

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK ENTROPİLİ CrMnFeCoNi ALAŞIMINA TUNGSTEN KARBÜRÜN (%3-
%5-%10) FARKLI ORANLARDA İLAVESİNİN MEKANİK ve MİKRO YAPI
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Kerem ANİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN**

TUNCELİ – 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK ENTROPİLİ CrMnFeCoNi ALAŞIMINA TUNGSTEN KARBÜRÜN (%3-
%5-%10) FARKLI ORANLARDA İLAVESİNİN MEKANİK VE MİKRO YAPI
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kerem ANİK
(220077111)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ – 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ENTROPİLİ CrMnFeCoNi ALAŞIMINA TUNGSTEN KARBÜRÜN (%3-
%5-%10) FARKLI ORANLARDA İLAVESİNİN MEKANİK ve MİKRO YAPI
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

KEREM ANIK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 04/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Doç. Dr. Yahya TAŞGIN
(Munzur Üniversitesi)

Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
(Fırat Üniversitesi)

Doç.Dr.Gökhan KAHRAMAN
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

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

Doç. Dr. Murat KORUNUR

Enstitü Müdürü

İmza ve Mühür

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

...../...../2024

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
Kerem ANIK

Danışman
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince ve tez çalışmamın her aşamasında yönlendiren danışmanım Doç. Dr. Yahya TAŞGIN'A sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yönlendirmeleri, önerileri ve ilgisi olmadan bu çalışmanın bu şekilde tamamlanması mümkün olmazdı.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca her zaman desteğini hissettiğim Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK hocama sonsuz teşekkür ederim.

Eğitimim boyunca hiçbir zaman beni yalnız bırakmayan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen çok kıymetli AİLEME sonsuz teşekkür ederim.

Kerem ANİK

TUNCELİ-2024



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Yüksek Entropili Alaşımlar	3
1.2. Yüksek Entropili Alaşımlarda Tanımsal Kavramlar	5
1.3. YEA'nın Mikroyapıları ile Mekanik Durumlarını Etkileyen Faktörler	8
1.3.1. Yüksek Entropinin Etkileri	8
1.3.2. Kafes Distorsiyonu Etkisi	9
1.3.3. Yavaş Difüzyon Etkisi	10
1.3.4. Kokteyl Etkisi	11
1.4. CrMnFeCoNi Yüksek Entropili Alaşımları.....	12
1.5. Yüksek Entropili Alaşımların Kullanım Alanları.....	13
1.6. Yüksek Entropili Alaşımların Tungsten Karbür ile İlişkisi.....	16
2. MATERYAL VE METOD	17
2.1. YEA'da Kullanılan Tozların Temini ve Toz Metalurjisi Yöntemi	17
ile Üretilmesi	17
2.2. CrMnFeCoNi Yüksek Entropili Alaşımın Ark Eritme Sistemi (Vakum Ark Melting) ile Üretilmesi	19
2.3. Metalografik İşlemler	21
2.3.1. Kesme İşlemi	21
2.3.2. Bakalite Alma İşlemi	21
2.3.3. Zımparalama ve Parlatma İşlemi	22
2.3.4. Dağlama İşlemi	22
2.4. Alaşımların Karakterizasyonu	22
2.4.1. XRD Analiz	22
2.4.2. SEM/EDS Analizleri	23
2.4.3. Sertlik Ölçümleri	24
2.4.4. Aşınma Testi.....	24
3. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	26
3.1. Sertlik Analiz Sonuçları.....	26
3.2. SEM/EDS ve XRD Analiz Sonuçları	27
3.2.1. K1 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	27
3.2.2. K2 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	30
3.2.3. K3 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	34
3.2.4. K4 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	38
3.2.5. K11 No'lu Isıl İşlemlili Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	42
3.2.6. K22 No'lu Isıl İşlemlili Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	46
3.2.7. K33 No'lu Isıl İşlemlili Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	50
3.2.8. K44 No'lu Isıl İşlemlili Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu	54

3.3. Aşınma Testi Sonuçları	60
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	62
5. KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ	65



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Mühendislikte kullanılan malzemelerin tarihlere göre değişim diyagramında YEA'ların keşfi.	3
Şekil 1.2. Eşmolar alaşıma ait elementlerin sayılarına bağlı olarak düzenleme entropisinin katı çözelti durumundaki değişimi.....	6
Şekil 1.3. (a) Karıştırmadan önce beş bileşenden oluşan eşatomik alaşım ve (b) düzensiz katı çözeltiye karıştırma. (Tamamının Atom çapları eşit olacak şekilde belirlenmiştir)	7
Şekil 1.4. Konfigürasyon entropisine bağlı alaşım çeşitleri.....	7
Şekil 1.5. Beş bileşenden oluşan bir YEA'nın ve saf metale ait kafes yapısının şematik gösterimi	10
Şekil 1.6. Kafes parametresi ve sertliğin değişik x değerleri için CoCrCuNiFeAlx alaşımı. A)CoCrCuNiFeAlx için oluşan alaşımı sertliğini göstermektedir, B) YMK faz kafes parametresinin değer değişimini göstermektedir, C) HMK faza ait kafes parametresi şeklinde olmaktadır	12
Şekil 1.7. Yüksek Entropili Alaşımlar'ın bazı kullanım alanları, nükleer tanklar, gaz türbini motorları, rulmanlar, kesici uçlar	15
Şekil 2.1. Toz karıştırma mikseri	18
Şekil 2.2. Tozlar için sıkıştırma presisi.....	19
Şekil 2.3. Metalografik işlemlerle preslenerek hazır hale getirilen numeneler.....	19
Şekil 2.4. Ark Eritme ile üretilen numeneler (Soldan 1. numune $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$, 2. numune $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$, 3. numune $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$, 4. numune $Cr_{20}Mn_{10}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_{10}$).....	20
Şekil 2.5. Isıl işlem fırını (Protherm marka)	21
Şekil 2.6. XRD Cihazı (Rigaku, Mini Flex600 marka).....	23
Şekil 2.7. SEM Elektron mikroskobu.....	24
Şekil 2.8. Aşınma deney makinesi	25
Şekil 3.1. Mikro sertlik ölçüm grafiği	27
Şekil 3.2. K1 Numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri.....	27
Şekil 3.3. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ bileşiğine sahip K1 numunesinin EDS analiz sonuçları .	28
Şekil 3.4. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ K1 Numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	29
Şekil 3.5. K1 numunesine ait XRD grafiği	30
Şekil 3.6. K2 Numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri.....	31
Şekil 3.7. $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$ bileşiğine sahip K2 numunesinin EDS analiz sonuçları	32
Şekil 3.8. $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$ K2 Numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	33
Şekil 3.9. K2 numunesine ait XRD grafiği	34
Şekil 3.10. K3 numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri.....	35
Şekil 3.11. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ bileşiğine sahip K3 numunesinin EDS analiz sonuçları	36
Şekil 3.12. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ K3 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	37

Şekil 3.13. K3 numunesine ait XRD grafiği	38
Şekil 3.14. K4 numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri.....	39
Şekil 3.15. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ bileşiğine sahip K4 numunesinin EDS analiz sonuçları	40
Şekil 3.16. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ K4 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	41
Şekil 3.17. K4 numunesine ait XRD grafiği	42
Şekil 3.18. K11 ısıtıl işlemlili numuneye ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri	43
Şekil 3.19. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ bileşiğine sahip K11 numunesinin EDS analiz sonuçları	44
Şekil 3.20. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ K11 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	45
Şekil 3.21. K11 ısıtıl işlemlili numuneye ait XRD grafiği	46
Şekil 3.22. K22 ısıtıl işlemlili Numuneye ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri.	47
Şekil 3.23. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$ bileşiğine sahip K22 numunesinin EDS analiz sonuçları	48
Şekil 3.24. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$ K22 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	49
Şekil 3.25. K22 ısıtıl işlemlili numuneye ait XRD grafiği	50
Şekil 3.26. K33 ısıtıl işlemlili Numuneye ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri	51
Şekil 3.27. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_5$ bileşiğine sahip K33 numunesinin EDS analiz sonuçları	52
Şekil 3.28. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_5$ K33 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	53
Şekil 3.29. K33 ısıtıl işlemlili numuneye ait XRD grafiği	54
Şekil 3.30. K44 ısıtıl işlemlili numuneye ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri	55
Şekil 3.31. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ bileşiğine sahip K44 numunesinin EDS analiz sonuçları	56
Şekil 3.32. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ K44 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı	57
Şekil 3.33. K44 ısıtıl işlemlili numuneye ait XRD grafiği	58
Şekil 3.34. Normal ve ısıtıl işlemlili numunelerin XRD 3D, faz ve molekül görünümü	59
Şekil 3.35. Aşınma kütle kayıp değerleri	61

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Alaşım numuneleri ve oranları	17
Tablo 3.1. Mikro sertlik ölçüm değerleri.....	26
Tablo 3.2. Aşınma testi sonuçları	60



SEMBOLLER LİSTESİ

S	: Entropi
Fe	: Demir
WC	: Tungsten Karbür
Mn	: Manganez
Cr	: Krom
Co	: Kobalt
Ni	: Nikel



KISALTMALAR LİSTESİ

HMK	: Hacim Merkezli Kübik
ÖPE	: Örgü Potansiyel Enerjisi
YEA	: Yüksek Entropili Alaşım
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
XRD	: X- Işını Kırınımı
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	: Toz metalürjisi



ÖZET

Bu çalışmada toz halinde bulunan Cr, Mn, Fe, Co, Ni ve WC elementleri ile üretilen Yüksek Entropili $Cr_{20}Mn_xFe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_x$ alaşımı incelenerek alaşımdaki Mn ve WC oranını değiştirip $Cr_{20}Mn_{20-x}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_x$ alaşımlı malzemeye farklı oranlarda (%3-%5-%10) Tungsten Karbür (WC) ilavesi yapılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Karışımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilip 6 ton basınç altında 30 gr ağırlıkta olacak şekilde preslenerek numuneler metalografik işlemler için hazır hale getirilmiştir. Ark eritme yöntemi ile 8 adet alaşım numunesi üretilmiş olup, 4 adet alaşım numunesi 24 saat süre ile 950 °C'de ısıtılma tabi tutularak 4 adet ısıtılmalı ve 4 adet normal numune üretilmiştir. Üretilen numunelere aşınma deneyi, mikro sertlik, XRD, SEM ve EDS analizleri yapılarak mikro yapı özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda ısıtılma tabi tutulmuş numunelerin normal numunelerden daha fazla sertlik değeri ortalamasına sahip olduğu ve XRD, SEM ve EDS mikro yapıları incelenen numunelerin tane yapılarının korunduğu ancak oranlarında değişim olduğu tespit edilmiştir. Aşınma deneyi sonucunda WC (%3-%5-%10) ilaveli ısıtılmalı numuneler, normal numuneler ile karşılaştırıldığında ısıtılmalı numunelerin kütle kayıplarının olumlu yönde azaldığı görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{20-x}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_x$ alaşımındaki elementlerin oranı değiştirilerek veya daha farklı elementler kullanılarak yapılacak yeni çalışmalara ışık tutabileceği değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek entropili CrMnFeCoNi alaşımı, Tungsten Karbür, ark eritme yöntemi, mikro yapı, mekanik özellikler.

ABSTRACT

Investigation of the Effect of Addition of Tungsten Carbide (3%-5%-10%) to High Entropy CrMnFeCoNi Alloy at Different Rates on Mechanical and Microstructural Properties

In this study, High Entropy Cr₂₀Mn_xFe₂₀Co₂₀Ni₂₀WC_x alloy produced with Cr, Mn, Fe, Co, Ni and WC elements in powder form was investigated and a homogeneous mixture was obtained by changing the ratio of Mn and WC in the alloy and adding Tungsten Carbide (WC) at different ratios (3%-5%-10%) to Cr₂₀Mn_{20-x}Fe₂₀Co₂₀Ni₂₀WC_x alloy material. The mixtures were produced by powder metallurgy method and pressed under 6 tons of pressure to a weight of 30 g and the samples were made ready for metallographic processes. Eight alloy samples were produced by arc melting method, 4 alloy samples were heat treated at 950 °C for 24 hours and 4 normal samples were produced. Wear tests, microhardness, XRD, SEM and EDS analyzes were performed on the produced samples and the effect on microstructure properties was investigated.

In the experimental studies, it was determined that the heat treated samples had a higher average hardness value than the normal samples and the grain structures of the samples whose XRD, SEM and EDS microstructures were examined were preserved, but their ratios changed. As a result of the wear test, it was observed that the mass loss of the heat-treated samples with the addition of WC (3%-5%-10%) decreased positively compared to the normal samples. It can be evaluated that new studies by changing the ratio of elements in Cr₂₀Mn_{20-x}Fe₂₀Co₂₀Ni₂₀WC_x alloy or using different elements can shed light on new studies.

KeyWords: High entropy CrMnFeCoNi alloy, Tungsten Carbide, arc melting method, micro structure, mechanical properties.

1. GİRİŞ

Yüksek entropili alaşımlar nispeten yakın zamanda ortaya çıkmış farklı bir alaşım tasarım anlayışına sahip alaşım türüdür. Ana matris metal elementi üzerine kurulu alaşımlama tipinden eşmolar veya birbirlerine yakın sayılabilecek seviyede alaşımlama elementlerinin yer aldığı bir anlayışı içermektedir. Geleneksel alaşım anlayışında bu 5–35 at.% civarında 5 veya daha fazla element içeren bu sıra dışı alaşım tasarımına sahip malzeme grubu çok farklı özellikler sergilemektedir. Bu malzemelerin oluşturulması temel hedefler mukavemet ve tokluk, aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, çevresel korozyon, hafif malzeme, işlenebilirlik, manyetiklik, yeşil malzeme (özellikle geri dönüştürülebilir Cd ve Cr⁺⁶ içeriği olmayan) ve sayılan bu durumların kombinasyonları olarak nitelendirilebilir (Yeh, 2006).

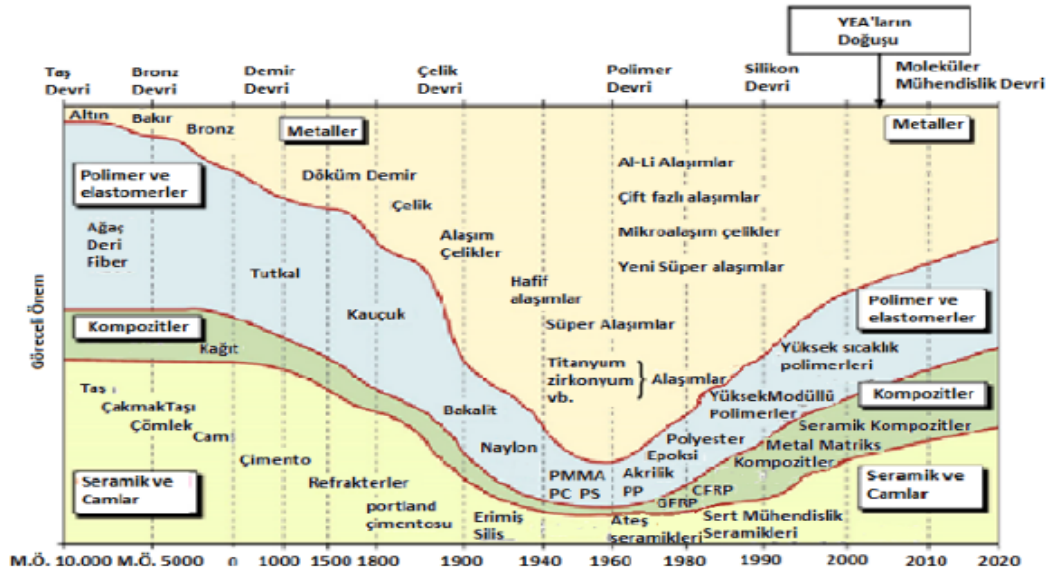
Endüstriyel uygulamalardaki ve son zamanlarda mühendislik çalışma alanlarındaki gelişmeler ile geleneksel malzemelerden mikroyapısal, mekanik ve kimyasal özellikler açısından üstün özellikli malzemeler daha çok tercih edilmektedir. Mikroyapısal, mekanik ve kimyasal özellikleri geleneksel alaşımlama ile elde etmek zor olmaktadır. Geleneksel alaşımlama ile üstün özellikli malzeme edinimi zor olduğundan son zamanlardaki çalışmalarda katı çözümlü fazların oluşumu beş veya beşten fazla temel elemente dayanan yüksek entropili alaşımlar (YEA) üzerine olmuştur. Metalurjideki önemli gelişmelerden biri olan YEA'lar çok elementli, eş molar veya çok bileşenli alaşımlar şeklinde de adlandırılmaktadır. YEA, mikro yapılarındaki farklılıklar ve benzersiz bileşenleri ile istendiği gibi kurgulanıp geliştirilebilir özellikleri açısından metalürjinin ihtiyaçlarını karşılayabileceği beklentisini oluşturmaktadır (Ergin ve ark., 2022).

YEA'lar üzerine yapılan bilimsel çalışmalar ve akademik araştırmalarda; Al, CoCr, Fe, Ni, Ti, Mn ve Cu elementlerinin kullanımı tercih konusu olmaktadır. Segregasyona sebep olan bakır elementi aynı zamanda aşınmada direnç değerlerini de düşürdüğü için Mo elementi tercihinin yönelim oluşturmaktadır. Co elementine yönelimdeki amaç yüksek elastik ve yüksek sıcaklıklarda da ısı kararlılığının daha iyi olmasıdır. Yapısal alanlarda kullanılacak malzemelerde karbür oluşturabilme özelliği sebebiyle Co elementinin sertlik değerlerinde yükseltici özellikler sergileyeceği düşünülmektedir. Akademik çalışmalarda ve piyasa uygulamalarında Co elementinin pahalı olmasından dolayı Mn elementinin kullanımı da yaygındır (Zhang ve ark., 2014).

1.1. Yüksek Entropili Alaşımlar

İnsanlık tarihinin medeniyet yolculuğu dönemin ihtiyacına ve kabiliyetine göre yeni metallerin keşfedilmesiyle birlikte büyük gelişim göstermiştir. Uygarlık medeniyetlerinde metal ve alaşımların keşfedilip bulunması önemli bir rol almıştır. Son birkaç yüzyılda insanlığın ihtiyaç ve gereksinimlerine göre takım çelikleri, paslanmaz çelikler ve süper alaşımlar gibi insanlığın ihtiyaçlarını karşılayan alaşımlar geliştirilmiştir.

Geleneksel alaşımların geçmişten günümüze uzanan tasarımlarında ve üretimlerinde, temel bir elementten oluşmasa da bir çözücü esaslı temel alınarak yapıldığı bilinmektedir. Bu tasarım biçimi insanlık tarihine ve gündelik hayata yardımcı bulunan çoğu pratik alaşım yapımında kullanılmıştır. Fakat bu anlayış ile üretilen alaşımlar kullanım kompozisyonunu sınırlandırarak yapılmak istenilen mikro yapı ve özelliklerini bulmakta engelleyici sebeplere neden olmaktadır (Murty ve ark., 2014).



Şekil 1.1. Mühendislikte kullanılan malzemelerin tarihlere göre değişim diyagramında YEA'ların keşfi (Yeh ve ark., 2004).

Alaşımlar, insanlık uygarlığının malzeme geliştirme yeteneği üzerine basitten kompleks bileşimlere yönelik geliştirilmiştir. Geliştirilmiş alaşımların performansları uygarlık tarihinde ilerlemeye katkı sağlamıştır. Son yüzyılda gelişen teknoloji ile birlikte çok sayıda elementlerden oluşan özel alaşımların bulunmasına neden olmuştur. Bir veya daha çok elementin bir araya gelmesiyle oluşturulan alaşımların, saf halde bulunan metallere oranla yüksek bir entropi sağladığı aşıkardır (Gao ve ark., 2016).

Franz Karl Achard'ın, 18. yüzyılın son zamanlarında 5-7 element ile eş kteli ve çok bileşenden oluşan alaşımlar üstüne yapmış olduğu çalışmalarını, YEA'ların belirleyicisi olarak kabul edebiliriz. Franz Karl Achard'ın çok az bilinen Fransızca yazılmış kitabında, 1788'de alaşımların sistem bilgileri üzerine detaylı bilgiler paylaşmıştır. Kitapta alaşımların sistem bilgileri üzerine, bakır, demir, antimon, çinko, kurşun, kobalt, kalay, gümüş, platinyum, bizmut ve arseniği içinde barındıran bir element ile dokuz yüzden fazla alaşımın kompozisyonuna ait karmaşık ve detaylı sonuçları açıklanmıştır. Kitabında iki, üç ve dört elementlerden oluşan alaşımlarla beraber beş, altı ve yedi elementten oluşan alaşımlar üzerine yaptđı çalışmalarda da ağırlıkları eşit olan alaşımlar üzerine çalışılmış ve üretilen alaşımların özelliklerinin de birbirinden farklı olduğu grlmştir (Smith, 1963). Mühendislik malzemelerinin kullanımına ait Şekil 2.1'deki görselden de YEA'ların keşfine uzanan malzeme tarihi gözlemlenebilmektedir.

Yeh ve ekibi 2004'te '*YEA(High EntropyAlloys)*' terimini ilk olarak; '*Advanced EnginneringMaterials*' dergisinde yayımlanmış olan "Nanoctructred High Entropy Alloys with multiprincipal elements novel alloys design concepts and outcomes" isimli akademik çalışmalarında kullanmışlardır (Murty ve ark., 2014).

YEA'lar geleneksel malzemeler ile kıyaslandđında iyi korozyon direnci, yüksek sertlik, yüksek aşınma ve sıcaklık dayanımı gibi geliştirilen mekanik özellikler sayesinde YEA'lar önemli oranda araştırılma yapılmaktadır (Zhou ve ark., 2007).

Yüksek entropili alaşımlar, beş veya daha çok elementin %5-35 konsantrasyonu aralığında yakın atomik oranlarda birleştirilmesiyle oluşan alaşım eşitleri ile meydana gelmektedir (Yeh ve ark., 2004). Birtakım araştırmacı akademisyenler bu yaklaşımdan farklı olarak entropi bazlı tanımlamayı kullanmışlardır. R'nin (R: gaz sabiti) 1,5'in üzerinde bulunan konfigürasyonel entropili alaşımlar da YEA çeşidine dahildir (Tsai, 2016). Bununla birlikte YEA, dört ve dörtten daha çok metal elementlerden oluşan eşmolara yakın bileşimler Şeklinde de olabilirler (Tian ve ark., 2014).

1.2. Yüksek Entropili Alaşımlarda Tanımsal Kavramlar

Yüksek entropili alaşımların temel özelliği; önemli ölçüdeki sıcaklıklardaki metalli bileşikler ile kıyaslanınca YEA'nın içerisinde bulundurduğu basit yapılı katı çözeltili faz, yüksek karışım entropisi etkisiyle kararlı bir yapı sergilemesi şeklinde açıklanabilir.

Basit katı çözeltili fazının açıklandığı gibi kararlılık göstermesi termodinamik olarak belirtilirse, alaşım sisteminin içerisinde bulunan bir fazın kararlılığı Gibbs serbest enerjisiyle açıklanabilir. Termodinamik olarak bir sistem, serbest enerjisini (G) en aza düşürmeye çalışır ve serbest enerji (G) değerini de küçük değerine düşürünce sistem dengelenmiş olur. Bileşenlerin birlikte bulunduğu alaşım sistemlerinde, herhangi bir faz kararlılığının Gibbs serbest enerjisi üzerinden hesaplanması denklem (1.1)'de verilmektedir.

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (1.1)$$

ΔG_{mix} karışımın Gibbs serbest enerjisini göstermektedir. ΔH_{mix} karışıma ait entalpiyi ΔS_{mix} şeklinde gösterilen sembol karışım entropisini ve T sembolü bağıntıda mutlak sıcaklığı temsil etmektedir. Gibbs serbest enerjisi (ΔG_{mix}) eşitliğinde, karışımdaki entalpiler (ΔH_{mix}) stabil kalmayı sağlarsa, karışıma ait yüksek entropiyi düşük Gibbs serbest enerjisine dönüştürmüş olur aynı zamanda alaşım sistemi kararlılığını da koruma eylemini sürdürür.

Denklemin (2.1) entropi kısmından anlaşılmaktadır ayrıca yüksek entropi içeren düzensiz fazlar, düşük entropi içeren düzenli fazlar ile kıyaslandığında daha avantajlıdır. Bu husus yüksek sıcaklıklarda oluşan bazı düzenli fazların indirgenmesine olanak sağlar. Düzensiz çözeltilerde mol sayısına göre düzenleme entropisi denklem (1.2)'de gösterilmektedir.

