

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK ENTROPİLİ $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Mn}_{20}$ ALAŞIMININ ÇİFT FAZLI
YÜKSEK ENTROPİLİ $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ ALAŞIMIYLA FARKLILIKLARININ
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Aziz MALKOÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ – 2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ENTROPİLİ $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Mn}_{20}$ ALAŞIMININ ÇİFT FAZLI
YÜKSEK ENTROPİLİ $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ ALAŞIMIYLA FARKLILIKLARININ
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Aziz MALKOÇ
(220077106)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ – 2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ENTROPİLİ $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Mn}_{20}$ ALAŞIMININ ÇİFT FAZLI
YÜKSEK ENTROPİLİ $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ ALAŞIMIYLA FARKLILIKLARININ
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Aziz MALKOÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 14/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza
Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
(Fırat Üniversitesi)

ÜYE

İmza
Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu” ndaki hükümlere tabidir.

14/06/2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yüksek Lisans Öğrencisi
Aziz MALKOÇ

Danışman
Doç.Dr. Yahya TAŞGIN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sürecinde yardımlarını ve deneyimlerini benden esirgemeyen, bana ışık tutan, karşılaştığım sorunları hiçbir zaman çözümsüz bırakmayan, deneyler aşamasında bana her konuda yardımcı olan danışmanım Doç. Dr. Yahya TAŞGIN'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında yanımda olan, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

**Aziz MALKOÇ
TUNCELİ- 2023**



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	V
RESİMLER LİSTESİ	VI
SEMBOLLER LİSTESİ	VII
KISALTMALAR LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1. GİRİŞ.....	1
2. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR	2
2.1. Yüksek Entropili Alaşımların Tarihsel Gelişimi	2
2.2. Yüksek Entropili Alaşım Malzemelerin Tanımlanması	3
2.3. Yüksek Entropili Alaşım Malzemelerinin Mikro yapı Özelliklerine Etki Eden Faktörler	3
2.3.2. Ağır difüzyon etkisi	5
2.3.3. Latis distorsiyonu etkisi.....	6
2.3.4. Karışım etkisi.....	7
2.4. Elementlerin Yüksek Entropili Alaşımlarda Mikro Yapı Üzerindeki Etkisi.....	9
2.5. Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Teknikleri	10
3. TOZLARIN ve NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	12
3.1. CoCrFeNiMn Alaşım Numunelerini Hazırlama	12
3.2. Tozların Karıştırılması.....	13
3.3. Tozların Preslenmesi ve Şekillendirme	13
3.4. Alaşım Numunelerinin Üretilmesi	15
3.4.1. Vakum ark melting yöntemi	15
3.5. Üretilen Numunelerin Metalürjik Çalışmalar İçin Hazırlanması	20
4. TOZLARIN ANALİZ İŞLEMLERİ.....	21
4.1. Numunelerin Analiz ve Test İşlemleri.....	21
4.2. Numunelerin Mikro Sertlik Ölçümü	22
4.2.1. Vickers sertlik testi	23
4.2.2 Knoop sertlik testi.....	23
4.3. Numunelerin SEM Analizleri	25
4.4. Numunelerin EDS Analizleri	30
4.5. Numunelerin XRD Analizleri.....	42
4.6. Aşınma Testi.....	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
6. KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bragg difraksiyonunda kafes distorsiyonunun etkisi	6
Şekil 2.2. (A) HMK ve (B) YMK kristal kafes yapıları 5 ana	7
Şekil 2.3. CoCrCuNiFeAl _x alaşımında sertlik ve kafes parametresinin farklı X değerlerine göre değişimi	8
Şekil 2.4. CoCrFeNiAl _x alaşımında farklı X değerlerine bağlı olarak sertlik ve yapı değişimi	9
Şekil 2.5. Çeşitli YEA'ların 17-4 paslanmaz çelik, hastelloy ve 316 paslanmaz çelik ile beraber sertlik grafiği kıyaslanması	9
Şekil 3.1. Ark eritme sistemi ve bölümleri	17
Şekil 4.1. Yapılan işlem ve testlere ait akış şeması	21
Şekil 4.2. Vickers sertlik testi şematik görünümü	23
Şekil 4.3. Knoop sertlik testi elmas uç temas açısı görüntüsü	23
Şekil 4.4. Mikro sertlik ölçüm değerleri grafiği	25
Şekil 4.5. X-Işını kırınımının şematik gösterimi	43
Şekil 4.6. A1 Numaralı numunenin XRD analizi	44
Şekil 4.7. A1 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü	44
Şekil 4.8. A2 Numaralı numunenin XRD analizi	45
Şekil 4.9. A2 Numaralı numuneye Ait XRD molekül görünümü	45
Şekil 4.10. A3 Numaralı numunenin XRD analizi	46
Şekil 4.11. A3 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü	46
Şekil 4.12. A4 Numaralı numunenin XRD analizi	47
Şekil 4.13. A4 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü	47
Şekil 4.14. A11 Numaralı numunenin XRD analizi	48
Şekil 4.15. A11 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü	48
Şekil 4.16. A22 Numaralı numunenin XRD analizi	49
Şekil 4.17. A22 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü	49
Şekil 4.18. A33 Numaralı numunenin XRD analizi	50
Şekil 4.19. A33 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü	50
Şekil 4.20. A44 Numaralı numunenin XRD analizi	51
Şekil 4.21. A44 Numaralı numuneye Ait XRD molekül görünümü	51
Şekil 4.22. XRD 3D, faz ve molekül görünümü	52
Şekil 4.23. Numunelerin aşınma kütle kaybı miktarları	54

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Co ₂₀ Cr ₂₀ Fe ₂₀ Ni ₂₀ Mn ₂₀ +Er bileşiminde bulunan elementlerinin	22
Tablo 4.2. Fe ₅₀ Mn ₃₀ Co ₁₀ Cr ₁₀ +Er bileşiminde bulunan elementlerinin 30gr için	22
Tablo 4.3. Mikro sertlik ölçüm değerleri	24
Tablo 4.4. Aşınma deneyi sonuç verileri	54



RESİMLER LİSTESİ

Resim 3.1. Tozların karıştırılması	13
Resim 3.2. Hidrolik pres	14
Resim 3.3. Tozların preslenmiş hali	14
Resim 3.4. Tozların preslenmiş hali	15
Resim 3.5. Tozların preslenmiş hali	15
Resim 3.6. Ark eritme sistemi	16
Resim 3.7. Ergitilen numuneler	17
Resim 3.8. Ergitilen numuneler	17
Resim 3.9. Elementlerin tartımı için kullanılan hassas terazi	18
Resim 3.10. Ark ergitme yöntemiyle oluşturulan numuneler	18
Resim 3.11. Ark ergitme yöntemiyle oluşturulan numuneler	19
Resim 3.12. Ark ergitme yöntemiyle oluşturulan numuneler	19
Resim 4.1. SEM elektron mikroskobu	25
Resim 4.2. A1 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	26
Resim 4.3. A2 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	27
Resim 4.4. A3 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	27
Resim 4.5. A4 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	28
Resim 4.6. A11 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	28
Resim 4.7. A22 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	29
Resim 4.8. A33 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	29
Resim 4.9. A44 Numaralı numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	30
Resim 4.10. A1 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri	31
Resim 4.11. A2 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri	31
Resim 4.12. A3 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri	32
Resim 4.13. A4 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri	32
Resim 4.14. A11 Numaralı numunenin ısıtma işlemli EDS noktasal spectrum değerleri	33
Resim 4.15. A22 Numaralı numunenin ısıtma işlemli EDS noktasal spectrum değerleri	33
Resim 4.16. A33 Numaralı numunenin ısıtma işlemli EDS noktasal spectrum değerleri	34
Resim 4.17. A44 Numaralı numunenin ısıtma işlemli EDS noktasal spectrum değerleri	34
Resim 4.18. A1 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri	35
Resim 4.19. A2 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri	36
Resim 4.20. A3 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri	37
Resim 4.21. A4 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri	38
Resim 4.22. A11 Numaralı Numunenin ısıtma işlemli mapping ve element görüntüleri	39
Resim 4.23. A22 Numaralı Numunenin ısıtma işlemli mapping ve element görüntüleri	40
Resim 4.24. A33 Numaralı Numunenin ısıtma işlemli mapping ve element görüntüleri	41
Resim 4.25. A44 Numaralı numunenin ısıtma işlemli mapping ve element görüntüleri	42
Resim 4.26. Aşınma deney düzeneği	53

SEMBOLLER LİSTESİ

%	: Yüzde
°C	: Derece Celcius
Al	: Alüminyum
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Er	: Erbiyum
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel



KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
Fe	: Demir
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
Mn	: Manganez
Ni	: Nikel
SEM	: Fiziksel Buhar Biriktirme
TM	: Toz metalürjisi
XRD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
YEA	: Yüksek Entropili Alaşım
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

ÖZET

Bu çalışmada yüksek entropili alaşımla, yüksek demir ve Mn içerikli çift fazlı yüksek entropili alaşımın yapısal ve mekanik özelliklerini kıyaslayarak bu alaşımlara nadir toprak element olan Erbiyumun (Er) az oranda ilavesinin etkileri tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında %99 saflıkta metal tozları temin edilerek 30gr olacak şekilde tozlar atomik ve kütsel olarak oranlanarak hazırlandı. Tozların homojen bir şekilde karışımı sağlanarak, 6 ton basınç altında 10 gramlık bloklar halinde preslenerek ark ergitme işlemine hazır hale getirilmiştir. Vakum altında ark ergitme işlemine tabi tutulan 4 farklı bileşimdeki numuneler SEM, EDS, XRD ve mikro sertlik testleri için küçük metalografik numunelere dönüştürülerek çalışmanın analiz ve görüntüleme kısmına geçilmiştir. Farklı büyütme ölçeklerinde aldığımız SEM görüntüleri ve bu görüntülerden tespit ettiğimiz farklı yapılardan aldığımız EDS analizleri ve XRD analizleri çalışmanın metalografik olarak farklılıklarını ortaya koymuştur. Numunelerin mekanik olarak değerlendirmek için yaptığımız mikro sertlik ve aşınma testleriyle de çift fazlı yüksek entropili alaşımın (A2) yüksek entropili alaşıma (A1) göre daha sert ve daha az aşındığı, bu alaşımlara Erbiyum elementinin fazla bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan ısıtma işleminin ise metalografik yapıyı iyileştirdiği fakat mekanik açıdan olumsuz etki sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fe-Cr-Co-Ni-Mn alaşımları, Yüksek entropili alaşım, Ark Ergitme, Mikro yapı, Mekanik özellikler.

ABSTRACT

Investigation Of The Differences Of High Entropy Co₂₀Cr₂₀Fe₂₀Ni₂₀Mn₂₀ Alloy With Dual phase High Entropy Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀ Alloy In Ters Of Mechanical And Microstructural Proferties

In this study, it was aimed to compare the structural and mechanical properties of a high-entropy alloy and a dual-phase high-entropy alloy with high iron and Mn content, and to determine the effects of adding a small amount of rare earth element Erbium (Er) to these alloys. In the first stage of the study, metal powders with 99% purity were provided and the powders were prepared by proportioning atomic and mass to 30 gr. By providing a homogeneous mixture of the powders, they were pressed in blocks of 10 grams under 6 tons of pressure and made ready for arc melting. The samples in 4 different compositions, which were subjected to arc melting under vacuum, were converted into small metallographic samples for SEM, EDS, XRD and microhardness tests, and the analysis and imaging part of the study was started. Sem images taken at different magnifications and EDS analyzes and XRD analyzes obtained from different structures we determined from these images revealed the metallographic differences of the study. With the microhardness and wear tests we conducted to evaluate the samples mechanically, it was determined that the dual-phase high entropy alloy (A2) was harder and less worn than the high entropy alloy (A1), and Erbium eilente did not have much effect on these alloys. It was observed that the heat treatment applied to the samples improved the metallographic structure, but had a negative effect on the mechanical aspect.

Keywords: Fe-Cr-Co-Ni-Mn alloys, High entropy alloy, Arc Melting, Microstructure, Mechanical properties.

1. GİRİŞ

Yüksek entropili alaşımlar (YEA); farklı kompozisyonları, farklı mikro yapıları ve çarpıcı fonksiyonel özellikleri ile ilgili son yıllarda dikkatleri üzerine çekmektedir ve üzerinde yoğun olarak çalışmaktadır. Alışagelmiş alaşım türleri, ana alaşım elementinin yanına göreceli olarak ana elementten daha az miktardaki diğer alaşım elementlerinin, alaşımdan beklenen özellikleri geliştirmek amacıyla eklenmesi ile elde edilirken, YEA'ları birçok birincil elementin eşit veya eşite yakın bir atomik yüzdelerde bir araya gelerek oluşturdukları alaşımlar olarak ifade edilmektedirler. Ayrıca, YEA'lar öncelikli olarak mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi olmak üzere yüksek termal, kimyasal kararlılık, yüksek korozyon ve aşınma direnci, sürünme dayanımı, manyetiklik özellikler göstererek günümüzde dikkatleri üzerine çekmeyi başarmıştır. YEA'ların üretiminde en yaygın olarak kullanılan yöntemler; vakum arc melting, vakum indüksiyon melting ve melt spinningdir. Çalışmalarımızda vakum arc melting yöntemi tercih edilmiştir.

Simgesi S^* olarak gösterilen entropi, bir sistem içindeki düzensizlik ve rastgelelik olarak tanımlanmaktadır. Sistemin tamamı düzenli olursa burada entropi sıfır olabilir ama düzensizlik artarsa entropi de artacaktır. Örnek olarak, bir maddenin gaz halinde moleküller rastgele bir hareket halinde olup, birbirleriyle çarpışıp yön değiştirirler (Çengel ve Boles, 1996).

Sistemin 0 kelvin veya $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumlar da entropi sıfırdır. Sıcaklık noktası termodinamik hesaplamalarında genelde referans değerler olarak alınır, entropinin sıfır noktasına mutlak entropi denir (İlhan M. 2013). Entropi; termodinamik işlemlerinde yarar sağlayan, enerjiyi anlık olarak kullanabilir olması termodinamik bir özelliktir.

Yapılmış olan çalışmada, yüksek entropili alaşım malzemelerin tanımlanması, tozların hazırlanması, yüksek entropili alaşımların tarihsel gelişimi ve vakum ark melting yöntemi ile alaşımların üretilmesi sonucu oluşturulan numunelerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR

2.1. Yüksek Entropili Alaşımların Tarihsel Gelişimi

Yüksek entropili alaşımlar (YEA) Taylan'lı Yeh ve ekibinin ilk defa 2004 yılında araştırmaları ile başlamıştır. Yüksek entropili alaşımların oluşumu ve üretimi yapılırken birbirine yakın düzeyde kullanıp oluşturulur. Genel olarak, YEA'lar ana alaşımların tümü %5-%35 arasında olur. Ana elementler dışında ikincil elementlerde %5 in altında olması gerekmektedir ve genel olarak beş veya daha fazla ana elementin (çoğunlukla metallerin) karışımından oluşan metalik malzemelerdir. (Yeh, ve ark., 2004). Daha sonra, 2008 yılında Yeh ve arkadaşları, Al, Co, Cr, Cu ve Ni elementlerinden oluşan başka bir yüksek entropili alaşım üretti. Bu alaşımın yapısal özelliklerinin, tek kristal alaşımlara benzerliği bulundu.

Yüksek entropili alaşımların araştırılması, 2010 yılından itibaren hız kazandı. Bu yıllarda, yüksek entropili alaşımların farklı elementlerin karıştırılmasıyla elde edilen alaşımlardan daha iyi özelliklere sahip olduğu gösterildi. Bu alaşımların mekanik özellikleri, geleneksel alaşımların özelliklerini aşabilecek kadar yüksek olduğu görülmüştür.

Malzemelerin imalatı, geliştirilmesi ile uygarlık tarihi boyunca bağlantı kurulmuştur. Kemik, deri, ahşap, altın, taş ve bakır ve benzeri gibi malzemeler insanlar tarafından tercih edilmiştir fakat çeşitliliği az ve bulunabilirliği düşük olduğundan dolayı insanlığın icat ve tasarımları bu zamana kadar sınırlı olarak kalmıştır. Taş devri, Tunç Çağı, Demir çağı, Bakır çağı gibi zamanlarda üretilen metalik malzemeler kültürel olarak değişim ve başarı olarak tarihe geçmiştir (Ashby, 2011).

Alaşımların üretimi, alaşımların tasarımı, alaşımların seçimi, temel elemente veya çözüm esasına dayanmaktadır. Alaşımların bu konsepti, sayısız pratik alaşımlar oluşturmuş olup günlük yaşama katkıda bulunmuş olsa da özel mikro yapıların özelliklerine ve uygulamalarının gelişimine olumsuz yönde ekti etmektedir (Murty ve ark., 2014).

Son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde araştırılmış olup bu alaşımların potansiyel uygulamaları arasında yüksek sıcaklık malzemeleri, yüksek mukavemetli malzemeler, termoelektrik malzemeler, manyetik malzemeler ve biyoyumlu malzemeler yer almaktadır.

2.2. Yüksek Entropili Alaşım Malzemelerin Tanımlanması

YEA'lar, mikro yapısı ve ayarlanabilir özellikleri sayesinde son zamanlarda dikkatleri üzerine çekmektedir. Yüksek entropili alaşımlar en az 5 tane farklı elementin eşit bir şekilde katı eriyik şeklinde oluşturduğu alaşımlar olarak adlandırılmaktadır (Zhang ve ark., 2008).

Yüksek entropili alaşımlar daha önce çok bileşenli alaşım olarak bilinmiştir. Mevcut çalışmalarda eş otomatik oranlı alaşım, eşmolar alaşımlar, yer değiştirmiş alaşımlar, temel alaşımlar, çok bileşenli alaşımlar olarak da adlandırılmıştır.

Bu tür alaşımlar, geleneksel alaşımların sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikleri aşan olağanüstü özelliklere sahip olurlar. Örneğin, yüksek entropili alaşımlar genellikle yüksek sertliğiyle, yüksek mukavemete, yüksek korozyon direncine ve yüksek termal iletkenliğe sahiptirler. Ayrıca, yüksek entropili alaşımların düşük yoğunlukları, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek aşınma direnci de vardır.

Yüksek entropili alaşımlar, malzeme biliminde ve endüstride son yıllarda artarak ilgi görmektedir. Bu alaşımların farklı elementlerin eşit oranda karışımından oluşması, geleneksel alaşımlara göre daha homojen bir yapıya sahip olmalarını sağlar. Bu da malzemelerin yüksek performans göstermesini sağlayabilir.

Yüksek entropili alaşımların bir diğer avantajı, farklı elementlerin kullanılması nedeniyle, farklı malzemelerin özelliklerinin birleştirilmesidir. Bu da farklı uygulamalara uygun malzemelerin üretilmesine katkı sağlayabilir.

2.3. Yüksek Entropili Alaşım Malzemelerinin Mikro yapı Özelliklerine Etki Eden Faktörler

Yüksek entropili alaşımlara etki eden faktörler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

1. Yüksek entropi etkisi
2. Ağır difüzyon etkisi
3. Latis distorsiyon etkisi
4. Karışım etkisi

2.3.1. Yüksek entropi etkisi

Yüksek entropi etkisi, malzeme biliminde yeni bir araştırma alanı olan yüksek alaşımların özelliklerinin keşfedilmesiyle ilgilidir.

Yüksek entropisi etkisi Yüksek entropili alaşımların temel kavramıdır, bundan dolayı entropi artış gösterdiği zamanlarda katı çözelti fazı oluşmuş olur. Bunun sonucunda intermetalik faz oluşumunun zorlandığı söylenmektedir (Miracle ve Senkov, 2017).

Yüksek entropi etkisi alaşımların içindeki katı çözelti fazların karışık ve kırılğan mikro yapılar oluşturacağından dolayı sınırlı olarak alaşımların çalışmasına sebep olmuştur. Kimyasal olarak uyumlu elementlerden oluşmuş olan yüksek entropili alaşımlar az sayıda ya da bir fazdan oluşurlar bu olayda yüksek karışım entropisine dönüştürülür. Yüksek karışım entropisi intermetalik bileşiklerin oluşmasına ve fazların bölünmesine engel olmak için çözünmeyi artırır. Yüksek entropili alaşımlarda elementlerin birbirilerine kuvvetli bağlanması sonucunda intermetalik fazların oluşumu gerçekleşmiş olsa da diğer elementleri de çok fazla miktarda içermesinden dolayı düzen derecesinde oransal olarak azalmaya sahiptirler (Yeh, 2006).

İlk olarak Yeh tarafından, Yüksek entropi etkisi ortaya atılmıştır (Yeh, 2011). Eşmolar veya eşmolara yakın olan intermetalik bileşikler faz diyagramının merkezinde olduğundan dolayı yüksek entropi etkisi genel olarak karmaşıktır. Gibbs faz kuralına göre sabit basınçta verilen bir alaşım için fazların sayısı (P);

$$P = C + 1 - F$$

Denklemdaki “F” serbest değişkenlerin sayısını “C” bileşen sayısını ifade etmektedir. Sabit basınç altında yedi denge fazı oluşur altı bileşenli bir sistemde. İlginç olan Yüksek entropili alaşımlarında katı eriyik fazlar, intermetalik fazların yerine oluşması fakat eşmolar oran nedeniyle yüksek entropili alaşımlarda bu ayrımı yapmak çok zor olmaktadır (Zhang ve ark., 2014).

