaştığını, ancak alüminyum eklenmesiyle katılaşma morfolojisinin eş eksenli bir yapıya dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu tanelerin ortalama boyutu artan alüminyum içeriğiyle birlikte azalmıştır. Tong ve ark. (Y. Liu vd., 2019), $CoCrCuFeNi$ yüksek entropili alaşıma alüminyum eklenmesiyle benzer bir mikroyapı oluşumunu belgelemiştir; bu da mevcut çalışmanın bulgularıyla uyumludur. Daha önce belirtildiği gibi, alüminyum içeren $FeCoCuNi$ alaşımının mikroyapısı iki farklı kontrast oluşumu sergilemiştir. Kontrasttaki bu varyasyonlar, farklı bileşimlere sahip elementlerin atomik ağırlıklarındaki farklılıklara atfedilmiştir. Bu fenomen, gözlemlenen mikroyapısal özellikleri ve bunların alaşımın bileşimiyle olan ilişkisini açıklamaktadır.

$FeCoCuNiAl$ alaşımı için SEM, noktasal EDS (Şekil 3.12) ve EDS (Şekil 3.13) haritası incelenmiştir. Yapılan incelemede; Mikroyapıdaki koyu gri alanın (Spot 1) EDS analizi, bu bölgenin kimyasal kompozisyonunu ortaya koymuştur. Bu analize göre, söz konusu alan yüzde 17,84 Fe, yüzde 20,12 Co, yüzde 13,10 Cu, yüzde 22,59 Ni ve yüzde 26,14 Al içermektedir. Bu bulgular, incelenen koyu gri bölgenin özellikle alüminyum ve nikel elementlerinin atomları bakımından zengin olduğunu işaret etmektedir. Öte yandan, mikroyapıdaki açık gri bölgenin (Spot 2) kimyasal bileşimi farklılık göstermektedir. Bu alan yüzde 11,16 Fe, yüzde 10,80 Co, yüzde 49,36 Cu, yüzde 14,99 Ni ve yüzde 13,69 Al içeriğine sahiptir. Enerji dağılımlı EDS analizinin sonuçları, açık gri olarak görünen bu bölgenin oluşumuna dair önemli bilgiler sunmaktadır. Bu veriler ışığında, açık gri alanın alaşımın katılaşma süreci esnasında meydana gelen bakır ayrışması neticesinde oluştuğu ve bakır elementi açısından zengin bir bölge olduğu sonucuna varılmaktadır.



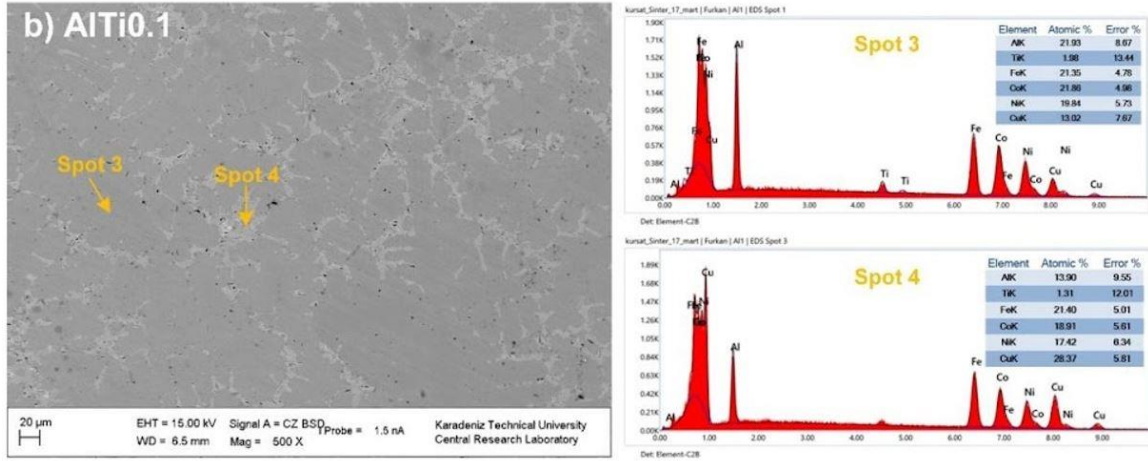
Şekil 3.12. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAl alaşımasının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları



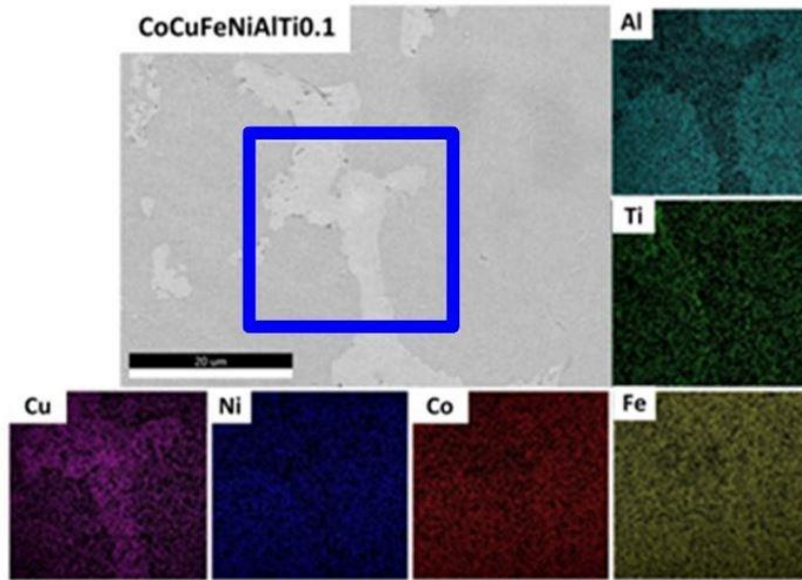
Şekil 3.13. FeCoCuNiAl alaşımasının EDS harita analizi

FeCoCuNiAlTi_{0.1} alaşımı için SEM, noktasal EDS (Şekil 3.14) ve EDS haritası (Şekil 3.15) incelenmiştir. Yapılan incelemede; mikroyapıdaki koyu gri alanın (Spot 3) EDS analizine göre, söz konusu alan yüzde 21,35 Fe, yüzde 21,86 Co, yüzde 13,02 Cu, yüzde 19,84 Ni, yüzde 21,93 Al ve yüzde 1,98 Ti içermektedir. Mikroyapıdaki açık gri bölgenin

(Spot 4) kimyasal bileşimi incelendiğinde yüzde 21,40 Fe, yüzde 18,91 Co, yüzde 28,37 Cu, yüzde 17,42 Ni, yüzde 19,90 Al ve yüzde 1,31 Ti içeriğine sahiptir.

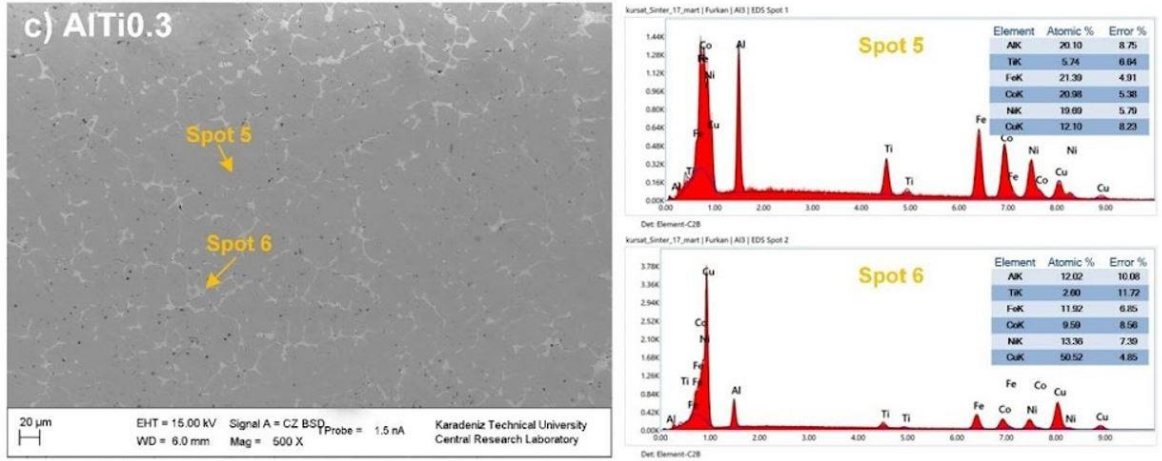


Şekil 3.14. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAlTi0.1 alaışımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları

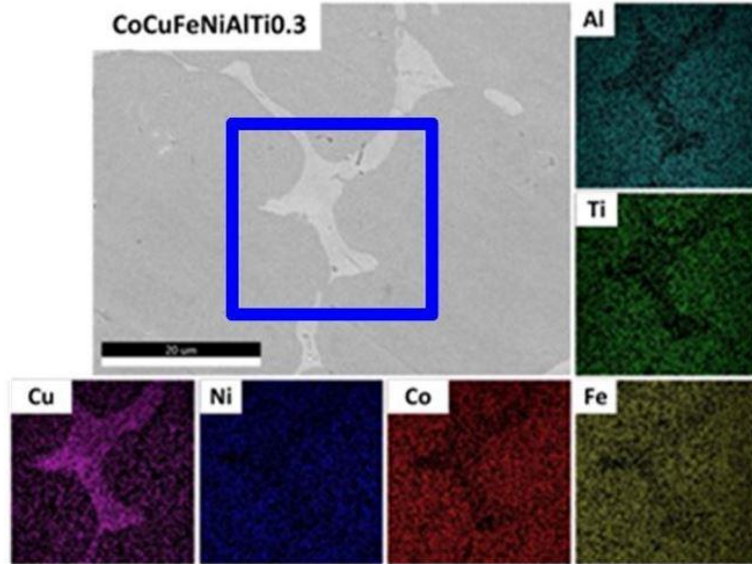


Şekil 3.15. FeCoCuNiAlTi_{0.1} alaışımının EDS harita analizi

FeCoCuNiAlTi_{0.3} alaşıımı için SEM, noktasal EDS (Şekil 3.16) ve EDS haritası (Şekil 3.17) incelenmiştir. Yapılan incelemede; Mikroyapıdaki koyu gri alanın (Spot 5) EDS analizine göre, söz konusu alan yüzde 21,39 Fe, yüzde 20,98 Co, yüzde 12,10 Cu, yüzde 19,69 Ni, yüzde 20,10 Al ve yüzde 5,74 Ti içermektedir. Mikroyapıdaki açık gri bölgenin (Spot 6) kimyasal bileşimi incelendiğinde yüzde 11,92 Fe, yüzde 9,59 Co, yüzde 50,52 Cu, yüzde 13,36 Ni, yüzde 12,02 Al ve yüzde 2,60 Ti içeriğine sahiptir.