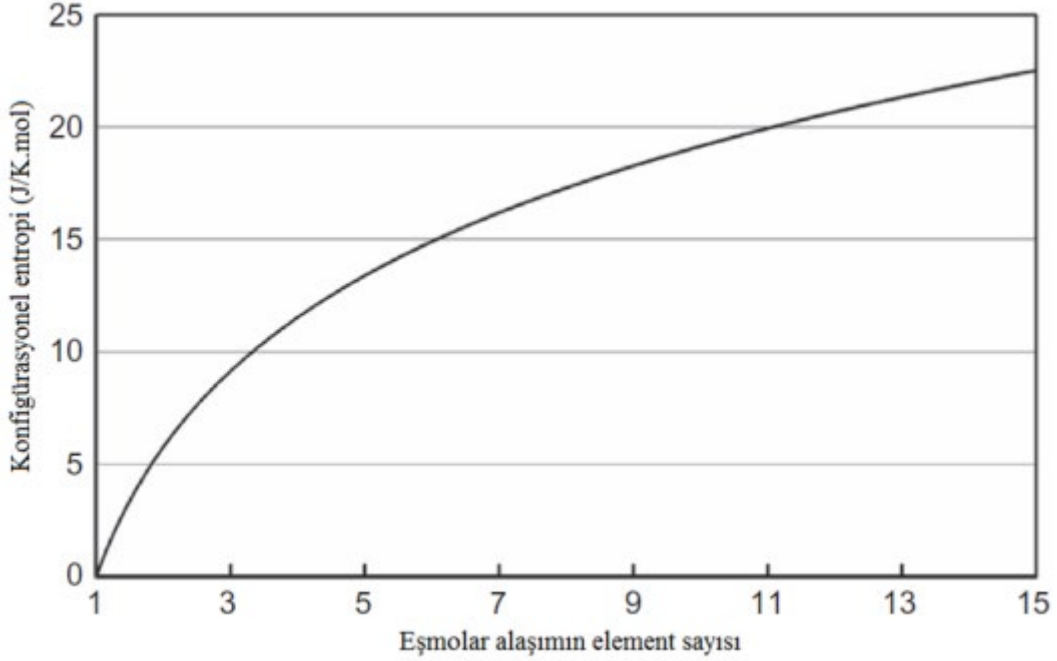
$$\Delta S_{\text{konf}} = -R \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (1.2)$$

'R' Gaz sabit değeri, 8,314 J/K mol, farklı sayılardaki bileşiklerle olan eş molar alaşımlar için düzenleme entropileri;

$$S=R.\ln.n \quad (1.3)$$

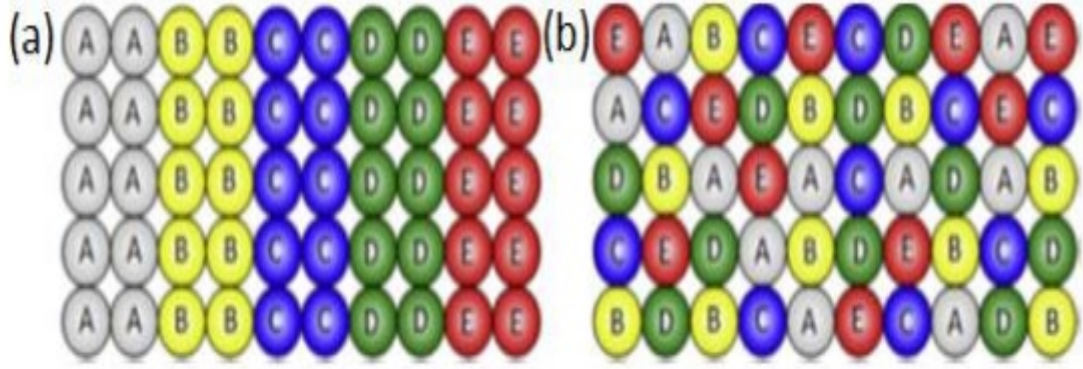
Beş tane elementten oluşmakta olan bir yüksek entropili alaşım için; “n” değeri beş alınınca eşitlik de 1,61 R değerine karşılık gelmektedir. “*Miracle ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak YEA’ların $\Delta \geq 1.5$ olduğunu açıklamışlardır.*” (Miracle ve ark., 2014).

Şekil 1.2’de elementlerin sayılarına bağlı olarak eş molar alaşım içeriklerinin yerleşme düzenlerindeki entropi değerinin grafiği yer almaktadır.



Şekil 1.2. Eşmolar alaşıma ait elementlerin sayılarına bağlı olarak düzenleme entropisinin katı çözelti durumundaki değişimi (Murty ve ark., 2014).

Bazı durumlarda, eşit olmayan bileşen oranlarına bağımlı olarak yüksek entropili alaşımların karışım entropileri 1.6 R’den daha az olduğu gözlemlenmektedir. Örnek olarak $Al_{1,5}CoCr_{0,5}FeNi_{0,5}$ alaşımının karışım entropisi 1.523 R’dir ve $AlCoCrFeNi$ alaşımının 1.61R karışım entropi değerinden düşük olduğunu tespit etmişlerdir (Murty ve ark., 2014).



Şekil 1.3. (a) Karıştırmadan önce beş bileşenden oluşan eşatomik alaşım ve (b) düzensiz katı çözeltiliye karıştırma. (Tamamının Atom çapları eşit olacak şekilde belirlenmiştir) (Murty ve ark., 2014).

Yüksek entropili alaşımlar ve orta entropili alaşımları birbirinden ayıran değer olarak ΔS_{konf} $1,5R$ değeri esas alınmıştır. Düşük entropili ve orta entropili alaşımları birbirinden ayıran ΔS_{konf} $1R$ değeri esas alınmıştır. Bu neden ile karışım entropisinin $1R$ 'den daha az olması sonucunda düşük enerji bağlarının meydana gelebileceği bilinmektedir (Yeh, 2013).



Şekil 1.4. Konfigurasyon entropisine bağlı alaşım çeşitleri (Yeh, 2013).

1.3. YEA'nın Mikroyapıları ile Mekanik Durumlarını Etkileyen Faktörler

Yüksek entropili alaşımların mikroyapıları ile mekanik özelliklerine etki eden birçok faktör bulunmaktadır. YEA'lara etki eden temel etkenler arasında temel dört etkiyi aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Yüksek entropi etkisi
- Latisdistorsiyonu etkisi
- Yavaş difüzyon etkisi
- Kokteyl etkisi olarak sıralanır.

1.3.1. Yüksek Entropinin Etkileri

YEA'larda en önemli etki Yüksek entropi etkisidir, bunun sebebi ise katı çözeltilerde çözeltilerin oluşum durumunun artırılabilir bir yapıda olması aynı zamanda mikroyapının da istenilenden daha basit bir duruma getirebilir olmasıdır (Murty ve ark., 2014). İçeriğinde birden fazla ana element olan alaşımların karışık ve kırılğan mikroyapılar oluşturacağı kanısı, bu alaşımlar ile ilgili yeteri oranda çalışma yapılmamasına neden olmuştur. Kimyasal olarak uyumlu elementlerden oluşan YEA'lar yüksek karışım entropisi özelliği ile az sayıda veya tek fazdan oluşabilirler. Gibbs faz kuralı kullanılarak belirlenen faz sayısının olması gereken en yüksek sayıdan belirgin bir seviyede az oluşu gözlemlenmiştir. Yüksek karışım entropisinin elementler içerisindeki çözünürlüğü taraf tarafa arttırıp fazların bölünmesine ve intermetalik bileşiklerin oluşumunu engellediği belirlenmiştir.

Yüksek entropili alaşımları meydana getiren elementlerin arasında oluşan güçlü bağların etkisiyle, intermetalik fazların meydana gelmesine karşın, meydana gelen bu fazların aynı zamanda diğer elementleri de içeriğinde barındırma eğiliminde olduğundan düzenlilik derecelerinde ciddi bir azalma meydana gelmektedir. Katı hâl termodinamiğin de karışım entropisi; artış gösteren boşluğun yoğunluğu ile sıcaklığın tesir etmesi ve çözücü atomlarıyla düşük bağları bulunan çözünmüş elementlerin çözünürlük durumunun iyileştirilmesinde etkili bir yer edinmektedir. Aynı olarak intermetalik şekilde oluşan bileşiklerde de karışım entropisi, diğer elementlerin de çözünürlüklerini daha iyi seviyelere çıkarabildiği tespit edilmiştir. Bütün bu özellikler; $\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$ bağıntısı ile ifade edilebilir. $T\Delta S_{\text{mix}}$ şeklinde bağıntıda verilmiş olan ifade yüksek sıcaklıklara uğrayan karışım entropisinin bu sıcaklarda da baskın bir durumda olacağını gösterir. Bu sebeple, YEA'lar

katı çözeltileri oluşturabilmek için kayda değer bir yüksek entropi etkileşimiyle yüksek ısı değerlerinde özellikle birinci dereceli katı çözeltilerden intermetalik şekilde oluşan bileşiklerdence, basit yapılı ve çok sayıda olan elementli çözeltiler fazları oluşturur. Özellikle yüksek olan sıcaklıklar için çözünürlük aralığının daha geniş tutulması sağlanır (Yeh, 2006). Sabit basınç (P);

$$P = C + 1 - F \quad (1.4)$$

Bağıntısı ile gösterilir. “C” değeri bileşenlerin sayılarını ve “F” de serbest olan değişkenlere ait sayıyı belirtmek için kullanılır. 6 bileşeni bulunan bir sistem için stabil basıncın aşağısında kalmak şartıyla en fazla 7 tane denge fazının oluşturulması beklenebilir. Tam bu noktada beklenilenin aksine YEA’larının intermetalik fazlardansa katı şekilde eriyik fazlar oluşturması şaşırtıcı bir durumdur. Ayrıca şaşırtıcı olması tüm eşmoların oranlı bileşenlerinin katı eriyik oluşturacağı anlamına gelmediğinin bilinmesi gereklidir. Dikkatle veya özenle seçilmiş kompozisyonlar için genelleme yapılacak olursa intermetalik fazlardansa katı eriyik halde olan faz oluşumu şeklinde bir durum gözlemlenebilir. Katı eriyik faz asıl olarak yorumlanacak olursa normal şartlarda bir element üzerinden yapılanabilir. Bir çözücünün olması ve çözünen diğer elementleri içeren bir yapının olması söz konusudur. Böyle bir ayırım yapıldığında, HEA’larda eşmoların oranlarından dolayı HEA’larda bunu sağlamak pek de mümkün olmamaktadır (Zhang ve ark., 2014).

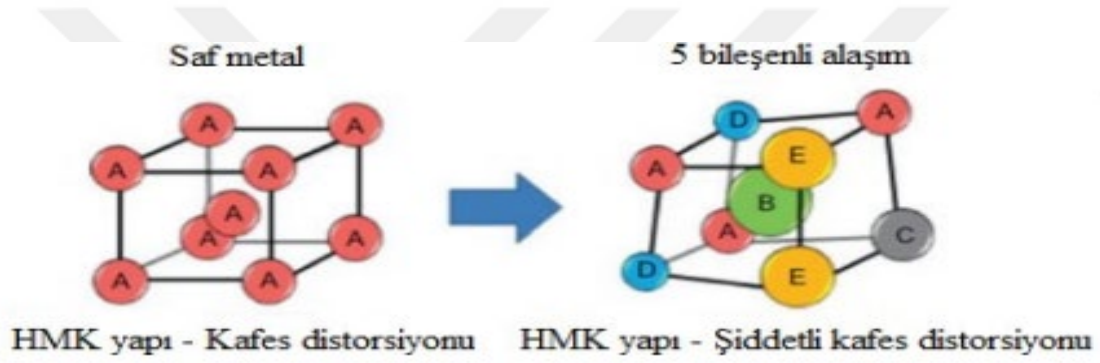
Alaşımın isimlendirilmesi yüksek entropi etkisinden esinlenerek Yüksek Entropili Alaşım olarak adlandırılmıştır. Yüksek entropi etkisi, oluşan katı çözeltiler dengesini daha iyi bir hale getirdiğinden ve mikroyapılardaki oluşumları kolay bir yapıya dönüştürdüğünden YEE (yüksek entropi etkisi) dört esas etki içerisinde en değerlisi olduğu yönünde bir değerlendirme söz konusudur (Yeh ve ark., 2004).

1.3.2. Kafes Distorsiyonu Etkisi

Yüksek entropili alaşımlar geleneksel alaşımlardan farklı olarak, atomların rastgele bir şekilde dağıldığı homojen bir yapı söz içerir. Bu homojen yapı, yüksek entropili alaşımların yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, yüksek dayanım ve yüksek korozyon direnci gibi büyümeye sahip olmasını sağlar. Ancak, homojen yapı aynı zamanda kafes bozulma etkisine de neden olur.

Kafes distorsiyon etkisi, atomların farklı yapılarının olması nedeniyle kristal yapısından meydana gelen distorsiyonlardır. Yüksek entropili alaşımlarda, homojen yapıda atomların rastgele dağılması nedeniyle farklı şekillerde atomların yan yana gelmesi söz konusu olabilir. Bu durumda, atomların kristal kafesinde farklı yapıların yerleşmesi ve kristal yapısında bozulmalar meydana gelebilir.

Kafes distorsiyon etkisi, yüksek entropili alaşımların bazı özelliklerinin etkilenmesi. Örneğin, kafes distorsiyonu, alaşımların mekanik özelliklerinde, özellikle dış kısımlar ve elastikiyet yapısındaki değişikliklere neden olabilir. Bunun yanı sıra, kafes distorsiyonu, alaşımların termal ışınlarına ve kristal yapılarının kararlılığına da etki edebilir.



Şekil 1.5. Beş bileşenden oluşan bir YEA'nın ve saf metale ait kafes yapısının şematik gösterimi (Murty ve ark., 2014).

Mukavemet dayanımının açıklanmasında kafes distorsiyonunun etkisi, HMK yapısı ile oluşan YEA'nın yüksek mukavemet dayanımı üzerinden açıklanabilmektedir (Zhang ve ark., 2014).

1.3.3. Yavaş Difüzyon Etkisi

Yüksek entropili alaşımlarda yavaş difüzyon etkisi de gözlemlenebilir. Homojen yapıdaki atomların rastgele dağılımı nedeniyle, malzeme içindeki farklı atomlar veya moleküllerin hareketi yavaşlayabilir. Bu yavaş difüzyon etkisi, alaşımların termal kararlılığını artırır ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirliğini sağlar.

Yavaş difüzyon etkisi, yüksek entropili alaşımların bazı özelliklerini etkileyebilir. Örneğin, alaşımların oksidasyon direnci ve korozyon direnci artabilir. Ayrıca, yavaş

difüzyon etkisi, alaşımların mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olabilir. Özellikle sertlik ve elastikiyet modülü gibi mekanik özellikler, yavaş difüzyon etkisine duyarlı olabilir.

Yüksek entropili alaşımlar ile geleneksel alaşımlardaki difüzyon arasında bulunun önemli farklardan biri, Yüksek entropili alaşımların katı çözeltili fazlarındaki bütün kafes yapısının çevresinde bulunan atomların, geleneksel olarak bulunanlara göre daha farklı çeşitliliğe sahip olmalarıdır. Bunun temel nedenlerinden ilki, Yüksek entropili alaşımlarda katı çözeltili halde bulunan fazlarının bileşimlerine yön veren bir çözücü elementin bulunmuyor oluşu, ikinci neden ise katı çözeltili fazlarında en az dört ana element olmasıdır (Tsai ve ark., 2013).

Yüksek entropili alaşımların tasarımı ve kullanımı sırasında, yavaş difüzyon etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu etkinin kontrol altında tutulması, alaşımların özelliklerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine ve optimize edilmesine yardımcı olabilir.

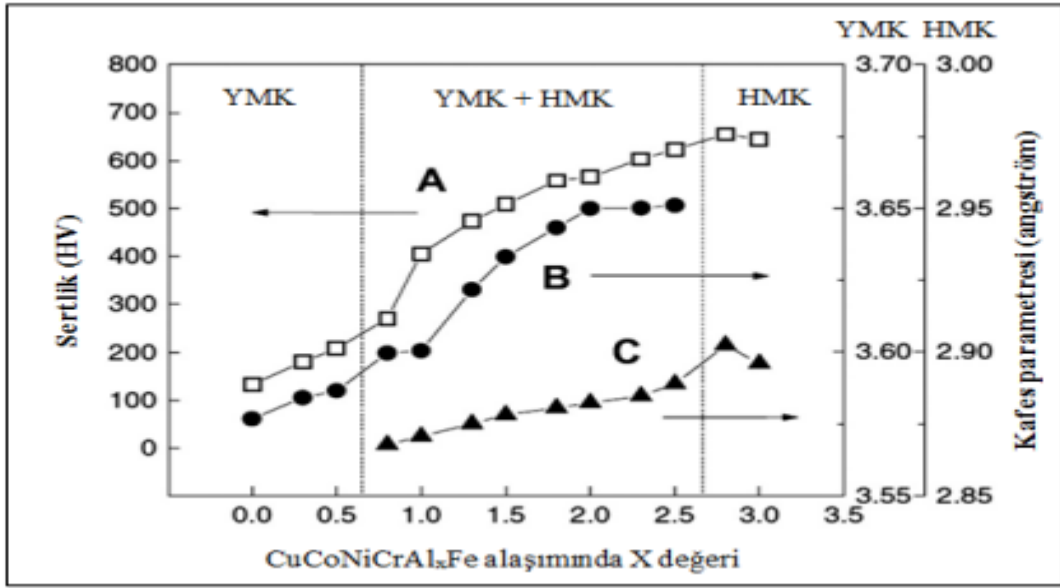
1.3.4. Kokteyl Etkisi

Kokteyl etkisi, farklı elementlerin homojen tek yapıda bir araya gelerek, beklenmeyen ve benzersiz özelliklere sahip bir malzeme oluşturmasıdır. Bu etki, alaşımın yapısındaki her elementin bir arada çalışması sonucunda, alaşımın yüksek özellikleri elde etmesini sağlar.

Kokteyl etkisi, yüksek entropili alaşımların özelliklerinde belirgin bir şekilde görülebilir. Örneğin, alaşımların sıcaklığa ve basınca dayanıklılığı, yüksek mukavemeti ve yüksek korozyon direnci gibi özellikler, kokteyl etkisinin bir sonucudur. Kokteyl etkisi ayrıca alaşımların elektriksel, manyetik ve optik özelliklerini de etkileyebilir. Örneğin, bir HEA'da nikel, demir, kobalt, krom ve manganez gibi elementler bir arada olabilir. Bu elementlerin bütün etkileşimi, alaşımın mekanik özellikleri, termal koruyuculuğu, korozyon direnci gibi özellikler üzerinde farklı etkilere neden olabilir. Kokteyl etkisi, farklı elementlerin olan etkileşimlerini analiz ederek, alaşımın bileşenlerinin optimize edilmesi yardımcı olabilir.

Örnek olarak alüminyum elementine bakıldığında yumuşak ve aynı zamanda düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Bunun yanında alüminyum elementi YEA'nın sertlik derecesi yükseltilebilir. Örnek olarak Şekil 1.6'da CoCrCuNiFeAlx alaşımına bakılacak olursa; alaşımdaki Alüminyum oranı göz önüne alınınca bu orandaki sertliğin önemli bir derecede

sertlik artışı sağladığı görülmektedir. Artış gösteren Alüminyum konsantrasyonuna bağımlı olacak şekilde YMK yapılı faz öncelikle HMK + YMK şeklinde bir yapı oluşturup sonrasında da HMK şeklinde bir yapı haline gelmektedir. Kafes parametresi için sonuç olarak YMK ve HMK yapıların ikisinde de artış olmakta ve buna bağlı olarak sertlik düzeyi de artış oluşturmaktadır (Miracle ve ark., 2014; Zhang vse ark., 2014).



Şekil 1.6. Kafes parametresi ve sertliğin değişik x değerleri için CoCrCuNiFeAl_x alaşımı. A)CoCrCuNiFeAl_x için oluşan alaşımın sertliğini göstermektedir, B) YMK faz kafes parametresinin değer değişimini göstermektedir, C) HMK faza ait kafes parametresi şeklinde olmaktadır (Yeh ve ark., 2004).

Kokteyl etkisi, yüksek entropili alaşımların tasarımı ve kullanımı sırasında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Farklı elementlerin homojen bir yapıya sahip bir araya gelmesi, alaşımın özellikleri ve davranışlarını tahmin etmeyi zorlaştırır. Bu nedenle, yüksek entropili alaşımların tasarımı, yüksek kaliteli malzemelerin üretimi için uygun tasarım ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmelidir.

1.4. CrMnFeCoNi Yüksek Entropili Alaşımları

CrMnFeCoNi, yüksek entropili bir alaşımdır ve içinde beş farklı element barındırır: manganez (Mn), krom (Cr), kobalt (Co), demir (Fe) ve son olarak nikel (Ni) elementleri şeklinde oluşur. Bu alaşım, ilk olarak 2004 yılında Cantor ve arkadaşları tarafından yüksek entropili alaşım olarak incelenmiştir (Cantor ve ark., 2004).

CrMnFeCoNi alaşımı, yzzey merkezli kzbik bir eş atomlu tek fazlı katı zozelti alaşımıdır.

Son 20 yılda araştırılan en belirgin yzsek entropi alaşımı mzkemmel performans sergileyen Cantor alaşımı olarak da bilinen eş atomlu CrMnFeCoNi alaşımı suneklik, yzsek zalışma sertleştirme oranı ve iyi kırılma tokluğuna sahiptir. Son yıllarda ısıl işlemlerin sıcaklıkların altında olduğu kanıtlanmıştır. 800 °C faz ayrışmasına neden olur. Tane boyutuna bağlı olarak, tavlama sertliğin artmasına ve aynı zamanda sunekliğin bozulmasına sebep olduğu da bilinir(Gludovatz ve ark., 2014; Tasan ve ark., 2014).

Bu alaşımın ozellikleri, diğer alaşımlardan farklı ve zok zezitli uygulamalara sahiptir. Bazı kullanım alanları:

1. Yzsek Sıcaklık Dayanımı: CrMnFeCoNi alaşımı, yzsek civarlarında mzkemmel dayanıklılık gosterir. Bu ozellik, bu alaşımın nzkleer reaktörler, işlem termal fırınları ve diğer yzsek sıcaklık uygulamalarının sağlanması sağlar.
2. Yzsek Mekanik Dayanıklılık: CrMnFeCoNi alaşımı, yzsek dayanım ve dayanıklılık ozellikleri ile sızdırmaz hale getirilir. Bu alaşımın korunması, ozellikle ağır yzık altında zalışan kullanım iwin idealdir.
3. Korozyona Direnç: Bu alaşım, korozyona karşı yzsek bir direnç gosterir. Bu nedenle, deniz suyu, asitler ve bazlar gibi agresif ortamlarda kullanım iwin idealdir.
4. Yzsek Isıl İletkenlik: CrMnFeCoNi alaşımı, yzsek bir ısı tuketimine sahiptir. Bu ozellik, ısı transferi gereksinimleri uygulamaları iwin idealdir.

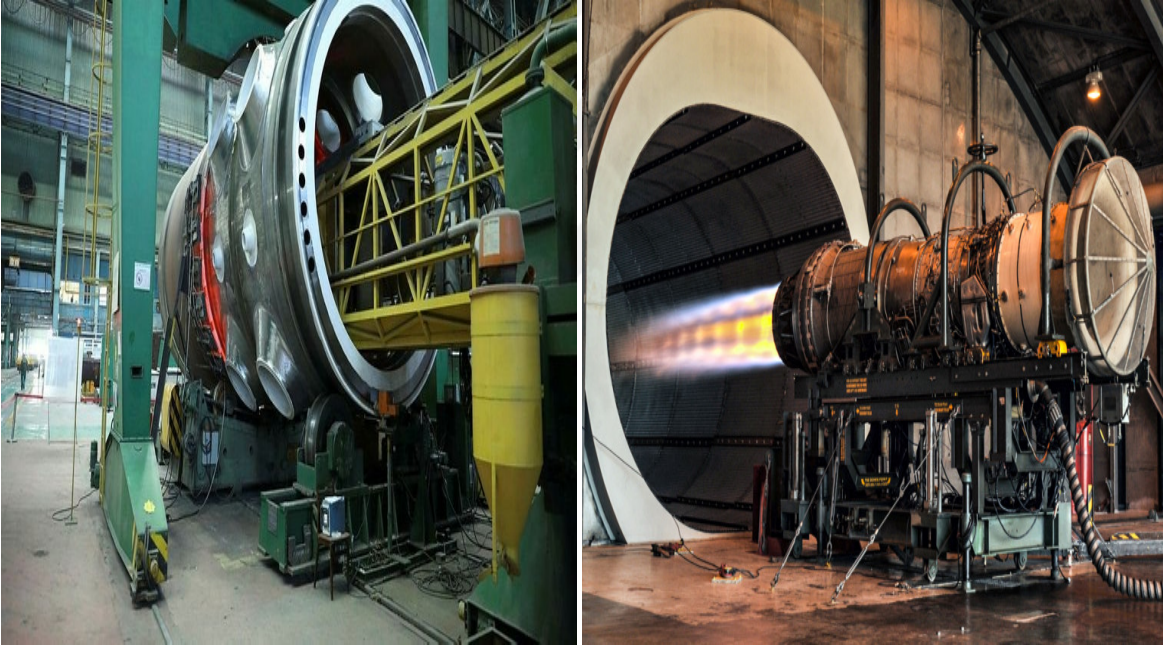
Sonuç olarak, CrMnFeCoNi yzsek entropili alaşımı, yzsek dayanıklılık, yzsek sıcaklık, yzsek korozyon direnci, yzsek sıcaklık gibi birzok avantaj sunar ve otomotiv, enerji, kimya ve diğer birzok endzstri alanında kullanılmaktadır.

