



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORLAMA İŞLEMİNİN CrFeMnNbNi YÜKSEK ENTROPİLİ  
ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DİLARA BENZEK

DANIŞMAN

DOÇ. DR. AZMİ ERDOĞAN

BARTIN-2025





T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BORLAMA İŞLEMİNİN CrFeMnNbNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMININ  
AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilara BENZEK

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2025

## KABUL VE ONAY

Dilara BENZEK tarafından hazırlanan “BORLAMA İŞLEMİNİN CrFeMnNbNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 20.08.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : .....

Üye : .....

Üye : .....

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN  
Enstitü Müdürü

## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “BORLAMA İŞLEMİNİN CrFeMnNbNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

20.08.2025

Dilara BENZEK

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında eş atomik orana yakın kompozisyonlarda 5 element bir araya getirilerek CrFeMnNbNi Yüksek entropili alaşımı oluşturulmuş ve CrFeMnNbNi alaşımı borlama işlemine tabi tutularak alaşım üzerindeki etkisi belirlenmesi ve mikro yapısı incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez sürecim boyunca yol gösterici fikirleriyle çalışma azmimi artıran, engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan bana her konuda destek vererek yolumu açan ve beni yetiştiren kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN' a vermiş olduğu emekler için sevgi ve saygılarımı sunarım. Hocama, sabrı ve anlayışı için teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım boyunca her zaman yardımcı olan, tecrübe ve birikimlerini benden esirgemeyen değerli Öğr. Görevlisi İbrahim ÇALIŞ'a teşekkür ederim.

Doğduğum günden bu yana beni karşılıksız seven, en iyi şekilde yetiştirmeye çalışan ve her zaman destekleyen biricik öğretmenlerim, yol göstericilerim ve en değerli varlıklarım annem Aysel ve babam Ekber ATAM'a sevgi ve saygılarımı sunar, her zaman yanımda olan ve zor anlarımda desteğini esirgemeyen değerli kardeşlerim İlayda ve Doğan ile birlikte hayatımın her anında desteğini, varlığını hissettiğim aileme içten teşekkürlerimi sunarım. Varlığıyla hayatımı güzelleştiren, desteğiyle her konuda bana güç veren kıymetli yol arkadaşım Murat BENZEK' e sevgisi ve anlayışı için teşekkür ederim.

Dilara BENZEK

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## BORLAMA İŞLEMİNİN CrFeMnNbNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Dilara BENZEK**

**Bartın Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN**

**Bartın-2025, sayfa: 125**

Bu tez çalışmasında, yüksek entropi prensibine dayalı olarak, eş atomik veya buna yakın oranlarda en az beş farklı elementin katılımıyla oluşturulan çok bileşenli bir alaşım sistemi sentezlenmiştir. Bu alaşım, elementlerin rastgele dağılım gösterdiği katı çözelti fazları oluşturma eğiliminde olan, geleneksel alaşımlardan farklı olarak yüksek konfigürasyonel entropiye sahip yeni nesil bir malzeme sınıfı olan yüksek entropili alaşımlar kapsamındadır. Alaşım; Cr, Fe, Mn, Nb ve Ni elementleri %99 saflıkta külçe formunda vakumlu ark eritme yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. Çalışmanın amacı imal edilen bu CrFeMnNbNi alaşımını borlama işlemine tabi tutarak alaşım üzerindeki etkisini belirlemek ve mikro yapılarını incelemektir. Çalışmada hazırlanan CrFeMnNbNi alaşımına 950 °C'de 5 saat borlama işlemi uygulanmıştır. Optik mikroskop ile gerçekleştirilen mikroyapı analizlerinde, karakteristik dendritik ve interdendritik morfolojiler tespit edilmiştir. Farklı bölgelerden elde edilen EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) verileri doğrultusunda elementel dağılımlar incelenmiş, kimyasal bileşim oranları üzerinden olası faz oluşumları değerlendirilmiştir. Borlama sonucunda mikro yapıda, mekanik özelliklerde, aşınma direncinde bazı değişiklikler meydana gelmiştir ve bu değişimler detaylı olarak incelenmiştir. CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımının XRD ve SEM testinde termodinamik hesaplamalar sonucunda mikro yapısında üç ana fazı bulunduğu belirlenmiştir. Bunlar Laves, FeNi ve FeCr dan

oluşmuştur. Borlama işlemi sonrasında yüzeyde 30-40 µm kalınlığında metalik borlama tabakası oluşmuştur. Borür tabakası sayesinde, alaşım sertliği ve kalıntı elastik modül değeri yaklaşık 5 kat artarak 2800 HV'ye kadar çıkmıştır. YEA üzerinde gerçekleştirilen nanoindentasyon testlerinde sertlik ve kalıntı elastik modülün Laves fazında en yüksek (10.9-190 GPa), FeNi fazında ise en düşük (2.74-128 GPa) olduğu görülmüştür. İncelemeler sonucunda alaşım sertliği en yüksek değerlerine (24-302 GPa) borür tabakasında ulaştığı görülmüştür. Aşınma testlerinde borlamanın aşınma kayıplarını doğrudan etkilediği ve %96'ya kadar azalttığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Borlama, CrFeMnNbNi, mekanik, mikro yapı, nanoindentasyon, vakumlu ark eritme, yüksek entropili alaşım.

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BORIDING PROCESS ON THE WEAR PROPERTIES OF CrFeMnNbNi HIGH ENTROPY ALLOY**

**Dilara BENZEK**

**Bartın University**

**Graduate School**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Azmi ERDOĞAN**

**Bartın-2025, pp: 125**

In this thesis, a multi-component alloy system was synthesized based on the high-entropy principle, involving at least five different elements in equiatomic or near-equiatomic proportions. Unlike conventional alloys, which typically form solid solutions with limited entropy, high entropy alloys (HEAs) represent a new generation of materials characterized by high configurational entropy and a tendency to form solid solution phases with randomly distributed elements. The CrFeMnNbNi alloy was produced using the vacuum arc melting method, utilizing high-purity (99%) Cr, Fe, Mn, Nb, and Ni elements in the form of ingots.

The primary objective of the study was to investigate the effect of boriding on the CrFeMnNbNi alloy and to analyze the resulting microstructural changes. The boriding treatment was conducted at 950 °C for 5 hours. Optical microscopy revealed the presence of characteristic dendritic and interdendritic morphologies in the alloy's microstructure. Elemental distribution was examined using Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) in various regions, and possible phase formations were evaluated based on the observed chemical composition ratios.

The boriding process led to significant changes in the microstructure, mechanical properties, and wear resistance of the alloy. These changes were analyzed in detail. Thermodynamic evaluations using XRD and SEM analyses identified three primary phases in the alloy's microstructure: Laves phase, FeNi phase, and FeCr phase. Following the boriding process, a metallic boride layer with a thickness of 30–40  $\mu\text{m}$  formed on the surface.

This boride layer significantly enhanced the alloy's hardness and residual elastic modulus, increasing them approximately fivefold to reach values as high as 2800 HV. Nanoindentation tests indicated that the Laves phase exhibited the highest hardness and elastic modulus values (10.9–190 GPa), while the FeNi phase had the lowest (2.74–128 GPa). In the boride layer itself, the maximum hardness values were measured in the range of 24–302 GPa. Wear tests demonstrated that boriding substantially reduced wear losses, with reductions of up to 96% observed.

**Keywords:** Boriding, CrFeMnNbNi, high entropy alloy, mechanics, microstructure, nanoindentation, vacuum arc melting.

# İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME .....	iii
ÖN SÖZ .....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ALAŞIMLAR.....	4
2.1 Malzeme Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Faktörler.....	4
2.2 Alaşım Özellikleri .....	7
2.3 Alaşım Türleri.....	9
2.3.1 Demir Esaslı Alaşım lar .....	9
2.3.1.1 Çelikler .....	10
2.3.1.2 Dökme Demirler .....	10
2.3.2 Demir Dışı Alaşım lar .....	11
2.3.2.1 Alüminyum Alaşım ları.....	12
2.3.2.2 Bakır Alaşım ları .....	12
2.3.2.3 Magnezyum Alaşım ları.....	13
2.3.2.4 Titanyum Alaşım ları .....	13
2.3.3 Entropi Esasına Göre Alaşım lar .....	13

2.3.3.1 Orta ve Düşük Entropili Alaşımalar .....	13
<b>3. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR .....</b>	<b>16</b>
3.1 YEA'ların Yapısı ve Özellikleri.....	16
3.2 Uygulama Alanları.....	17
3.3 Malzeme Tasarımında Paradigma Değişimi .....	17
3.4 Yüksek Entropili Alaşımaların Üretim Yöntemleri .....	22
3.4.1 Ergitme ve Döküm Yöntemleri .....	22
3.4.1.1 İndüksiyon Ergitme.....	22
3.4.1.2 Vakum Ark Ergitme .....	23
3.4.1.3 Sürekli Döküm .....	25
3.4.2 Toz Metalurjisi Yöntemi.....	26
3.4.2.1 Sıcak Presleme/Sinterleme.....	27
3.4.2.2 Soğuk İzostatik Presleme .....	28
3.4.3 Eklemeli İmalat .....	28
3.4.3.1 Seçici Lazer Eritme .....	28
3.4.3.2 Elektron Işını Eritme .....	28
3.5 Sınıflandırma ve Termodinamik Hesaplamalar .....	29
3.6 Çekirdek Etkileri .....	38
3.6.1 Yüksek Entropi Etkisi .....	38
3.6.2 Yavaş Yayınım Etkisi.....	39
3.6.3 Kafes Distorsiyon Etkisi .....	40
3.6.4 Kokteyl Etkisi .....	41
3.7 Mekanik Özellikler .....	41
3.8 Güçlendirme Yöntemleri.....	42
3.8.1 Katı Çözelti Güçlendirmesi .....	42
3.8.2 Kısa Mesafeli Düzen.....	43
3.8.3 İkincil Faz ile Güçlendirme .....	44
3.8.4 Çökelti Güçlendirmesi .....	45
<b>4. AŞINMA .....</b>	<b>46</b>
4.1 Aşınma Türleri.....	46

4.1.1 Adezif Aşınması.....	46
4.1.2. Abrasif Aşınması .....	46
4.1.3. Yorulma Aşınması.....	46
4.1.4. Erozyon Aşınması.....	46
4.1.5. Korozyon Aşınması.....	47
4.1.6. Yüksek Sıcaklık Aşınması .....	47
4.2 Aşınmadan Korunma Yöntemleri.....	47
4.2.1 Difüzyonla Yüzey Sertleştirme Yöntemleri .....	47
4.2.1.1 Karbürleme .....	47
4.2.1.2 Nitürleme .....	47
4.2.1.3 Kromlama .....	48
4.2.1.4 Borlama (Boraks Sertleştirme) .....	48
4.2.2 Yüzey Modifikasyonu ile Sertleştirme .....	49
4.2.2.1 Endüksiyon Sertleştirme.....	50
4.2.2.2 Alev Sertleştirme .....	50
4.2.2.3 Lazer Sertleştirme .....	51
4.2.2.4 Elektron Işını Sertleştirme .....	51
4.2.2.5 Bilyalı Peening .....	51
4.2.2.6 Östemperleme .....	51
4.2.3 Termal Sprey Kaplamalar .....	51
4.2.4 Buhar Biriktirme.....	54
4.2.5 Diğer Kaplamalar.....	56
4.2.5.1 Lazerle Kaplama Metodu .....	56
4.2.5.2 Kimyasal Yöntemler.....	58
5. MATERYAL VE METOT .....	60
5.1 Kullanılacak Malzemenin Belirlenmesi.....	62
5.1.1 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Her Bir Elementinin Alaşıma Katılma Kütlesinin Hesabı .....	63
5.2 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımın Üretimi .....	64
5.3 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımda Borlama İşlemi .....	66
5.4 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Optik Mikroskop Analizi .....	72

<b>5.5 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Taramalı Elektron Mikroskop Analizi.....</b>	<b>72</b>
<b>5.6 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının X-Işını Kırınım Analizi (XRD)...</b>	<b>74</b>
<b>5.7 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Mikrosertlik Analizi .....</b>	<b>75</b>
<b>5.8 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Nanoindentasyon Testi.....</b>	<b>76</b>
<b>5.9 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Aşınma Testi.....</b>	<b>77</b>
<b>5.10 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Optik Profilometre.....</b>	<b>80</b>
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>82</b>
<b>6.1 Mikroyapı Karakterizasyonu .....</b>	<b>82</b>
<b>6.2 Bor Kaplı CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşım Tabakasının Mikroyapı Karakterizasyonu.....</b>	<b>89</b>
<b>6.3 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Mikrosertlik ve Nanoindentasyon Özellikleri .....</b>	<b>96</b>
<b>6.4 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Kuru Kayma Aşınma Davranışı.</b>	<b>99</b>
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>111</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>114</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>124</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Dökme demir sınıflandırılması.....	11
2.2: Karışım entropisine bağlı olarak alaşımlar farklı entropi grupları içinde değerlendirilebilir.....	15
3.1: Eş atomlu bileşimlerin toplam sayısının ana elementlerin sayısına göre değişimi.....	18
3.2: Çok bileşenli alaşımda farklı renklerdeki dairelerle temsil edilen elementlerin rastgele karışımına ilişkin gösterilen kavram.....	19
3.3: $\Delta S_{mix}$ (J/mol K) şematik üçlü alaşım sistemi üzerindeki kontur grafiği .....	22
3.4: İndüksiyon ergitme ocağı.....	23
3.5: Vakumlu ark ergitme sistemi şematik gösterimi.....	24
3.6: Sürekli döküm yöntemi şematik gösterimi.....	25
3.7: Toz metalurjisi sıkıştırma işlemi.....	26
3.8: Tek fazlı katı eriyik yapısına sahip yüksek entropili alaşımlarda (YEA) valans elektron konsantrasyonu (VEC) değerine bağlı olarak kristal yapıların değişimi.....	33
3.9: Valans elektron konsantrasyonundaki (VEC) değişimlerin, malzemenin sertlik değerine (HV) olan etkisi.....	33
3.10: Atomik boyut farkındaki değişikliklerin malzemenin sertlik değerine etkisi .....	34
3.11: YEA' ların bileşim özelliklerine, faz ve element bileşenlerine göre sınıflandırılması.....	37
3.12: Kare kafes üzerine dağıtılmış 10 farklı bileşenin 2 boyutlu şeması.....	40
3.13: Kafes distorsiyonu.....	42
3.14: Kaplamaların güçlendirme yöntemleri; a. Katı çözeltili güçlendirmesi; b. İnce tane güçlendirmesi; c. Dağılım güçlendirmesi; d. İkinci faz güçlendirmesi; e. Arayüz güçlendirmesi .....	44
4.1: Yüzey sertleştirme yöntemleri .....	50
4.2: Yüksek entropili alaşımlarda kaplama yöntemleri.....	52
4.3: Isıl püskürtme yöntemi.....	53
4.4: Buhar biriktirme yöntemi ilkesinin şematize gösterimi .....	54
4.5: Lazer kaplama prosesi.....	57
4.6: Çok esaslı element alaşımlarında elementlerin kullanılma sıklığı.....	58
5.1: Tez süresinde gerçekleştirilen işlemler .....	61

5.2: Vakum Eritme ocağı resmi.....	65
5.3: Hazırlanmış Numuneler .....	67
5.4: Bakalit Solüsyonu .....	68
5.5: Bakalite alınmış numuneler.....	68
5.6: Kalıptan çıkarılmış numune .....	69
5.7: Forcipol 2V model zımparalama ve parlatma cihazı .....	70
5.8: Zımparalanmış numune.....	71
5.9: Parlatma solüsyonu .....	71
5.10: Nikon marka dijital mikroskop .....	72
5.11: TESCAN markasıyla üretilmiş taramalı elektron mikroskobu .....	73
5.12: Numunenin yerleştirildiği ünite .....	74
5.13: Rigaku marka XRD cihazı .....	75
5.14: QNESS marka Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı.....	76
5.15: Cihazda numunenin yerleştirildiği modül .....	77
5.16: Değerlendirme ve işleme yapılan bilgisayar modülü.....	77
5.17: Turkyus marka aşındırma cihazı .....	78
5.18: Cihaza malzemenin yerleştirildiği tabla.....	78
5.19: Aşındırılmış malzeme yüzeyleri.....	79
5.20: Cihaz koluna uygulanan 10N yük .....	79
5.21: Profilometre görüntüleri elde edilen ve çalışmaları düzenlenen bilgisayar ara yüzü.....	80
5.22: Filmetrics marka profilometre.....	81
6.1: CrFeMnNbNi alaşımı SEM mikroyapı görüntüsü .....	83
6.2: CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımı XRD kırınım modeli .....	84
6.3: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın SEM+EDS analizi .....	85
6.4: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın faz analizi .....	86
6.5: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın EDS haritalama analizi .....	86
6.6: Bor Kaplı CrFeMnNbNi alaşımı SEM mikroyapı görüntüsü .....	90
6.7: Borlu CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın XRD kırınım modeli.....	91
6.8: Borlama işlemi sonrası CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşıma ait taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen mikroyapı görüntüsü.....	92
6.9: Numune yüzeyinde oluşan farklı açılardan borlu tabaka görüntüsü .....	93
6.10: Borlanan numunenin SEM görüntüsü .....	94

<b>6.11:</b> Borlanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın SEM ve EDS analizi .....	96
<b>6.12:</b> Borür tabakasının mikrosertlik diyagramı.....	97
<b>6.13:</b> Borlama sonrasında mikroyapıda bulunan fazların nanoindentasyon testlerinde elde edilen Yük-Derinlik diyagramı.....	98
<b>6.14:</b> YEA için kuru kayma aşınma testlerinde sürtünme katsayısı eğrisi .....	100
<b>6.15:</b> Bor kaplı YEA kuru kayma aşınma testlerinde sürtünme katsayısı eğrisi.....	100
<b>6.16:</b> Farklı yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri .....	102
<b>6.17:</b> Yüksek entropili alaşımların aşınma testlerinde oluşan aşınma izlerinin profilleri: a) YEA-5N, b) YEA-10N, c) YEA-15N.....	103
<b>6.18:</b> Borlanmış yüksek entropili alaşımların aşınma testlerinde oluşan aşınma izlerinin profilleri: a) Bor Kaplı YEA- 5N, b) Bor Kaplı YEA- 10N c) Bor Kaplı YEA- 15N .....	104
<b>6.19:</b> CrFeMnNbNi YEA' ın a)5N, b)10N, c)15N yükler altında gerçekleştirilen aşınma EDS görüntüleri .....	105
<b>6.20:</b> Bor kaplı CrFeMnNbNi yüksek entropi alaşımının a) 5N, b) 10N ve c) 15N yükler altında yapılan aşınma testlerine ait EDS analiz görüntüleri .....	106
<b>6.21:</b> CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımının 5 N yük uygulanarak yapılan aşınma testinde oluşan aşınma izlerine ait görüntüler.....	107
<b>6.22:</b> 10 N yük altında uygulanan aşınma testinde CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşım üzerinde meydana gelen aşınma izlerinin mikroskobik görüntüleri.....	107
<b>6.23:</b> CrFeMnNbNi YEA' ın 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerindeki aşınma izlerinin görüntüleri .....	108
<b>6.24:</b> Bor kaplaması uygulanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın 5 N yük altında yapılan aşınma testine ait aşınma izlerinin mikroskop görüntüleri.....	108
<b>6.25:</b> Bor kaplaması yapılmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın 10 N yük altında yapılan aşınma testine ait aşınma izlerinin mikroskobik görüntüleri.....	109
<b>6.26:</b> 15 N yük uygulanan aşınma testinde, bor kaplamalı CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin mikroskop görüntüleri .....	109

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
2.1: Malzeme Seçimi İçin Genel Yaklaşım (Fındık vd., 2008; Smith, 1979a) .....	5
3.1: Miedema modeline göre hesaplanmış, karışım entalpi değerleri $\Delta H_{mix}$ (kJ/mol) (Manzoni vd., 2013).....	31
5.1: Tez Kapsamında İncelenen Elementlerin Özellikleri.....	62
5.2: Alaşım Hazırlığında Kullanılan Cr, Fe, Mn, Nb ve Ni Elementlerinin Kütle Değerleri.....	64
6.1: Şekil 6.3' te işaretlenen bölgelerdeki element oranları ve faz analizi tablosu .....	85
6.2: CrFeMnNbNi YEA'da kullanılan elementlerin atom yarı çapları ve karışım entalpisi değerleri $\Delta H$ (kJ/mol) (Senkov vd., 2001; Takeuchi vd., 2005).....	88
6.3: CrFeMnNbNi YEA' ın hesaplanan bazı termodinamik verileri .....	89
6.4: Borlanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın analiz değerleri.....	95
6.5: Nanoindentasyon testlerinden elde edilen dijital veriler .....	99
6.6: Kuru kayma aşınma testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı (CoF ) ve aşınma oranı (WR) değerleri .....	101

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
C	: Karbon
$c_i$	: Elektronun Molar Konsantrasyonu
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
$E_r$	: Elastik Modül
Fe	: Demir
Li	: Lityum
In	: Logaritma Fonksiyonu
Mg	:Magnezyum
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
N	: Alaşımdaki bileşen sayısı
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
Pd	: Paladyum
R	: Gaz Sabiti
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
T	: Mutlak Sıcaklık
$T_m$	: Erime Sıcaklığı
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
VEC	: Değerlik Elektron Konsantrasyonu
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
$\Delta H$	: Entalpi Değeri
$\Delta H_{\text{karışım}}$	: Karışım Entalpisi
$\Delta G$	: Gibbs Serbest Enerjisi

$\Delta S_{mix}$	: Karışım Entropisi
$\% \delta$	: Atomik Boyut Farkı
$\Delta X_A$	: Allen Elektronegatiflik Değeri
$\Delta X_p$	: Pauling Elektronegatiflik Değeri



## KISALTMALAR

ALD	: Atomik Katman Biriktirme
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
EDS	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HCP	: Hegzagonal Sıkı Paket
HEBM	: Tozları Yüksek Devirli Biyelerde Karıştırma Yöntemi
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt
OM	: Optik Mikroskop
PLD	: Puls Lazer Depozisyon
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
XRD	: X-ışını Kırınımı
VEC	: Valans Elektron Konsantrasyonu
YEA	: Yüksek Entropili Alaşımlar
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
CoF	: Sürtünme Katsayısı
WR	: Aşınma Oranı

# 1. GİRİŞ

Mühendislik açıdan bir çalışma yaparken malzemenin tek bir özelliğini analiz etmek yerine bütünü incelemek ve ne kadar geliştirileceği dikkate alınarak seçim yapmak gerekmektedir. Malzemenin karakteristik özellikleri detaylıca değerlendirilip; davranışı, bileşimi, yapısı, çalışma koşulları ve bunların kendi aralarında etkileşimleri malzeme seçimi yaparken göz önüne alınması gereken konulardandır. Atomlar farklı düzenlerde ve yapılarda birbirleri ile bağlanarak malzeme türlerini oluşturur. Metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve yarı iletkenler çeşitli malzeme türlerindedir. Günümüzde malzemeler insanlığa hizmet edip problemleri çözmek için oldukça farklı formlara evrilmektedirler. Örneğin telefonun ilk zamanlarda dış yüzeyi tahtadan, elektrik aksanlarının bulunduğu bölüm ise metalden yapılmıştır. Üretilen bu telefonlar kullanım ve ergonomi açısından zor olduğu için farklı arayışlar içine girilmiştir. Daha sonradan dökme demir ve pirinç kullanılmıştır. 1970'ler de ise dış yüzeyinde polimer malzemeler kullanılmıştır. Arabalar, gemiler, saç şekillendiricilerde aynı şekilde ihtiyaca yönelik olarak malzemelerde değişimler yapılarak daha kullanışlı hale getirilmiştir. Önemli olan malzemenin kullanılacağı şartlara uygun olarak seçmektir. Malzeme seçimi detaylı mühendislik çalışması gerektirmektedir. Malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirebilmek ve endüstriyel alanda kullanımını kolaylaştırmak için saf malzemeler kullanılarak bileşenlerine göre daha üstün özellikli alaşımlar yapılmaktadır. Alaşımlama ile istenen özellikte malzeme elde edilebilir, fiziksel ve mekanik özellikleri değiştirilebilir, ısıl işleme uygun hale getirilebilir, maliyeti düşürülebilir. Örneğin uçak gövdelerinde kullanılan alüminyum alaşımları hafifliğin yanı sıra yüksek düzeyde korozyon direnci de sağlar. Geleneksel alaşımlar ilave katkı maddesi ile ana çözücü elementten oluşmaktadır. İlave katkı maddeleri ana çözücü elementin çalışma özelliklerinin iyileşmesini sağlar. Ancak konvansiyonel alaşımlarda bazı alaşım elementlerinin eklenmesi, ana matrisin kırılgenliğini artırarak üretim sürecinde çatlak oluşumu, segregasyon veya istenmeyen fazların ortaya çıkması gibi olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Örneğin, bazı intermetalik fazlar (örneğin  $Ni_3Nb$  veya  $Fe_2Ti$  gibi) mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyerek malzemenin işlenebilirliğini zorlaştırabilir. Bu tür sınırlamaları aşmak ve mikro yapısal kontrolü daha esnek hale getirmek amacıyla, çok bileşenli yapıya sahip yüksek entropili alaşımlar tercih edilmektedir.

Yüksek entropili alaşımlar, en az beş ana elementin yaklaşık eş atomik oranlarda bir araya getirilmesiyle oluşur ve bu yapı, yüksek konfigürasyonel entropi sayesinde intermetalik fazlara kıyasla katı eriyik fazların daha kararlı kalmasını sağlar. Bu termodinamik kararlılık, bu tür alaşımların sentezlenmesini ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmasını kolaylaştırmakta, aynı zamanda mikro yapı ve mekanik özelliklerin analizini de mümkün kılmaktadır. Yüksek entropili alaşımlar basit konfigürasyonları ve üstün performansları ile oldukça ilgi görmektedir. Malzemede hasar oluşumu oldukça yaygın görünen sorunların başında gelmektedir. Hasara neden olan aşınmaya karşı alınan yüzey özelliklerini iyileştirmeye yönelik önlemler arasında kaplama yöntemleri başlıca uygulamalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Mekanik malzemeler aşınmaya karşı karbür, nitür ve borür gibi çeşitli yöntemlerle kaplanarak başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Yüzey kaplama teknolojileri, metal malzemelerin korozyon direncini artırmanın yanı sıra yüksek sıcaklık uygulamalarına dayanım, enerji verimliliği sağlama gibi çeşitli avantajlar da sunmaktadır. Ancak bu tür kaplama proseslerinin büyük bir kısmı yüksek teknoloji gereksinimi ve maliyetleri nedeniyle sınırlı uygulanabilirliğe sahiptir. Bu duruma alternatif olarak, oksit içermeyen seramik esaslı bir bileşik olan borür tabakasının, termokimyasal yüzey modifikasyon yöntemleriyle metal yüzeylerde ekonomik ve pratik bir şekilde oluşturulması, birçok açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Termokimyasal bir yüzey işlem yöntemi olan borlama, metalik malzemelerin yüzey sertliği, aşınma direnci, oksidasyona ve korozyona karşı dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, dünya bor rezervlerinin büyük bir bölümüne sahip olan Türkiye açısından, bu teknolojiye yatırım yapılması hem stratejik hem de ekonomik açıdan oldukça değerlidir. Bu bilgilerden yola çıkarak iyi mekanik özelliklere sahip malzeme elde edebilmek için çalışmamızda CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımı üretilerek bor ile kaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında aşağıdaki temel hedefler doğrultusunda araştırmalar yürütülmüştür:

1. CrFeMnNbNi esaslı yüksek entropili alaşım sistemlerine belirli oranlarda bor elementi ilave edilerek bor katkılı YEA malzemelerin üretilmesi ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi,
2. Üretilen bor katkılı yüksek entropili alaşımların kristal yapılarının belirlenmesi,
3. Tüm örneklerin mikroyapı analizlerinin gerçekleştirilmesi ve mekanik karakterizasyonlarının yapılması,

4. Bor katkılı yüksek entropili alaşım malzemelerinin ülkemizde tanıtılması, kullanım potansiyelinin artırılması ve bu alana katkı sunulması,
5. Vakumlu indüksiyon ergitme sistemlerinde uygun bor oranlarıyla alaşım üretiminin optimizasyonunun sağlanması,
6. Yüksek entropili alaşımlara yönelik mevcut problemlere zm nerileri getirilmesi,
7. Elde edilen deneysel verilerin bilimsel yayınlar ve Ar-Ge çalışmalarında değerlendirilerek akademi ve sanayiye kazandırılması,
8. Çalışmada elde edilen bileşimlerin özellikleri doğrultusunda bu alaşımların potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesi ve uygulamaya dönük öneriler sunulması.

Tezin içeriği şu şekilde yapılandırılmıştır: İkinci bölümde, alaşımlar hakkında genel bilgiler sunulmuş; nc bölümde ise yüksek entropili alaşımların temel özellikleri, üretim yöntemleri ve kullanım alanları kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Dördüncü bölümde aşınma mekanizmaları ve ilgili teorik bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde deneysel uygulamalara yer verilmiş, altıncı bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Son olarak, yedinci bölümde çalışmadan çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

## 2. ALAŞIMLAR

Malzeme kullanılırken uygun seçim yapmak oldukça önemlidir. Malzeme seçimi yaparken malzemenin tek bir özelliğinden dolayı seçim yapmak mümkün değildir. Ayrıca malzemenin herhangi bir özelliği de iyileştirilip daha kullanışlı hale getirilebilmektedir. Günümüzde kullanılan malzemeler insanlığa hizmet edip problemleri çözmek için oldukça farklı formlara evirilmektedirler. Önemli olan malzemenin kullanılacağı şartlara uygun olarak seçmektir (Fındık vd., 2008). Malzeme seçimi detaylı mühendislik çalışması gerektirmektedir.

Malzeme seçimi süreci, belirli bir uygulama için en uygun malzemenin belirlenebilmesi adına sistematik bir yaklaşımla gerçekleştirilmelidir. Bu süreç şu temel adımları içermektedir:

- İlk olarak, hedef uygulamaya yönelik gerekli malzeme özelliklerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi,
- Belirlenen kriterlere uygun potansiyel malzemelerin ön elemeden geçirilerek seçilmesi,
- Seçilen malzemelerin performanslarının artırılmasına yönelik gerekli iyileştirme ve geliştirme çalışmalarının yapılması,
- Son olarak, tüm teknik ve işlevsel gereklilikleri en iyi şekilde karşılayan malzemenin nihai olarak tercih edilmesi gerekmektedir.

### 2.1 Malzeme Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Faktörler

Malzeme seçimi yaparken göz önüne almamız gereken karakteristik özellikleri bulunmaktadır. Bu noktada; malzemelerin davranışı, bileşimi, yapısı, çalışma koşulları ve bunların kendi aralarında etkileşimleri en çok önemsenmesi gereken noktalardandır. Malzeme seçiminde dikkate alınması gereken temel kriterler Tablo 2.1’de özetlenmiştir. Uygulama alanına uygun malzemenin belirlenebilmesi için aşağıdaki özellikler değerlendirme sürecinde öncelikli olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2.1: Malzeme Seçimi İçin Genel Yaklaşım (Fındık vd., 2008; Smith, 1979a)

<b>Mekanik dayanım:</b> Malzemenin yük taşıma kapasitesi ve gerilme altındaki performansı.
<b>Süreklilik (duktilite):</b> Deformasyon altında kırılmadan şekil değiştirebilme yeteneği.
<b>Termal ve yapısal stabilite:</b> Yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli kullanımda özelliklerini koruyabilme kabiliyeti.
<b>İmal edilebilirlik:</b> Üretim süreçlerine uygunluk ve işlenebilirlik düzeyi.
<b>Temin edilebilirlik:</b> Malzemenin piyasada bulunabilirliği ve lojistik erişilebilirliği.
<b>Korozyon direnci:</b> Kimyasal ortamlara karşı dayanıklılığı.
<b>Isıl iletkenlik özellikleri:</b> Isı transferi gerektiren uygulamalarda verimlilik düzeyi.
<b>Fonksiyonel/özel özellikler:</b> Elektriksel, manyetik, optik gibi özel uygulamalara uygunluk.
<b>Ekonomik faktörler:</b> Malzeme ve üretim maliyetleri ile sürdürülebilirliği.

Bir malzemenin, iç yapısında kalıcı deformasyon ya da kırılmaya neden olabilecek düzeydeki gerilmelere karşı gösterdiği direnç, mukavemet olarak tanımlanır. Malzeme seçiminde malzemelerin uygun gerilmelere dayanıp dayanamayacağı oldukça önemlidir. Malzeme seçiminde ilk kriter malzemenin kullanım alanına dayanabilmesidir. Örneğin evlerin su tesisatları düşük su basınçlı olduklarından çok dayanıklı çelik borular yerine daha az dayanıklı ve daha pahalı bakır borular seçmek kullanışlı olabilir. Çünkü çelik borular genellikle parçalar halinde gelir ve bağlantı noktalarındaki köşe kısımlarında sızdırmaz dirsekler kıvrılması gerekebilir bu da yüksek tesisat masrafına neden olur. Bakırın tesisat masrafının düşük olması malzeme masrafını telafi eder. Ayrıca bakırın mukavemeti kullanım alanına yeterli olduğu için çeliğin yüksek mukavemetine gerek yoktur. Ayrıca bakır donma olayında çatlama değil esneme davranışı gösterdiğinden bu da kullanım

avantajı sağlar. Genellikle malzeme seçiminde tek bir özellik değil birden fazla özellikler kombinasyon halinde incelenir. Bunlar; malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri ve ekonomik faktörlerdir (Fındık vd., 2008).

Kararlılık olarak da adlandırılan süreklilik malzemenin doğrudan doğruya çalışma halinde sıcaklığına ve sıcaklıktaki dalgalanmalara bağlıdır. Yine radyasyona maruz kalmada sürekliliği etkileyebilmektedir. Sıcaklık sadece malzemenin mukavemetini etkilemekle kalmayıp aynı zamanda mikro yapıda da değişikliklere neden olabilmektedir.

Malzeme kolay elde edilebilir değil ise malzemeyi üretmek pek mantıklı olmayabilir. Bu noktada dikkat etmemiz gereken noktalar malzemenin fiyatı ve istenilen şekli kolayca alabilmesidir. Üretilirlik ve elde edilebilirlik doğrudan ilişkilidir. Tasarlanan malzemenin geliştirilen malzemenin ticari ölçekte, hedeflenen üretim yöntemleriyle uyumlu olarak üretilme yeteneğini ifade eder. Malzeme imalatında asıl amaç standart imalat yöntemleri ile tasarlanacak malzeme kullanmaktır (Crane vd., 1984; Ashby vd., 1987).

Malzemenin korozyon direnci aşağıda yer alan kriterler dikkate alınarak değerlendirilebilir (Smith, 1979b).

- a. Kirlenmeden sakınma.
- b. Basıncı kaplar ve kapalı sistemlerde çatlak oluşumunu önleyerek yapısal bütünlüğün korunması.
- c. Korozi ortamlarda meydana gelen kimyasal etkileşimlerin, malzemenin mekanik dayanımı ve diğer işlevsel özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yaratması.

Eğer malzemeler istenilen yapı ve özellikleri sağlamıyorsa, en az biri metal olmak üzere birden fazla elementin birleştirilmesiyle, alaşım oluşturularak istenen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirilebilir. Geleneksel alaşım geliştirme stratejileri, öncelikle hedeflenen özelliğe göre ana bileşenin seçilmesini, ardından ikincil özelliklerin sağlanması amacıyla diğer yardımcı bileşenlerin eklenmesini temel alır. Bu yöntem, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren Ni esaslı süper alaşımlar, şekil verme kabiliyeti yüksek Al alaşımları ve korozyona karşı dayanıklı paslanmaz çelikler gibi pek çok başarılı alaşımın geliştirilmesinde etkili olmuştur. Ancak geleneksel alaşım tasarım stratejileri, çoğu zaman birden fazla özelliği aynı anda optimize etmede yetersiz kalmakta ve bu da geliştirilebilecek

alaşım çeşitliliğini kısıtlamaktadır. Bu kısıtları aşmak amacıyla Prof. Yeh ve çalışma arkadaşları, “yüksek entropili alaşımlar” olarak adlandırılan alternatif bir alaşım tasarımı yaklaşımını ortaya koymuştur.

Termodinamik, ısı enerjisi ile hareket enerjisi arasındaki ilişkiyi inceleyen fiziksel bir bilim dalıdır. Bu alanın ikinci yasasında geçen “entropi” kavramı, bir sistemdeki düzensizliği ve işe dönüştürülemeyen ısı miktarını tanımlar. Karışım entropisi 1,61'in üzerinde olan ve en az beş farklı element içeren alaşımlar, yüksek entropili alaşımlar olarak sınıflandırılmaktadır.

Yüksek entropili alaşımlar üzerine gerçekleştirilen araştırmalar, bu malzemelerin bileşimleri ve mikro yapıları doğrultusunda yüksek mekanik dayanım, iyi seviyede oksidasyon ve korozyon direnci ile etkileyici aşınma direnci gibi avantajlı özellikler sunabileceğini ortaya koymuştur. Ancak, bu tür alaşımların performansı büyük ölçüde seçilen elementlere bağlıdır. Örneğin, Cu elementi genellikle tercih edilmez çünkü hem segregasyona neden olabilir hem de aşınma direncini olumsuz yönde etkileyebilir. Buna karşılık, yüksek ergime sıcaklığına ve elastik modüle sahip elementler, yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılığı artırmak için tercih edilmektedir. Ayrıca, maliyeti yüksek olan Co elementinin yerine, daha ekonomik olan Mn elementinin kullanıldığı alaşım sistemleri üzerinde de çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Yine de, bu yeni nesil alaşımlar hakkında yürütülen araştırmalar henüz sınırlı sayıda ve gelişim aşamasındadır.

## 2.2 Alaşım Özellikleri

Alaşımlar, en az biri metal olan iki ya da daha fazla kimyasal elementin bir araya gelmesiyle oluşan ve metalik özellik gösteren malzemelerdir. Bir alaşım sistemi, ilgili elementlerin tüm olası bileşimlerini içeren alaşımları kapsamaktadır. İçerdikleri element sayısına göre bu sistemler isimlendirilir; iki elementten oluşanlar “ikili”, üç element içerenler ise “üçlü” alaşım sistemleri olarak tanımlanır. Doğada yaygın olarak bulunan 45 farklı metal ile teorik olarak yaklaşık 990 adet ikili ve 14.000'e yakın üçlü alaşım sistemi oluşturulabilir. Her ikili sistem, yalnızca %1'lik bileşim değişimleriyle 100 farklı alaşım çeşidi üretebilecek potansiyele sahiptir. Günümüzde kullanılan ticari alaşımların büyük bir kısmı, birden fazla element içeren çok bileşenli sistemlerden oluşmaktadır. Bu durum, var olan element kombinasyonlarıyla sınırsız sayıda alaşım üretiminin mümkün olduğunu göstermektedir.