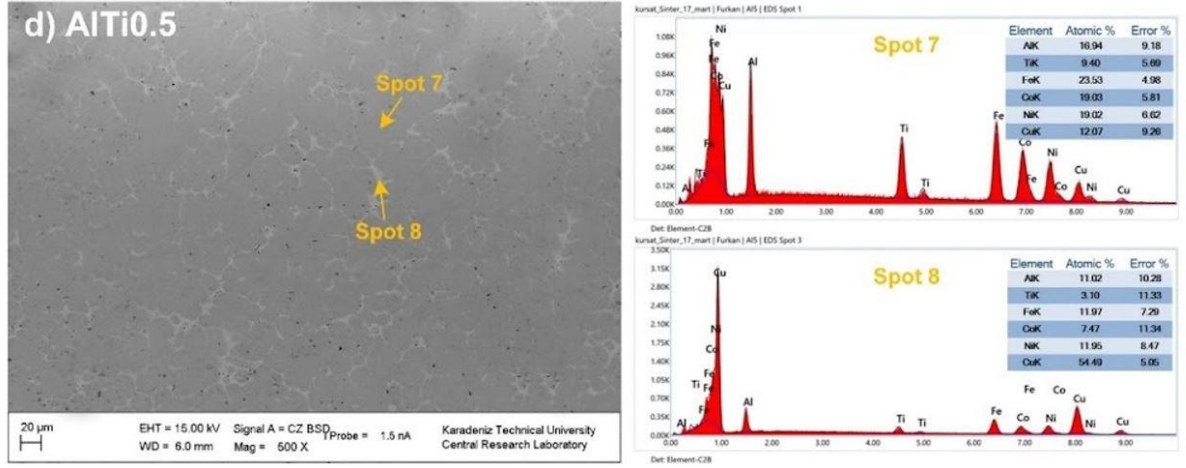


Şekil 3.16. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAlTi_{0.3} alaışımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları

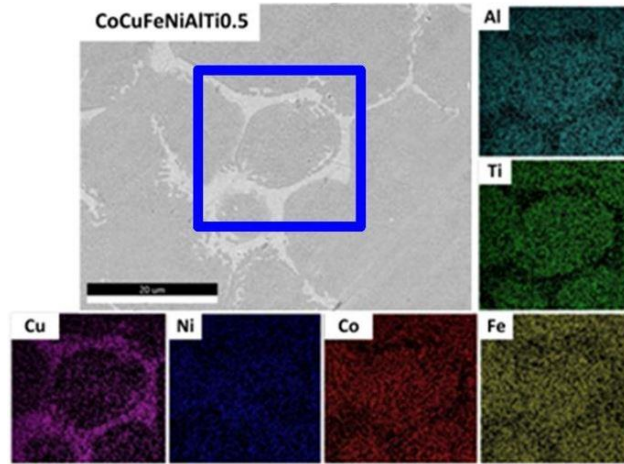


Şekil 3.17. FeCoCuNiAlTi_{0.3} alaışımının EDS harita analizi

FeCoCuNiAlTi_{0.5} alaşımı için SEM, noktasal EDS (Şekil 3.18) ve EDS haritası (Şekil 3.19) incelenmiştir. Yapılan incelemede; Mikroyapıdaki koyu gri alanın (Spot 7) EDS analizine göre, söz konusu alan yüzde 23,53 Fe, yüzde 19,03 Co, yüzde 12,07 Cu, yüzde 19,02 Ni, yüzde 16,94 Al ve yüzde 9,40 Ti içermektedir. Mikroyapıdaki açık gri bölgenin (Spot 8) kimyasal bileşimi incelendiğinde yüzde 11,97 Fe, yüzde 7,47 Co, yüzde 54,49 Cu, yüzde 11,95 Ni, yüzde 11,02 Al ve yüzde 3,10 Ti içeriğine sahiptir.



Şekil 3.18. Ark ergitme ile üretilen FeCoCuNiAlTi_{0.5} alaşımının SEM analizi; sol sütunda geri saçılmış görüntüler, sağ sütunda farklı bölgelerdeki nokta EDS analiz sonuçları



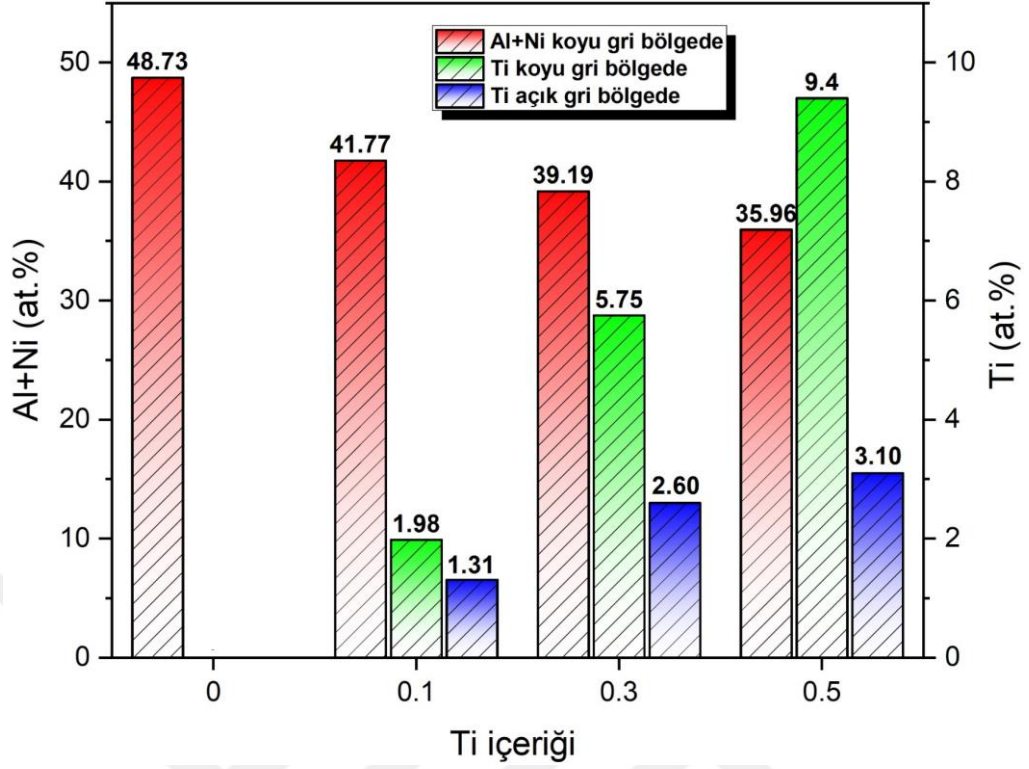
Şekil 3.19. FeCoCuNiAlTi_{0.5} alaşımının EDS harita analizi

EDS analizinin sonuçları, mikroyapıdaki açık gri bölgenin oluşum mekanizmasını aydınlatmaktadır. Bu veriler, söz konusu bölgenin alaşımın katılaşma süreci esnasında gerçekleşen bakır ayrışması neticesinde meydana geldiğini ve bakır elementi açısından

zengin bir alan olduğunu göstermektedir. Mikroyapıdaki fazların kimyasal kompozisyonundaki bu farklılık, Şekil 3.13'de sunulan EDS haritasında da açıkça gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.13'ü incelediğimizde, koyu gri bölgeyi çevreleyen açık arka alanın bakır açısından zengin olduğu görülmektedir. Buna karşılık, koyu renkli bölgelerin alüminyum ve nikel bakımından zengin olduğu dikkat çekmektedir. Demir ve kobalt elementlerinin ise nispeten homojen bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. Alüminyum ve nikel bakımından zengin olan koyu gri faz, HMK veya B2 fazına tekabül etmektedir. Öte yandan, bakır açısından zengin olan faz, YMK yapıya karşılık gelmektedir. Choi ve arkadaşları (Tong vd., 2005), ark eritme yöntemiyle hazırladıkları $(\text{FeCoCuNi})_{0.8}\text{Al}_{0.2}$ alaşımının benzer bir mikroyapı sergilediğini tespit etmişlerdir. Onların analizleri, geniş bir alana yayılan dendritlerin alüminyum ve nikel bakımından zengin B2 fazından oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu arada, dendritler arasındaki bölgeler, atomik olarak yüzde 57 bakır içeren YMK yapılardan meydana gelmekteydi. Ayrıca, onların çalışmaları mikroyapıdaki çökelti formundaki açık gri bölgelerin de tıpkı bu araştırmada olduğu gibi, bakırca zengin bir fazdan oluştuğunu göstermektedir. Çok bileşenli yüksek entropili alaşımların mikroyapılarında katı çözeltilerin oluşumunda belirli termodinamik faktörler kritik bir rol oynamaktadır. Bu faktörler, karışım entalpisi ve alaşımı oluşturan metal atomları arasındaki boyut farklılıklarıyla yakından ilişkilidir (Choi vd., 2023; Sheng ve Liu, 2011). Karıştırma entalpisi -5 ile -20 kJ/mol aralığında olduğunda ve atomik boyut farkı yüzde 5,6 ile yüzde 8 civarında seyrettiğinde, bu durum katı bir çözeltili fazının oluşumunu hızlandırıcı bir etki yaratır. Alüminyumun durumu özel bir dikkat gerektirmektedir. Alüminyum, önemli ölçüde yüksek bir negatif karıştırma entalpisine sahiptir. Bu özelliği nedeniyle, alüminyumun varlığı alaşım içindeki atomik boyutlarda değişikliklere yol açar. Bu değişim, mikroyapıda bir HMK veya B2 katı çözeltili fazının gelişimini teşvik eder. Diğer taraftan, bakır elementi alüminyum hariç diğer metal atomlarının çoğuyla pozitif bir karışım entalpisine sahiptir. Bu özellik, katılaşma işlemi sırasında bakırın ayrılmaya meyilli olmasına neden olur. Sonuç olarak, bu ayrışma süreci FeCoCuNiAl yüksek entropi alaşımının mikroyapısında sürekli olarak ikinci bir katı çözeltili fazının oluşmasına veya çökmesine sebebiyet vermiştir.