1.5. Yzsek Entropili Alaşımların Kullanım Alanları

Yzsek entropili alaşımlar son zamanlarda bilim malzemesi alanında oldukza popzler hale gelmiştir. Bu alaşımlar, geleneksel alaşımlardan farklı olarak birden fazla element iwermekte ve kristal yapılar genellikle birbirinden farklı elementlerden oluşmaktadır. Bu nedenle yzsek entropili alaşımlar, homojen olmayan yapılar sayesinde pek zok farklı gorumze sahiptirler. Yzsek entropili alaşımların kullanım alanları;

1. Yzsek entropili alaşımlar, yzsek sıcaklığa dayanıklılık gosterme ozelliği sayesinde, motor ve jeneratör gibi yzsek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirler.

2. Yüksek entropili alaşımlar, farklı elementlerin birleşimi sayesinde korozyona karşı yüksek direnç gösterme özelliğine sahiptir. Bu nedenle, gemi ve denizcilik endüstrisinde, petrokimya endüstrisi ve savunma sanayisinde kullanılabilirler.
3. Yüksek entropili alaşımların ışınlama dirençleri ve korozyon dirençleri yüksek olduğu için uzay aracı, otomotiv yapıları ve malzeme bilim araştırmalarında ve nükleer yakıtlarda kullanılabilirler.
4. Yüksek entropili alaşımlar yüksek sertlik değerine sahip oldukları için kesici takım ve yüksek hız çeliklerine bakıldığında sert kaplamada ve difüzyonda bariyer şeklinde kullanım sağlamaktadır.





Şekil 1.7. Yüksek Entropili Alaşım lar'ın bazı kullanım alanları, nükleer tanklar, gaz türbini motorları, rulmanlar, kesici uçlar

1.6. Yüksek Entropili Alaşımların Tungsten Karbür ile İlişkisi

Tungsten Karbür, çok sert ve geçmeye dayanıklı bir malzemedir. Bu nedenle yüksek entropili alaşımların Tungsten Karbür ile tasarımları, aşınmaya dayanıklı malzemeler olarak kullanılabilir. Bunun yanı sıra, Tungsten Karbür, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük termal genişleme etkisi gibi büyümeye sahiptir.

Tungsten Karbür yapının sertliği, alaşımların mekanik yayılmalarını sağlar ve ağırlıkları yorulma özelliklerini geliştirebilir. Bu nedenle, yüksek entropili alaşımların Tungsten Karbür ile uzun ömürlü ve yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip malzemeler olarak kullanılabilir. Yüksek entropili alaşıma Tungsten Karbür takviyesi, alaşımın korozyon direncinin artmasına neden olur. Tungsten karbürün sertliği ve korozyon direnci nedeniyle bu alaşımların mekanik özelliklerinin artırılabilmesiyle bağlantılıdır. Özellikle yüksek entropili alaşımların aşınma direnci, tüketim ve tokluk gibi mekanik özellikler, tungsten karbür ilavesi ile artırılabilir. Bu da yüksek entropili alaşımların endüstriyel donanımlarından daha iyi performans göstermesini sağlar.

Sonuç olarak, yüksek entropili alaşımların Tungsten Karbür ile ilişkisi, malzemelerin uzamaya, yüksek sıcaklıklara ve yüksek mekanik streslere dayanıklı olmalarını sağlayabilir. Bu özellikler, birçok endüstriyel uygulama için önemli olabilir ve parçalarda kullanılabilir.

2. MATERYAL VE METOD

Çalışmada kullanılacak olan tozların temini yapılarak, belirlenen oranlarda tozlar karıştırma mikseri ile karıştırılarak presleme işlemi yapıp daha sonra Ark Eritme Yöntemi ile üretilen numuneler ısıtma işlemi tabii tutulur. Üretilen numunelerin, metalografik çalışmalarının ve mikroyapı incelemelerinin yapılabilmesi için sırasıyla, kesme işlemi, bakalite alma zımparalama/parlatma ve dağlama işlemleri yapılacaktır.

2.1. YEA'da Kullanılan Tozların Temini ve Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilmesi

Bu tez çalışmasında kullanılacak olan numunelerin öncelikle özellikleri belirlenmiştir. Bu tez çalışması için özellikleri belirlenen (Co: %99 saflık 44-75 µm, Mn: %99 saflık 44-75 µm, Fe: %99 saflık 44-75 µm, Cr: %99 saflık 44-75 µm, Ni: %99 saflık 44-75 µm, WC: %99 saflık 44-75 µm) 6 farklı metal tozu Nanokar Kimyevi Maddeler A.Ş, firmasından temin edilmiştir.

Toz halde bulunan Cr,Mn,Fe,Co,Ni ve WC elementleri Tablo1'dedeğerleri verilen oranlarda ve ağırlıkta, 0.01 gr hassasiyetine sahip tartıyla toplam 30 gramlık 4 adet numune oluşturulmuştur. Belirlenen oranların yoğunluk ve ağırlık hesaplamaları özel hazırlanmış bilgisayar programlarında yapılmaktadır.

Tablo 2.1. Alaşım numuneleri ve oranları

No	Numune Adı	Alaşım % ve gr	Alaşım % ve gr	Alaşım % ve gr	Alaşım % ve gr	Alaşım % ve gr	Alaşım % ve gr
1	Cr ₂₀ Mn ₂₀ Fe ₂₀ Co ₂₀ Ni ₂₀	Cr: %20 5,563gr.	Mn: %20 5,878gr.	Fe: %20 5,975gr.	Co: %20 6,305gr.	Ni: %20 6,279gr.	-
2	Cr ₂₀ Mn ₁₇ Fe ₂₀ Co ₂₀ Ni ₂₀ WC ₃	Cr: %20 5,358gr.	Mn: %17 4,812gr.	Fe: %20 5,754gr.	Co: %20 6,072gr.	Ni: %20 6,048gr.	WC: %3 1,956gr.
3	Cr ₂₀ Mn ₁₅ Fe ₂₀ Co ₂₀ Ni ₂₀ WC ₅	Cr: %20 5,234gr	Mn: %15 4,148gr.	Fe: %20 5,622gr.	Co: %20 5,932gr.	Ni: %20 5,908gr.	WC: %5 3,156gr.
4	Cr ₂₀ Mn ₁₀ Fe ₂₀ Co ₂₀ Ni ₂₀ WC ₁₀	Cr: %20 4,942gr.	Mn: %10 2,611gr.	Fe: %20 5,308gr.	Co: %20 5,601gr.	Ni: %20 5,578gr.	WC: %10 5,960gr.

Toz metalürjisi, yapım sürecinin güç olduğu malzemelerin toz halindeki durumuyla hammadde olarak başlayan yüksek mukavemet, ekonomik ve en düşük tolerans olacak şekilde farklı üretim yöntemlerine kıyasla çok daha avantajlı olarak üreten bir yöntemdir (Kurt, 2004).

Oluşturulacak numuneler toz metalürjisi üretim aşamalarından biri olan karıştırma/harmanlama işlemine tabi tutulacaktır. Birden fazla bileşen ihtiva eden tozlar için bu işlem yapılmaktadır. Karıştırma işleminde; karıştırılacak toz hacmi ile karıştırıcı hacminin %50-60 aralığında olması durumunda daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Karıştırma süresi uygulaması 5-30 dakika arasında yapılmaktadır (Upadhyaya, 1997).

Metal tozların karıştırılma işleminde çoğu zaman çift konili veya borulu karıştırıcılarda Y ya da V karıştırıcılar kullanılarak yapılır. Metal tozların karıştırma işlemi için Şekil 2.1'de gösterilen karıştırma mikser ile 30 dakika sürede uygulama yapılmıştır (Koch, 1998).



Şekil 2.1. Toz karıştırma mikseri

Toz Karıştırma mikseri ile elde edilen numuneler, kalıba yerleştirilerek numenlerin iki zımba arasındaki hareket doğrultusunda üzerlerine yüksek basınç uygulanmasıyla oluşmaktadır. Bu işlem basit geometriye sahip parçaların seri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan işlem sonucu elde edilen ürün kütle olarak adlandırılır. Numunenin optimum seviyede sıkışmamasından ötürü kütle ifadesi ortaya çıkmıştır. Kütle şeklindeki malzemeler düşük dayanıma sahip olup yapılacak sinterleme işleminden sonra yüksek dayanımlı kütleye sahip ürün oluşmaktadır (Saritaş ve ark., 2007).

Toz karıştırma mikseri ile elde edilen numuneler kalıplara yerleştirilerek istenilen oranlarda karıştırılan tozlar 30 gr ağırlığında olacak şekilde tartımı yapılarak Şekil 2.2.'de

gösterilen numune toz sıkıştırma presinde N₂ atmosferi altında toz metalurjisi ile 6 tonluk yük ile preslenerek Şekil 2.3'te gösterilen numuneler elde edilmiştir.



Şekil 2.2. Tozlar için sıkıştırma presi



Şekil 2.3. Metalografik işlemlerle preslenerek hazır hale getirilen numuneler

2.2. CrMnFeCoNi Yüksek Entropili Alaşımın Ark Eritme Sistemi (Vakum Ark Melting) ile Üretilmesi

YEA'larda üretim olarak birçok yöntem olduğu bilinmektedir. YEA'lar için üretimsel çalışmalarda kullanılan yöntemler arasında diğerlerine oranla daha çok tercih edilen yöntemler; vakum arc melting yöntemi, melt spinning yöntemi ve vakum indüksiyon

melting yöntemi şeklinde söylenebilir (Murty vd., 2014). YEA üretim yöntemleri içerisinde vakum arc melting yöntemi ile üretimin tercih edilmesi daha doğru olacağı düşünülmüştür.

Preslenerek hazır hale getirilen numuneler *İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi (İBTAM)*'a bağlı *Manyetik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında* bulunan Ark Eritme Sistemi üretim yöntemiyle CrMnFeCoNi alaşımına belirli oranlarda Tungsten Karbür (WC) ilave edilerek yüksek entropili alaşım üretilmiştir.

Ark eritme yöntemi kullanılarak eritmek istenen malzemelerin fiziki yapısının plazma olacağı bilindiğinden alaşımda, atmosferde bulunan gazların sebep olacağı bir safsızlık durumunun yaşanmasının mümkün olacağı öngörülebilmektedir. Alaşım için atmosferik gazların sebep olacağı çeşitli safsızlığı engellenmesi amacıyla ark ucunun ve potanın içinde olduğu odacık (chamber) vakum işlemi görmektedir. Ortam içerisinde safsızlıkları uzaklaştırıp ark fırınında bulunan eritme odacığı içerisinde, vakum işlemi üç veya dört defa yapılarak oda içerisindeki havanın alınması sağlandıktan sonra, argon gazının verilmesiyle örnek ürünler üretilmiştir.



Şekil 2.4. Ark Eritme ile üretilen numuneler (Soldan 1. numune $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$, 2. numune $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$, 3. numune $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_5$, 4. numune $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$)

Ark eritme yöntemi ile üretilen numuneler daha sonra ısıtma fırınında homojenliğin sağlanabilmesi için Tunceli Üniversitesi Makina Laboratuvarında bulunan Şekil 2.5'te gösterilen fırında 24 saat süre ile $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ısıtma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 2.5. Isıl işlem fırını (Protherm marka)

2.3. Metalografik İşlemler

2.3.1. Kesme İşlemi

Numuneler üzerinde mikroyapı ve mikrosertlik analizleri yapmak için bakalitlere alınarak, kesme cihazı ile kesme işlemi yapılmıştır.

2.3.2. Bakalite Alma İşlemi

Numunelerimizi kesme cihazı ile kestikten sonra Tungsten Karbürsüz ve belirli oranlarda Tungsten Karbür ilaveli numunelerin yapılması hedeflenen analizler için bakalite alma makinesiyle bakalite alma uygulaması gerçekleştirilmiştir. 180 °C sıcaklıkta bakalite alma uygulaması gerçekleştirilmiş ve aynı zamanda basınç değerini 250 bar olarak belirledikten sonra da soğutma işlemi uygulanmıştır.

2.3.3. Zımparalama ve Parlatma İşlemi

Zımparalama ve parlatma işlemleri Tunceli Üniversitesi Mühendislik Laboratuvarı'nda bulunan zımparalama ve parlatma cihazı ile işlem yapılarak ve 320, 400, 600, 800, 1200, 2000, 5000 no'lu zımparalar kullanılarak işlem yapılmıştır.

Numuneler için yapılacak olan zımparalama uygulaması esnasında zımparalanacak yüzeylerde ısınma olmaması ve kirliliklerin de oluşmaması için su zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha iyi görüntüler alabilmek için numunelere düzgün bir şekilde zımparalama/parlatma işlemi yapılarak örnek ürünün yüzeyi üzerinde derin ve düz şekillerde oluşan çiziklerin tamamen yok edilmiş olmasına özen gösterilmiştir.

2.3.4. Dağlama İşlemi

Zımparalama ve Parlatma işleminden sonra elde edilen YEA'ların yüzey kısımlarında oluşan deformasyonların giderilmesinden daha sonra mikroyapılarının analizleri için uygun bir kimyasal reaktif ile dağlanarak, gerçek yapısal özelliklerini ortaya çıkarmak için gereklidir.

Numuneler Nital dağlayıcı reaktifine (Nital = %1-5 Nitrik asit(HNO_3) + %95-99 Alkol(CH_3OH)) batırılarak parlak yüzeyin matlaştığı görülene kadar sürdürülerek Dağlama işlemi yapılmış olup daha sonra numuneler bol su ile yıkandıktan sonra alkol ile de yıkama işlemi yapılarak kurutulmuştur.

2.4. Alaşımların Karakterizasyonu

Elde edilen numunelere sırasıyla, kesme işlemi, bakalite alma zımparalama/parlatma ve dağlama işlemleri yapılarak XRD analizi, SEM/EDS analizi, Mapping analizi Sertlik ölçümleri ve Aşınma testi yapılarak sonuçlar değerlendirilecektir.

2.4.1. XRD Analiz

Yapılan uygulama çalışmaları içerisinde kullanımı yaygın olan X-ışını analizi yöntemi malzemelerdeki kristal yapıların analizlerini gözlemlemek amacıyla kullanılır.

Üretilen örnek ürünlerin fazlarını belirleyebilmek için X-ışını kütle difraksiyon ölçme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ölçme uygulamaları Tunceli Üniversitesi Mühendislik Laboratuvarlarında bulunan Şekil 2.6 ile gösterilen XRD cihazında, Cu-K α ışınının, X-ışını olarak kullanılmasıyla ortaya çıkan dalga boyu ve tarama hızına uygun değerlerde ayarlanarak yapılmıştır.



Şekil 2.6. XRD Cihazı (Rigaku, Mini Flex600 marka)

2.4.2. SEM/EDS Analizleri

Ark Eritme yöntemiyle üretilen yüksek entropili alaşımların yüzey özelliklerini gözlemlemek için Tunceli Üniversitesi Mühendislik Laboratuvarlarındaki Şekil 2.7 ile gösterilen SEM elektron mikroskobu (Hitachi SU3500) kullanılarak SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır.



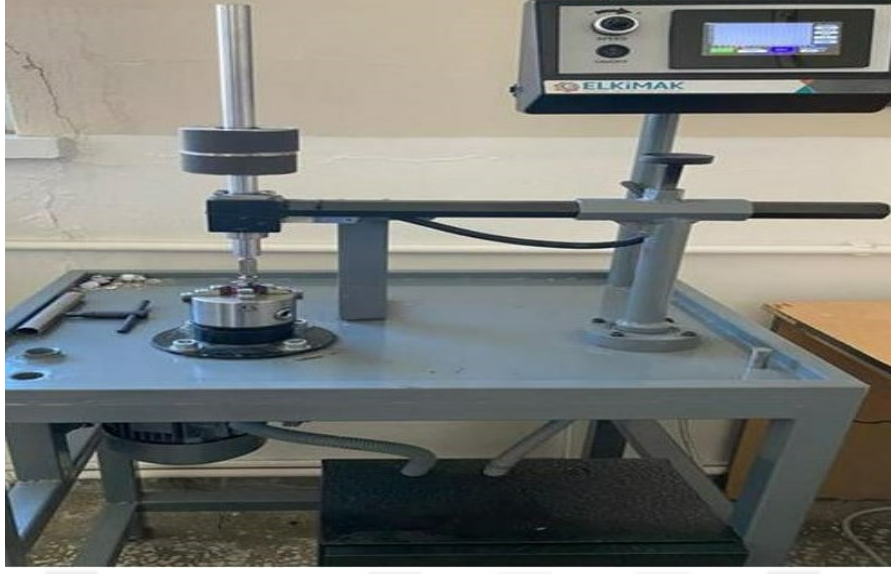
Şekil 2.7. SEM Elektron mikroskobu

2.4.3. Sertlik Ölçümleri

Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılmış başka bir çalışma ise sertlik analizidir. Numunelerin sertlik ölçüm analizleri Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan sertlik ölçüm cihazıyla (Mitutoyo Sertlik Test Cihazı (Hardness Testing Machine-HM)), 1/16'lik küre uç ile yapılarak, hazırlanan bütün numuneler için yapılan 5 ölçüm sonrası alınan ortalamalar sertlik değeri olarak alınmıştır.

2.4.4. Aşınma Testi

Aşınma testleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında Elki Mak marka Aşınma Deney Makinasında Pin-on disk yöntemiyle yapılmıştır.



Şekil 2.8. Aşınma deney makinesi

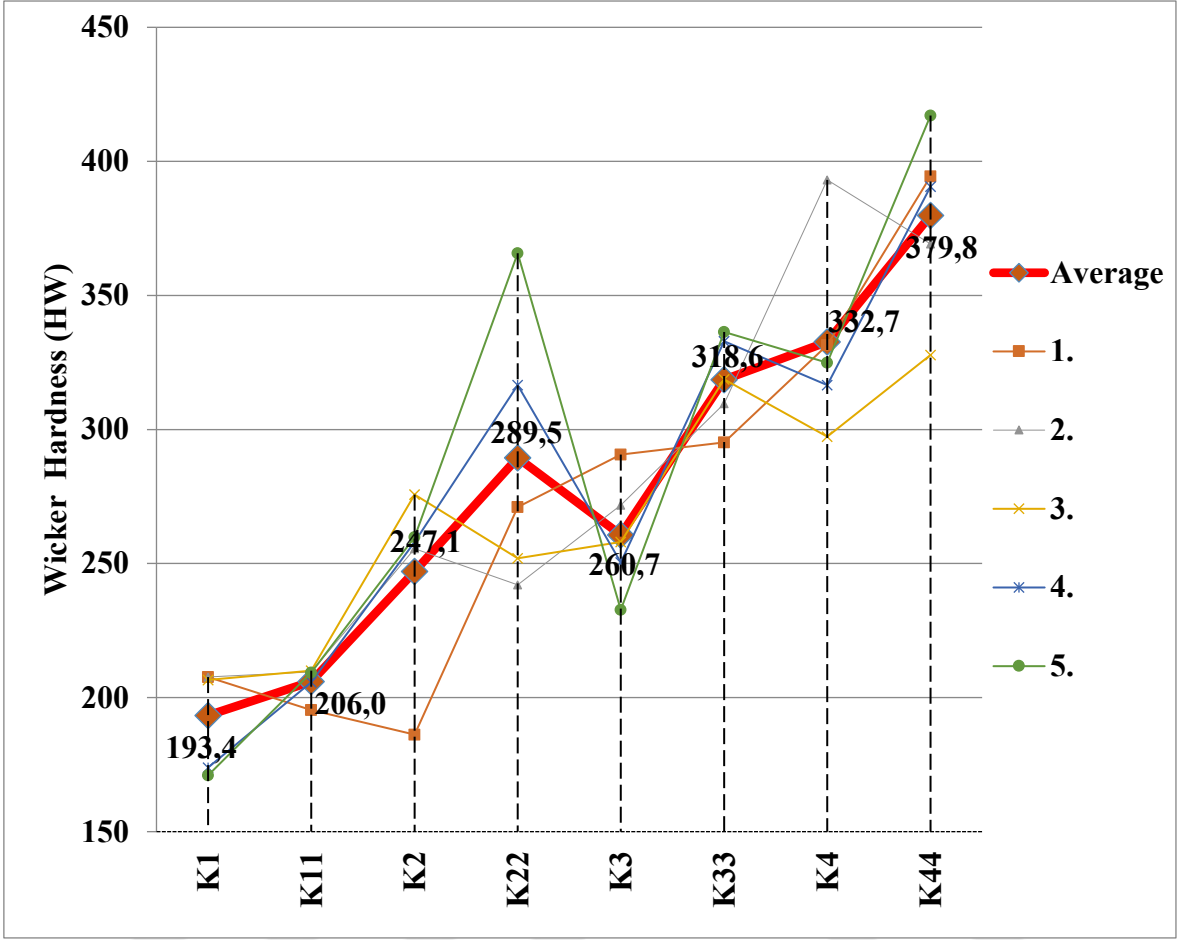
3. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

3.1. Sertlik Analiz Sonuçları

Wickers sertlik metodu kullanılarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Ark Eritme Yöntemi ile hazırladığımız ısıtılma tabii tutulmuş 4 adet normal numune ve 4 adet ısıtılma işlem görmüş numuneden oluşan 8 farklı numunenin beş ayrı noktasından alınan değerler ile sertlik testi yapılmıştır. Sertlik testlerinde her bir numune için çıkan sonuçların ortalaması alınarak sertlik değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 3.1. Mikro sertlik ölçüm değerleri

Alaşımlar	Ortalama	1.	2.	3.	4.	5.
K1	193,4	207,6	207,7	206,6	173,9	171,0
K11	206,0	195,4	209,6	210,1	205,8	209,3
K2	247,1	186,2	255,5	275,7	258,1	259,8
K22	289,5	271,1	242,0	251,9	316,5	365,8
K3	260,7	290,6	271,8	258,1	250,4	232,7
K33	318,6	295,2	309,6	318,7	332,9	336,4
K4	332,7	331,5	393,1	297,3	316,6	324,9
K44	379,8	394,4	369,2	327,8	390,6	417,1



Şekil 3.1. Mikro sertlik ölçüm grafiği

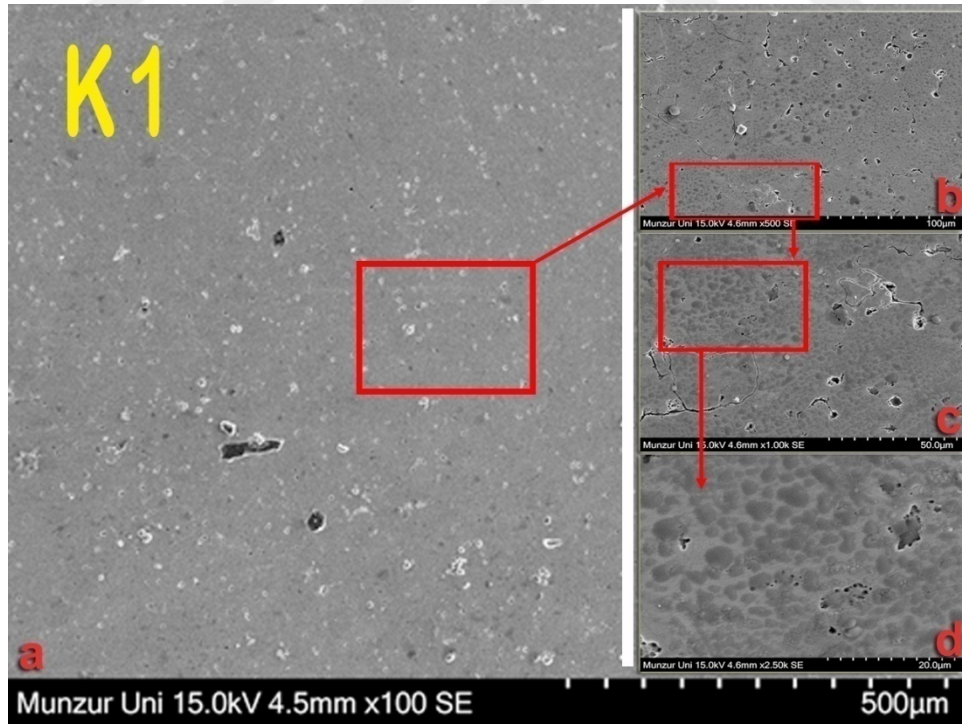
Şekil 3.1’de belirtilen YEA’lı $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ alaşımına belirli oranda WC (%3-%5-%10) eklenerek elde edilen YEA’nın, ısıl işleme tabi tutulmamış K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin sertlik değerleri incelendiğinde K1 ($Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$) numunesi, Mn oranı %3 azaltılıp %3 WC elementi eklendiğinde elde edilen K2 ($Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$) numunesi ile kıyaslandığında ortalama sertlik değerinin 193,4 HW’den, 247,1 HW’ye çıktığı görülmüştür. K3 numunesi incelendiğinde ise Mn oranı %5 azaltılarak WC oranı %5 arttırıldığında ortalama sertlik değerinin 260,7 HW değerine çıktığı görülmüştür. K4 numunesinde ise ortalama sertlik değerinin 332,7 HW olduğu görülmüştür.