Alaşımlar, sahip oldukları i yapıya göre; alaşım sistemleri ise denge diyagramları doğrultusunda sınıflandırılır (Savaşkan, 2009). Sanayide kullanılan metaller çoğunlukla saf halde değil, belirli özelliklerin kazandırıldığı alaşım formunda tercih edilir. Metal retimi esnasında ergiyik halindeki ana metale, istenilen özellikleri sağlamak amacıyla bir ya da daha fazla alaşım elementi ilave edilerek farklı yapısal ve mekanik niteliklere sahip malzemeler elde edilir (Karaaslan, 2010).

Bir alaşımın yapısal özelliklerini belirleyebilmek için; bünyesinde bulunan fazların türü, her bir fazın oranı, fazlardaki elementlerin bileşim yüzdeleri, bu fazların fiziksel ve kimyasal özellikleri ile alaşım içerisindeki konumları ve dağılımları göz önünde bulundurulur. Alaşımlar ergiyik halde genellikle homojen yapıda, yani tek fazlı sıvı zeltiden oluşur. Katılaştıklarında ise yalnızca bir katı zelti içerebilir veya çok fazlı yapıda olabilirler. Bu kapsamda alaşımlar, tek kristalli ve çok kristalli yapılar şeklinde sınıflandırılabilir (Karaaslan, 2010).

#### Alaşım Yapmanın Avantajları

1. Geniş zellik yelpazesinde malzeme elde edilebilir.
2. Mekanik zellikler; mukavemet, sertlik vb. geliştirilebilir.
3. Fiziksel zellikler; yoğunluk, iletkenlik vb. değiştirilebilir.
4. Isıl işleme uygun hale getirilebilir.
5. Maliyet düşürülebilir.
6. Korozyon ve aşınmaya karşı direnç artırılabilir.

Alaşımların en önemli avantajı, ilave edilen elementlerin ana metale etkisinin bilinmesiyle, uygulamaya özel üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilebilmesidir. Saf metallerin yetersiz kaldığı zorlu koşullarda, yüksek sıcaklık, kimyasal ortam, aşınma vb. uygun alaşımlar tercih edilir. Metaller, kristal yapılarında belirli sayıda yabancı atom barındırabilir. Bu atomlar, ana metalin atomlarının yerine geçerse “yer alan katı zelti”, kafes boşluklarına yerleşirse “arayer katı zelti” oluşur (Megep, n.d.).

## 2.3 Alaşım Türleri

Metalik malzemeler, genel olarak iki temel gruba ayrılır: demir esaslı alaşımlar ve demir dışı alaşımlar. Bu ayırım, dünyada üretim miktarına dayalı bir sınıflandırmadır. Demir esaslı malzemeler, ana bileşen olarak demir içerirken; diğer tüm metalik alaşımlar, demir dışı olarak kabul edilir. Ayrıca alaşımlar, şekillendirme yeteneklerine göre de sınıflandırılabilir. Şekil verilmesi zor olan alaşımlar, çoğunlukla döküm yöntemiyle biçimlendirilir ve döküm alaşımları olarak adlandırılır. Öte yandan, plastik deformasyona uygun, yani kolay şekillendirilebilen malzemelere ise dövme alaşımları denir. Bu tür malzemelerin mekanik dayanımları, soğuk şekillendirme veya ısıtma işlemi gibi yöntemlerle artırılabilir (Erdoğan, 2000).

### 2.3.1 Demir Esaslı Alaşımlar

Demir esaslı alaşımlar, ana bileşen olarak demir içerir. Ayrıca bu alaşımlarda, belirli oranlarda krom ve nikel gibi elementler; daha düşük oranlarda ise molibden ve tungsten gibi elementler bulunabilir. Bu tür alaşımlar; karbür oluşumu, intermetalik faz çökmesi veya katı eriyik sertleşmesi gibi mekanizmalar yoluyla dayanım kazanır.

Demir esaslı malzemeler, dünya genelinde en çok üretilen metal grubu içerisinde yer alır. Bu yaygınlığın temel nedenleri arasında demirin doğada bolca bulunması, ekonomik şekilde elde edilebilmesi, kolay işlenebilirliği ve çok çeşitli özellikler sunması bulunur. Bununla birlikte, bu alaşımların bazı dezavantajları da vardır. En belirgin sorunları, çevresel koşullara karşı düşük korozyon dayanımıdır. Diğer olumsuzluklar arasında yüksek yoğunluk ve zayıf elektrik iletkenliği sayılabilir. Bu alaşımlarda en etkili alaşım elementi karbondur. Karbon oranındaki değişim, malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Eğer alaşımda karbon oranı %2,14'ün altındaysa çelik, bu değer üzerindeyse dökme demir olarak adlandırılır (Satish, 2004). Mukavemetin artırılması amacıyla molibden ve tungsten gibi elementler de katı eriyik içine dahil edilebilir (Bradley, 1979).

### 2.3.1.1 Çelikler

Çelikler, yapılarında %2'ye kadar karbon içeren demir esaslı alaşımlardır. Ancak pratikte kullanılan çeliklerin karbon oranı genellikle %1,5'in altındadır. Bunun yanında çelikler az miktarda mangan, silisyum, fosfor ve kükürt gibi elementler de içerebilir.

Çelikler, kullanım amacına, kimyasal bileşimlerine, üretim kalitelerine ve şekillendirme yöntemlerine göre sınıflandırılabilir. En yaygın sınıflandırma ise karbon miktarına göre yapılır:

- **Düşük karbonlu çelikler:** %0,3'ten az karbon içerir.
- **Orta karbonlu çelikler:** %0,3 ile %0,6 arasında karbon içerir.
- **Yüksek karbonlu çelikler:** %0,6'dan fazla karbon içerir.

Bu sınıflandırma, çeliğin sertliği ve şekillendirilebilirliği gibi mekanik özelliklerini belirlemede temel alınır (Satish, 2004).

### 2.3.1.2 Dökme Demirler

Dökme demirler, yüksek karbon içerikleri nedeniyle şekillendirme işlemlerine uygun olmayan, sadece döküm yöntemiyle biçimlendirilebilen demir alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, demir-sementit veya demir-grafit yapılarında olabilir. Bazı özel dökme demir türlerinde karbon oranı bu sınırın altında da olabilir.

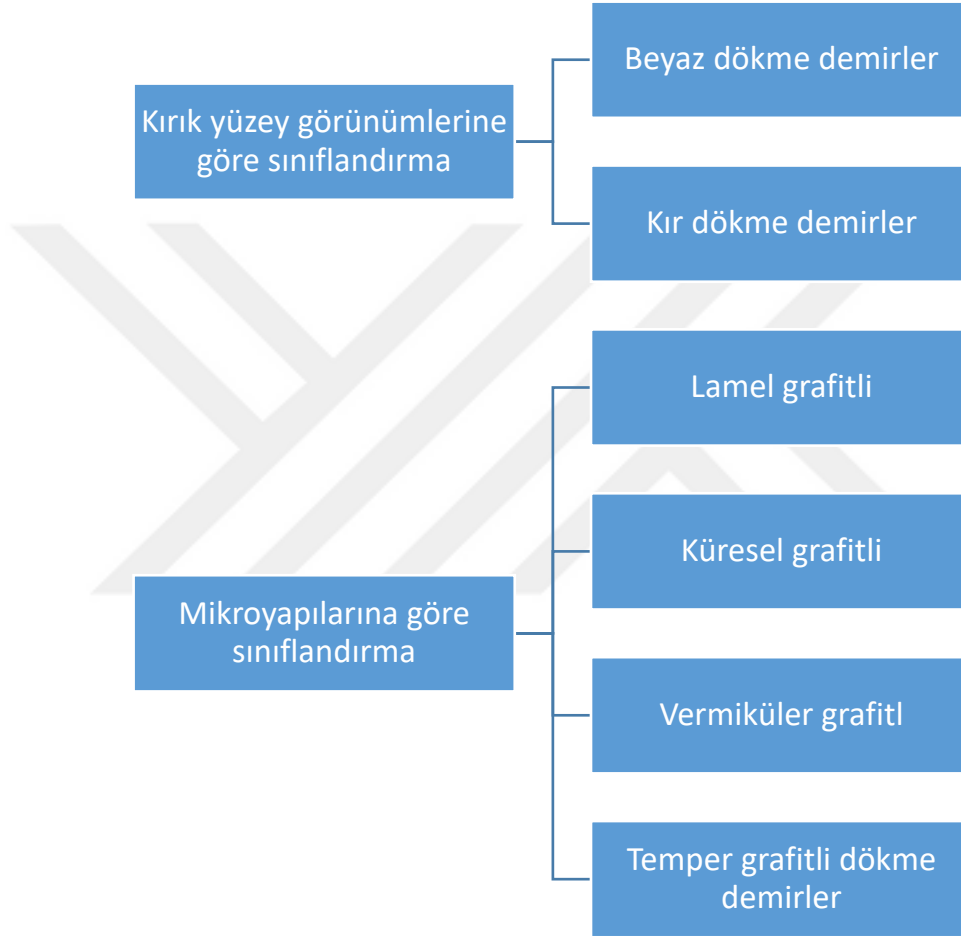
Döküm kolaylığı ve homojen iç yapı istenen durumlarda genellikle ötektik bileşime yakın oranlar tercih edilir. Bu sayede malzeme döküldüğünde istenilen yapıya daha kolay ulaşılır. Dökme demirlerde en önemli alaşım elementi silisyumdur, çünkü bu element ötektik noktanın yerini değiştirerek mikroyapıyı etkiler.

Karbon oranı genellikle %2,5 ile %5 arasında değişir. Katı haldeki yoğunlukları ise yaklaşık 7,2–7,4 g/cm<sup>3</sup> arasındadır.

Demir ve karbonun birleşerek sementit (Fe<sub>3</sub>C) oluşturup oluşturmaması veya karbonun serbest hale geçerek grafit yapısı oluşturması; kullanılan alaşım elementlerine, parçanın soğuma hızına ve bu hıza bağlı olarak parçanın kalınlığına bağlıdır. Eğer parçada grafit oluşması isteniyorsa, bu süreci destekleyen elementler karbon, silisyum, fosfor, bakır ve

nikel gibi elementlerdir. Diğer yandan mangan ve krom ise sementit oluşumunu destekleyen başlıca alaşım elementleridir (Can, 2020).

Dökme demirler, mikroyapılarına ve kırılma yüzeylerinin görünümüne göre çeşitli alt türlere ayrılır. Bu türler detaylı olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Dökme demir sınıflandırılması

### 2.3.2 Demir Dışı Alaşımlar

Periyodik tabloda 92 kararlı izotop içeren elementten 70’i metal özellik taşır. Ancak bunların sadece yaklaşık 30 tanesi sanayide etkin biçimde kullanılmaktadır. Demir dışı metaller arasında üretim miktarı en yüksek olanlar sırasıyla alüminyum, bakır, kurşun, çinko, krom, nikel, magnezyum ve kalaydır. Bazı metaller saf olarak değil, daha çok

alaşımlarda katkı elemanı olarak yer alır. Bu bölümde bu gruba giren önemli demir dışı alaşımlar özetlenmiştir (Gürü ve Yalçın, 2006).

### 2.3.2.1 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, doğada bolca bulunur ve hafifliği sayesinde mühendislikte çelikten sonra en çok tercih edilen metaldir. Çeliğin yaklaşık üçte biri yoğunluğa sahiptir. Bazı alüminyum alaşımları, 500 MPa üzeri akma sınırı gösterebilir. Bu özellikleri sayesinde özellikle uçak ve taşıt üretiminde tercih edilirler.

Alüminyum alaşımları genellikle düşük yoğunluk, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, ayrıca iyi korozyon direnci gibi nitelikler taşır. YMK yapıda olduğu için düşük sıcaklıklarda bile şekillendirilmesi kolaydır. Zayıf noktaları ise düşük erime sıcaklığıdır. Alaşımın dayanımı soğuk ve ısı ile artırılabilir. Bu alaşımlar genelde döküm ya da dövme şeklinde sınıflandırılır. Alüminyum alaşımlarında sık kullanılan elementler arasında bakır, silisyum, mangan, magnezyum ve çinko yer alır. Ayrıca lityum, magnezyum ve titanyum gibi düşük yoğunluklu metallerle de yeni hafif alaşımlar geliştirilmektedir (Can, 2020).

### 2.3.2.2 Bakır Alaşımları

Bakır, saf halde dahi pek çok avantajlı özelliğe sahip olduğu için önemli bir mühendislik malzemesidir. Özellikle yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci, kolay şekillendirme ve iyi lehmlenebilme özellikleri sayesinde elektrik ve elektronik sektöründe geniş yer bulur. Bakırın çinko ile oluşturduğu alaşıma pirinç, kalay ve diğer elementlerle oluşturduğuna ise **bronz** denir. Bronz, pirince göre genellikle daha dayanıklıdır ve korozyon direnci daha yüksektir (Erdoğan, 2001). Demiryolu, havacılık ve metal işleme sektörlerinde sıkça kullanılır. Ancak, bakır alaşımları düşük sertlik ve aşınma direnci eksikliği nedeniyle bazı uygulamalarda sınırlı kalabilir (Zhang vd., 2019; Li, 2022). Ancak bakır ve bakır alaşımlarının zayıf sertlik ve yetersiz aşınma direnci gibi dezavantajları vardır. Aşınmaya dayanıklı bileşenler olarak kullanıldıklarında bileşenlerin hizmet ömrü genellikle büyük ölçüde azalır ve güvenlik tehlikeleri büyük ölçüde artar, bu da bunların mühendislik uygulamalarındaki gelişimini büyük ölçüde sınırlar (Zhang vd., 2021; Wang vd., 2020).

### **2.3.2.3 Magnezyum Alaşımları**

Magnezyum, yeryüzünde alüminyum ve demirden sonra en çok bulunan üçüncü metaldir. Gümüşi gri renkte olup, sanayide kullanılan en hafif metaldir. Kolay işlenebilir ve dövülebilir. Fakat yüksek üretim maliyeti ve oksijenle olan yüksek tepkime eğilimi nedeniyle yaygın kullanımda sınırlıdır. Magnezyumun HSP kristal yapısı nedeniyle, oda sıcaklığında şekillendirilmesi zordur. Bu yüzden genellikle döküm ya da sıcak işlem uygulanarak şekillendirilir. En sık kullanılan alaşım elementleri arasında alüminyum, çinko ve mangan yer alır (Gürü ve Yalçın, 2006).

### **2.3.2.4 Titanyum Alaşımları**

Titanyum, yapısal malzeme olarak 1952'den itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Sahip olduğu yüksek dayanım-ağırlık oranı, yaklaşık 550°C'ye kadar ısıya dayanıklılığı ve çok iyi korozyon direnci sayesinde öne çıkar. Özellikle oksitleyici asitlerde ve klorür içeren ortamlarda oldukça kararlıdır.

Ancak titanyumun yüksek üretim maliyeti, kullanımını bazı alanlarla sınırlandırır. Buna rağmen, özellikle havacılık ve uzay sektöründe, yüksek dayanım ve sıcaklık direnci gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Erdoğan, 2001).

### **2.3.3 Entropi Esasına Göre Alaşımlar**

Entropi esasına göre alaşımlar alt başlıkları ile anlatılmıştır.

#### **2.3.3.1 Orta ve Düşük Entropili Alaşımlar**

Her metal her uygulama için uygun olmayabilir. Örneğin demir sağlamdır ancak korozyona dayanıklı değildir; alüminyum hafiftir ama yumuşaktır. Bu nedenle metal özellikleri alaşımlarla geliştirilir. Alaşımlar sayesinde metallerin mukavemeti artırılır, aşınma direnci yükseltilir ve özel amaçlara uygun yeni malzemeler elde edilir.

Tarih boyunca insanlar ihtiyaçlarına göre yeni alaşımlar üretmiştir. Bronz Çağı'ndan bu yana, alaşımlar genellikle bir veya iki ana element etrafında oluşturulmuştur. Örneğin çelik, demir üzerine karbon eklenerek geliştirilmiştir. Ancak son yıllarda, geleneksel yaklaşımdan

farklı olarak, birden fazla elementin eşit oranlarda kullanıldığı çok bileşenli alaşımlar geliştirilmiştir.

Bu yeni alaşımlar, yüksek karışım entropisi sayesinde daha kararlı katı eriyik yapılar oluşturabilmektedir. Bir alaşımda yer alan element sayısı beş ya da daha fazla olduğunda, karışım entropisi toplam serbest enerjiye ciddi katkı sağlar. Bu da alaşımı faz ayrışmalarına karşı daha dirençli hale getirir (Jien vd., 2016; Wang vd., 2016; Miracle, 2017).

İdeal katı eriyiklerde, karışım entropisi alaşımı oluşturan element sayısı arttıkça yükselir. Özellikle beş veya daha fazla ana alaşım elementi içeren sistemlerde, bu artan entropinin toplam serbest enerjiye etkisi belirgin hale gelir. Bu durum, alaşımın faz ayrışması ya da bileşik oluşumuna karşı direnç kazanmasını sağlayarak katı eriyik yapının daha kararlı olmasına katkı sağlar. Bu yaklaşıma dayanarak, alaşımlar yalnızca bileşenlerine göre değil, aynı zamanda entropi düzeylerine göre de sınıflandırılabilir. Örneğin, tek bir ana element etrafında tasarlanan alaşımlar düşük entropili olarak değerlendirilirken, iki ila dört temel element içerenler orta entropili alaşımlar sınıfına girer. Beş veya daha fazla farklı element barındıran ve her birinin alaşım içindeki oranı %5 ila %35 arasında olan sistemler ise yüksek entropili alaşımlar olarak tanımlanır. Çok bileşenli alaşımlarda karışım entropisi, tüm elementlerin eşit oranda bulunması durumunda en yüksek seviyeye ulaşır. Bu nedenle, çoğu yüksek entropili alaşım çalışmasında, eşit mol oranlarına sahip sistemler tercih edilerek araştırmalar yürütülmektedir (Gali, 2013). Bu yaklaşıma göre alaşımlar üç gruba ayrılır:

- **Düşük entropili alaşımlar:** Genellikle tek ana elemente dayalıdır.
- **Orta entropili alaşımlar:** 2–4 temel element içerir.
- **Yüksek entropili alaşımlar:** 5 veya daha fazla element içerir ve her birinin oranı %5–35 arasında değişir.

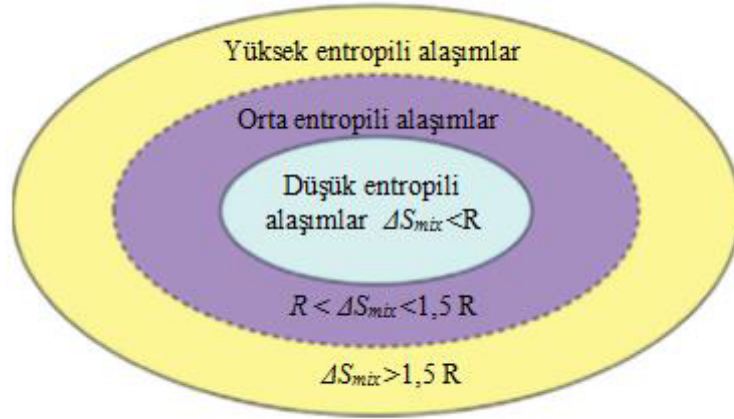
Karışım entropisinin hesabı aşağıda yer alan formül ile yapılır:

$$\Delta S_{\text{mix}} = R \cdot \ln N \quad (1.2)$$

Eşitlik 2.1: Karışım Entropisi

Burada **R** gaz sabiti (8.31 J/K·mol), **N** ise alaşımı oluşturan element sayısıdır.

Yüksek entropili bir alaşımda, bu entropi değeri genellikle 1.6 R'den büyük olmalıdır. Şekil 2.1' de buna yer verilmektedir. Elementlerin eşit oranlarda olması, maksimum entropi değerine ulaşılmasını sağlar. Bu tür alaşımlar, malzeme mühendisliğinde yeni nesil dayanıklı ve kararlı yapıların oluşturulmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 2.2: Karışım entropisine bağlı olarak alaşımlar farklı entropi grupları içinde değerlendirilebilir (Güven vd., 2022)

### 3. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR

Yüksek entropili alaşımlar şu anda malzeme bilimi ve mühendisliğinde büyük araştırma ilgisine sahiptir. Binlerce yıldır insanlar yeni malzemeler geliştirmek, yeni metaller keşfetmek ve yeni alaşımlar icat etmek için önemli çaba sarfetmiştir. Bronz çağından beri alaşımlar, geleneksel olarak 'temel element' paradigmasına göre geliştirilmektedir. Bu strateji, çeliklerdeki demir veya süper alaşımlardaki nikel gibi bir veya iki temel elementle başlar ve gelişmiş özelliklere sahip alaşımlar elde etmek için alaşımlama yaklaşımları kullanılır. Bununla birlikte, yaklaşık on yıl önce alaşım tasarımı için yeni bir teori önerilmiştir. Bu teoride alaşım oluşturmak için eşmolar veya eşmolar'a yakın bir bileşimde birden fazla elementin karıştırılmasını içerir, böylece 'temel element' kavramı yok olur. Bu yöntemle tasarlanan çok bileşenli alaşımlar, Yeh ve arkadaşları tarafından 'yüksek entropili alaşımlar' olarak adlandırılmıştır. Bu alaşımlardaki elementlerin rastgele karışımı, yüksek konfigürasyon entropisinden kaynaklandığı bulunmuştur (Yeh, 2004; Cantor, 2004).

#### 3.1 YEA'ların Yapısı ve Özellikleri

Yüksek entropili alaşımlarda en az beş farklı element, çoğu zaman eşit ya da yakın oranlarda, bazen de küçük miktarda yardımcı elementlerle birlikte kullanılır (Zhang, 2008; Zhang, 2014). Bu çeşitlilik, alaşımın karışım entropisini önemli ölçüde artırır. Elde edilen yüksek entropi, malzemenin katı eriyik fazda kararlı kalmasını sağlar ve böylece istenmeyen intermetalik bileşiklerin oluşumu engellenebilir. Bu özellik, alaşımların yüksek sıcaklıklarda dahi kararlılığını korumasına imkân tanır.

Bu alaşımlar, üretim ve işleme açısından da uygundur; kolay sentezlenebilir, üretilebilir ve analiz edilebilir. Ayrıca geleneksel alaşımlarla elde edilmesi mümkün olmayan niteliklerde malzeme özellikleri sağlama potansiyeline sahiptir (Miracle, 2017).

### 3.2 Uygulama Alanları

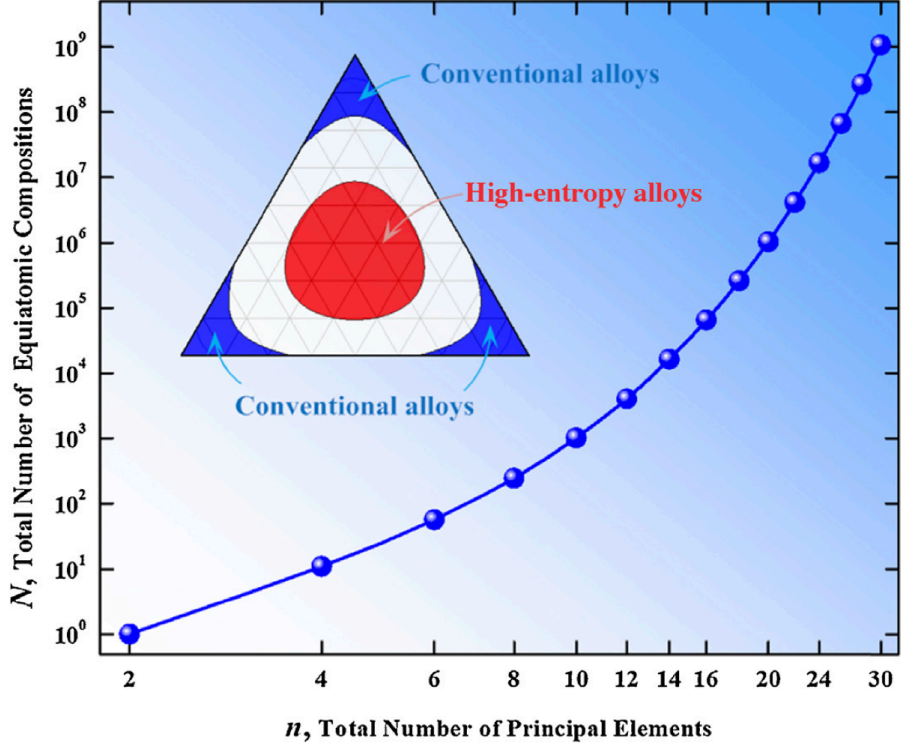
YEA'lar sahip oldukları çok yönlü özellikler sayesinde çeşitli mühendislik alanlarında geniş kullanım potansiyeli taşır. Bu alanlar:

- **Yüksek aşınma dayanımı** ile sürtünmeye maruz kalan parçalarda,
- **Isıya dayanıklı yapılarıyla** termal bariyer kaplamalarda,
- **Radyasyon ve korozyon dirençleriyle** nükleer teknolojilerde,

Düşük yoğunluklarıyla taşıt ve havacılık sektörlerinde tercih edilmektedir (Daniel ve Svensson, 2014; Ioannis ve Aristeidakis, 2016; Yeh vd., 2016). Yüksek entropili alaşımlar; termal ve kimyasal kararlılık, korozyon ve aşınmaya karşı direnç, sürünme dayanımı, manyetik özellikler ve yüksek sertlik gibi avantajları sayesinde pek çok farklı alanda kullanılmaktadır (Murty, 2018). Alaşım tasarlarırken, araştırmacılar eskiden Şekil 3.1' de gösterildiği gibi tasarım alanının yalnızca küçük bir bölümünü kaplayan geleneksel alaşım geliştirmek için kullanılan faz diyagramının köşelerine odaklanmışlardır.

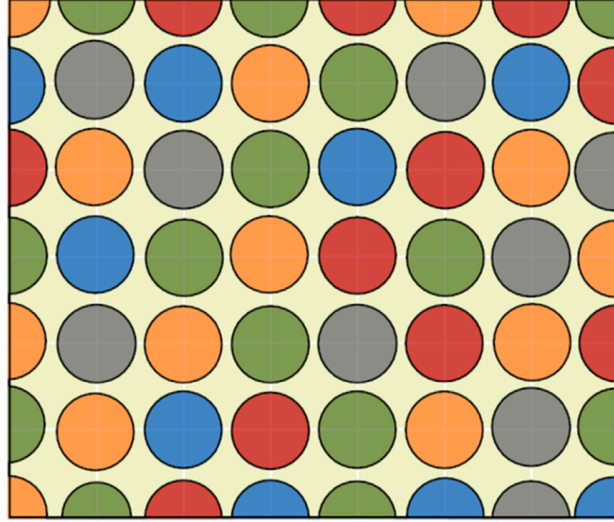
### 3.3 Malzeme Tasarımında Paradigma Değişimi

Klasik alaşım tasarımında, araştırmacılar genellikle faz diyagramlarının köşe noktalarındaki bileşimleri baz alırdı. Ancak bu sınırlandırılmış alan, çoğu zaman istenen malzeme özelliklerine ulaşmayı engelliyordu. İşte YEA fikri, bu sınırlamaların dışına çıkarak faz diyagramının merkez bölgelerinde yer alan, çoklu element kombinasyonlarına yönelmeyi mümkün kılmıştır (Cantor, 2004; Zhang vd., 2008). Prensipte olarak, geleneksel yaklaşımda,  $n$  farklı temel element kullanılarak yalnızca  $n$  tipte alaşım elde edilebilir. Bununla birlikte, eş atomlu bir alaşım oluşturmak için ( $p = 2, 3, \dots, n$ ) toplam  $n$  element arasından  $p$  elementlerinin herhangi bir kombinasyonu seçilecekse, olası alaşımların toplam sayısı ( $N$ ) artırılabilir. Alaşımların toplam sayısı  $n < 3$  olduğunda önemli ölçüde farklılık göstermez; ancak  $n$  arttıkça,  $N$ 'nin  $n$ 'ye üstel bağımlılığı nedeniyle bu fark büyüyebilir. Şekil 3.1' de gösterildiği gibi,  $n = 20$  için 106 olası eş atomlu alaşımlar elde edilebilir. Hatta 30 farklı elementte alaşımların toplam sayısı yaklaşık bir milyara kadar ulaşabilir. Literatürde Yeh, yüksek entropili alaşımları en az beş element içeren alaşımlar olarak tanımlamıştır (Yeh, 2004).



Şekil 3.1: Eş atomlu bileşimlerin toplam sayısının ana elementlerin sayısına göre değişimi

YEA' lar üzerinde devam eden araştırmaların ana temalarından biri, YEA' larda entropi karışımı ile faz seçimi arasındaki olası etkileşimin anlaşılmasıdır. Yüksek entropili alaşımlar Şekil 3.2'de modellenmiştir. Şekilde 3.2'de gösterildiği gibi en az 5 elementin benzer oranlarda karıştırılması ile elde edilir.



Şekil 3.2: Çok bileşenli alaşımda farklı renklerdeki dairelerle temsil edilen elementlerin rastgele karışımına ilişkin gösterilen kavram

#### Kristal yapı tahmini:

- $VEC < 6,87$  ise: HMK (Hacim Merkezli Kübik)
- $VEC \geq 8,00$  ise: YMK (Yüzey Merkezli Kübik)
- $6,87 < VEC < 8,00$  ise: HMK-YMK arası geçişli yapı oluşabilir (Huo vd., 2015b).

Eşitlik 3.1’de alaşımın valans elektron konsantrasyonu hesaplanmakta olup; bu değer, alaşımı oluşturan her bir elementin valans elektron sayısı ile atomik oranlarının çarpımının toplamına dayanarak belirlenmektedir. VEC değeri, elde edilen fazın kristal yapısı hakkında öngörüde bulunmak açısından önemli bir parametredir.

$$VEC = \sum_{i=1}^n (c_i (VEC)_i)$$

Eşitlik 3.1: Valans Elektron Konsantrasyonu

Burada:

- $c_i$ : Her bir elementin molar oranı,
- $VEC_i$ : O elementin valans elektron sayısıdır.

YMK yapısı veren elementler arasında Nikel, Mangan, Bakır, Karbon; HMK yapısı oluşturanlar ise Krom, Molibden, Silisyum, Niyobyum yer alır. Ancak Mn'nin üretim sürecinde buharlaşabileceği unutulmamalıdır. Yüksek entropi fikri ilk kez Jien-Wei Yeh tarafından ortaya atılmıştır. Yeh'in çalışmasına göre, yüksek karışım entropisine sahip alaşımlar, daha kararlı katı çözeltilerine sahiptir çünkü bu durum, alaşımın Gibbs serbest enerjisini düşürür. Bu sayede, istenmeyen intermetalik bileşiklerin oluşumu baskılanabilir. Yeh, yüksek bir entropi değerinin katı çözeltilerinin Gibbs serbest enerjisini azalttığını, bunun da daha düşük konfigürasyon entropili intermetaliklerin oluşumuna yol açtığını belirtmektedir. Eşitlik 3.2'ye göre katı çözeltiler daha yüksek karıştırma entropisi ile stabilize edilebilir. YEA' lar için yüksek entropili karakteri özellikle eşmolar oranının kompozisyon tasarımı ile bulunabilir (Yeh, 2006). Belirli bir bileşimdeki  $\Delta G$ , aşağıdaki verilen denklemle belirlenen, sıvı fazın  $\Delta G$  karışımını karışma serbest enerjisi ile orantılıdır. Bu orantı aşağıda verilmiştir.

$$\Delta G_{\text{karışım}} = \Delta H_{\text{karışım}} - T \Delta S_{\text{karışım}}$$

Eşitlik 3.2: Gibbs serbest enerji formülü

Burada T mutlak sıcaklık,  $\Delta H$  karışım entalpisi ve  $\Delta S$  karışım entropisidir (Takeuchi, 2005). Bir alaşım sisteminin katılaşmasını analiz etmek için katı ve katı arasındaki Gibbs serbest enerjisi farkı soğutulmuş durumlarda hesaplanmalıdır. Ancak çok elemanlı sistemler için  $\Delta G$ ' nin doğru bir şekilde hesaplanması zordur. Karışım entropisi  $\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i$  denklemi ile ifade edilir. Burada R gaz sabiti,  $c_i$  i' inci elementin molar fraksiyonu ve n, elementlerin toplam sayısıdır.

$\Delta S_{\text{mix}}$  kontur haritası gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi alaşım bileşimi merkez bölgeye ne kadar yakın ise  $\Delta S_{\text{mix}}$  değeri de o kadar büyük olur. Şekil 3.3' de gösterildiği gibi şeklin tam merkezinde  $\Delta S_{\text{mix}}$  değeri maksimum değerine ulaşır. Eşitlik 3.3' de eşitlik formülüne yer verilmiştir. Şekil 3.3' de  $\Delta S_{\text{mix}}$  değeri 9, 15 J/mol K' ye ulaşır. Tm 2000 K ergime noktasına sahip tipik bir alaşım için  $T_m \Delta S_{\text{mix}} \sim 20$  kJ/mol lük toplam enerji kazancı olduğu gözlemlenmiştir. Richard kuralına göre çoğu metalik alaşımında bu enerji kazancı alaşımın entropik stabilizasyonu için yeterlidir. Yüksek entropili alaşımlarda karışım entropisi aşağıdaki gibi hesaplanır: (He vd., 2016)

$$\Delta S_{\text{mix}} = R \ln n \quad [2]$$

### Eşitlik 3.3: Karışım Entropisi

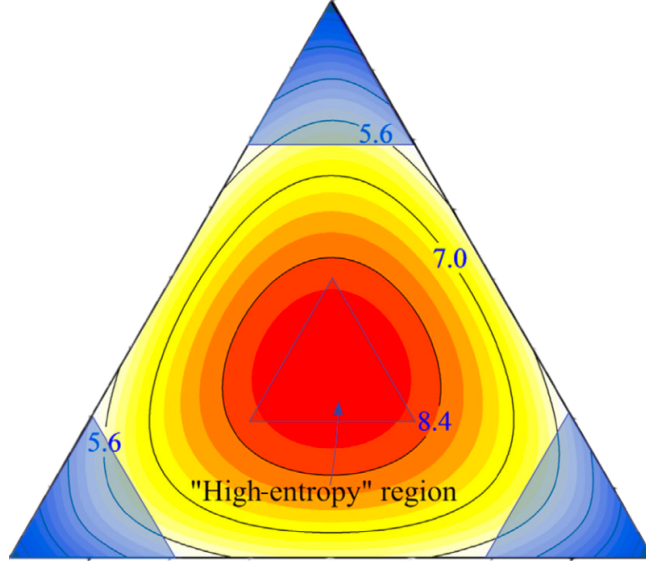
(n: toplam element sayısı)

Bu durumda karışım entropisi maksimuma ulaşır. Örneğin, beş elementli eşmolar bir sistemde  $\Delta S_{\text{mix}}$  daha yüksek olurken, bu değer merkez bileşime yakınlaştıkça daha da artar.

Yapılan araştırmalarda, ergime sıcaklığı yaklaşık 2000 K olan tipik bir alaşım için  $T_m \times \Delta S_{\text{mix}}$  değeri yaklaşık 20 kJ/mol seviyelerinde enerji kazancı sağlayabilir. Richard kuralı bu kazancın çoğu metalik sistemde, kararlı katı çözeltili oluşumu için yeterli olduğunu belirtmektedir.

#### **Sonuç Olarak:**

- Yüksek entropili alaşımların kristal yapısı VEC ile tahmin edilebilir.
- Yüksek entropi, alaşımın kararlı bir katı çözeltili fazı oluşturmasına yardımcı olur.
- Karışım entropisi, alaşımın tasarım merkezine ne kadar yakınsa, o kadar yüksek olur.
- YEA'lar, çoklu element yapısı sayesinde entropik olarak stabilize olurlar ve bu da onların üstün termal, mekanik ve kimyasal özellikler kazanmalarını sağlar.



Şekil 3.3:  $\Delta S_{mix}$  (J/mol K) şematik üçlü alaşım sistemi üzerindeki kontur grafiği

### 3.4 Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Yöntemleri

#### 3.4.1 Ergitme ve Döküm Yöntemleri

Ergitme ve döküm yöntemleri kendi içlerinde farklı yollar içermektedir. Bunlardan en sık kullanılanları indüksiyon ergitme, vakum ile ark ergitme ve sürekli döküm yöntemleridir.

##### 3.4.1.1 İndüksiyon Ergitme

İndüksiyon ergitme yönteminde, indüksiyon ergitme ocağı kullanarak sıcaklığı ergime noktasına getirmek için metali ısıtma ve sonunda metali eritme işlemidir. İndüksiyon ergitme ocağına Şekil 3.4' de yer verilmiştir. Genellikle kontrollü bir atmosfer veya vakum altında, elemanları eritmek için elektromanyetik endüksiyon kullanır. Hassas sıcaklık kontrolü ve azaltılmış kirlenme ile kullanımı kolaylaştırır. Havacılık ve otomotiv bileşenlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.4: İndüksiyon ergitme ocağı

#### 3.4.1.2 Vakum Ark Ergitme

Elementel metaller, minimum oksidasyonu garanti eden bir ark fırını kullanılarak vakum altında eritilir. Erimiş alaşım daha sonra külçe üretmek için katılaştırılır. Yüksek saflık, homojenlik ve ölçeklenebilirlik gibi özellikleri ile oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Vakumlu ark eritme yöntemi yüksek entropili alaşım hazırlanırken en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Kullanılan yöntem yüksek sıcaklık ile gerçekleştiği için, bazı düşük ergime ve kaynama noktasına sahip metaller işlem sırasında buharlaşmaya uğrayabilir. Vakum ark ergitme, elementel metallerin oksidasyon riskini en aza indirerek eritilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemde, metaller vakum ortamında, özel bir ark fırını yardımıyla eritilir ve sonrasında katılaştırılarak külçe haline getirilir. Bu işlem, yüksek saflıkta, homojen ve kontrollü yapıda alaşımlar elde edilmesine olanak tanır. Aynı zamanda üretim ölçeği açısından da esnek bir yöntemdir.