Titanyum içeren yüksek entropili alaşımların mikroyapıları incelendiğinde, açık gri bölgelerin titanyum içermeyen alaşıma kıyasla daha yoğun bir şekilde var olduğu gözlemlenmektedir. Geri saçılımlı elektron görüntüleri, titanyum içeriğinin artmasıyla birlikte açık gri bölgelerin sıklığının giderek azaldığını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Titanyum elementi ilave edilmiş FeCoCuNiAl alaşımlarının mikroyapısında en dikkat çekici sonuç, FeCoCuNiAlTi_{0.1} yüksek entropili alaşımında tespit edilmiştir. Bu alaşımın mikroyapısındaki fazların kimyasal bileşimi detaylı bir şekilde incelendiğinde, noktasal EDS analizinde 4 numaralı noktada yüzde 28,37 atomik Cu içeren açık gri renkli faz bölgeleri belirlenmiştir. Bu bölgeler, daha önceki alaşımlarda gözlemlenen bakır açısından zengin alanların yerini almış görünmektedir. Bu gözlem, Şekil 3.15'de sunulan EDS harita sonuçlarında da açıkça fark edilmektedir. Mikroyapı incelendiğinde, alüminyum ve bakır elementleri hariç tüm elementlerin neredeyse homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Diğer iki alaşım olan 0,3 ve 0,5 titanyum içeren FeCoCuNiAl'de ise durum farklılık göstermektedir. Bu alaşımlarda hem noktasal EDS hem de haritalama analizleri yoluyla gözlemlenen demir, kobalt ve titanyum dağılımında belirgin ayrışmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.20'de açıkça görüldüğü üzere, FeCoCuNiAl alaşımına titanyum eklenmesi, mikroyapıdaki koyu gri bölgelerde çözünmüş alüminyum ve nikel oranını azaltırken hem koyu gri hem de açık gri bölgelerde çözünmüş titanyum oranını artırmaktadır. Mikroyapıdaki fazların kimyasal bileşiminde gözlemlenen bu değişim, tamamen atomik boyuttaki farklılıktan ve karışım entalpisindeki değişimden kaynaklanmaktadır. Titanyum elementi, alaşımın bileşimine dahil edildiğinde, sahip olduğu yüksek karışım entalpisi nedeniyle diğer elementlerle güçlü bağlar oluşturma eğilimi gösterir. Bu durum, elementler arasındaki etkileşimi etkilemektedir. Sonuç olarak, titanyumun bu özelliği, alaşım içindeki elementlerin ayrışma eğilimini zayıflatmakta ve daha homojen bir yapının oluşmasına katkıda bulunmaktadır.



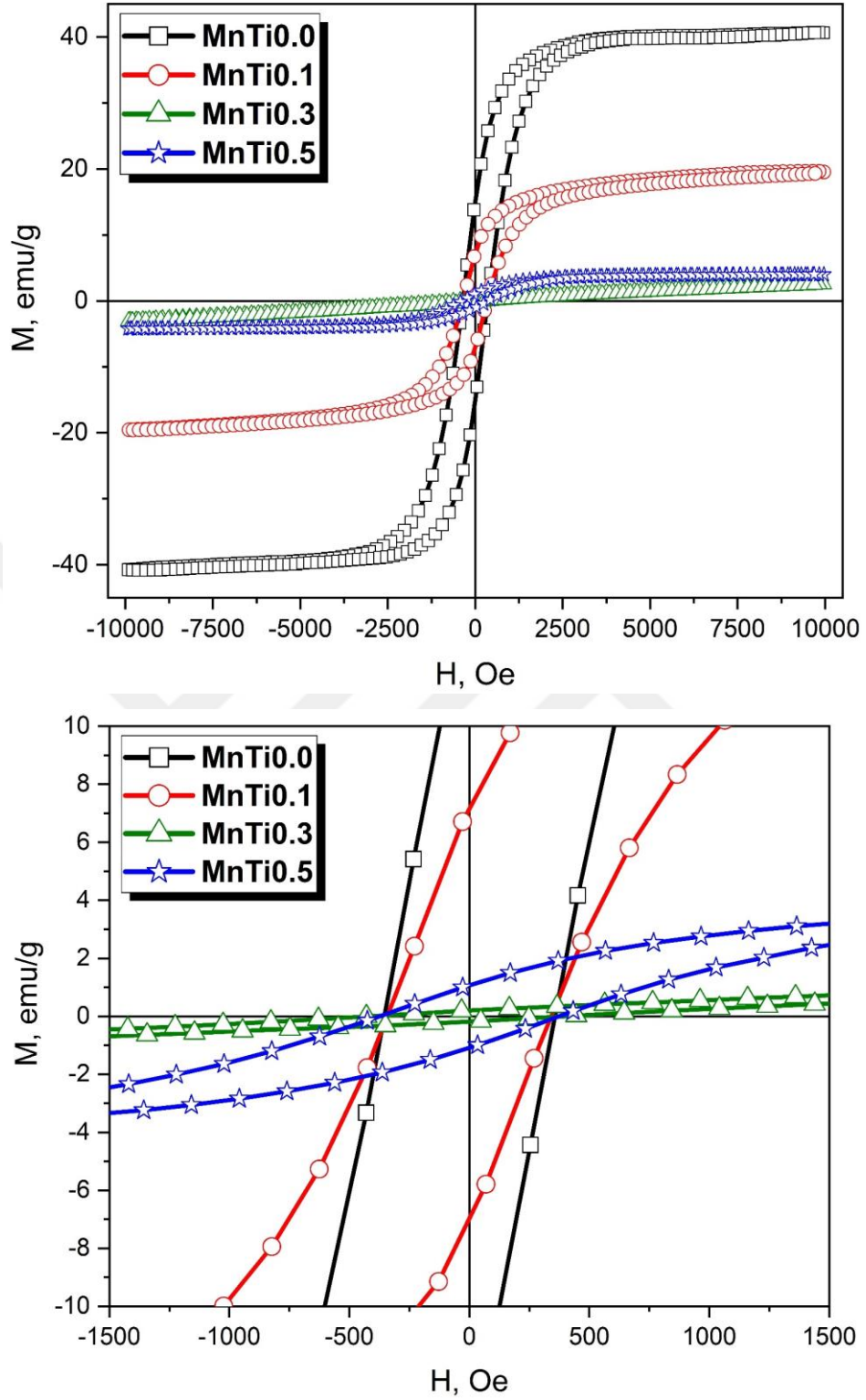
Şekil 3.20. FeCoCuNiAlTi_x mikroyapısında farklı fazlardaki bazı elementlerin değişimi.

3.3. Üretilen Alaşımların Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

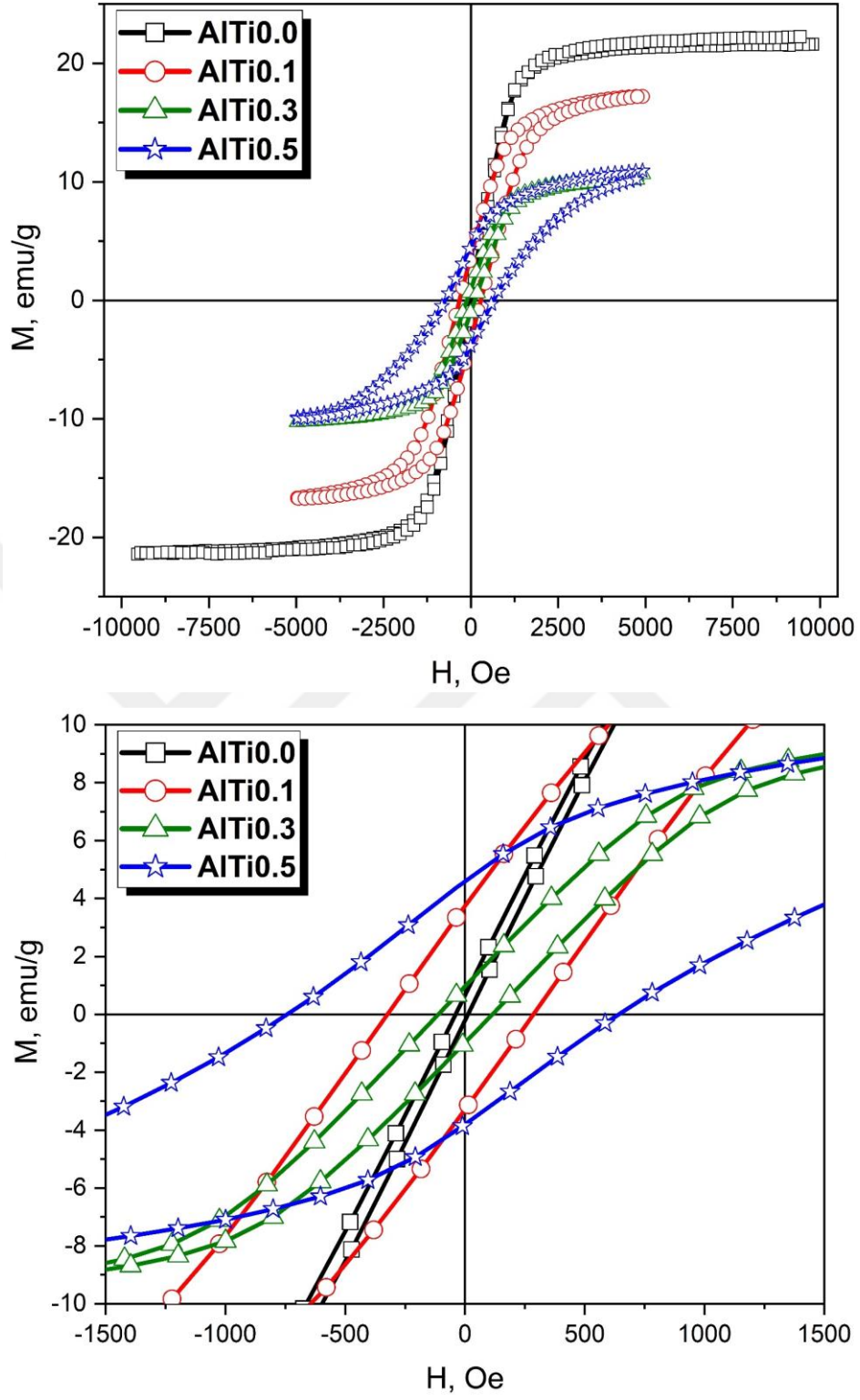
FeCoCuNiMnTi_x ve FeCoCuNiAlTi_x yüksek entropi alaşımlarının manyetik davranışlarını gösteren histerezis eğrileri, oda sıcaklığında 1 Tesla'lık harici manyetik alan uygulanarak elde edilmiş ve Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de sunulmuştur. Her iki FeCoCuNiMTi_x (M=Mn ve Al) yüksek entropi alaşımı için manyetik özellik değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekillerde gösterilen tüm histerezis eğrileri incelendiğinde, YMK, YMK +HMK ve HMK yapılarına sahip olan ve vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen tüm yüksek entropili alaşımların ferromanyetik davranış sergilediği açıkça görülmektedir. Bu araştırma, yüksek çalışma sıcaklıklarında ayrışma eğilimi göstermesi sebebiyle Cr elementini yüksek entropi alaşımı bileşiminden çıkarmayı hedeflemiştir. Bu doğrultuda, Cr içermeyen FeCoCuNiMn ve FeCoCuNiAl alaşımlarının manyetik özelliklerini detaylı bir şekilde ele alıyoruz.