950°C’de ısıtılma tabii tutulmuş K11, K22, K33 ve K44 numunelerinin Şekil 3.1’de verilen sertlik değeri incelendiğinde Mn oranının (%3, %5, %10) azaltılıp, WC oranının (%3, %5, %10) artırılması ile elde edilen K44 (379,8 HW), K33 (318,6 HW) ve K22 (289,5 HW) numunelerinin ortalama sertlik değeri K11 (206,0 HW) numunesine ait ortalama sertlik değeriinden büyük olduğu görülmüştür. Isıtılma tabii tutulmuş numunelerin normal numunelerden daha fazla sertlik değeri ortalamasına sahip olduğu görülmüştür.

3.2. SEM/EDS ve XRD Analiz Sonuçları

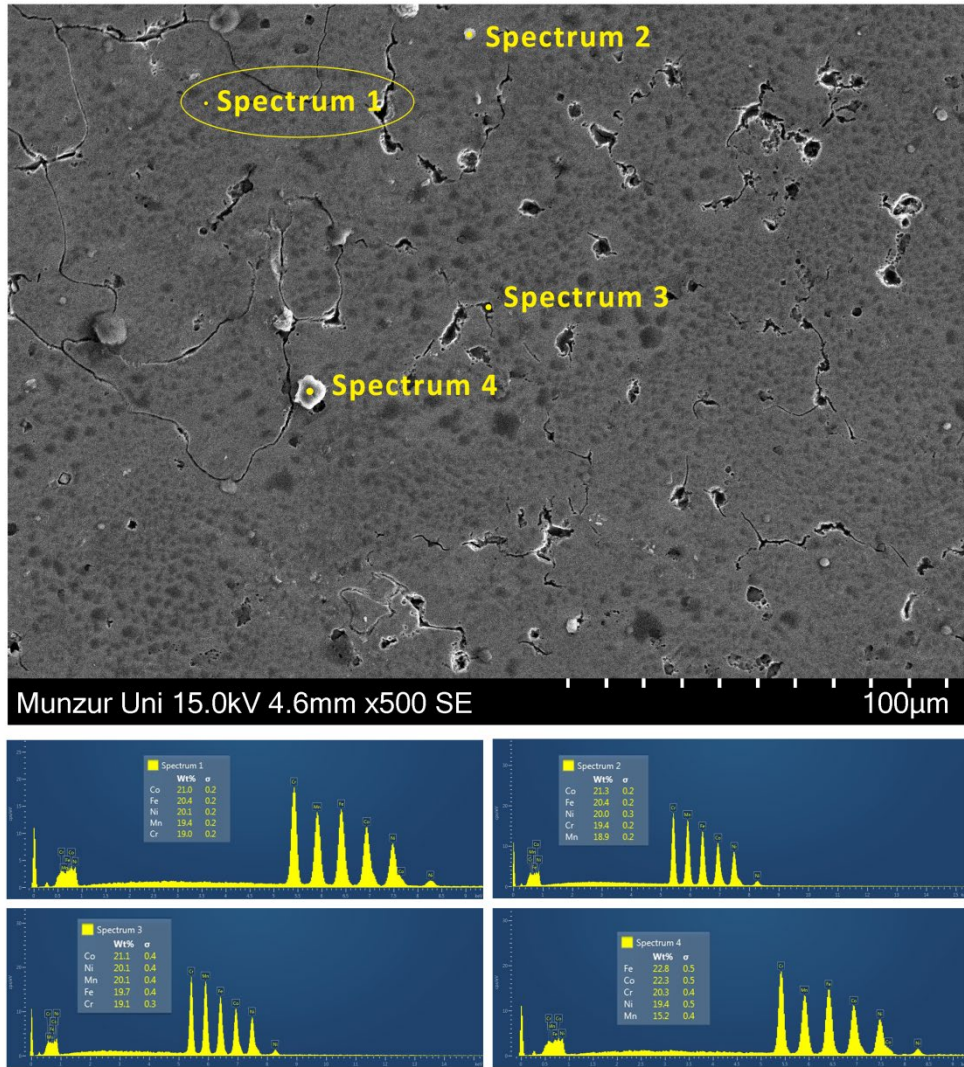
3.2.1. K1 No’lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

$Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ numunesi için Şekil 3.2’de 100x, 500x, 1000x ve 2500x büyütmelele alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.

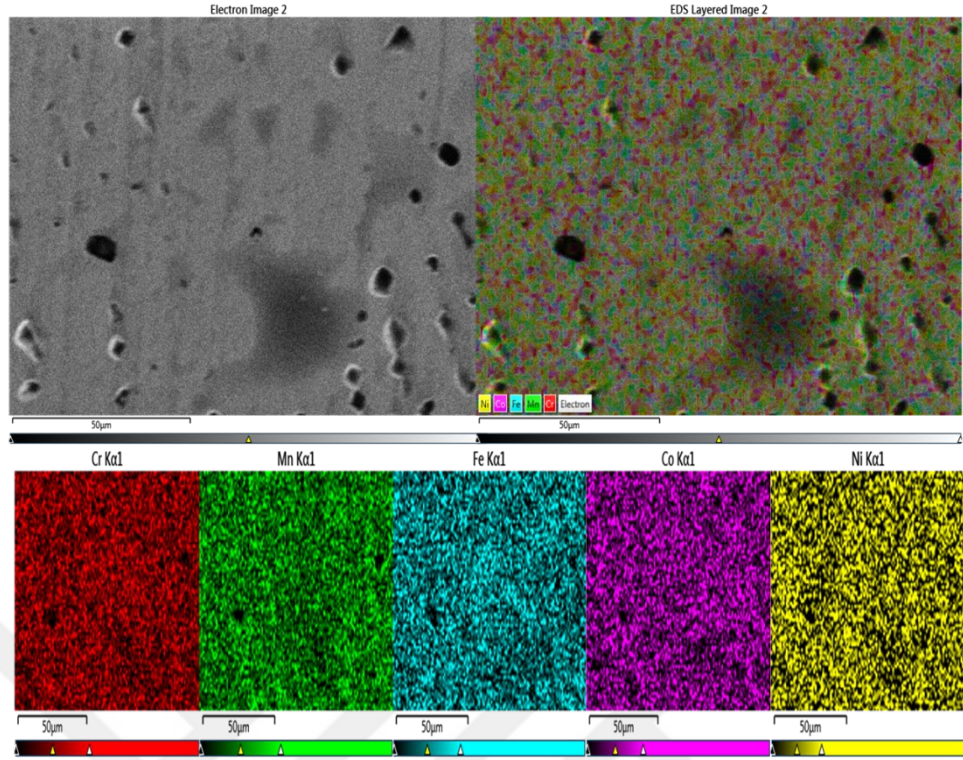


Şekil 3.2. K1 Numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

K1 numunesinden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütle ve hacimsel yüzdelik oranları Şekil 3.3'te verilmiş olup kütle ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ YEA %19,4Cr, %18,9Mn, %20,4Fe, %21,3Co ve %20Ni elementlerinin kütle dağılımını gösteren Şekil 3.3'te verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'te Mapping görüntüleri incelendiğinde; elementlerin malzeme yapısına homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.

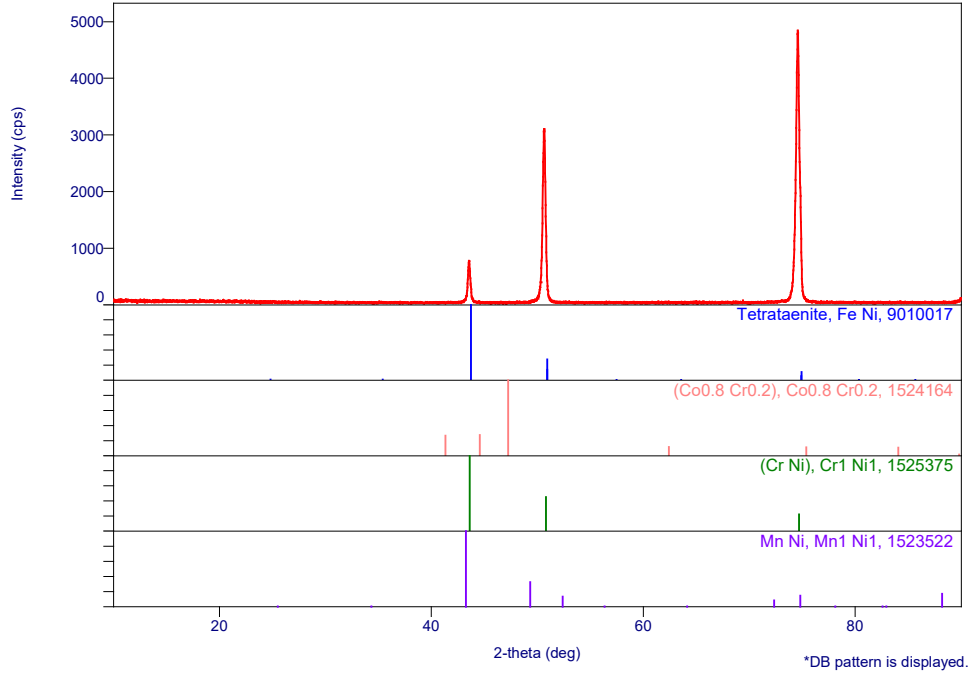


Şekil 3.3. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ bileşiğine sahip K1 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.4. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ K1 Numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

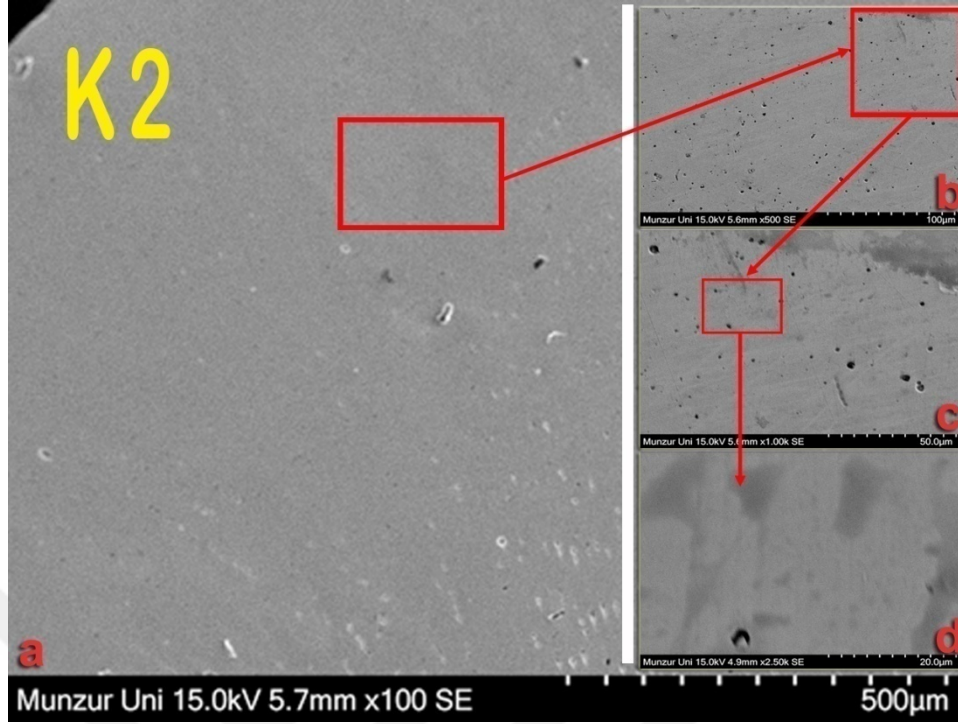
K1 numunesinden aldığımız XRD analizini incelediğimizde; büyük piklere karşılık gelen FeNi, CrNi bileşiklerinin 42.4° ve 51.4° 'de yer alarak birleşik oluşturduğu CoCr ve MnNi bileşiklerinin ise 44.7° ile 44.2° 'lerde küçük pikler şeklinde yer aldığı Şekil 3.5'te görülmüştür. YEA'nın esas piki olarak 74.59° 'da meydana gelen ve bütün bileşiklerin karşılayan esas pik olduğu görülmüştür. K1 numunesine tam olarak karşılık gelen 74.59° 'da tespit ettiğimiz ve numune de oluşan bütün bileşiklerin o açıda görüldüğü pik olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.5. K1 numunesine ait XRD grafiği

3.2.2. K2 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

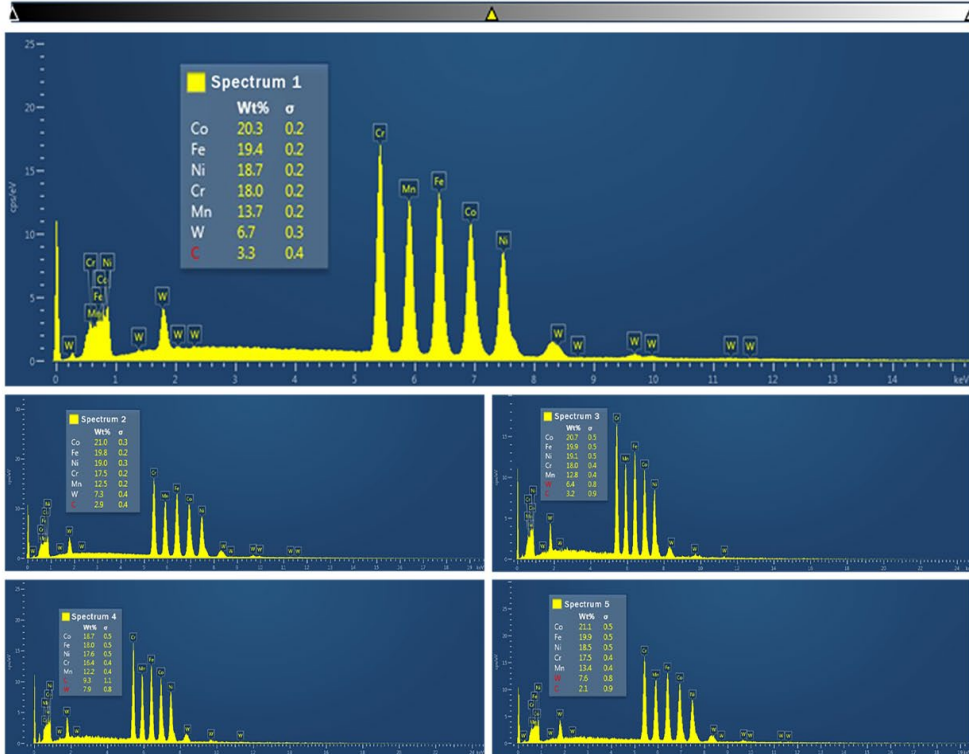
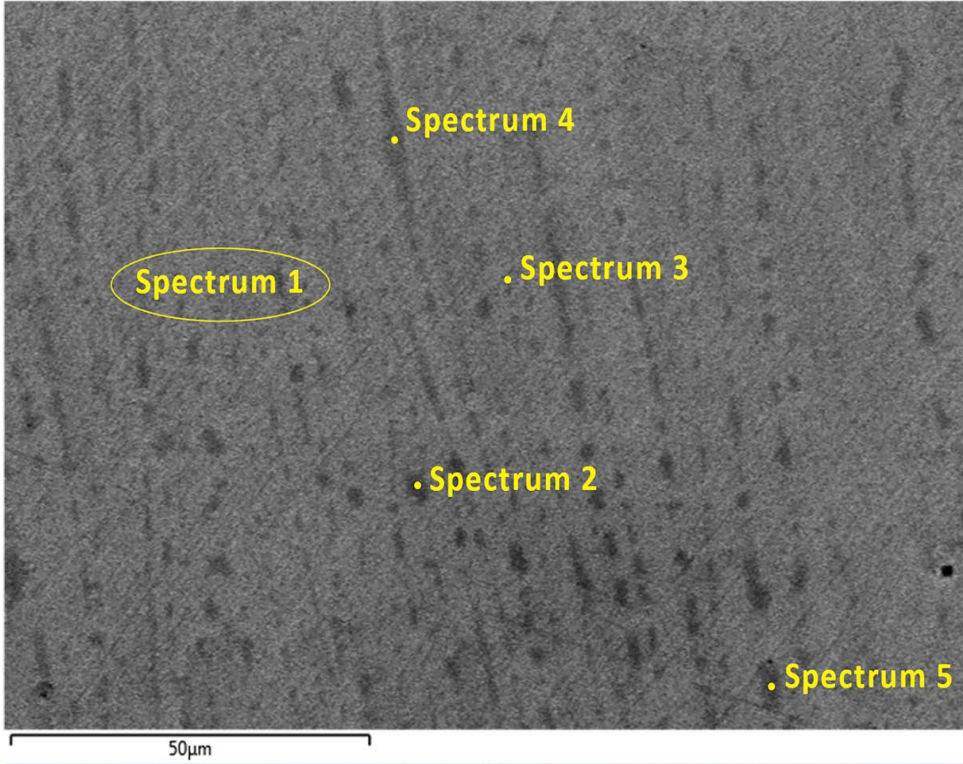
$\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$ numunesi için Şekil 3.6'da 100x, 500x, 1000x ve 2500x, büyütmelemlerle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir. K2 numunesine ait SEM görüntülerinde tane sınırları belirgin olmasa da, tane yapısının ince bir yapıda olduğu, malzemenin dış çeperine yaklaştıkça tane yapısının daha küçüldüğü görülmektedir.



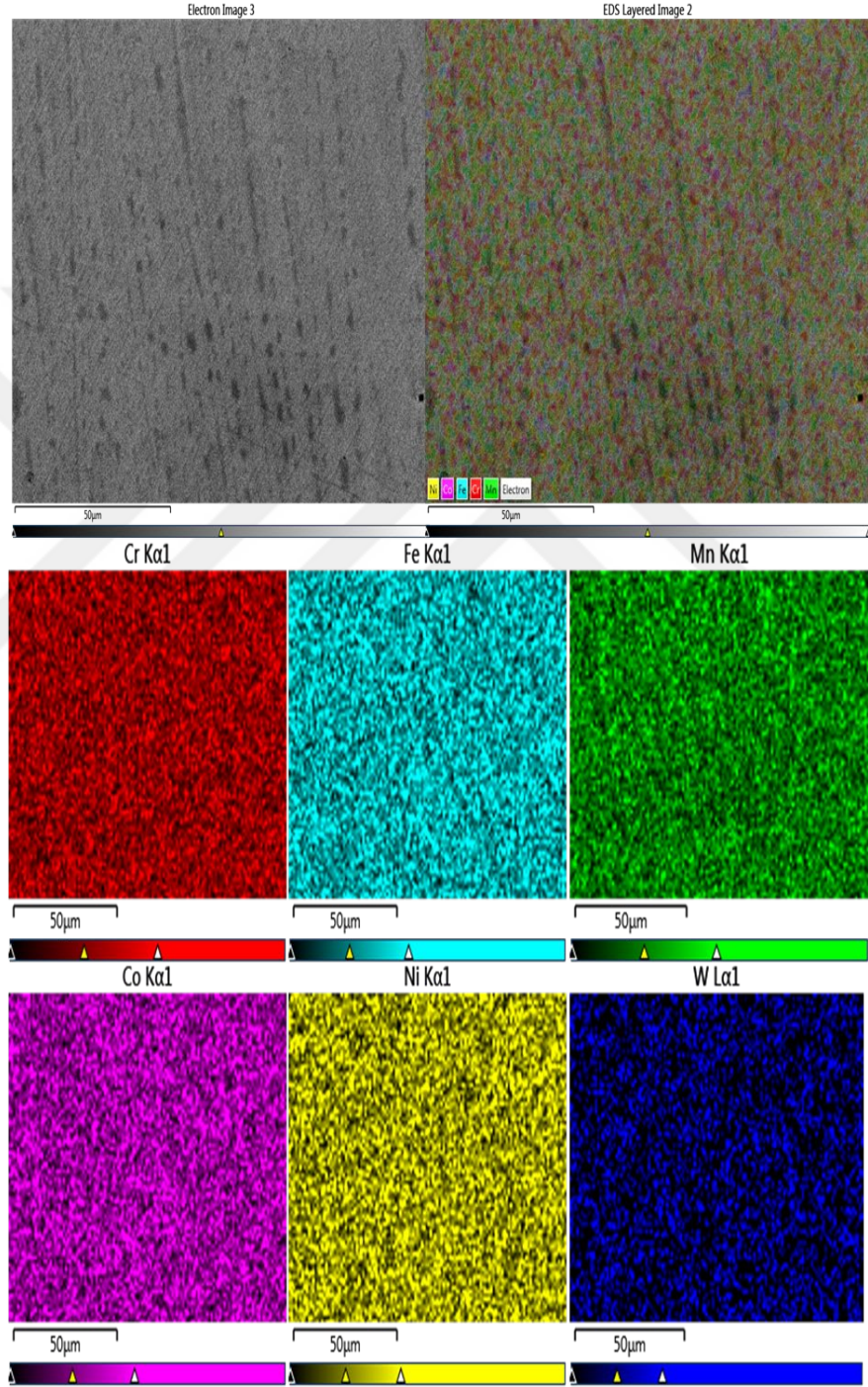
Şekil 3.6. K2 Numunesine ait farklı büyütmelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

%3 WC ilave ettiğimiz K2 numunesinden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütle ve hacimsel yüzdeleri Şekil 3.7’de verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütle ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$ YEA alaşımının %17,5Cr, %12,5Mn, %19,8Fe, %21,0Co, %19Ni, %7,3W ve %2,9C elementlerinin kütle dağılımını gösteren Şekil 3.7’de verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.8’de Mapping ve element dağılımı incelendiğinde malzemenin yapısı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

Electron Image 3

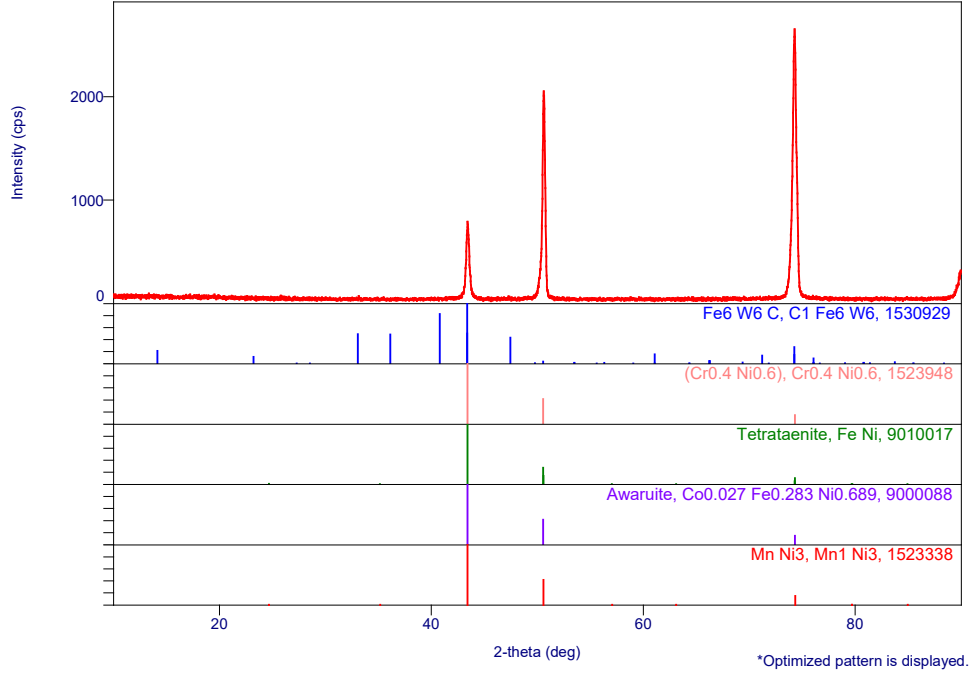


Şekil 3.7. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$ bileşiğine sahip K2 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.8. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$ K2 Numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