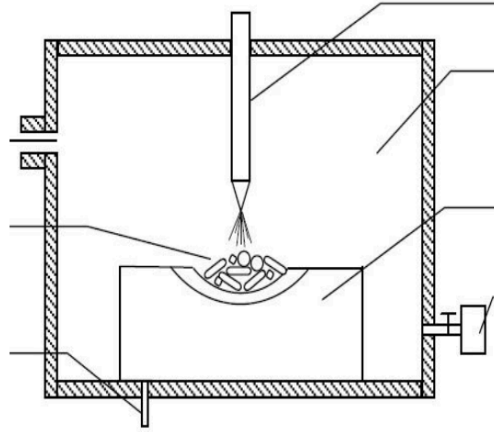
Yüksek entropili alaşımların üretiminde en sık tercih edilen yöntemlerden biri olan vakum ark ergitme, yüksek sıcaklık gerektiren bir işlemdir. Ancak bazı elementler özellikle düşük kaynama ve erime noktalarına sahip olanlar bu yüksek sıcaklık nedeniyle buharlaşabilir. Bu nedenle, bu yöntem uygulanırken alaşım bileşiminin dikkatle kontrol edilmesi büyük önem taşır. Buharlaşma sorunlarının önüne geçebilmek için alternatif olarak indüksiyon fırınları ya da rezistansla ısıtmalı sistemler kullanılabilir (Gao vd., 2016; Zhang, 2014) Bu yöntemin bir dezavantajı, katılma hızının düşük olmasıdır. Bu durum, elementlerin

soğuma sırasında ayrışarak farklı bölgelerde yoğunlaşmasına neden olabilir. Sonuç olarak, elde edilen malzeme homojenliğini kaybedebilir ve istenmeyen heterojen mikroyapılar ortaya çıkabilir.

Şekil 3.5’ de de gösterildiği gibi ark ertitme cihazının sistem ve ekipmanları aşağıda belirtildiği gibidir:

- **Su soğutmalı bakır tabla:** Metallerin üzerine yerleştirilip eritildiği yüzeydir.
- **Hareketli elektrot:** Elektrik arkı oluşturarak metalleri eriten parçadır.
- **Vakum haznesi:** Tüm işlemin gerçekleştirildiği, hava geçirmez kapalı bölmedir.
- **Gaz besleme tüpü:** İstenilen atmosfer koşulunu sağlamak için gerekli inert gaz girişini kontrol eder.
- **Vakum sistemi:** Oksijensiz ortamı oluşturur, metallerin oksidasyonunu önler.
- **Gözlem penceresi:** Sürecin dışarıdan izlenmesine olanak tanır.

Bu donanımlar bir araya geldiğinde, yüksek kontrollü ortamda kaliteli alaşımların üretilmesini mümkün kılar.



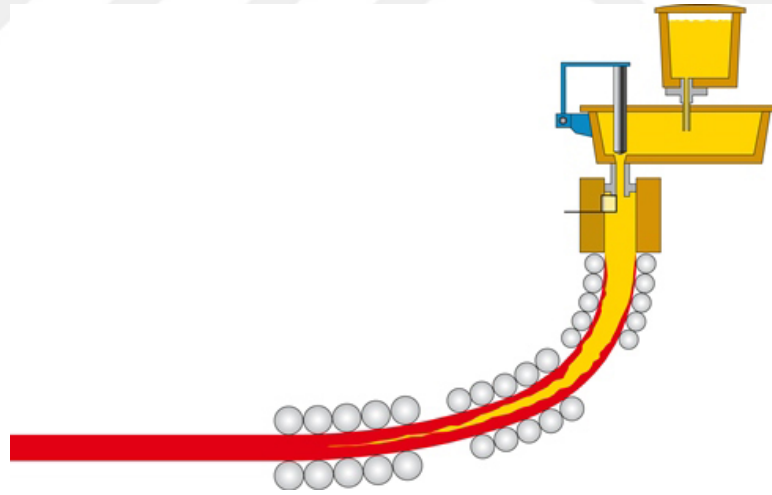
Şekil 3.5: Vakumlu ark ertitme sistemi şematik gösterimi

İşlem öncesinde, vakum odası ile bakır pota, iç yüzeylerinde kalmış olabilecek yabancı maddeleri ve oksijen kalıntılarını gidermek amacıyla oksijenli su kullanılarak titizlikle temizlenir. Temizlik işleminin ardından, hazırlanacak alaşımın elementel bileşenleri bakır potanın içine yerleştirilir.

Bakır pota, vakum ark ergitme cihazında uygulanan 4000°C'ye kadar ulaşabilen aşırı yüksek sıcaklıklara maruz kalacağından, erime veya deformasyonu önlemek amacıyla sürekli olarak basınçlı su ile etkin şekilde soğutulmaktadır. Bu soğutma, sistemin güvenli ve verimli çalışması için kritik bir rol oynar.

### 3.4.1.3 Sürekli Döküm

Sürekli döküm yöntemi içi dolu ya da boş olan uzun malzemelerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Yöntemde sıvı maden su ile soğutulan bir kalıptan geçirilerek şekil verilir. Su dolu kalıp madeni soğuttuğu için katı hale dönüşmesini sağlar. Sürekli akan maden kalıptan geçip şekil aldığından bu yöntem sürekli döküm yöntemi ismi verilmektedir. Şekil 3.6' da yöntem şematize edilmiştir. Erimiş alaşımın dönen bir bakır çarkta hızla soğutulduğu ve ince mikro yapılara sahip ince şeritlerin oluşturulduğu yüksek hızlı bir işlemdir. Ergitilmiş alaşım sürekli döküm hattında katılaştırılarak belirli şekillerde üretilir (Martin ve Lopez, 2012).

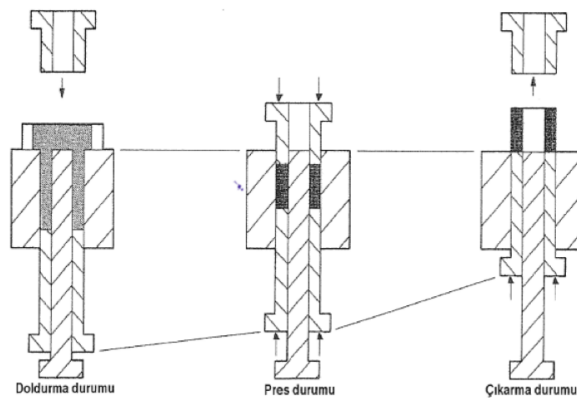


Şekil 3.6: Sürekli döküm yöntemi şematik gösterimi

### 3.4.2 Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz metalurjisi, metal tozlarının kullanıldığı üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, ilk olarak metal tozları elde edilir, ardından bu tozlar uygun oranlarda karıştırılarak şekillendirme işlemi için hazırlanır. Tozların şekil kazanması genellikle presleme yoluyla sağlanır. Üretim sürecinde en yaygın olarak sıcak presleme ve soğuk izostatik presleme teknikleri kullanılır. Yaygın uygulamalarda, tozlar soğuk izostatik presle sıkıştırıldıktan sonra, vakum ya da kontrollü bir atmosfer altında ısıtılarak sinterleme işlemi uygulanır. Eğer bu sinterleme sürecinden sonra toz malzeme sıcak dövme ile şekillendirilirse, parçanın mikroyapısı daha homojen hale gelir ve elde edilen malzeme daha üstün mekanik özellikler kazanır.

Bu teknikte toz metali istenen şekillere sıkıştırılarak ve parçacıkları birbirine bağlamak için sinterleyerek malzemeler oluşturulur. Bu teknik, minimum atıkla yüksek hassasiyetli bileşenler üretme kabiliyeti nedeniyle yüzey kaplamalarında ve üretim endüstrilerinde uygulamalara sahiptir. Metal tozları atomizasyon, kimyasal indirgeme veya elektroliz gibi yöntemler kullanılarak üretilir. Üretilen tozlar, bir kalıp kullanılarak yüksek basınç altında sıkıştırılır ve parçacıkların kaynaşması için kontrollü bir atmosferde ısıtma işlemi sağlanır böylece yüksek mukavemet ve yoğunluk elde edilir. Şekil 3.7' de toz metalurjisi ile üretim tekniği şematize edilmiştir (German, 1984).



Şekil 3.7: Toz metalurjisi sıkıştırma işlemi

Bu kaplamalar, havacılık, otomotiv ve takım gibi endüstrilerde korozyon direnci, aşınma direnci veya termal yalıtım için kullanılır. En büyük avantajı minimum atık üretimi ile çevre dostu bir tekniktir. Ancak, toz üretimi ve sıkıştırma için gereken ekipman, kalıplar ve aletler pahalıdır. Bu nedenle yüksek üretim maliyet gerektirir. Küçük ve orta boy parçalar için en uygundur. Sıkıştırma ve sinterleme sırasında yoğunluk sorunları nedeniyle büyük bileşenler üretmek zordur. Buda sınırlı bileşen boyutuna neden olur. Parçaları genellikle bir miktar gözenekliliği koruduğu için mekanik mukavemet azalabilir ve bu nedenle ikincil işlemler olmadan yüksek stresli uygulamalar için kullanılamayabilir.

Tüm malzemeler için uygun değildir. Yüksek ergime noktalarına veya düşük sünekliğe sahip metallerin etkili bir şekilde işlenmesi zor olabilir. Karmaşık şekiller karmaşık kalıplar gerektirir ve düzgün bir şekilde sıkıştırılması zor olabilir, bu da yoğunluk değişimlerine ve daha zayıf parçalara yol açabilir. Sinterleme işlemi genellikle kirlenmeyi veya oksidasyonu önlemek için atmosferin hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir ve bu da üretim sürecine karmaşıklık katar. Bu nedenlerden dolayı çok kullanılan bir yöntem değildir. Bu teknik belirli uygulamalar için oldukça verimli bir işlem olsa da bu sınırlamalar bazı endüstrilerde kullanımını kısıtlayabilir veya dezavantajlarını azaltmak için ek adımlar gerektirebilir (M., 1996).

### **3.4.2.1 Sıcak Presleme/Sinterleme**

Mekanik olarak alaşımlanmış tozlar, yoğun, homojen malzemeler oluşturmak için aynı anda sıkıştırılır ve ısıtılır. Karmaşık şekiller üretmek için uygundur. Kesici takımlar ve aşınmaya dayanıklı parçaların üretimine oldukça elverişlidir. Malzemelerin kontrollü bir atmosferde ana bileşenin ergime noktasının üçte biri kadar altındaki bir sıcaklıkta tutulmasıdır. Bu sıcaklıklarda, toz parçacıkları birbirleriyle kimyasal bağlar oluşturarak birleşmeye başlar ve bu süreçte yeniden kristalleşme ile birlikte tane büyümesi meydana gelir. Koruyucu gaz atmosferi hem yüzeydeki oksitlerin giderilmesini sağlar hem de parçanın çevresiyle reaksiyona girmesini engeller. Böylece, malzemenin yapısal dayanımı ve bütünlüğü önemli ölçüde iyileşir.

### **3.4.2.2 Soğuk İzostatik Presleme**

Tozlar, oda sıcaklığında tekdüze basınç altında sıkıştırılır ve ardından sinterlenir. Tekdüze yoğunluk dağılımı sağlar. Biyomedikal implantlar ve ince kaplamalar için kullanılmaktadır.

### **3.4.3 Eklemeli İmalat**

Eklemeli imalat, dijital bir üç boyutlu modelden malzemenin katman katman biriktirilmesiyle parça üretimidir. Toz yatağı füzyon, yönlendirilmiş enerji biriktirme, bağlayıcı püskürtme ve tel ark gibi süreçleri kapsar. Karmaşık geometri ve kişiselleştirme için esneklik, malzeme ve zaman tasarrufu sağlar; ancak yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik, anizotropi ve boyutsal doğruluk gibi zorluklar içerir. Havacılık, enerji ve biyomedikal alanlarında prototipten nihai ürüne geniş kullanım bulur. Yüksek entropili alaşımlarda soğuma hızı, atmosfer ve enerji yoğunluğu optimizasyonu mikroyapı ve performansı belirler.

#### **3.4.3.1 Seçici Lazer Eritme**

Bir lazerin alaşım tozlarını seçici olarak eriterek 3 boyutlu bir nesne oluşturduğu işlem yöntemidir. Talep üzerine şekil özelleştirmeye olanak tanıyan yöntem olduğundan karmaşık geometrilere sahip üretimlerde avantaj sağlar. Havacılık ve tıbbi cihazların üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### **3.4.3.2 Elektron Işını Eritme**

Seçici lazer eritmeye benzer, ancak ısı kaynağı olarak bir elektron ışını kullanır. Vakumda çalışır, kirlenmeyi azaltır bu da avantaj sağlar kullanımında. Yüksek performanslı yapısal parçaların üretiminde kullanılır. Bu yöntemlerin her birinin maliyet, ölçeklenebilirlik ve yüksek entropili alaşımın istenen özellikleri gibi faktörlere dayalı belirli avantajları ve sınırlamaları vardır. Üretim tekniğinin seçimi genellikle alaşım bileşimine ve hedef uygulamasına bağlıdır.

### 3.5 Sınıflandırma ve Termodinamik Hesaplamalar

YEA' ların standartlaşmış bir sınıflandırması bulunmadığından bileşim özellikleri açısından eşit atomlu veya eşit atomlu olmayan alaşımlar olarak ayırım yapılabilir. Bu tür yüksek entropili alaşımlardaki elementlerin sayısı genellikle 4 ile 6 arasında değerler almaktadır. Dünya rekoru ise 20 farklı bileşenden oluşan eş atomlu çok bileşenli alaşım tasarlayan Cantor ve Alain Vincent'a aittir (Murty vd., 2019). Bilimsel çalışmalarda eskiden eşit atomlu YEA' ların geliştirilmesine odaklanılmışken, son yıllarda ise yüksek bileşim alanı ve üstün özellikleri nedeniyle eşit atomlu olmayan YEA' lar dikkat çekmektedir.

YEA' lar genel olarak katı çözeltiler, nano boyutlu intermetaliklerden ve amorf fazlardan oluşur. Bunların arasında üstün özelliklerinden dolayı en çok katı çözeltiler fazlarının elde edilmesi beklenir. Yüksek entropili alaşımlarda faz bileşenlerini doğru bir şekilde tahmin etmek yalnızca temel açıdan değil, aynı zamanda çeşitli uygulamalar için de büyük zorluk olmuştur (Murty vd., 2019).

Hume-Rothery kurallarına göre, iki elementin bir araya gelerek katı eriyik oluşturabilmesi için bazı temel kriterlerin sağlanması gerekir. Bu kriterler; benzer kristal yapılara sahip olmaları, atom yarıçapları arasındaki farkın küçük olması, benzer elektron yoğunluğuna sahip olmaları ve elektronegatiflik farklarının düşük olmasıdır (Liu vd., 2015) Ancak yüksek entropili alaşımlarda sadece bu klasik kurallar yeterli olmamakta, karışım entalpisi ve karışım entropisi gibi termodinamik parametreler de önemli rol oynamaktadır. Bu tür alaşımlarda karışım entalpisi genellikle  $-40$  ila  $+10$  kJ/mol aralığında olmalı, atom yarıçapları arasındaki fark ise %12'yi geçmemelidir. Zhang ve arkadaşları ile Guo ve arkadaşları yaptıkları araştırmalarda, katı eriyiklerin intermetalik bileşikler yerine oluşmasını sağlayan temel parametrelerin; karışım entalpisi, karışım entropisi ve atomik boyut farkı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu üç parametre doğru analiz edildiğinde, alaşımın hangi fazları oluşturabileceği önceden tahmin edilebilir hale gelir (Zhang vd., 2008; Guo, 2011).

Karışım Entropisi, bu değer, alaşımı oluşturan elementlerin oranları eşit olduğunda maksimum seviyeye ulaşır. Aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_i^n c_i \ln c_i$$

Eşitlik 3.4: Karışım Entropisi

Karışım entropisi yukarıda belirtilen Eşitlik 3.4'deki formül ile hesaplanır.  $\Delta S_{\text{mix}}$  değeri bileşenlerin molar oranları eşit olduğunda en yüksek değerlerini almaktadır. (Tian vd., 2015) Burada R gaz sabitidir (8,314 J/mol·K),  $c_i$  ise her bir elementin mol oranını temsil eder.

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, j \neq i}^n (\Omega_{ij} c_i c_j)$$

Eşitlik 3.5: Karışım Entalpisi

Karışım entalpisi yukarıda verilen Eşitlik 3.5' deki formül ile hesaplanır.  $\Delta H_{xy}$  ikili alaşımları aşağıda verilen Takeuchi ve ark.(Takeuchi vd., 2005) tarafından oluşturulan tablo sayesinde hesaplamalar yapılabilir. Bu tabloya Tablo 3.1'de yer verilmiştir. Sonuç olarak, bu parametreler yardımıyla yüksek entropili alaşımların mikroyapı davranışı ve faz oluşumu tahmin edilebilir, bu da tasarım sürecini daha kontrollü ve verimli hale getirir.

Tablo 3.1: Miedema modeline göre hesaplanmış, karışım entalpi değerleri  $\Delta H_{mix}$  (kJ/mol)  
(Manzoni vd., 2013)

	Fe	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Cu	Mn	V	Nb
Fe	Fe	-2	-1	-1	-11	-17	13	0	-7	-16
Ni	-2	Ni	-7	0	-22	-35	4	-8	-18	-30
Cr	-1	-7	Cr	-4	-10	-7	12	2	-2	-7
Co	-1	0	-4	Co	-19	-28	6	-5	-14	-25
Al	-11	-22	-10	-19	Al	-30	-1	-19	-16	-18
Ti	-17	-35	-7	-28	-30	Ti	-9	-8	-2	2
Cu	13	4	12	6	-1	-9	Cu	4	5	-4
Mn	0	-8	2	-5	-19	-8	4	Mn	-1	-4
V	-7	-18	-2	-14	-16	-2	5	-1	V	-4
Nb	-16	-30	-7	-25	-18	2	-4	-4	-1	Nb

Literatür incelemeleri sonucunda, yüksek entropili alaşımların tasarımında bazı temel ampirik kriterlerin dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur. Bu kriterler; termodinamik istikrar için kullanılan  $\Omega \geq 1.1$  değeri, atomik yarıçap farkı, elektronegatiflik farkı ve değerlik elektron konsantrasyonu gibi parametreleri içermektedir.

Basit katı eriyik fazlarının oluşabilmesi için aynı anda aşağıdaki koşulların sağlanması gerekir:

- Karışım entalpisi  $-22 \leq \Delta H_{mix} \leq 7$  kJ/mol aralığında olmalıdır.
- Atomik boyut farkı ( $\delta$ ) %8,5'ten küçük olmalıdır.
- Karışım entropisi  $\Delta S_{mix}$  ise 11 ile 19,5 J/K·mol arasında olmalıdır.

Eğer entalpi değeri çok pozitif olursa faz ayrışmaları gözlenebilir. Aşırı negatif olması durumunda ise intermetalik fazların oluşumu artar. Bu da istenen tek fazlı katı eriyik yapının oluşmasını engeller. Atomik boyut farkı ne kadar küçükse, basit yapılar oluşturma ihtimali o kadar artar. Öte yandan, karışım entropisinin yüksek olması, tek fazlı katı eriyik yapılarının termodinamik olarak daha kararlı hale gelmesinde kilit rol oynar.

Karışım entalpisi ve entropisi dışında, valans elektron konsantrasyonu ve atomik yarıçap farkı gibi kriterlerin de faz oluşumunu etkileyen önemli etkenler olduğu bilinmektedir. Her ne kadar bu iki parametre hakkında yapılan çalışma sayısı sınırlı olsa da, kristal yapı oluşumunu belirlemede önemli rol oynadıkları ifade edilmektedir. Alaşımda kullanılan elementlerin türü, ortaya çıkacak kristal yapının belirlenmesinde doğrudan etkilidir.

Ortalama Valans Elektron Konsantrasyonu değeri, alaşımı oluşturan her bir elementin valans elektron sayısı ile alaşımdaki atomik oranlarının çarpımının toplamı alınarak hesaplanmakta olup, bu hesaplama aşağıda verilen Eşitlik 3.6 da yer alan denklem aracılığıyla gerçekleştirilir.

$$VEC = \sum_i^n (c_i (VEC)_i)$$

Eşitlik 3.6: Ortalama valans elektron konsantrasyonu

Yukarıda verilen ortalama valans elektron konsantrasyonunda  $c_i$ , ilgili elementin mol fraksiyonunu,  $(VEC)_i$  ise o elementin valans elektron sayısını ifade eder. Geçiş metallерinde bu değer, toplam valans elektron sayısına göre belirlenir (Tian, 2015).

Atomal boyut farkı ise Eşitlik 3.7' de yer alan denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

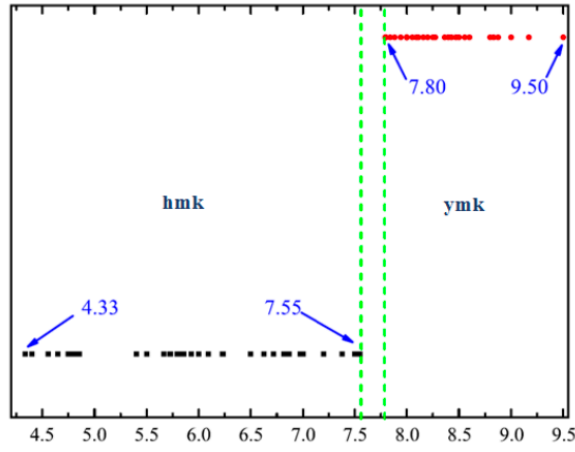
$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)}$$

Eşitlik 3.7: Atomal boyut farkı

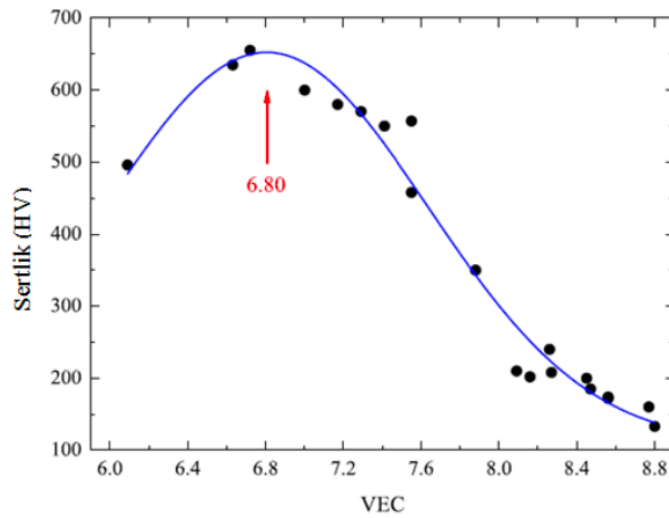
Yukarıdaki denklemde  $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$  burada,  $r_i$  her bir elementin atomik yarıçapı,  $c_i$  mol oranı ifade eder (Tian vd., 2015).

Tian ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan analizde, 100 farklı YEA örneği incelenmiş ve YMK kristal yapıya sahip alaşımların VEC değerlerinin, HMK yapılara göre daha yüksek

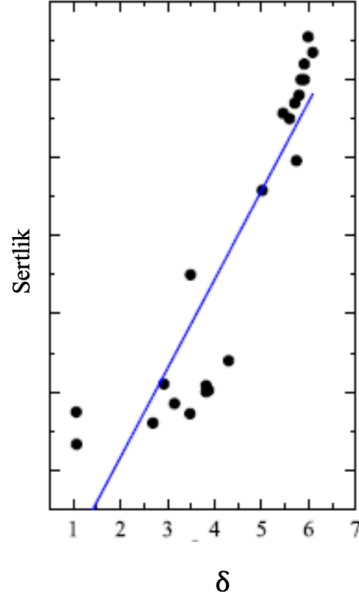
olduğu gözlemlenmiştir. HMK yapılar için VEC aralığı 4,33 – 7,55 iken, YMK yapılar için bu aralık 7,8 – 9,0 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8 de yer alan görselde buna yer verilmiştir (Tian vd., 2015). Ayrıca VEC değerine bağlı olarak alaşımların makro sertlik değişimleri de incelenmiş; en yüksek sertlik değerinin yaklaşık VEC  $\approx$  6,8 civarında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.9). Bu da VEC' in mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.8: Tek fazlı katı eriyik yapısına sahip yüksek entropili alaşımlarda (YEA) valans elektron konsantrasyonu (VEC) değerine bağlı olarak kristal yapıların değişimi (Tian vd., 2015)



Şekil 3.9: Valans elektron konsantrasyonundaki (VEC) değişimlerin, malzemenin sertlik değerine (HV) olan etkisi (Tian vd., 2015)



Şekil 3.10: Atomik boyut farkındaki değişikliklerin malzemenin sertlik değerine etkisi (Tian vd., 2015)

Katı eriyiklerin sertleşme mekanizması, kristal örgüdeki bozulmaların dislokasyonların hareketini zorlaştırmasına dayanır. Yüksek entropili alaşımlarda bu bozulma, farklı atom çaplarına sahip elementlerin aynı kafes yapısında bir araya gelmesiyle ortaya çıkar. Şekil 3.10'da gösterildiği üzere, atom çapı farkı büyüdükçe malzemenin sertliği de artış göstermektedir. Bu durum, farklı boyuttaki atomların kafes içinde oluşturduğu gerilmelerin, dislokasyon hareketini zorlaştırarak sertliği artırdığını ortaya koymaktadır (Tian vd., 2015).

YEA' ları istenilen özelliklerde tasarlayabilmek ve daha kullanışlı hale getirebilmek için çeşitli hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında en sık kullanılanlar fiziksel model yöntemleri, hesaplamalı yöntemler ve makine öğrenme yöntemleridir (Pickering, 2016).

Yüksek entropili alaşımların fazlarını tahmin etmek için temelde iki kategoride incelenen iki model önerilmiştir. Bunlar; parametre bazlı model ve serbest modeldir (Li, 2020a). Eşitlik 3.2'de verildiği gibi ( $\Delta G_{\text{karışım}} = \Delta H_{\text{karışım}} - T\Delta S_{\text{karışım}}$ ) eşit atom oranlı alaşım için maksimum karışım entropisi eşit atomlu veya eşit atoma yakın YEA' lar da yüksek karışım entropisi meydana gelir. Bununla birlikte, farklı fazlara sahip YEA' lar da hem  $\Delta H$  hem de  $\Delta S$  değerleri önemli ölçüde karıştırılabilmektedir. Faz tahmininin daha isabetli yapılabilmesi

için, bileşenin otom boyutuna ve uyumsuzluk unsurlarına da dikkat edilmelidir. (Guo, 2013; Zhang vd., 2008) Çünkü atom boyutu oranlarındaki farklılık YEA' larda ciddi kafes bozulmalarına yol açar ve dolayısıyla gerilme enerjisi de artar. Atom çapındaki önemli fark nedeniyle alaşımların serbest enerjisi artar bu da katı çözeltili fazlarının dengesizleşmesine yol açar. Üstelik atomlar kafes için yüksek distorsiyon eğilimine sahiptir.

Bileşikler kendilerini topolojik olarak düzenlemek için yapısal enerjii en aza indirir ve böylece metallar arası düzenli yapılar oluşur. (Murty vd., 2019; Zhou vd., 2008) Atom yarıçapındaki büyük bir fark yüksek difüzyona yol açabilir. Atomlar arası yarı çap farkı alaşımların aktivasyon enerjisini ve yavaş difüzyon etkisini açıklamaktadır. Farkın değişimi ile faz dönüşüm oranı yavaşlatılabilmektedir. Buda elementlerin ayrışmasına, nano boyutta çökeltilere ve de amorf yapıya yol açacaktır. Bu nedenle, YEA' lardaki atom yarıçapı farkının kapsamlı etkisini tanımlamak için yukarıda Eşitlik 3.8' da yer alan formülasyon kullanılmaktadır. (Murty vd., 2019)

YEA' larda faz tahmini teorilerine göre (Guo vd., 2011; Guo vd., 2013; Zhang vd., 2008), katı çözeltili fazları genellikle iki parametre olan  $\Delta H_{mix}$  ve  $\delta$  uygun aralıklarda olduğunda oluşur. Bu aralıklar  $-11,6 \text{ KJ/ mol} < \Delta H_{mix} \leq 3,2 \text{ KJ/mol}$  ve  $\delta (\%) \leq 6,6$  şeklindedir. Ayrıca, Zhang ve ark. tarafından geliştirilen  $\Omega$  kuralı, aşağıda verilen Eşitlik 3.8'deki gibi hesaplanabilir.

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{|\Delta H_{mix}|}$$

Eşitlik 3.8:  $\Omega$  kuralı

$\Delta S_{mix}$  karışım entropisi ve  $T_m$  (n- element alaışımının ergime sıcaklığı)

Katı hal faz geçişi göz ardı edilirse, faz oluşumu genellikle alaışımın ergime sıcaklığına yakın bir yerde meydana gelir. Bu nedenle entropi terimi  $T\Delta S$  karışımı için  $T_m$  kullanılmıştır. Alaışımın ergime sıcaklığı formülü Eşitlik 3.9'da verilmiştir. N elementli alaşımların ergime sıcaklığı  $T_m$ , karışımlar kuralı kullanılarak hesaplanır:

$$T_m = \sum_{i=1}^n (c_i T_m)$$

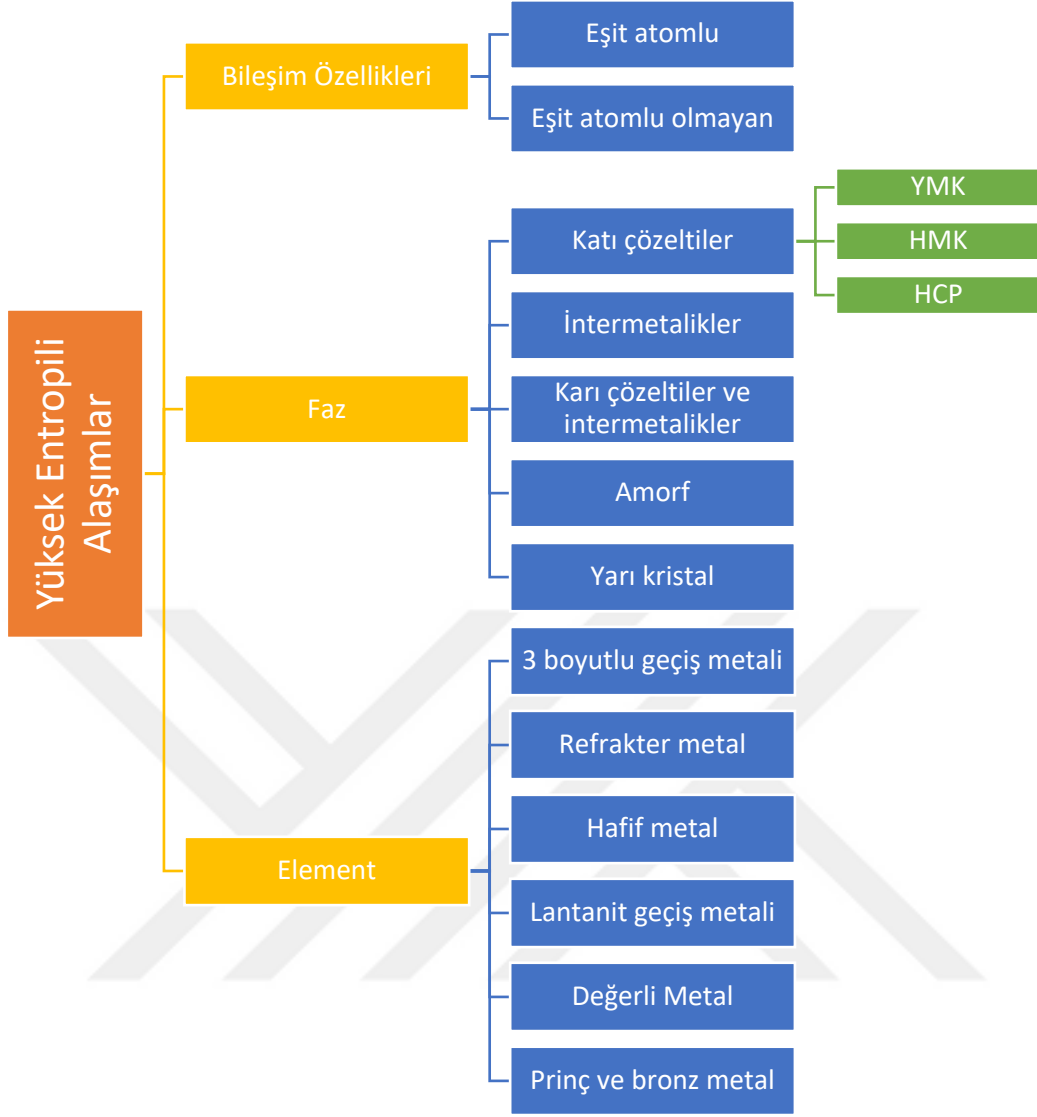
### Eşitlik 3.9: Alaşımın ergime sıcaklığı

Burada (T); alaşımın i bileşeninin ergime noktasıdır.

Yukarıda verilen ( $\Delta H_{mix}$ ,  $\Omega$ ,  $\delta$ ) formüller yüksek entropili alaşımların faz türlerini, örneğin; katı, çözelti fazı, intermetalikler ve amorf fazlar tahmin etmek için kullanılır. Bununla birlikte, faz yapısının tahmini için YMK, HMK veya HCP gibi başka parametreleri de bilmek gerekir. Guo ve arkadaşlarına göre (Guo, 2011), Battezzati ve ark. (Poletti, 2014), yüksek entropili alaşımların değerlik elektron konsantrasyonu, faz türlerini etkileyen bir diğer önemli parametre olabilir. Bir alaşımın değerlik elektron konsantrasyonu Eşitlik 3.6'daki gibi hesaplanabilmektedir.

Guo ve arkadaşları (Guo, 2011), Battezzati ve ark. (Poletti, 2014) VEC ile yüksek entropili alaşımların faz yapısı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Genellikle tek YMK fazlı YEA'ların VEC değeri 8,0'ın üzerinde, tek HMK fazlı YEA'ların VEC değeri 6,87'nin altında, HCP fazların ise VEC değeri 2,8 civarındadır. Fiziksel modellerde yer alan parametreler ve formalizasyonları bu şekilde değerlendirilmektedir. Bununla birlikte mevcut fiziksel modellerin genel doğruluğu oldukça düşüktür. Bu nedenle, tahminleri doğrulamak için genellikle deneysel yöntemler gereklidir (Li, 2020b).

YEA'ların standart bir sınıflandırması bildirilmediğinden, aşağıda belirtilen YEA'ların sınıflandırması, şekil 3.11 de gösterildiği gibi bileşim özelliklerine, faz ve element bileşenlerine dayanmaktadır. Bileşim özelliklerine göre, YEA'lar eş atomlu veya eş atomlu olmayan alaşımlara ayrılabilir. Bu tür YEA'lardaki element sayısı genellikle 4 ila 6 arasında değişir. Özellikle, 20 farklı bileşenden oluşan eş atomlu çok bileşenli alaşım dünya rekoru Cantor ve Alain Vincent'a aittir (Cantor, 2004). Daha önce de belirtildiği gibi, erken aşamada araştırma eş atomlu YEA'ların geliştirilmesine odaklanmışken, eş atomlu olmayan YEA'lar daha yüksek bileşim alanı ve üstün özellikleri nedeniyle son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmektedir.



Şekil 3.11: YEA' ların bileşim özelliklerine, faz ve element bileşenlerine göre sınıflandırılması

Faz bileşenlerine dayalı sınıflandırma için, YEA aileleri katı çözeltiler, intermetalikler, amorf ve yarı kristal alaşımlar olarak ayrılabilen geleneksel alaşımlara benzer. Yapılan araştırmalara göre bu alaşımlar arasında, bilim insanları tek fazlı katı çözeltiler veya küçük intermetalik fazlı katı çözeltiler içeren YEA'ların geliştirilmesiyle daha fazla ilgilenmiştir. Özellikle, tek fazlı katı çözeltiler yapıları genellikle yüzey merkezli, hacim merkezli veya hegzagonal sıkı paketlenmiş kristal yapılar sergiler (George ve Curtin, 2020). Dahası, Cantor ve çalışma arkadaşları 2003 yılında metalik camı keşfetme yöntemi olarak eş atomlu ikame fikrini önerdiler (Kim vd., 2022). Ek olarak, elementlerin türüne göre, YEA'lar 3d geçiş metali YEA'ları, refrakter metal YEA'ları, hafif metal YEA'ları, lantanit geçiş metali

YEA'ları, YEA piriçleri ve bronzları ve değerli metal YEA'ları dahil olmak üzere altı alaşım ailesine ayrılabilir (Miracle, 2017). YEA'larda en yaygın olarak incelenen alaşım ailesi olarak, 3d geçiş metali YEA'ları 9 elementten en az 4'ünü içerir: Cr, Co, Fe, Ni, Mn, Cu, Al, Ti ve V, paslanmaz çeliklerin ve süper alaşımların uzantıları olarak kabul edilebilir (Miracle, 2017). En tipik olanı eş atomlu CoCrFeMnNi Cantor alaşımıdır. 3d geçiş metali YEA'larına ek olarak, refrakter YEA'lar genellikle yüksek sıcaklıkta Ni bazlı süper alaşımlardan çok daha yüksek mukavemet gösteren 1650 °C'den yüksek bir ergime noktasına sahip dörtten fazla refrakter elementten oluşur. Diğer alaşım aileleri şu anda çeşitli dezavantajlar; örneğin yüksek maliyet, kırılabilirlik, toplu olmayan ürün formu nedeniyle nadiren rapor edilmektedir (Miracle, 2017). Ayrıca, ara bileşik YEA'lar yüksek B, C veya N içeriğine sahiptir veya seramik faz bileşenleri; örneğin nitürler, karbürler ve borürler nedeniyle dahil edilmemiştir, bunlar daha sıklıkla yüksek entropili seramikler olarak rapor edilir (Osse ve Toher, 2020).

### 3.6 Çekirdek Etkileri

Yüksek entropili alaşımların davranışı dört çekirdek etkiyle açıklanır: yüksek entropi etkisi, çoklu ana elementlerin karışım entropisini artırarak tek fazlı katı çözelti kararlılığını güçlendirir; kafes distorsiyonu, atomik boyut ve elastiklik farklarından doğan yerel gerinimlerle dislokasyon hareketini zorlaştırıp sertlik ve dayanımı yükseltir; yavaş difüzyon, çok bileşenli ortamda atom göçünü yavaşlatarak tane büyümesi ve çökme kinetiğini sınırlar, böylece yüksek sıcaklık kararlılığına katkı verir; “kokteyl” etkisi ise elementler arası sinerji sayesinde korozyon, oksidasyon, aşınma gibi özelliklerde tekil bileşenlerin ulaşamadığı bir performans düzeyi sağlar; bu etkilerin bileşim, proses ve ısıl işleme dengelenmesi faz seçimini, mikroyapıyı ve nihai mekanik-tribolojik davranışı belirler.