FeCoCuNiMn ve FeCoCuNiAl yüksek entropi alaşımlarının histerezis eğrileri birbirine oldukça benzer görünmesine rağmen, titanyum içermeyen yüksek entropi alaşımları birbirlerinden önemli ölçüde farklı manyetik özellikler sergilemektedir. Titanyum

içermeyen yüksek entropi alaşımlarının mıknatıslanma değerleri karşılaştırıldığında, FeCoCuNiMn alaşımının doygunluk manyetizasyonu (M_s) (40,64 emu/g), FeCoCuNiAl alaşımının doygunluk manyetizasyonundan (21,60 emu/g) neredeyse iki kat daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Doymunluk manyetizasyonunun aksine, kalıcı mıknatıslanma değerleri (M_r) incelendiğinde, FeCoCuNiAl yüksek entropi alaşımında bu değerin neredeyse sıfır olduğu, FeCoCuNiMn alaşımı için ise 14,36 emu/g olduğu gözlemlenmiştir. FeCoCuNiMn ve FeCoCuNiAl alaşımlarının koersivite (H_c) değerleri ölçüldüğünde, sırasıyla 346 Oe ve 38 Oe olarak tespit edilmiştir. Bu manyetik özelliklerden kalıcı mıknatıslanma ve koersivite birlikte değerlendirildiğinde, FeCoCuNiMn yüksek entropi alaşımının sert ferromanyetik özelliğe sahip olduğu, CoCuFeNiAl alaşımının ise yumuşak ferromanyetik özellik gösterdiği anlaşılmaktadır. FeCoCuNiMnTi_x YEA'ların manyetik histerezis eğrileri Şekil 3.21'de, FeCoCuNiAlTi_x YEA'ların manyetik histerezis eğrileri ise Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Oda sıcaklığında FeCoCuNiMnTix YEA'ların manyetik histerezis eğrileri.



Şekil 3.22. Oda sıcaklığında FeCoCuNiAlTi_x YEA'ların manyetik histerezis eğrileri.

Literatürden de bilindiği üzere (Joy vd., 2019; H. Ma vd., 2021; Zhai vd., 2022), CoCuFeNi-tabanlı yüksek entropi alaşımları genellikle YMK yapısında üretilmekte ve mükemmel süneklik özelliği sergilemektedir. Bununla birlikte, bu alaşımların karmaşık yapısı, manyetik özelliklerinin kesin olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, manyetik özelliklerdeki değişimi daha iyi açıklayabilmek için CoCrFeNi yüksek entropi alaşımının manyetik özelliklerini incelemekle başlamak gerekmektedir. YMK yapıdaki CoCrFeNi alaşımında ferromanyetik özelliğe sahip kobalt, demir ve nikel atomları bulunmasına rağmen, bu alaşıma bakır eklenmesi, alaşımın paramanyetik özellik göstermesine neden olmaktadır. İlk olarak, Heisenberg benzeri Hamiltonian denkleminin oluşturduğu Bethe-Slater eğrisine göre, krom elementinin antiferromanyetik bölgede bulunması (atomlar arası negatif değişim etkileşimi) paramanyetik özelliklerin ortaya çıkmasında etkili olmuştur. Wang ve meslektaşları (Baruffi ve Curtin, 2022) yaptıkları çalışmada, döküm halindeki CoCrFeNi alaşımının paramanyetik özelliklere sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca, bakır atomları arasındaki mesafe, Hamiltonian'a göre ferromanyetik özelliklerin ortaya çıktığı kritik mesafeden daha yüksektir. Bu nedenle, bakır diyamanyetik özelliklere sahiptir ve bakır atomları 0,1 Bohr magnetonundan daha düşük indüklenmiş manyetik momente sahiptir. Bu perspektiften bakıldığında, Kormann ve arkadaşları (J.-J. Wang vd., 2022), mutlak sıfır sıcaklığında (0 Kelvin) yoğunluk fonksiyonel teorisi kullanarak hem krom hem de bakır içeren beş bileşenli bir YMK sistem için 0,54 Bohr magnetonu doygunluk mıknatıslanma değerini hesaplamışlardır. Huang ve arkadaşları, kuantum mekaniksel ilk-prensip yöntemini kullanarak hem CrCoCuFeNi hem de CoCuFeNi sistemlerinin toplam manyetik momentlerini atom başına sırasıyla 0,55 Bohr magnetonu ve 1,23 Bohr magnetonu olarak tespit etmişlerdir. Her iki alaşımın toplam manyetik özelliklerindeki farklılığın temel nedeni, krom elementinin antiferromanyetik karakterinden dolayı manyetik momenti azaltması, bakır atomlarının ise herhangi bir net manyetik momente sahip olmamasıdır (Körmann vd., 2015). Mevcut çalışmada, alaşım bileşiminde krom elementinin bulunmaması nedeniyle, incelenen her iki yüksek entropi alaşımı da ferromanyetik özellikler sergilemektedir.

CoCuFeNi-tabanlı yüksek entropi alaşımına Mn ve Al elementlerinin eklenmesi sonucunda üretilen her iki yüksek entropi alaşımının da ferromanyetik özellik sergilemeye devam ettiği, şekillerde sunulan verilerden açıkça anlaşılmaktadır. Bu noktada, CoCuFeNi-tabanlı yüksek entropi alaşımına Mn ilavesinin manyetik özellikler üzerindeki etkisinin tartışılması, öncelikli olarak ele alınması gereken bir konudur. Bunun nedeni, Mn tıpkı Cr

gibi antiferromanyetik bir element olmasıdır. Mn ve Cr elementleri arasındaki temel farklar, net veya toplam manyetik moment değeri ve karışım entalpisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bethe-Slater eğrisi incelendiğinde, manganın ferromanyetik bölgeye daha yakın konumlandığı ve bu nedenle kroma göre daha yüksek bir değişim etkileşimine sahip olduğu görülmektedir. Bu özelliği sayesinde, CoCuFeNiMn alaşımı ferromanyetik özellik gösterebilmektedir. Cr içeren yüksek entropi alaşımlarının döküm halinde paramanyetik davranış sergilemesinin nedeni, daha önce de belirtildiği gibi, Cr antiferromanyetik özelliklere sahip olmasının yanı sıra, mikroyapıda segregasyona neden olarak Cr bakımından zengin YMK faz bölgeleri oluşturmaktadır. Bu alaşımların paramanyetik özellikler göstermesinin bir diğer önemli sebebi de kromun katılaşma sürecinde ayrılarak Cr açısından zengin bir faz meydana getirmesidir. Ancak Mn içeren yüksek entropili alaşımlarda durum farklıdır. Bu alaşımlarda diğer fazlar ayrılmaz ve homojen tek bir katı çözelti fazı oluşur. Zhang ve arkadaşları (Huang vd., 2017) tarafından yapılan bir araştırmada, üretilen CoCrFeNiMn yüksek entropi alaşımı mikroyapısında sinterleme işleminden sonra ferromanyetik demir, kobalt ve nikelden yoksun krom bakımından zengin bölgeler oluştuğu, ancak mangan atomlarının dağılımının krom atomlarına kıyasla nispeten homojen olduğu rapor edilmiştir.

Bir başka çalışmada Zhang ve arkadaşları, lazer kaynağı ile inert gaz yoğunlaştırma (IGC) yöntemini kullanarak CoCrFeNiMn yüksek entropi alaşımı üretmişlerdir. Araştırmacılar, döküm yöntemiyle üretilen yüksek entropi alaşımının paramanyetik özelliklere sahip olduğunu, buna karşılık IGC yöntemiyle üretilen yüksek entropi alaşımının ferromanyetik özellikler sergilediğini tespit etmişlerdir. IGC yöntemiyle üretilen CoCrFeNiMn alaşımında ferromanyetik özelliklerin ortaya çıkmasının temel nedeninin, lazer kaynağı sayesinde gerçekleşen hızlı katılaşmaya bağlı olarak oluşan homojen mikroyapı olduğunu açıklamışlardır (Yongyun Zhang vd., 2021). Wang ve arkadaşları tarafından yakın zamanda gerçekleştirilen bir çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmıştır (J. Wang vd., 2021). CoCrFeNiMn yüksek entropi alaşımının düşük sıcaklıklarda bile paramanyetik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Mevcut çalışmada elde edilen bulgular, literatürdeki verilerle birlikte değerlendirildiğinde, vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen alaşımda dahi ferromanyetik özelliklerin oluşmasını sağlayan üç farklı etken ortaya çıkmaktadır:

1. Bakırın diyamanyetik özellik göstermesi, faz ayrılmasını önlemektedir.
2. Mangan elementi mikroyapıda homojen olarak dağılmaktadır.

3. Mangan atomları arasındaki güçlü değişim etkileşimleri, krom atomlarına kıyasla daha yüksektir ve mangan elementi Bethe-Slater eğrisinde ferromanyetik bölgeye kroma göre daha yakın konumlanmıştır.

CoCuFeNiMn alaşımasının temel özelliklerinden biri, nanoyapısal ferromanyetik CoCrFeNiMn alaşımından farklı bir zorlayıcı kuvvete sahip olmasıdır.

CoCuFeNiMn yüksek entropi alaşımında gözlemlenen duruma benzer şekilde, CoCuFeNiAl alaşımında da Mn elementi yerine Al ilavesi ile ferromanyetik davranış ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, paramanyetik özellik gösteren alüminyumun, tıpkı diyamanyetik özellik gösteren bakır gibi manyetik olmayan özelliklere sahip olmasıdır. Titanyum içermeyen CoCuFeNiAl alaşımının histerezis eğrisi incelendiğinde, doygunluk mıknatıslanmasının CoCuFeNiMn alaşımına kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Manyetik doygunluktaki bu azalmanın en önemli sebebi, alüminyum atomu başına düşen toplam manyetik momentin 0,1'den daha az olmasıdır. Bu durum mangan elementi için geçerli değildir. Bu nedenle, mangan içeren CoCuFeNi bazlı alaşımın manyetik doygunluk değeri, CoCuFeNiAl alaşımından daha yüksek çıkmaktadır.