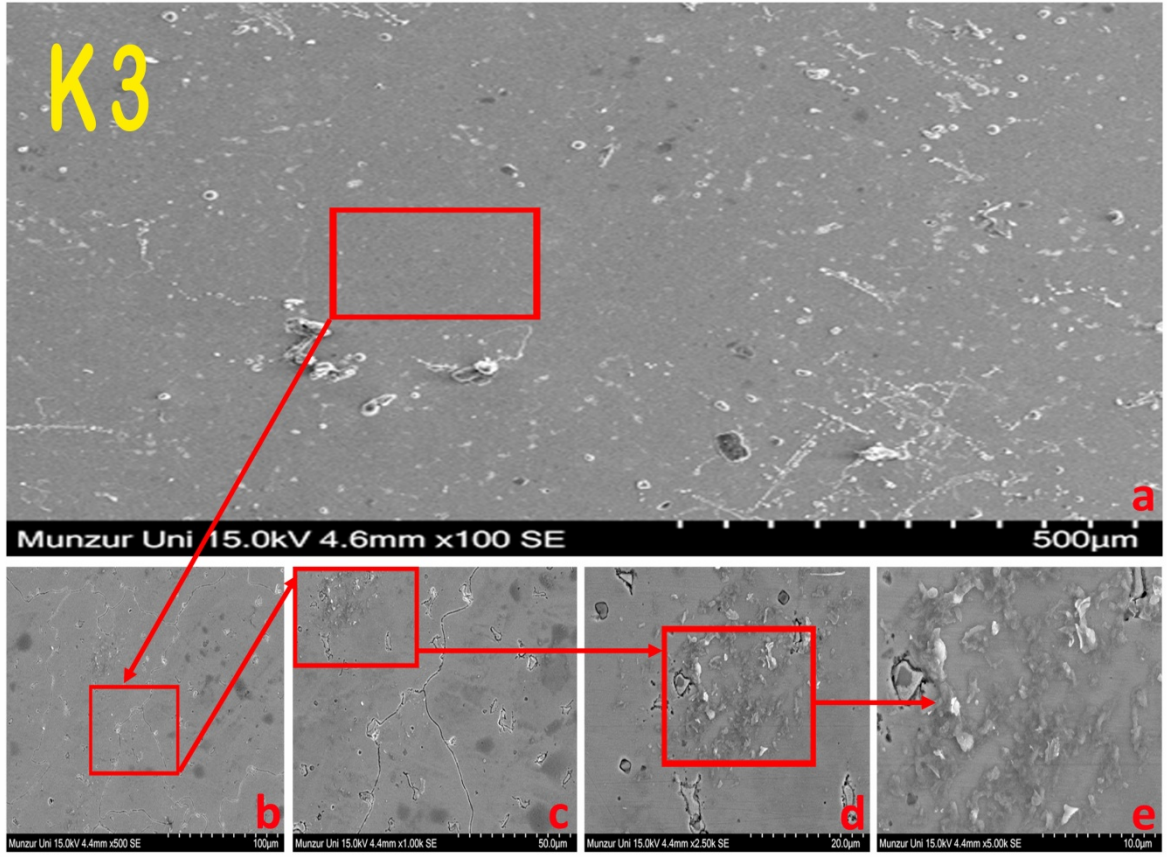
K2 numunesine ait XRD analizini Şekil 3.9'da incelediğimizde; büyük pik olarak tespit ettiğimiz üç pikin 43.39° , 50.58° ve 74.59° 2 theta açılarında oluşturduğu ve bu piklerin hepsinde Fe_6W_6C , $Cr_{0.4}Ni_{0.6}$, $FeNi$, $Co_{0.027}Fe_{0.28}Ni_{0.68}$, $MnNi_3$, bileşiklerini içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.9. K2 numunesine ait XRD grafiği

3.2.3. K3 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

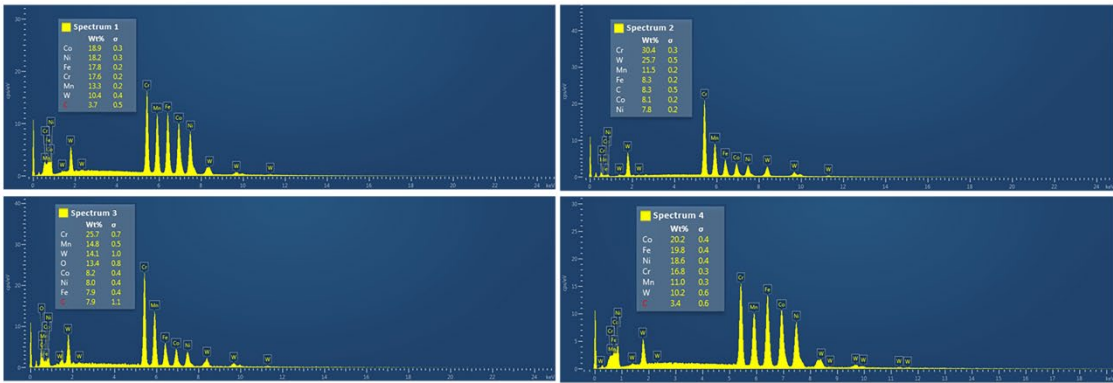
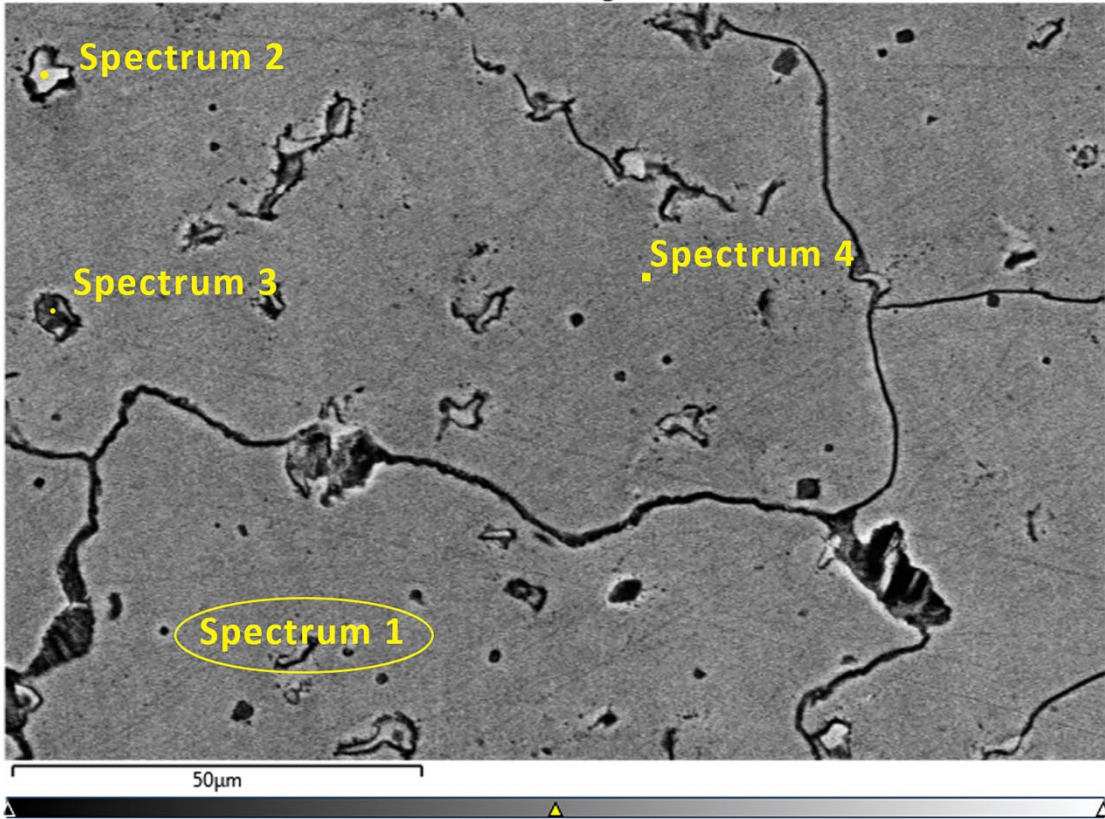
$Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ numunesi için Şekil 3.10'da 100x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütmelemlerle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.



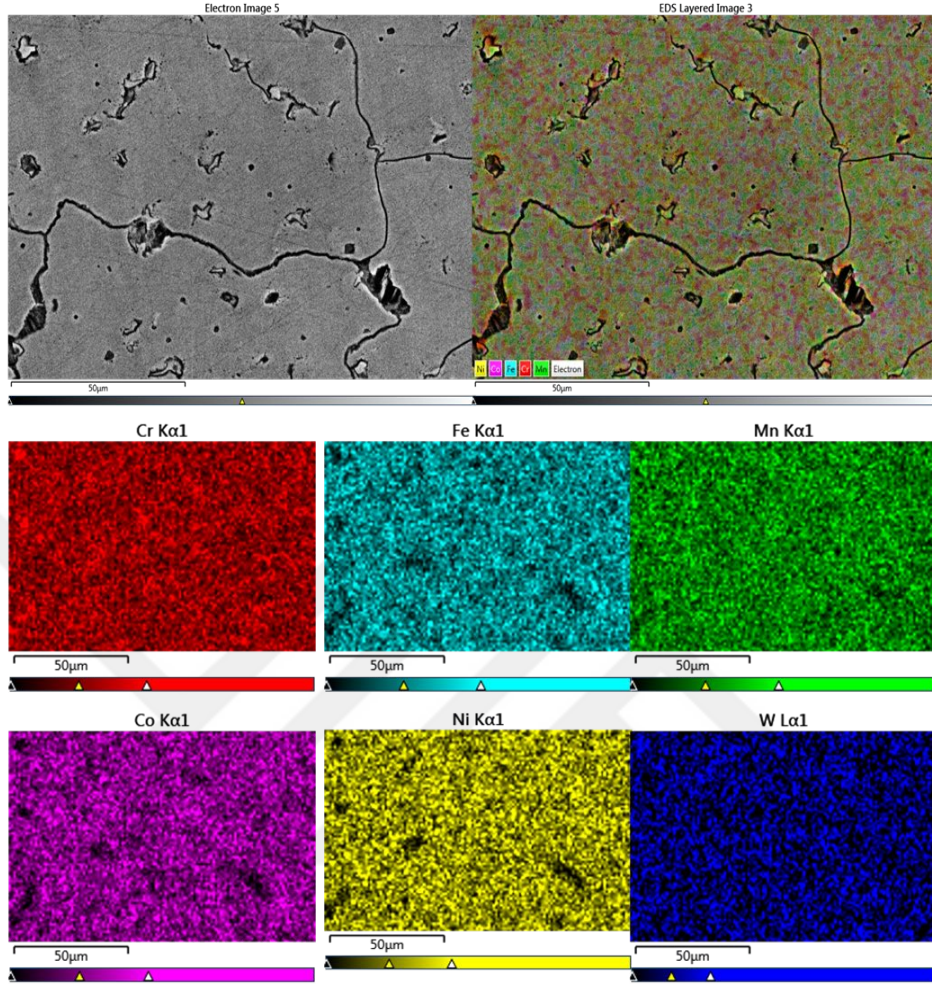
Şekil 3.10. K3 numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

Numuneden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütleli ve hacimsel yüzdeleri oranları Şekil 3.11’de verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütleli ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ YEA alaşımının %30,4Cr, %11,5Mn, %8,3Fe, %8,1Co, %7,8Ni, %25,7W ve %8,3C elementlerinin kütleli dağılımını gösteren Şekil 3.11’de verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.12’de Mapping görüntüleri incelendiğinde, elementlerin toz metalurjisi yöntemiyle karıştırılmasından kaynaklı yine homojen bir dağılım gözlemlenmiştir.

Electron Image 5

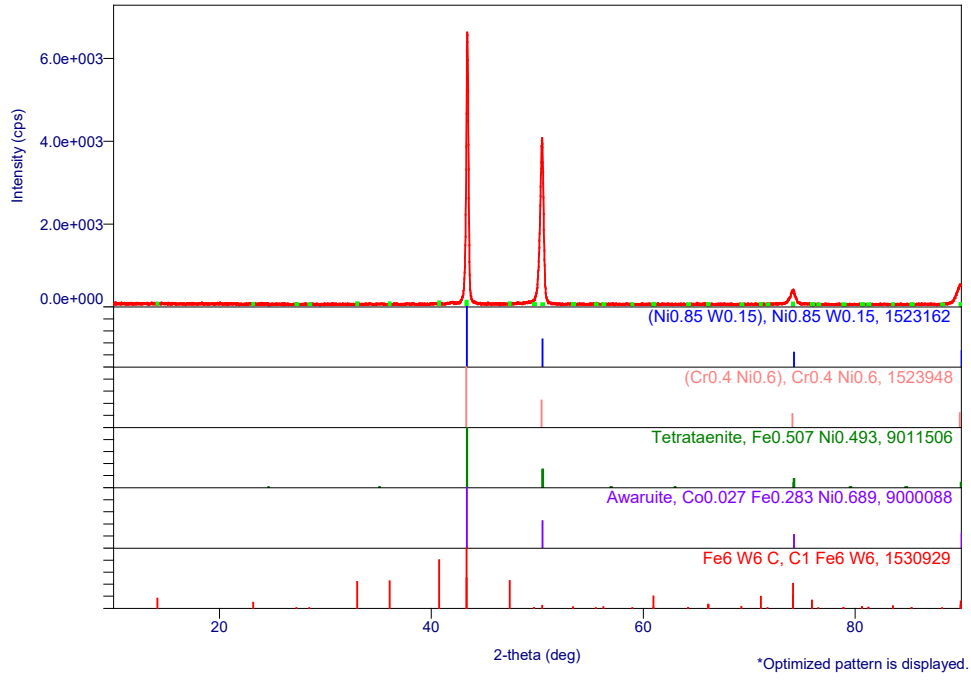


Şekil 3.11. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ bileşiğine sahip K3 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.12. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5K_3$ numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

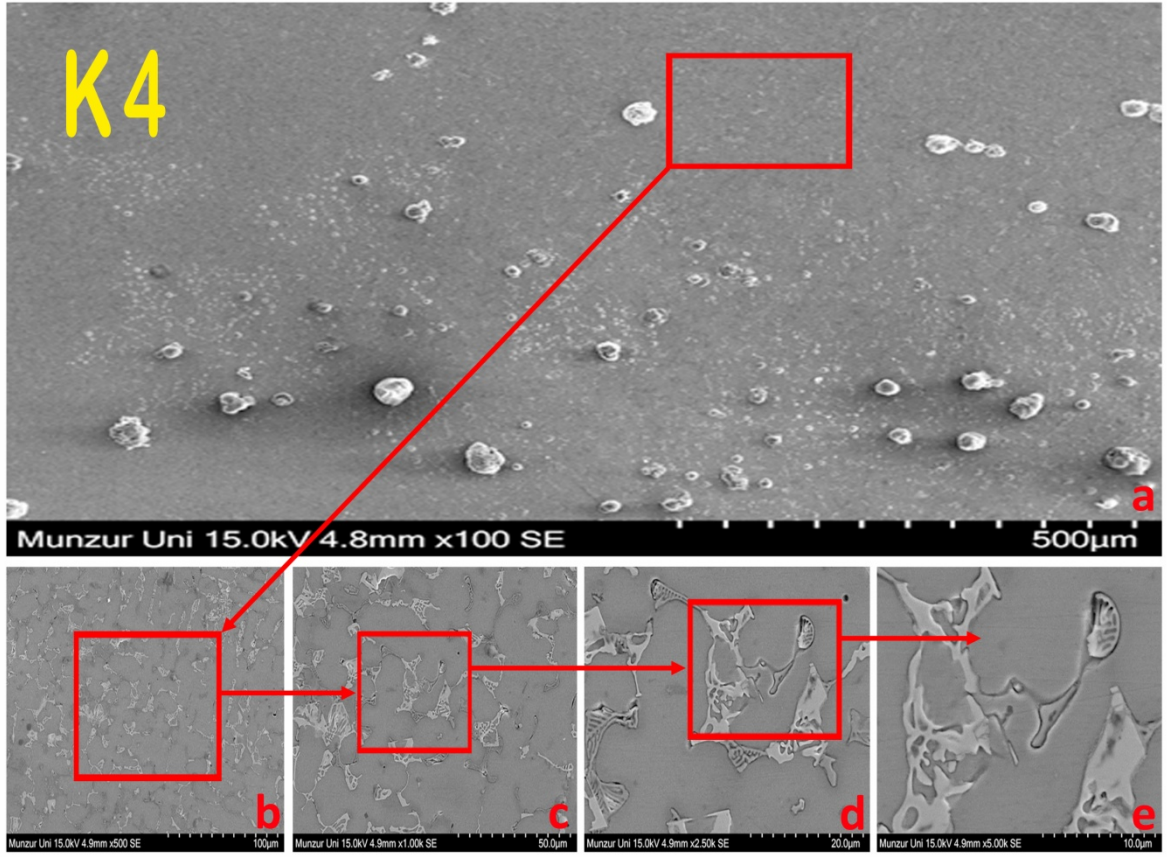
K3 numunesine ait XRD analizinde K2 numunesinde olduğu gibi oluşan bütün bileşikler 43.39° , 50.44° ve 74.29° lere görüldüğü özellikle %5 ilave ettiğimiz Tungsten karbürün Şekil 3.13'te $Ni_{0.85}W_{0.15}$, Fe_6W_6C , bileşikleri oluşturduğu, bunlarla birlikte $Cr_{0.4}Ni_{0.6}$, $FeNi$ ve $CoFeNi$ bileşikleri oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 3.13. K3 numunesine ait XRD grafiği

3.2.4. K4 No'lu Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

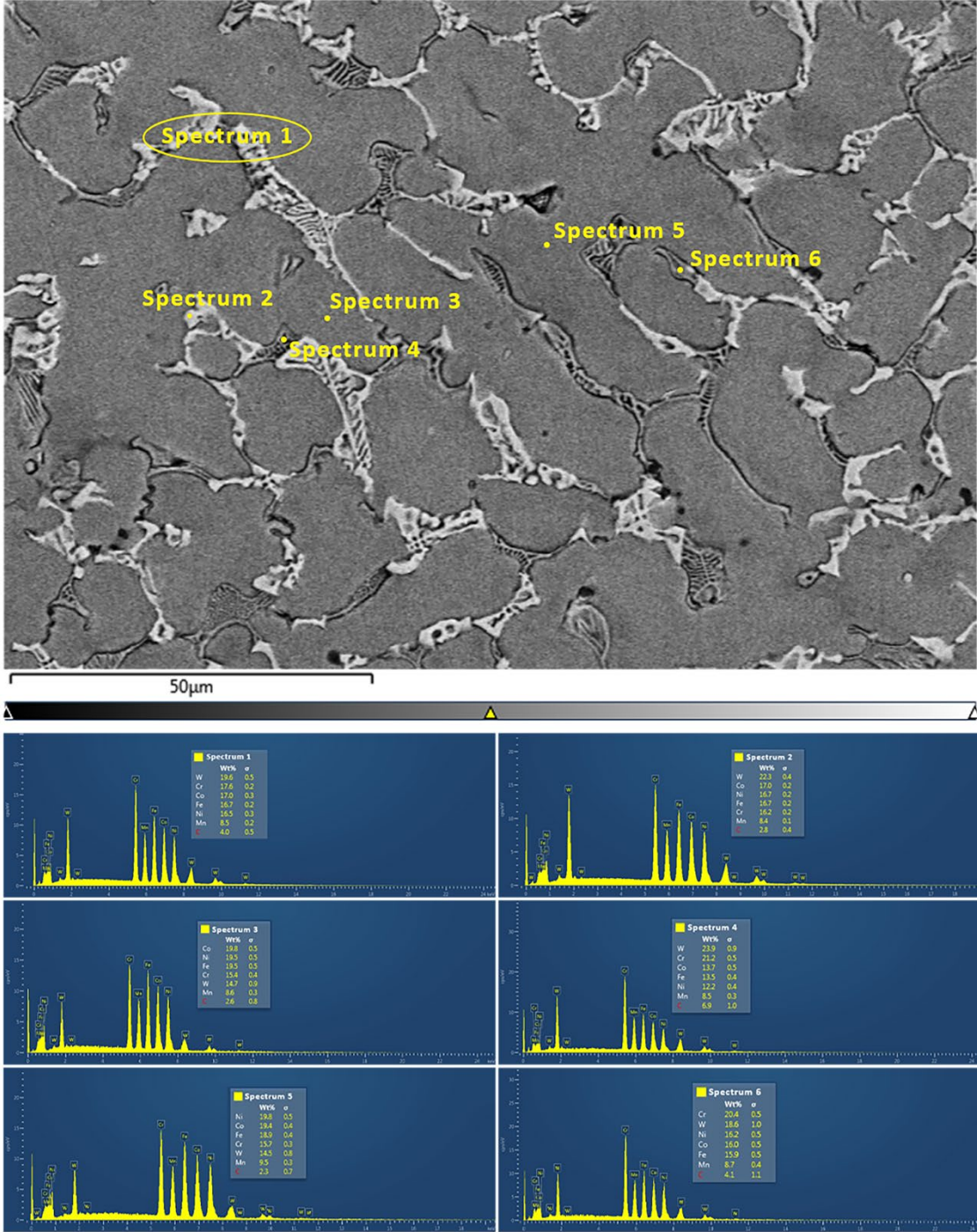
$\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ numunesi için Şekil 3.14'te 100x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütmelemlerle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.



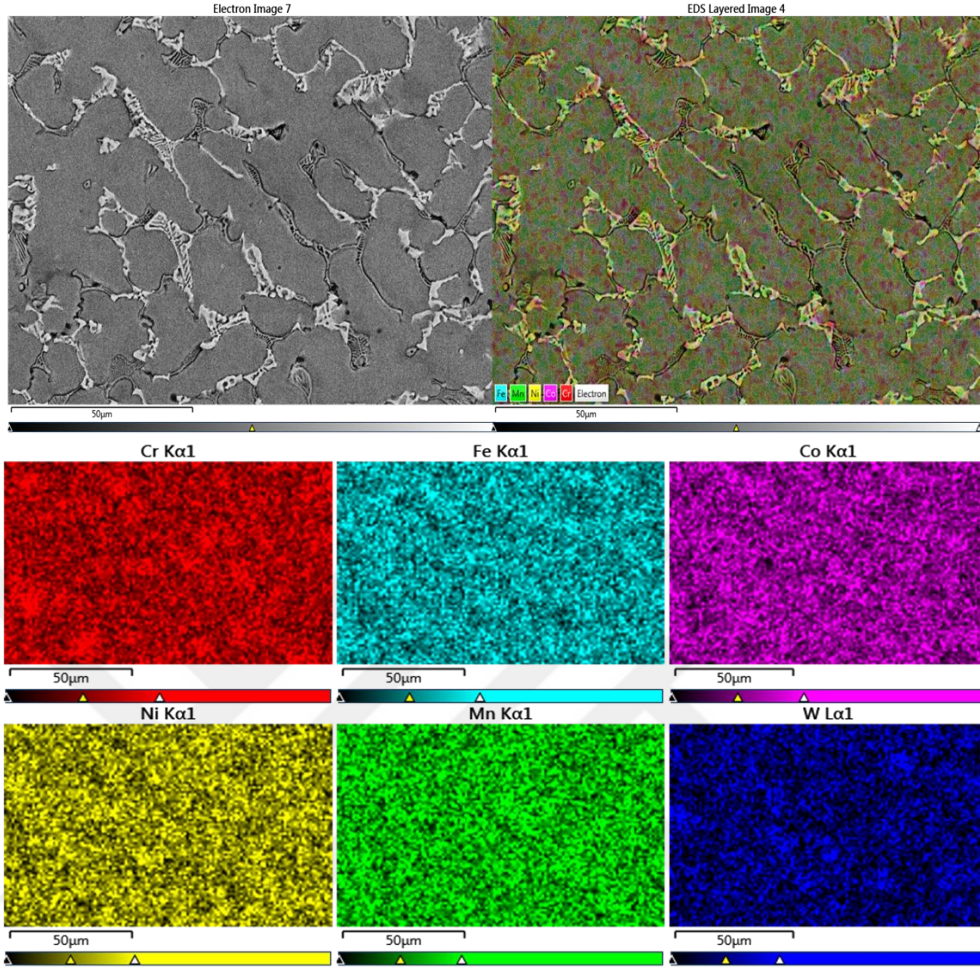
Şekil 3.14. K4 numunesine ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

K4 numunesinden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütleli ve hacimsel yüzdeleri oranları Şekil 3.15'te verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütleli ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{10}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_{10}$ YEA alaşımının %16,2Cr, %8,4Mn, %16,7Fe, %17,0Co, %16,7Ni, %22,3W ve %2,8C elementlerinin kütleli dağılımını gösteren Şekil 3.15'te verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.16'da verilen Mapping görüntülerinde bütün elementlerin homojen dağıldığı görülmektedir.