#### 3.6.1 Yüksek Entropi Etkisi

Üçlü alaşım sistemi için Smix grafiği; mavi bölümleri bir veya iki temel elemente sahip geleneksel alaşımları belirtirken, kırmızı orta bölge yüksek entropi bölgesini temsil eder. Eşmolar alaşım sistemi genellikle maksimumdur. Örneğin, bir model üçlü alaşım sistemi için Smix' in Şekil 3.3 şematik haritasında gösterildiği gibi alaşım bileşimi merkeze ne kadar yakınsa Smix değeri de o kadar büyük olur. Ayrıca katı çözelti fazları, intermetalikden

daha yüksek bir karıştırma entropisi değeri sergiler. Bu nedenle, yüksek entropili alaşımlarda kararlı fazın intermetalik bileşikler yerine katı çözeltiler haline gelmesi çok muhtemeldir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla yüksek entropili alaşımların genel düzen derecesinde değişmeye neden olur ve düzenli fazlar içeren döküm alaşımları bile yüksek sıcaklıkta düzensiz katı fazına dönüşebilir. Bununla birlikte, Senkov ve arkadaşlarının sonuçları yüksek entropi etkisi ile çelişen tek katı çözeltilerinin oluşma olasılığının düşük olduğunu göstermektedir. Artan konfigürasyonel entropi, düzensiz katı çözeltilerini stabilize eder (Senkov vd., 2015). Senkov ve arkadaşlarına göre konfigürasyonel entropi, artan elementlerin sayısı ile yavaş yavaş artarken, intermetaliklerin oluşma olasılığı daha hızlı artar (Senkov vd., 2015).

### 3.6.2 Yavaş Yayılım Etkisi

Farklı yüksek entropili alaşımlar üzerinde yapılan araştırmalar, yüksek entropili alaşımların difüzyon hızının ve faz dönüşümünün geleneksel alaşım muadillerine göre daha yavaş olduğunu göstermektedir (Ng, 2012; Tsai, 2013; Tsai, 2014). J.W' ye, Yeh ve diğerlerine göre yavaş yayılma etkisi her bir alaşım için farklı enerjilerden kaynaklanmaktadır. Farklı yerel atom konfigürasyonları farklı bağlanmalara neden olur ve bu da her bölge için yerel enerjilerin farklı olmasına yol açar. Bir yandan, geleneksel alaşımlar için bir atom düşük enerjili bir bölgeye sıçradıktan sonra yerel atom konfigürasyonu neredeyse aynı kalırken, atomun yüksek enerjili YEA' lar için konfigürasyonun değişme olasılığı daha yüksektir. Eğer atom yüksek enerjili bir bölgeye sıçrarsa orijinal bölgesine geri sıçraması kuvvetle muhtemeldir (Yeh, 2004). Bu durumdan herhangi biri YEA' larda difüzyon hızını yavaşlatır. Dahası, faz dönüşümleri özellikle farklı elementlerin koordineli bir difüzyonunu gerektirir. Bu nedenle yavaş yayılan elementler YEA' ların dönüşümünü engeller.

Bugüne kadar, YEA' ların yavaş difüzyon etkisi, nano boyuttaki intermetaliklerin çökmesini açıklamak için kullanılmıştır. Çünkü intermetalik bileşiklerin çekirdeklerinin oluşması kolaydır ancak YEA' lar yavaş büyür. (Yeh, 2004). Ayrıca yavaş difüzyon etkisi, yüksek sıcaklık dayanımına ve mükemmel sürünme direncine yol açar (Tsai, 2014). Tsai ve ark. CoCrFeMnNi alaşımındaki atomların difüzyon katsayılarının gerçekten de üçlü alaşımlardan ve saf metallere göre daha düşük olduğunu bildirmiştir. Buna bağlı olarak YEA' ların aktivasyon enerjileri, benzer alaşımlara göre daha yüksektir. Farklı matrislerdeki kafes potansiyel enerjisinin dalgalanması da kimyasal bir model ile analiz edilir. Tsai ve

arkadaşlarına göre kafes potansiyel enerjisindeki daha büyük dalgalanma, atomların difüzyonu için daha önemli engeller üretir, bu da daha yüksek aktivasyon enerjileriyle sonuçlanır ve dolayısıyla YEA' lardaki yavaş difüzyon etkisini açıklar (Tsai, 2013).

### 3.6.3 Kafes Distorsiyon Etkisi

Tek temel elementli alaşımlarla karşılaştırıldığında YEA' lar, özellikle HMK yapının hakim olduğu yüksek entropili alaşımlarda genellikle ciddi bir kafes distorsiyon etkisi gösterir (Li vd., 2017; He vd., 2016; Lai vd., 2006). Geleneksel alaşımlar için kafes bölgeleri bir veya iki baskın bileşen tarafından kaplanır. YEA' lar için, farklı boyutlardaki elemanlar kafes bölgelerini kaplar ve bu da kaçınılmaz olarak kafes distorsiyonuna ve kafes şekil değiştirmelerine yol açar. Şekil 3.12 kafes şekil değişimine örnek teşkil etmektedir. Çok sayıda araştırma, şiddetli kafes distorsiyon etkisinin dislokasyon hareketlerini engellediğini ve belirgin katı çözelti güçlendirmesiyle sonuçlandığını gösterir. (Tong vd., 2005; Kao, 2009). Basit YMK fazlı YEA' lar genellikle düşük mukavemet ve sertlik sergilemelerine rağmen, kafes distorsiyon etkisi nedeniyle hala YMK fazlı alaşımlar geleneksel benzerlerinden daha yüksek mukavemetlere sahiptirler.



Şekil 3.12: Kare kafes üzerine dağıtılmış 10 farklı bileşenin 2 boyutlu şeması

Katı çözelti güçlendirmesinin yanı sıra ciddi biçimde bozulmuş kafes elektronların ve fotonların saçılmasına da neden olabilir. Bu da daha yüksek elektrik direncine ve daha düşük

termal iletkenliğe yol açar. (Tsai, 2014). YEA' larda XRD yoğunluklarındaki büyük azalmayı analiz etmek için Yeh ve ark. bir dizi YEA' ın x ışını kırınım tepe yoğunluklarını niceliksel olarak araştırmıştır (Yeh vd., 2007). Yeh' in raporuna göre, alaşım sisteminin XRD yoğunluklarındaki değişim, termal etki ve kafes distorsiyon etkisinin birleşiminden dolayı olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, kafes distorsiyon etkisinin çekme kırılgenliği ve yavaş kinetik hareketi ile de bir ilişkisi olduğu bulunmuştur ( Zhang, 2014).

### 3.6.4 Kokteyl Etkisi

“Kokteyl etkisi” kavramı, ilk kez S. Ranganathan tarafından, bileşiminde çok sayıda element barındıran ve bu nedenle olağan dışı özellikler gösteren alaşımlar için ortaya atılmıştır. Bu terim; toplu metalik camlar, süper elastik ve süper plastik metaller ile yüksek entropili alaşımlar gibi yüksek oranda alaşım elementi içeren malzeme sistemlerini tanımlamak amacıyla kullanılmıştır (Ranganathan, 2003). Artık çeşitli elementlerin mikro yapı veya özellikler üzerindeki dolaylı etkilerine ek olarak, tüm elementler arasındaki temel özellikler ve etkileşimlerden kaynaklanan bileşik bir etki anlamına gelmektedir. (Yeh, 2006). Bu etki genellikle çok bileşenli alaşımın oldukça dikkat çekici veya beklenmedik özelliklerini açıklamak için kullanılır (Miracle, 2017). Ancak teorik hipotez olarak öne sürülen diğer üç temel etkiden farklı olarak ‘kokteyl etkisi’ çok soyuttur. Bu nedenle bu etki hipotez olarak kabul edilemez. Genel olarak kokteyl etkisinin bilinmeyenleri, kafes bölgesinin doluluğu bilinmiyorsa tahmin edilemeyen bireysel atom türleri arasındaki etkileşimle ilgilidir. Bu etki ile ne kastedildiği ve onu özellikle neyin etkilediğini tam olarak belirlemek zordur (Pickering, 2016).

### 3.7 Mekanik Özellikler

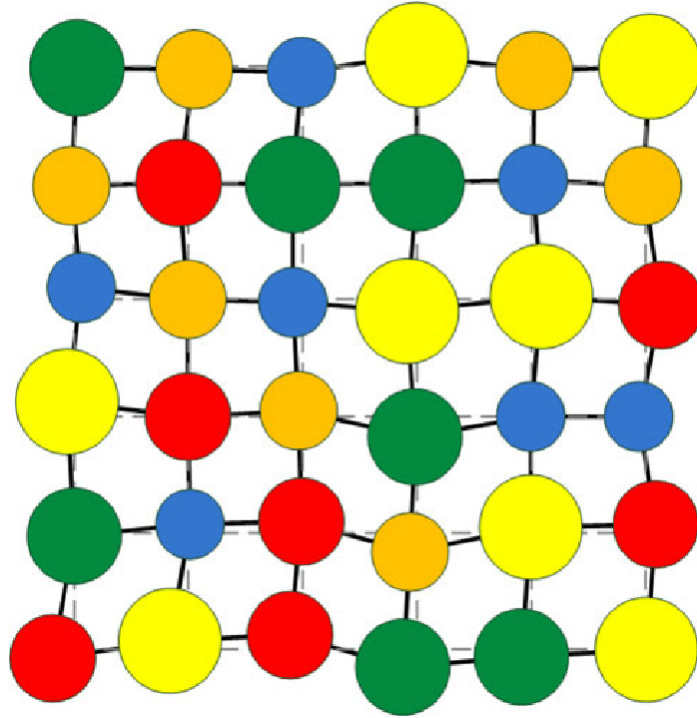
Çok esaslı elemanların bileşimsel özellikleri ve dört çekirdek etkisi nedeniyle, YEA' lar genellikle kararlı mikro yapı ve yüksek mukavemet ve sertlik (Huang vd., 2012), yüksek aşınma direnci (Liu vd., 2024), düşük sıcaklık dahil olmak üzere farklı mekanik özellikler sergiler. Sıcaklık sünekliği, iyi korozyon (Alaneme ve Bodunrin, 2016) ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci YEA' ların ileri mühendislik malzemeleri olarak potansiyel uygulama alanlarındaki çeşitliliğini göstermektedir.

### 3.8 Güçlendirme Yöntemleri

Geleneksel alaşımlar için uygulanan güçlendirme yöntemlerinin benzeri yüksek entropili alaşımlar içinde kullanılabilir.

#### 3.8.1 Katı Çözelti Güçlendirmesi

Yüksek entropili alaşımların katı çözelti güçlendirilmesi genellikle dislokasyon hareketlerini engelleyen, ara yer atomları ve kısa menzilli düzen kümelerinin neden olduğu kafes distorsiyonunun etkisi ile değişebilmektedir (Lai vd., 2006; Li vd., 2017) bir veya iki ana metal atomu tarafından kaplandığı geleneksel alaşımların aksine, YEA' lar da kafes bölgeleri farklı boyutlardaki çeşitli element atomları ile oluşturulur. Buda YEA' lar da ciddi kafes distorsiyonuna yol açar. Örneğin, Şekil 3.13'de kafes yapısında meydana gelen bozulmayı gösteren bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.13: Kafes distorsiyonu

Bu nedenle, özellikle hacim merkezli kübik yapının hakim olduğu yüksek entropili alaşımlarda, atom yarıçapındaki farklılaşmalardan dolayı, geleneksel alaşımlara kıyasla şiddetli kafes distorsiyonuna sahiptirler (Li vd., 2017). Örneğin HMK yapısına sahip  $Al_xCoCrFeNi$  ( $x>1$ ) HEA'ların sertliği 500 HV civarındadır bu da HMK yapıya sahip yüksek entropili alaşımların sertliğinin geleneksel alaşımlardan daha yüksek olduğunu gösterir. Yüksek entropili alaşımların HMK (hacim merkezli kübik) kristal yapıya sahip olanlarının, sertlik açısından geleneksel alaşımlara kıyasla daha üstün mekanik özellikler sergilediği görülmektedir (Martienssen, 2006; Chaudhari ve Awale, 2019).

Geleneksel alaşımlara benzer şekilde, katı çözümleri güçlendirmenin verimliliği, YEA' lardaki çözünen atomların doğasına, örneğin atom yarıçapı, elektronegatiflik gibi özelliklere büyük ölçüde bağlıdır. Ding ve arkadaşları iki yüzey merkezli kübik yüksek entropili alaşımlardan olan  $CrMnFeCoNi$  alaşımı ve yeni  $CrFeCoNiPd$  alaşımını incelemişlerdir. Burada eş atomlu  $CrFeCoNi$  bir matris olarak nitelendirilirken ve  $Mn/Pd$  çözünen atomlar olarak nitelendirir.  $CrMnFeCoNi$  alaşımındaki beş ana elementin dağılımının atomik ölçekte nispeten rastgele ve tekdüze olduğu bulunmuştur. Atomik ölçekteki yüksek bileşim dalgalanması, daha yüksek kafes distorsiyonuna ve nano ölçekli alternatif çekme ve sıkıştırma gerinim alanlarına ve dolayısıyla dislokasyonun kaymasına karşı önemli bir direnç sağlar. Ayrıca,  $CrFeCoNiPd$  alaşımında plastik deformasyonun erken aşamasında büyük miktarda çapraz kayma meydana gelir. Bu çapraz kaymalar çoklu kayma sistemleri arasında güçlü dislokasyon etkileşimlerine ve daha yüksek akma mukavemetine yol açar (Zhang vd., 2020)

### **3.8.2 Kısa Mesafeli Düzen**

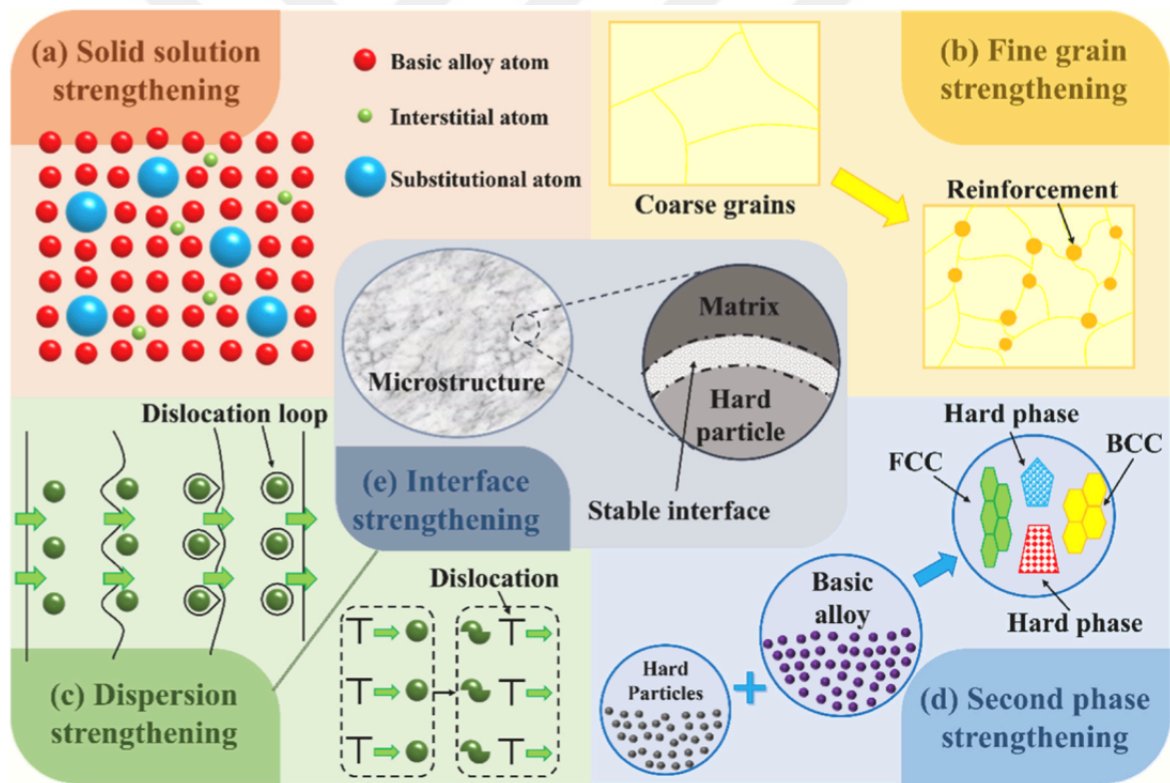
Arayer veya ikameli çözünen atomların yanı sıra, YEA' lar da kısa mesafeli düzenin oluşumu da ciddi kafes bozulmasına ve dolayısıyla yüksek katı çözümleri güçlendirmesine neden olabilir. Kısa mesafeli düzen genellikle termal olarak indüklenen sonsuz küçük konsantrasyon dalgalanmasıdır ve geleneksel alaşımlarda yaygın olarak gözlemlenen kimyasal çift korelasyonlarıyla doğrudan ilişkilidir (Wu vd., 2021; Mo vd. 2019). Kimyasal karmaşıklık nedeniyle, YEA sistemlerinde kısa mesafeli düzenli oluşumu enerji açısından tercih edilir ve bu, YEA' ların doğal bir yapısal özelliği olarak alınabilir (Wu vd., 2021).

Sıralı ara kümeler, dislokasyon kayma modunu düzlemsel kaymadan dalgalı kaymaya dönüştürür ve çift çapraz kaymayı ve dolayısıyla deformasyon sırasında dislokasyon

çoğalmasını destekler. Sonuç olarak, YEA' da hem mukavemet hem de süneklik açısından dikkate değer bir artış elde edilir (Lei vd., 2018).

### 3.8.3 İkincil Faz ile Güçlendirme

Polikristal malzemelerde ikincil faz güçlendirme genellikle iki kategoriye ayrılır: çökeltme güçlendirmesi ve dispersiyon güçlendirmesi. Çökeltme güçlendirmesi için, güçlendirilmiş parçacıklar genellikle matristen çöker. Dispersiyonun güçlendirilmesi için parçacıklar doğrudan matrise eklenir. Genel olarak, çökeltilerin yerinde oluşumu, parçacıkların eklenmesinden daha fazla avantaja sahiptir, çünkü çökeltiler ve matris arasında genellikle bir yönelim ilişkisi vardır ve bu da daha yüksek bağlanma kuvvetine yol açar. Ancak hacim oranı, parçacık boyutu ve ilave türleri dispersiyon güçlendirmesi ile kolayca ayarlanabilir. Şekil 3.14' de güçlendirme örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.14: Kaplamaların güçlendirme yöntemleri; a. Katı çözelti güçlendirmesi; b. İnce tane güçlendirmesi; c. Dağılım güçlendirmesi; d. İkinci faz güçlendirmesi; e. Arayüz güçlendirmesi. (Zhang vd.,2022)

### 3.8.4 ökelti Güçlendirmesi

Çoğu geleneksel alaşımın aksine, YEA' lardaki ökeltelerin büyümesi, yavaş difüzyon etkisinden dolayı çok daha yavaştır. Bu nedenle, YEA 'larda nano boyutlu ökeltelerin oluşumu yaygındır ve bu, mekanik özelliklerini, özellikle de mukavemeti önemli ölçüde artırır (Yeh vd., 2004; Chen vd., 2010).



## 4. AŞINMA

Aşınma harekete maruz kalan yüzeylerde oluşan yüzey hasarı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma, farklı şekillerde gerçekleşebilmektedir. Bir yüzey tek bir aşınmaya maruz kalabileceği gibi aynı anda birden fazla aşınma mekanizmasına da maruz kalabilir. Aşınma mekanizmaları; yapışma aşınması, aşındırma aşınması, aşındırıcı ve yorulma aşınması, erozyon aşınması, korozif aşınma ve yüksek sıcaklık aşınması bunların biri veya birkaçının birleşimi olabilir. Aşınma süreci zamanla veya çalışma koşullarındaki değişikliklerle sürekli olarak değişebilir. Aşınma genellikle kimyasal ve mekanik etkileşimler yoluyla sürtünmeli ısıtma ile hızlandırılır (Karaaslan, 2010).

### 4.1 Aşınma Türleri

#### 4.1.1 Adezif Aşınması

İki yüzeyin temas noktalarında mikroskobik kaynaklar oluşur ve bu noktalar izafi hareket sırasında koparak malzeme kaybına neden olur. Bu tür aşınma, genellikle benzer malzemeler arasında ve yetersiz yağlama koşullarında meydana gelir.

#### 4.1.2. Abrasif Aşınması

Sert parçacıkların daha yumuşak bir yüzeyi çizmesi veya kesmesi sonucu oluşur. Bu durum, iki yüzey arasında yabancı sert parçacıkların bulunması veya bir yüzeyin diğerinden daha sert olması durumunda ortaya çıkar.

#### 4.1.3. Yorulma Aşınması

Tekrarlayan yükler altında yüzeyde mikro çatlakların oluşması ve zamanla bu çatlakların birleşerek malzeme kaybına yol açmasıdır. Bu tür aşınma, özellikle rulmanlar ve dişliler gibi döner elemanlarda görülür.

#### 4.1.4. Erozyon Aşınması

Sıvı veya gaz akışı içinde taşınan sert parçacıkların yüzeye çarpması sonucu meydana gelir. Bu tür aşınma, boru hatları ve türbinler gibi akışkan taşıyan sistemlerde yaygındır.

#### **4.1.5. Koroziyonun Aşınması**

Kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyde oluşan zayıflamaların mekanik etkileşimlerle birleşmesiyle oluşur. Bu durum, agresif ortamlarda çalışan metal parçalar için kritiktir.

#### **4.1.6. Yüksek Sıcaklık Aşınması**

Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin yumuşaması veya oksidasyon gibi reaksiyonlara maruz kalması sonucu oluşan aşınma türüdür. Özellikle motor parçaları ve fırın ekipmanlarında görülür (Güneş ve Gökten 2023).

### **4.2 Aşınmadan Korunma Yöntemleri**

#### **4.2.1 Difüzyonla Yüzey Sertleştirme Yöntemleri**

Bu yöntemler, istenen sertlik, aşınma direnci, sertleşme derinliği ve temel malzemenin özellikleri gibi uygulamanın özel gereksinimlerine göre seçilir. Her yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır. Katı borlama, ucuz ve yaygın bir yöntemken, plazma borlama daha hassas ve düşük sıcaklıkta yapılabilir. Hangi yöntemin seçileceği, uygulamanın gereksinimlerine ve malzemenin özelliklerine bağlıdır.

##### **4.2.1.1 Karbürleme**

Karbürlemede, karbon, düşük karbonlu çeliğin yüzeyine, malzemeyi karbon açısından zengin bir ortamda ısıtarak sokulur. İşlem, sertleştirilmiş bir çelik tabakası oluşturarak yüzey sertliğini artırır. Sertliği sabitlemek için genellikle söndürme işlemi uygulanır (Keating, 2007).

##### **4.2.1.2 Nitrürleme**

Nitrürleme, nitrojenin nispeten düşük bir sıcaklıkta (tipik olarak 500-550°C) çelik veya diğer alaşımların yüzeyine yayıldığı bir işlemdir. Bu, yüzeyde sert nitrürler; demir nitrürleri veya alaşım nitrürleri oluşturarak aşınma direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirir (P. 2013).

### 4.2.1.3 Kromlama

Kromlama, sert, aşınmaya dayanıklı bir tabaka oluşturmak için bir malzemenin yüzeyine krom ekleme işlemidir. Bu genellikle yüksek sıcaklıkta difüzyon işlemiyle yapılır ve parçaların korozyona, aşınmaya ve yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırmak için kullanılır (Liao vd., 2010).

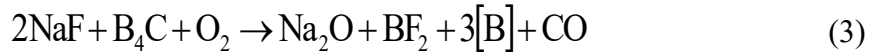
### 4.2.1.4 Borlama (Boraks Sertleştirme)

Borlama, sert borür bileşikleri oluşturmak için bir malzemenin; tipik olarak çelik, titanyum veya kobalt alaşımları yüzeyine bor yaymayı içerir. Yüzey tabakası son derece sert ve aşınmaya dayanıklı hale gelir ve ayrıca korozyon direncini artırır (Zhang ve Jiang, 2017). Borlama sırasında oluşabilecek oksidasyon sorunlarını önlemek amacıyla işlem tablasının tüm yüzeyleri 10 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası ile doldurulmalıdır. Ni içeren süper alaşımlarda ve yüksek entropili alaşımlarda silisit tabakasının oluşumunu önlemek için SiC yerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanmak daha doğru tercih olur. (Güven vd., 2022).

Borlama işlemleri sırasında meydana gelen detaylı reaksiyonlara aşağıda yer verilmiştir. Borlama sıcaklığında, borlama tozu içindeki NaBF<sub>4</sub> ayrışır ve Ref'de belirtildiği gibi NaF ve BF<sub>3</sub>'ü serbest bırakır.(Güven vd., 2022)



Bu gazlar B<sub>4</sub>C ve kapta mevcut olan oksijen ile reaksiyona girerek aktif bor üretir:



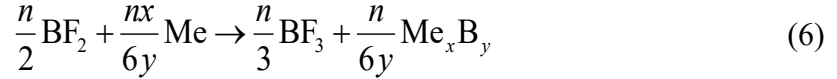
Yüksek sıcaklıklarda, Denklem 2 ve 3'teki reaksiyonlardan üretilen BF<sub>2</sub> gazı ayrıca BF<sub>3</sub>'e ayrışabilir:



Denklemler 2-4'teki reaksiyonlarla üretilen aktif bor, daha sonra alaşımdaki borür oluşturan metallere reaksiyona girebilir ve aşağıdaki reaksiyonla açıklandığı gibi metal borürlerin (Me) oluşumuna yol açabilir:



Me ayrıca doğrudan BF<sub>2</sub> gazıyla reaksiyonlar yoluyla da oluşabilir:



#### 4.2.2 Yüzey Modifikasyonu ile Sertleştirme

Yüzey sertleştirme yöntemleri, özellikle metaller olmak üzere bir malzemenin dış tabakasının sertliğini ve aşınma direncini artırırken çekirdeğin sünekliğini de korumayı sağlayan tekniklerdir. Bu yöntemler genellikle aşınma ve strese maruz kalan makine parçalarının, takımların ve bileşenlerin performansını iyileştirmek için kullanılır. Sıklıkla kullanılan yüzey sertleştirme yöntemleri aşağıdaki Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Yüzey sertleştirme yöntemleri

#### 4.2.2.1 Endüksiyon Sertleştirme

Endüksiyon sertleştirme, bir malzemenin yüzeyini hızla ısıtmak için bir endüksiyon bobini kullanılmasını ve ardından hızlı bir soğutma yapılmasını içerir. Bu, iç çekirdeği nispeten yumuşak ve sert bırakırken sert bir dış tabaka ile sonuçlanır. Genellikle milleri, dişlileri ve diğer bileşenleri sertleştirmek için kullanılır (Valtierra vd., 2010).

#### 4.2.2.2 Alev Sertleştirme

Alev sertleştirme, bir malzemenin belirli bir alanını ısıtmak için bir oksijen-asetilen alevi veya diğer yüksek sıcaklıklı alev kaynakları kullanır. Isıtılan alan daha sonra sertleştirmek için söndürülür. Bu yöntem genellikle büyük parçaları veya bileşenleri yerel yüzey sertleştirme ile sertleştirmek için kullanılır (Zink, 2011).

#### **4.2.2.3 Lazer Sertleştirme**

Lazer sertleştirmede, yüksek güçlü bir lazer ışını, bir metalin yüzeyini, hızlı soğutma üzerine martensitik bir yapı oluşturacağı bir sıcaklığa ısıtmak için kullanılır. Lazer sertleştirme, sertleştirilmiş alanın ve derinliğin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar (Liu vd., 2018).

#### **4.2.2.4 Elektron Işını Sertleştirme**

Elektron ışını sertleştirme, malzemenin yüzeyini ısıtmak için yüksek enerjili elektronların odaklanmış bir akışını kullanır. Çevredeki alandan gelen hızlı soğutma, sertleştirilmiş bir yüzey tabakası oluşturur. Bu yöntem, özellikle küçük alanların çok hassas bir şekilde sertleştirilmesi için faydalıdır (Lai vd., 2006).

#### **4.2.2.5 Bilyalı Peening**

Bilyalı peening, bir malzemenin yüzeyinin yüksek basınç altında küçük, sert küresel parçacıklarla bombardıman edilmesini içerir. Bu işlem, yüzeyde basınç stresi oluşturarak yorulma direncini ve yüzey sertliğini iyileştirir.

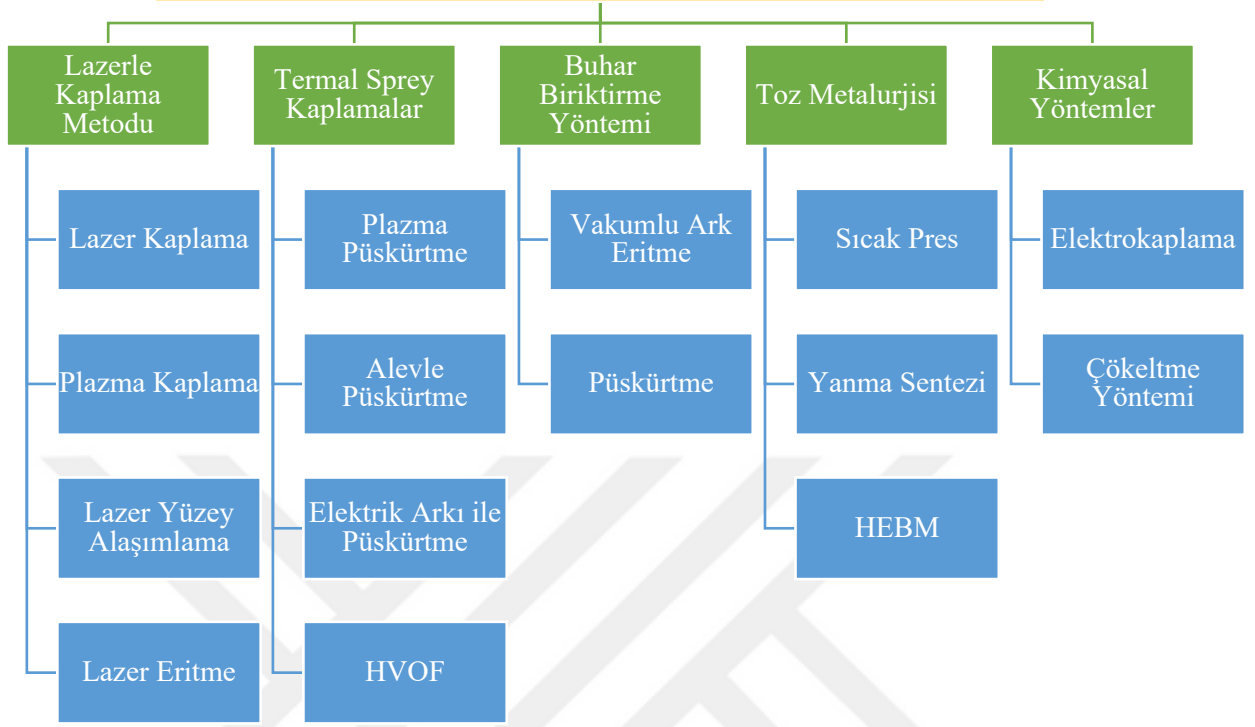
#### **4.2.2.6 Östemperleme**

Östemperleme, çeliğin kritik noktanın üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtıldığı ve ardından kontrollü bir oranda erimiş tuz veya yağ banyosunda söndürüldüğü bir ısıl işlem işlemidir. İşlem hem yüksek mukavemet hem de iyi tokluk sağlayan ince bir mikro yapı oluşturur (L., vd., 2009).

#### **4.2.3 Termal Sprey Kaplamalar**

Yüzey kaplama yöntemleri, özellikle mühendislik, metalurji ve biyomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılan teknolojik işlemlerdir. Kaplama, bir malzemenin yüzeyine, istenen özellikleri kazandırmak amacıyla ince bir katmanın uygulanması olarak bilinir. Yüzey kaplamaları, malzeme yüzeylerinin aşınma direncini, korozyona dayanıklılığını, oksidasyon direncini arttırmak, estetik görünümünü ve biyouyumluluğunu iyileştirebilmek için kullanılır. Literatürde yüksek entropili alaşımlarda kullanılan yüzey kaplama yöntemlerine Şekil 4.2’de yer verilmiştir.

## Yüksek Entropili Alaşımlarda Kaplama Yöntemleri



Şekil 4.2: Yüksek entropili alaşımlarda kaplama yöntemleri

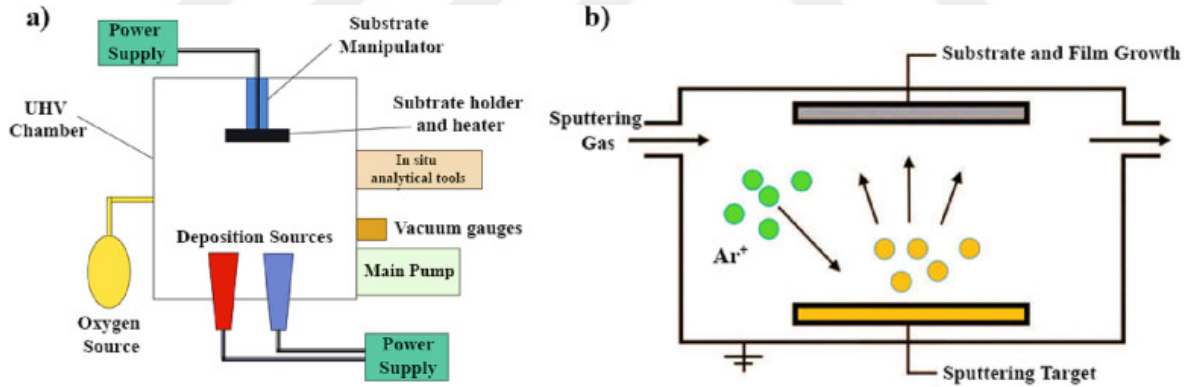
Termal spreY kaplama yönteminde kaplama yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak, kaplama yapılacak malzeme yüzeyine püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Toz halinde hammaddeler kullanılarak tek veya çok katmanlı kaplamalar yapılır. Şekil 4.3' de gösterildiği gibi spreY püskürtülmesi sırasında erimiş parçacıklar sürekli malzeme yüzeyine çarpar, çarpma anında parçacıklar yüksek hızda soğuyarak birikinti oluşturur. Böylece kaplama meydana gelmiş olur (Robotti, 2016). Bu yöntem metal, seramik, kompozit ve alaşımlı malzemelerin yüzeylerine kaplama yapmak için kullanılır. Bu kaplama özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilir (Bach, 2000). İşlemin yapılışına ve kullanılan malzemeye göre farklı yollarla uygulama yapılabilmektedir. Bu uygulamalara aşağıda yer verilmiştir (Çay, 2009).



püskürtme teknolojisi ile 304 paslanmaz çelik üzerine kaplanmış  $\text{Ni}_x\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_y\text{Si}_z\text{AlTi}_{0.2}$  YEA incelemesi yapmıştır (Wang vd., 2011). Termal sprey için kullanılan YEA, elementlerin ark ergimesi ile hazırlanırlar. Püskürtme ile biriktirilen YEA kaplamalarının çoğu, mükemmel aşınma, oksidasyon ve ışınlama direnci özelliklerine sahip YEA nitrür, karbür ve borür kaplamalarıdır (Lai vd., 2006; Chen vd., 2004; Zhang vd., 2018; Tsai vd., 2015). Bu püskürtülen kaplamaların çoğu, diğer termal olarak püskürtülen kaplamalara kıyasla amorf yapıya sahip YMK veya HMK katı çözelti aşamalarına sahiptir.

#### 4.2.4 Buhar Biriktirme

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi, kaplama amacıyla seçilen malzemenin vakum altında buharlaştırılıp, buharın hedeflenen yüzeye kontrollü bir şekilde birikmesiyle gerçekleştirilen bir kaplama tekniğidir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ince kaplamalar oluşturmak için kullanılır ve kaplamalar malzemeye sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci sağlar.



Şekil 4.4: Buhar biriktirme yöntemi ilkesinin şematize gösterimi

Buhar biriktirme yöntemi, fiziksel veya kimyasal reaksiyon yoluyla belirli bir madde yüzeyinde ince film oluşturarak doğrudan biriktirme yöntemidir. Şekil 4.4' de buhar biriktirme yönteminin şematik diyagramı gösterilmektedir. Bu kaplama yöntemi, elektronik, havacılık, optik ve biyomedikal cihazlar gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüzeyle ince filmler uygulanarak kaplama yapma çok farklı tekniklerle geliştirilebilmektedir. Ana mantık malzemenin buhar fazına dönüştürülmesini ve ardından

alt tabaka üzerine biriktirilerek bir kaplama oluşturulmasını içerir. Her biri farklı yöntem ve uygulamalara sahip olan fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme şeklinde iki ana kategori içermektedir. Fiziksel Buhar Biriktirme; genellikle vakum koşulları altında buharlaştırma veya püskürtme yoluyla bir malzemenin fiziksel dönüşümünü içerir. Bir kaynaktan gelen atomlar veya moleküller, kontrollü bir şekilde alt tabakaya biriktirilir. Termal buharlaştırma ve püskürtme teknikleri kullanılmaktadır. Termal Buharlaştırma yönteminde malzeme, buharlaşana ve alt tabaka üzerinde yoğunlaşana kadar ısıtılırken püskürtme yönteminde iyonlar, alt tabaka üzerinde ince bir film oluşturan atomları dışarı atarak hedef malzemeye püskürtülür (Bhushan, 1991; Toyserkani ve Khajepour, 2004).