Bir diğer önemli faktör ise, birinci başlıkta sunulan XRD analizine göre YMK sahip CoCuFeNi-tabanlı yüksek entropi alaşımına Al ilavesinin, YMK yapının yanı sıra HMK yapının da oluşmasına neden olmasıdır. Doygunluk mıknatıslanması (MS) ile mikroyapıda oluşan fazlar arasındaki ilişki, aşağıdaki Denklem 5 ile ifade edilmektedir (Tan vd., 2022):

$$\Delta M_S = (M_{S,HMK} - M_{S,YMK})\Delta V_{HMK} \quad (6)$$

Bu denklemde ΔM_S Doygunluk Manyetizasyonu değişimi, ΔV_{HMK} HMK fazının hacim fraksiyonundaki değişimi, $M_{S,HMK}$ ve $M_{S,YMK}$ ise sırasıyla HMK ve YMK fazlarının doygunluk mıknatıslanmasını temsil etmektedir.

Yüksek entropi alaşımı sisteminin doygunluk mıknatıslanması, faz yapısı ile yakından ilişkilidir. Her iki alaşım karşılaştırıldığında, Mn yerine Al ilavesinin HMK yapının oluşumunu desteklediği görülmektedir. Bu durumda, Denklem 6'daki ΔV_{HMK} değeri sıfırdan büyüktür ($\Delta V_{HMK} > 0$). Bu bilgiye dayanarak, Al içeren alaşımın doygunluk mıknatıslanması değerinin Mn içeren alaşımdan daha yüksek olması beklenebilir. Ancak, deneysel sonuçlar bunun aksini göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Denklem 6'da sunulan değişkenlerin aynı kimyasal bileşime sahip alaşımların karşılaştırılması için kullanılması

gerektiğidir. Buna ek olarak, yapılan araştırmalar (Q. Zhang vd., 2017) Al'nin manyetik olmayan özellikleriyle hem YMK hem de HMK fazlarında net manyetik momentin azalmasına yol açtığını göstermektedir. Net manyetik momentteki bu azalma, manyetik özellik göstermeyen alaşım elementi Al'nin, ferromanyetik özellik gösteren demir, kobalt ve nikel alaşım elementleri ile neredeyse hiç polarize olmaması veya anti-polarize olmasından kaynaklanmaktadır.

FeCoCuNiM (M=Mn ve Al) yüksek entropi alaşımına Ti elementi eklendiğinde, her iki alaşım türünde de doyumluk mıknatıslanma değerlerinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Titanyumun FeCoCuNiMnTi_x yüksek entropi alaşımlarının koersivitesi üzerinde belirgin bir etkisi görülmezken, FeCoCuNiAlTi_x yüksek entropi alaşımlarının koersivitesi Ti oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

FeCoCuNiMnTi_x alaşımında, Ti oranı x'in 0.1, 0.3 ve 0.5 değerleri için sırasıyla 19.6, 2.43 ve 2.74 emu/g manyetik doyumluk değerleri elde edilmiştir. Bu alaşımın koersivitesi, tüm titanyum oranları için yaklaşık olarak 346 Oersted olarak tespit edilmiştir. Mıknatıslanma değerlerindeki değişimin, Mn ve Ti atomlarının kafes içindeki konumları ve dağılımları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Mangan-titanyum ilişkisinin, yüksek entropili alaşımların manyetik özelliklerini inceleyen teorik çalışmalarda henüz detaylı olarak ele alınmadığını belirtmek önemlidir. Bu nedenle, mevcut araştırma bu ilişkiyi aydınlatmayı hedeflemektedir. Minimum enerji prensibine dayanarak, YMK kafesi içinde tercihli bir atomik yer değiştirme gerçekleşir. Bu süreçte, bir titanyum atomu en yakın komşu mangan atomu ile yer değiştirir. Bu durum, düzensiz değişim bölgelerinin (mangan-titanyum) oluşmasına ve aynı zamanda titanyum bölgelerini (manganez-titanyum) çevreleyen çok sayıda mangan atomunun varlığına yol açar. Sonuç olarak, bu düzenleme mangan-mangan atomları arasındaki en yakın mesafeyi azaltmaya hizmet eder ve YMK kristalinde gözlemlenen antiferromanyetik bir durumla sonuçlanır. FeCoCuNiMnTi alaşımının dendritik bölgesinde (YMK yapıda) artan titanyum ve mangan içeriği ile alaşımın genel manyetik momentinde belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş, fazla mangan atomlarıyla ilişkili antiferromanyetik manyetik momentlere atfedilebilir. Benzer bir sonuç, Guan ve meslektaşları tarafından gerçekleştirilen teorik bir çalışmada detaylı olarak açıklanmıştır (Huang vd., 2016). Bu çalışmada, basitçe ifade etmek gerekirse, doyumluk mıknatıslanmalarındaki değişimin temel nedeni, Mn elementinin YMK yapıdaki çözünürlüğünün Ti oranı ile artmasıdır. Bu araştırmanın sonuçları, literatürde yer alan benzer bir alaşım olan TiFeNiCrMn alaşımının manyetik özellikleri ile karşılaştırıldığında (Guan

vd., 2021), TiFeNiCrMn yüksek entropi alaşımının 2,28 emu/g'lık bir doğunluk mıknatıslanmasına ve 225,83 Oersted'lik bir koersiviteye sahip olduğu görölmektedir. Bu sonuçlar, alaşım bileşimine Co ile birlikte Cr yerine Cu eklenmesinin, 0,1 oranında Ti içeren alaşımda daha yüksek bir doğunluk mıknatıslanma değeri elde edilebileceğini göstermektedir. Aynı çalışmada, Mn yerine Co içeren TiFeNiCrCo alaşımında nispeten daha yüksek bir doğunluk mıknatıslanması (24,44 emu/g) elde edilmiştir. Bu da düşük oranda titanyumun doğunluk mıknatıslanmasını azaltmasına rağmen, benzer alaşımlara kıyasla daha iyi sonuçlar sunabileceğini göstermektedir.

FeCoCuNiAl yüksek entropi alaşımına titanyum eklenmesinin hem manyetik doğunlukta (M_s) hem de koersivitede (H_c) değişikliklere yol açtığı daha önce belirtilmişti. 0,1 oranında titanyum ilavesi, doğunluk mıknatıslanma değerinin 21,60 emu/g'dan 17,14 emu/g'a düşmesine neden olmuştur. Bununla birlikte, FeCoCuNiAlTi_{0,3} ve FeCoCuNiAlTi_{0,5} yüksek entropi alaşımlarında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir, çünkü bu alaşımların doğunluk mıknatıslanması değerleri oda sıcaklığında sırasıyla 10,66 ve 10,93 emu/g olarak ölçölmüştür. Doğunluk Manyetizasyonu değişim Denklem 5'e göre değerlendirildiğinde, Ti ilavesiyle YMK fazdan HMK faza dönüşöümün artmasıyla doğunluk mıknatıslanmasının artması beklenirdi. Bununla birlikte, bu denklemin hacim merkezli kübik faz oranındaki bir artışın doğrudan doğunluk mıknatıslanmasında bir artışa neden olduğu genelleştirilmiş bir iddiayı desteklemediğine dikkat etmek önemlidir. Titanyum ilavesinden kaynaklanan Doğunluk Manyetizasyonu azalma, titanyumun alüminyum-nikel bakımından zengin HMK fazı içinde çözünmesine bağlanmaktadır. Bilindiği üzere, önemli kalıcı ferromanyetik malzemeler olan AlNiCo alaşımlarında, alüminyum ve nikel zayıf ferromanyetik özelliklere sahip fazlar olarak tanımlanır (Mishra vd., 2017; Zhou vd., 2019). Titanyum gibi manyetik olmayan metal atomlarının HMK yapıya dahil edilmesi, manyetik doğunluğun azalmasına yol açar. FeCoCuNiAl alaşımının aksine, FeCoCuNiAlTi_x yüksek entropi alaşımları, AlNiCo mıknatıslara benzer şekilde kimyasal şekil anizotropisi nedeniyle sert ferromanyetik özellikler sergilemektedir. Bu yüksek entropi alaşımlarının koersiviteleri şu şekilde ölçölmüştür: Titanyum içermeyen alaşım için 38 Oersted, 0,1 oranında titanyum içeren alaşım için 331 Oersted, 0,3 oranında titanyum içeren alaşım için 118 Oersted ve 0,5 oranında titanyum içeren alaşım için 748 Oersted. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, CoCrCuFeNiTi alaşımında süperparamanyetik özellikler elde edilmiştir (H. Chen vd., 2023). Mevcut çalışmada ise krom yerine alüminyum bulunması, alaşımın manyetik karakterini tamamen değişirmiş ve sert manyetik özelliklerin ortaya çıkmasına

neden olmuştur. Chen ve arkadaşlarının (XF Wang vd., 2007) gerçekleştirdikleri araştırmada, $\text{Fe}_{0.2}\text{CoNiAlCu}_{0.4}\text{Ti}_{0.4}$ yüksek entropi alaşımında koersivite değeri 895 Oersted olarak tespit edilmiştir.



4. SONUÇLAR

Bu araştırma, Cantor alaşımasının modifikasyonlarını ve bunların manyetik özelliklerini incelemektedir. İlk olarak, Cr yerine Cu kullanılarak FeCoCuNiMn yüksek entropi alaşımı (YEA) oluşturulmuştur. Bu değişiklik, Cantor alaşımasının yüksek sıcaklıklardaki bozunma ve antiferromanyetik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. İkinci bir modifikasyon olarak, Mn yerine Al ikame edilerek FeCoCuNiAl HEA üretilmiş ve bu değişikliğin manyetik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, her iki alaşıma da farklı oranlarda (0.1, 0.3 ve 0.5) Ti eklenerek, yapısal ve manyetik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir.

Araştırmanın sonuçları:

- FeCoCuNiMn alaşımasının Cantor alaşımına benzer şekilde YMK fazı oluşturduğunu göstermiştir. Ancak, Mn'nin Al ile değiştirilmesi, YMK yapısının yanı sıra B2 ve HMK fazlarının oluşumuna yol açmıştır. Ti ilavesi, FeCoCuNiMn alaşımasının faz yapısını değiştirmezken, FeCoCuNiAl alaşımında YMK yapısından HMK yapısına dönüşüme neden olmuştur.
- Mikroyapısal açıdan, FeCoCuNiMn alaşımında dendritik bir yapı gözlemlenmiştir. Ti ilavesi bu yapıyı inceltmiş ve Ti bakımından zengin bir YMK fazının oluşumuna yol açmıştır. Öte yandan, FeCoCuNiAl alaşımında Al-Ni ve Cu açısından zengin iki fazlı bir mikroyapı oluşmuştur. Bu durum, Mn yerine Al kullanımının dendritik katılaşma morfolojisini tamamen değiştirdiğini göstermektedir.
- Manyetik özellikler açısından, FeCoCuNiMn ve FeCoCuNiAl alaşımları sırasıyla 40,64 ve 21,60 emu/g doygunluk mıknatıslanması sergilemiştir. Bu alaşımların koersiviteleri ise sırasıyla 346 Oe ve 38 Oe olarak ölçülmüştür. Ti ilavesi, FeCoCuNiMn alaşımasının koersivitesini değiştirmezken, doygunluk mıknatıslanmasında önemli bir düşüşe neden olmuştur. %0.3 Ti ilavesi ile bu değer 2,43 emu/g'a kadar düşmüştür.
- FeCoCuNiAl alaşımına Ti eklenmesi, başlangıçta yumuşak manyetik özellikler gösteren alaşımı sert manyetik özelliklere sahip hale getirmiştir. %0,5 Ti ilavesi ile alaşımın koersivitesi 748 Oe'ye yükselmiştir. Bununla birlikte, Ti ilavesi FeCoCuNiAl alaşımasının manyetik doygunluğunu olumsuz etkilemiştir. %0,1, %0,3 ve %0,5 Ti ilavesi ile mıknatıslanma değerleri sırasıyla 17,11, 10,66 ve 10,93 emu/g olarak ölçülmüştür.