Electron Image 7

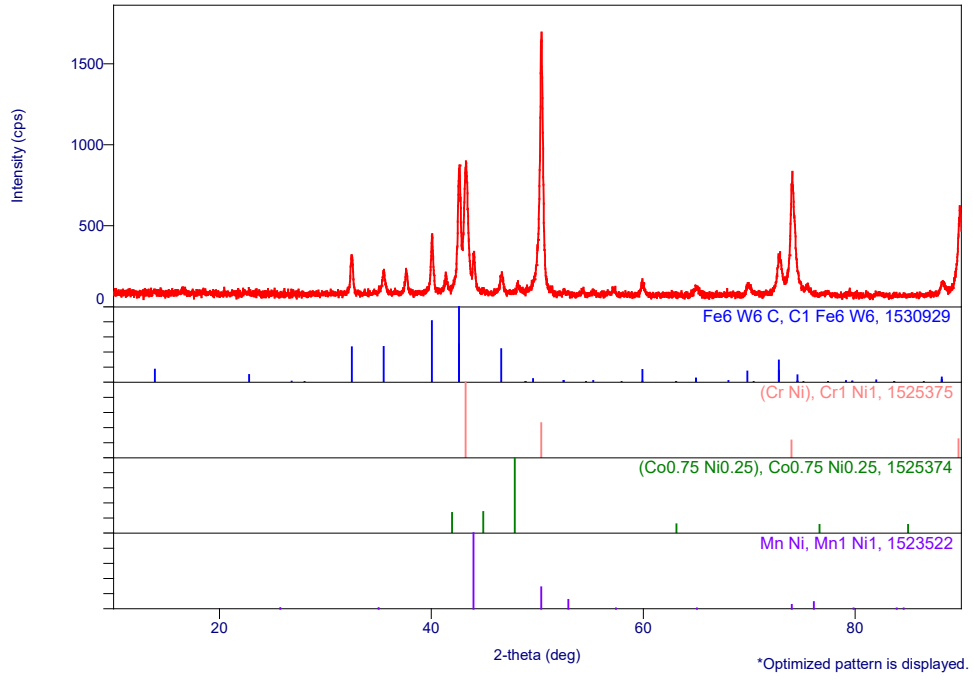


Şekil 3.15. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ bileşiğine sahip K4 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.16. $Cr_{20}Mn_{10}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_{10}$ K4 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

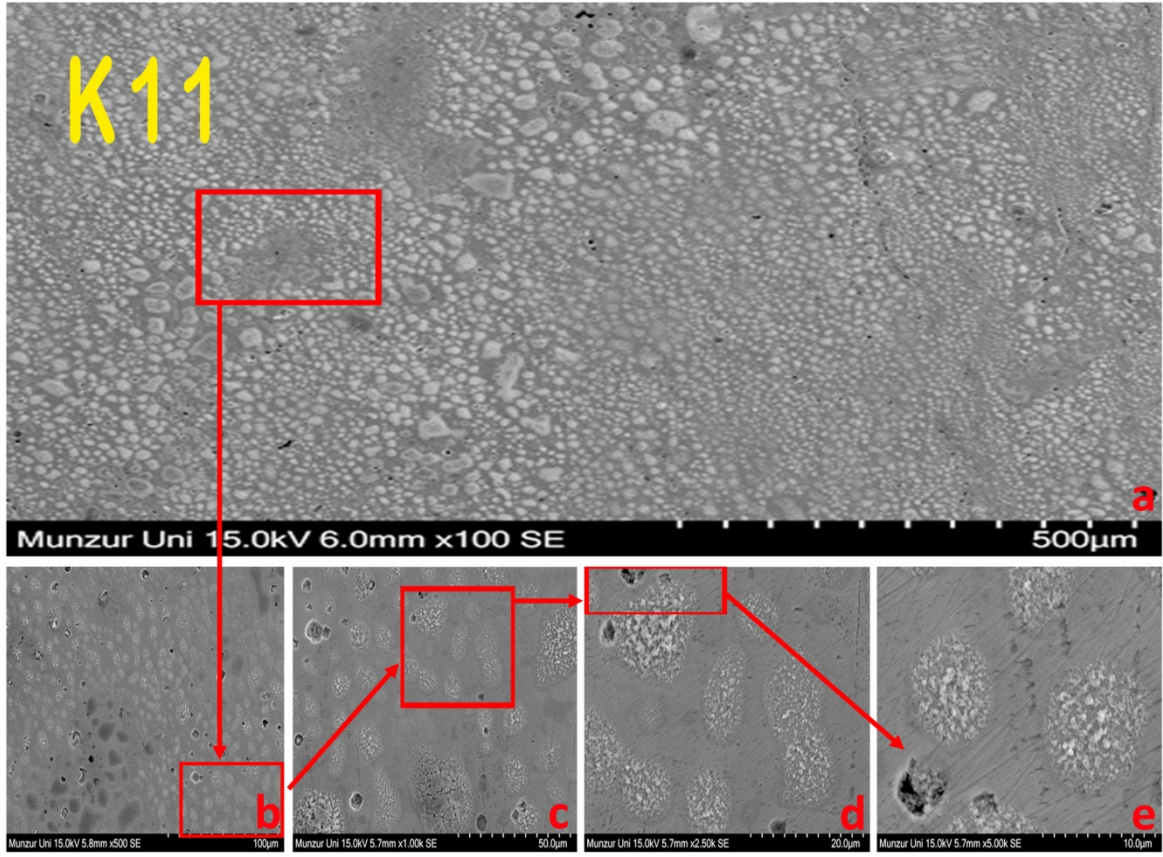
K4 numunesinin XRD analizini incelediğimizde; Tungsten karbür oranının %10 olduğu bu numuneye ait büyüklük küçüklük birçok pikin olduğu Şekil 3.17’de görülmektedir. Oluşan piklerin theta açılarında baktığımızda çoğunlukla Fe_6W_6C bileşiğine ait olan 32.46° , 37.61° , 41.40° , 42.58° , 43.21° , 46.63° , 50.37° , 69.91° , 72.79° , 74.03° ve 75.50° olduğu görülmektedir. Bileşik olarak ta Fe_6W_6C bileşiğinin yanı sıra $CrNi$, $MnNi$ ve $Co_{0,75}Ni_{0,75}$ bileşiklerinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.17. K4 numunesine ait XRD grafiği

3.2.5. K11 No'lu Isıl İşlemlenmiş Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

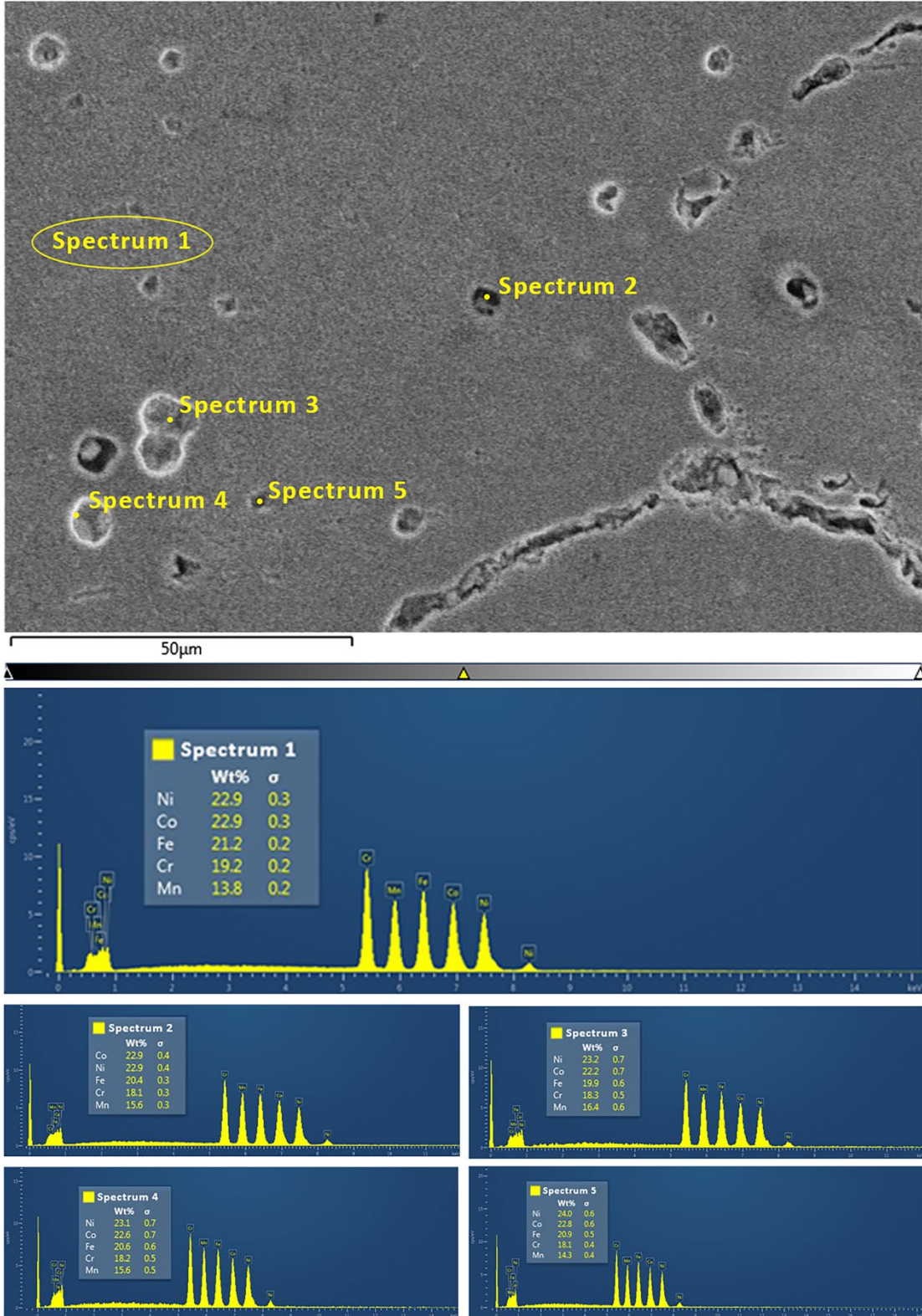
$\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ numunesi için Şekil 3.18'de 100x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütmeyle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.



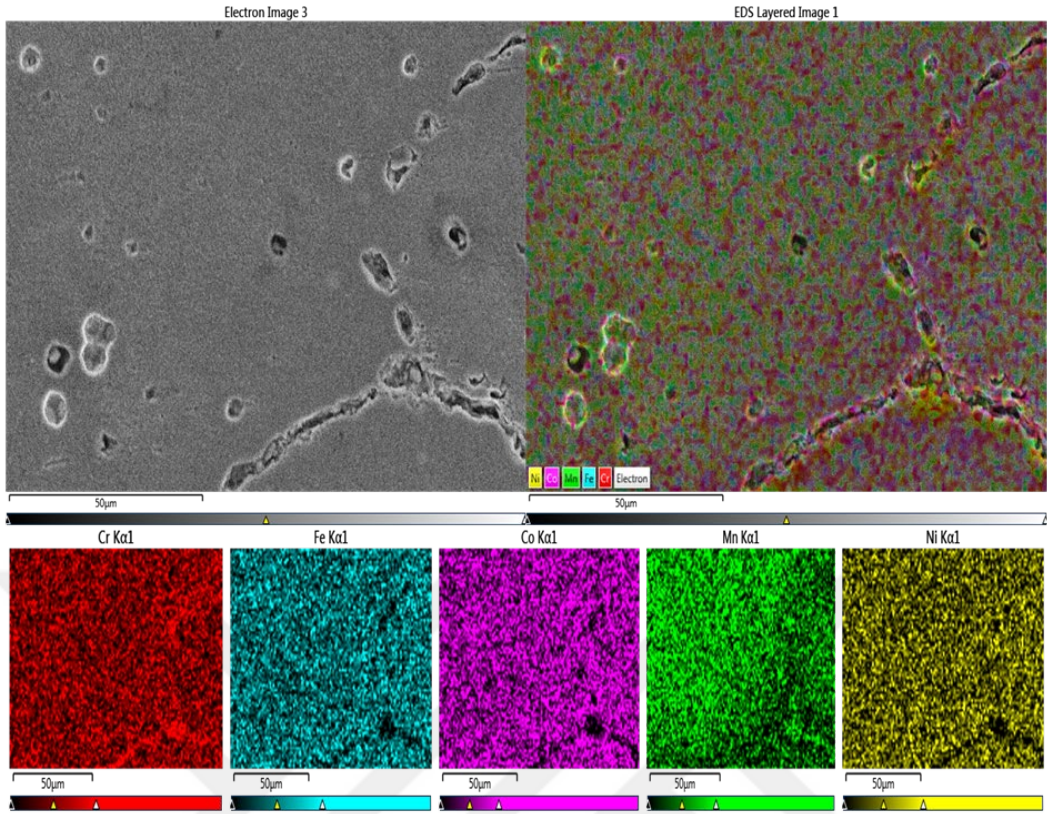
Şekil 3.18. K11 ısıtılmış numuneye ait farklı büyütme ölçeklerindeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

Isıl işlem uyguladığımız K11 numunesinden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütle ve hacimsel yüzdeleri Şekil 3.19’da verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütle ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ YEA alaşımının %18,1Cr, %15,6Mn, %20,4Fe, %22,9Co ve %22,9Ni elementlerinin kütle dağılımını gösteren Şekil 3.19’da verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.20’de Mapping görüntülerini incelediğimizde özellikle Cr ve Mn in tane sınırlarına yöneldiği görülmüştür.

Electron Image 3

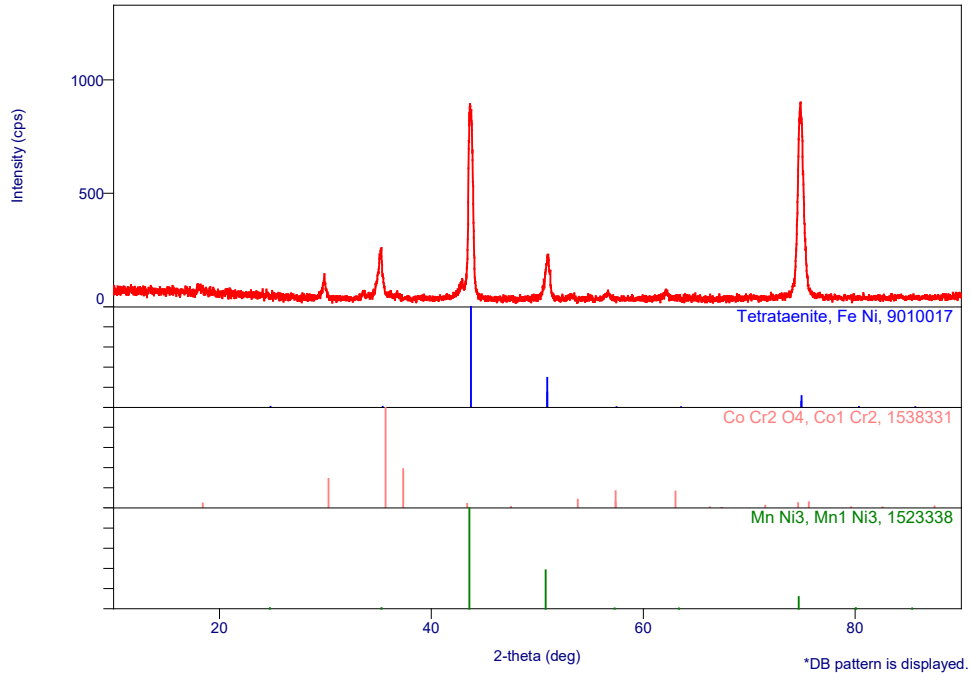


Şekil 3.19. $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$ bileşiğine sahip K11 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.20. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ K11 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

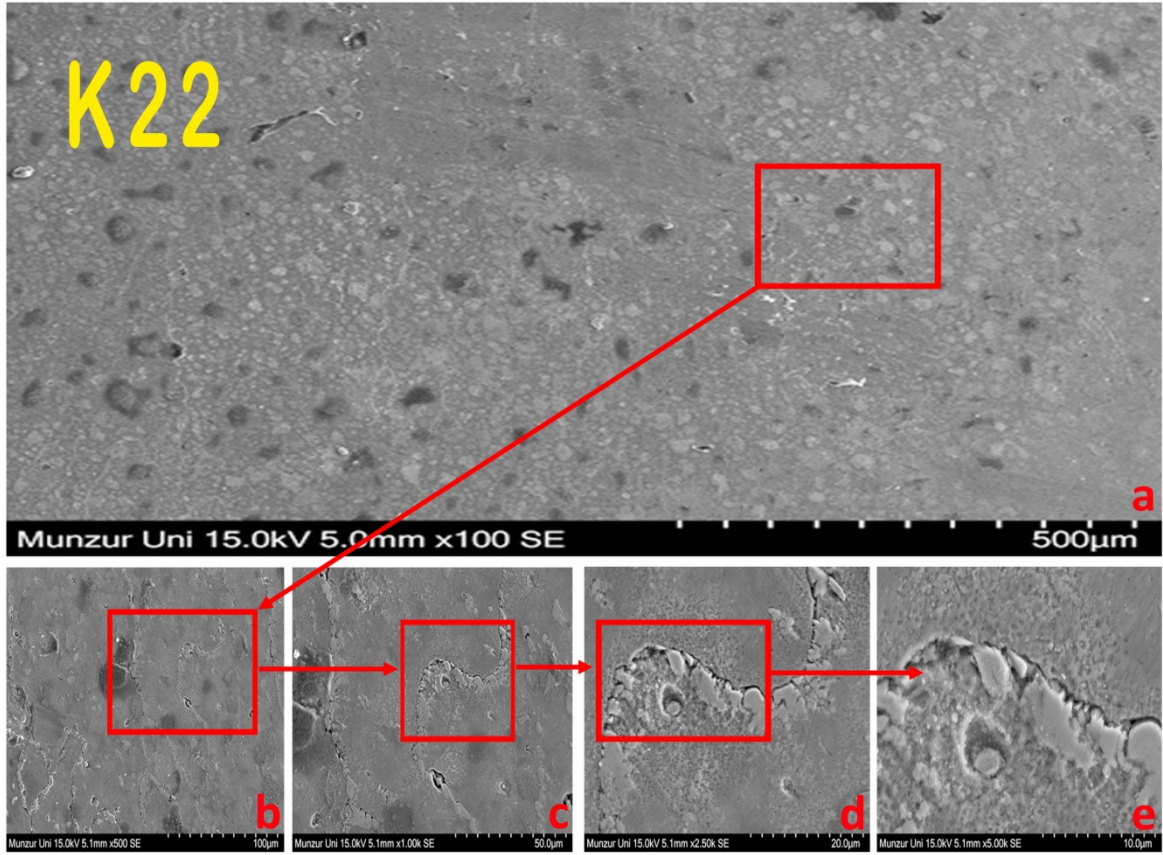
Isıl işlem uyguladığımız ve Tungsten karbür içermeyen K11 numunesine ait XRD analizini Şekil 3.21'i incelediğimizde; FeNi , CoCr_2O_4 ve MnNi_3 bileşiklerinin olduğu FeNi ve MnNi_3 bileşiklerinin 43.54° , 43.76° , 51.04° ve 74.74° theta açılarında oluşurken CoCr_2 bileşiğinin 33.54° ve 35.25° 'lerde pik oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 3.21. K11 ısıtılmış numuneye ait XRD grafiği

3.2.6. K22 No'lu Isıl İşlemli Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

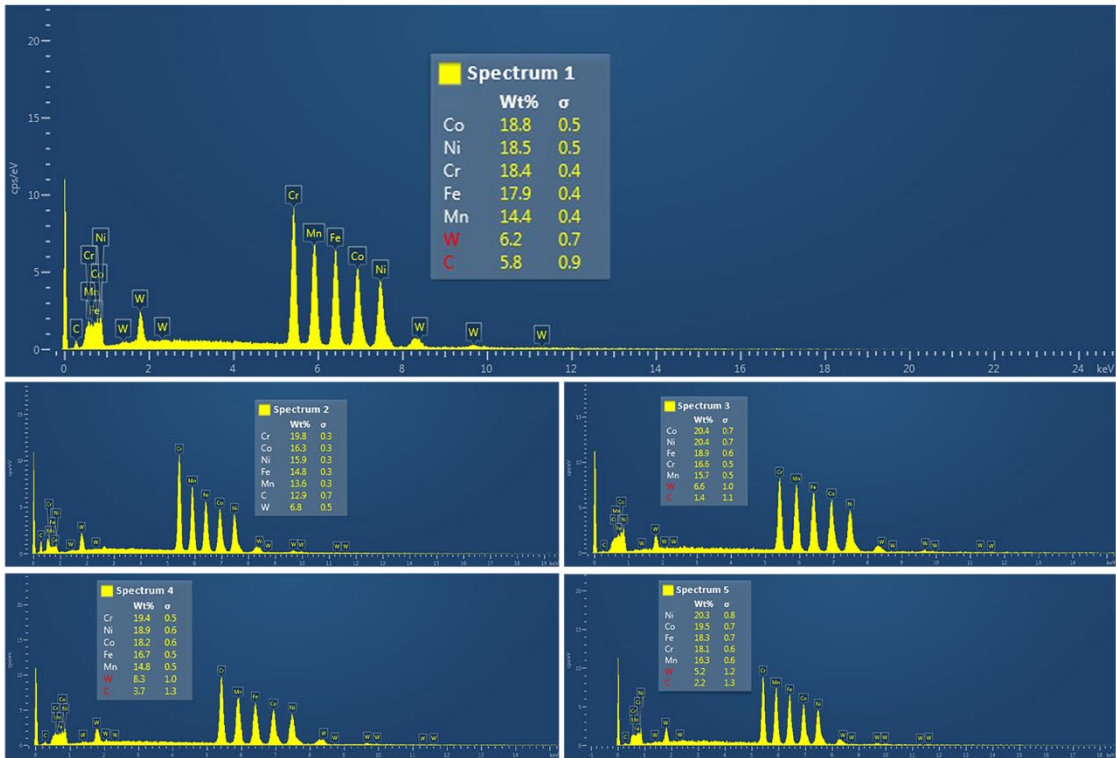
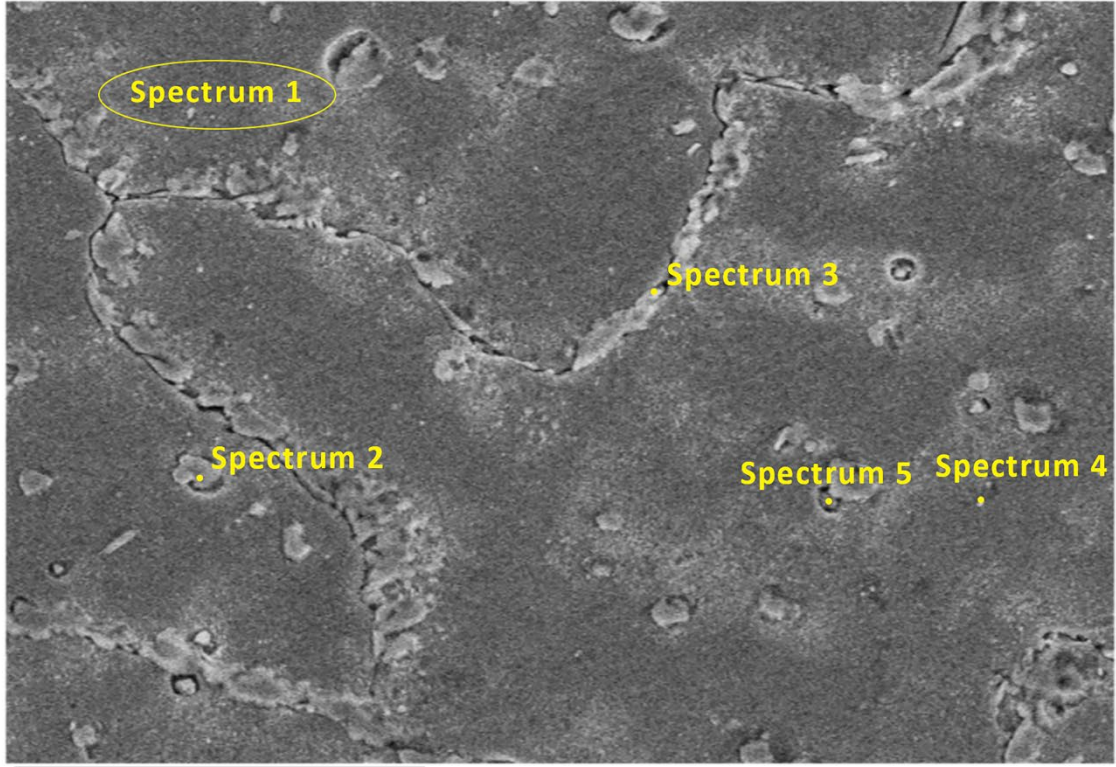
$\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_3$ numunesi için Şekil 3.22'de 100x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütmeyle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.