Buhar biriktirmede vakum ark eritme yöntemi, genellikle vakum ark biriktirme veya ark PVD olarak adlandırılır, katı bir katottan malzemeyi buharlaştırmak için elektrik arkı kullanan bir fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Buharlaştırılmış malzeme daha sonra ince, yapışkan bir kaplama oluşturmak için bir alt tabaka üzerine biriktirilir. Bu yöntem genellikle sert, aşınmaya dayanıklı malzemeler üretmek, dekoratif kaplamalar oluşturmak veya iletkenlik, yansıtıcılık gibi belirli özellikler için elektronik ve optikte fonksiyonel kaplamalar için kullanılır. Oldukça kullanışlı ve avantajlı olan bu yöntem ile yüksek enerjili plazma sayesinde mükemmel yapışma özelliğine sahip kaplamalar üretir. Metaller, alaşımlar ve seramikler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerle kaplama yapılabilir. Uygun plazma yönlendirmesiyle karmaşık geometriler üzerinde çalışılabilir. Yüksek enerji tüketimi ve kaplama kalitesini etkileyebilecek makro büyüklükte parçacıklar üretimi zorlaştırabilir ancak bir filtreleme teknikleri ile bu sorunlar hafifletebilir. Bu yöntem, genellikle yüksek performanslı uygulamalarda kullanılan güçlü alt tabaka bağlama özelliğine sahip yoğun, dayanıklı kaplamalar üretme yeteneği nedeniyle özellikle değerlidir.

### **Kaplama Tekniği:**

- 1. Ark Ateşlemesi:** Vakum odasında katot ve anot arasında yüksek akımlı, düşük voltajlı bir ark oluşturulur.
- 2. Malzeme Buharlaşması:** Arkın yoğun enerjisi katot malzemesini ısıtır ve buharlaştırır ve yoğun bir plazma bulutu oluşturur.
- 3. İyonlaşma:** Buharlaştırılmış malzeme yüksek oranda iyonize olur, bu da yapışmayı artırır ve biriktirmenin yön kontrolüne olanak tanır.
- 4. Biriktirme:** İyonize buhar alt tabaka üzerinde yoğunlaşarak düzgün ince bir film oluşturur.

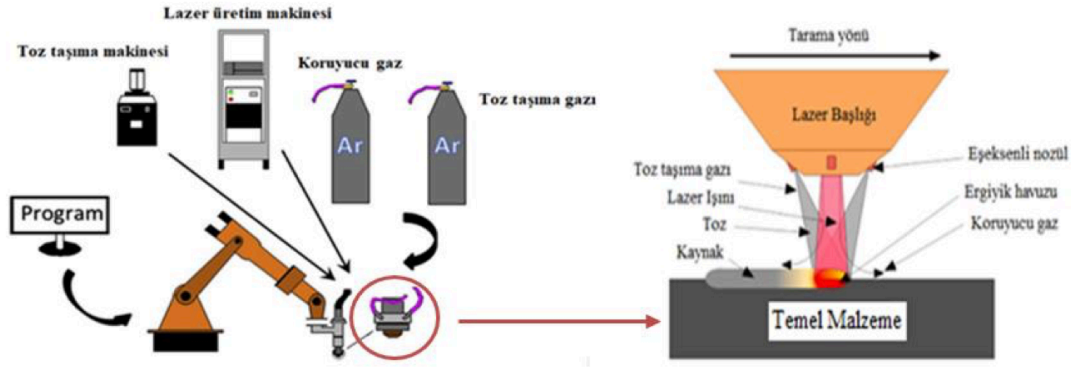
Kimyasal buhar biriktirme tekniğinde, alt tabaka üzerinde katı ince bir film üretmek için ısıtılmış bir haznedeki öncül gazlar arasındaki kimyasal reaksiyonları içerir. Yarı iletkenler, koruyucu kaplamalar ve biyouyumlu filmlerde kullanılmaktadır. Karmaşık şekillerde bile düzgün kaplamalar sağlar ancak genellikle daha yüksek sıcaklıklar gerektirir ve bu da kullanılacak alt tabakaları sınırlar (Bhushan, 1991; Toyserkani ve Khajepour, 2004). Bu yöntemler, özel optik, mekanik veya elektronik özelliklere sahip aşınmaya dayanıklı, korozyona dayanıklı ve işlevsel kaplamalar üretmek için gereklidir.

#### **4.2.5 Diğer Kaplamalar**

Bu başlık altında lazerle kaplamaya ek olarak termal sprej, PVD ve CVD, elektrokaplama, sol-jel, plazma elektrolitik oksidasyon ile nitrürleme, borlama ve kromlama gibi difüzyon kaplamaları ele alınır. Amaç; sertlik, aşınma, korozyon, oksidasyon ve ısıl yorgunluk direncini hedefe uygun biçimde iyileştirmektir. Her yöntemin kaplama kalınlığı, yapışma mekanizması, işlem sıcaklığı, yüzey kalitesi, üretim hızı ve maliyet açısından avantajları ve sınırlamaları bulunur. Uygun yöntemin seçimi altlık malzemesi, geometri, istenen faz/mikroyapı, servis koşulları ve son işlem gereksinimleri dikkate alınarak yapılır; yüksek entropili alaşımlar için ara yüz kararlılığı ve kaplama-altlık uyumu özellikle kritik önemdedir.

##### **4.2.5.1 Lazerle Kaplama Metodu**

Lazerle kaplama metodu, YEA' larının üzerine lazer ışını ile eritilen kaplamayı içeren çok işlevli bir üretim tekniğidir. Ana substrat tarafından alınan enerji malzemenin ergimesine neden olur ve kaplanma malzemeye eklendikten sonra substrat yeniden katılır (Sun vd., 2019). Bu kaplamalar, nitrürler, karbürler veya borürler (Al, Cr, Ti, Nb, Zr) için yüksek afiniteye sahip elementler içerir (Zhang ve Zhou, 2017). Lazer kaplama, önceden yerleştirilmiş tellerin veya tozların lazerin yüksek ısısı altında eritildiği ve eş zamanlı olarak katıldığı yöntemdir. İşlem sırasında lazer başlığı, kaplama uygulanacak yüzey üzerinde belirli bir yol izleyerek hareket ettirilir ve böylece kaplama işlemi gerçekleştirilir. Bu süreçte, ortamın oksidasyona karşı korunması amacıyla genellikle argon gazı gibi koruyucu bir gaz kullanılır. Şekil 4.5'de ayrıntılı olarak bu yöntem şematize edilmiştir. Bu gaz erigiyik havuzundaki malzemeyi oksitlenmeye karşı korur (Zhu vd., 2020).

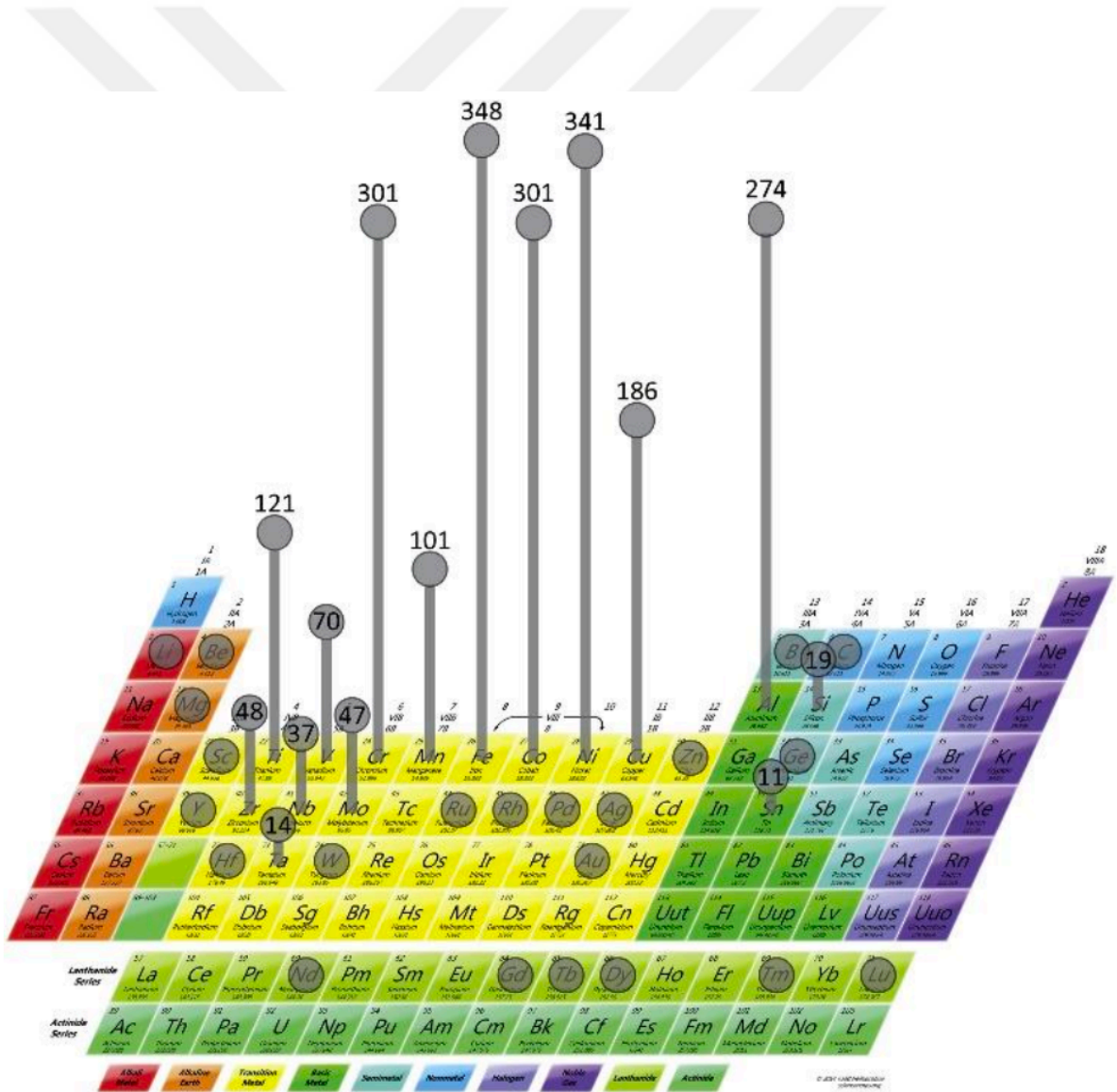


Şekil 4.5: Lazer kaplama prosesi (Zhu vd., 2020)

YEA' ları kaplamak için kullanılan yaygın yöntemlerden biridir. Lazer yüzey alaşımı ile karşılaştırıldığında, alt tabaka ile lazer kaplama kaplamaları arasında daha az kaplama seyreltmesi ve çok güçlü bir metalurjik bağ vardır. Lazer kaplama işlemi, daha iyi yönsellik, yüksek sıcaklık ve yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle uygulanır, bu da temel malzemeyi/alt tabakayı daha iyi eritmeye yardımcı olur ve mükemmel ara yüzey yapışma ile sonuçlanır (Arif vd., 2021). Yüksek enerji yoğunluğu, hızlı soğutma oranı ve ısıdan az oranda etkilenmesi ile lazer kaplama metotları oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Al. vd., 2024). Lazerle kaplanan yüzey; ince mikro taneli yapısı, kaplamanın mukavemeti, sertlik, aşınma direnci sayesinde gelişmiş mekanik özelliklere sahip olur (Chen vd., 2022). Kontrol edilebilir kaplı katman kalınlığı ve düşük termal deformasyonu ile diğer yüzey kaplamalarına göre en uygun avantajlı olmasını sağlar ve lazer kaplama işlemini endüstriyel uygulamalar için yüksek entropi alaşımlarında çok uygun hale getirir (Mostajeran vd., 2020). Isıdan etkilenen bölge, alt tabaka bölgesi, ara yüzey, kaplama bölgesi ve lazer kaplı kısım olmak üzere dört bölgedir. Lazer kaplama; gelişmiş performans için, koruyucu kaplamalar uygulamak için ve yıpranmış veya hasarlı yüzeyleri onarmak için yaygın olarak kullanılır. Bu işlem özellikle darbe, korozyon veya aşınma ve yıpranmaya maruz kalan makine ve ekipman parçaları için faydalıdır. Örneğin, inşaat ekipmanları işi, aşınma ve korozyon direncini artırmak ve böylece ekipmanlarının ömrünü uzatmak için bu teknolojiden yararlanır (Zhu vd., 2020).

#### 4.2.5.2 Kimyasal Yöntemler

Yüzey kaplama için kimyasal yöntemler, bir malzemenin görünümünü, dayanıklılığını veya işlevselliğini geliştirmek için yüzey özelliklerini değiştirmek için kullanılan tekniklerdir. Bu kaplamalar korozyona, aşınmaya, ısıya ve diğer çevresel faktörlere karşı direnç sağlayabilir. Elektrokaplama yöntemi bir metal kaplamanın; örneğin altın, gümüş, krom gibi bir elektrik akımı kullanılarak bir yüzeye biriktirilmesini içerir. Korozyon direncini artırır ve parlak bir yüzey sağlar (Loretto, 2005). Kimyasal dönüşüm kaplamasında ise alt tabaka ile kaplama çözeltisi arasındaki kimyasal reaksiyonla ince, koruyucu bir tabakanın oluşturulduğu bir işlemdir. Örneğin alüminyum veya çinko üzerindeki kromat dönüşüm kaplamaları bulunur (Wernick vd., 2000).



Şekil 4.6: Çok esaslı element alaşımlarında elementlerin kullanılma sıklığı

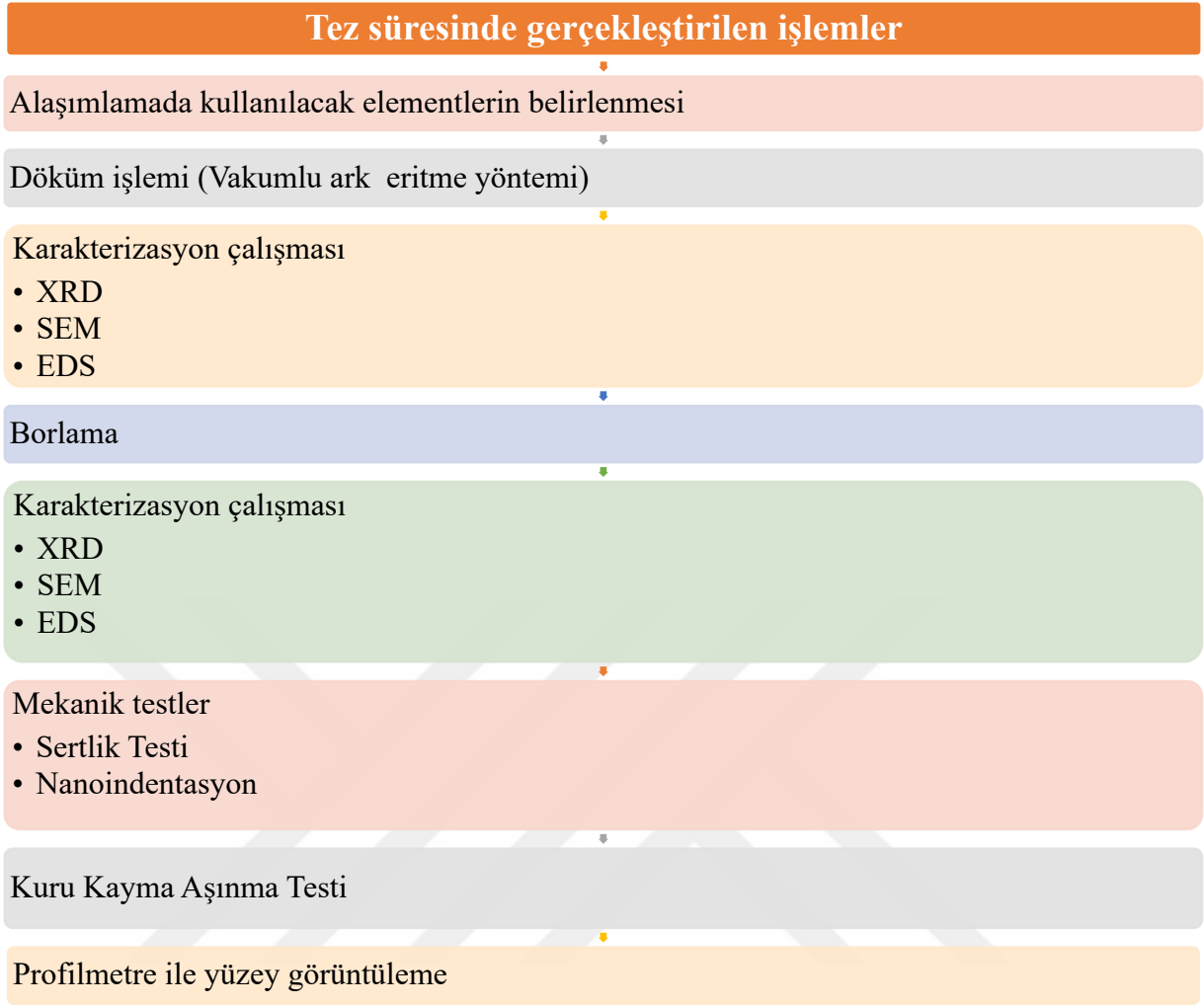
Yapılan araştırmalara göre şu anda en çok rapor edilen yüksek entropili alaşımlarla ilişkili iki sınırlama vardır. Bunlardan biri yüksek maliyettir çünkü YEA' ların mevcut bileşim tasarım stratejisi genellikle yüksek maliyet içerikleri içermektedir. Özellikle şekil 4.6' deki gibi Co, Ta, Hf ve V. Co gibi metallere oldukça pahalıdır. YEA' ların yüksek maliyeti, bu tür gelişmiş alaşımların mühendislik uygulamalarını sınırlayan temel engellerden biri haline gelmiştir. Dikey çizgiler, ilgili sayılarla da gösterilen, belirtilen elementi kullanan alaşımların sayısıyla orantılıdır (Miracle, 2017).

İkinci konu, YEA' ların mukavemet süneklik dengesi ile ilgilidir. Yüksek akma dayanımına sahip çoğu yüksek entropili alaşımlar, düşük sünekliğe sahiptir. Her ne kadar bazı YEA'lar dengeli bir mukavemet ve süneklik sergilese de (Lei vd., 2018; Yang vd., 2018), bunların mekanik özellikleri hala bazı geleneksel alaşımlardan daha düşüktür (Xu vd., 2020). Yine de YEA ile olağanüstü mekanik özellikler elde etme olasılığı geleneksel alaşımlara göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, yüksek performanslı, uygun maliyetli YEA'ların geliştirilmesi hem teknolojik hem de bilimsel öneme sahiptir. Bu nedenle alışmamızda YEA'ların mekanik özelliklerini geliştirmek için mikroyapısal kontrol ve kompozisyon tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Kompozisyon tasarımı açısından, daha önce de belirtildiği gibi, mevcut tasarımlarda genellikle yüksek miktarda pahalı metal içeren elementler kullanıldığında çalışmalar yüksek maliyetler ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle maliyeti düşürmek için yeni bir kompozisyon tasarımına ihtiyaç vardır. Tezimizde uygun maliyetli elementler kullanılarak YEA üretilmiştir. Üretilen yüksek entropili alaşımın yüzeyi bor ile kaplanarak daha iyi mekanik özellikler elde edilmesi amaçlanmıştır.

## 5. MATERYAL VE METOT

Yüksek entropili alaşımlar, sahip oldukları çeşitli bileşimler, mikro yapılar ve istenen özelliklere göre uyarlanabilme yetenekleri sayesinde, malzeme mühendisliğinde karşılaşılan birçok problemin çözümünde etkili bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yüksek entropili alaşımlar hakkında çalışmalar yapılmış olsa bile konu hakkında daha fazla inceleme yapılarak literatüre katkı sağlayacak olan daha çok bilginin ortaya çıkarılması gerekmektedir.

Bu çalışmada CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımı üretilip, alaşıma borlama yüzey işlemi uygulanarak yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı olan bir malzeme üretilmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında, eşatomik CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşım üretilerek; aynı sıcaklıkta borlama işlemlerine tabi tutulup, yüksek sıcaklık koşullarında bor atomlarının metal yüzeyine doğru difüze olmasıyla, yüzeyde bir bor tabakası oluşumu gerçekleşmiştir. Bu bölümde genel olarak yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Şekil 5.1’de tez süresinde gerçekleştirilecek olan aşamalar verilmiştir.



Şekil 5.1: Tez süresinde gerçekleştirilen işlemler

Tasarlanmak istenen yüksek entropili alaşımdaki elementlerin seçimi ve hazırlanışı, alaşımların vakumlu ark eritme cihazı ile üretimi, bor ile kaplanması işlemlerine bu bölümde yer verilmiştir. Ardından malzemeyi analiz edebilmek adına, üretimi gerçekleştirilen yüksek entropili alaşım numunelerinin mikroyapılarını, kristal yapılarını incelemek, fazlarını belirlemek için X-ışını Kırınımı (XRD) ve (SEM) kullanılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve yüzey yapılarını gözlemleyebilmek için sertlik testi ve nanoindentasyon testi yapıp aşınma testine tabi tutulmuştur. Optik profil oluşturucusu cihazı ile haritalandırmalar yapılarak sonuçlar gözlemlenmiştir.

## 5.1 Kullanılacak Malzemenin Belirlenmesi

Yüksek entropili alaşımlarda karışım entropisi yüksek olması açısından en az 5 element seçimi yapılmıştır, böylece element sayısının fazla olması karışım entalpi değerini dengelemiştir. Alaşımlamada kullanılacak malzemeler belirlenirken erişim imkanı kolay olan malzemeleri seçmek avantaj sağlayacağından bu konuya dikkat edilmiştir.

Alaşımlama sürecinde malzeme seçimi yapılırken, periyodik tablodaki elementlerin özellikleri dikkate alınmış; alaşımı oluşturan elementlerin termodinamik entropi ve entalpi değerleri, elektronegatiflikleri ile atomik yarıçapları gibi karakteristik özelliklerinin birbirleriyle uyumluluğu değerlendirilerek uygun elementler belirlenmiştir. Ayrıca, katı çözelti oluşumunu desteklemek amacıyla Hume Rothery kriterleri doğrultusunda; yüksek karışım entropisine sahip, elektronegatiflik değerleri birbirine yakın ve atomik yarıçap farkı az olan alaşım elementleri tercih edilmiştir. Bu çalışmada, özellikle Mn, Nb, Cr, Fe ve Ni elementleri seçilerek yüksek entropili alaşım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tezde kullanılan malzemeler ile özellikleri Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1: Tez Kapsamında İncelenen Elementlerin Özellikleri

Element	Atom Numarası	Periyot	Grup	Katagorisi	Kristal Yapısı
<b>Nb</b>	41	5	5	Geçiş Metali	HMK
<b>Cr</b>	24	4	6	Geçiş Metali	HMK
<b>Mn</b>	25	4	7	Geçiş Metali	HMK
<b>Fe</b>	26	4	8	Geçiş Metali	HMK
<b>Ni</b>	28	4	10	Geçiş Metali	YMK

Çalışmada alaşım hazırlanırken, her bir elementin alaşımdaki yüzdesi ve mol kütleleri “dikkate alınarak, gerekli gramaj miktarları hesaplanmıştır. Her bir element %20 molar oranında hesaplanmıştır. Bu nedenle toplamda 100gr lık bir CrFeMnNbNi alaşımı elde etmek için her bir elementten %20 atomik oran yüzdesi ile hesaplama yapılmıştır. Elementler, hassas teraziler kullanılarak dikkatlice tartılmış ve böylece gereken miktarlarda

malzemelerin doğru oranlarda karışımı sağlanmıştır. Kullanılan her elementin saflığı ağırlıkça %99,9'un üzerinde olup ve elementler külçe formunda kullanılmıştır.

$$\text{Toplam Mol Sayısı} = \frac{100g}{\left(\frac{20}{58,69} + \frac{20}{92,92} + \frac{20}{55,85} + \frac{20}{54,94} + \frac{20}{51,99}\right)}$$

### 5.1.1 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Her Bir Elementinin Alaşıma Katılma Kütlesinin Hesabı

CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımı toplamda 100gr lık hazırlanacağı için hesaplama 100gr üzerinden yapılmıştır. Alaşımı elde etmek için her bir elementten %20 atomik oran yüzdesi ile hesaplama yapılmıştır. CrFeMnNbNi alaşımının her bir elementinin toplam kütlesi 314,38g dır. 100gr üzerinden bu değeri hesaplırsak aşağıdaki veriler elde edilmektedir. Alaşımlama için eklenen element kütleleri Tablo 5.2' de verilmiştir.

$$\text{Ni mol: } \frac{100 \times 58,69}{314,38}$$

$$\text{Nb mol: } \frac{100 \times 92,91}{314,38}$$

$$\text{Fe mol: } \frac{100 \times 55,85}{314,38}$$

$$\text{Mn mol: } \frac{100 \times 54,94}{314,38}$$

$$\text{Cr mol: } \frac{100 \times 51,99}{314,38}$$

Tablo 5.2: Alaşım Hazırlığında Kullanılan Cr, Fe, Mn, Nb ve Ni Elementlerinin Kütle Değerleri

Element	Alaşımındaki Atomik Oran Yüzdesi (%)	Atom Kütleleri (g/mol)	Alaşımına Katılan Kütle (g)
Niyobyum (Nb)	%20	92,91	29,5
Krom (Cr)	%20	51,99	16,6
Mangan (Mn)	%20	54,94	17,4
Demir (Fe)	%20	55,85	17,8
Nikel (Ni)	%20	58,69	18,7

Alaşım lamada kullanılan tozlar Alfa Aesar'dan tedarik edilmiştir ve ortalama tane boyutu -325 mesh'dir. Tabloda verilen oranlara uygun olarak hassas terazilerde tozlar tartılarak alaşım için bir araya getirilmiştir. Tozlar öncelikle hafif mekanik şartlarda bir bilyeli değirmen içinde karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma işleminde 2 saat süre ile 200 rpm devirde gerçekleştirilmiştir. Sonra tozlar her biri yaklaşık 5 gr olacak şekilde hidrolik presler yardımıyla pelet haline getirilmiştir. Toplam ağırlığı 100 gr olan peletler vakum ark eritme cihazı yardımıyla yüksek saflıkta argon atmosferi altında su soğutmalı bir bakır tablada eritilerek alaşım haline getirilmiştir. Vakumlu ark eritme cihazı, elementlerin vakum ortamında yüksek sıcaklıklara çıkarılarak ergitilmesini sağlar; bu yöntem sayesinde, normal katılma sürecine kıyasla daha homojen yapıya sahip alaşımlar elde edilmiştir.

## 5.2 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımın Üretimi

Vakumlu ark eritme yöntemi yüksek entropili alaşım hazırlanırken en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Alaşım arkla eritilerek, koruyucu Ar atmosferi altında, su soğutmalı tungsten elektrotlu bakır bir pota içinde gerçekleştirilmiştir. CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımı tamamen karışması ve elementlerin daha homojen olarak dağılması için birkaç kez işlemler tekrarlanmıştır. Alaşımlama sürecinde, ark eritme fırınının iç basıncı önce  $10^{-2}$  mbar seviyesine çekilmiş ve ardından eritme işlemleri, yüksek saflıkta argon gazı altında 400 mbar basınçta yapılmıştır.

Vakumlu ark eritme sisteminde ark oluşturmak için 300-400 A aralığında ve 70-120V aralığında eritme yapılmıştır. Kullanılan yöntem yüksek sıcaklık ile gerçekleştiği için bazı düşük erime ve kaynama noktasına sahip metaller işlem sırasında buharlaşmaya uğrayabilir. Bu sebeple iyi bir alaşım oluşması için alaşım hazırlama sırasında sürekli kompozisyon kontrolü sağlanmıştır. Bu tür durumlarda, alaşım hazırlamak için indüksiyon ve dirençle ısıtma fırınları en uygun yöntemler olarak öne çıkar. Eritme ve döküm süreçlerinde, katılma hızının düşük olması nedeniyle segregasyon oluşumu görülmekte ve bu durum heterojen bir mikroyapıya yol açabilmektedir. Kimyasal homojenliği sağlamak amacıyla, alaşım en az dört kez tekrar eritilmiştir. Kullanılan vakumlu eritme fırını Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2: Vakum Eritme ocağı resmi

İşlem başlamadan önce, vakum odası ve bakır pota oksijenli suyla temizlenmiştir. Ardından, alaşımda kullanılacak elementler bakır potanın içine yerleştirilmiştir. Bakır pota, ark eritme cihazının 4000°C gibi yüksek sıcaklıklara ulaşabilmesi nedeniyle basınçlı su ile soğutularak aşırı ısınmanın önüne geçilmiştir.

- Peletler, vakum cihazının tablasına düzenli ve sıralı şekilde yerleştirilmiştir; bu düzenleme, peletlerin erirken bütünlüğünü korumasını kolaylaştırmaktadır.
- Daha sonra vakum odasının kapağı kapatılarak cihaz çalıştırılmıştır.
- Bu aşamadan sonra, vakum pompası kullanılarak vakum odası boşaltılmıştır.
- Homojenlik sağlamak amacıyla bu vakumlama işlemi birkaç kez tekrarlanmış, ardından vakum odasına argon gazı verilerek ortam temizlenmiş ve sadece argon gazı bulunması sağlanmıştır. Argon, işlem sırasında malzemenin oksitlenmesini engellemek için kullanılmaktadır.
- Tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra, vakum odasında bulunan elektrotta elektrik akımı uygulanmış ve elektrot ucu ile tabla arasında bir ark oluşumu sağlanmıştır.

Elektronlar, elektrottan yüksek enerjiyle koparak tabla üzerinde bulunan elementlere yönelir. Elektronların çarpmasıyla elementler önce ısınır, ardından erimeye başlar. Elementlerin erime noktaları farklı olduğu için, uygun sıcaklıkta tüm elementler sıvı hale gelir. Uygun sıcaklık değerinde alaşım sıvı hale gelmesi sağlanmıştır. Akabinde cihaz kapatılıp işlem sonlandırılmıştır. Daha sonra alaşım soğuması için bekletilmiştir. Alaşımın karışması ve homojenizasyonu daha iyi olması için malzemeye aynı işlemler birkaç defa tekrarlanmıştır. Böylelikle CrFeMnNbNi alaşımı üretilmiştir. Hazırlanan numuneler daha sonra tel erozyon işlemi kullanılarak, külçelerden küçük parçalar haline getirilebilmesi için yüksek hızlı hassas kesme cihazı ile 20 x 20 x 5 mm boyutlarında dikdörtgen şekillerde kesilmiştir.

### **5.3 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımda Borlama İşlemi**

Borlama yapılacak numunelerin işlemden önce yüzeyleri pürüzsüz ve temiz olması için 1200 gritlik SiC zımpara kağıtları kullanılarak taşlanmıştır. Bu işlemeden sonra kirlenici maddeleri numune yüzeyinden uzaklaştırmak için zımparalanan yüzeyler suyla yıkanmıştır. Ardından 10 dakika boyunca asetonda sonikasyon yapılmıştır. Böylece kirli olmayan ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Temizlenen numuneler ağzı hava almayacak şekilde kapatılabilen, hava geçirmez bir Inconel 718 kroze yerleştirilmiştir. Daha sonra kapatılıp sızdırmaz hale getirilen kroze önceden ısıtılmış borlama sıcaklığında hazır bekletilen fırına yerleştirilmiştir. Borlama sırasında oluşabilecek oksidasyon sorunlarını önlemek amacıyla tablanın tüm yüzeyleri 10 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası ile doldurulmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda; Ni

içeren süper alaşımlarda ve yüksek entropili alaşımlarda silisit tabakasının oluşumunu önlemek için SiC yerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanmak daha doğru tercih olacağı sonucuna varılmıştır.

Yüksek entropili alaşımlardaki (YEA' lar) yavaş difüzyon etkisi göz önüne alındığında, borlama işlemi, çelikler için tipik olarak kullanılanla kıyasla daha fazla süre olacak şekilde planlanmıştır. Borlama işlemi 950°C'lik yüksek sıcaklıkta 5 saat gibi çeliklere nazaran daha uzun bir süre boyunca gerçekleşmiştir. Borlama tozu olarak 75% B<sub>4</sub>C, 5% NaBF<sub>4</sub>, 5% saf Al, 1% NH<sub>4</sub>Cl, ve 14% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, saf Al tozunun eklenmesiyle borür katmanları içindeki alüminid kaplamaların şekillendirilebilirliğinin araştırılması da amaçlanmıştır. Borlama işlemi atmosfer kontrollü kül fırınında gerçekleştirilmiş, ardından havayla soğutulmuştur. Elde edilen numuneler Şekil 5.3' de gösterilmiştir. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen numunelerin üzerinde bulunan oksitlenmeler giderilmesi amacı ile zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır.



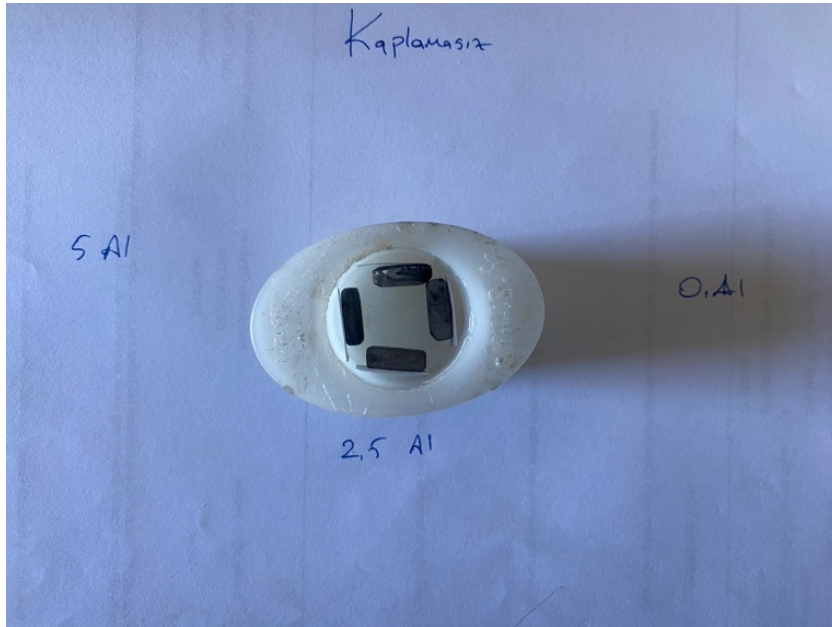
Şekil 5.3: Hazırlanmış Numuneler

Elde edilen farklı numuneler mikroyapı ve mekanik çalışmalarda birlikte incelemesi ve sertlik analizleri yapılabilmesi için geleneksel numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler öncelikle bakalite alınarak soğuk kalıplama yapılmıştır. Soğuk kalıplama oda sıcaklığında yapılmıştır ve dışarıdan harici basınç veya sıcaklık uygulanmamıştır. Bakalitleme için epoksi reçine ve sertleştirici karıştırılarak kalıp malzemesi hazırlanmıştır. Şekil 5.4' de bakalit solüsyonunun hazırlığı verilmiştir.

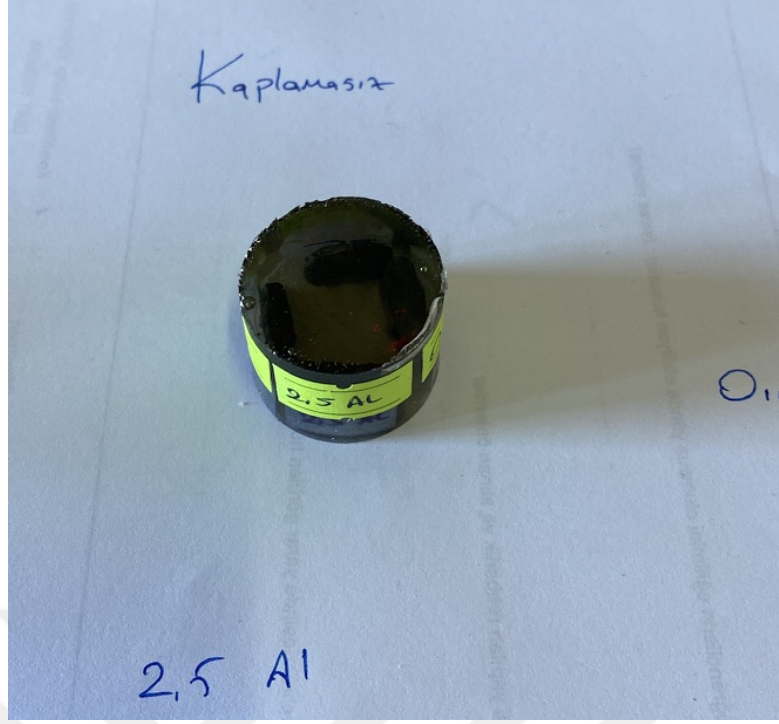


Şekil 5.4: Bakalit Solüsyonu

Numuneler bakalit alma kabına yerleştirilip üzerine hazırlanan reçine dökülmüştür. Ardından reçine sertleşmesi için 45 dk beklenmiştir ve numune kalıptan çıkarılmıştır. Şekil 5.5'te bakalit içine alınmış numunelerin görüntüsüne yer verilmiştir. Buna ek olarak, Şekil 5.6'da ise bakalit kalıplarından çıkarılan numuneler görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 5.5: Bakalite alınmış numuneler



Şekil 5.6: Kalıptan çıkarılmış numune

Mikroskobik inceleme yapacağımız numune yüzeyi pürüzlü ve çizikli olduğundan düzgün bir yüzey elde edebilmek, deforme olmuş tabakayı uzaklaştırmak için zımparalama yapılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemi için Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi laboratuvarı'nda bulunan Metkon firmasına ait Forcipol 2V model otomatik zımparalama ve parlatma cihazı tercih edilmiştir. Şekil 5.7'de, kullanılan bu otomatik zımparalama ve parlatma sisteminin görseli sunulmuştur.



Şekil 5.7: Forcipol 2V model zımparalama ve parlatma cihazı

Otomatik zımparalama cihazında, numune hazırlama sürecine uygun olarak dönüş hızı ve su verme fonksiyonu isteğe bağlı şekilde ayarlanabilmektedir. Zımparalama işlemi adım adım ilerletilmiş ve her aşamada bir önceki aşındırıcıdan daha ince tanecikli zımpara kullanılmıştır. Bu sayede, her aşamada yüzeyde oluşan çizikler ve deformasyonlar minimum seviyeye indirgenmiştir. Zımparalama işlemi için 60, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 numaralı grit SiC zımpara kağıtları kullanılmıştır. Numunenin ısınmaması ve kopan parçaların numune yüzeyini çizmesini engellemek için su modu kullanılmıştır. Zımparalama, küçük numaralı zımpara kağıtından başlanacak şekilde her disk değiştirdikçe numune yönü 90 derece döndürülmüş ve numune diskin dış yüzeyinden merkeze doğru hareket ettirilerek yapılmıştır. Bu sayede numune yüzeye homojen temas sağlayıp, numune her 90 derece döndüğünde bir önceki zımparanın izlerinin giderildiği daha kolay anlaşılabilir böylece düzgün bir yüzey elde edilmiştir. Zımparalama işlemi tamamlanan numunenin görseli Şekil 5.8’de sunulmuştur.