- Yapılan incelemeler sonucu üretilen alaşımlardan yumuşak ferromanyetik özellikler gösteren FeCoCuNiAl alaşımı koversivite ve kalıcı mıknatıslanma özellikleri bakımından ticari kullanım için en uygun olan alaşım olarak gözlemlenmiştir. Ancak bu alaşımında doygunluk manyetizasyon değeri oldukça düşüktür bu değerinde arttırılmasıyla bu alaşım sistemi ticari açıdan rakipleriyle kıyaslanabilir. FeCoCuNiAlTi_x alaşım sistemi için Ti ilavesinin arttıkça manyetik özellikleri olumsuz yönde etkilediği söylenebilir.
- FeCoCuNiMnTi_x alaşım sistemi incelendiğinde ise en iyi manyetik özellikleri Ti içermeyen FeCoCuNiMn sert ferromanyetik alaşımın sahip olduğu gözlemlendi ancak bu alaşımında ticari olarak rakipleriyle mücadele edebilmesi için doygunluk manyetizasyonu, kalıcı mıknatıslanma ve koversivite değerlerinin hepsinin geliştirilmesi gerekmektedir. FeCoCuNiMnTi_x alaşım sistemi içinde Ti ilavesinin artmasıyla birlikte manyetik özelliklerin kötüleştiği gözlemlendi.

Bu sonuçlar, element ikamesi ve Ti ilavesinin YEA'ların yapısal ve manyetik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu modifikasyonlar, alaşımların faz yapısını, mikroyapısını ve manyetik özelliklerini kontrol etmek için etkili yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu kapsamlı çalışmada, yüksek entropi alaşımlarındaki element ikamelerinin ve Ti ilavesinin manyetik ve yapısal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Daha detaylı mikroyapı analizleri için taramalı elektron mikroskopu (TEM) kullanılabilir. Bu sayede, manyetik özelliklerle mikroyapı arasındaki korelasyon daha iyi anlaşılabilir. Bu sayede malzemede manyetik domainler ve bunların yönelimleri incelenerek malzemenin manyetik davranışında domainlerin etkisi yorumlanabilir. Ayrıca, nanometre ölçeğindeki manyetik parçacıkların veya inklüzyonların varlığı, boyutu ve dağılımı da incelenir, çünkü bunlar malzemenin makroskopik manyetik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Son olarak, malzemenin kristal yapısı ile manyetik özellikleri arasındaki ilişki de TEM analizi sayesinde incelenebilir, bu da malzemenin manyetokristallin anizotropisi hakkında değerli bilgiler sağlar.
- Manyetik özelliklerin daha detaylı incelenmesi için Mössbauer Spektrometresi ve Spin Polarize İnelastik Nötron Saçılımı cihazlarında ölçümler yapılabilir. Bu sayede, manyetik etkileşimlerin doğası daha iyi anlaşılabilir.
- Farklı geçiş elementleri (Cr ve V gibi), nadir toprak elementleri (Nd ve Dy gibi) ve Si gibi hafif elementlerde farklı kompozisyonlarda eklenerek manyetik özelliklerin geliştirilmesi hedeflenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Baruffi, C., & Curtin, W. (2022). Theory of spontaneous grain boundary roughening in high entropy alloys. *Acta Materialia*, 234, 118011.
- Borkar, T., Chaudhary, V., Gwalani, B., Choudhuri, D., Mikler, C. V., Soni, V., & Banerjee, R. (2017). A combinatorial approach for assessing the magnetic properties of high entropy alloys: role of Cr in $\text{AlCo}_x\text{Cr}_{1-x}\text{FeNi}$. *Advanced Engineering Materials*, 19(8), 1700048.
- Cantor, B., Chang, I., Knight, P., & Vincent, A. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science Engineering: A*, 375, 213-218.
- Chaudhary, V., Chaudhary, R., Banerjee, R., & Ramanujan, R. V. (2021). Accelerated and conventional development of magnetic high entropy alloys. *Materials Today*, 49, 231-252.
- Chen, D., He, F., Han, B., Wu, Q., Tong, Y., Zhao, Y., & Kai, J.-j. (2019). Synergistic effect of Ti and Al on L12-phase design in CoCrFeNi-based high entropy alloys. *Intermetallics*, 110, 106476.
- Chen, H.-C., Jan, D.-J., Chen, C.-H., & Huang, K.-T. (2013). Bond and electrochromic properties of WO_3 films deposited with horizontal DC, pulsed DC, and RF sputtering. *Electrochimica Acta*, 93, 307-313.
- Chen, H., Gou, J., Jia, W., Song, X., & Ma, T. (2023). Origin of hard magnetism in Fe-Co-Ni-Al-Ti-Cu high-entropy alloy: Chemical shape anisotropy. *Acta Materialia*, 246, 118702.
- Chen, Y., Duval, T., Hung, U., Yeh, J., & Shih, H. (2005). Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys—a comparison with type-304 stainless steel. *Corrosion Science*, 47(9), 2257-2279.
- Chen, Y., Liu, W., Wang, H., Xie, J., Zhang, T., Yin, L., & Huang, Y. (2022). Effect of Ti content on the microstructure and properties of CoCrFeNiMnTix high entropy alloy. *Entropy*, 24(2), 241.
- Cheng, C.-Y., Yang, Y.-C., Zhong, Y.-Z., Chen, Y.-Y., Hsu, T., & Yeh, J.-W. (2017). Physical metallurgy of concentrated solid solutions from low-entropy to high-entropy alloys. *Current Opinion in Solid State Materials Science and Engineering: A*, 21(6), 299-311.
- Choi, J. W., Kim, J. T., Hong, S. H., Park, H. J., Jumaev, E., & Kim, K. B. (2023). Investigation of correlation between the microstructural characteristics and mechanical properties of (CoCuFeNi) $100-x\text{Al}_x$ high entropy alloys. *Journal of Alloys Compounds*, 933, 167679.

- Chou, H.-P., Chang, Y.-S., Chen, S.-K., & Yeh, J.-W. (2009). Microstructure, thermophysical and electrical properties in $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys. *Materials Science Engineering: B*, 163(3), 184-189.
- Cieslak, J., Tobola, J., & Reissner, M. (2020). The effect of bcc/fcc phase preference on magnetic properties of $\text{Al}_x\text{CrFeCoNi}$ high entropy alloys. *Intermetallics*, 118, 106672.
- Constantinides, S. (2012). The demand for rare earth materials in permanent magnets. 51st Annual Conference of Metallurgists,
- Cui, H. B., Wang, H. Y., Wang, J. Y., & Fu, H. Z. (2011). Microstructure and microsegregation in directionally solidified FeCoNiCrAl high entropy alloy. *Advanced Materials Research*, 189, 3840-3843.
- Cui, P., Ma, Y., Zhang, L., Zhang, M., Fan, J., Dong, W., & Liu, R. (2018). Effect of Ti on microstructures and mechanical properties of high entropy alloys based on CoFeMnNi system. *Materials Science Engineering: A*, 737, 198-204.
- Eißmann, N., Mühle, U., Gaitzsch, U., Walther, G., Weißgärber, T., & Kieback, B. (2021). Precipitation hardening of high entropy alloy CoCrFeMnNi containing titanium. *Journal of Alloys Compounds*, 857, 157610.
- Fang, S., Chen, W., & Fu, Z. (2014). Microstructure and mechanical properties of twinned $\text{Al}_{10}\text{5CrFeNiCo}_{10}\text{3Co}_{10}\text{2}$ high entropy alloy processed by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Materials Design*, 54, 973-979.
- Fu, X., Schuh, C. A., & Olivetti, E. A. (2017). Materials selection considerations for high entropy alloys. *Scripta Materialia*, 138, 145-150.
- Fu, Z., Chen, W., Fang, S., Zhang, D., Xiao, H., & Zhu, D. (2013). Alloying behavior and deformation twinning in a $\text{CoNiFeCrAl}_{10}\text{6Ti}_{10}\text{4}$ high entropy alloy processed by spark plasma sintering. *Journal of Alloys Compounds*, 553, 316-323.
- Gao, M. C., & Alman, D. E. (2013). Searching for next single-phase high-entropy alloy compositions. *Entropy*, 15(10), 4504-4519.
- Gao, M. C., Yeh, J.-W., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2016). *High-entropy alloys: fundamentals and applications*. Springer.
- Gao, M. C., Zhang, B., Guo, S., Qiao, J., & Hawk, J. (2016). High-entropy alloys in hexagonal close-packed structure. *Metallurgical Materials Transactions A*, 47, 3322-3332.
- George, E. P., Raabe, D., & Ritchie, R. O. (2019). High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials* 4(8), 515-534.
- Gheysarian, A., Rezaeian, A., & Toroghinejad, M. R. (2023). Homogenizing optimization, microstructure and tensile properties evolution of $\text{CuCrFeNi}_{2\text{Mn}_{0.5}}$ alloy. *Journal of Materials Research Technology*, 24, 3164-3178.