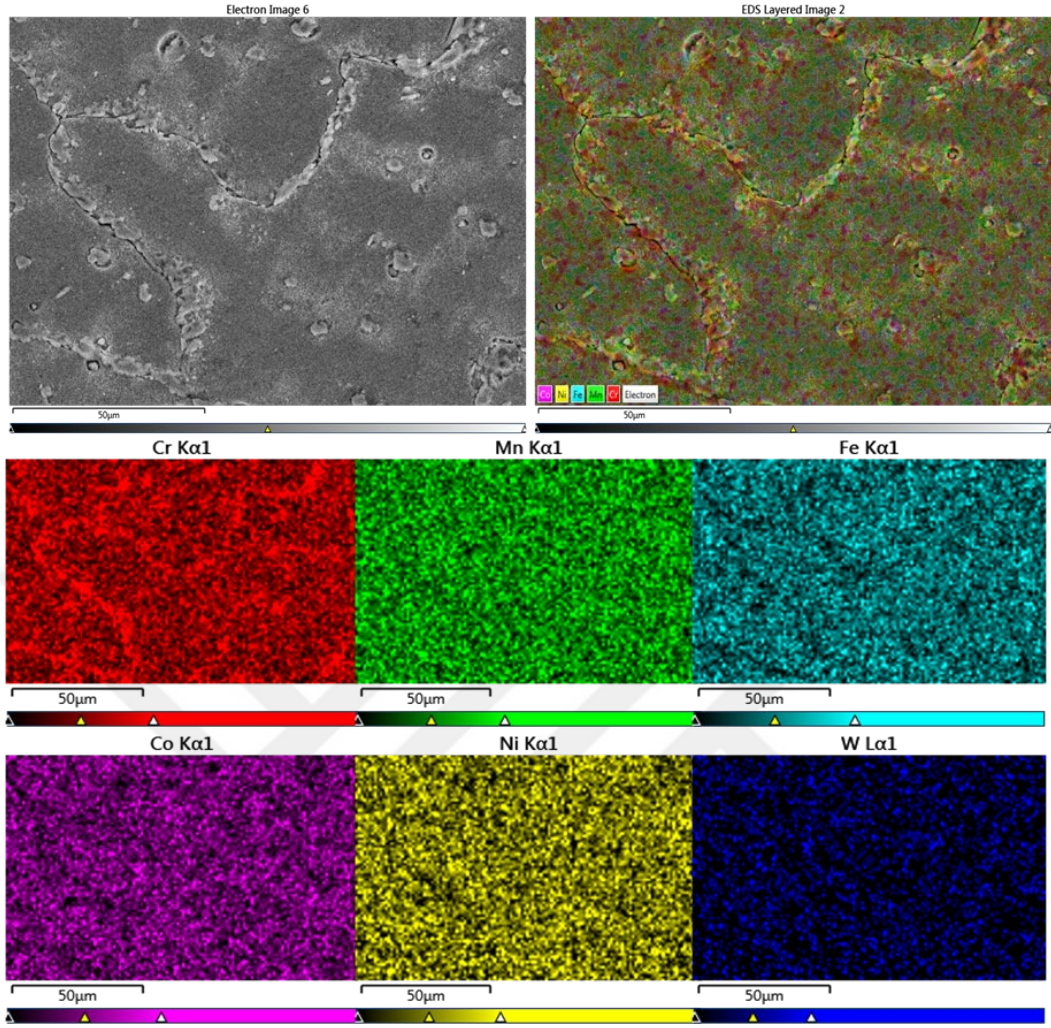
Şekil 3.22. K22 Isıl İşlemli Numuneyle ait farklı büyütmelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri.

Tungsten karbür ilave ettiğimiz ve ısıl işlem uyguladığımız K22 numunesinden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütleli ve hacimsel yüzdelik oranları Şekil 3.23'te verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütleli ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$ YEA alaşımının %19,8Cr, %13,6Mn, %14,8Fe, %16,3Co, %15,9Ni, %6,8W ve %12,9C elementlerinin kütleli dağılımını gösteren Şekil 3.23'te verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.24'te Mapping görüntüleri verilmiştir.

Electron Image 6

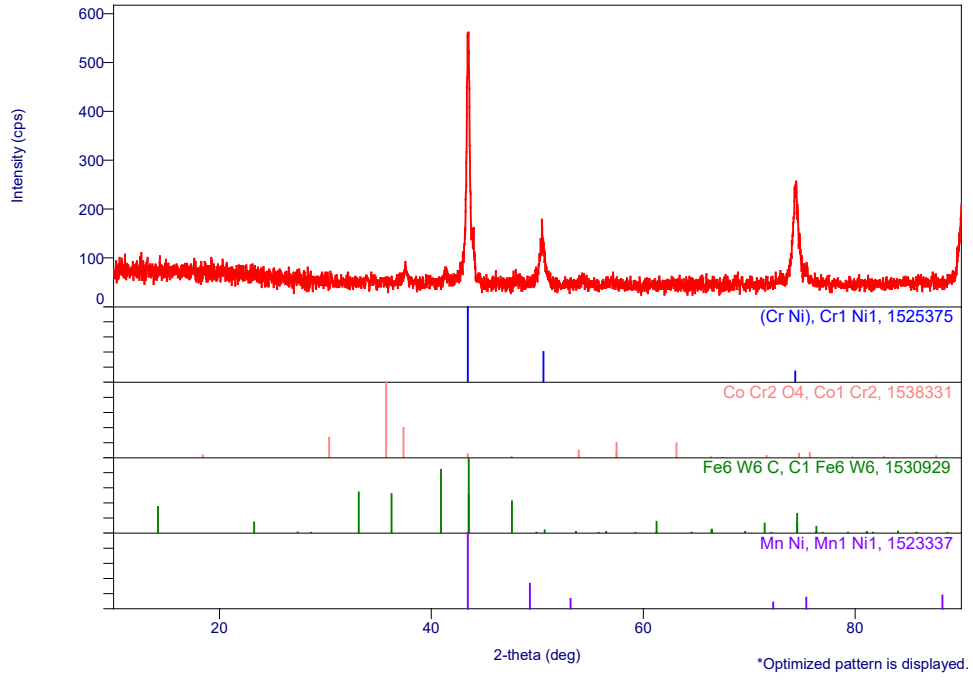


Şekil 3.23. $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$ bileşiğine sahip K22 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.24. $Cr_{20}Mn_{17}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_3$ K22 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

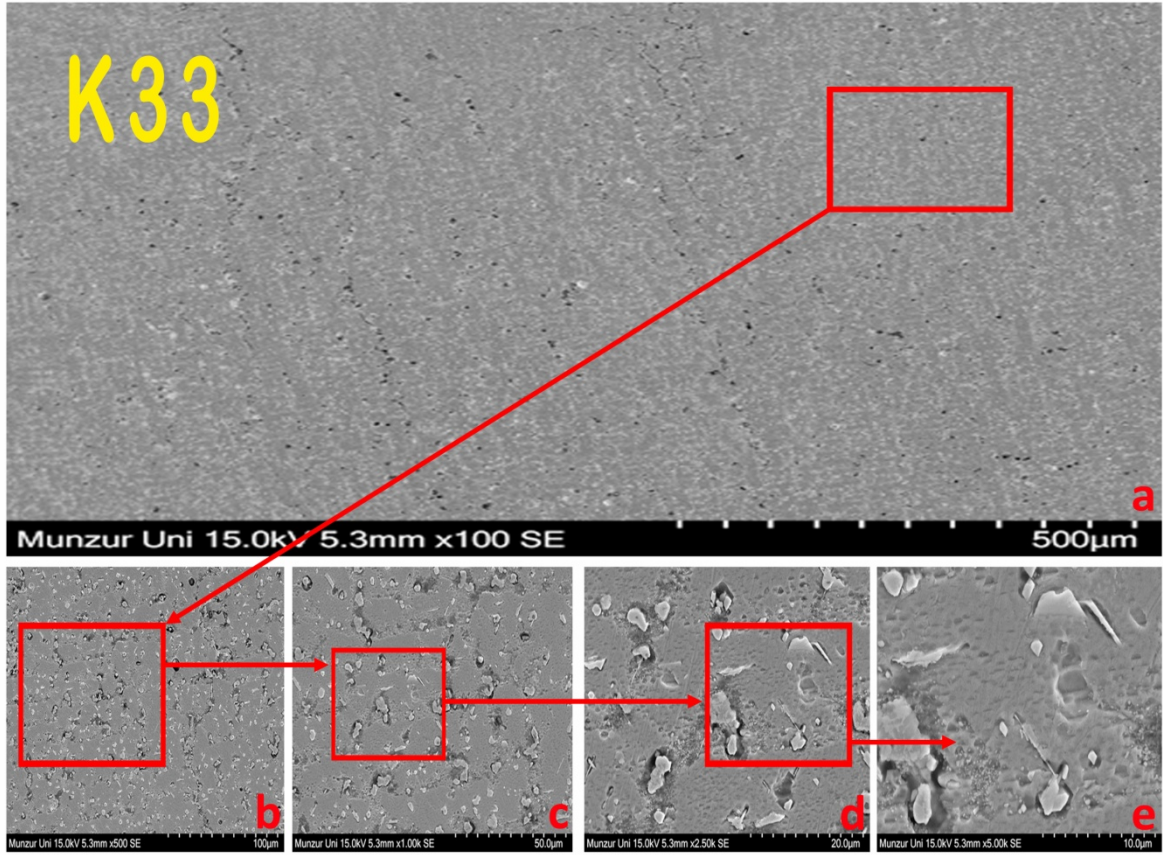
K22 numunesinin ısıtılma işlem uygulaması ve içeriğinde, %3 oranında Tungsten karbür bulundurması XRD analizinde her ne kadar küçük piklerin oluşmasına neden olsa da K22 numunesinde tespit ettiğimiz büyük pikler yine aynı derecelerde ve bileşiklere sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.25'te bileşik olarak CrNi ve Fe_6W_6C bileşiği 43.43° , 50.45° ve 74.35° theta açılarına karşılık gelmektedir.



Şekil 3.25. K22 ısıtılmış numuneye ait XRD grafiği

3.2.7. K33 No'lu Isıl İşlemli Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

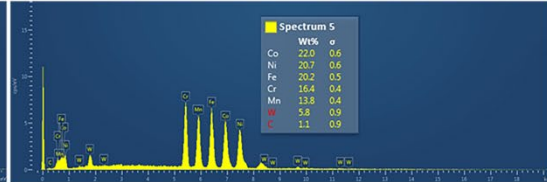
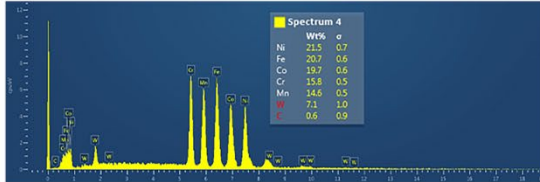
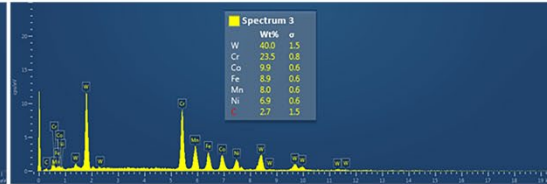
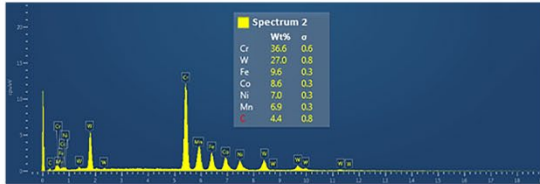
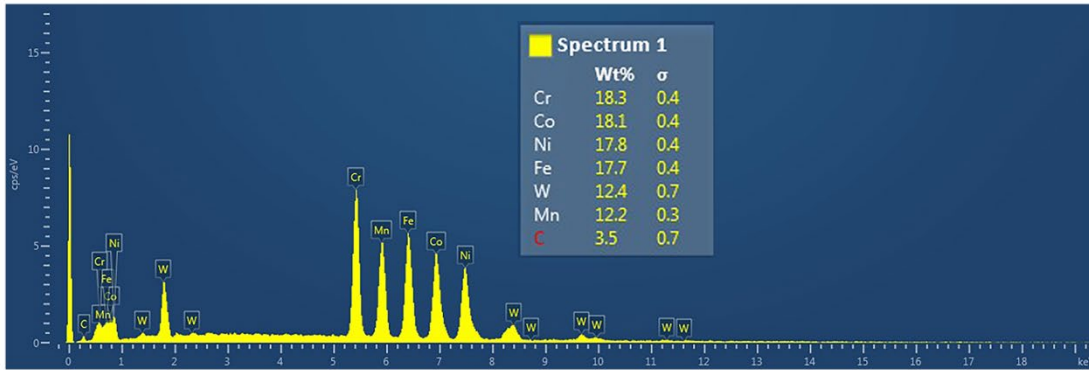
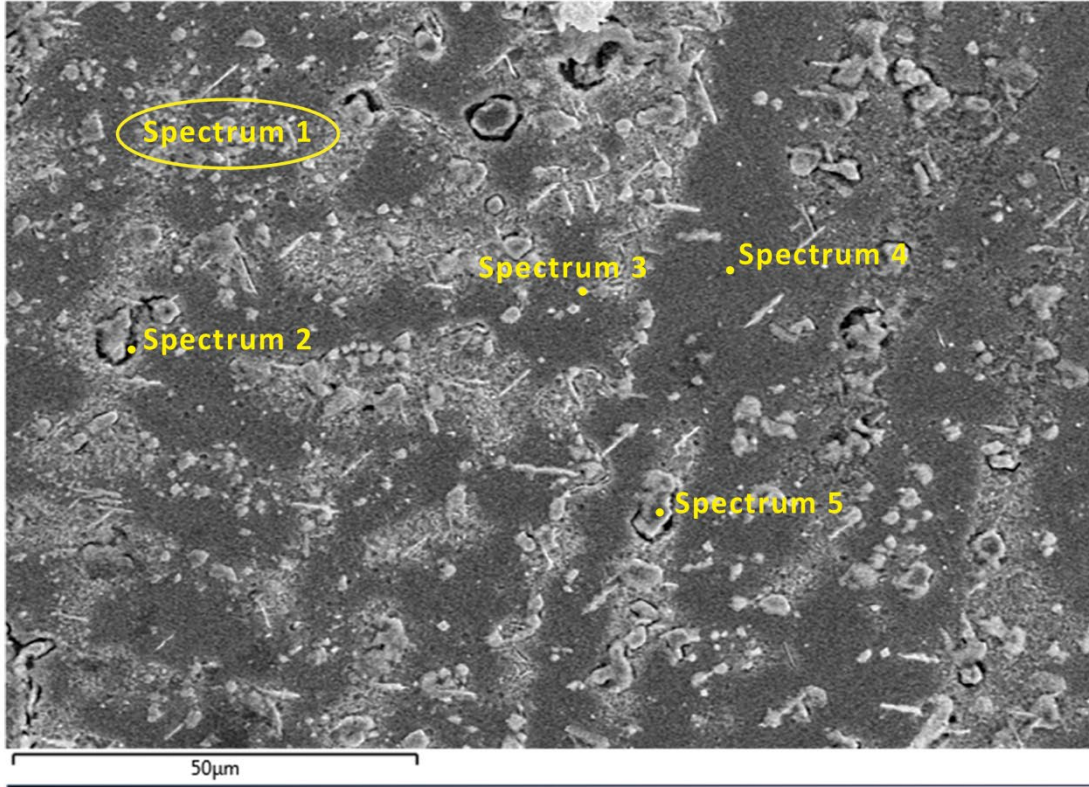
$\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_5$ numunesi için Şekil 3.26'da 100x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütmelemlerle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.



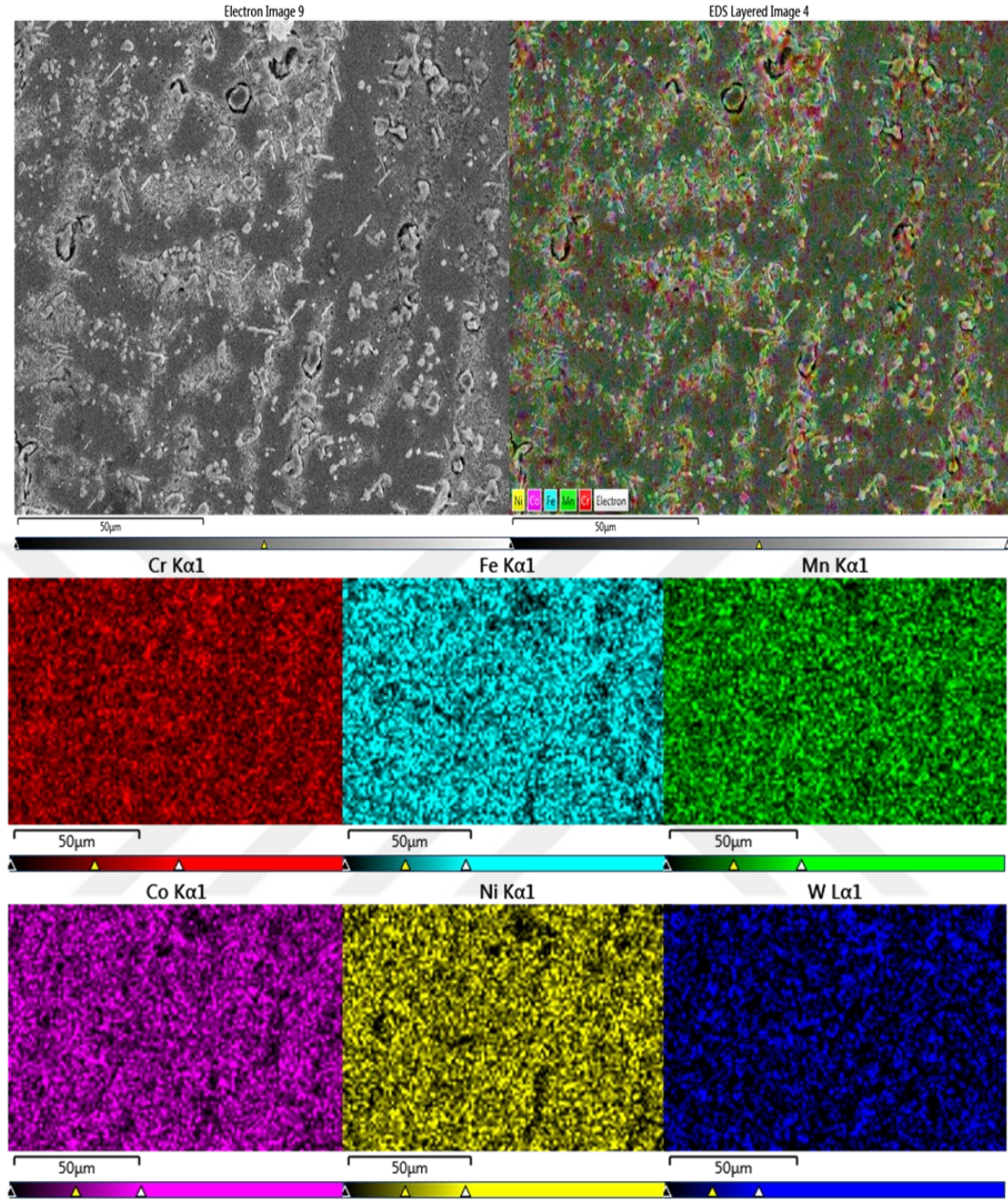
Şekil 3.26. K33 Isıl İşlemlili Numuneye ait farklı büyütmelelerdeki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

Numuneden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütle ve hacimsel yüzdeleri oranları Şekil 3.27’de verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütle ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ YEA alaşımının %36,6Cr, %6,9Mn, %9,6Fe, %8,6Co, %7,0Ni, %27,0W ve %4,4C elementlerinin kütle dağılımını gösteren Şekil 3.27’de verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.28’de numuneden alınan Mapping görüntülerinde düzenli bir dağılım görülmüştür.

Electron Image 9

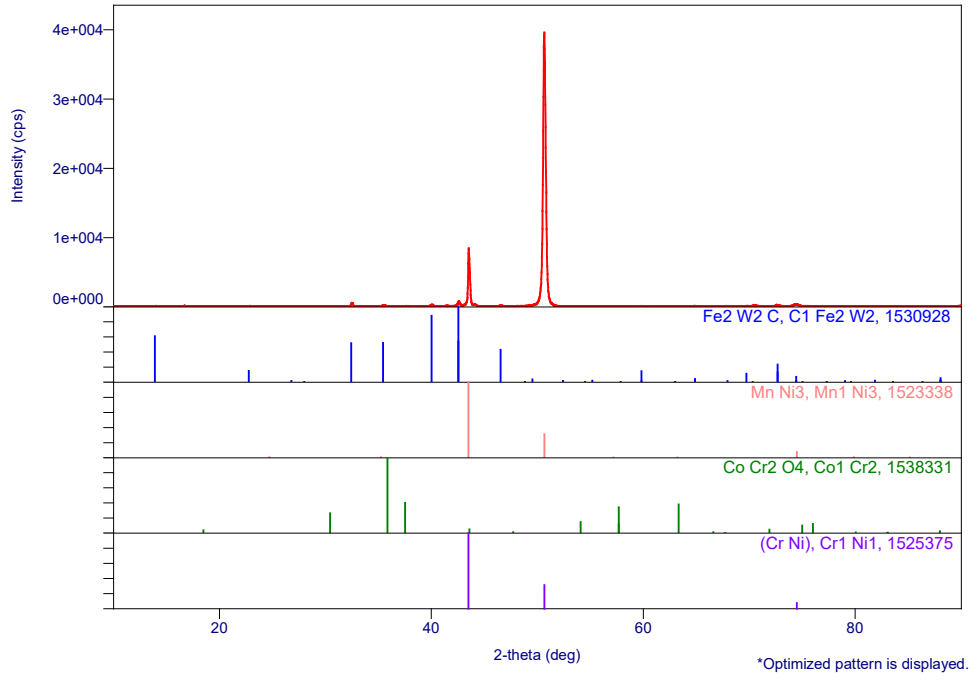


Şekil 3.27. $Cr_{20}Mn_{15}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_5$ bileşiğine sahip K33 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.28. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_5$ K33 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

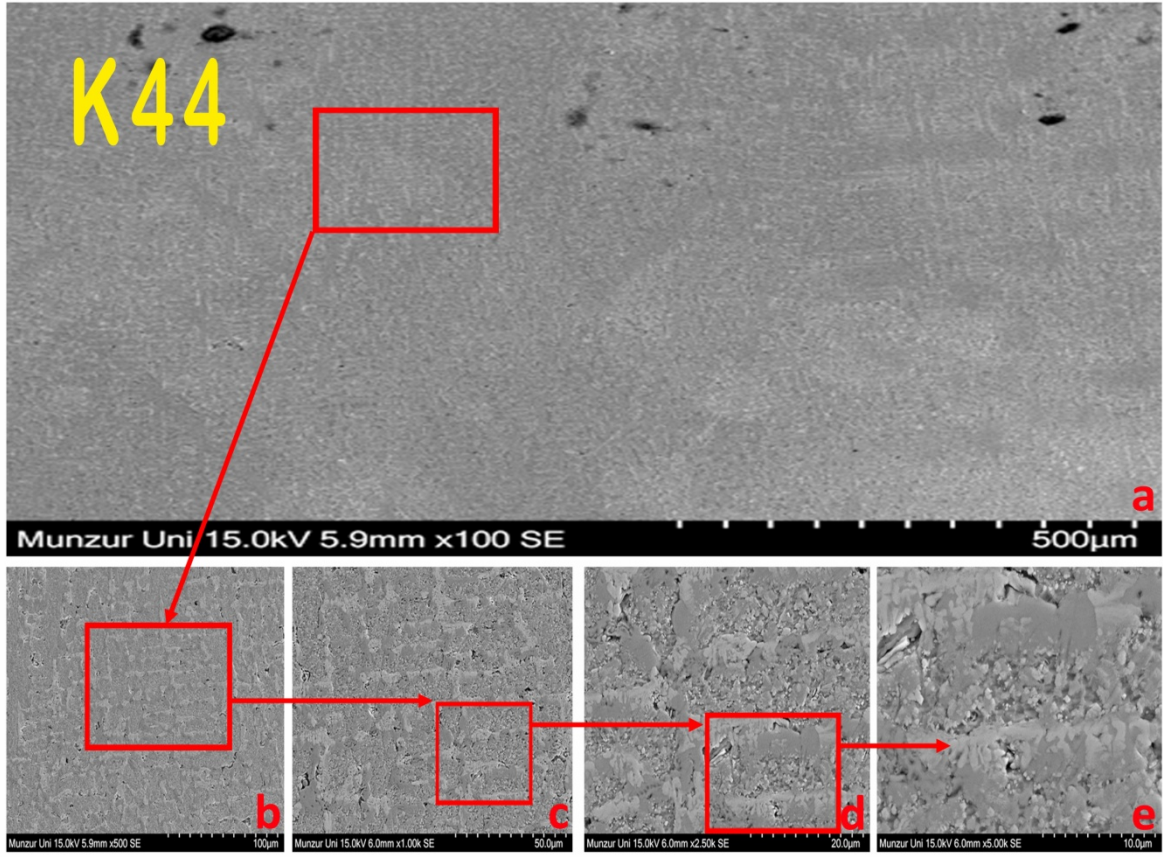
Isıl işlem uyguladığımız %5 Tungsten karbür içerikli K33 numunesinin XRD analizini Şekil 3.29’da incelediğimizde; bileşik olarak $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$, $\text{MnNi}_3\text{CoCr}_2\text{O}_4$ ve CrNi bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. İki büyük pikin oluştuğu analizde 43.51° ve 50.62° theta açılarında büyük pikler yer almıştır.