Yüksek entropili alaşımlarda maksimum faz sayısı, oluşan faz sayısı fazlar kuralında belirtilmiş olandan daha yüksektir. Yüksek karışım entropisi karşılıklı çözünürlüğü desteklediğinden dolayı katı eriyiklerin oluşması güçlenir ve birden fazla fazın oluşmasını sınırlandırmış olur. Yüksek entropili alaşımlarda fazların kinetik olarak sınırlandırılmasına sebep olan atomların difüzyon hızlarını azaltmasıdır (Murty ve ark., 2014).

Yüksek entropi etkisi, farklı uygulama alanları için uyarlanabilecek, daha dayanıklı daha hafif ve daha sert malzemelerin üretimi için umut verici bir alandır. Yüksek entropili alaşımların özellikle havacılık, nükleer enerji ve tıp gibi alanlarda kullanımı için yapılmış olan çalışmaların sayısı da giderek artmıştır ve artmaya da devam edecektir.

2.3.2. Ağır difüzyon etkisi

Faz dönüşüm teorisine göre, yeni oluşan fazların oluşum esnasında birbirinden değişik türlerde atomun ortak difüzyonunu gerektirmektedir. Yüksek entropili alaşımlarda difüzyon veriminin bir temel elemente dayanan geleneksel alaşımlardan daha düşük olması beklenilmektedir. Yüksek entropili alaşımlarda bu yüzden büyüme oranları ve çekirdeklenme daha düşük olması beklenilmektedir (Cheng vd., 2017).

Ağır difüzyon etkisi, malzemelerin yüksek sıcaklıkta ve uzun süreli maruziyeti sonucu, ağır elementlerin diğer elementlere göre daha hızlı difüzyon yapmasıdır. Bu etki, malzemelerin kimyasal bileşiminde değişikliklere neden olur ve malzemenin özelliklerinde önemli değişimlere yol açar.

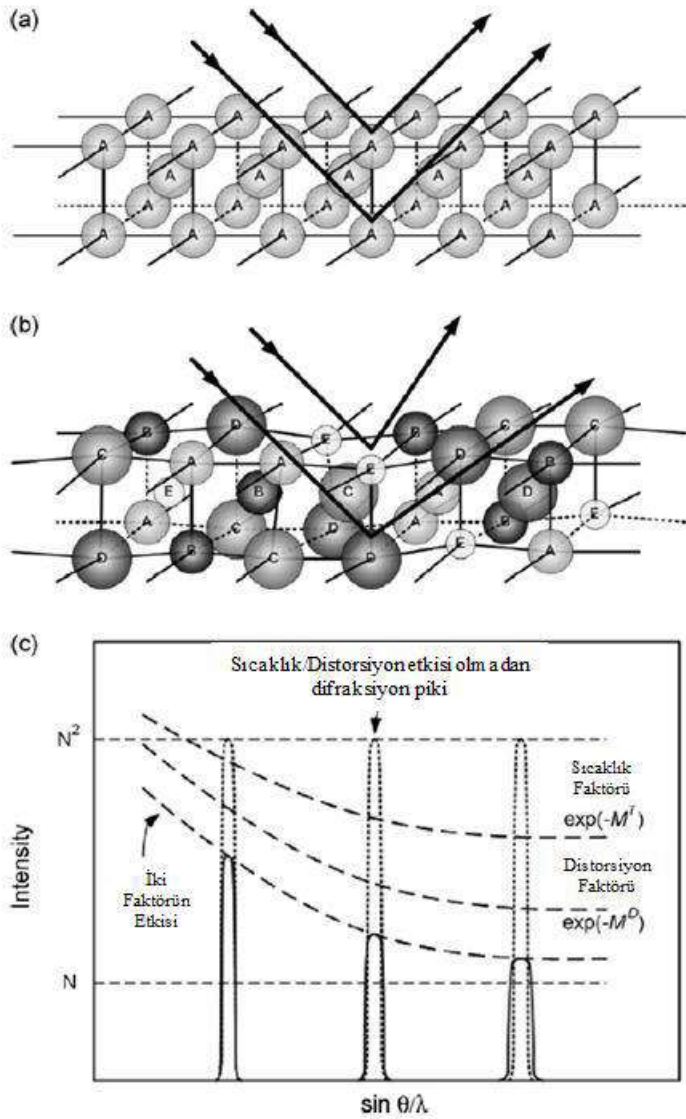
Yüksek entropili alaşımların difüzyon değerleri, diğer alaşımlarla kıyaslandığında değerleri daha düşüktür. Bu incelemelere göre buna ağır difüzyon etkisi denir (Murty, Yeh and Ranganathan, 2014).

Ağır difüzyon etkisi, geleneksel olarak kullanılan alaşımlar ile kıyaslanmıştır. Aşağıda sıralaması gösterilmiştir;

Yüksek entropili alaşımlar < paslanmaz çelik < saf metaller

Yüksek entropili alaşımlarda difüzyon ve faz dönüşüm kinetikleri alaşımlara kıyasla daha ağır olmaktadır. Yavaş difüzyon etkisi alaşımın içerisinde bulunan kafeslerin bölgesindeki atom ile komşu atom daima farklıdır. Her atomun bir sonraki boşluğa atıldığında komşu atomu da değişecektir. Bunun sonucunda yerel enerji seviyesi farklılık göstermektedir. Buda yüksek entropi alaşımların difüzyonunun ağır olduğunu gösterir.

Yüksek entropili alaşımların yavaş kinetikleri kolaylıkla oluşabilen aşırı doymuş ve nano boyutlu çökeltilerin dökümde bile oluşmasına izin verir. Bu da YEA kaplamaların difüzyon bariyeri olarak yüksek performansına katkıda bulunur. Daha iyi yüksek sıcaklık dayanımına ve yapı kararlılığına izin verir. Yine aynı sebeple yüksek entropili alaşımların olağanüstü sürünme davranışına sahip olması beklenebilir (Tsai ve Yeh, 2014). Bunun sonucunda ağır difüzyon genel anlamda yüksek entropili alaşımların özelliklerine olumlu etki göstermektedir. Örneğin; ince çökelme ve tane yapısı ile dayanım ve tokluk kombinasyonu geliştirilebilir. Yüksek sürünme dayanımı ile yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların kullanım ömrü artırılabilir (Gao ve ark., 2016).



Şekil 2.1. Bragg difraksiyonunda kafes distorsiyonunun etkisi

a) aynı atomlara sahip kafes, b) farklı boyutlarda atomlara sahip katı eriyiğin kafes distorsiyonu, c) kafes ve sıcaklık distorsiyonunun XRD pik noktalarına etkisi (Yeh ve ark., 2007).

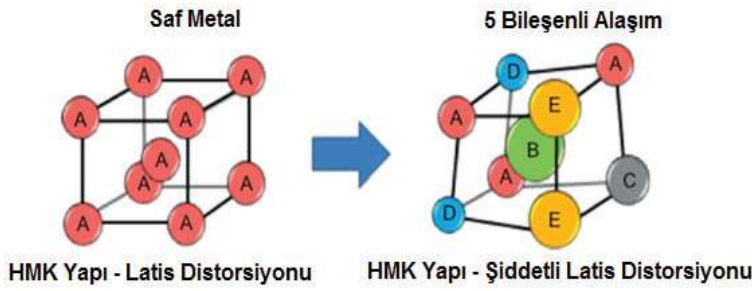
CoCrFeMnNi Yüksek entropili alaşımlar difüzyonları üzerine Tsai ve arkadaşları çalışma yapmışlardır. Saf element veya az elementlerle karşılaştırdıklarında yüksek entropili alaşımlarda ki elementlerin artmış olması difüzyon hızlarının daha ağır olduklarının ispatı olarak açıklanır (Tsai ve ark., 2013).

2.3.3. Latis distorsiyonu etkisi

Latis distorsiyonu etkisi, kristal yapıların farklı şekillerde gerilmeler sonucu bozulmasıdır. Kristallerdeki atomik düzenlemeler, kristalin yapısını belirleyen düzenli bir

örüntüye sahiptir. Ancak, kristalin içindeki atomların konumları, dış etkiler veya katışkı elementlerin varlığı nedeniyle değişebilir ve bu değişim kristalin yapısını bozar.

YEA’da birden fazla bileşenli katı çözeltilerin kristal yapı kavramı bir veya ikili elementli tanımlamasından çok elementli tanıma yayılmıştır. Şekil 2 YMK ve HMK kristal yapılar için 5 temel elementli örnekler gösterilmektedir. Çok elementli latis yüksek oranda distorsiyona uğradığından çözünen tüm atomların boyutları birbirinden farklıdır. Bu yüksek atomik boyut farklılığından dolayı çarpılan kafesin dağılması ve bunun sonucunda amorf yapıya geçiş, yüksek latis distorsiyon enerjisi sebebiyle beklenebilir. Hem kristalin hem de amorf yapıların distorsiyonu malzemelerin mekanik, termal, elektrik, optik ve kimyasal davranışlarını etkiler ve bunlar kafes distorsiyon etkisi olarak adlandırılır. Örnek; latis distorsiyon etkisi yüksek entropili alaşımlarda katı eriyik sertleşmesine, elektriksel dirence, termal dayanıma ve x-ışını dağılımına sebep olabilir.



Şekil 2.2. (A) HMK ve (B) YMK kristal kafes yapıları 5 ana elementli (Jien-Wei, 2006)

2.3.4. Karışım Etkisi

Karışım etkisi, en az 5 elementin karışımı sonucu oluşan yüksek entropili alaşımların özelliklerinin artırılması, geliştirilmesi için kullanılmaktadır.

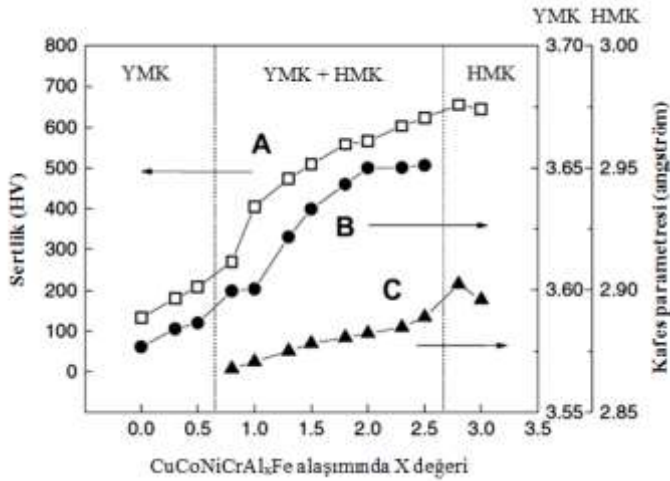
Karışım etkisi, alaşımdaki her elementin özelliklerinin, alaşım mikro yapısı ve özellikleri üzerindeki etkilerinin toplamının ötesinde bir etkiye sahip olmasıdır. Bu etki, alaşımın özelliklerini değiştiren bir sinerji etki yaratır. Örneğin, yüksek entropili alaşımların sertlikleri, katkı maddelerin sertlik toplamından daha yüksek olabilir çünkü alaşımın mikro yapısında mevcut olan karışım etkisi, alaşım sertliğini artırabilir.

Karışım etkisi terimini ilk olarak Prof. S. Ranganathan tarafından üç farklı alaşımı adlandırmak için kullanılmıştır. Yüksek entropili alaşım, hacimli metalik cam, plastik metal, bu alaşım sınıflarının tümü yoğun alaşım bileşenlerini içerir. Hibrit etki, tamamen amorf

dökme metalik camların üstün özelliklerini ve metallerin üstün yapısal ve fonksiyonel özelliklerini ele alır (Miracle ve Senkov, 2017).

Daha önce gerçekleştirilmiş bir çalışma, CoCrCuNiAl_xFe alaşımlarından oluşmuş YEA'nın Alüminyum (Al), oranlarının değiştirilmesiyle büyük oranda değişim gözlemlenmiştir.

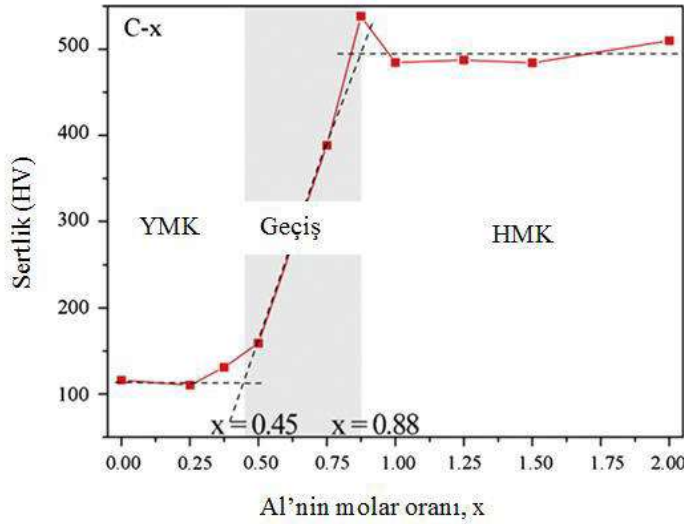
Şekil 2.3'de gözle görünecek seviyede değişim görülmektedir. Yüksek entropili alaşımlarda, karışım etkisi, mekanik özellikler üzerinde de etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca Alüminyum oranının yükselmesi sonucu yüzey merkezli kübik yapıdaki yüksek entropili alaşımlar, yüzey merkezli kübik + hacim merkezli kübik yapıya dönüşmüş olup, ilerleyen süreçte yüzey merkezli kübik yapıya dönüşecektir. Genel olarak bakıldığında, yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kübik yapı içeriği için, alaşım sertliği artar, latis ölçüler de yükselir.



Şekil 2.3. CoCrCuNiFeAl_x alaşımında sertlik ve kafes parametresinin farklı X değerlerine göre değişimi

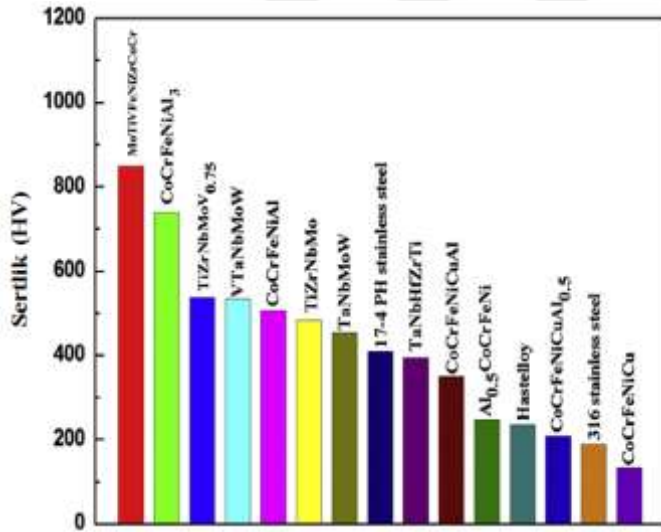
A) CoCrCuNiFeAl_x alaşımının sertliği, B) Yüzey merkezli kübik fazın kafes parametresi, C) Hacim merkezli kübik fazın kafes parametresi (Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., Chin, T.S., Shun, T.T).

Şekil 2.4'de CoCrFeNiAl_x alaşımında Al oranına bağlı olarak sertlik artışını vermektedir. YMK fazın sertliği Al oranının 0'dan 0,45'e kadar yükselmesiyle çok fazla etkilenmemekte yine HMK fazın sertliği Al oranının 0,88'den 2,0 yükselmesiyle 538 HV'den 480 HV'ye inmiştir.



Şekil 2.4. CoCrFeNiAl_x alaşımda farklı X değerlerine bağlı olarak sertlik ve yapı Değişimi (Chen ve ark. 2013).

Şekil 2.5’de bazı yüksek entropili alaşımların paslanmaz çeliği kriter olarak sertlik değerlerini göstermektedir. MoTiVFeNiZrCoCr alaşımı 800 HV gibi yüksek sertlik değerine ulaşırken CoCrFeNiCu alaşımı 200 HV gibi düşük sertlik değerine ulaşmıştır.



Şekil 2.5. Çeşitli YEA’ların 17-4 paslanmaz çelik, hastelloy ve 316 paslanmaz çelik ile beraber sertlik grafiği kıyaslanması (Zhang ve ark., 2013)

2.4. Elementlerin Yüksek Entropili Alaşımlarda Mikro Yapı Üzerindeki Etkisi

Her elementin yüksek entropili alaşımların mikro yapısı üzerinde farklı bir etkisi vardır. Örneğin, alaşımdaki elementin atomik boyutu diğerlerinden daha büyükse, alaşımın kristal yapısında bir gerilmeye neden olabilir ve bu da alaşımın sertliğini artırabilir. Aynı

şekilde, bir elementin yüksek yükü, alaşımın mikro yapısında elektrostatik etkiler yaratabilir alaşımın termal ve elektriksel özelliklerini etkileyebilir.

Yüksek entropili alaşımlarda, erime noktaları arasındaki fark fiziksel özelliklerinin yapısını ve morfolojik özelliklerinin değişimini göstermektedir (Erdoğan ve Zeytin, 2019). Ark ergitme yöntemi ile üretilen yüksek entropili alaşımlarda malzeme kalıba dökülerek üretimi sağlanır. Ark ergitme veya indüksiyon ergitme, alaşım döküm halindeki dentrit yapısını gösterir (Gao ve ark, 2016). Yüksek entropili alaşımlarda geçiş elementlerinin konumları çok önemlidir. Yüksek entropili alaşımlar, oluşturdukları kristal yapı sayesinde fazlarını korurlar. Hacim merkezli kübik kristal yapılar için Ti, Mo, V, Cr elementler, Yüzey merkezli kübik kristal yapıları için Cu, Co, Ni elementler tercih edilir (Çarboğa ve Karaca, 2019). Co ve Ni birlikte karıştırıldıklarında tüm alaşım elementlerine kıyasla çok güçlü bir yüzey merkezli kübik yapı oluşturur. Ni ilavesinde yüksek entropili alaşımlarda yüzey merkezli kübik fazının oluşması görülmektedir (Juan ve ark., 2013). Juan ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada alaşımlarının farklı x oranlarındaki yüksek oran Ni miktarlarında Yüzey merkezli kübik yapısını korumaktadır (Mridha ve ark., 2013). Dört veya beş metalik element içeren yüksek entropi alaşımların belirli bir oranda karışımı yapılabilir (Tsai ve ark. 2013; He ve ark., 2016). Yüksek entropili alaşımlar genel olarak tek fazlı katı çözeltilerdir (Cantor ve ark., 2013). Örneğin; yüksek mukavemet, yüksek süneklik ve yüksek korozyon direncine sahiptirler (Yeh, 2013).

2.5. Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Teknikleri

Yüksek entropili alaşımlar, geleneksel alaşımlardan farklı olarak, birden fazla elementin homojen şekilde dağılımını sağlamak için özel üretim teknikleri gerektirir. İşte yüksek entropili alaşımların üretiminde kullanılan bazı teknikler:

1-Mekanik Alaşım: Bu yöntem, farklı elementlerin toz halinde karıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Tozlar, yüksek enerjili bir top veya fraksiyonel mermi ile bir araya getirilerek sıkıştırılır. Bu işlem, tozların homojen bir şekilde karışmasını ve yeni bir alaşımın oluşmasını sağlar.

2- Elektrodpozisyon: bu yöntemde, farklı elementlerin iyonik formu, bir elektrik akımı yardımıyla bir elektriksel yüzey üzerine elektrolize edilir. Elektrot üzerindeki farklı iyonlar, homojen bir şekilde birleşerek alaşımı oluşturur.

3- Vakum Ergitme: Bu yöntem, farklı elementlerin saf metalleri vakum altında ergitilir. Ergitilmiş metal, bir kalıba dökülerek soğutulur ve bunun sonucunda alaşım oluşur.

4- Yüksek Basınçlı Sinterleme: Bu yöntemde, farklı elementlerin toz halindeki karışımı, yüksek basınç altında sıkıştırılır ve daha sonra yüksek sıcaklıkta fırınlanır. Bu işlem farklı elementlerin sıkı bir şekilde birleşmesini sağlar ve yüksek entropili bir alaşım oluşur.

5- Magnetron Sputtering: Bu yöntem, farklı elementlerin hedeflerinin bir vakum altında, bir magnetron kullanılarak bombardıman sonucuyla gerçekleştirilir. Bombardıman sonucu, hedeflerden çıkan atomlar homojen bir şekilde birleşip yeni bir alaşım oluşturur.

Bu yöntemlerin her biri, yüksek entropili alaşımların üretiminde farklı avantajlar ve dezavantajlar ortaya çıkarır. Örnek verecek olursak, vakum ergitme yöntemi, yüksek saflıkta alaşımların üretilmesini sağlarken, magnetron sputtering yöntemi ise ince film yüksek entropili alaşımların üretiminde etkili olmaktadır. Her bir yöntem, alaşımın özelliklerini ve üretim maliyetlerini etkileyen faktörleri farklı şekilde etkiler.



3. TOZLARIN ve NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Yüksek entropili alaşımların hazırlanması için kullanılan tozlar ve numuneler, alaşımların özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, tozların ve numunelerin hazırlanması önemli bir adımdır.

3.1. CoCrFeNiMn Alaşım Numunelerini Hazırlama

Toz halde bulunan Co-Cr-Fe-Ni-Mn elementlerinin belirli oranlarda, hassas tartıyla numuneler oluşturmakta ve bu numuneler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir.