- Guan, Z., Bai, J., Gu, J., Liang, X., Liu, D., Jiang, X., & Zhao, X. (2021). First-principles investigation of B2 partial disordered structure, martensitic transformation, elastic and magnetic properties of all-d-metal Ni-Mn-Ti Heusler alloys. *Journal of Materials Science Technology*, 68, 103-111.
- Guo, S., Ng, C., & Liu, C. T. (2013). Anomalous solidification microstructures in Co-free Al_xCrCuFeNi₂ high-entropy alloys. *Journal of Alloys Compounds*, 557, 77-81.
- Guo, S., Ng, C., Lu, J., & Liu, C. (2011). Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys. *Journal of Applied Physics*, 109(10).
- Gwalani, B., Choudhuri, D., Soni, V., Ren, Y., Styles, M., Hwang, J., & Banerjee, R. (2017). Cu assisted stabilization and nucleation of L12 precipitates in Al_{0.3}CuFeCrNi₂ fcc-based high entropy alloy. *Acta Materialia*, 129, 170-182.
- Hamdi, H., Abedi, H. R., & Zhang, Y. (2023). A review study on thermal stability of high entropy alloys: Normal/abnormal resistance of grain growth. *Journal of Alloys Compounds*, 960, 170826.
- He, J., Liu, W., Wang, H., Wu, Y., Liu, X., Nieh, T., & Lu, Z. (2014). Effects of Al addition on structural evolution and tensile properties of the FeCoNiCrMn high-entropy alloy system. *Acta Materialia*, 62, 105-113.
- He, Q., Ding, Z., Ye, Y., & Yang, Y.-c. (2017). Design of high-entropy alloy: a perspective from nonideal mixing. *Jom*, 69, 2092-2098.
- Hemphill, M. A., Yuan, T., Wang, G., Yeh, J., Tsai, C., Chuang, A., & Liaw, P. (2012). Fatigue behavior of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloys. *Acta Materialia*, 60(16), 5723-5734.
- Hsu, C.-Y., Juan, C.-C., Wang, W.-R., Sheu, T.-S., Yeh, J.-W., & Chen, S.-K. (2011). On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCr_xFeMo_{0.5}Ni high-entropy alloys. *Materials Science Engineering: A*, 528(10-11), 3581-3588.
- Hsu, U., Hung, U., Yeh, J., Chen, S., Huang, Y., & Yang, C. (2007). Alloying behavior of iron, gold and silver in AlCoCrCuNi-based equimolar high-entropy alloys. *Materials Science Engineering: A*, 460, 403-408.
- Hsu, Y.-J., Chiang, W.-C., & Wu, J.-K. (2005). Corrosion behavior of FeCoNiCrCu_x high-entropy alloys in 3.5% sodium chloride solution. *Materials Chemistry Physics*, 92(1), 112-117.
- Huang, S., Li, W., Li, X., Schönecker, S., Bergqvist, L., Holmström, E., & Vitos, L. (2016). Mechanism of magnetic transition in FeCrCoNi-based high entropy alloys. *Materials Design*, 103, 71-74.
- Huang, S., Vida, Á., Heczal, A., Holmström, E., & Vitos, L. (2017). Thermal expansion, elastic and magnetic properties of FeCoNiCu-based high-entropy alloys using first-principle theory. *Jom*, 69, 2107-2112.

- Joy, J., Jadhav, M., Sahane, D., Davis, D., & Singh, S. (2019). Elemental effect on formation of solid solution phase in CoCrFeNiX and CoCuFeNiX (X= Ti, Zn, Si, Al) high entropy alloys. *Materials Science Technology*, 35(14), 1700-1707.
- Kao, Y.-F., Chen, S.-K., Chen, T.-J., Chu, P.-C., Yeh, J.-W., & Lin, S.-J. (2011). Electrical, magnetic, and Hall properties of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys. *Journal of Alloys Compounds*, 509(5), 1607-1614.
- Kao, Y.-F., Lee, T.-D., Chen, S.-K., & Chang, Y.-S. (2010). Electrochemical passive properties of Al_xCoCrFeNi (x= 0, 0.25, 0.50, 1.00) alloys in sulfuric acids. *Corrosion Science*, 52(3), 1026-1034.
- Karimzadeh, M., Malekan, M., Mirzadeh, H., Li, L., & Saini, N. (2022). Effects of titanium addition on the microstructure and mechanical properties of quaternary CoCrFeNi high entropy alloy. *Materials Science Engineering: A*, 856, 143971.
- Kohn, W., & Sham, L. J. (1965). Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*, 140(4A), A1133.
- Körmann, F., Ma, D., Belyea, D. D., Lucas, M. S., Miller, C. W., Grabowski, B., & Sluiter, M. H. (2015). "Treasure maps" for magnetic high-entropy-alloys from theory and experiment. *Applied Physics Letters*, 107(14).
- Koželj, P., Vrtnik, S., Jelen, A., Jazbec, S., Jagličić, Z., Maiti, S., & Dolinšek, J. (2014). Discovery of a superconducting high-entropy alloy. *Physical Review Letters*, 113(10), 107001.
- Kresse, G., & Hafner, J. (1993). Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Physical review B*, 47(1), 558.
- Kulkarni, R., Murty, B., & Srinivas, V. (2018). Study of microstructure and magnetic properties of AlNiCo (CuFe) high entropy alloy. *Journal of Alloys Compounds*, 746, 194-199.
- Kunce, I., Polanski, M., & Bystrzycki, J. (2013). Structure and hydrogen storage properties of a high entropy ZrTiVCrFeNi alloy synthesized using Laser Engineered Net Shaping (LENS). *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(27), 12180-12189.
- Lee, C., Chang, C., Chen, Y., Yeh, J., & Shih, H. (2008). Effect of the aluminium content of Al_xCrFe1.5MnNi0.5 high-entropy alloys on the corrosion behaviour in aqueous environments. *Corrosion Science*, 50(7), 2053-2060.
- Li, H., Zhang, S., Liang, J., Hu, M., & Yang, Y. (2023). Effect of Ti on characterization and properties of CoCrFeNiTi_x high entropy alloy prepared via electro-deoxidization of the metal oxides and vacuum hot pressing sintering process. *Materials*, 16(4), 1547.
- Li, P., Wang, A., & Liu, C. (2017). Composition dependence of structure, physical and mechanical properties of FeCoNi (MnAl)_x high entropy alloys. *Intermetallics*, 87, 21-26.

- Li, X., Zhang, G., Lei, N., Wei, R., Wu, S., Wang, T., & Li, F. (2023). A novel complex-structure Co-free Cr-Fe-Ni-Al-Si-Ti-Cu high entropy alloy with outstanding mechanical properties in as-cast and cold-rolled states. *Materials Characterization*, 202, 113016.
- Lin, G., Guo, J., & Ji, P. (2021). Molecular dynamics study on the diffusion process of AuAgCuNiPd high-entropy alloy metallurgy induced by pulsed laser heating. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(35), 19482-19493.
- Lin, L., Xian, X., Zhong, Z., Chen, C., Zhu, Z., Wu, Y., & Liaw, P. K. (2020). A multi-phase CrMnFeCoNiAl_{0.75} high-entropy alloy with high strength at intermediate temperature. *Intermetallics*, 120, 106744.
- Liu, C., Peng, W., Jiang, C., Guo, H., Tao, J., Deng, X., & Chen, Z. (2019). Composition and phase structure dependence of mechanical and magnetic properties for AlCoCuFeNi_x high entropy alloys. *Journal of Materials Science Technology*, 35(6), 1175-1183.
- Liu, L., Zhu, J., Zhang, C., Li, J., & Jiang, Q. (2012). Microstructure and the properties of FeCoCuNiSn_x high entropy alloys. *Materials Science Engineering: A*, 548, 64-68.
- Liu, X., Laplanche, G., Kostka, A., Fries, S., Pfetting-Micklich, J., Liu, G., & George, E. (2019). Columnar to equiaxed transition and grain refinement of cast CrCoNi medium-entropy alloy by microalloying with titanium and carbon. *Journal of Alloys Compounds*, 775, 1068-1076.
- Liu, Y., Chen, Z., Shi, J., Wang, Z., & Zhang, J. (2019). The effect of Al content on microstructures and comprehensive properties in Al_xCoCrCuFeNi high entropy alloys. *Vacuum*, 161, 143-149.
- Ma, H., Shao, Y., & Shek, C. H. (2021). Microstructure, grain growth behavior and mechanical properties of W-CoCuFeNi tungsten heavy alloys prepared by infiltration. *International Journal of Refractory Metals Hard Materials*, 98, 105572.
- Ma, S., Zhang, S., Gao, M., Liaw, P., & Zhang, Y. (2013). A successful synthesis of the CoCrFeNiAl_{0.3} single-crystal, high-entropy alloy by Bridgman solidification. *Jom*, 65, 1751-1758.
- Ma, S., & Zhang, Y. (2012). Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Materials Science Engineering: A*, 532, 480-486.
- MacDonald, B. E., Fu, Z., Wang, X., Li, Z., Chen, W., Zhou, Y., & Lavernia, E. J. (2019). Influence of phase decomposition on mechanical behavior of an equiatomic CoCuFeMnNi high entropy alloy. *Acta Materialia*, 181, 25-35.
- Maharubin, S., Hu, Y., Sooriyaarachchi, D., Cong, W., & Tan, G. Z. (2019). Laser engineered net shaping of antimicrobial and biocompatible titanium-silver alloys. *Materials Science and Engineering: C*, 105, 110059.

- Merupo, V.-I., Velumani, S., Ordon, K., Errien, N., Szade, J., & Kassiba, A.-H. (2015). Structural and optical characterization of ball-milled copper-doped bismuth vanadium oxide (BiVO₄). *CrystEngComm*, 17(17), 3366-3375.
- Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., & Tiley, J. (2014). Exploration and development of high entropy alloys for structural applications. *Entropy*, 16(1), 494-525.
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448-511.
- Mishra, R. K., Sahay, P., & Shahi, R. R. (2019). Alloying, magnetic and corrosion behavior of AlCrFeMnNiTi high entropy alloy. *Journal of Materials Science*, 54, 4433-4443.
- Mishra, R. K., & Shahi, R. R. (2017). Phase evolution and magnetic characteristics of TiFeNiCr and TiFeNiCrM (M= Mn, Co) high entropy alloys. *Journal of Magnetism Magnetic Materials*, 442, 218-223.
- Murty, B., Yeh, J., & Ranganathan, S. (2014). High Entropy Alloys, Butterworth-Heinemann Ltd (Verlag). In.
- Murty, B. S., Yeh, J.-W., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. P. (2019). *High-entropy alloys*. Elsevier.
- Ng, C., Guo, S., Luan, J., Shi, S., & Liu, C. T. (2012). Entropy-driven phase stability and slow diffusion kinetics in an Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 31, 165-172.
- Otto, F., Yang, Y., Bei, H., & George, E. P. (2013). Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61(7), 2628-2638.
- Pickering, E., & Jones, N. (2016). High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*, 61(3), 183-202.
- Praveen, S., & Kim, H. S. (2018). High-entropy alloys: potential candidates for high-temperature applications—an overview. *Advanced Engineering Materials*, 20(1), 1700645.
- Razuan, R., Jani, N. A., Harun, M. K., & Talari, M. K. (2013). Microstructure and hardness properties investigation of Ti and Nb added FeNiAlCuCrTi_xNb_y high entropy alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 66, 309-312.
- Senkov, O., Wilks, G., Miracle, D., Chuang, C., & Liaw, P. (2010). Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 18(9), 1758-1765.
- Shams, S. A. A., Kim, G., Won, J. W., Kim, J. N., Kim, H. S., & Lee, C. S. (2021). Effect of grain size on the low-cycle fatigue behavior of carbon-containing high-entropy alloys. *Materials Science Engineering: A*, 810, 140985.