Şekil 5.8: Zımparalanmış numune

Parlatma işlemi için otomatik zımparalama parlatma cihazı 300 devir/dk hızda ayarlanıp diske çuha yerleştirilmiştir. Numune yüzeyine solüsyon sıkılarak daha iyi parlaklık elde edilmek istenmiştir. Solüsyonun içerisinde bulunan elmas partiküller sayesinde malzeme yüzeyi temizlenip parlatılmıştır bu da malzeme analizinde daha doğru veriler almamızı sağlamıştır. Parlatma işleminde kullanılan solüsyonun görseli Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9: Parlatma solüsyonu

#### 5.4 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Optik Mikroskop Analizi

Numunenin yüzey analizi, Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan Nikon marka Shuttle Pix model dijital mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikroskoba ait görsel Şekil 5.10'da yer almaktadır.

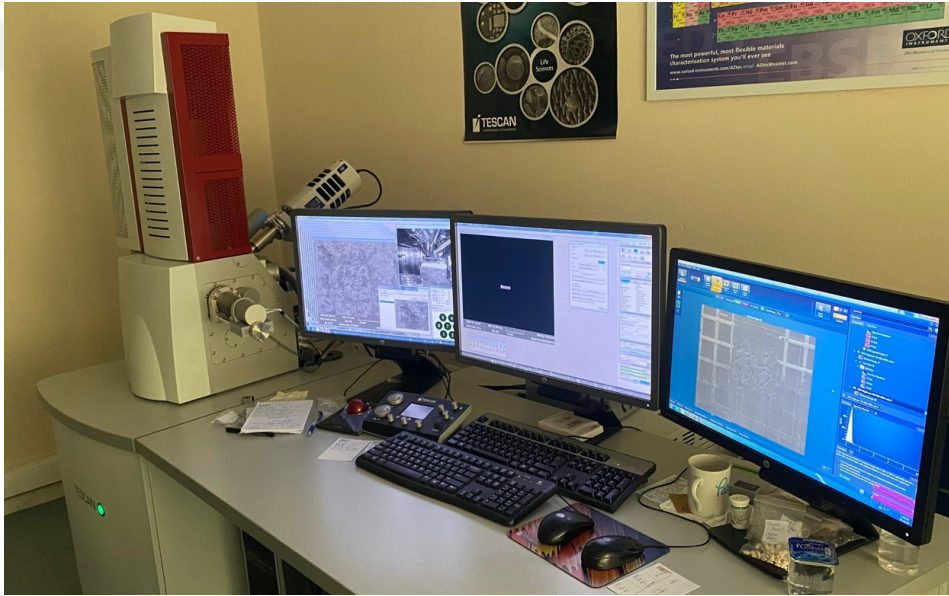


Şekil 5.10: Nikon marka dijital mikroskop

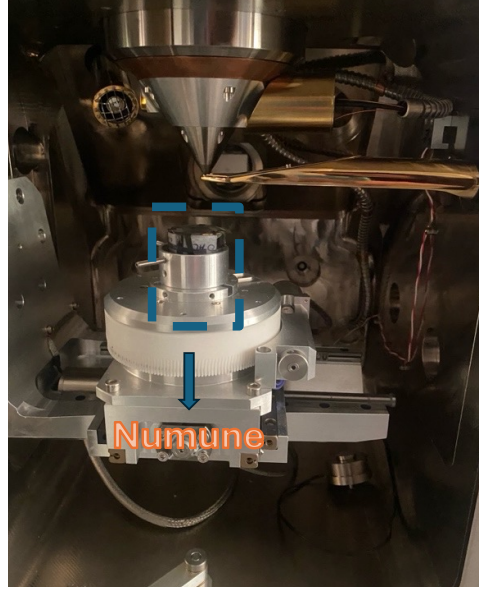
#### 5.5 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Taramalı Elektron Mikroskop Analizi

Borsuz ve bor ilaveli numunelerin optik mikroyapı görüntülerini karşılaştırmak ve aşınmış yüzeyleri incelemek için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Yüksek entropili alaşımlarda istenilen özelliklerin elde edilmesi büyük ölçüde mikroyapıların kontrolüne bağlıdır. Bu nedenle, söz konusu alaşımların üretiminde mikroyapının doğru şekilde yönlendirilmesi oldukça kritik bir aşamadır. Bu çalışmada, üretilen yüksek entropili alaşımlar Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne bağlı Taramalı Elektron Mikroskobu Laboratuvarı'nda, TESCAN markasına ait MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskobu ile detaylı olarak analiz edilmiştir. Aynı zamanda, kimyasal bileşimlerin belirlenmesi amacıyla enerji dağılımlı spektroskopi yöntemi de kullanılmıştır. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de, incelemelerde kullanılan taramalı elektron mikroskobuna ilişkin detaylı görsellere yer verilmiştir.

Görüntü alma işlemine başlanılmadan önce, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçen numunelerden daha net görüntüler alınabilmesi için kaplama yapılmıştır. Kaplamanın sebebi, meydana gelecek olan elektron demetlerinin mükemmel bir şekilde etrafa saçılabilmesi ve alınacak olan görüntülerin mükemmel netliğe ve iyi bir kontrast değerine sahip olmasıdır. Taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen analizlerde, numunenin mikroyapısal özellikleri ve elementel bileşimi belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, SEM cihazına entegre enerji dağılımlı spektroskopi sistemi kullanılarak, çok bileşenli alaşımın içerdiği elementlerin yüzey üzerindeki dağılımı haritalama yöntemiyle incelenmiştir.



Şekil 5.11: TESCAN markasıyla üretilmiş taramalı elektron mikroskobu



Şekil 5.12: Numunenin yerleştirildiği ünite

### 5.6 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının X-Işını Kırınım Analizi (XRD)

Mikro yapıdaki kristal yapılar ve fazlar, 40 kV ve 30 mA çalışma voltajı ve akımında Cu K $\alpha$  radyasyonu ile x- ışını kırınım cihazı ile tanımlanmıştır. Numunelerde oluşan faz değişimlerini belirlemek amacıyla, Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Karakterizasyon Laboratuvarı'nda bulunan RIGAKU marka Smartlab model X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. Cihazın görseli Şekil 5.13'te sunulmuştur.

X-ışını kırınımı (XRD) analizi, kristal fazların atomik düzenlerine bağlı olarak, X-ışınlarının belirli bir düzen içinde kırılması prensibine dayanır ve bu sayede malzemenin faz yapısı hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Yüksek entropili alaşımlarda kristal fazların oluşumu, yapısı ve özelliklerini anlamak için kritik öneme sahip bir analiz yöntemidir. Her kristal yapı kendine özgü bir kırınım paterni oluşturur. Faz tanımlaması için American Society for Testing and Materials tarafından yayınlanan ve JCPDS veri tabanından alınan standart referans paternleri kullanılmıştır. XRD ölçümleri, CuK $\alpha$  ışınlarının kullanılmasıyla,  $2\theta$  açısı  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında ve tarama hızı  $2^\circ$ /dakika olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13: Rigaku marka XRD cihazı

### 5.7 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Mikrosertlik Analizi

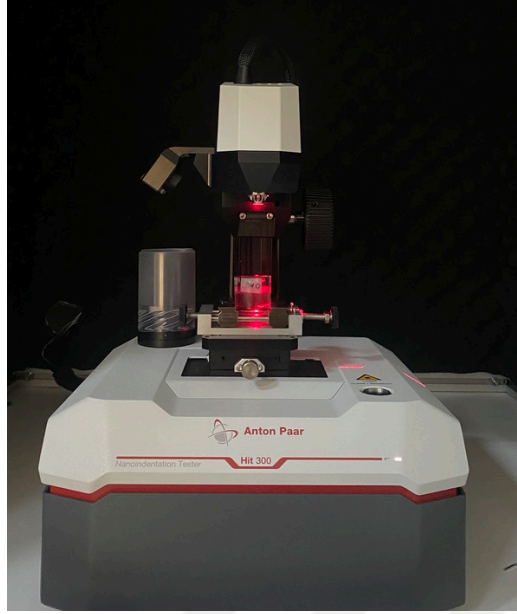
Yüksek entropili alaşımların mikroyapı görüntüleri optik görüntüleme sistemi kullanılarak elde edildikten sonra, mikro sertlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla sertlik testlerine geçilmiştir. Sertlik ölçümleri, Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan Qness marka Q10M model dijital sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sertlik cihazının fotoğrafı Şekil 5.14'te sunulmuştur. Numunelerin kesitlerinden Vickers sertlik testi uygulanmış ve testler 100 gramlık yük ile 15 saniye süre boyunca yapılmıştır. Vickers sertlik ölçümlerinde batma derinliği tespit edildiği için yüzey pürüzlülüğü sonuçları etkileyebilmektedir; bu yüzden ölçüm öncesinde numune yüzeyleri uygun şekilde temizlenmiştir. Her bir numune için beş farklı noktada sertlik ölçümleri yapılarak, elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.14: QNESS marka Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

### 5.8 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Nanoindentasyon Testi

Numunelerin detaylı sertlik analizlerini yapabilmek için nanoindentasyon özellikleri Bartın Üniversitesi Metalografi laboratuvarında bulunan Anton Paar marka Hit 300 model cihazında değerlendirilmiştir. Test cihazına ait detaylı görseller Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sunulmuş olup, cihazın farklı açılardan çekilmiş fotoğraflarıyla yapısı ve çalışma prensibi hakkında görsel bilgi sağlanmıştır. Bu test, numunenin yüzeyine çok küçük bir yük uygulayarak malzemenin plastik ve elastik özelliklerini belirlemeye yardımcı olur. Önemli parametreleri arasında elastik indentasyon modülü, indentasyon sertliği ve dalma sürünmesi yer almaktadır. 10 mN yük, 30 s sabit yükleme hızı, 15 s bekleme süresi ve 30 s kademeli boşaltma süresi ile Berkovich uçlu nanoindentasyona sahip cihazda değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler en az 5 farklı noktadan alınmış olup ortalama değerler bulunmuştur.



Şekil 5.15: Cihazda numunenin yerleştirildiği modül

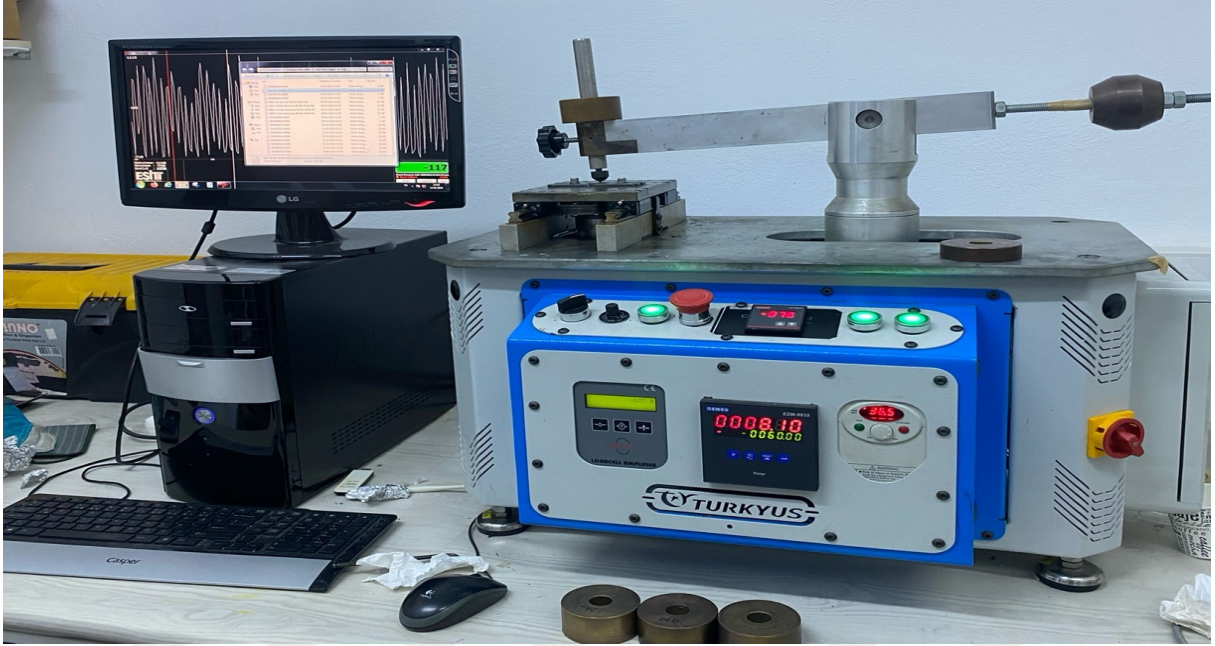


Şekil 5.16: Değerlendirme ve işleme yapılan bilgisayar modülü

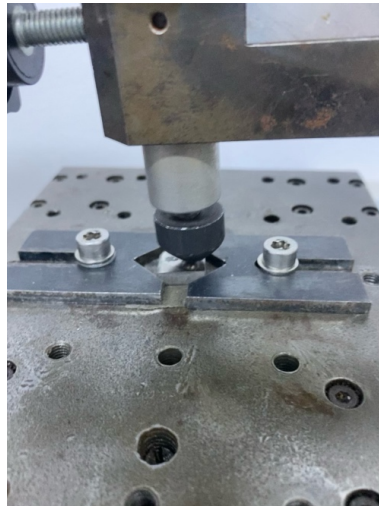
### 5.9 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Aşınma Testi

Birbiri ile temas eden malzemelerin sürtünmesi sonucunda aşınma meydana gelir. Numunelerin aşınma özelliklerini ve direnç kapasitelerini kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Laboratuvarı'nda bulunan Turkeyus marka POD&HT&WT model Ball-on-disk aşınma testi cihazı tercih edilmiştir. Bu cihaz, numune yüzeyine belirli bir basınç ve

hızda temas eden top ile disk arasındaki sürtünme ve aşınma miktarını ölçerek, malzemelerin dayanıklılık performansını hassas bir şekilde analiz etmeye olanak sağlar. Yapılan testler sonucunda, malzemelerin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi kritik parametreler belirlenerek, farklı alaşımların performans karşılaştırmaları yapılabilmektedir. Cihaza Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’ de yer verilmiştir.



Şekil 5.17: Turkeyus marka aşındırma cihazı



Şekil 5.18: Cihaza malzemenin yerleştirildiği tabla

Kuru kayma aşınma testleri oda şartlarında yapılmıştır. Öncelikle cihaz ve malzeme yüzey temizliği yapıp aşındırıcı bilya cihaza yerleştirilmiştir. Cihazın tabla kısmına malzeme yerleştirilerek sıkma pensi ile numune sabitlenmiştir. Cihaz kontrol panelinden test frekansı 36,5 Hz, süresi 60 dk olarak ayarlanmıştır. Cihazın yükleme bölümündeki kol kısmına numune üzerine uygulanacak kuvvetler karşılık gelen kütleler yerleştirilmiştir. Cihaza entegre yük hücresi ile anlık olarak veriler ölçülerek bağlı yazılım aracılığı ile bilgisayara aktarım gerçekleşmiştir. Bilyalı cihaz üzerinde yapılan testlerde disk kısmında toplam kayma mesafesi 100 m ve pistonlu test prosedüründe yapılan testlerde delici uç olarak 6 mm çapında WC topu kullanılmıştır. Sırasıyla numunelere 5N, 10N ve 15N karşılık gelen kütlelerle 60 dk boyunca yük uygulayarak aşınmaları ölçülmüştür. Şekil 5.19’ da aşındırılmış yüzeyler gösterilmiştir. Uygulanan 10N yüke Şekil 5.20’ de yer verilmiştir. Testlerde meydana gelen hacim kayıpları ve aşınma izi profilleri Filmmetrics Profilm 3D optik profil oluşturma cihazı kullanılarak belirlenmiştir.



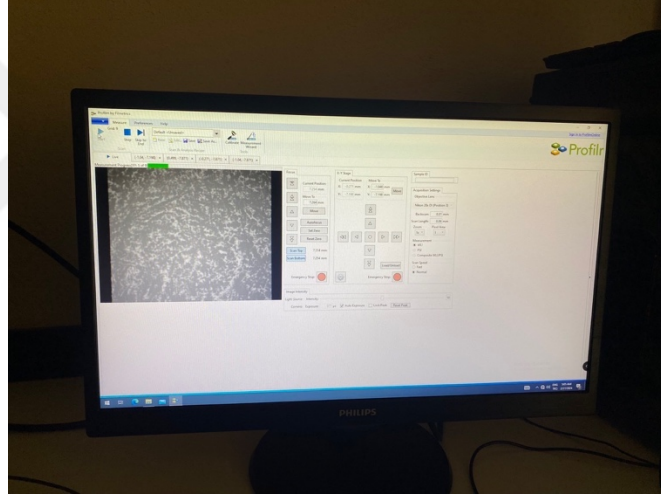
Şekil 5.19: Aşındırılmış malzeme yüzeyleri



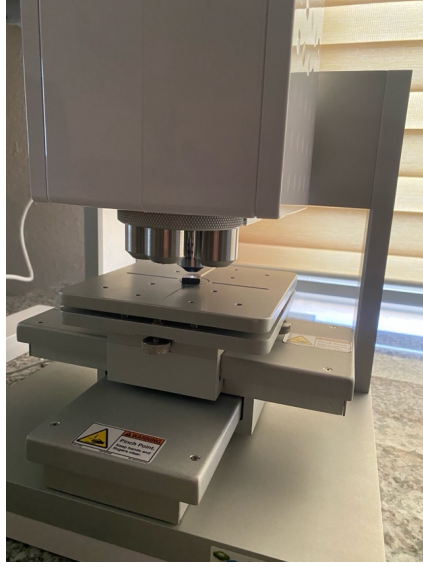
Şekil 5.20: Cihaz koluna uygulanan 10N yük

## 5.10 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Optik Profilometre

Aşınma testinden geçirilen numunelerin yüzey yapısını detaylı şekilde incelemek ve yüzey topografyasına ait verileri elde etmek amacıyla, Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik Test Laboratuvarı'nda yer alan Filmetrics marka profilometre cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz aracılığıyla, numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve elde edilen veriler doğrultusunda yüzey analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, aşınma sonrası oluşan yüzey deformasyonları nicel olarak değerlendirilmiştir. Analiz cihazına Şekil 5.21 ve Şekil 5.22' de yer verilmiştir. Profilm 3D optik profil oluşturucu cihazı, aritmetik ortalama ve ortalama karekök parametreleri açısından ISO 25178-2 standardına uygundur.



Şekil 5.21: Profilometre görüntüleri elde edilen ve çalışmalarını düzenlenen bilgisayar ara yüzü



Şekil 5.22: Filmetrics marka profilometre

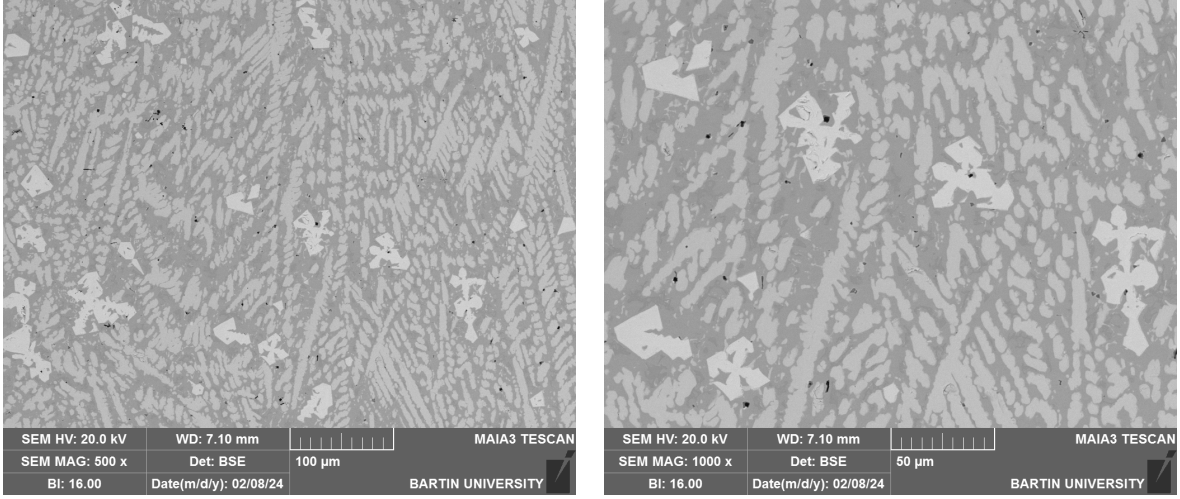
## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, eş atomik oranlarda seçilen beş farklı elementin birleşimiyle CrFeMnNbNi bileşiminde yeni bir yüksek entropili alaşım sentezlenmiştir. Elde edilen bu yüksek entropili alaşım, borlama işlemine tabi tutularak yüksek sıcaklık koşullarında bor atomlarının metal yüzeyine difüze olması sağlanmış ve bu sayede yüzeyde borür oluşumu gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan bu termokimyasal işlem ile malzemenin yüzey sertliğinde meydana gelen değişimler detaylı şekilde incelenmiştir. Borlama işleminden sonra CrFeMnNbNi alaşımı kimyasal, morfolojik, mikro yapısal özelliklerinin değişime uğraması ve aşınma direncinin değişimi beklenmiştir ve bu veriler analiz edilmiştir. Üretilen alaşım aşınma direnci, mekanik özellikleri, sertlik ve mikroyapılarının grafikleri incelenip sonuçları verilmiştir. Yüzey analizinde SEM, faz analizinde XRD, aşındırma sonrası yüzey analizinde profilometre cihazı kullanılmıştır. Alaşımın yüzeyinde oluşan borür fazların etkisiyle sertlik artışı ve bu sertlik artışına bağlı olarak da aşınma direnci hakkında analizler yapılmıştır. Sertlik ölçümü vickers sertlik ölçüm ve nanoindentasyon cihazı ile numunelerin farklı noktalarından sertlik analizleri yapılmıştır.

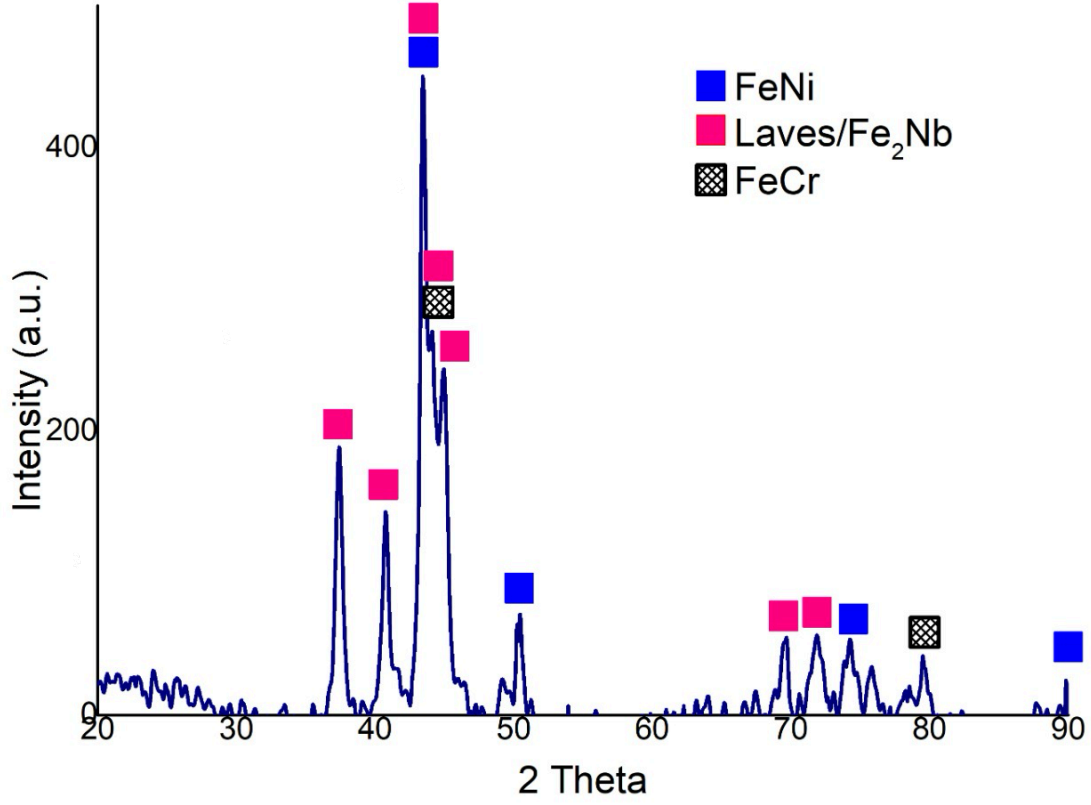
### 6.1 Mikroyapı Karakterizasyonu

Numuneler üzerinde yapılan mikroyapısal incelemeler aşağıda Şekil 6.1' de detaylı bir şekilde verilmiştir. Alınan mikroyapılardaki görüntüler incelendiğinde dentrit ve interdentrit yapılar oluştuğu görülmüştür.



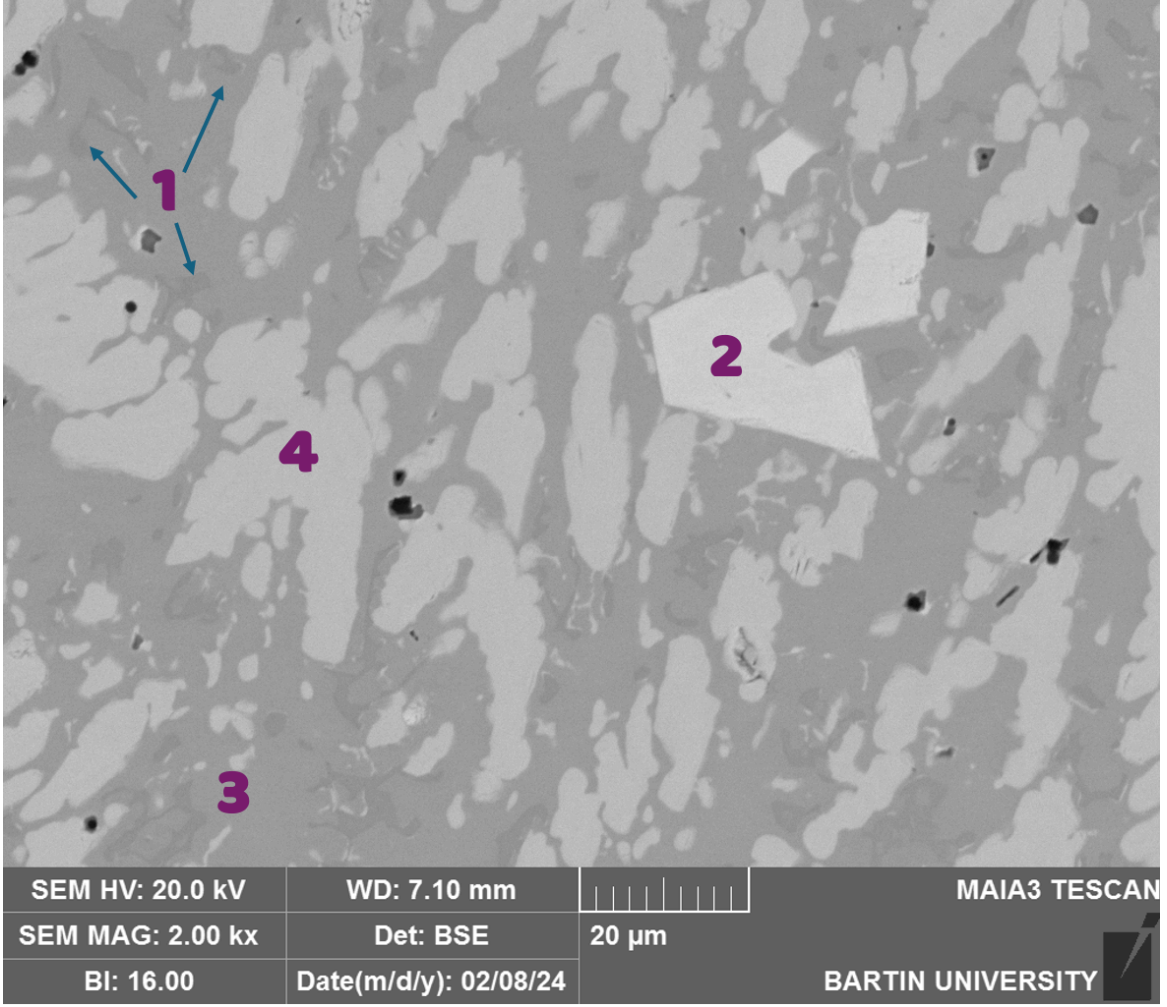
Şekil 6.1: CrFeMnNbNi alaşımı SEM mikroyapı görüntüsü

Vakumlu ark eritme yöntemiyle üretilen CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın XRD analizi Şekil 6.2’ de verilmiştir. XRD analizine bakıldığında alaşımın 3 farklı fazına ait pikler belirlenmiştir. Bu fazların iki farklı katı çözelti ve bir intermetalik faz olduğu tahmin edilmektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, alaşımda yer alan katı çözelti fazlarının FeCr için hacim merkezli kübik yapıya ve FeNi için ise yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip olabileceği öngörülmektedir. Ayrıca Fe<sub>2</sub>Nb bileşiğindeki Nb elementinin varlığı laves fazının varlığını desteklemiştir. Nb elementi, yeterli miktarlarda Cr, Fe ve Ni gibi elementlerinin varlığında, X<sub>2</sub> Nb tipi hegzagonal sıkı paket yapısında laves fazının oluşumunu teşvik eder (Ma vd., 2012; Chanda vd., 2018).



Şekil 6.2: CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımı XRD kırınım modeli

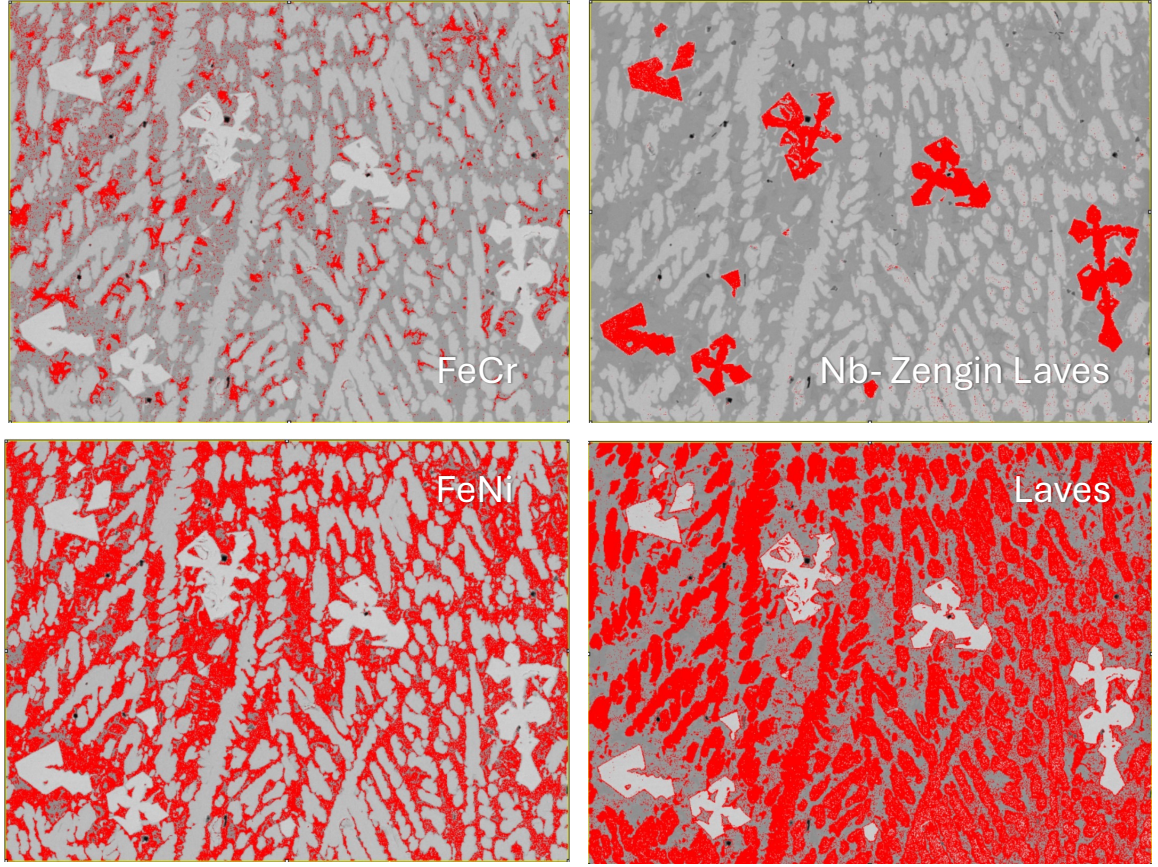
CrFeMnNbNi alaşımının mikroyapısal karakterizasyonu kapsamında yapılan taramalı elektron mikroskopu görüntülemeleri ve enerji dağılımlı spektroskopi analiz sonuçları, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. SEM üzerinden elde edilen görüntülerde dikkat çeken bölgeler işaretlenerek, bu alanlardan alınan EDS ölçümleri ile elementlerin bölgesel dağılımları tespit edilmiştir. Bu elementel bileşim oranları, Tablo 6.1'de listelenmiş ve elde edilen verilere dayanarak farklı faz yapılarının oluşumuna ilişkin tahminlerde bulunulmuştur. Analizler sayesinde alaşımda gözlemlenen fazların kimyasal bileşimle ilişkili olarak nasıl dağıldığı ve muhtemel kristal yapıları hakkında bilgi edinilmiştir. SEM mikro yapısı incelendiğinde farklı bileşimlere sahip dört farklı renkli faz gözlemlenmiştir. Burada XRD sonuçlarından farklı bir dağılım daha belirlenmiştir.



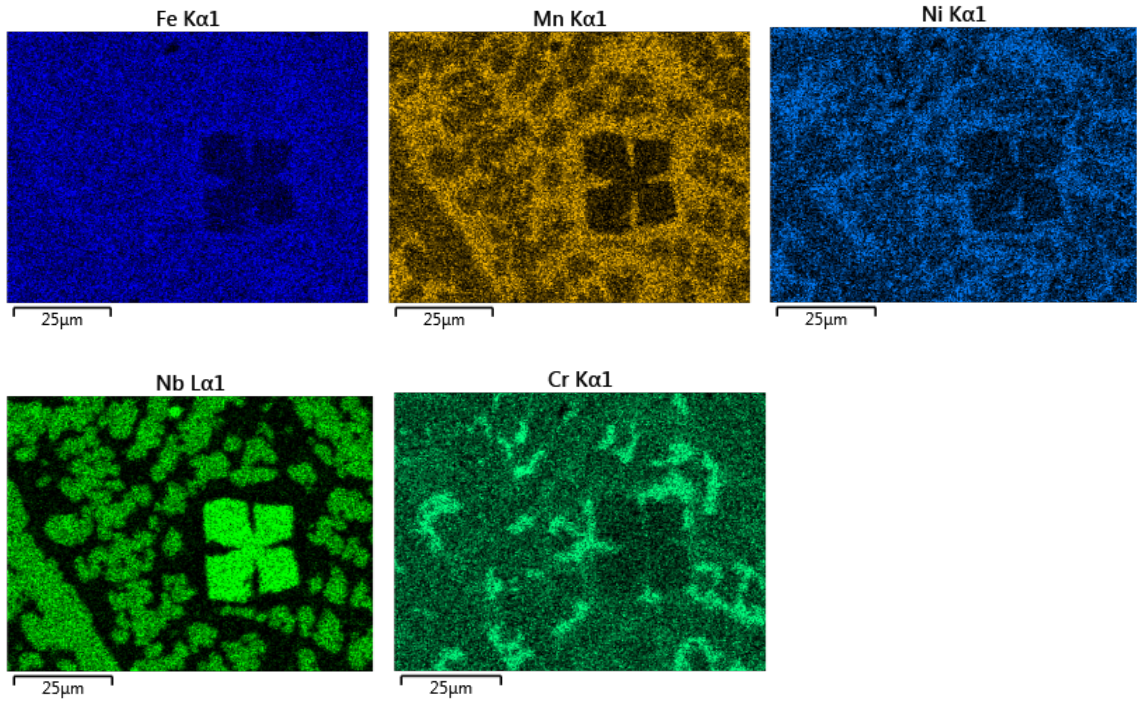
Şekil 6.3: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın SEM+EDS analizi

Tablo 6.1: Şekil 6.3’ te işaretlenen bölgelerdeki element oranları ve faz analizi tablosu

	Cr	Fe	Mn	Nb	Ni
1. FeCr	37.9	33.6	17.2	0.8	10.6
2. Nb yüksek Laves	10	15.2	5.4	61.8	7.6
3. FeNi	18	26	25,4	2.7	27.9
4. Laves	14.3	25.5	10.2	38.1	11.9



Şekil 6.4: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın faz analizi



Şekil 6.5: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın EDS haritalama analizi

- Faz değerlendiğinde fazın içeriğinde %33.6 Fe, %37.9 Cr olduğu gözlemlenmiştir. Faz değerlendirildiğinde XRD analizinde belirlenen FeCr fazı ile uyumlu olduğu bulunmuştur. 2. Faz incelendiğinde fazın Nb açısından zengin olduğu grlmştir. Nb açısından aşırı doğun olan bu faz üretim sonrası soğutma sırasında Nb'nin yüksek erime sıcaklığı nedeniyle diğer fazlardan ayrılması mümkündür.
- Faz değerlendiğinde fazın %26 Fe, %27.9 Ni içerdiği grlmştir. Faz, Fe ve Ni açısından oldukça zengindir. Bu oranlara bakıldığında XRD analizlerinde belirlenen YMK fazını 3. faz temsil ettiği düşünülmektedir.
- Faz değerlendirildiğinde %38.1 Nb, %25.5 Fe içerdiği grlmştir. Faz değerlendiğinde XRD analizlerine göre bu fazın Laves fazı olduğu düşünülmektedir.

Alaşım içerisinde yer alan fazlar kıyaslandığında 3. ve 4. faz en yüksek oranda olduğu grlmştir. Bu nedenle matrisin büyük çoğunluğu 3. ve 4. faz olduğu grlmştir. Yine alaşım fazları bütün olarak incelendiğinde laves fazı olarak değerlendirilen 4. Faz ile 2. Faz benzer içeriğe sahip olduğu grlmştir. Bu fazlar benzer içeriğe sahip olsa da 2. Fazın Nb açısından aşırı doğun olması bu fazları birbirinden ayrırır.