CoCrFeNiMn alaşımı toz metalürjisi yöntemiyle üretilir. Bu yöntem, farklı elementlerin tozlarından homojen bir şekilde karıştırılması ve presleme makinesi kullanılarak sıkıştırılması ile gerçekleştirilir. Tozların karışımı, sıkıştırma işlemi sırasında yüksek bir basınç altında preslenir ve genellikle son ürün yarı mamulleri şeklindedir. Daha sonra yarı mamuller, yüksek sıcaklık ve basınç altında sinterlenir veya fırınlanır, böylece alaşımların yoğunluğu ve mekanik özellikleri artırılmış olur.

CoCrFeNiMn alaşımı toz metalürjisi yöntemiyle üretildiğinde, bu yöntemin birkaç avantajı vardır. İlk olarak, toz karışımı homojen bir şekilde hazırlanabilir, böylece alaşım numunelerinin bileşimi ve mikro yapısı kontrol edilebilir. İkincisi, presleme işlemi numunelerin istenilen şekle getirilmesini sağlar. Son olarak, sinterleme işlemi, numunelerin yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini artırarak daha dayanıklı ve yüksek performanslı hale getirir. Ancak toz metalürjisi yöntemiyle üretim, bazı dezavantajları da beraberinde getirir. Örnek verecek olursak, presleme işlemi, numunelerin yapısı ve mikro yapısını etkileyebilir. Sinterleme işlemi sırasında, numunelerin boyutlarında küçük değişiklikler olabilir ve bu da numunelerin şekil bozukluğuna neden olabilir. Bununla birlikte, bu dezavantajlar, doğru tasarım ve işleme adımları kullanılarak minimize edilebilir ve CoCrFeNiMn alaşım toz metalürjisi yöntemiyle başarıyla üretilir.

3.2. Tozların Karıştırılması

Toz metalürjisi (TM) kısaca, metal veya seramik tozlarını bir kalıpla şekillendirerek, şekillendirme esnasında veya sonrasında ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta pişirilmesi (sinterlenmesi) sürecidir. Karışma süresi 5-30 dakika aralığında yapılmaktadır (Upadhyaya, 1997).

Toz karışımı hazırlanırken, her bir elementin tozu doğru oranda ölçülmelidir. Karıştırma işlemi için genellikle bir toz karıştırıcı kullanılır. Bu cihazlar, tozların homojen bir şekilde karıştırmasını ve alaşım numunelerinin bileşimlerinin kontrol edilmesini sağlar.

Tozların homojen bir şekilde karıştırılması, CoCrFeNiMn alaşımının mikro yapısını ve bileşimini doğru bir şekilde kontrol etmek için son derece önemlidir. Homojen bir toz karışımı, numunelerin yapısal özelliklerini ve mekanik özelliklerini iyileştirir ve alaşımdan en iyi performansı elde etmeyi sağlar.



Resim 3.1. Tozların karıştırılması

3.3. Tozların Preslenmesi ve Şekillendirme

Sıkıştırma, yük altındaki toz partiküllerinin istenilen şekle dönüşmesi için yoğunluk kazandırma işlemidir. İşlenmemiş yoğunluk ve dayanımın elde edilmesi için tozların sıkıştırılması yapılır. Preslerin uyguladıkları basınç değerleri 70-700 MPa aralığındadır. Uygulamalı olarak kullanılan basınç değerleri de yoğunluk olarak 145 ila 450 MPa arasındadır. Presleme işlemi yapılmadan önce genelde tozlar 400 ila 800°C arasında ısıtma işlemine tabi tutulur, bunun sonucunda karbon, oksitler, kükürt, fosfor, rutubet ortamdan uzaklaştırılır. Isıl işlem sonucunda tozların sertliklerinde azalma görülür bu da tozların sıkıştırma işlemine olumlu yönde etki eder. Oksijen azaldıkça sıkıştırma işlemi artar ve tavlama sıcaklığı yükseldikçe sıkıştırma işlemi artar.

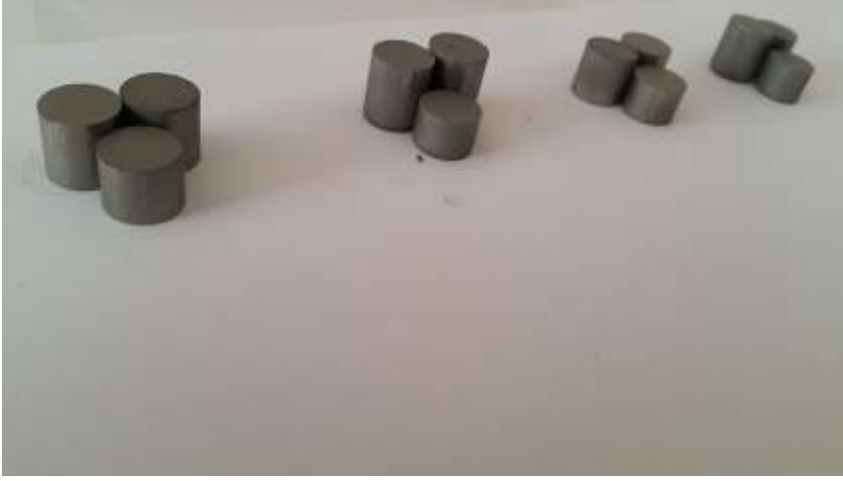
Tozların preslenmesi ve şekillendirilmesi, birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Bu işlem, tozların bir araya getirilmesi ve belirli bir şekil verilmesi için kullanılır.



Resim 3.2. Hidrolik pres



Resim 3.3. Tozların preslenmiş hali



Resim 3.4. Tozların preslenmiş hali



Resim 3.5. Tozların preslenmiş hali

3.4. Alaşım Numunelerinin Üretilmesi

3.4.1. Vakum Ark Melting Yöntemi

Ark melting yöntem ile üretimi yapılacak alaşımın içinde bulunan elementler %99,9 saflıkta, toz ve külçe halinde temin edildi. Bu deneyde yapılmış olan çalışmada Co20Cr20Fe20Ni20Mn20 ve Co10Cr10Fe50Mn30 alaşımlar hassas terazi ile hazırlanmıştır.

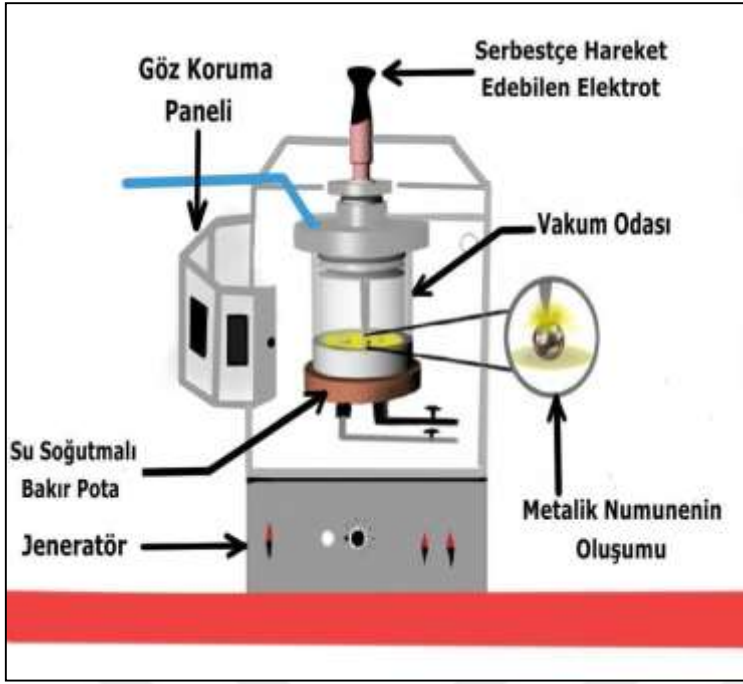
Numuneler İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Manyetik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunan ark eritme sistemi ile ergitilerek üretilmiştir.

Kaynak çalışmalarının yaklaşık olarak %75'i ergitme ve döküm yöntemi ile yapılmış olup ergitme yöntemlerinden de en çok kullanılmış olan ve en popüler olan vakum

ark eritmedir. Sıcaklığın yaklaşık olarak 3000°C ye kadar ulaşabiliyor olmasından dolayı çok yüksek ergime noktasına sahip metallere bile bu yöntem kullanılarak eritilmektedir fakat bu yöntemin dezavantajı da bazı düşük kaynama ve ergime noktalı metallerin buharlaşmasıdır. Bu nedenle alaşım hazırlanırken kompozisyon kontrollerinin iyi yapılması gerekmektedir. Bu tarz durumlarda indüksiyon ve direnç ısıtma fırınları alaşım hazırlamak için uygun yöntem olabilir (Zhang, 2005).



Resim 3.6. Ark eritme sistemi



Şekil 3.1. Ark eritme sistemi ve bölümleri



Resim 3.7. Ergitilen numuneler



Resim 3.8. Ergitilen numuneler



Resim 3.9. Elementlerin tartımı için kullanılan hassas terazi



Resim 3.10. Ark ergitme yöntemiyle oluşturulan numuneler



Resim 3.11. Ark ergitme yöntemiyle oluşturulan numuneler



Resim 3.12. Ark ergitme yöntemiyle oluşturulan numuneler

3.5. Üretilen Numunelerin Metalürjik Çalışmalar İçin Hazırlanması

Ark eritme sistemiyle üretilecek olan numunelerin, metalürjik çalışmalarının ve mikro yapı incelemelerinin yapılabilmesi için kesme işlemi, sonrasında yüzeylerine ardışık olarak zımparalama ve dağlama işlemleri yapılmalıdır (İ.Ü. Metalürji Müh. Lab. Deney Föyleri, 2021).

Numune Alınması: Metalografik inceleme için belirlenen numunenin bir değere sahip olması için, bu numunenin kimyasal bileşim ve fiziksel özellik bakımından temel malzemeyi tam olarak temsil etmesi gerekir. Bu bakımdan işin temeli numune alınması işlemidir. Metalografik numune alınmasında belli kurallar olmasa da bazı genel prensipler vardır ve yerine göre insan zekâsı ve bilgisi kullanılır. Numunenin nereden alınacağı belirlendikten sonra uygun bir alet ile numune kesimi gerçekleştirilir (İ.Ü. Metalürji Müh. Lab. Deney Föyleri, 2021).

Numunenin Kalıplanması: Zımparalama işlemi gerçekleştirildiğinde ufak ve biçimsiz şekilli numuneleri elle tutmak zor olacağından kalıplama işlemi yapılır. Kalıplama işlemi sıcakta ve basınç altında kalıplama, soğuk olarak kalıplama şeklinde olabilir (İ.Ü. Metalürji Müh. Lab. Deney Föyleri, 2021).

Zımparalama: Uyumsuz ve ince zımparalama olarak sınıflandırılabilir. Uyumsuz zımparalama kademesinin amacı, ince zımparalama ve parlatma kademeleri için ilk düz yüzeyi elde etmektir. Bu kademede 80 ve 150 nolu zımparalar kullanılır.

İnce zımparalamada 240, 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2500, 3000 nolu zımparalar kullanılır. Uyumsuz ve sonuncu Parlatma: Her iki kademede de numune parlatma disklerine tutulur. Parlatma kumaşlarıyla disklerin üzeri kaplıdır (İ.Ü. Metalürji Müh. Lab. Deney Föyleri, 2021).

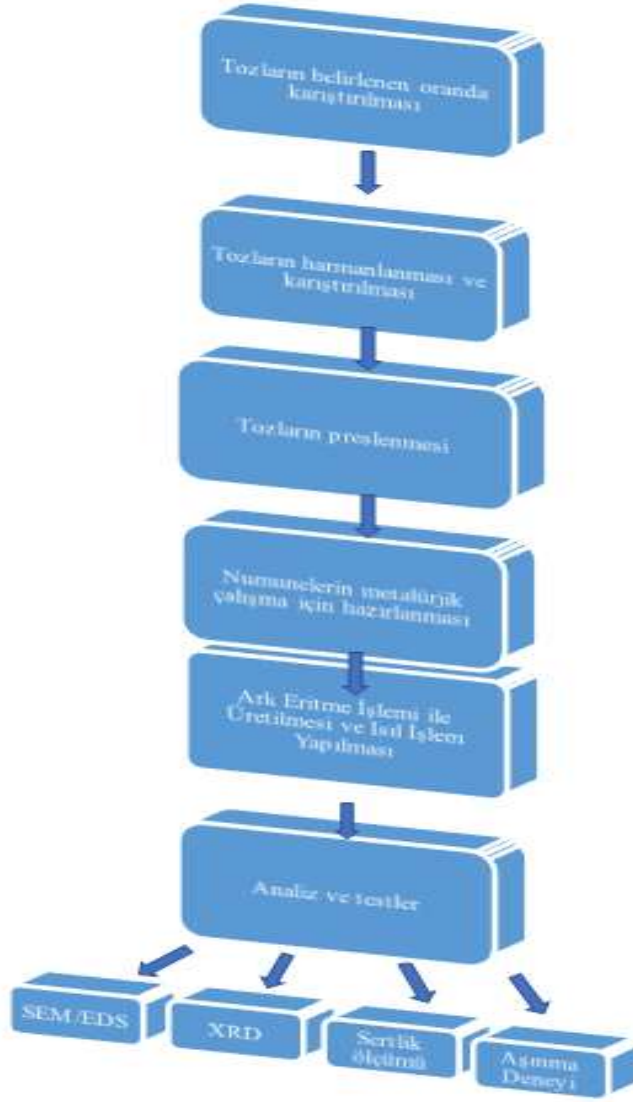
Dağlama: Parlatılmış numunelerin mikroskopta incelenmesi sonucu yapı detayları azda olsa ortaya çıkabilir. Parlatma işlemi sonrası, metalik olmayan kalıntılar ve porozite, çatlak gibi yüzey kusurları görülebilir. Numunenin uygun bir kimyasal reaktifle dağlanması gerçek iç yapı özelliklerini ortaya çıkarır (İ.Ü. Metalürji Müh. Lab. Deney Föyleri, 2021).

4. TOZLARIN ANALİZ İŞLEMLERİ

Tozların analiz işlemleri, tozların kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini içerir. Bu işlemler, tozların kullanım alanına göre değişebilir. Tozların özelliklerini belirleyerek, daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur ve endüstriyel uygulamalarda daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar.

4.1. Numunelerin Analiz ve Test İşlemleri

Üretimi yapılan çalışmaların kullanım yöntemi aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Yapılan işlem ve testlere ait akış şeması

Tablo 1. Co20Cr20Fe20Ni20Mn20+Er bileşiminde bulunan elementlerinin 30gr için karışım miktarları

Sembol	İsim	Atomik Kütle (gr)	Atomik oran (%)
Co	Kobalt	6,305	20,00
Cr	Krom	5,563	20,00
Fe	Demir	5,975	20,00
Ni	Nikel	6,279	20,00
Mn	Manganez	5,878	20,00

Tablo 2. Fe50Mn30Co10Cr10+Er bileşiminde bulunan elementlerinin 30gr için karışım miktarları

Sembol	İsim	Atomik Kütle	Atomik oran (%)
Co	Kobalt	3,186	10,00
Cr	Krom	2,811	10,00
Fe	Demir	15,094	50,00
Mn	Manganez	8,909	30,00

4.2. Numunelerin Mikro Sertlik Ölçümü

Mikro sertlik yöntemi genel olarak küçük numunelerin ve çok ince sacların sertliklerinin ölçülmesinde kullanılır. Mikro sertlik deneyleri nispeten kullanışlı olması sebebiyle tercih edilen küçük boyuttaki mesafelerdeki sertlik değişimini görmek için kullanılır. Son dönemde özellikle kesilebilirlik konusu üzerinde inceleme yapan araştırmacı sayısı artmaktadır (Xie ve Tamai, 2007; Delgado ve ark., 2005).

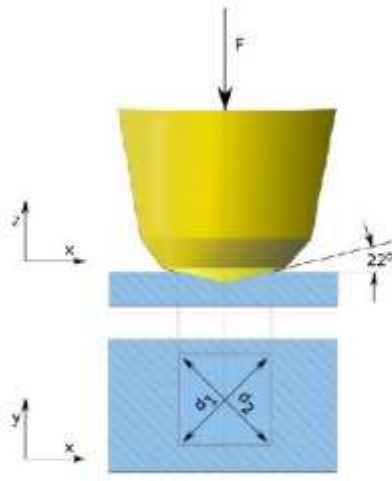
Mikro sertlik ölçümü, malzemelerin yüzey sertliğini ölçmek için kullanılan bir testtir. Bu test, malzemenin mikro yapısına, tane boyutlarına, kristal yapılarına ve diğer yapısal özelliklerine bağlı olarak değişir.

Mikro sertlik ölçümü için kullanılan en yaygın cihazlar Vickers ve Knoop sertlik ölçerleridir. Bu cihazlar, malzemenin yüzeyine belirli bir yük uygularlar ve bu yük altında yapılan izlerin boyutlarını ölçerek sertliği hesaplarlar.

1. Vickers sertlik testi (HV = Hardness of Vickers)
2. Knoop sertlik testi (HK = Hardness of Knoop)

4.2.1. Vickers sertlik testi

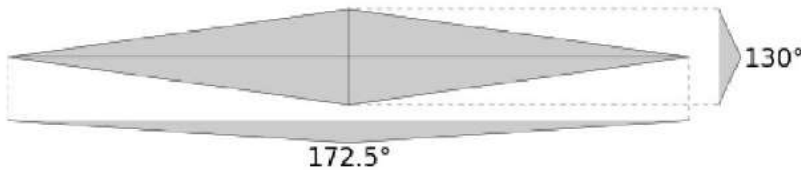
Vickers Ltd. Şirketinde Robert L. Smith ve George E. Sandland tarafından Brinell metoduna alternatif olarak malzemenin sertlik değerini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir (Smith, Sandland G 1922). Test edilecek malzemenin sertliğine bakılmaksızın tüm malzemelerde kullanılabilir olmasından dolayı diğer yöntemlere göre daha kolay bir işlem olduğundan diğer sertlik belirleme deneylerine göre daha fazla tercih edilir.



Şekil 4.2. Vickers sertlik testi şematik görünümü (URL-1)

4.2.2 Knoop sertlik testi

Knoop sertlik testi 1939 yılında A.B.D’de Frederick Knoop ve Ulusal Standartlar Enstitüsü’nden çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve ASTM E384 standardı olarak tanımlanmıştır (Knoop, Peters and Emerson 1939). Mikro sertlik testi olarak genelde küçük izlerin oluşturmuş olduğu kırılğan malzemelerin ya da ince kesitlerin mekanik sertliğinin belirlenmesinde kullanılan bir deneydir. Knoop sertlik testinde sadece uzun köşegen ölçülür ve bu ölçüler hesaplamalar için kullanılır.



Şekil 4.3. Knoop sertlik testi elmas uç temas açısı görüntüsü (URL-2)

Sertlik değerlerinin belirlenmesinde Wickers sertlik metodu kullanılmış olup çalışmamızda toz metalürjisi ve vakumlu ark melting yöntemiyle hazırlamış olduğumuz ilk 4 ü normal diğer 4 ü ısıtılı işlemli olmak üzere 8 farklı numune üzerinde yapmış olduğumuz mikro sertlik testlerinde her bir numunenin 5 farklı noktadan değerleri alınarak ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır alaşım elementlerinin özellikleri normal (ısıtılı işlemsiz) ve ısıtılı işlemli kıyaslamalar sonucu farklı değerler ve her bir numunenin ortalama değerleri ortaya çıkmış olup bu değerler Tablo 4.3'te, mikro sertlik ölçüm değerleri grafiği de şekil 4.4'de belirtilmiştir. Sertlik değerlerinin ortalaması aşağıda küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Normal (ısıtılı işlemsiz);

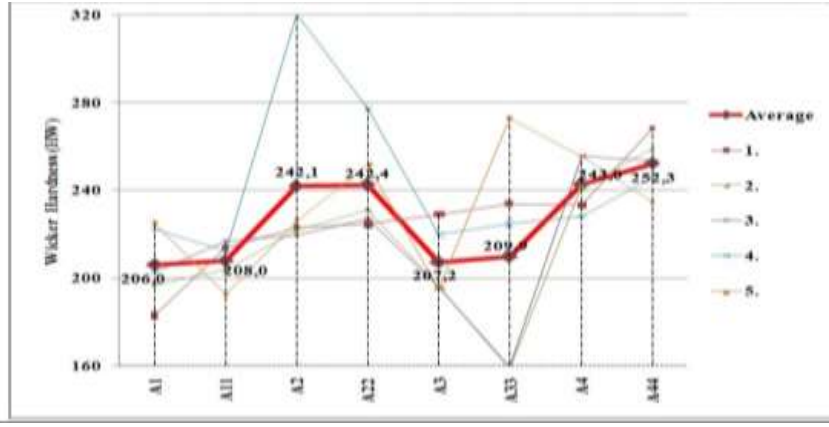
1. A1 nolu CoCrFeNiMn: 206,0
2. A3 nolu CoCrFeniMnEr: 207,1
3. A2 nolu CoCrFeMn: 242,1
4. A4 nolu CoCrFeMnEr: 243,0

Isıtılı işlemli;

1. A11 nolu CoCrFeNiMn: 208,0
2. A33 nolu CoCrFeniMnEr: 209,9
3. A22 nolu CoCrFeMn: 242,4
4. A44 nolu CoCrFeMnEr: 251,5

Tablo 4.1. Mikro Sertlik Ölçüm Değerleri

Alaşımlar	Ortalama	1.	2.	3.	4.	5.
A1	206,0	183,1	197,2	202,7	222,2	224,7
A11	208,0	214,1	203,8	216,9	212,5	192,7
A2	242,1	222,8	221,7	219,7	320,5	225,8
A22	242,4	224,7	231,3	227,0	277,2	251,7
A3	207,1	228,8	196,3	195,9	219,8	195,3
A33	209,9	233,7	158,4	159,7	224,7	272,8
A4	243,0	233,4	242,1	255,6	228,3	255,6
A44	251,5	268,4	258,9	253,7	245,9	234,7



Şekil 4.4. Mikro sertlik ölçüm değerleri grafiği

4.3. Numunelerin SEM Analizleri

Tarama sonucu numune yüzeyinde görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektron mikroskobu numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller sayesinde faz yapılarını tespit edilir ve mikro yapılarını inceler.