- Sheng, G., & Liu, C. T. (2011). Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Natural Science: Materials International*, 21(6), 433-446.
- Shi, Y., Yang, B., & Liaw, P. K. (2017). Corrosion-resistant high-entropy alloys: a review. *Metals*, 7(2), 43.
- Singh, S., Wanderka, N., Murty, B., Glatzel, U., & Banhart, J. (2011). Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 59(1), 182-190.
- Sui, Q., Wang, Z., Wang, J., Xu, S., Yuan, Q., Wen, H., & Liu, J. (2023). Phase evolution and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys by directed energy deposition. *Materials Characterization*, 204, 113217.
- Takeuchi, A., Amiya, K., Wada, T., Yubuta, K., Zhang, W., & Makino, A. (2013). Entropies in alloy design for high-entropy and bulk glassy alloys. *Entropy*, 15(9), 3810-3821.
- Tan, Y.-Y., Chen, Z.-J., Su, M.-Y., Ding, G., Jiang, M.-Q., Xie, Z.-C., & Wang, H.-Y. (2022). Lattice distortion and magnetic property of high entropy alloys at low temperatures. *Journal of Materials Science Technology*, 104, 236-243.
- Tong, C.-J., Chen, M.-R., Yeh, J.-W., Lin, S.-J., Chen, S.-K., Shun, T.-T., & Chang, S.-Y. (2005). Mechanical performance of the Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical Materials Transactions A*, 36, 1263-1271.
- Troparevsky, M. C., Morris, J. R., Kent, P. R., Lupini, A. R., & Stocks, G. M. (2015). Criteria for predicting the formation of single-phase high-entropy alloys. *Physical Review X*, 5(1), 011041.
- Tsai, M.-H. (2013). Physical properties of high entropy alloys. *Entropy*, 15(12), 5338-5345.
- Tsai, M.-H., & Yeh, J.-W. (2014). High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*, 2(3), 107-123.
- Ujah, C. O., Kallon, D. V., & Aigbodion, V. S. (2023). High entropy alloys prepared by spark plasma sintering: Mechanical and thermal properties. *Materials Today Sustainability*, 100639.
- Urban, K., & Feuerbacher, M. (2004). Structurally complex alloy phases. *Journal of non-crystalline solids*, 334, 143-150.
- Wang, H., Chen, D., An, X., Zhang, Y., Sun, S., Tian, Y., & Song, M. (2021). Deformation-induced crystalline-to-amorphous phase transformation in a CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Science Advances*, 7(14), eabe3105.
- Wang, J.-J., Kou, Z.-D., Fu, S., Wu, S.-S., Liu, S.-N., Yan, M.-Y., & Feng, T. (2022). Microstructure and magnetic properties evolution of Al/CoCrFeNi nanocrystalline high-entropy alloy composite. *Rare Metals*, 41(6), 2038-2046.

- Wang, J., Wu, S., Fu, S., Liu, S., Ren, Z., Yan, M., & Feng, T. (2021). Nanocrystalline CoCrFeNiMn high-entropy alloy with tunable ferromagnetic properties. *Journal of Materials Science Technology*, 77, 126-130.
- Wang, W.-R., Wang, W.-L., Wang, S.-C., Tsai, Y.-C., Lai, C.-H., & Yeh, J.-W. (2012). Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*, 26, 44-51.
- Wang, X., Liu, Q., Huang, Y., Xie, L., Xu, Q., & Zhao, T. (2020). Effect of Ti content on the microstructure and corrosion resistance of CoCrFeNiTi_x high entropy alloys prepared by laser cladding. *Materials*, 13(10), 2209.
- Wang, X., Zhang, Y., Qiao, Y., & Chen, G. (2007). Novel microstructure and properties of multicomponent CoCrCuFeNiTi_x alloys. *Intermetallics*, 15(3), 357-362.
- Wu, Z., Bei, H., Pharr, G. M., & George, E. P. (2014). Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures. *Acta Materialia*, 81, 428-441.
- Wu, Z., Li, B., Chen, M., Yang, Y., Zheng, R., Yuan, L., & Xu, H. (2022). Tailoring magnetic property and corrosion resistance of FeCoNiCuAl high-entropy alloy with Ce additive. *Journal of Alloys Compounds*, 901, 163665.
- Xian, X., Lin, L., Zhong, Z., Zhang, C., Chen, C., Song, K., . . . Wu, Y. (2018). Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in CrMnFeCoNiCu_x high-entropy alloys. *Materials Science Engineering: A*, 713, 134-140.
- Xiaotao, L., Wenbin, L., Lijuan, M., Jinling, L., Jing, L., & Jianzhong, C. (2016). Effect of boron on the microstructure, phase assemblage and wear properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Rare Metal Materials Engineering*, 45(9), 2201-2207.
- Yan, Y., Fang, L., Tan, Y., Tao, X., Ouyang, Y., & Du, Y. (2023). Mechanical properties and corrosion resistance of Al_xCoCuFeMn high-entropy alloys. *Journal of Materials Research Technology*, 24, 5250-5259.
- Yang, M., Zhou, H., Cheng, Y., Hong, Q., Chen, J., Zhang, Q., & Pan, C. (2022). Incorporation of copper and strontium ions in TiO₂ nanotubes via dopamine to enhance hemocompatibility and cytocompatibility. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 1450-1463.
- Yang, X., & Zhang, Y. (2012). Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. *Materials Chemistry Physics*, 132(2-3), 233-238.
- Yao, H., Qiao, J., Gao, M., Hawk, J., Ma, S., Zhou, H., & Zhang, Y. (2016). NbTaV-(Ti, W) refractory high-entropy alloys: experiments and modeling. *Materials Science Engineering: A*, 674, 203-211.
- Ye, Y., Wang, Q., Lu, J.-t., Liu, C., & Yang, Y.-c. (2015). Design of high entropy alloys: A single-parameter thermodynamic rule. *Scripta Materialia*, 104, 53-55.

- Ye, Y., Wang, Q., Lu, J., Liu, C., & Yang, Y. (2016). High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*, 19(6), 349-362.
- Yeh, J.-W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*, 65, 1759-1771.
- Yeh, J.-W. (2016). Overview of high-entropy alloys. *High-entropy alloys: fundamentals applications*, 1-19.
- Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Lin, S.-J., Gan, J.-Y., Chin, T.-S., Shun, T.-T., & Chang, S.-Y. (2004). Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299-303.
- Yin, Z., Gao, N., Fan, S., Yan, D., Hu, Q., Wang, K., & Liu, X. (2022). Microstructure Evolution and Tensile Property of a CuMnFeCoNi High-Entropy Alloy During Thermomechanical Treatment. *Metallurgical Materials Transactions A*, 53(12), 4393-4403.
- Yushin, D., Smirnov, A., Solis Pinargote, N., Peretyagin, P., & Torrecillas, R. (2015). Modeling Process of Spark Plasma Sintering of Powder Materials by Finite Element Method. *Materials Science Forum*, 834, 41-50.
- Zhai, K., Chen, S., Wang, C., Li, Q., Sun, B., & He, J. (2022). Microstructure and properties of WC-CoCuFeNi composites fabricated by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals Hard Materials*, 105, 105808.
- Zhang, F., Zhang, C., Chen, S.-L., Zhu, J., Cao, W.-S., & Kattner, U. R. (2014). An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations. *Calphad*, 45, 1-10.
- Zhang, Q., Xu, H., Tan, X., Hou, X., Wu, S., Tan, G., & Yu, L. (2017). The effects of phase constitution on magnetic and mechanical properties of FeCoNi (CuAl) x ($x=0-1.2$) high-entropy alloys. *Journal of Alloys Compounds*, 693, 1061-1067.
- Zhang, Y. (2023). *High entropy materials* (Vol. 1498). Springer.
- Zhang, Y., Bian, T., Shen, X., Wang, Z., Ye, S., Feng, S., & Yu, P. (2021). Sintering mechanism and microstructure evolution of a CoCrFeNiMn high entropy alloy fabricated by metal injection molding. *Journal of Alloys Compounds*, 868, 158711.
- Zhang, Y., Ma, S., & Qiao, J. (2012). Morphology transition from dendrites to equiaxed grains for AlCoCrFeNi high-entropy alloys by copper mold casting and Bridgman solidification. *Metallurgical Materials Transactions A*, 43, 2625-2630.
- Zhang, Y., & Zhang, Y. (2019). History of high-entropy materials. *High-Entropy Materials: A Brief Introduction*, 1-33.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in materials science*, 61, 1-93.

- Zhao, C., Li, J., Liu, Y., Wang, W. Y., Kou, H., Beaugnon, E., & Wang, J. (2021). Tailoring mechanical and magnetic properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy via phase transformation. *Journal of Materials Science*, 73, 83-90.
- Zheng, M., Ding, W., Cao, W., Hu, S., & Huang, Q. (2019). A quick screening approach for design of multi-principal element alloy with solid solution phase. *Materials Design*, 179, 107882.
- Zhou, L., White, E., Ke, L., Cullen, D. A., Lu, & P. (2019). Microstructure and coercivity in alnico 9. *Journal of Magnetism*, 471, 142-147.
- Zhu, C.-y., Hao, W., Zhu, H.-g., Li, X.-d., Tu, C.-l., & Xie, Z.-h. (2021a). Mechanical properties and fracture mechanism of as-cast MnFeCoCuNix high-entropy alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(1), 222-231.
- Zhu, C.-y., Hao, W., Zhu, H.-g., Li, X.-d., Tu, C.-l., & Xie, Z.-h. (2021b). Mechanical properties and fracture mechanism of as-cast MnFeCoCuNix high-entropy alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(1), 222-231.
- Zuo, T., Yang, X., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2015). Influence of Bridgman solidification on microstructures and magnetic behaviors of a non-equiatomic FeCoNiAlSi high-entropy alloy. *Intermetallics*, 67, 171-176.
- Zyska, A., Konopka, Z., Łągiewka, M., & Kordas, P. (2017). Thermocalc application for the assessment of binary alloys non-equilibrium solidification. *Archives of Foundry Engineering*, 17.

ÖZGEÇMİŞ

Ataberk YILDIZ, İlköğrenimini Hacı Mustafa Tarman İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2012 yılında Ankara Abdullah Mürşide Özünenek Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzemem Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başladı. 2020 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. İyi derece İngilizce bilmektedir.