Nb'nin yüksek erime sıcaklığı nedeniyle 2. Faz retim sonrası soğutma sırasında 4. Fazdan ayrılması sağlanır. XRD ve SEM ile EDS analizleri arasındaki farkta bu aşamadan kaynaklanmaktadır. Bu faz XRD analizinde belirlenen Laves fazına benzer bir yapıya sahip olduğundan aynı açılarda pikler vermektedir. Ancak Nb elementinin hem yüksek erime sıcaklığı hem de yüksek atom boyutundan dolayı Nb açısından daha zengin bir Laves fazı olan 2. Faz oluşmuştur. 2. Faz yüksek erime sıcaklığı nedeniyle soğuma sırasında diğer elementlerden ayrılması normaldir. Ayrıca atom çapının yüksek olması nedeniyle diğer fazlarla karışmasının zor olması 2. Fazın oluşumunu desteklemiştir.

Tablo 6.2: CrFeMnNbNi YEA'da kullanılan elementlerin atom yarı çapları ve karışım entalpisi değerleri  $\Delta H$  (kJ/mol) (Senkov vd., 2001; Takeuchi vd., 2005)

Element (atom yarıçapı)	CR	Fe	Mn	Not	Ni
Cr (1,25 Å)	-	-1	2	-7	-7
Fe (1,24Å)	-	-	0	-16	-2
Mn (1,35 Å)	-	-	-	-4	-8
Nb (1,45 Å)	-	-	-	-	-30
Ni (1,25 Å)	-	-	-	-	-

YEA bileşimindeki elementlerin karışım entalpisi ve atom yarıçapı değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Elementlerin fazlar içindeki dağılımına bakıldığında atom yarıçapı ve karışım entalpisi değerlerinin etkili olduğu söylenebilir. Genel olarak elementler, distorsiyon etkisi nedeniyle yakın atom büyüklüğüne sahip elementlerle bir araya gelme eğilimindedir. Bu nedenle Fe, Ni, Cr hem yakın atom boyutları hem de benzer entalpi değerlerinden dolayı FeCr ve FeNi fazlarını oluşturmuştur. Nb, Laves fazını oluştururken Fe ile arasındaki yüksek negatif karışım entalpisinden dolayı Fe açısından da zenginleştirilmiştir. Mn ayrıca karışım entalpisine uygun olarak diğer elementler arasında dağıtılmıştır. SEM görüntüsünden elde edilen faz miktarlarının analizinde matriste en fazla Laves fazı ve FeNi fazı tespit edilmiştir. Yapıda yaklaşık %36 FeNi fazı, %52,5 Laves fazı ve %8 FeCr fazı belirlenmiştir. Laves mikroyapıda en çok bulunan fazdır ve matrisin ana fazı olarak tanımlanabilir. Muhtemelen Laves fazı açısından mikroyapısal denge doyumluğa ulaşmış ve alaşımdaki Nb oranının yüksek olması Nb açısından zengin Laves fazının oluşumunu tetiklemiştir. Bu faz mikroyapıda en düşük oranda bulunur ve oranı %3,5 civarındadır.

Karışım entalpisi ( $\Delta H_{\text{karışım}}$ ), karışım entropisi ( $\Delta S_{\text{karışım}}$ ), atomik boyut farkı ( $\delta$ ), değerlik elektron konsantrasyonu (VEC), erime sıcaklığı ( $T_m$ ), Pauling ( $\Delta X_p$ ) ve Allen ( $\Delta X_A$ ) elektronegatiflik değerleri gibi verilerin hesaplanmasına yönelik formüllere giriş bölümünde yer verilmişti. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda yapılan hesaplamaların sonuçları, Tablo 6.3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Hesaplanan bu değerler, araştırma bulgularını destekleyici nitelikte olup tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 6.3: CrFeMnNbNi YEA' ın hesaplanan bazı termodinamik verileri

YEA	Atomik Buyut Farkı $\delta$ (%)	Karışım Entalpisi $\Delta H_{\text{karışım}}$ (kj.mol <sup>-1</sup> )	Valans Konsantrasyonu	Elektron VEC
CrFeMnNbNi	5,78	-11,68	7,2	

YEA	Karışım Entropisi $\Delta S_{\text{karışım}}$ (j.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> )	$\Omega$	Ortalama Erime Sıcaklığı T <sub>m</sub> . (°C)	$\Delta X_A$	$\Delta X_p$
CrFeMnNbNi	13,38 (1,61R)	2,28	1724	2,40	0,137

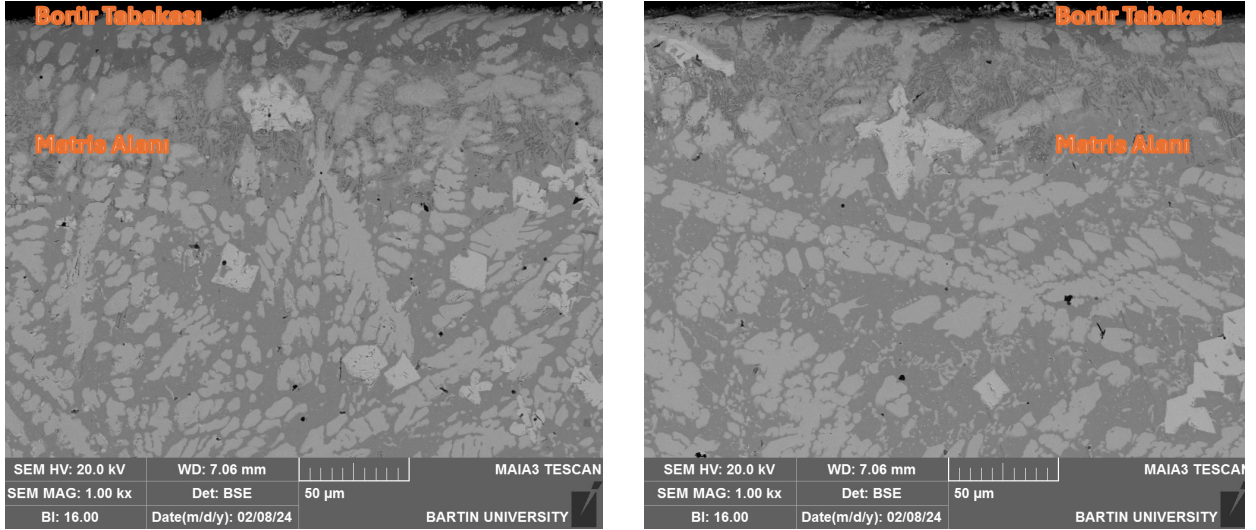
Karışım entropi değeri (1.61R) dikkate alındığında alaşımın karışım entropi değerinin 1.5R'den büyük olması, alaşımın yüksek entropili bir alaşım olduğunu kanıtlamaktadır. Yüksek entropili alaşımlar farklı türde elementlerden oluşan katı çözeltiler oluşturulabilir. Benzer şekilde  $\Omega \geq 1,1$  alaşımda katı çözelti olasılığını artırır. Faz oluşumunu belirleyen en önemli faktörlerden bir diğeri de karışım entalpi değeridir. Katı çözeltiler genellikle  $5 < \Delta H_{\text{karışım}} < -15 \text{ kJ.mol}^{-1}$  aralığında görülse de, yüksek entropili alaşımlarda  $\Delta H_{\text{karışım}} < -10 \text{ kJ.mol}^{-1}$  olduğunda intermetalik faz oluşumu gözlenir. (Yong Zhang vd., 2014). Yine atom boyutu farkı açısından bakıldığında  $\delta > \%4,4$  olması, katı çözelti oluşumundan ziyade alaşımda intermetalik fazların var olma ihtimalini artırmaktadır. VEC değeri oluşturulacak katı çözeltinin tipini belirlemek için kullanılır. Genel olarak  $VEC < 6.8$  için HMK yapı,  $VEC > 8$  ise YMK yapı oluşturduğu yapılan araştırmalarla bilinmektedir. Bu açıdan bakıldığında şu şekilde ifade etmek mümkündür; CrFeMnNbNi alaşımı her iki katı çözünece faza da sahiptir. Pauling elektronegatiflik değerinin yüksek olması intermetalik fazların oluşma olasılığını artırırken,  $\Delta X_p > 0,133$  değeri ile Laves fazları kararlı hale gelir (Liu vd., 2015). Bu değerlere bakıldığında üretilen CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın daha önce hesaplanan değerlerle uyumlu fazlar ürettiği görülmektedir.

## 6.2 Bor Kaplı CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşım Tabakasının Mikroyapı

### Karakterizasyonu

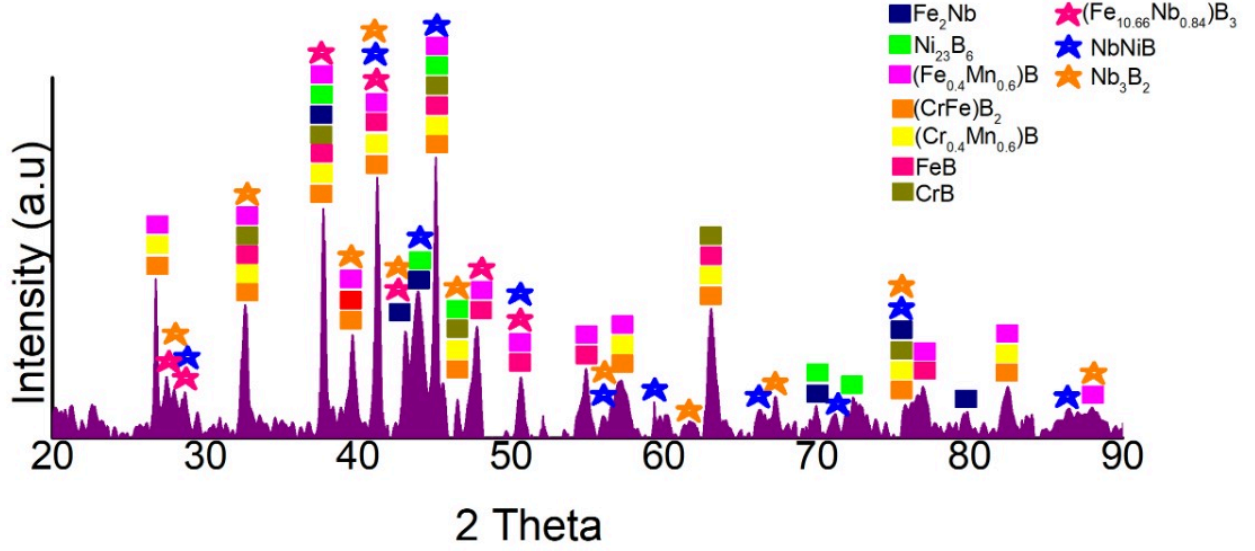
Borlama sağlanarak elde edilen numuneler incelendiğinde ise borlu numunelerin yüzeyinde borür tabakası olduğu görülmüştür. Bor kaplı numune yüzeyleri detaylı

değerlendirildiğinde 3 bölüm varlığı dikkat çekmiştir. Bunlar; bor tabakasından oluşan borür tabakası katmanı, geçiş bölgesi ve Fe, Ni, Nb, Mn ve Cr elementlerinin oluşturduğu matris bölümdür. Bu bölümler Şekil 6.6 da gözlemlenmektedir. Yüzeyleri daha detaylı incelemek için SEM mikroskobu ile numune üzerinde çizgi oluşturarak çizgi analizi yapılmıştır. Borür katmanı ve dağılımı belirlenebilmesi için SEM üzerinde her numune için en az 5 farklı açıdan veri toplanmıştır.



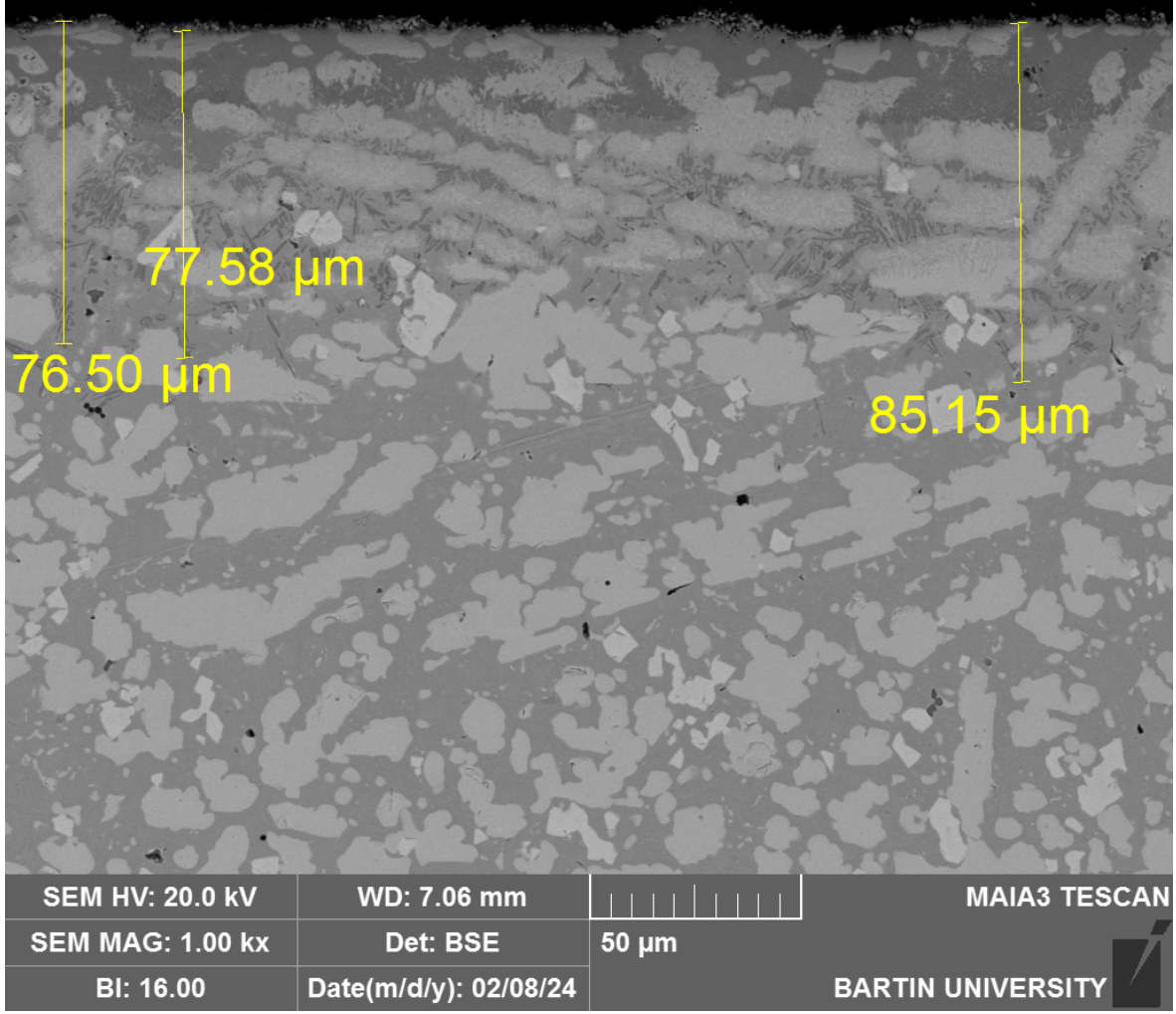
Şekil 6.6: Bor Kaplı CrFeMnNbNi alaşımı SEM mikroyapı görüntüsü

Borlanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın yüzeyinden alınan SEM kesit görüntüsü ve buna ait EDS analiz sonuçları Şekil 6.7’de ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, borlama işlemi sonrasında yüzeyde oluşan çeşitli borür fazları tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre;  $(CrFe)B_2$ ,  $(Fe_{0.4}Mn_{0.6})B$ ,  $(Cr_{0.4}Mn_{0.6})B$ ,  $NbNiB$  ve  $(Fe_{10.66}Nb_{0.84})B_3$  gibi kimyasal bileşenlere sahip borür yapıları belirlenmiştir. Ayrıca,  $CrB$ ,  $FeB$  ve  $Ni_{23}B_6$  gibi daha kompleks ve çok bileşenli borür fazlarının da malzeme yapısında olduğu gözlemlenmiştir. Bu fazlar, bor atomlarının farklı metal elementleriyle oluşturduğu bileşik yapılar olup, borlama sonrası mikroyapıda önemli değişimlere yol açmaktadır. Tespit edilen bu borür fazları, malzemenin yüzey özelliklerinde sertlik, aşınma direnci ve kimyasal dayanım gibi mekanik ve fiziksel iyileşmelere katkı sağlamaktadır. YEA alaşımın atom yüzdesi %5-35 olan ve az beş elementten oluşan kompleks borür fazlarının gözlemlenmesi beklenen bir durumdur. Nitekim yüksek entropili alaşımların borlanması üzerine çalışan birçok araştırmacı, YEA alaşımlarında karmaşık borür fazlarının oluştuğunu bildirmiştir (Güven, 2021; Döleker vd., 2023).



Şekil 6.7: Borlu CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın XRD kırınım modeli

Borlanmış CrFeMnNbNi alaşımına ait numune yüzeylerinde oluşan borür tabakasının yapısı ve kalınlığı, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da detaylı olarak gösterilmiştir. Bu görsellerde, yüksek sıcaklıkta bor atomlarının yüzeye difüzyonu sonucunda meydana gelen sert borür katmanı açıkça gözlemlenmektedir. Borlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan bu tabaka, alt tabakadan farklı bir morfoloji sergilemekte olup, mikroyapıda belirgin bir faz ayrımı oluşturmaktadır. Şekillerde yer alan kesit görüntüleri, borür tabakasının yüzeydeki sürekli ve yoğun yapısını, tabaka kalınlığını ve ara fazlarla olan sınırlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu yapı, malzemenin yüzey dayanımını artırmakla birlikte, aşınma ve oksidasyona karşı direncin de iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Alaşım yüzeyinde borür tabakası ile Fe, Ni, Nb, Mn ve Cr elementlerinin oluşturduğu matris bölümü olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeyleri daha detaylı incelemek için SEM mikroskobu ile numune üzerinde çizgi oluşturarak çizgi analizi yapılmıştır.

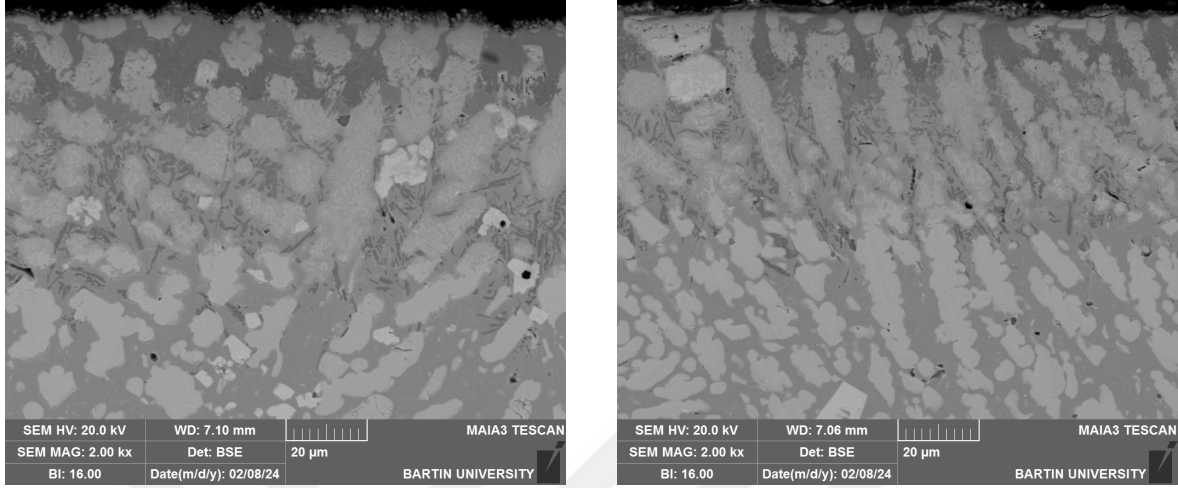


Şekil 6.8: Borlama işlemi sonrası CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşıma ait taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen mikroyapı görüntüsü

Şekil 6.8’de yer alan SEM görüntüsü, CrFeMnNbNi bazlı yüksek entropili alaşımın borlama işlemine tabi tutulmasının ardından yüzeyde meydana gelen difüzyon tabakasını ayrıntılı şekilde ortaya koymaktadır. Görselde, yüksek sıcaklıkta bor atomlarının metal yüzeyine nüfuz etmesiyle oluşan borür tabakasının yapısı, kalınlığı ve alt tabaka ile olan ara faz geçişleri net bir şekilde izlenebilmektedir.

Difüzyon sonucu oluşan bu tabaka, malzemenin yüzey morfolojisinde belirgin bir değişim yaratmakta ve farklı kontrastlarda gözlemlenen bölgeler aracılığıyla tabaka içindeki faz farklılıkları ve katman yapısı hakkında bilgi sunmaktadır. Bu yapı, yüzey sertliğinde ve aşınma direncinde önemli bir artışa işaret etmektedir. İncelemede, borür tabakası ile alt tabaka arasında belirgin bir mikroyapısal geçiş bölgesi gözlenmiştir. Üç farklı noktadan yapılan kalınlık ölçümleri sırasıyla 76.50 μm, 77.58 μm ve 85.15 μm olarak tespit edilmiş

olup, bu değerler borür tabakasının yüzey boyunca oldukça homojen bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.9: Numune yüzeyinde oluşan farklı açılardan borlu tabaka görüntüsü

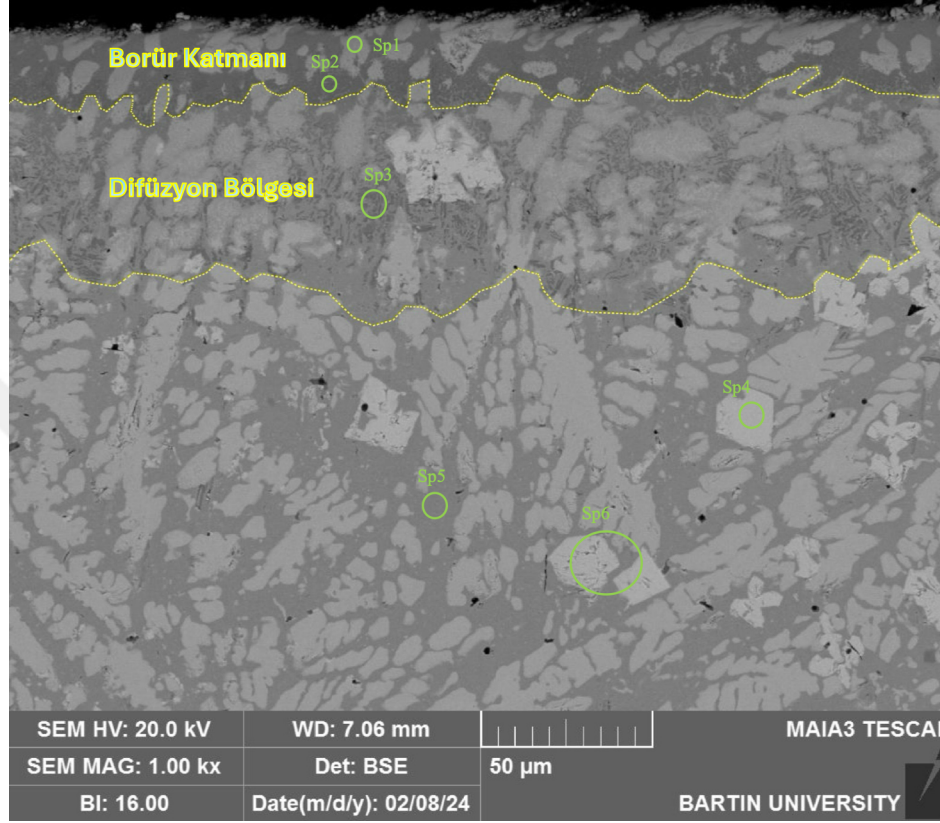
Şekil 6.9’ da yer alan görüntüler incelendiğinde geri saçılan elektron modunda elde edilen görüntülerde, farklı atom numaralarına sahip fazlar arasındaki kontrast farkları net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Üst bölgede daha koyu tonlarda gözlemlenen tabaka, bor elementinin difüzyonu sonucu oluşan borür fazlarını temsil etmekte olup, bu fazların yüzeye yakın bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Alt bölgede ise alaşımın orijinal dendritik mikroyapısı korunmuştur.

Borlama işlemi sonucunda oluşan bu sert borür tabakasının, malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı ve yüksek sıcaklık uygulamalarında performansını iyileştirdiği değerlendirilmiştir. Genel olarak, uygulanan borlama işleminin yüksek entropi alaşım üzerinde etkili bir difüzyon profili ve faz dönüşümü sağladığı gözlemlenmiştir.

Borlanan numunenin Şekil 6.10’ da SEM görüntüsüne yer verilmiştir. Kayıtlı 3 farklı renk yoğunluğuna sahip bölgelerin varlığı görülmektedir. Bu bölgeleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- i. Siyah ve beyaz bölgelerin birbirinin içinde hemen hemen homojen olarak dağıldığı borür katmanı.

- ii. İnce siyah bölgeler ve çukur benzeri görünüme sahip beyaz bölgelere sahip difüzyon bölgesi.
- iii. Dendritik ve interdendritik bileşenlerin oluşturduğu bir matris yapısı.



Şekil 6.10: Borlanan numunenin SEM görüntüsü

Yapılan incelemeler neticesinde alaşımın, borür katmanının  $32\pm 3$  µm olduğu, bu katmanın altında bulunan difüzyon bölgesinin ise  $29\pm 6$  µm olduğu, yani 60 µm' ye kadar bor difüzyonunun olduğu tespit edilmiştir. Araştırmalara göre elde edilen borür katmanlarının çeliklerde ve süper alaşımlarda elde edilen borür tabakalarına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Günen vd., 2017; Alkan vd., 2024). Bunun nedeni YEA alaşımlarındaki çok sayıda farklı tipteki elementlere bağlanmaktadır. YEA' larda element sayısı dolayısıyla yavaş difüzyon etkisi oluşmaktadır. YEA difüzyonu gerçekleşebilmesi için  $211,07 \pm 7,4$  kJmol<sup>-1</sup> değerinde aktivasyon enerjisi ile başlaması gerekmektedir. Bu yüksek aktivasyon enerjisi bariyeri, YEA' ların temel etkisi olan yavaş difüzyon etkisinden kaynaklanmaktadır (Günen vd., 2022a; Günen vd., 2022b; Döleker vd., 2023c).

Tablo 6.4'te verilen EDS sonuçlarına göre, borlanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın farklı noktalarından (Sp1–Sp6) alınan ölçümlerde element dağılımlarında belirgin

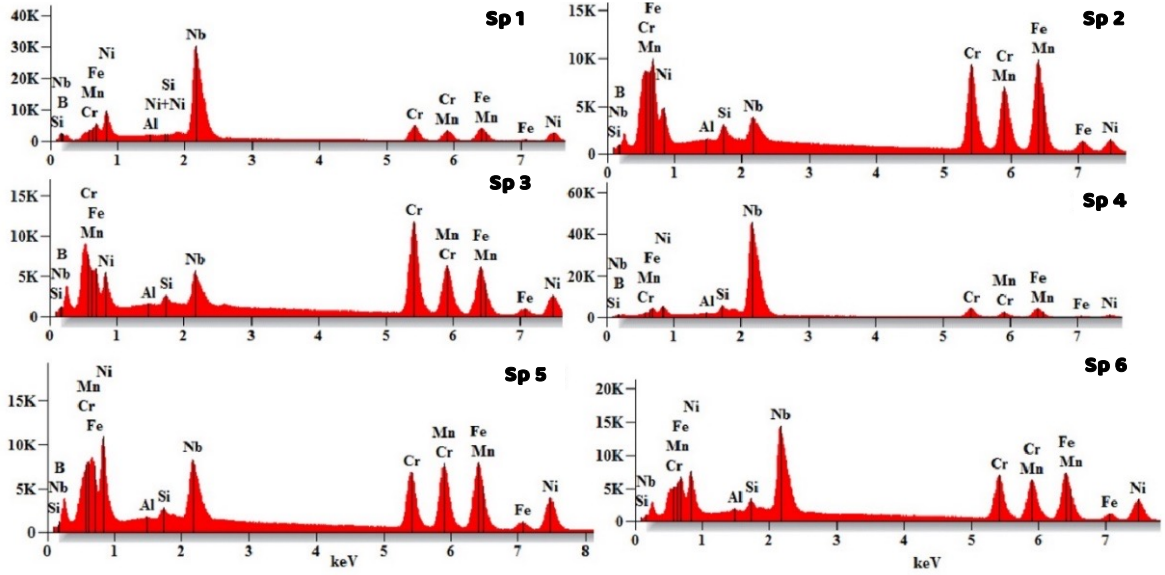
farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle Sp1, Sp2 ve Sp3 numunelerinde bor oranının oldukça yüksek (%43.08–62.48) olduğu, buna karşılık matris elementleri olan Cr, Mn, Fe, Ni ve Nb oranlarının görece düşük kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, borlama işlemi sonrası yüzeyde bor açısından zengin fazların oluştuğunu ve borun bu bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu fazların borür (örneğin FeB ve CrB gibi) yapılar olabileceği değerlendirilmiştir. Diğer yandan, Sp4, Sp5 ve Sp6 noktalarında bor oranı oldukça düşüktür (%0.23–2.64). Bu bölgelerde Cr, Mn, Fe, Ni ve Nb elementlerinin oranları birbirine yakın ve dengeli dağılım göstermektedir.

Bu durum, borlama işleminin daha az etkilediği, yani alaşımın orijinal yapısına daha yakın olan matris bölgelerini temsil etmektedir. Örneğin, Sp6 noktasında Cr (%17.75), Mn (%18.71), Fe (%27.31), Ni (%19.14) ve Nb (%14.60) oranları yüksek düzeyde ve homojendir. Bu da alaşımın yüksek entropili karakteristiğinin bu bölgelerde korunduğunu göstermiştir. Al ve Si elementleri her noktada düşük oranlarda (%0.03–2.23) bulunmakta olup, alaşım içindeki rolleri sınırlı kalmıştır. Özellikle Si elementinin Sp6 bölgesinde göreceli olarak yüksek bulunması (%2.23), yüzeyden içeriye doğru belirli bir difüzyon eğilimi olabileceğini düşündürmüştür. Sonuç olarak, borlama işleminin yüzeyde borca zengin fazlar oluşturduğu ve bu fazların alaşımın mikro yapısında faz ayrışmalarına neden olduğu anlaşılmıştır.

Yüzeyden başlayarak derinliğe doğru gidildikçe bor oranında belirgin bir düşüş görülmüş, buna karşılık matris elementi konsantrasyonunda artış kaydedilmiştir. Bu durum, borlamanın difüzyon mekanizması ile gerçekleştiğini göstermektedir. Bor ve matris elementlerinin dağılımına ilişkin veriler, Şekil 6.11’de grafik olarak ve Tablo 6.4’te sayısal olarak sunulmuştur.

Tablo 6.4: Borlanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın analiz değerleri

Atom %	B	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
Sp1	61.52	0.03	0.03	6.25	4.34	7.43	7.36	13.04
Sp2	62.48	0.07	0.76	9.23	8.28	15.18	3.02	0.98
Sp3	43.08	0.07	0.41	18.93	9.93	11.88	9.52	6.18
Sp4	2.64	0.13	1.90	18.55	8.47	21.26	18.12	28.93
Sp5	2.10	0.06	0.37	19.72	17.54	28.09	19.22	12.90
Sp6	0.23	0.03	2.23	17.75	18.71	27.31	19.14	14.60

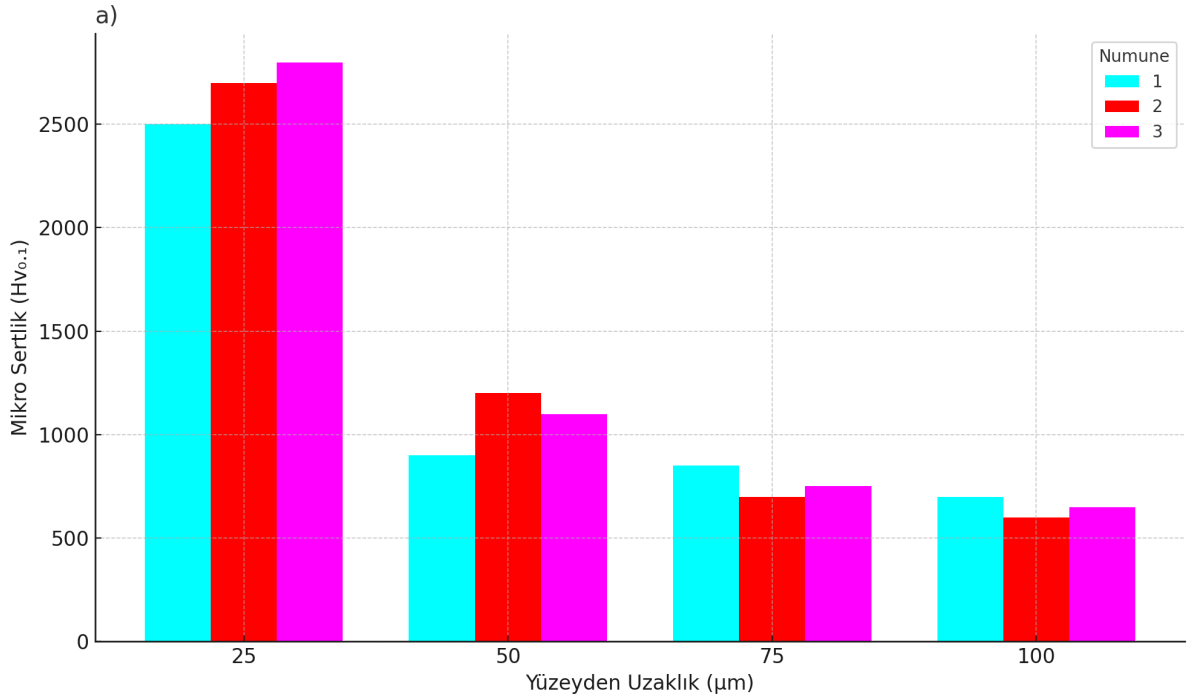


Şekil 6.11: Borlanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın SEM ve EDS analizi

Nb, YEA mikro yapısında olduğu gibi borür tabakasında da zengin bir faz olarak birikmiştir. Bunun temel nedeni daha önce belirtildiği gibi Nb'nin yüksek atom yarıçapı ve erime noktasından kaynaklanmaktadır (Jiang vd., 2017). Aynı durum difüzyon bölgesinde de gözlenmiştir. Difüzyon bölgesinin Sp3 noktasında %43,08 B tespit edilirken, Nb'den zengin olan bölge olan Sp4 noktasında bor oranı sadece 2,64 olarak tespit edilmiştir. Borür tabakasının Sp1 ve Sp2 noktasındaki bor oranı atomik olarak %60 civarında olduğu görülmüştür.

### 6.3 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Mikrosertlik ve Nanoindentasyon Özellikleri

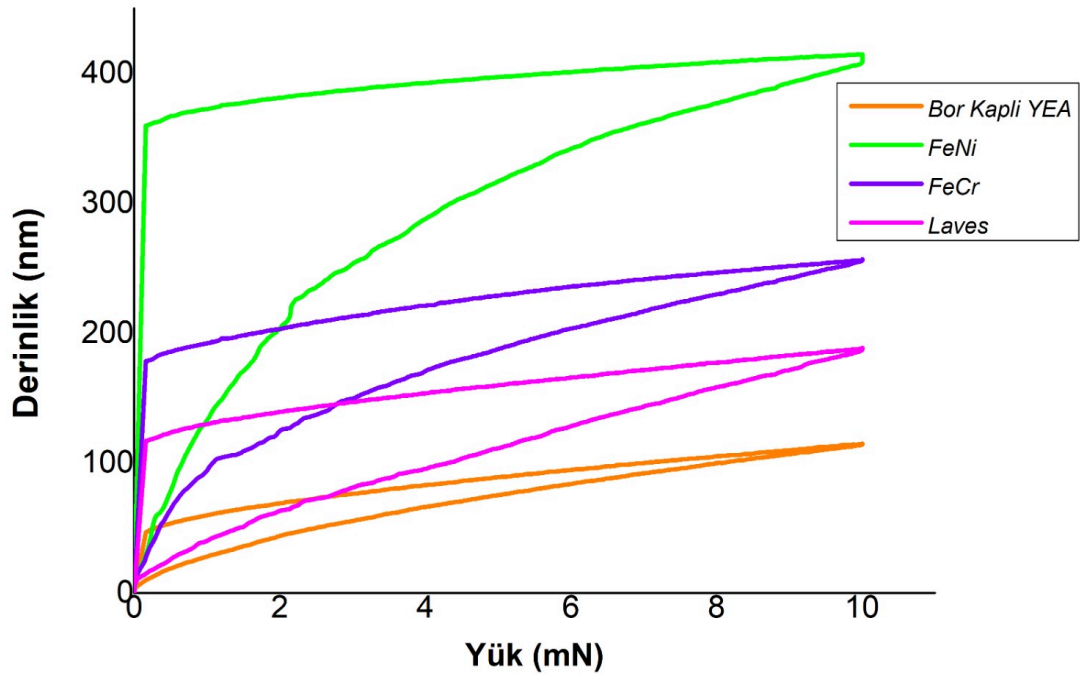
Borlama işleminin ardından yüzeyden derinliğe doğru değişen mikrosertlik değerleri Şekil 6.12'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Eğriler 3 farklı ölçüm değerleri için ayrı ayrı çizilmiştir. Eğriler incelendiğinde birbirlerine benzer profillere sahip olduğu görülmüştür. Alaşımın yüzeyine en yakın borür tabakasından elde edilen mikrosertlik değerleri 2500-2800  $HV_{0,1}$  civarında olduğu görülmüştür. Farklı tipte borür fazları içeren, karmaşık yapıya sahip olan en dış katmanda en yüksek verim değerinde sertlik gözlenmiştir. SEM analizinden görülebileceği gibi en dıştaki borür katmanı yaklaşık 30-40  $\mu m$  büyüklüğündedir. Borür tabakasının hemen altında yaklaşık 30-40  $\mu m$ 'lik bir difüzyon tabakası bulunmaktadır ve burada sertlik değeri 900-1300  $HV_{0,1}$  arasındadır. Borür kesitinden 100  $\mu m$  uzaklaşıldığında matriste sertlik değeri azaldığı gözlemlenmiştir. CrFeMnNbNi alaşımının mikrosertlik cihazında yapılan testlerde ortalama sertlik değeri 564  $HV_{0,1}$  tespit edilmiştir. Borlama işlemi sonrasında matrisin ortalama sertliğinde herhangi bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 6.12: Borür tabakasının mikrosertlik diyagramı

CrFeMnNbNi alaşımındaki fazların ve borür tabakasının nanoindentasyon özellikleri Tablo 6.5'de verilmiştir. Nanoindentasyon testleri 10 mN koşullarında gerçekleştirilmiştir. Alaşımın Yük-Derinlik grafiği Şekil 6.13' de verilmiştir. Dikkat edildiğinde grafikte dört farklı trend eğrisi görülmektedir. Bu grafik aslında fazların mekanik özellikleri hakkında

bilgi vermektedir. Grafikte alttaki eğrilerin bulunduğu fazlar genel olarak daha sert ve dayanıklı olduğu, üstteki eğrin bulunduğu fazların ise daha yumuşak ve dayanımının daha düşük olduğu anlaşılabilir. Borür tabakasının seramik yapısı sebebiyle faz dayanımının büyük olması ve eğrilerin altında olması doğaldır. (Gunen vd., 2022b; Döleker vd., 2023a). CrFeMnNbNi alaşımında XRD ve SEM analizlerine benzer 3 farklı eğri bulunmuştur. Bu fazlar arasında sertliği en yüksek olan intermetalik Laves fazına ait eğri borür eğrisinden sonra ortaya çıkar. FeCr ve FeNi arasındaki sertlik farkının kafes yapısından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. YMK yapısına sahip FeNi daha yumuşak, HMK yapısına sahip FeCr ise daha serttir (Zhang vd., 2014).