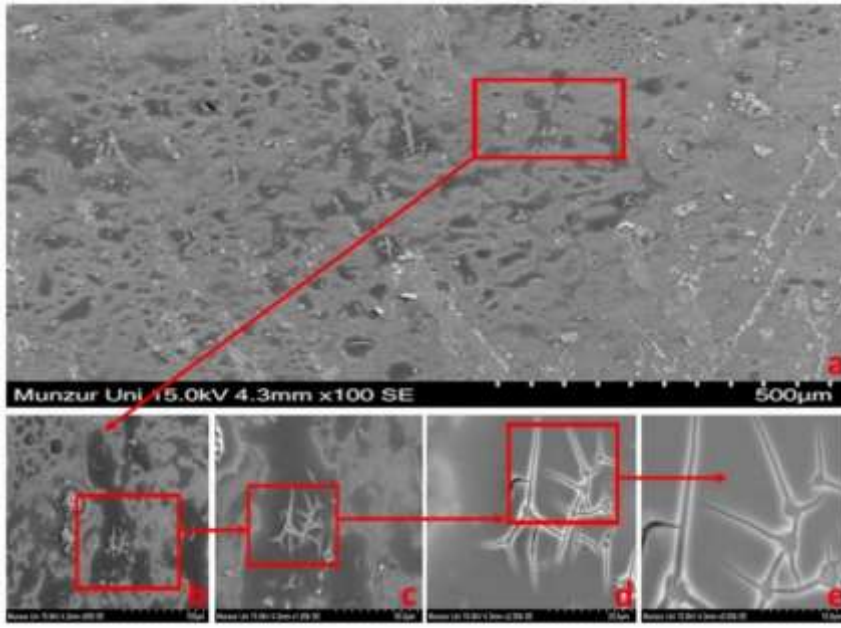
SEM analizi için öncelikle numunenin hazırlanması gereklidir. Numunenin yüzeyi, uygun bir şekilde hazırlanmalıdır. Bu işlem, numunenin uygun bir matris içinde yer alması, numunenin yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması, numunenin yüzeyinin temizlenmesi ve numunenin kurtulması işlemlerini içerir.

SEM analizi, birçok farklı alanda kullanılır. Örneğin, malzeme bilimi, metalürji, nanoteknoloji, biyoloji, tıp ve çevre bilimleri gibi birçok alanda kullanılır. SEM analizi, malzemelerin yapısal özelliklerini belirlemek, numunelerin yüzeyindeki yapılar ve özellikleri incelemek, numunelerin kalitesini kontrol etmek ve malzemelerin kullanım alanlarını belirlemek için önemlidir.



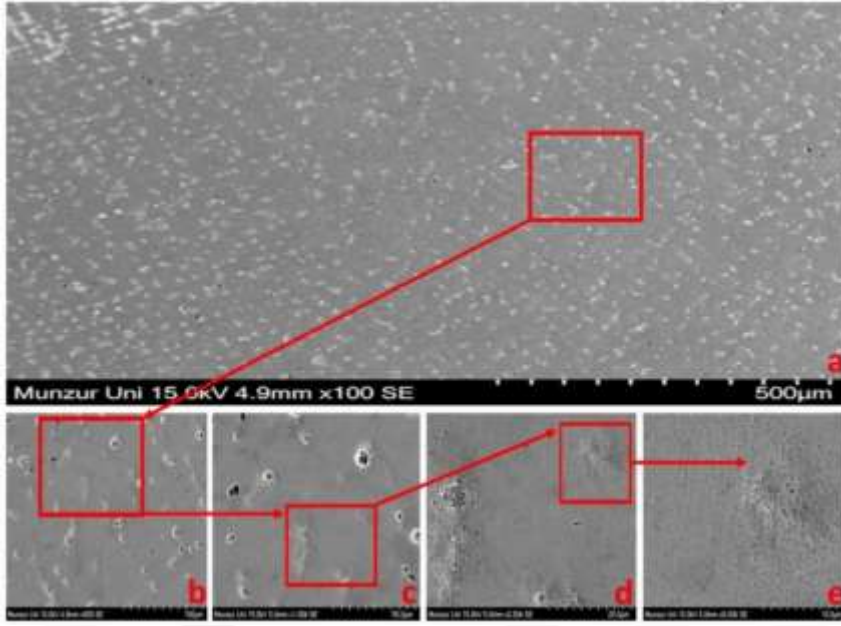
Resim 4.1. SEM elektron mikroskobu

Normal (ısıtıl işlemsiz) üretilen A1 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin Farklı büyütme (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri 5 farklı noktada incelenmiştir. Resim 4.2’de işaretlenmiş numunelerin tane yapıları inceleme sonucunda numunenin yüzeyindeki yapılar belirlenmiş olup, yapı içerisinde çökeltilerin meydana geldiği ve bu çökeltiler dendritik yapıya benzer bir görünüm oluşmasına neden olmuştur. A1 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin kütleli yapılarının korunduğu şekil yapısında görülmektedir.



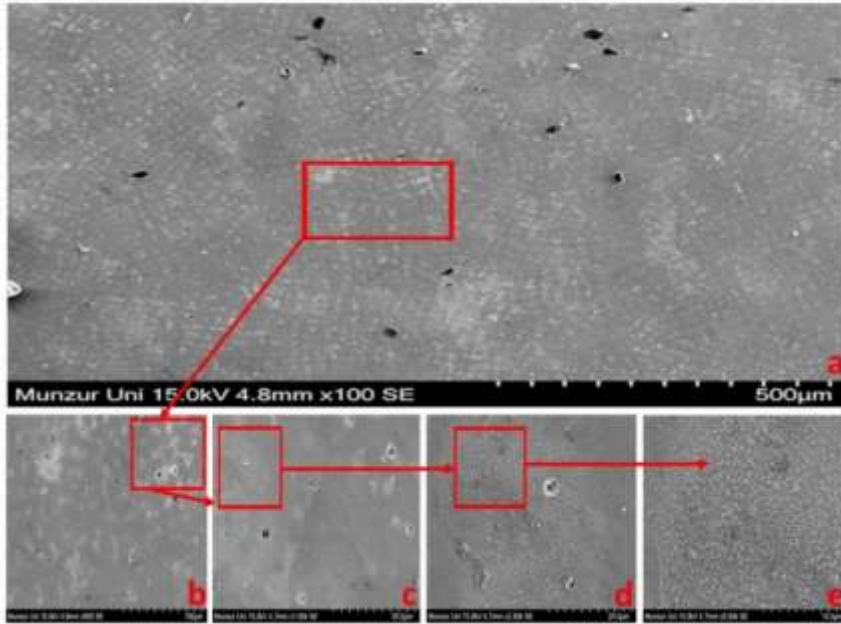
Resim 4.2. A1 Numaralı numunenin farklı büyütme SEM görüntüleri

Normal (ısıtıl işlemsiz) üretilen A2 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin Farklı büyütme (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri 5 farklı noktada incelenmiştir. Resim 4.3’de işaretlenmiş numunelerin tane yapıları inceleme sonucunda düzenli bir yapının olduğu, genelde bulunan beyaz noktaların (ağırlıkça Cr-Co dan oluşan noktalar) eşit ve bir düzende dağılımıyla belirlenmiştir. A2 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin kütleli yapılarının korunduğu şekil yapısında görülmektedir.



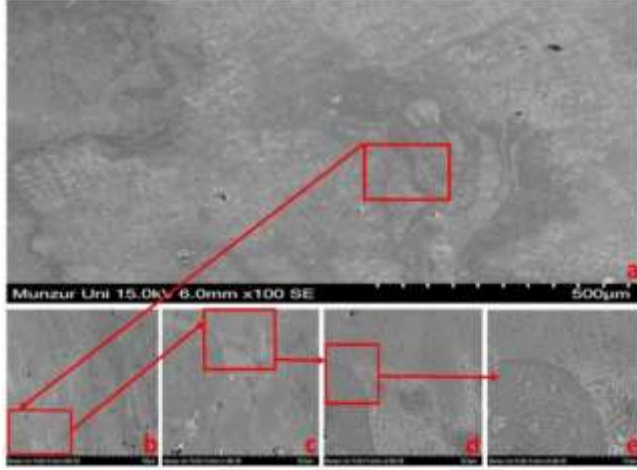
Resim 4.3. A2 Numaralı numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Normal (ısıtıl işlemsiz) üretilen A3 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin Farklı büyütmelerde (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri 5 farklı noktada incelenmiştir. Resim 4.4’de işaretlenmiş numunelerin tane yapısı ikiz tane yapısına benzeyen farklı yönlerden bloklar halinde gelerek belli noktalarda birleşmiş gibi bir görünüme sahiptir. A3 numunesine az miktarda ilave ettiğimiz Erbiyumun bileşime ve mekanik özelliklere fazla etki etmese de genel yapıyı değiştirdiği görülmüştür.



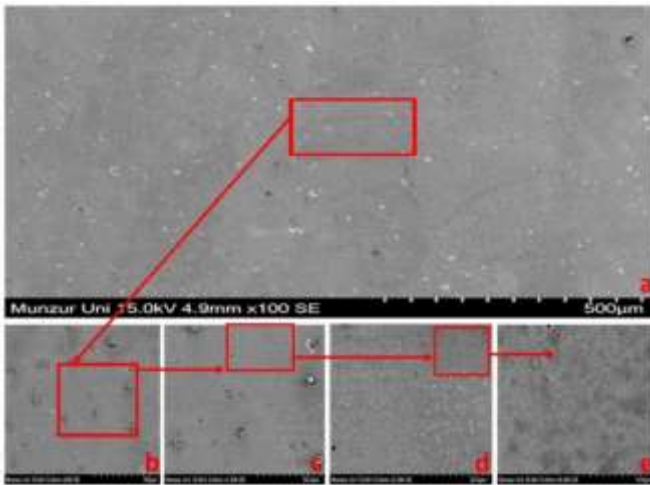
Resim 4.4. A3 Numaralı numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A4 nolu Co-Cr-Fe-Mn-Er numunesinin Farklı büyütmelelerde (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri 5 farklı noktada incelenmiştir. Resim 4.5’de işaretlenmiş numunelerin tane yapıları inceleme sonucunda tane sınırlarının genişlediği ve çökelmelerin azaldığı görülmektedir. A4 nolu Co-Cr-Fe-Mn-Er numunesinin kütleel yapılarının korunduğu şekil yapısında görülmektedir.



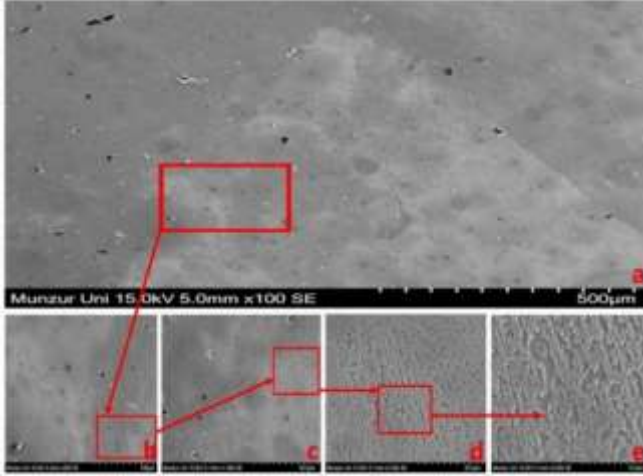
Resim 4.5. A4 Numaralı numunenin farklı büyütmelelerde SEM görüntüleri

Isıl işlemlili üretilen A11 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin Farklı büyütmelelerde (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görünümüleri incelendiğinde. Resim 4.6’da işaretlenmiş bölümlerin tane yapıları inceleme sonucunda A1 numunesinde olduğu gibi yapı içerisinde çökeltilerin olduğu ve ısıt işlemden ötürü homojen bir dağılımın olduğu görülmektedir.



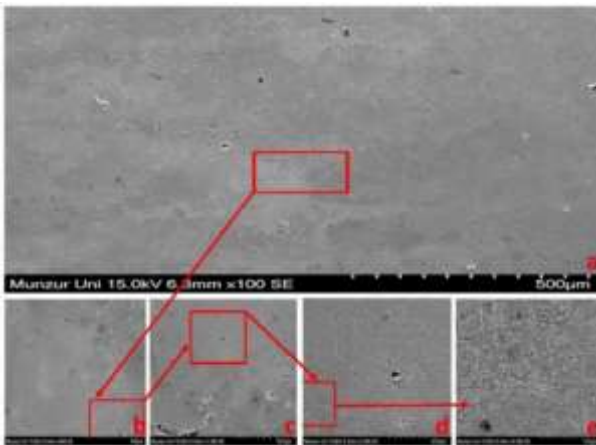
Resim 4.6. A11 Numaralı numunenin farklı büyütmelelerde SEM görüntüleri

Isıl işlemli üretilen A22 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin Farklı büyütmelerde (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri incelendiğinde. Resim 4.7’de belli bir noktanın büyütülerek iç yapıdaki farklılıkları tespit etmemize imkan veren özellikle 2500x ve 5000x büyütmedeki görüntüyü incelediğimizde açık gri tondaki tabakalı yapının numunenin ana matrisini oluşturan Fe-Mn bileşiğini oluşturduğu, siyah çökelen kısmın ise daha çok krom bölgesi olduğu düşünülmektedir.



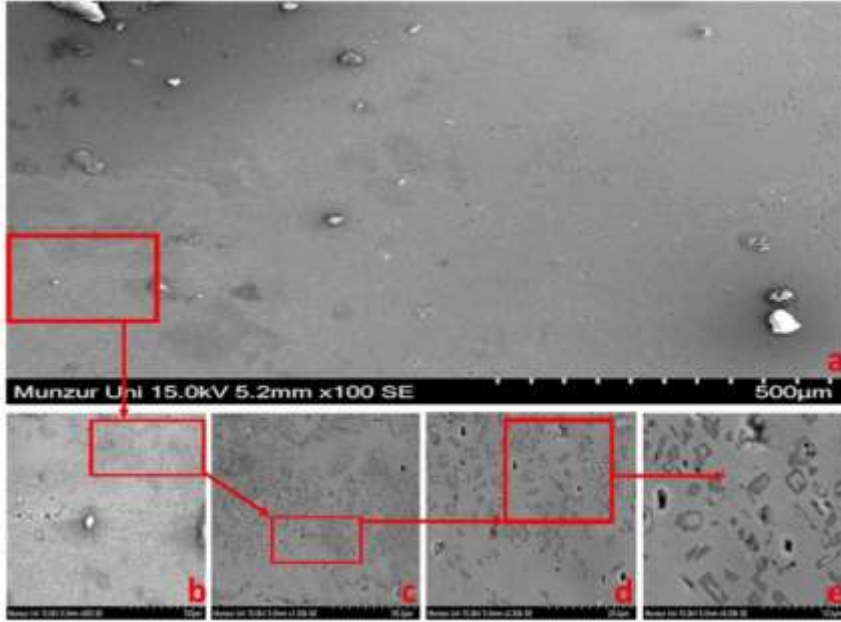
Resim 4.7. A22 Numaralı numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Isıl işlemli üretilen A33 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin Farklı büyütmelerde (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri 5 farklı noktada incelenmiştir. Resim 4.8’de işaretlenmiş numunelerin tane yapıları inceleme sonucunda numunenin yüzeyindeki yapılar belirlenmiş olup A33 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin kütleli yapılarının korunduğu şekil yapısında görülmektedir.



Resim 4.8. A33 Numaralı numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Isıl işlemlili üretilen A44 nolu Co-Cr-Fe-Mn-Er numunesinin Farklı büyütmelerde (100x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x) alınan SEM Mikro yapı görüntüleri 5 farklı noktada incelenmiştir. Resim 4.9’da yapıyı oluşturan matrisin büyük bir kısmının demir içeriğinden oluşmasından kaynaklı hem de ısıl işlemin etkisiyle homojen bir yapı oluştuğu görülmüştür.



Resim 4.9. A44 Numaralı numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

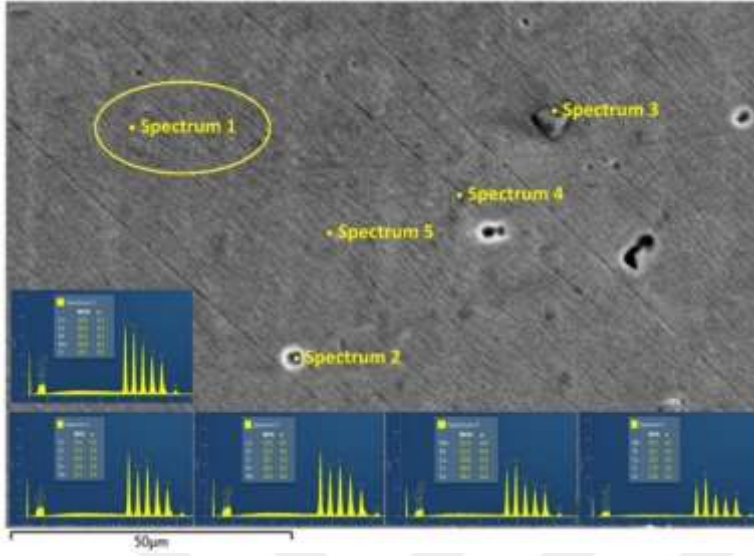
4.4. Numunelerin EDS Analizleri

EDS analizi için öncelikle SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) gibi bir cihaza ihtiyaç vardır. SEM analizinde olduğu gibi, numune öncelikle uygun bir matris içinde hazırlanıp daha sonra, numune SEM cihazına yerleştirilir ve yüzeyi yüksek enerjili elektron demeti ile taranır. Elektron demeti, numunenin yüzeyindeki atomları uyarır ve atomlar X-ışınları gibi farklı enerjilerde elektromanyetik radyasyonlar yayarak geri tepme yaparlar. EDS analizi sırasında, geri tepen X-ışınları, bir detektör tarafından ölçülür ve X-ışınlarının enerji seviyeleri, numunenin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılır.

EDS analiz sonuçları, numunenin kimyasal bileşimini belirler. Analiz sonucunda, numunenin yüzeyindeki elementlerin tespit edilmesi, elementlerin yüzdesel dağılımı ve numunenin kimyasal bileşimi hakkında ayrıntılı bilgi sağlar.

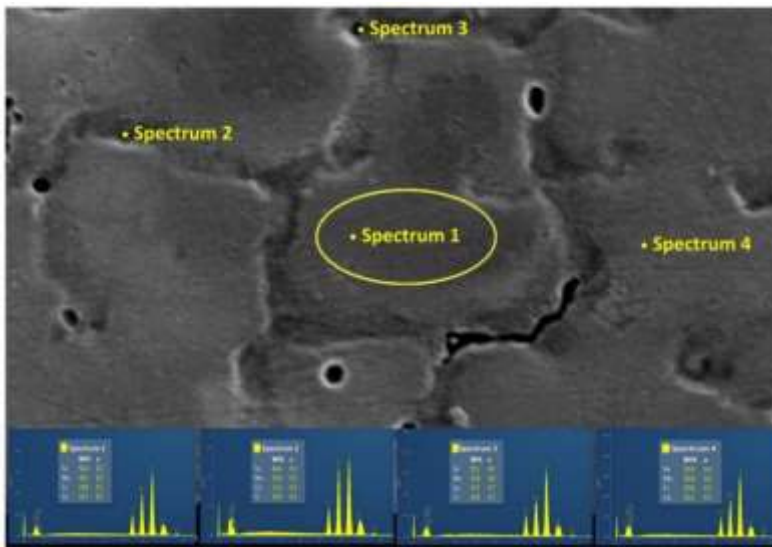
Normal (ısıl işlemsiz) üretilen A1 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni numunesi, analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları doğru olup bu elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş

olduğumuz değerlere yakındır. Spectrum 2, spectrum 3’de Mn oranı düşük olsa da belirlediğimiz değerlere yakındır. Bu değerler Resim 4.10’da gösterilmiştir.



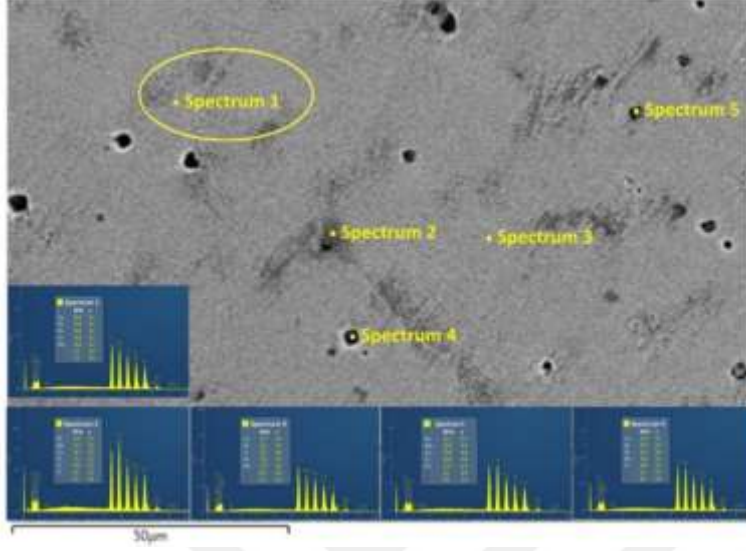
Resim 4.10. A1 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri

Normal (ısıtıl işlemsiz) üretilen A2 nolu Fe-Cr-Co-Mn numunesi, analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları doğru olup bu elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere yakındır. Spectrum 2’de Fe oranı belirlediğimiz orana göre biraz düşük, Mn oranı biraz yüksek, spectrum 3’de Fe oranı belirlediğimiz orana göre biraz yüksek, Mn oranı biraz düşük olsa da değerlerimiz belirlemiş olduğumuz değerlere yakındır. Bu değerler resim 4.11’de gösterilmiştir.