Şekil 3.29. K33 ısıtılmış numuneye ait XRD grafiği

3.2.8. K44 No'lu Isıl İşlemli Numunenin SEM/EDS ve XRD Analiz Sonucu

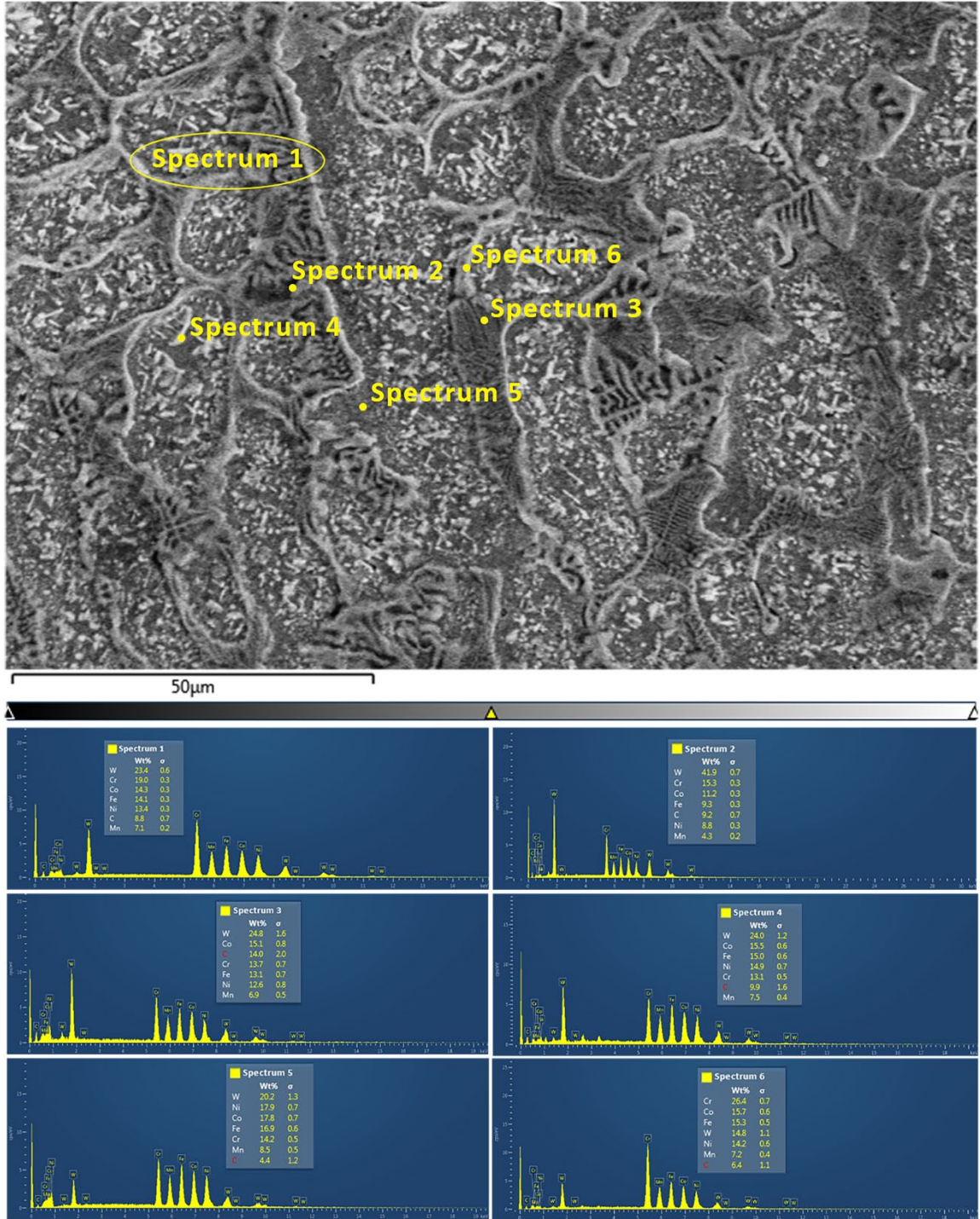
$\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ numunesi için Şekil 3.30'da 100x, 500x, 1000x, 2500x ve 5000x büyütmeyle alınmış olan SEM Mikroyapı analiz sonuçları verilmiştir. Numunenin tane yapısının korunduğu gözlemlenmiştir.



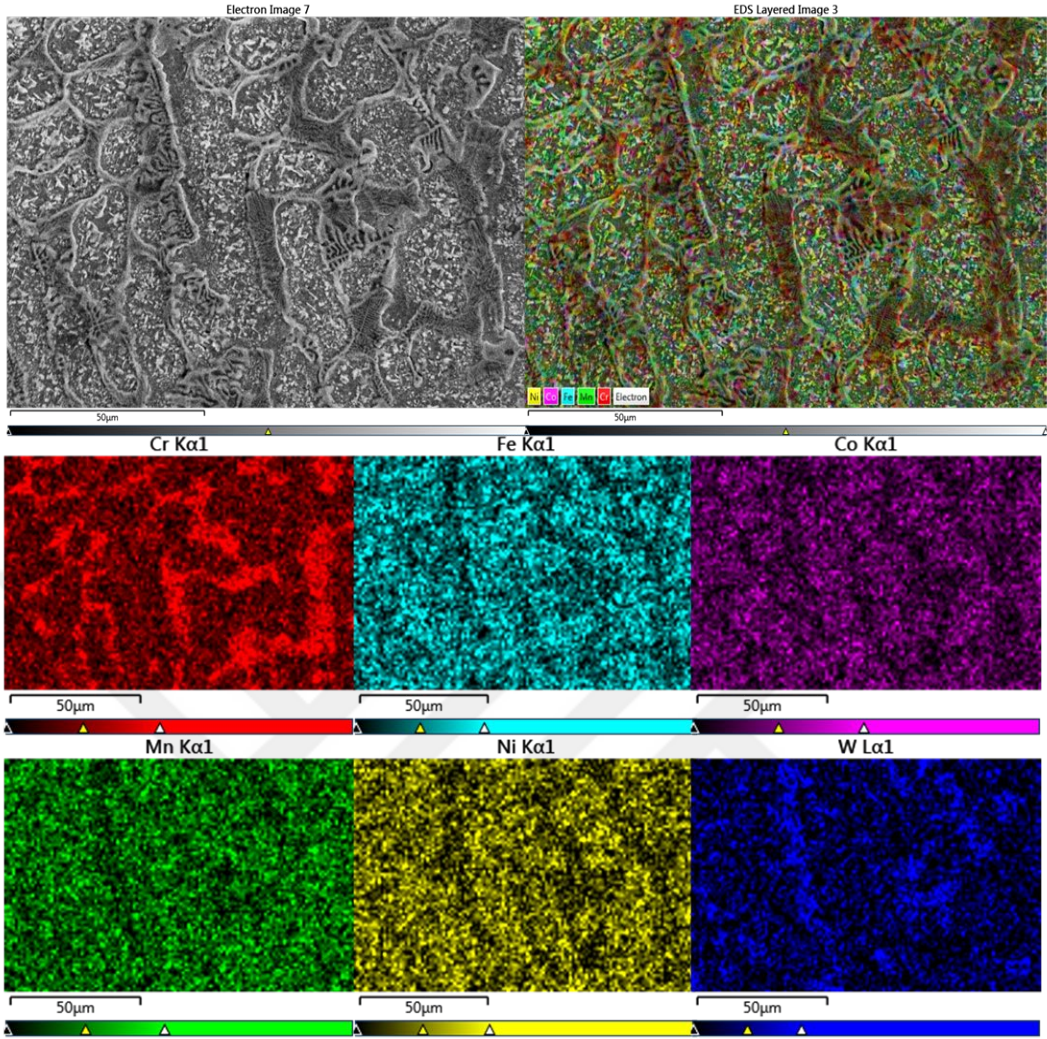
Şekil 3.30. K44 ısıtılmış numuneye ait farklı büyütme oranlarındaki (100X, 500X, 1000X, 2500X) SEM görüntüleri

K44 Numunesinden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütle ve hacimsel yüzdelik oranları Şekil 3.31’de verilmiş olup noktasal spektrumlar incelendiğinde kütle ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür. $Cr_{20}Mn_{10}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_{10}$ YEA alaşımının %15,3Cr, %4,3Mn, %9,3Fe, %11,2Co, %8,8Ni, %41,9W ve %9,2C elementlerinin kütle dağılımını gösteren Şekil 5.31’de verilen analiz sonucuna göre numunenin hazırlandığı oranlarda değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.32’de Mapping analiziyle element dağılımları verilmiştir. Dağılımda özellikle kromun tane sınırlarına doğru yönlendiği görülmüştür.

Electron Image 7

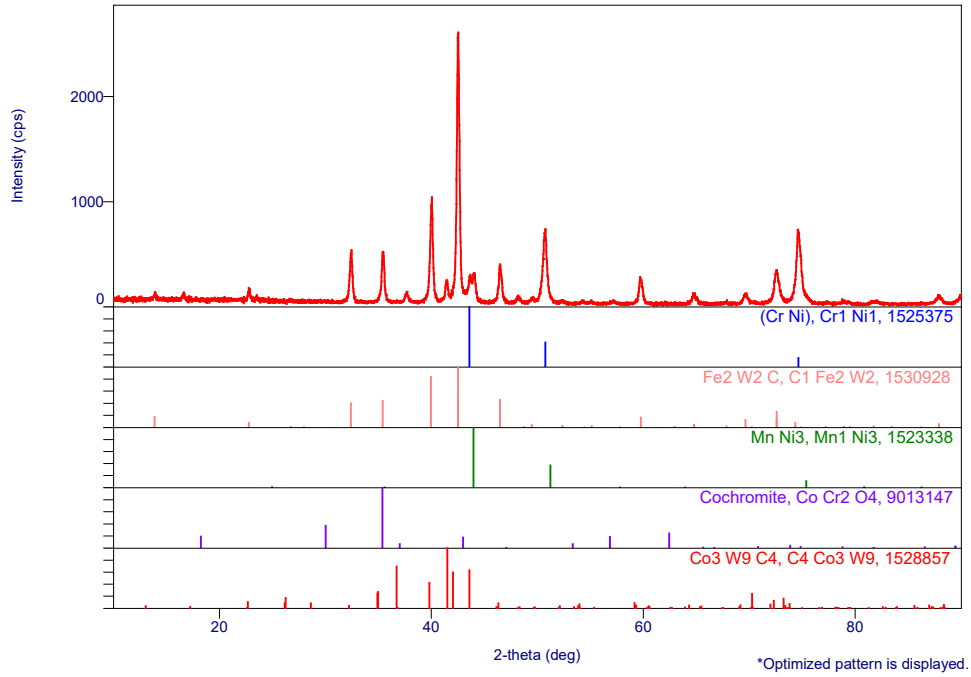


Şekil 3.31. $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{WC}_{10}$ bileşiğine sahip K44 numunesinin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.32. $Cr_{20}Mn_{10}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_{10}$ K44 numunesine ait mapping analizi ve elementer dağılımı

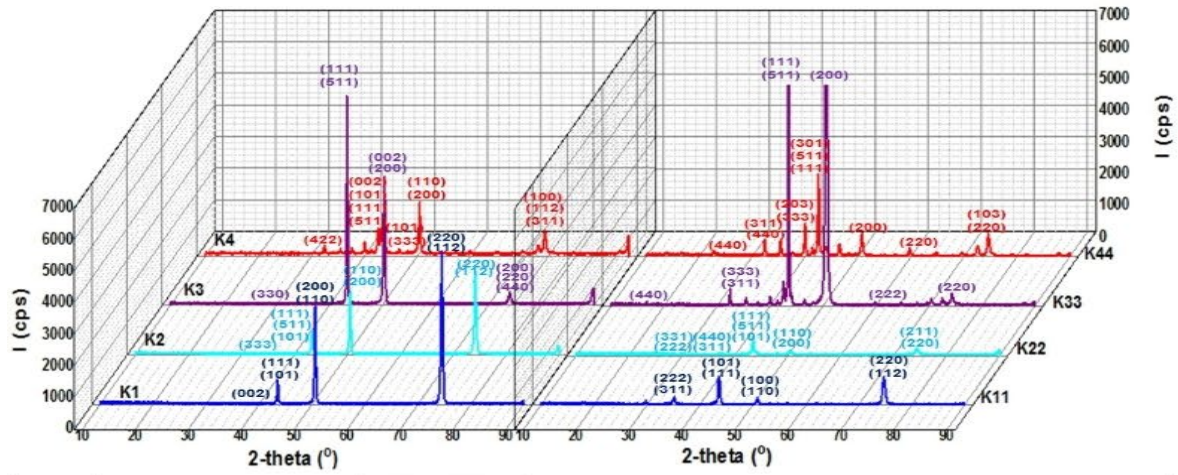
En fazla Tungsten Karbür (%10) içeren ve ısıl işlem uyguladığımız K44 numunesine ait XRD analizini Şekil 3.33'te incelediğimizde; Tungsten Karbür, Demir ve Kobalt elementleri ile Fe_2W_2C ve $Co_3W_9C_4$ bileşiklerini oluşturduğu görülmüştür. Malzemenin genelinde bu bileşiklerin yanı sıra 32.41° , 35.38° , 41.44° , 43.60° , 46.47° , 50.75° , 57.19° , 72.49° ve 74.59° theta açılarında $CrNi$, $MnNi_3$ ve $CoCr_2O_4$ bileşiklerinin olduğu görülmüştür.



Şekil 3.33. K44 ısıtılmış numuneye ait XRD grafiği

3.3. XRD Analiz Sonuçları

Şekil 3.34'te ısıtılmış ve ısıtılmamış olarak üretilen numunelere ait fazların tane yapıları, pik yaptığı açılar ve molekül görünüşleri verilmiştir. Çalışılan numuneler üzerinden aldığımız XRD analizlerinde FeNi, CrNi, CoCr, MnNi, Fe₆W₆C, Cr_{0,4}Ni_{0,6}, Co_{0,027}Fe_{0,28}Ni_{0,68}, CoCr₂O₄, Co₃W₉C₄ gibi bileşikler tespit edilmiştir. Yüksek entropili alaşıma farklı oranlarda ilave ettiğimiz Tungsten Karbürün (WC) Fe ve Co ile bileşik oluşturduğu görülmüştür.



Alloys	Phase name (formula)	Phase data name	Molecul
K1	Fe Ni	101, 110, 112	
	Co0.8 Cr0.2	101, 002, 100	
	Cr1 Ni1	111, 200, 220	
	Mn1 Ni1	101, 110, 112	
K11	Fe Ni	101, 110, 112	
	Co1 Cr2	311, 222, 220	
	Mn1 Ni1	111, 200, 220	
K2	C1 Fe6 W6	511, 333, 440	
	Cr0.4 Ni0.6	111, 200, 220	
	Fe Ni	101, 110, 112	
	Co0.027 Fe0.283 Ni0.689	111, 200, 220	
	Mn1 Ni3	111, 200, 220	
K22	Cr1 Ni1	111, 200, 220	
	Co1 Cr2	311, 222, 220	
	C1 Fe6 W6	511, 440, 331	
	Mn1 Ni1	101, 110, 211	
K3	Cr0.4 Ni0.6	111, 200, 311	
	Ni0.85 W0.15	111, 200, 220	
	Fe0.507 Ni0.493	111, 002, 200	
	Co0.027 Fe0.283 Ni0.689	111, 200, 220	
	C1 Fe6 W6	511, 333, 440	
K33	C1 Fe2 W2	511, 333, 440	
	Mn1 Ni3	111, 200, 220	
	Co1 Cr2	311, 222, 220	
	Cr1 Ni1	111, 200, 220	
K4	C1 Fe6 W6	511, 422, 333	
	Cr1 Ni1	111, 200, 311	
	Co0.75 Ni0.25	101, 002, 100	
	Mn1 Ni1	101, 110, 112	
K44	Cr1 Ni1	111, 200, 220	
	C1 Fe2 W2	511, 333, 440	
	Mn1 Ni3	111, 200, 220	
	Co Cr2 O4	311, 440, 220	
	C4 Co3 W9	301, 203, 103	

Şekil 3.34. Normal ve ısıtılmış numunelerin XRD 3D, faz ve molekül görünümü

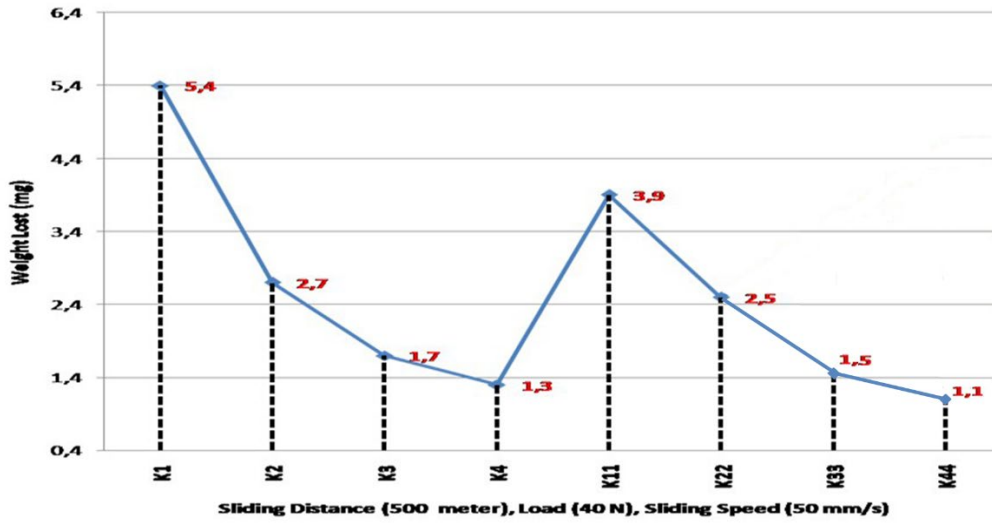
3.3. Aşınma Testi Sonuçları

Aşınma testi 500 metre kayma mesafesi ile 40 N ağırlık altında, 50 mm/sn kayma hızıyla ve 120 d/dk ile kuru aşındırıcı şartında yapılmıştır. Numuneler dijital terazide tartılıp kütle kayıpları hesaplanmıştır. Tablo 3.2’de Aşınma Testi Sonuçları ve Şekil 3.35’te Aşınma Kütle Kayıp Değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2’de aşınma testi tablosu incelendiğinde, ısıl işleme tabii tutulmamış K1, K2, K3 ve K4 numunelerinde, Tungsten Karbür ilave etmediğimiz K1 numunesinde 5,4 mg iken tungsten karbür ilavesi arttıkça aşınma değeri düşerek 1,3 mg a kadar düştüğü görülmüştür. Isıl işlem uygulanmış K11, K22, K33 ve K44 numuneleri incelendiğinde; ısıl işleme tabii tutulan numunelerin aşınma değerlerinin mikro sertlik değerlerine paralel olarak düştüğü görülmüştür. K11 numunesinde aşınma sonucu kütle kaybı 3,9 mg iken Tungsten karbür ilave ettiğimiz numunelerde 1,1’e kadar düştüğü görülmüştür.

Tablo 3.2. Aşınma testi sonuçları

Numune Adı	Başlangıç kütlesi (mg)	500 m Mesafe Sonrası Kütle (mg)	Kütle Kaybı (mg)	Aşındırma Mesafesi (m)	Yük (N)	Aşındırma Hızı (mm/sn)	Dönme Hızı (d/dk)
K1	13,6398	13,6344	5,4	500	40	50	120
K2	14,0087	14,0060	2,7	500	40	50	120
K3	13,5388	13,5371	1,7	500	40	50	120
K4	13,0871	13,0858	1,3	500	40	50	120
K11	13,1759	13,1720	3,9	500	40	50	120
K22	13,5646	13,5621	2,5	500	40	50	120
K33	13,6604	13,6589	1,5	500	40	50	120
K44	14,1655	14,1644	1,1	500	40	50	120



Şekil 3.35. Aşınma kütle kayıp değerleri

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında Ark Eritme yöntemi ile üretilen CrMnFeCoNi yüksek entropili alaşımına belirli oranlarda WC (%3-%5-%10) elementi eklenerek dört adet normal numune ve dört adet ısıtılmış numuneye XRD analizi, SEM/EDS analizi, Sertlik analizi ve Aşınma testi yapılmıştır.

Isıl işlem uygulanmayan K1, K2, K3 ve K4 numunelerinde WC içeriğinin artmasıyla Aşınma Oranının, K11, K22, K33 ve K44 numunelerine kıyasla azaldığı görülmüştür. Isıl işleme tabii tutulmuş numunelerde WC elementinden kaynaklı karbon ve tungsten miktarına bağlı olarak aşınma miktarında artış olduğu görülmüştür.

EDS Analizi Mapping ve Element Görüntüleri numunelerden alınan noktasal spektrumlar incelendiğinde elementlerinin kütle ve hacimsel değerler ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür.

Sertlik değeri incelenen 8 adet numunede WC (%3-%5-%10) içeriğinin artmasıyla Sertlik değerinin arttığı görülmüş olup ısıtılmış numunelerde bu oran daha fazla arttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise WC elementinin yoğunluğunun diğer elementlere göre yüksek olması olabilir. WC sert seramik malzeme parçacıkları Cr, Co ve Ni gibi yumuşak elementlerin içine eklenmesiyle numunelere sertlik dayanımı kazandırabilir. WC yüzdesi arttıkça sertliğin artması Cr-Karbür fazlarında sertliğin artmasına neden olabilir.

Yeni bir malzeme çeşidi olarak tanımlanan Yüksek Entropili Alaşımlar son yıllarda yapılan çalışmalar ve analizler ile diğer alaşımlara alternatif olabilecek bir malzeme çeşidi oldukları kanıtlanmıştır. Yüksek Entropili Alaşımların tasarımı yapılırken alaşımın içerdiği elementlerin özellikleri değerlendirilerek geleneksel alaşımlara göre üstün özelliklere sahip alaşımlar üretilmesi mümkündür.

Bu tez çalışmasında $Cr_{20}Mn_xFe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_x$ yüksek entropili alaşımı incelenerek alaşımdaki Mn ve WC oranını değiştirip elde edilen numuneler ile alaşımın sertliği ve aşınma direncindeki farklılıklar görülmüştür. $Cr_{20}Mn_xFe_{20}Co_{20}Ni_{20}WC_x$ alaşımındaki elementlerin oranı değiştirilerek veya daha farklı elementler kullanılarak yapılacak yeni çalışmalara ışık tutabileceği değerlendirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Cantor, B., Chang, I.T.H., Knight, P., Vincent, A.J.B.**, 2004. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Mater. Sci. Eng*, 375–377, 213–218.
- Ergin, N., Koçak, N., Özdemir, Ö., Uysal, M.**, 2022. Yüksek Entropi Alaşımlarına Genel Bakış. Gece Kitaplığı, Ankara. 103–166.
- Gao, M.C., Yeh, J.-W., Liaw, P.K., Zhang, Y.**, 2016. High-entropy alloys Fundamentals and applications, High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications. Springer. Switzerland.
- German R.**, 2007. Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri. TTMD, Ankara.
- Gludovatz, B., Hohenwarter, A., Catoor, D., Chang, E.H., George, E.P., Ritchie, R.O.**, 2014. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 345, 1153–1158.
- Koch, C.**, 1998. Milling of Brittle and Ductile Materials. ASM Handbook.
- Kurt, O.**, 2004. Toz üretim yöntemleri ve sinterleme. Sakarya Üniversitesi
- 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, 494–525.
- Murty, B.S., Yeh, J.-W., Ranganathan, S.**, 2014. High-Entropy Alloys. Elsevier, London.
- Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N.**, 2007. Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri. Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara.
- Smith C. S.**, 1963. Four outstanding researches in metallurgical history. *American Society for Testing and Materials*, Baltimore.
- Tasan, C.C., Deng, Y., Pradeep, K.G., Yao, M.J., Springer, H., Raabe, D.**, 2014. Composition dependence of phase stability, deformation mechanisms, and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high-entropy alloy system. *Jom*, 66, 1993–2001.
- Tian, F., Varga, L.K., Chen, N., Shen, J., Vitos, L.**, 2014. Ab initio design of elastically isotropic TiZrNbMoV high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 599, 19–25.
- Tsai, K.Y., Tsai, M.H., Yeh, J.W.**, 2013. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61, 4887–4897.
- Tsai, M.H.**, 2016. Three strategies for the design of advanced high-entropy alloys. *Entropy*

- 18.
- Upadhyaya, G.**, 1997. Powder metallurgy technology. *Cambridge International Science Publishing*, England.
- Yeh, J.W.**, 2006. Recent progress in high-entropy alloys. *European Journal of Control*, 31, 633–648.
- Yeh, J.W.**, 2013. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*, 65, 1759–1771.
- Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., Chin, T.S., Shun, T.T., Tsau, C.H., Chang, S.Y.**, 2004. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6, 299–303.
- 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.
- Zhou, Y.J., Zhang, Y., Wang, Y.L., Chen, G.L.**, 2007. Solid solution alloys of AlCoCrFeNi Tix with excellent room-temperature mechanical properties. *Applied Physics Letter*, 90, 18–20.