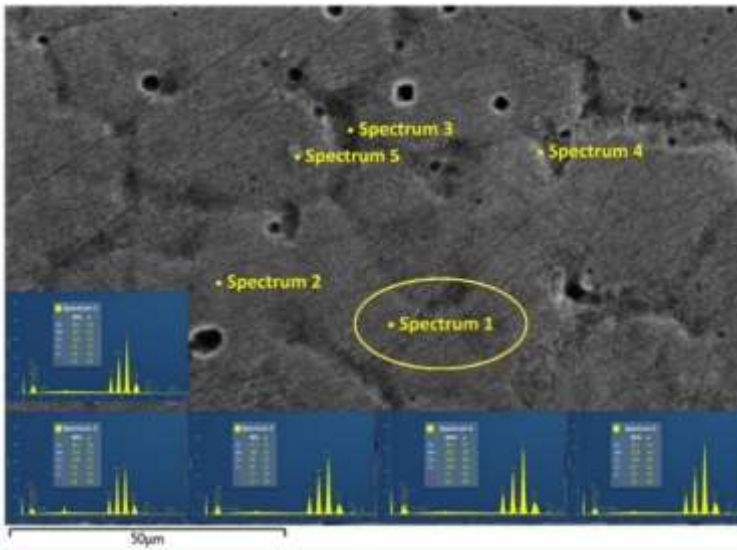
Resim 4.11. A2 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri

Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A3 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni-Er numunesi, analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları doğru olup bu elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere yakındır. Bu değerler Resim 4.12’de gösterilmiştir.



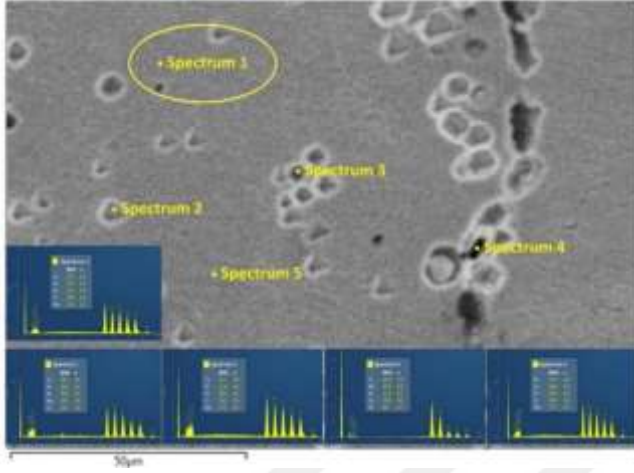
Resim 4.12. A3 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri

Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A4 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Er numunesi, analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları doğru olup bu elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere yakındır. Spectrum 1 ve spectrum 5’de Mn oranı belirlediğimiz orana göre biraz düşük olsa da değerlerimiz belirlemiş olduğumuz değerlere yakındır. Bu değerler resim 4.13’de gösterilmiştir.



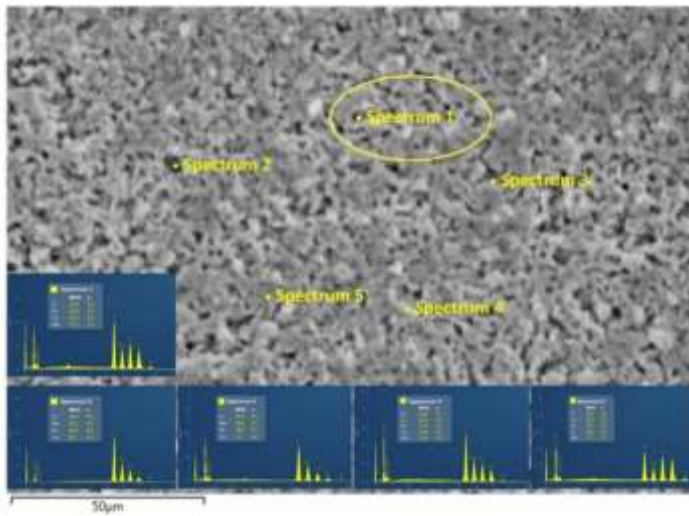
Resim 4.13. A4 Numaralı numunenin EDS noktasal spectrum değerleri

Isıl işlemli üretilen A11 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni numunesi, analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere göre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi intermetalik fazın oluşmasıdır. XRD analizinde olduğu gibi burada da tane yapısı küçülüyor buna bağlı olarak değerler de düşüyor. Spectrum 4’de Co, Fe, Ni oranları yarı yarıya düşmektedir. Cr oranı yaklaşık olarak 2 katına yükselmiş, Mn oranı da artmıştır. Bu değerler resim 4.14’de gösterilmiştir.



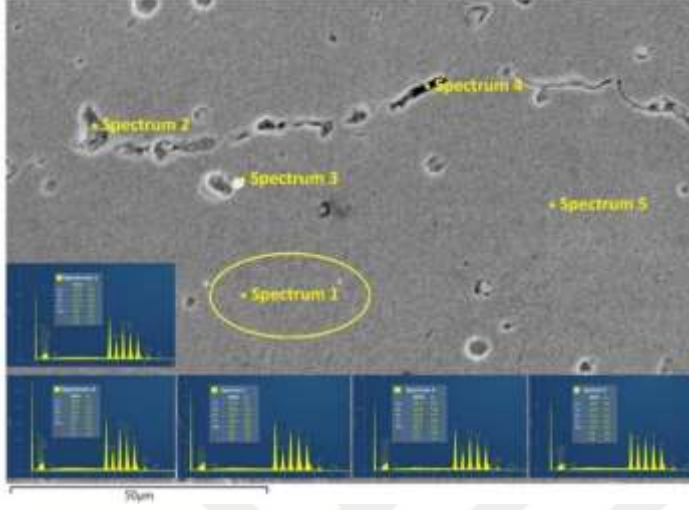
Resim 4.14. A11 Numaralı numunenin ısıtılmış EDS noktasal spectrum değerleri

Isıl işlemli üretilen A22 nolu Fe-Cr-Co-Mn analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere göre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi intermetalik fazın oluşmasıdır. XRD analizinde olduğu gibi burada da tane yapısı küçülüyor buna bağlı olarak Co, Cr, Fe değerleri de düşüyor. Bu değerler resim 4.15’de gösterilmiştir.



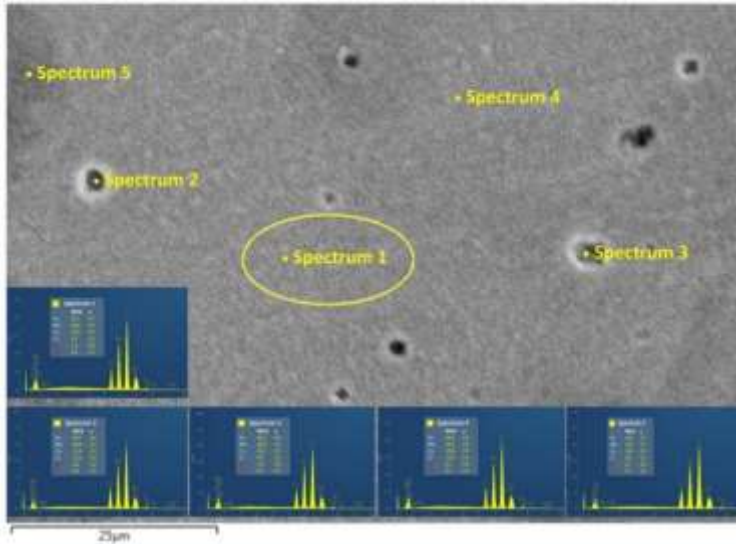
Resim 4.15. A22 Numaralı numunenin ısıtılmış EDS noktasal spectrum değerleri

Isıl işlemlili üretilen A33 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni-Er analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere göre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi intermetalik fazın oluşmasıdır. XRD analizinde olduğu gibi burada da tane yapısı küçülüyor buna bağlı olarak Mn değerleri de düşüyor. Bu değerler resim 4.16’da gösterilmiştir.



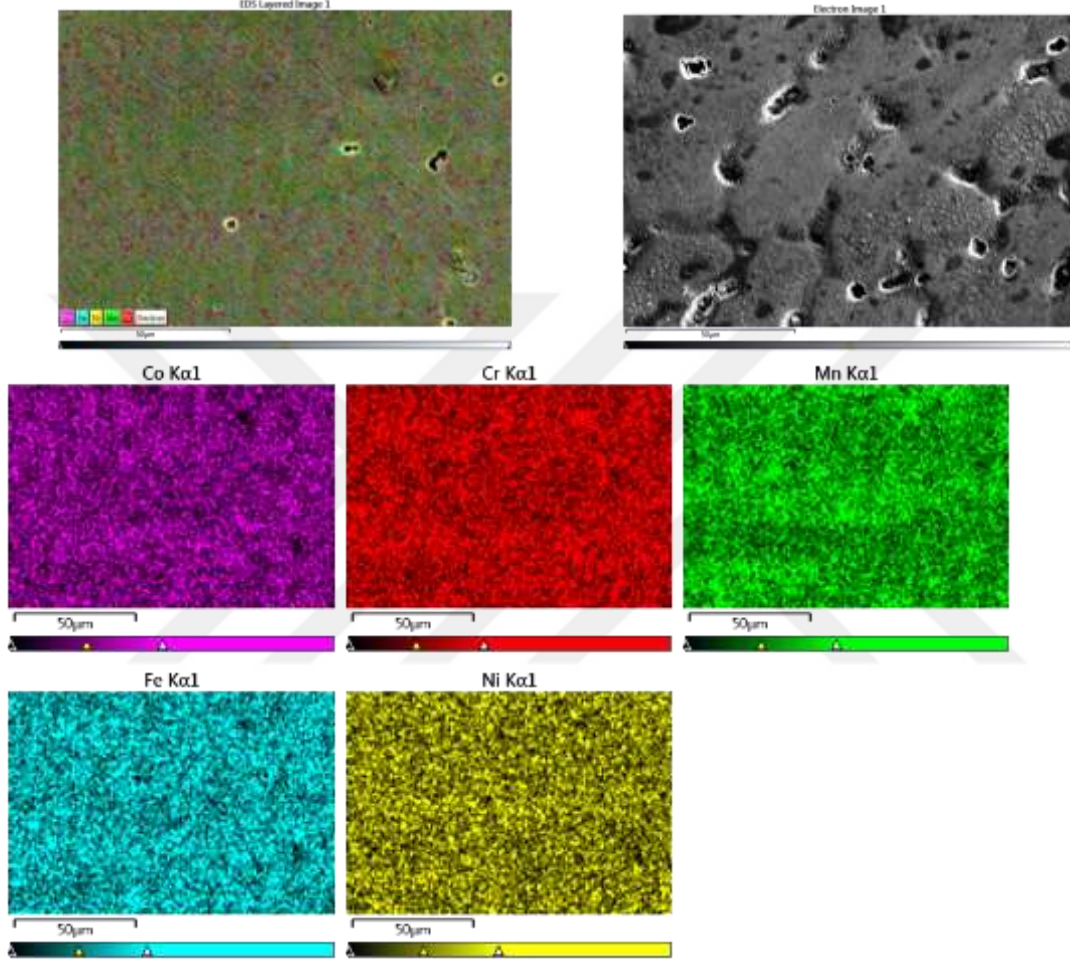
Resim 4.16. A33 Numaralı numunenin ısıll işlemlili EDS noktasal spectrum değerleri

Isıl işlemlili üretilen A44 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Er numunesi, analiz sonucunda elementlerin yüzdesel oranları doğru olup bu elementlerin yüzdesel oranları belirlemiş olduğumuz değerlere yakındır. Resim 4.17’de gösterilmiştir.



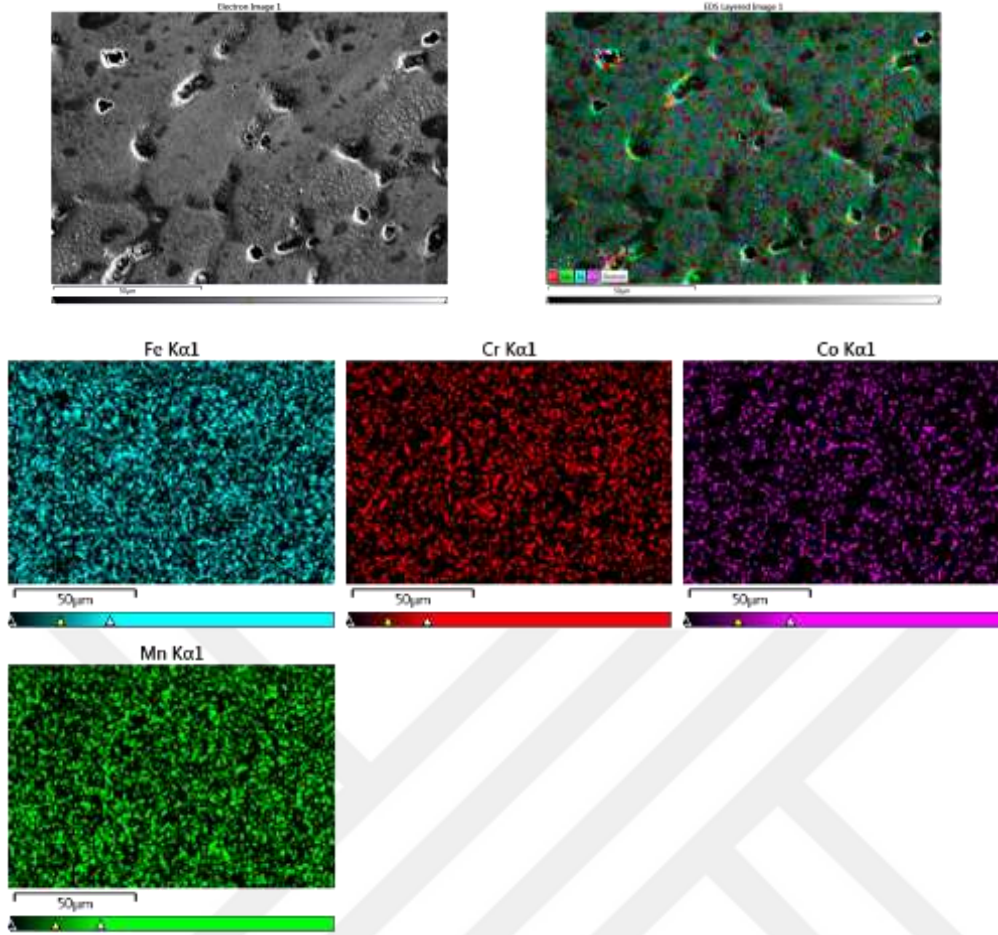
Resim 4.17. A44 Numaralı numunenin ısıll işlemlili EDS noktasal spectrum değerleri

Normal şartlarda üretilen A1 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.18’de gösterilmiştir. Yapı içerisinde bulunan elementlerin düzenli bir dağılım gösterdikleri görülmektedir. Yüksek entropili alaşımlarda görülen bu düzenli dağılımın nedeni mikron seviyesinde kullanılan metal tozlarının ergitme öncesi uzunca bir süre karıştırılarak preslenmesinden kaynaklıdır.



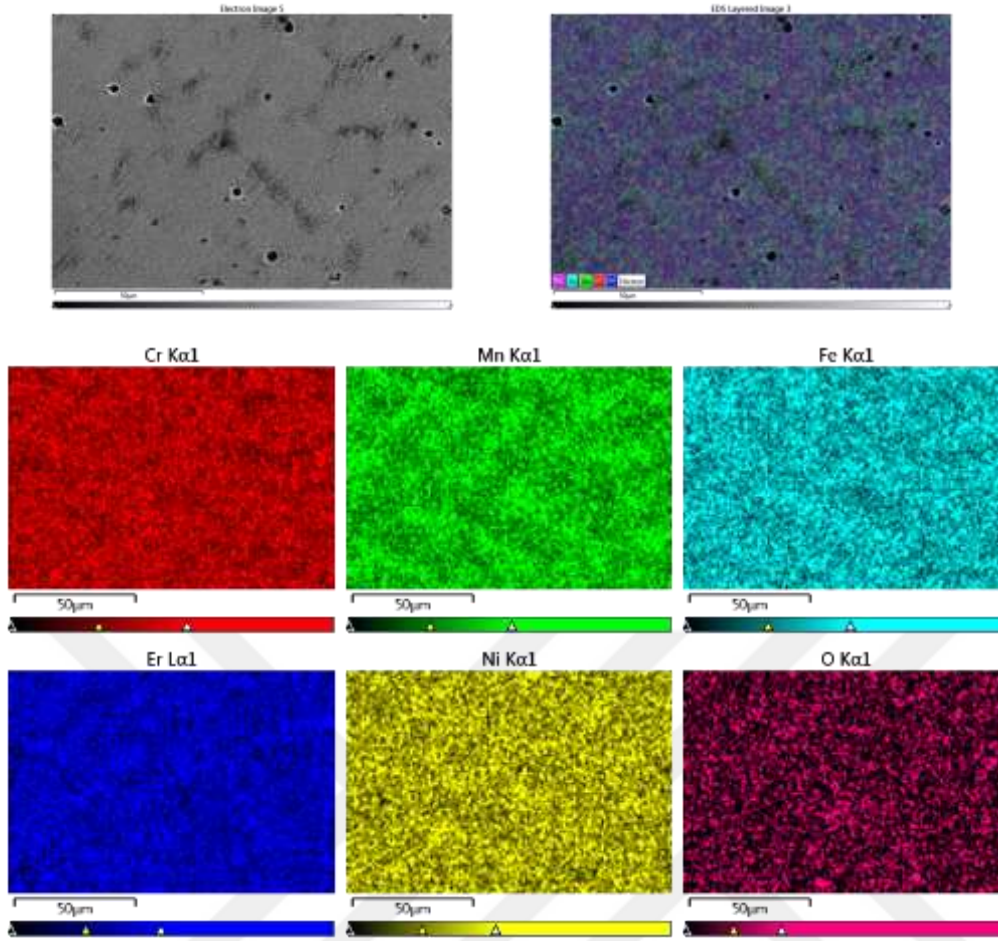
Resim 4.18. A1 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri

Normal şartlarda üretilen A2 nolu Fe-Cr-Co-Mn Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.29’da gösterilmiştir. Genel yapı homojen bir dağılım göstermesine rağmen belli bölgelerde çökelmelerin olduğu mapping analizinde net olarak görülmektedir.



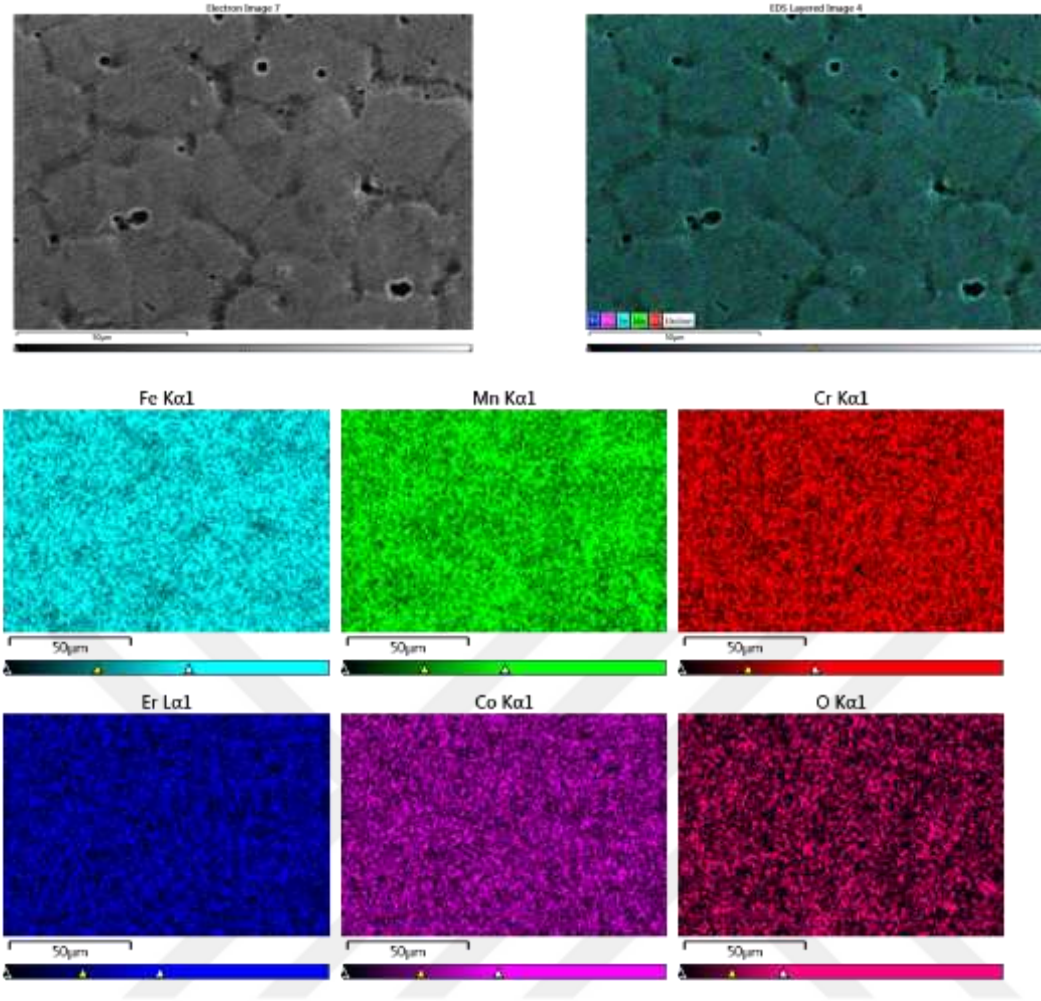
Resim 4.19. A2 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri

Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A3 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni-Er Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.20’de gösterilmiştir. Özellikle çok az oranda ilave ettiğimiz Erbiyum nadir toprak elementinin dağılımını mapping analiziyle göre bilmemiz üretilen numunenin erbiyum elementini bünyesine alıp almadığı hakkında bize net bilgi vermektedir.



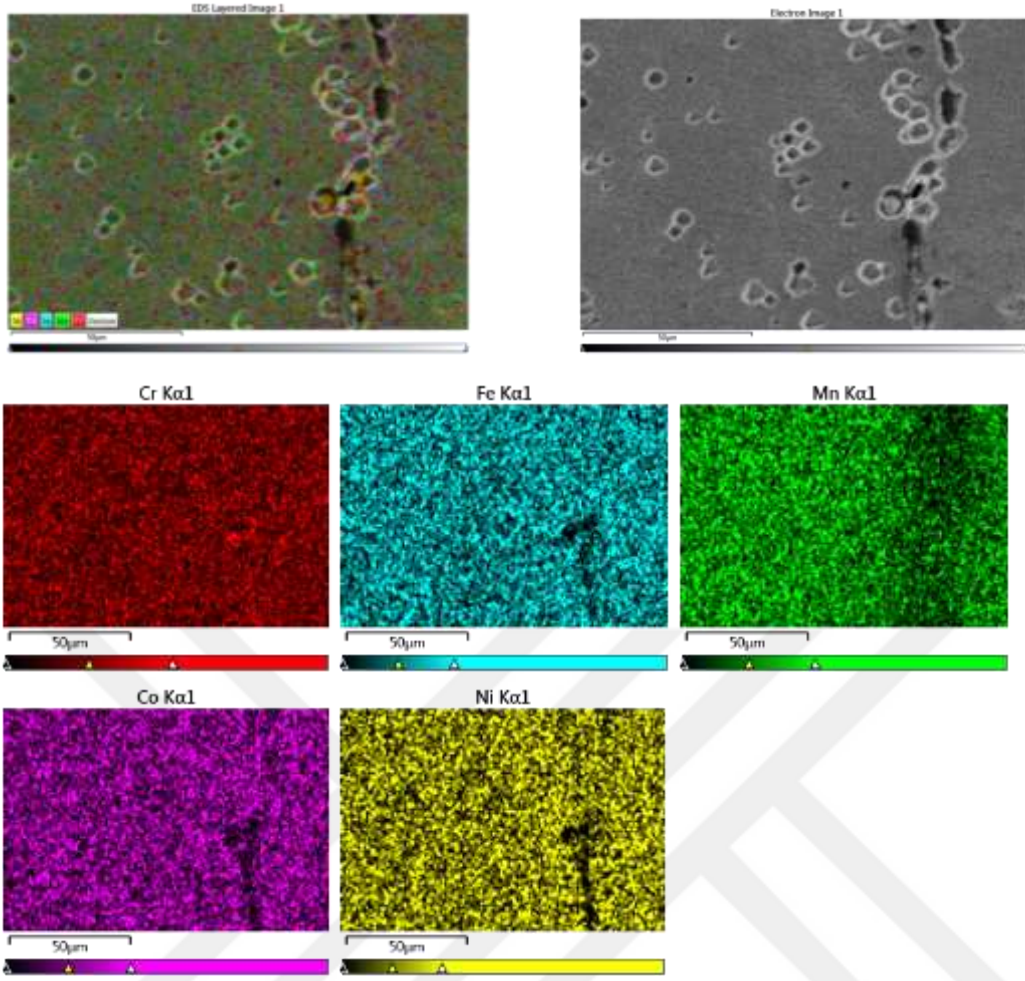
Resim 4.20. A3 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri

Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A4 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Er Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.21’de gösterilmiştir. A4 numunesi de A3 numunesinde olduğu gibi Erbiyum elementinin yapı içerisinde homojen dağıldığını göstermektedir.



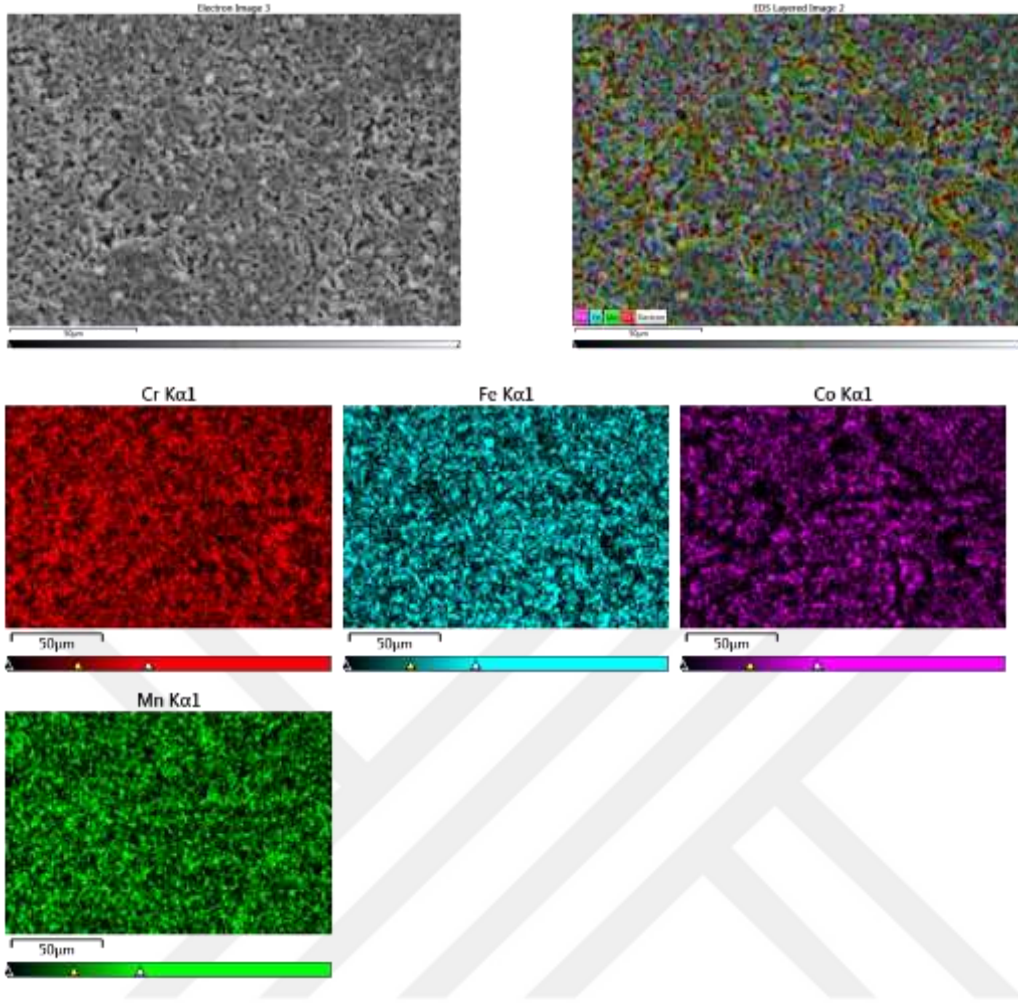
Resim 4.21. A4 Numaralı numunenin mapping ve element görüntüleri

Isıl işlemli üretilen A11 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.22’de gösterilmiştir. Uygulanan ısıl işlemle tane yapısının düzenli olduğu ve homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür.



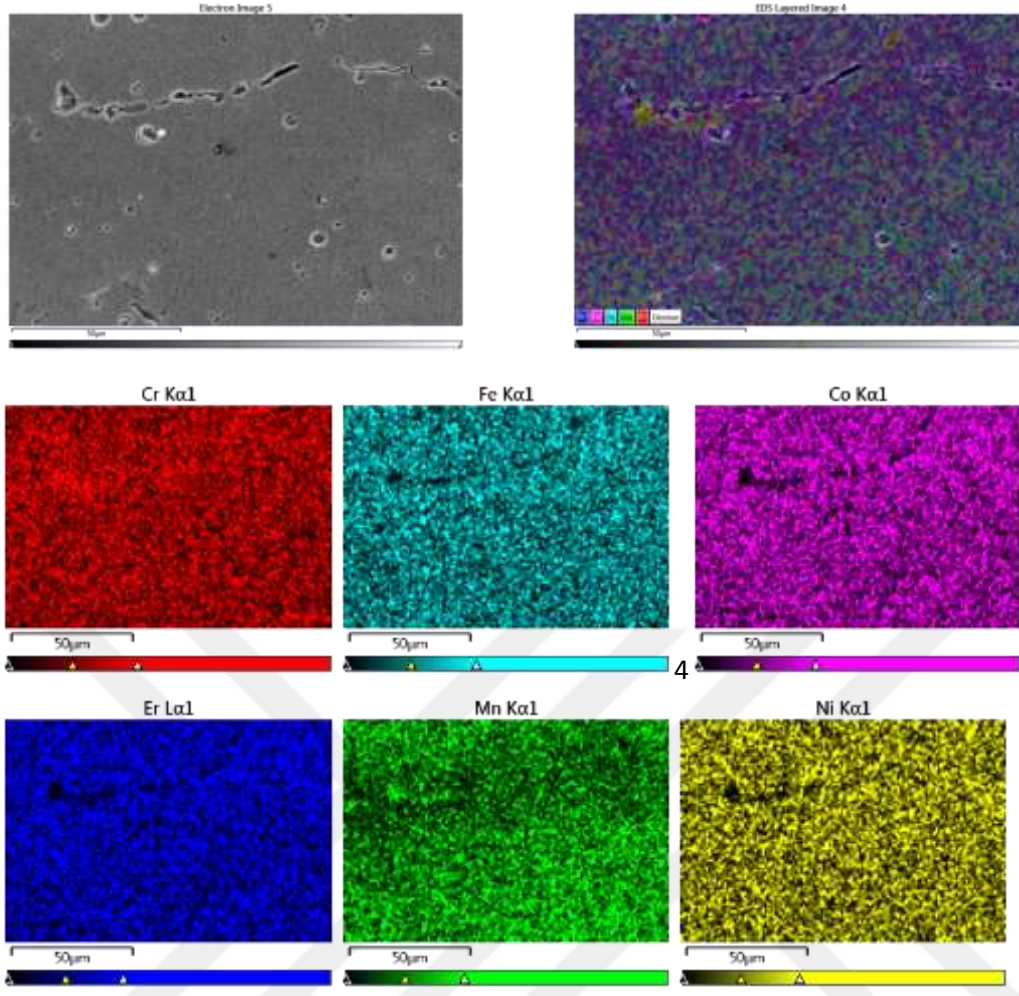
Resim 4.22. A11 Numaralı Numunenin ısıt işlemleri mapping ve element görüntüleri

Isıl işlemleri üretilen A22 nolu Fe-Cr-Co-Mn Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.23’de gösterilmiştir. Özellikle demir ve manganın ön plana çıktığı bu numunede yine elementer olarak homojen bir dağılım görülmektedir.



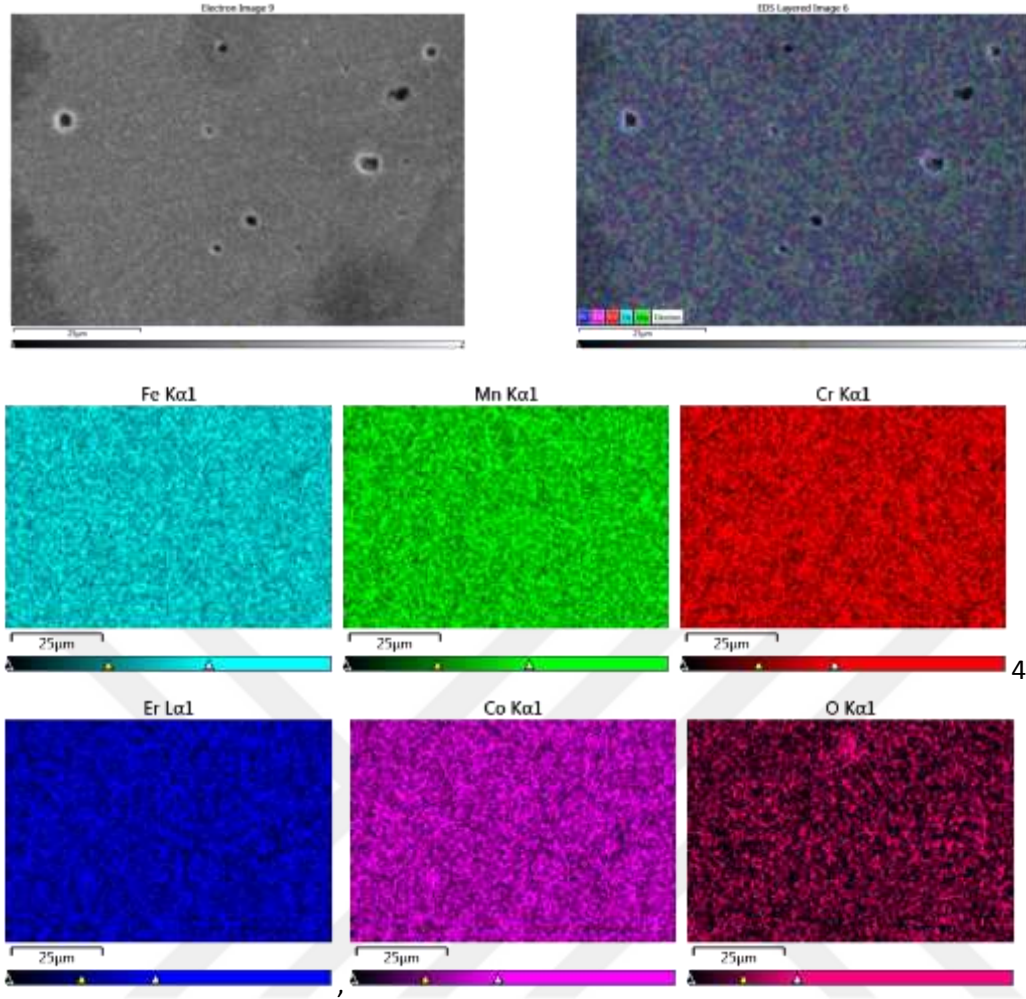
Resim 4.23. A22 Numaralı Numunenin ısıl işlemleri mapping ve element görüntüleri

Isıl işlemleri üretilen A33 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Ni-Er Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.24’de gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucu homojen dağılım gözlenmiştir. A33 numunesine ilave ettiğimiz Erbiyum yapı bünyesine düzenli olarak yayılmıştır.



Resim 4.24. A33 Numaralı Numunenin ısıt işlemleri mapping ve element görüntüleri

Isıl işlemleri üretilen A44 nolu Fe-Cr-Co-Mn-Er Numunesinin Mapping ve Element Görüntüleri de resim 4.25’de gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucu hem diğer elementlerin hem de erbiyum homojen dağılım göstermiştir.



Resim 4.25 A44 Numaralı numunenin ısıt işlemleri mapping ve element görüntüleri

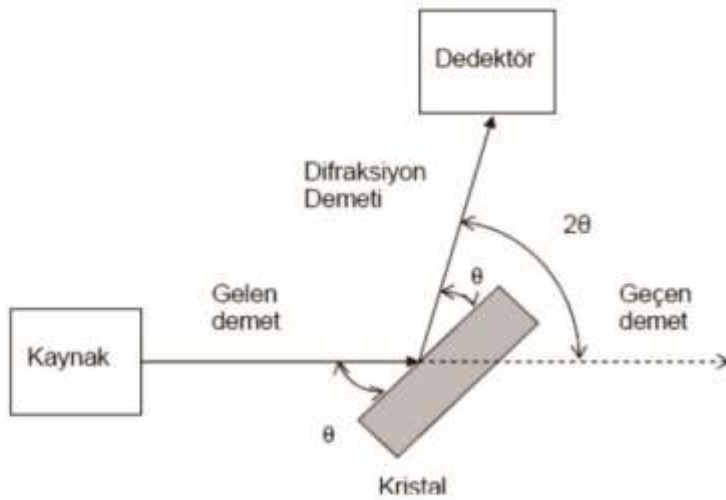
4.5. Numunelerin XRD Analizleri

XRD analizi için öncelikle numunenin hazırlanması gereklidir. Numunenin kristal yapısının analizi için, numunenin kristal yapılarına uygun bir şekilde hazırlanması gereklidir. Numune, uygun bir matris içinde yer almalı ve uygun boyutta ve şekilde hazırlanmalıdır.

XRD yöntemi, tahribatsız analiz yöntemi olarak her türlü tozu, kristali ve sıvıyı analiz eden önemli bir araçtır. XRD yöntemi kristal fazların kendine has atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. XRD sonuçları incelenerek çalışmanın bu seviyesinde üretilmiş yüksek entropili alaşımların hangi kristal yapı veya yapıya sahip olduğunu incelenmiştir. XRD üretilen malzemenin sahip olduğu yapı ile ilgili bilgiyi malzemeye gönderilen ışının dalga boyuna bağlı olarak sahip

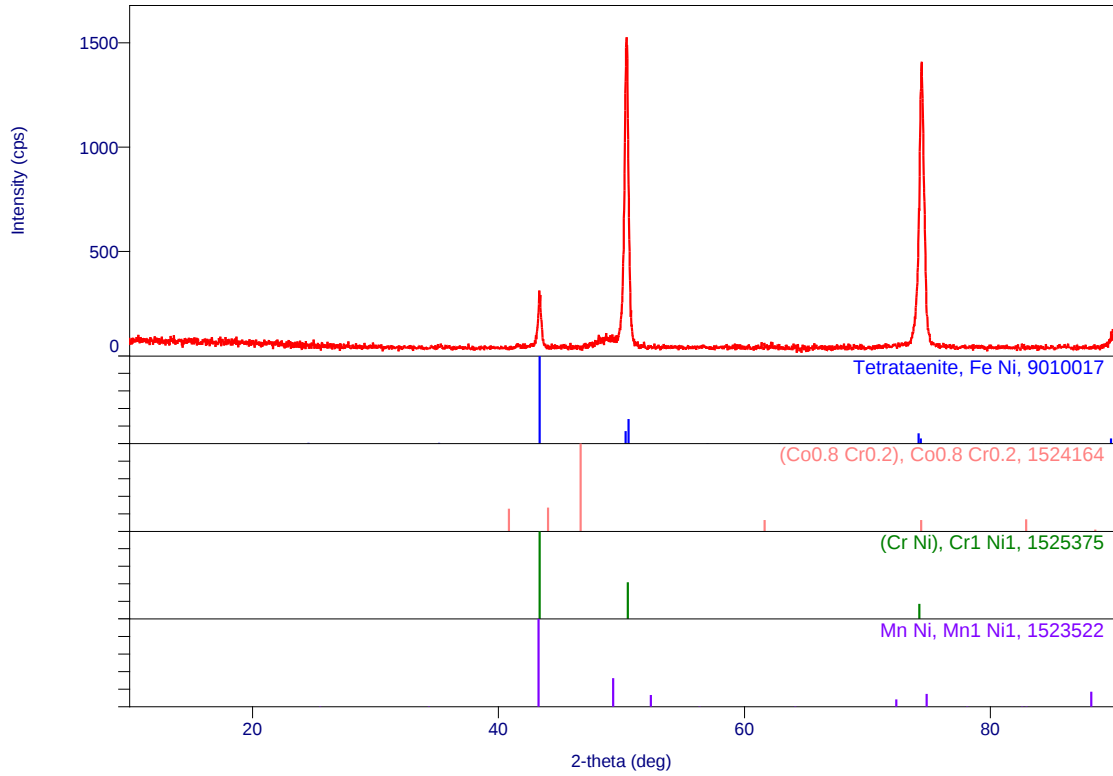
olduğu yapıya göre farklı açılarda ve şiddette kırar. Sonuç olarak bu yöntemle kendine özgü biçimde malzeme yapısı analiz edilmektedir (Kittel 2005).

XRD analizi, birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Örneğin, malzeme mühendisliği, kimya, fizik, mineraloji, jeoloji ve metalürji gibi birçok alanda kullanılır. Numunelerin XRD analizi, malzeme özelliklerini belirlemek, malzemelerin kalitesini kontrol etmek ve malzemelerin kullanım alanlarını belirlemek için önemlidir.



Şekil 4.5. X-Işını kırınımının şematik gösterimi

Normal (ısıtılmış) üretilen A1 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin 10° - 90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Normal (ısıtılmış) üretilen A1 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin FeNi (FeNi), Co_{0.8}Cr_{0.2} (Co_{0.8}Cr_{0.2}), CrNi (Cr₁Ni₁), MnNi (Mn₁Ni₁) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. FeNi (FeNi) fazına ait pik açıları; $43,3^{\circ}$, $50,3^{\circ}$, $74,4^{\circ}$, (101), (110), (220) kafes yapıları belirlenmiştir. CoCr (Co_{0.8}Cr_{0.2}) fazına ait pik açıları; $43,3^{\circ}$ ve $74,4^{\circ}$ ve (101) (002), (100) kafes yapıları belirlenmiştir. CrNi (Cr₁Ni₁) fazına ait pik açıları; $43,3^{\circ}$, $50,3^{\circ}$, $74,4^{\circ}$ ve (111), (200), (220) kafes yapıları belirlenmiştir. MnNi (Mn₁Ni₁) fazına ait pik açıları; $43,3^{\circ}$ ve $74,4^{\circ}$ ve (101), (110), (221) kafes yapıları belirlenmiştir.

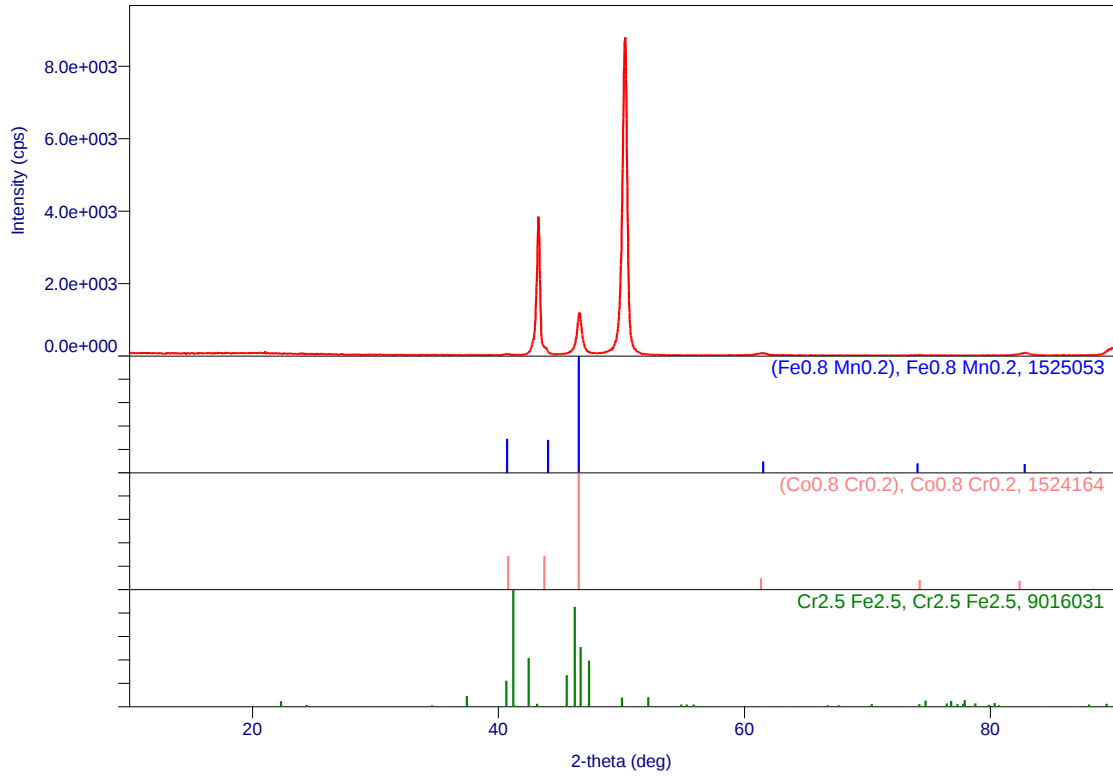


Şekil 4.6. A1 Numaralı numunenin XRD analizi

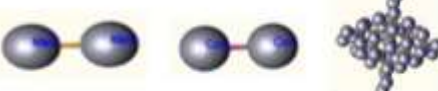
Alloys	Phase name (formula)	Phase data name	Molecule
A1	Cr1 Ni1	111, 200, 220	
	Mn1 Ni1	101, 110, 111	
	Fe Ni	101, 110, 002	
	Co0.8 Cr0.2	101, 002, 100	

Şekil 4.7. A1 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü

Normal (ısıtılmış) üretilen A2 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin 10°-90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Normal (ısıtılmış) üretilen A2 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin FeMn (Fe_{0.8}Mn_{0.2}), CoCr (Co_{0.8}Cr_{0.2}), CrFe (Cr_{2.5}Fe_{2.5}) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. FeMn (Fe_{0.8}Mn_{0.2}) fazına ait pik açısı; 50,2° ve (101), (002), (100) kafes yapıları belirlenmiştir. CoCr (Co_{0.8}Cr_{0.2}) fazına ait pik açısı; 50,2° ve (101), (002), (100) kafes yapıları belirlenmiştir. CrFe (Cr_{2.5}Fe_{2.5}) fazına ait pik açısı; 43,2°, 50,2°, 46,5° ve (411), (410), (212) kafes yapıları belirlenmiştir.

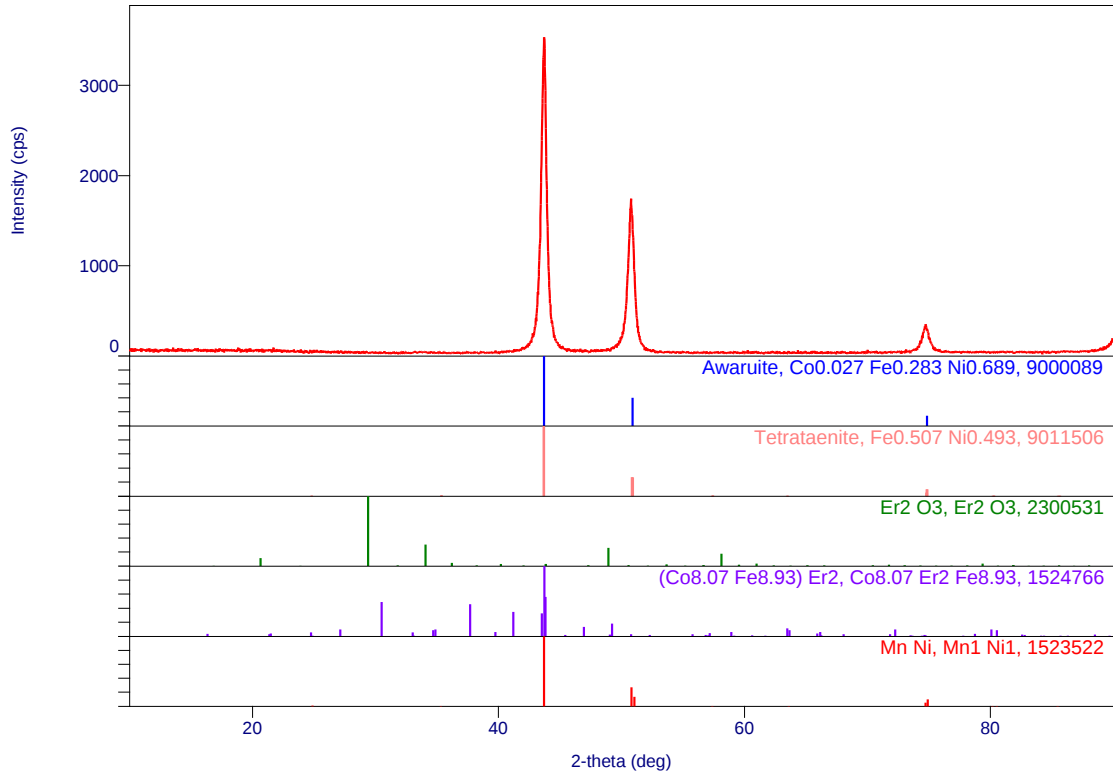


Şekil 4.8. A2 Numaralı numunenin XRD analizi

A2	Fe0.8 Mn0.2	101, 002, 100	
	Co0.8 Cr0.2	101, 002, 100	
	Cr2.5 Fe2.5	411, 410, 212	

Şekil 4.9. A2 Numaralı numuneye Ait XRD molekül görünümü

Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A3 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin 10°-90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Normal (ısıt işlemsiz) üretilen A3 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin CoFeNi (Co0.027Fe0.283Ni0.689), FeNi (Fe0.507Ni0.493), CoErFe (Co8.07Fe8.93) ve MnNi (Mn1Ni1) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. CoFeNi (Co0.027Fe0.283Ni0.689) fazına ait pik açıları; 43,7°, 50,7°, 74,7° ve (111), (200), (220) ve kafes yapıları belirlenmiştir. FeNi (Fe0.507Ni0.493) fazına ait pik açıları; 43,7°, 50,7°, 74,7° ve (111), (110), (002) ve kafes yapıları belirlenmiştir. CoErFe (Co8.07Fe8.93) fazına ait pik açısı; 43,7°, 50,7°, 74,7° ve (302), (300), (112) kafes yapıları belirlenmiştir. MnNi (Mn1Ni1) fazına ait pik açıları; 43,7° ve (101), (110), (112) kafes yapıları belirlenmiştir.

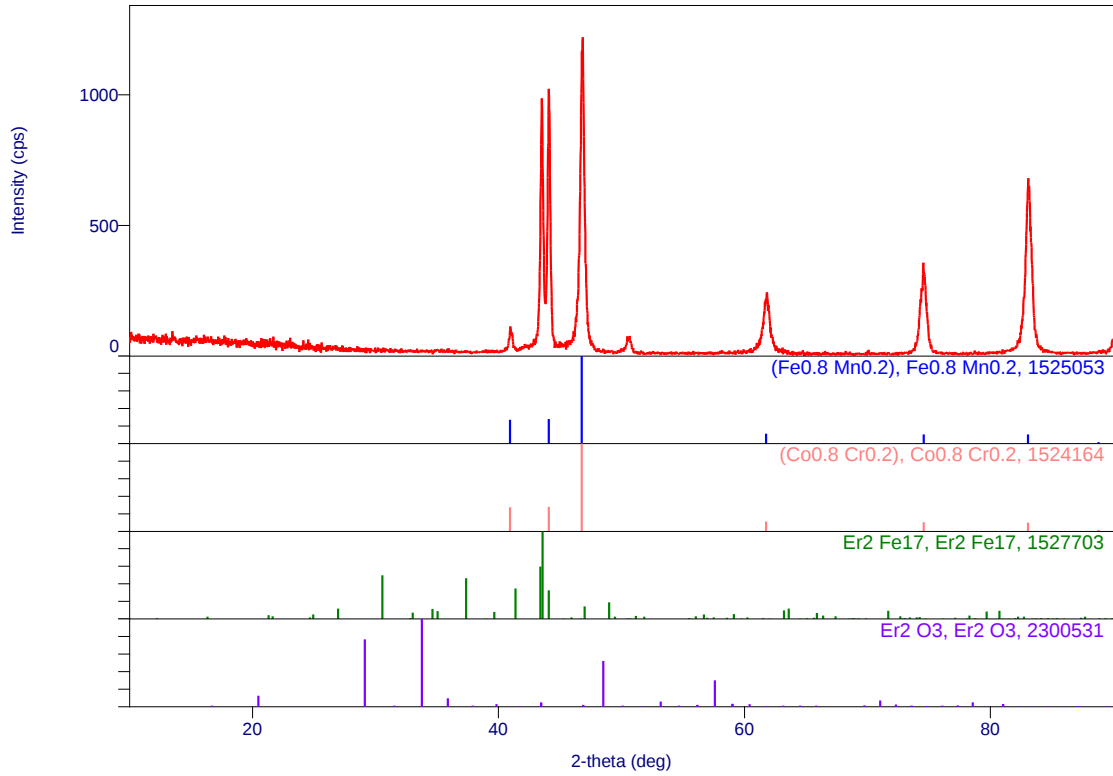


Şekil 4.10. A3 Numaralı numunenin XRD analizi

A3	Co0.027 Fe0.283 Ni0.689	111, 200, 220	
	Er2 O3	111, 200, 220	
	Co8.07 Er2 Fe8.93	302, 300, 112	
	Mn1 Ni1	101, 110, 112	
	Fe0.507 Ni0.493	111, 110, 002	

Şekil 4.11. A3 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü

Normal (ısıtılmış) üretilen A4 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin 10° - 90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Normal (ısıtılmış) üretilen A4 nolu Co-Cr-Fe-Mn-Er numunesinin FeMn (Fe_{0.8}Mn_{0.2}), CoCr (Co_{0.8}Cr_{0.2}), ErFe (Er₂Fe₁₇) ve Er₀ (Er₂O₃) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. FeMn (Fe_{0.8}Mn_{0.2}) fazına ait pik açıları; $40,3^{\circ}$, $46,7^{\circ}$, $50,04^{\circ}$, $61,7^{\circ}$, $74,5^{\circ}$, $83,1^{\circ}$ ve (101), (002), (100) kafes yapıları belirtilmiştir. CoCr (Co_{0.8}Cr_{0.2}) fazına ait pik açıları; $40,3^{\circ}$, $46,7^{\circ}$, $50,04^{\circ}$, $61,7^{\circ}$, $74,5^{\circ}$, $83,1^{\circ}$ ve (101), (002), (100) kafes yapıları belirlenmiştir.

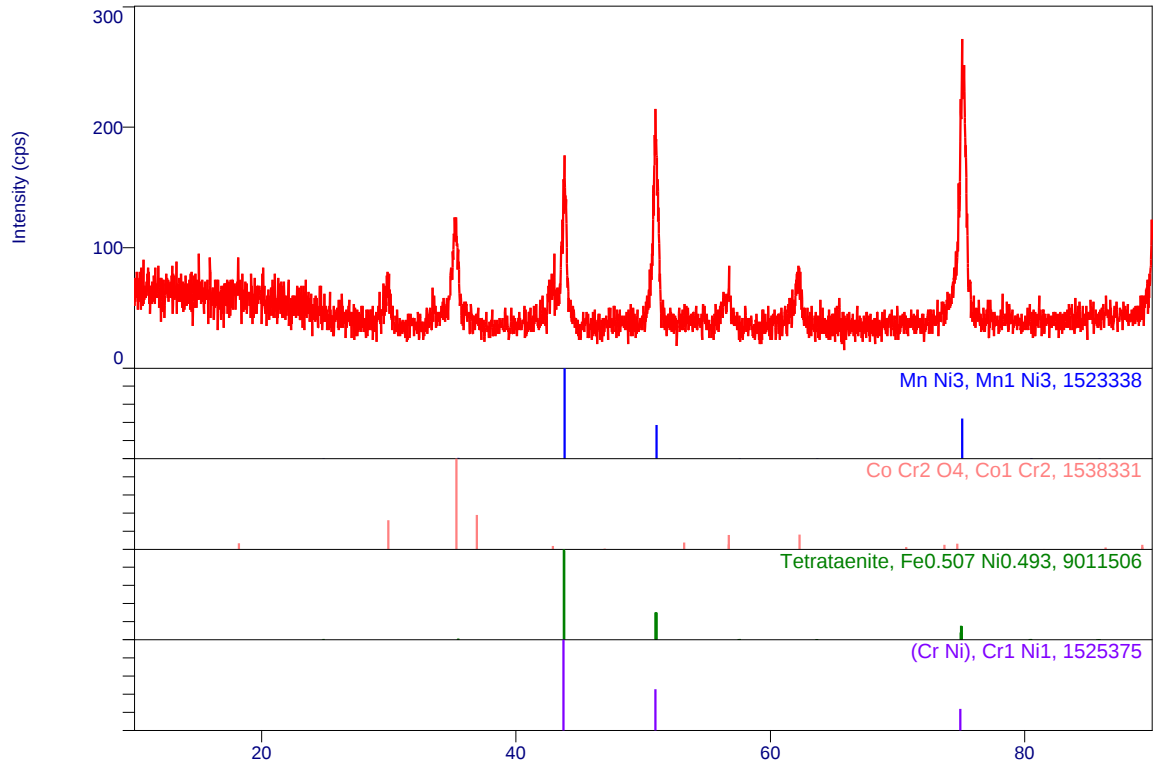


Şekil 4.12. A4 Numaralı numunenin XRD analizi

A4	Fe0.8 Mn0.2	101, 002, 100	
	Co0.8 Cr0.2	101, 002, 100	
	Er2 Fe17	302, 300, 112	
	Er2 O3	222, 440, 400	

Şekil 4.13. A4 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü

Isıl işlemlili üretilen A11 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin 10°-90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Isıl işlemlili üretilen A11 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn numunesinin MnNi (Mn1Ni1), CoCrO (CoCr2O4), FeNi (Fe0.507Ni0.493), CrNi (Cr1Ni1) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. MnNi (Mn1Ni1) fazına ait pik açısı; 43,8°, 50,9°, 75,1° ve (111), (200), (220) kafes yapıları belirlenmiştir. CoCrO (CoCr2O4) fazına ait pik açısı; 29,9°, 35,2°, 56,7°, 56,7°, 62,1°, 75,1° ve (111), (110), (002) kafes yapıları belirlenmiştir. FeNi (Fe0.507Ni0.493) fazına ait pik açısı; 43,8°, 50,9°, 75,1° ve (111), (110), (002) kafes yapıları belirlenmiştir. CrNi (Cr1Ni1) fazına ait pik açısı; 43,8°, 50,9°, 75,1° ve (111), (200), (220) kafes yapıları belirlenmiştir.

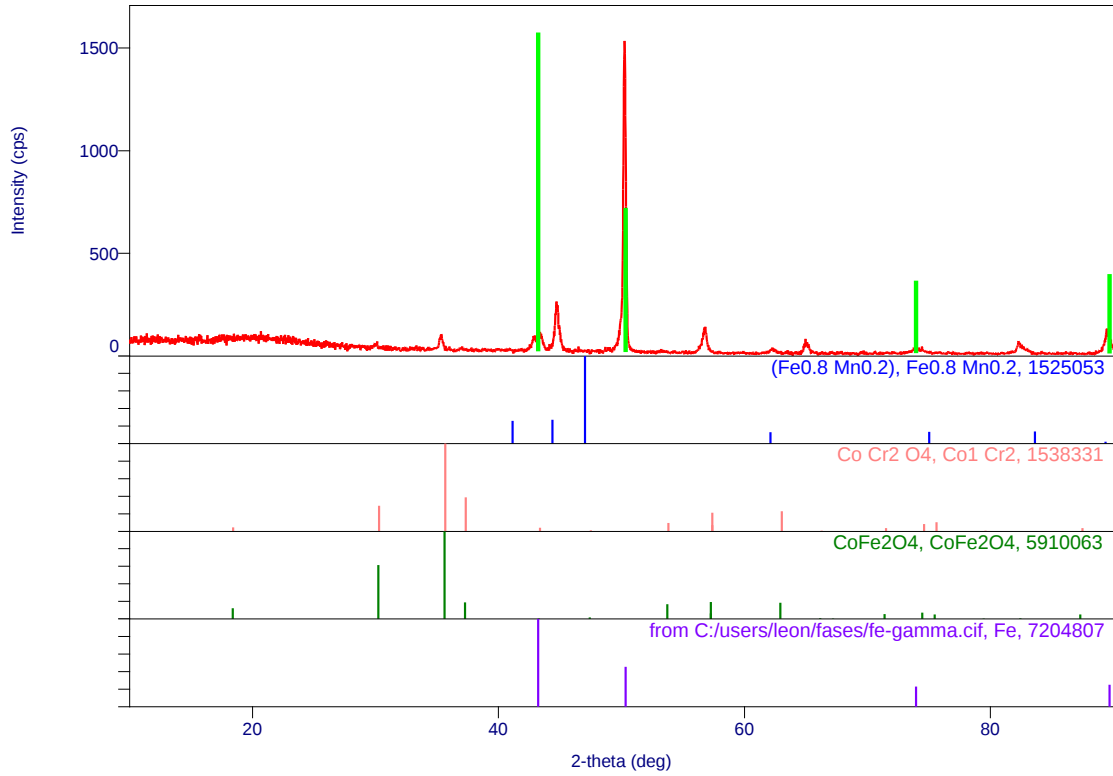


Şekil 4.14. A11 Numaralı numunenin XRD analizi

A11	Cr1 Ni1	111, 200, 220
	Mn1 Ni1	111, 200, 220
	Fe Ni	111, 110, 002
	Co0.8 Cr0.2	311, 222, 220

Şekil 4.15. A11 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü

Isıl işlemli üretilen A22 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin 10°-90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Isıl işlemli üretilen A22 nolu Co-Cr-Fe-Mn numunesinin CoCrO (CoCr₂O₄), CoFeO (CoFe₂O₄), Fe (Fe) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. CoCrO (CoCr₂O₄) fazına ait pik açısı; 30,1°, 35,3°, 64,9°, 73,9° ve (311), (222), (220) kafes yapıları belirlenmiştir. CoFeO (CoFe₂O₄) fazına ait pik açısı; 30,1°, 35,3°, 64,9°, 73,9° ve (311), (222), (220) kafes yapıları belirlenmiştir. Fe (Fe) fazına ait pik açısı; 43,1°, 50,2°, 83,3°, 89,5° ve (111), (200), (311) kafes yapıları belirlenmiştir.

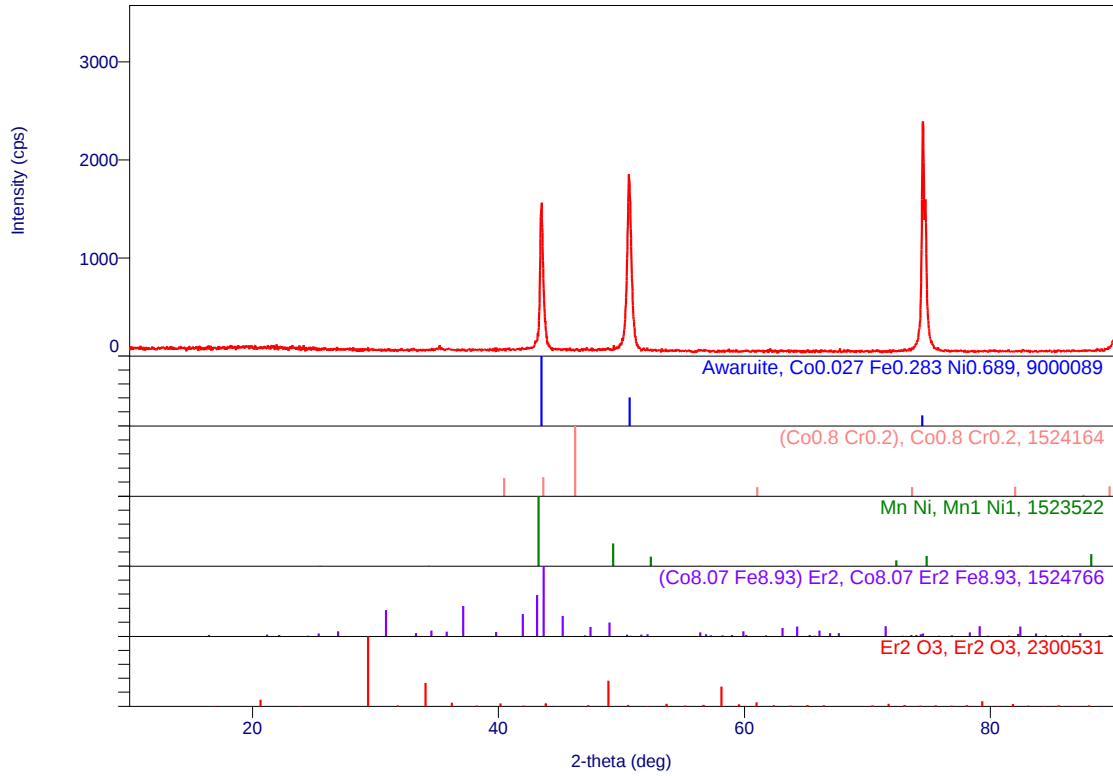


Şekil 4.16. A22 Numaralı numunenin XRD analizi

A22	Fe _{0.8} Mn _{0.2}	101, 002, 100	
	Co ₁ Cr ₂	311, 222, 220	
	CoFe ₂ O ₄	311, 222, 220	
	Fe	111, 200, 311	

Şekil 4.17. A22 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü

Isıl işlemli üretilen A33 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin 10°-90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Isıl işlemli üretilen A33 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin CoFeNi (Co_{0.027}Fe_{0.283}Ni_{0.689}), MnNi (Mn₁Ni₁) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. CoFeNi (Co_{0.027}Fe_{0.283}Ni_{0.689}) fazına ait pik açıları; 43,4°, 50,5°, 74,5° ve (111), (200), (220) kafes yapıları belirlenmiştir. MnNi (Mn₁Ni₁) fazına ait pik açısı; 43,4°, 74,5° ve (101), (110), (211) kafes yapıları belirlenmiştir.

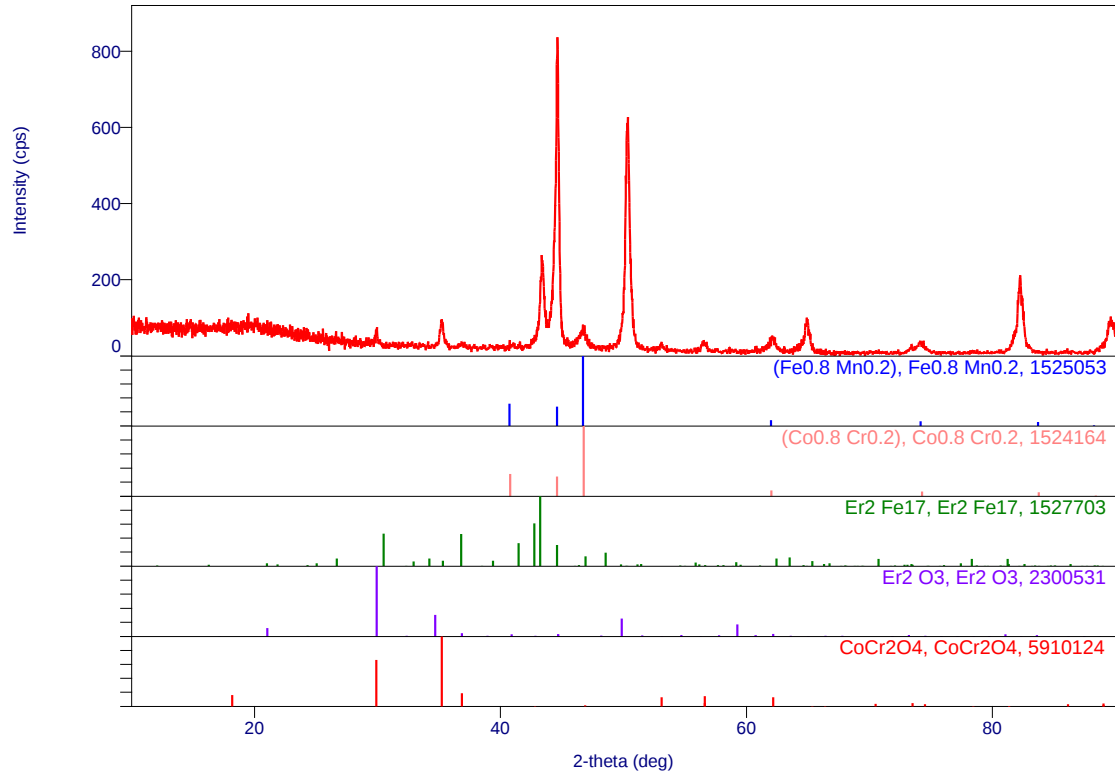


Şekil 4.18. A33 Numaralı numunenin XRD analizi

A33	Co0.027 Fe0.283 Ni0.689	111, 200, 220	
	Er2 O3	222, 440, 400	
	Co8.07 Er2 Fe8.93	302, 220, 300	
	Mn1 Ni1	101, 110, 211	
	Co0.8 Cr0.2	101, 002, 100	

Şekil 4.19. A33 Numaralı numuneye ait XRD molekül görünümü

Isıl işlemli üretilen A44 nolu Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Er numunesinin 10°-90° C sıcaklığı aralığında X-ışınları difraktogram 40 Kv, 15Ma değerlerinde ölçümleri yapılmıştır. Isıl işlemli üretilen A44 nolu Co-Cr-Fe-Mn-Er numunesinin FeMn (Fe0.8Mn0.2), CoCr (Co0.8Cr0.2), ErO (Er2O3), CoCrO (CoCr2O4) fazlarının içerdiği pikler tespit edilmiştir. FeMn (Fe0.8Mn0.2) fazına ait pik açısı; 44,6°, 46,7°, 53,1° ve (101), (002), (100) kafes yapıları belirlenmiştir. CoCr (Co0.8Cr0.2) fazına ait pik açısı; 44,6°, 46,7°, 53,1° ve (101), (002), (100) kafes yapıları belirlenmiştir. ErO (Er2O3) fazına ait pik açısı; 29,9°, 35,2°, 53,1° ve (22), (400), (622) kafes yapıları belirlenmiştir. CoCrO (CoCr2O4) fazına ait pik açısı; 29,9°, 64,8°, 82,2° ve (311), (220), (222) kafes yapıları belirlenmiştir.



Şekil 4.20. A44 Numaralı numunenin XRD analizi

A44	Fe _{0.8} Mn _{0.2}	101, 002, 100
	Co _{0.8} Cr _{0.2}	101, 002, 100
	Er ₂ Fe ₁₇	302, 220, 300
	Er ₂ O ₃	222, 400, 622
	CoCr ₂ O ₄	311, 220, 222

Şekil 4.21. A44 Numaralı numuneye Ait XRD molekül görünümü

4.6. Aşınma Testi

Aşınma deneyi 40 N yük altında ve 500 metre kayma mesafesinde, 50mm/sn kayma hızıyla, 120 d/d da kuru aşındırıcı şartlarında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır.



Resim 4.26. Aşınma deney düzeneği

Normal (ısıtıl işlemlsiz) üretilen 4 adet numunelerin A1 nolu CoCrFeNiMn numunesi, A2 nolu FeMnCoCr numunesi, A3 nolu CoCrFeNiMnEr numunesi, A4 nolu FeMnCoCrEr numunesi için yapmış olduğumuz aşınma deneyleri sonucunda oluşan kütle kayıplarının değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

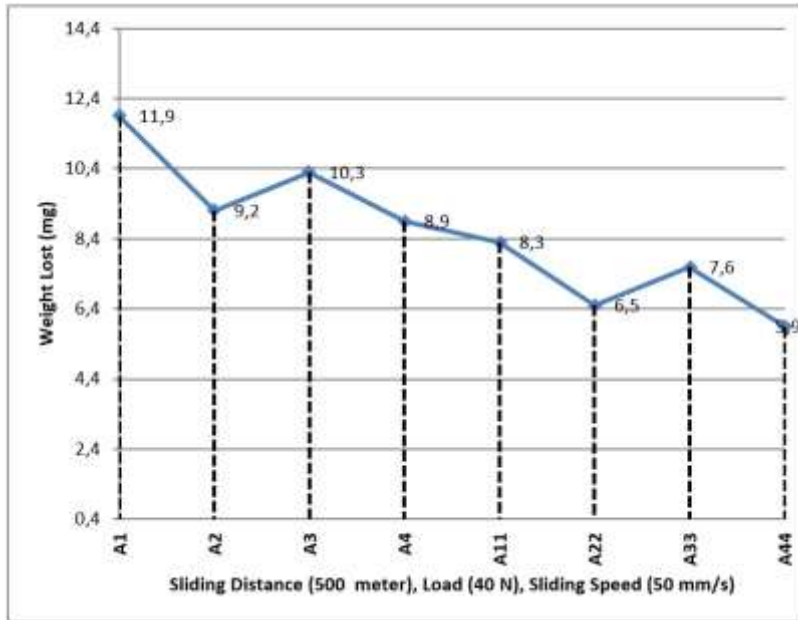
1. A4 nolu CoCrFeMnEr (normal): 8,9 mg
2. A2 nolu FeMnCoCr (normal): 9,2 mg
3. A3 nolu CoCrFeNiMnEr (normal): 10,3 mg
4. A1 nolu CoCrFeMnEr (normal): 11,9 mg

Isıl işlemli üretilen 4 adet numunelerin A11 nolu CoCrFeNiMn numunesi, A22 nolu FeMnCoCr numunesi, A33 nolu CoCrFeNiMnEr numunesi, A44 nolu FeMnCoCrEr numunesi için yapmış olduğumuz aşınma deneyleri sonucunda oluşan kütle kayıplarının değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

1. A44 CoCrFeMnEr (ısıl işlem): 5,9mg
2. A22 nolu FeMnCoCr (ısıl işlem): 6,5 mg
3. A33 nolu CoCrFeNiMnEr (ısıl işlem): 7,6 mg
4. A11 nolu CoCrFeNiMn (ısıl işlem): 8,3 mg

Tablo 4.2. Aşınma deneyi sonuç verileri

Numune Adı	Başlangıç kütlesi (g)	500 m mesafe sonrası kütle (mg)	Kütle kaybı (mg)	Aşındırma Mesafesi (m)	Yük (N)	Aşındırma Hızı (mm/sn)	Dönme Hızı (d/dk)
A1	11,4628	11,4509	11,9	500	40	50	120
A2	10,1296	10,1204	9,2	500	40	50	120
A3	11,8335	11,8232	10,3	500	40	50	120
A4	10,7960	10,7871	8,9	500	40	50	120
A11	12,8565	12,8482	8,3	500	40	50	120
A22	11,6801	11,6736	6,5	500	40	50	120
A33	12,8427	12,8351	7,6	500	40	50	120
A44	10,8473	10,8414	5,9	500	40	50	120



Şekil 4.23. Numunelerin aşınma kütle kaybı miktarları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yüksek entropili alaşımla, yüksek demir ve Mn içerikli çift fazlı yüksek entropili alaşımın yapısal ve mekanik özelliklerini kıyaslayarak bu alaşımlara nadir toprak element olan Erbiyumun (Er) az oranda ilavesinin etkileri tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu numunelerde vakum altında ark ergitme işlemine tabi tutularak 4 adet ısılsız, 4 adet ısılsı olmak üzere 8 adet numunelerin üzerinde çalışılmıştır. Bu numuneler SEM, EDS, XRD ve mikro sertlik testleri için küçük metalografik numunelere dönüştürülerek çalışmanın analiz ve görüntüleme kısmına geçilmiştir.

Bu sonuçlara göre mikro sertliğin alınması;

Isılsız üretilen numunelerimizin sertlik deneyleri sonucu ortalama sertlik değerinin küçükten büyüğe sıralanışı; A1-A3-A2-A4 olarak tespit edilmiştir.

Isılsı üretilen numunelerimizin sertlik deneyleri sonucu ortalama sertlik değerinin küçükten büyüğe sıralanışı; A1-A3-A2-A4 olarak tespit edilmiştir.

A1 nolu numunemiz ortalama olarak en düşüktür (206,0). Isılsı numunede çok fazla fark oluşmamıştır.

A2 nolu numunemiz ısılsı işlem sonucunda en az artış gösteren numunedir (241,1'den 242,4'e yükselmiştir). Isılsı işlemin çok etkisi olmamıştır.

A3 nolu numunemizde ısılsı işlem uygulandığında çok fazla fark oluşmamıştır (207,2'den 209,9'a yükselmiştir). Isılsı işlemin çok etkisi olmamıştır.

A4 nolu Co-Cr-Fe-Mn-Er numunesinin ortalaması en yüksektir. A4 nolu numunemiz ısılsı işlem sonucundan sonra en fazla artışı göstermiştir (243,0'dan 251,5'e yükselmiştir.)

SEM görüntüsü, EDS analizleri ve Mapping görüntüsü sonucunda;

Sem görüntüleri ve bu görüntülerden tespit ettiğimiz farklı yapılardan aldığımız EDS analizleri çalışmanın metalografik olarak farklılıklarını ortaya koymuştur. SEM mikro yapı görüntüleri verilmiş olup genel olarak ısılsız numunelerin kütsel yapılarının korunduğu tespit edilmiştir. Normal (ısılsız) noktsal spectrum değerlerinin ortalamasının genel bileşimle benzerlik oluşturduğu tespit edilmiştir. Isılsı noktsal spectrum değerlerinin intermetalik faz oluşmasından dolayı değerler biraz düşüktür. Mapping ve element görüntüleri sonucunda deneyler de homojen dağılım sağladığı tespit edilmiştir.

XRD analizleri deneyleri sonucunda;

Normal (ısılsız) üretilen 4 farklı numunemiz ile ısılsı işleme tabi tutularak üretilen 4 farklı numunemizin x-ışınları difraktogramı ölçümleri yapılmıştır. XRD analizleri

Çalışmanın metalografik olarak farklılıklarını ortaya koymuştur. Pik açıları ve kafes yapısı değerleri belirlenmiştir.

Aşınma deneyleri sonucunda;

Normal (ısıl işlemsiz) üretilen 4 farklı numunemiz için yapılan aşınma deneyleri sonucunda oluşan kütle kayıplarının küçükten büyüğe doğru sıralanması; A2-A4-A3-A1 olarak tespit edilmiştir.

Isıl işleme tabi tutularak üretilen 4 farklı numunemiz için yapılan aşınma deneyleri sonucunda oluşan kütle kayıplarının küçükten büyüğe doğru sıralanması; A2-A3-A4-A1 olarak tespit edilmiştir.

Normal (ısıl işlemsiz) üretilen numunelerde en fazla kütle kaybı A1 nolu numunede 11,9 mg olarak gerçekleşmiştir. En az kütle kaybı A2 nolu numunede 3,6 mg olarak gerçekleşmiştir. A3 nolu numunede kütle kaybı 5,0 mg, A4 nolu numunede ise 4,6 mg olarak tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Isıl işleme tabi tutularak üretilen numunelerde en fazla kütle kaybı A11 nolu numunede 11,5 mg olarak gerçekleşmiştir. En az kütle kaybı ise A22 nolu numunede 9,0 mg olarak gerçekleşmiştir. A33 nolu numunede kütle kaybı 9,7 mg, A44 nolu numunede ise 10,3 mg olarak tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Genel olarak en çok kütle kaybı normal (ısıl işlemsiz) üretilen numunelerde olmuştur. Isıl işlemli numuneler malzemelerin dayanımını yükselterek aşınma miktarını düşürmüştür. Mikro sertlik ve aşınma değerleri doğru orantılı ve birbirilerine paralellik göstermiş olup numuneler olumlu sonuçlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Ashby M.F.**, Materials Selection in Mechanical Design, fourth ed. Butterworth- Heinemann, Elsevier, Oxford, UK., 2011
- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., Vincent, A. J. B.**, Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 375, 213-218.
- Çarboğa, C., Karaca, Y.**, Yüksek entropili CrMnFeCoNiAl alaşımlarına bor ilavesinin etkisi (Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi). 2019
- Çengel, Y. A., Boles, M. A.**, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, (Çev. T. Derbentli), Literatür Yayıncılık, s.282, 283, 1996
- Cheng, C. Y., Yang, Y. C., Zhong, Y. Z., Chen, Y. Y., Hsu, T., vd.**, Physical Metallurgy of Concentrated Solid Solutions from Low Entropy to High Entropy Alloys, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21, 2017.
- Erdoğan, A., Zeytin, S.**, Yüksek entropili alaşımlar: Prensipler ve alaşım tasarımı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019, 8(2), 1160-1178.
- F. Knoop, C.G. Peters and W.B. Emerson** "A Sensitive Pyramidal-Diamond Tool for Indentation Measurements" *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1939, 23 (1): 39–61
- Gao, M.C., Yeh, J.W., Liaw P.K., Zhang Y.**, High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications, Springer, 1-516, 2016.
- He, J. Y., Wang, H., Huang, H. L., Xu, X. D., Chen, M. W., Wu, Y., ...Lu, Z. P.**, A precipitation-hardened high-entropy alloy with outstanding tensile properties. *Acta Materialia*, 2016, 102, 187-196.
- İlhan M.**, Mekanokimyasal Sentez Yöntemiyle BaTa₂O₆ üretimi, Fe J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 2013, 6: 299–303, 2004.
- Jien-Wei, Y. E. H.**, Recent progress in high entropy alloys. *Ann. Chim. Sci. Mat*, 2006, 31(6), 633-648.
- Juan, C. C., Hsu, C. Y., Tsai, C. W., Wang, W. R., Sheu, T. S., Yeh, J. W., Chen, S. K.**, On microstructure and mechanical performance of AlCoCrFeMo_{0.5}Ni high-entropy alloys. *Intermetallics*, 2013, 32, 401-407.
- Kao, Y.F., Chen, T.J., Chen, S.K., Yeh, J.W.**, "Microstructure and mechanical property of As-cast, homogenized and deformed Al_xCoCrFeNi (06 x 62) high-entropy alloys", *J Alloy Compd*; 488, 57–64, 2009.

- Miracle, D. B., Senkov, O. N.**, A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448-511, 2017.
- Mridha, S., Samal, S., Khan, P. Y., Biswas, K.** (2013). Processing and consolidation of nanocrystalline Cu-Zn-Ti-Fe-Cr high-entropy alloys via mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(10), 4532-4541.
- Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S.**, High Entropy Alloys, 2014.
- Smith R.L. Sandland G.E.** “An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Vol. I, 1922, p 623-641.
- Tsai, M. H., Yeh, J.W.**, “High-Entropy Alloys: A Critical Review”, *Mater. Res. Lett.*, Vol. 2, No. 3, 107–123, 2014.
- Tsai, K. Y., Tsai, M. H., Yeh, J. W.**, Sluggish diffusion in co-cr-fe-mn-ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61(13), 4887-4897, 2013.
- Tsai, M.-H., Yuan, H., Cheng, G., Xu, W., Tsai, K.-Y., Tsai, C.-W., Jian, W. W.**, with multi-principal elements. *Materials Chemistry and Physics*, 103(1), 41-46
- URL-1**, http://www.ukcacrillations.co.uk/vickers_htm.html
- URL-2**, <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>
- Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang**, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials Today*, 19: 349–362, 2016.
- Yeh, J. W.**, Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*, 65(12), 1759-1771., 2013.
- Yeh, J.W.**, “Recent Progress in High-Entropy Alloys”, *Annales De Chimie – Science des Materiaux*, 31, 633-648, 2006.
- Yeh, J.W., Chang, S.Y., Hong, Y.D., Chen, S.K., Lin S.J.**, “Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements”, *Materials Chemistry and Physics* 103, 41–46, 2007.
- Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., Chin, T.S., Shun, T.T.**, “Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes”, *Adv Eng Mater*; 6(5), 299–303, 2004.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., Lu, Z. P.**, “Microstructures and properties of high-entropy alloys”, *Progress in Materials Science* 61, 1–93, 2014.
- Zhang, Y., Zuo, T., Cheng, Y. ve Liaw, P. K.**, High-entropy alloys with high (Xie, Tamai 2007), (Delgado, Rodriguez-Rey, Suarez del Rio, Sarria, Calleja, Ruiz de Argandona 2005). 2013

ÖZGEÇMİŞ