Şekil 6.13: Borlama sonrasında mikroyapıda bulunan fazların nanoindentasyon testlerinde elde edilen Yük-Derinlik diyagramı

Nanoindentasyon sonuçları Tablo 6.5'te daha ayrıntılı olarak verilmiştir. Tabloda alaşımın sertlik ve indirgenmiş elastik modül ( $E_r$ ) değerleri fazlara bağlı olarak 2,74-24,03 GPa ile 128-302 GPa arasındadır. Maksimum derinliği 117-357 nm arasında ve fazların sertliği ile uyumludur. Daha sert borür tabakasında penetrasyon derinliği düşük iken, daha yumuşak fazlarda daha yüksek penetrasyon derinlikleri tespit edilmiştir. Tablo 6.5' den elde edilen önemli bir faktör  $h_f/h_{max}$  oranıdır. Bu veriler, fazlarda meydana gelen artık gerilmelerin miktarı hakkında fikir vermektedir. Daha yüksek  $h_f/h_{max}$  oranı daha düşük artık gerilim

anlamına gelir (Küçük vd., 2022). Beklendiği gibi bu oran borür tabakasında en düşüktür. Tablodan elde edilebilecek bir diğer önemli veri ise H/E oranıdır. Bu oran aynı zamanda bize fazın plastik deformasyon direnci hakkında da bilgi verir (Beake, 2022). Sert ve kırılğan borür tabakasında H/E'nin yüksek olması normaldir.

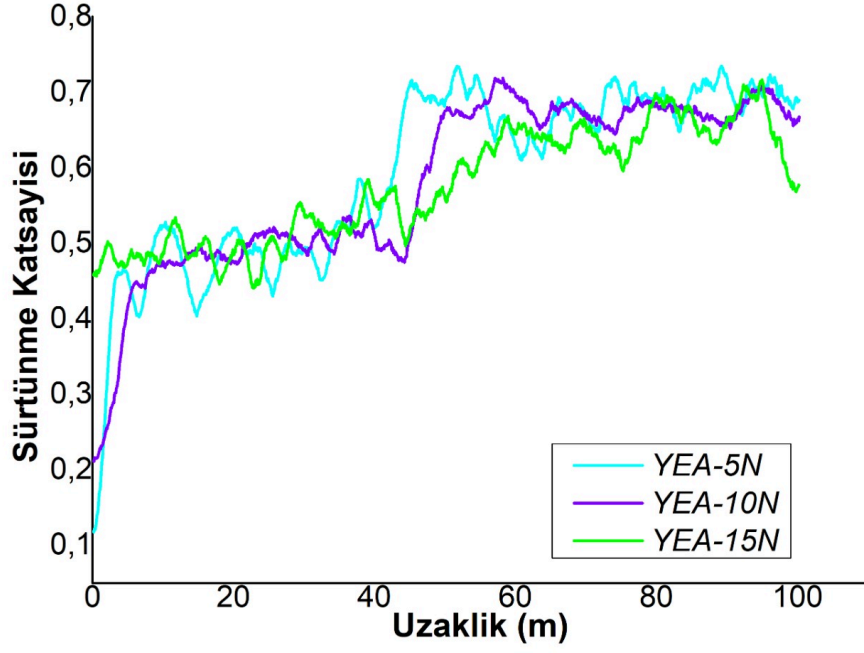
Tablo 6.5: Nanoindentasyon testlerinden elde edilen dijital veriler

Faz	$h_{\text{maksimum}}$ (nm)	E (GPa)	H (GPa)	$h_f$ (nm)	H/E
FeNi	357 ±56	128 ±24	2,74 ±0,9	300 ±47	0,02
FeCr	228 ±30	162 ±25	6,94 ±1,2	159 ±38	0,042
Laves	180 ±11	190 ±13	10,91 ±1,3	113 ±15	0,057
Borür	117 ±11	302 ±29	24,03 ±3,9	49 ±8	0,079

Tablo 6.5' e bakıldığında H/E oranının borür tabakasında en yüksek olması onun daha kırılğan olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca tabloda borür tabakasının en düşük  $h_f/h_{\text{max}}$  oranı, artık gerilmelerin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu faktörlere rağmen borür tabakasının yüksek aşınma performansı göstermesi dikkat çekicidir. Aşınma yükünün etkisi açısından bakıldığında aşınma yükünün artmasıyla birlikte hacim kaybı da artmıştır. Bu artış doğaldır çünkü yük arttıkça aşındırıcı bilya yüzeye daha fazla nüfuz ederek daha fazla malzemenin çıkarılmasına olanak tanır.

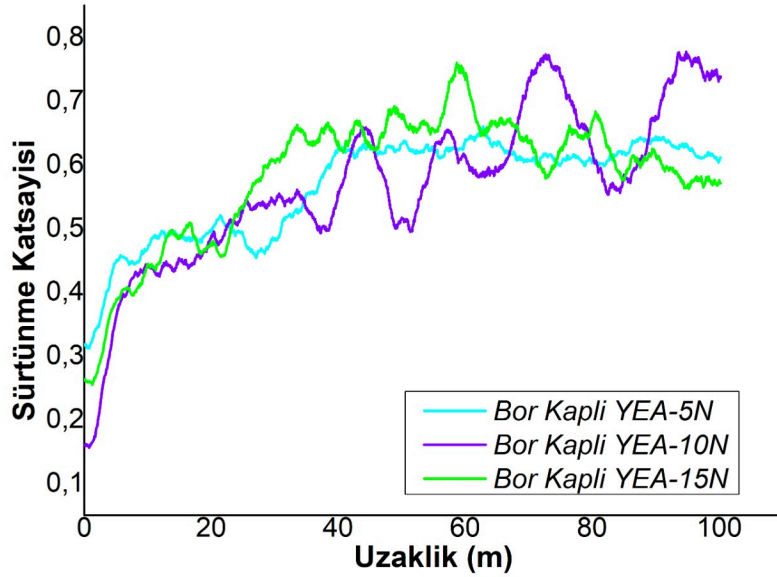
#### 6.4 CrFeMnNbNi Yüksek Entropili Alaşımının Kuru Kayma Aşınma Davranışı

Yüksek entropili alaşım ile bor kaplanmış YEA'nın kuru kayma aşınma testleri sırasında sürtünme katsayısı değişimleri, sırasıyla Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te grafiklerle sunulmuştur. Grafiklerde, farklı yük altında; 5N, 10N ve 15N gerçekleştirilen aşınma testlerinde sürtünme katsayısının aşınma mesafesi ile değişimi gösterilmiştir. Tüm numunelerde sürtünme katsayısı başlangıçta düşük olup, mesafe arttıkça yükselme eğilimi göstermiştir. Bu, muhtemelen yüzeydeki ilk temas ve uyum sürecinden sonra sabit bir aşınma rejimine geçildiğini gösterir.



Şekil 6.14: YEA için kuru kayma aşınma testlerinde sürtünme katsayısı eğrisi

Şekil 6.14’ de 5N ve 10N’ luk düşük yükte yüzey daha az baskı altında olduğu için başlangıçta düşük sürtünme katsayısı gözlenmiştir fakat temas süresi uzadıkça yüzey aşınımı arttığı için sürtünme katsayısı yükselmiştir. 15N’ luk artan yükte birlikte başlangıçtaki yüzey uyumu daha hızlı tamamlanmış, bu da daha kararlı bir sürtünme davranışı sağlamıştır.



Şekil 6.15: Bor kaplı YEA kuru kayma aşınma testlerinde sürtünme katsayısı eğrisi

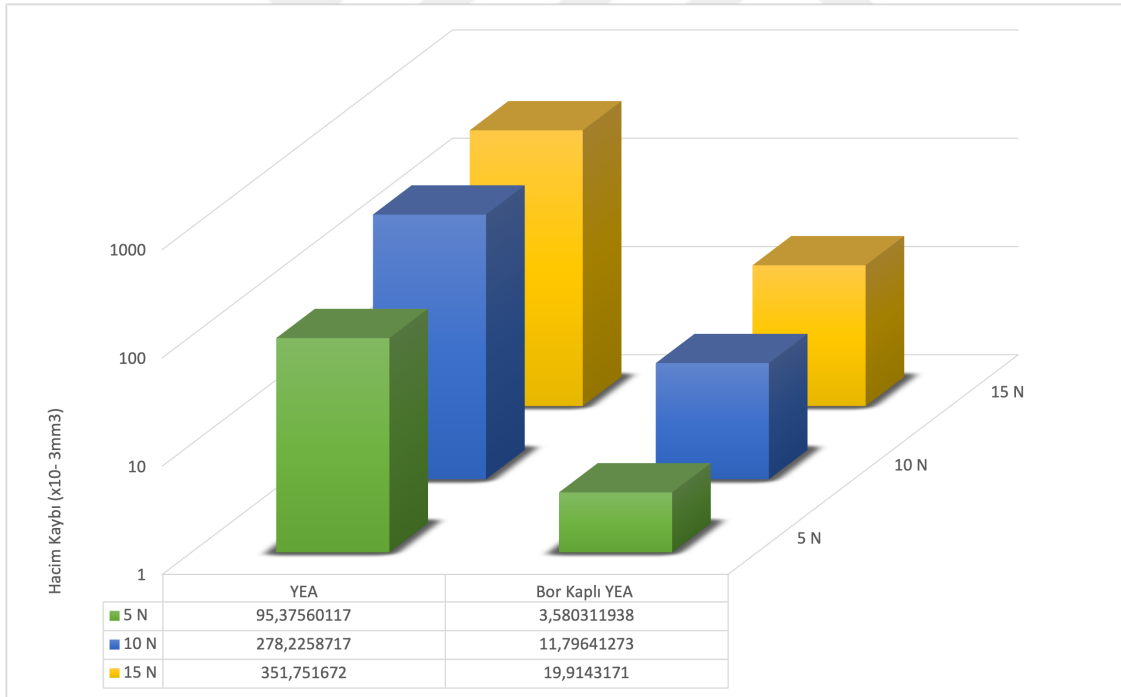
Tüm yükler üzerinde hem YEA hem de bor kaplanmış numunelerin sürtünme katsayısı eğrilerine bakıldığında büyük bir farklılık görülmemektedir. Tüm yüklerde benzer eğilimler görülmüştür. Tüm eğrilerde sürtünme katsayısının 3 ana aşamayı gösterdiği görülmüştür. Testin başlangıcında sürtünme katsayısının hızla arttığı bölgeye genel olarak alıştırma aşaması denir. Sürtünme eğrilerine bakıldığında bu aşamanın 0-10 m arasında olduğu görülmektedir. Bu aşamada yüzeydeki pürüzler sürekli olarak deforme edilerek plastik deformasyon ve kırılma ile yüzey pürüzsüz hale getirilmiştir. Testlerden önce yüzeylerden alınan Ra ve Rq pürüzlülük değerleri YEA ve bor kaplamalı yüzey için sırasıyla 0,19  $\mu\text{m}$ , 0,24  $\mu\text{m}$  ve 0,20  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$ 'dir. YEA ve bor kaplı yüzey arasında pürüzlülük değerleri çok yakındır. Bu değerler sürtünme katsayısı üzerinde de benzer bir etki yaratacağı düşünülmektedir. Pürüzlerin giderilmesi sırasında aşındırıcı bilye kullanılmıştır. Aşındırıcı bilye ile pürüzler arasındaki temas alanının artması nedeniyle sürtünme katsayısının artması beklenen bir sonuçtur. Buradan sonraki etap olan 10- 50 m arası geçiş etabı olarak adlandırılmıştır. Pürüzlülükler tamamen giderilip temas alanı arttıkça bu bölgede sürtünme katsayısı artabilir. Son olarak 50- 100 m aralığında kararlı durum aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada sürtünme katsayısı genel olarak kararlı bir davranış göstermiştir ve test sonuna kadar yaklaşık değerlerde devam etmiştir. Durağan aşamada eğrilerde artan dalgalanmalarla karşılaşmak normaldir. Aşınma işlemi sırasında oluşan atıkların yüzeye yeniden sıvanması, lokal sıcaklık artışları nedeniyle oksit bölgelerinin oluşması, kırılması ve yeniden oluşması gibi nedenlerden dolayı sürtünme katsayısı bu bölgede oldukça fazla dalgalanabilmektedir. CrFeMnNbNi alaşımı ve bor kaplamanın ortalama sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, sürtünme eğrilerinde olduğu gibi birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Bu değerlere Tablo 6.6' da yer verilmiştir. Borür kaplamanın sürtünme katsayısını değiştirmeye etkisi olmamıştır.

Tablo 6.6: Kuru kayma aşınma testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı (CoF ) ve aşınma oranı (WR) değerleri

	5 N	10 N	15 N
CoF -YEA	0,594	0,580	0,576
WR-YEA ( $10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{N.m}$ )	0,19	0,26	0,25
CoF -Borür	0,566	0,568	0,583
WR-Borür ( $10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{N.m}$ )	0,0072	0,0118	0,0132

Testlerde oluşan aşınma oranları Tablo 6.6' da verilmiştir. Bu tablodan yola çıkarak YEA' da aşınma oranının yüke göre değişmediği söylenebilir. Ancak borür tabakasının aşınma oranının yükün artmasına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Bu durum bor tabakasının yükteki değişimlere karşı daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Daha önce de belirtildiği gibi kırılğan yapılar da yükün artmasıyla birlikte aşınma direncinin azalması normaldir.

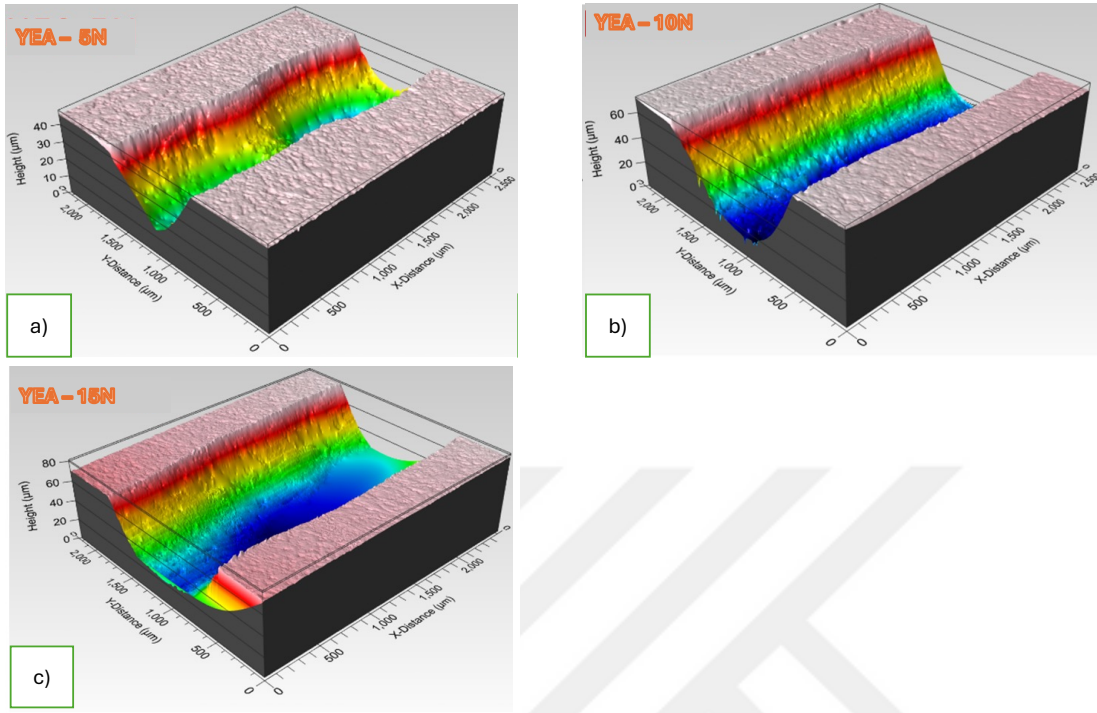
Farklı yükler altında gerçekleştirilen kuru kayma aşınma testlerinde CrFeMnNbNi YEA ve bor kaplamalardaki hacim kayıpları Şekil 6.16' da verilmektedir. Bor tabakasının tüm yükler altında YEA' a göre çok daha üstün aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir. Hacim kayıpları değerlendirildiğinde bor kaplı alaşımlarda daha az hacim kaybı yaşandığı gözlemlenmiştir. Borlama işlemi sayesinde yüke bağlı olarak aşınma kayıpları %94-96 oranında azaltılmıştır. Benzer ortalama sürtünme katsayılarına rağmen bor kaplı alaşımlarda hacim kayıplarının bu kadar az olması, aşınmaya maruz kalan parçalarda borlama işleminin ne kadar önemli olduğunu bir göstergesidir.



Şekil 6.16: Farklı yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri

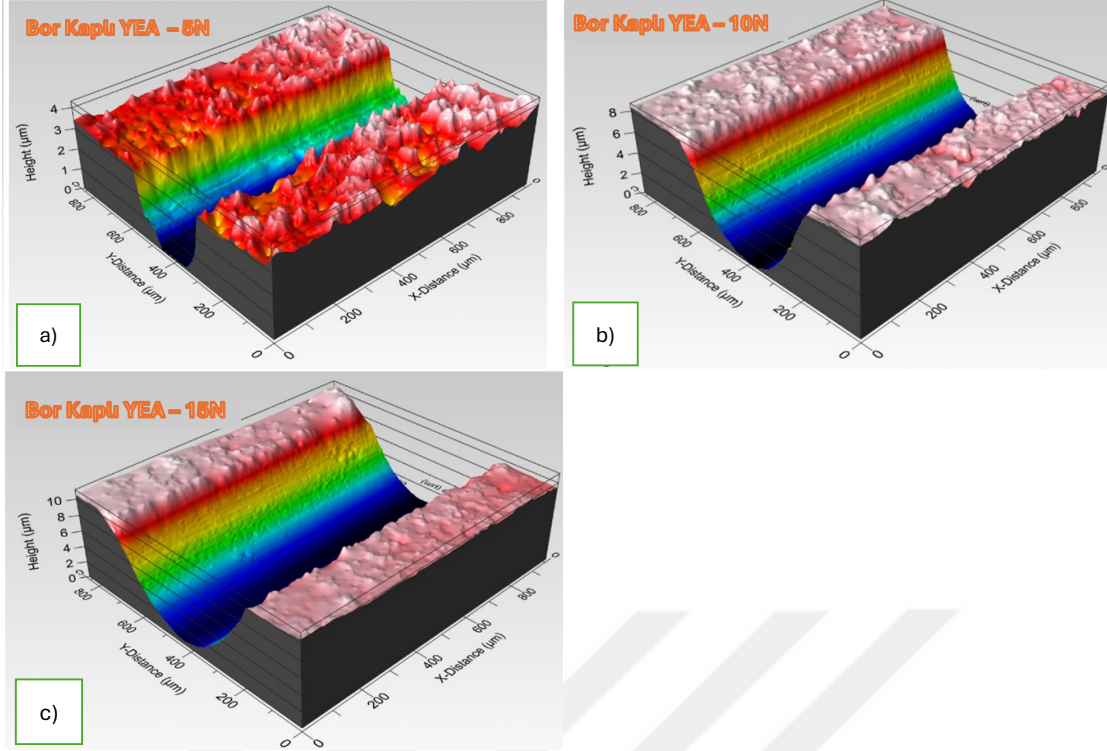
Testlerde oluşan aşınma izlerinin profilleri Şekil 6.17' ve Şekil 6.18' de verilmiştir. Şekil 6.17' de aşınma izleri değerlendirildiğinde yük değeri arttıkça aşınma izi de derinleştiği görülmektedir. Bor kaplı olmayan numunelerde aşınma izlerinin derinliği yüke bağlı olarak

40-75  $\mu\text{m}$  arasında olduğu görülmüştür. Buda, malzemenin yüksek miktarda hacim kaybına uğradığını göstermiştir.



Şekil 6.17: Yüksek entropili alaşımların aşınma testlerinde oluşan aşınma izlerinin profilleri: a) YEA-5N, b) YEA-10N, c) YEA-15N

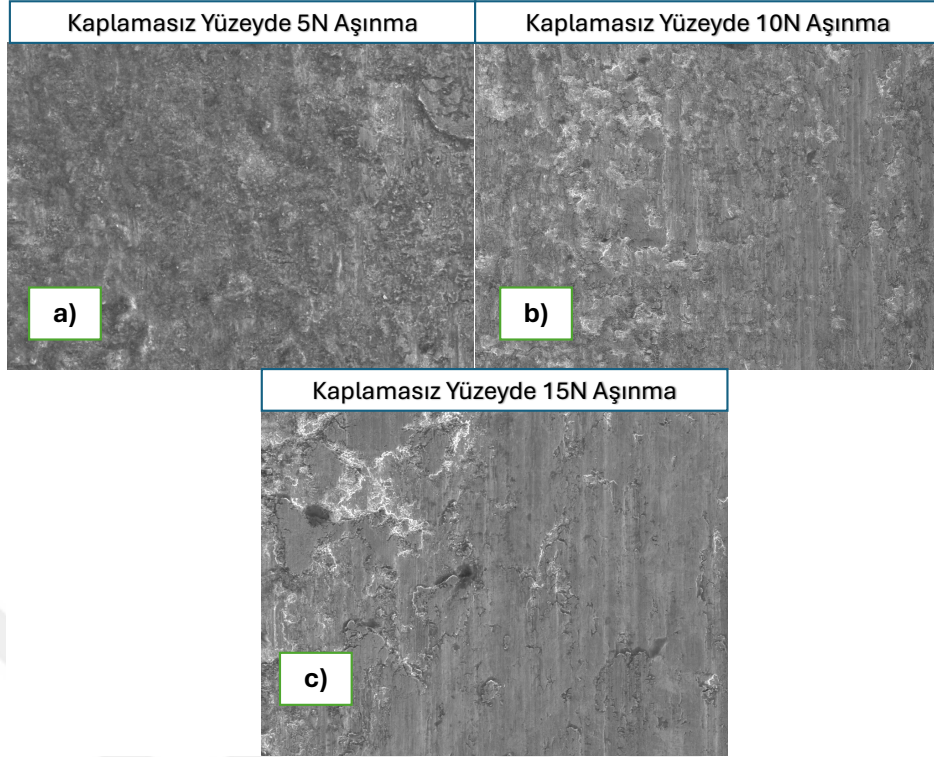
Şekil 6.18' e bakıldığında bor kaplamalardaki izlerin çok daha sığ ve dar olduğu açıkça görülmektedir. YEA üzerinde yapılan testlerde aşınma izlerinin derinliği yüke bağlı olarak 40-75  $\mu\text{m}$  arasında değişirken, bor kaplamalarda aşınma izlerinin derinliği 3-10  $\mu\text{m}$  arasında kalmıştır. Aşınma kayıplarının bu kadar azalmasının en önemli nedeni borlama işlemi nedeniyle yüzeyde oluşan yüksek sertlikteki bor tabakasıdır. Yüzeye batmaya çalışan bir cismin direnci yüksekse aşınma direnci de yüksek olacaktır. Yüzeyde oluşan farklı ve kompleks tipteki borürler, aşındırıcı topun yüzeye nüfuz etmesini önleyerek yüksek aşınma direnci sağlamıştır.



Şekil 6.18: Borlanmış yüksek entropili alaşımların aşınma testlerinde oluşan aşınma izlerinin profilleri: a) Bor Kaplı YEA- 5N, b) Bor Kaplı YEA- 10N c) Bor Kaplı YEA- 15N

Sertlik genel olarak aşınma direncine olumlu etki etse de çok yüksek olması kırılabilirliğin de yüksek olmasına neden olacaktır. Bu da özellikle yüksek yüklerde kaplamaların kırılabilirliğinden dolayı hızlı dökülmeye neden olabilir.

Bor sayesinde YEA' nın yüzeyi kendinden yaklaşık 5 kat daha sert bir katmanla daha iyi korunur. Ancak aşınma izi profillerinde dikkat çeken bir diğer nokta ise YEA' ların aşınma izinin kenarında küçük de olsa mini sırt oluşumudur. Bor kaplamalarda aynı sırt oluşumuna rastlanmamıştır. Bu YEA' nın bor kaplamaya göre daha sünek ve plastik deformasyona daha duyarlı olduğunun bir göstergesidir. Aşınma testi sırasında oluşan aşınma döküntülerinin veya bilyenin etkisi altındaki yüzeyin, plastik deformasyon nedeniyle aşınma izinin kenarında birikmesi beklenebilir. CrFeMnNbNi yüksek entropi alaşımına herhangi bir yüzey modifikasyonu yani borlama işlemi uygulanmaksızın 5 N, 10 N ve 15 N yük değerleriyle gerçekleştirilen aşınma testlerine ait EDS görüntüleri Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri ve yüzey gözlemleri, borlama işleminin aşınma direncine etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

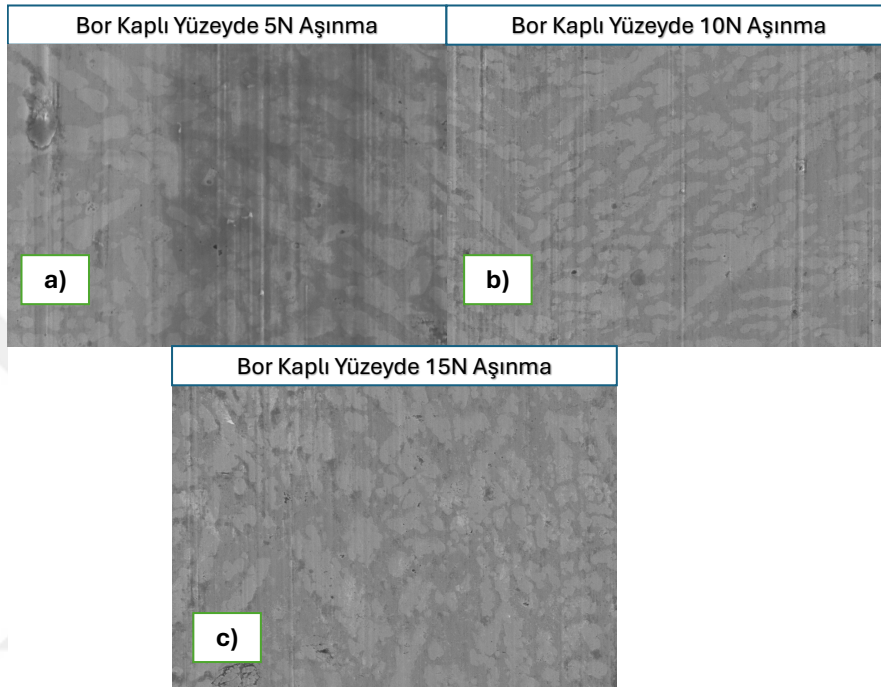


Şekil 6.19: CrFeMnNbNi YEA' ın a)5N, b)10N, c)15N yükler altında gerçekleştirilen aşınma EDS görüntüleri

5N yük altında düşük yükte gerçekleştirilen testte bile, borlama uygulanmamış numunenin yüzeyinde belirgin aşınma izleri ve yüzey deformasyonları gözlemlenmiştir. Bu, alaşımın yüzey sertliğinin borlanmamış durumda nispeten düşük olduğunu ve bu nedenle aşındırıcı etkilere daha açık hale geldiğini göstermektedir. 10 N orta düzey yük altında, yüzeyde ciddi düzeyde hasar ve malzeme kaybı meydana gelmiştir. Yüzey boyunca mikroçatlaklar, yüzey yırtılmaları ve malzeme yığılmaları tespit edilmiştir. Aşınma mekanizması bu durumda, plastik deformasyonla birleşen yoğun abrasif aşınma şeklinde değerlendirilmiştir. 15 N yük altında borlanmamış numunede aşırı düzeyde yüzey tahribatı, şiddetli delaminasyon, adhesif aşınma belirtileri ve bölgesel parçacık kopmaları gözlemlenmiştir. Yüzeyde hem yatay hem dikey yönlerde ilerleyen çatlaklar, malzemenin yüksek yükler altında aşınmaya karşı yetersiz kaldığını göstermektedir.

Bor kaplı CrFeMnNbNi yüksek entropi alaşımına herhangi bir yüzey modifikasyonu yani borlama işlemi uygulanmaksızın 5 N, 10 N ve 15 N yükler altında aşındırma deneyleri EDS görüntüleri Şekil 6.20' de verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde borlama işlemi uygulanmamış numunelerin düşük yüklerde dahi önemli miktarda yüzey deformasyonuna

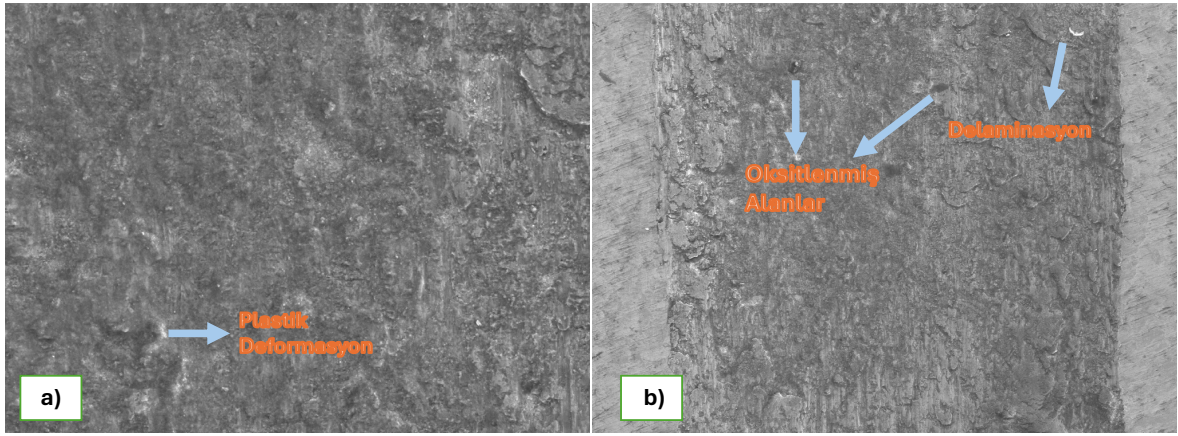
uğradığı tespit edilmiştir. Yük arttıkça malzeme yüzeyinde çatlak oluşumu, malzeme yığılması ve delaminasyon gibi mekanizmaların etkisi artmıştır. Buna karşın, borlama işlemi uygulanmış numuneler aynı yükler altında çok daha stabil bir aşınma davranışı sergilemiştir. Bu durum, borlama işleminin yüksek entropi alaşımların yüzey sertliğini artırarak aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.



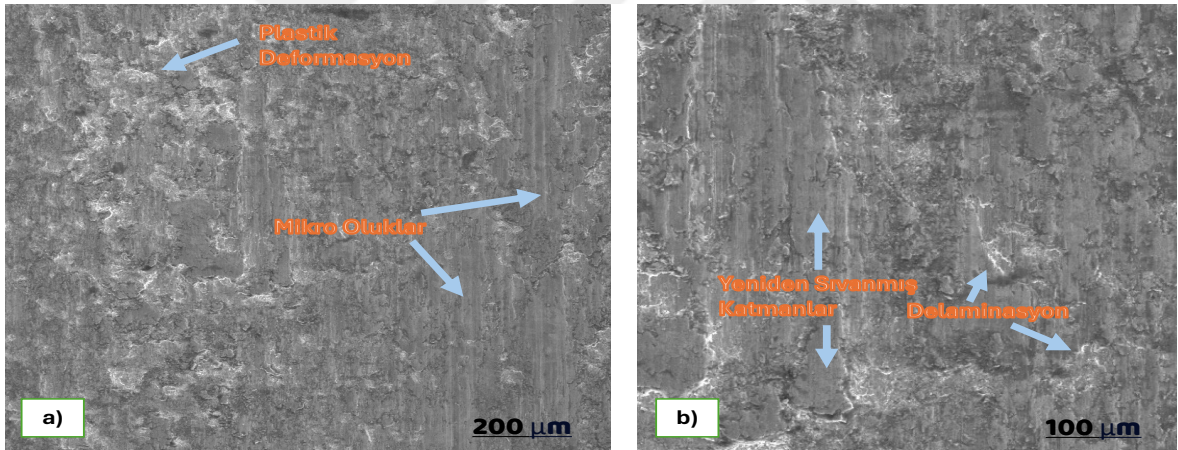
Şekil 6.20: Bor kaplı CrFeMnNbNi yüksek entropi alaşımının a) 5N, b) 10N ve c) 15N yükler altında yapılan aşınma testlerine ait EDS analiz görüntüleri

Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'nin incelenmesi sonucunda, bor kaplama uygulanmış numunelerin aşınmaya karşı oldukça dirençli olduğu tespit edilmiştir; bu numunelerin yüzeylerinde belirgin bir aşınma veya hasar gözlemlenmemiştir. Öte yandan, kaplama yapılmamış numunelerde yüzeylerin belirgin şekilde pürüzlü olduğu ve aşınmanın daha yoğun gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca, kaplama yapılmayan örneklerde plastik deformasyon belirtileri de EDS analizlerinden açıkça tespit edilmiştir. Kaplama içermeyen CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşım numuneleri, 5N, 10N ve 15N yükler altında yapılan aşınma testleri sonucunda, özellikle yüzey bölgelerinde plastik deformasyon oluşumu ile karşılaşmıştır. Bu aşınma izlerine ait detaylı SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'te sunulmuştur. Bu görsellerde, kaplamasız numunelerin yüzeylerinde meydana gelen

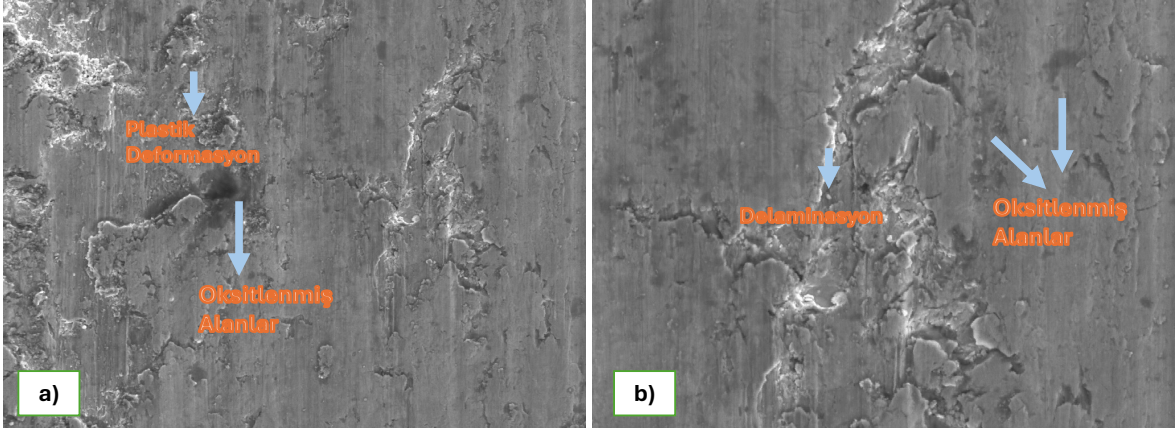
deformasyon ve aşınma morfolojisi net biçimde ortaya konmuştur. Böylece bor kaplamının aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkisi olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 6.21: CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımının 5 N yük uygulanarak yapılan aşınma testinde oluşan aşınma izlerine ait görüntüler

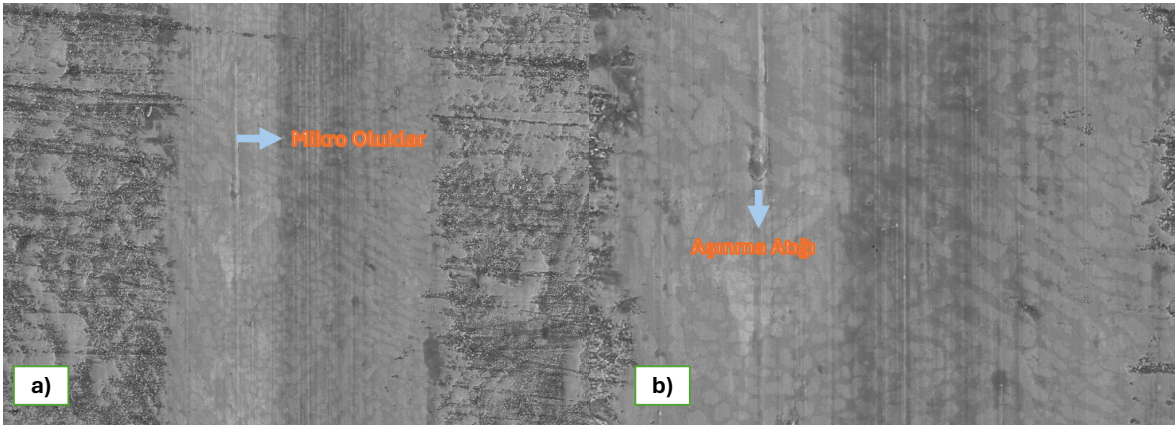


Şekil 6.22: 10 N yük altında uygulanan aşınma testinde CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşım üzerinde meydana gelen aşınma izlerinin mikroskopik görüntüleri

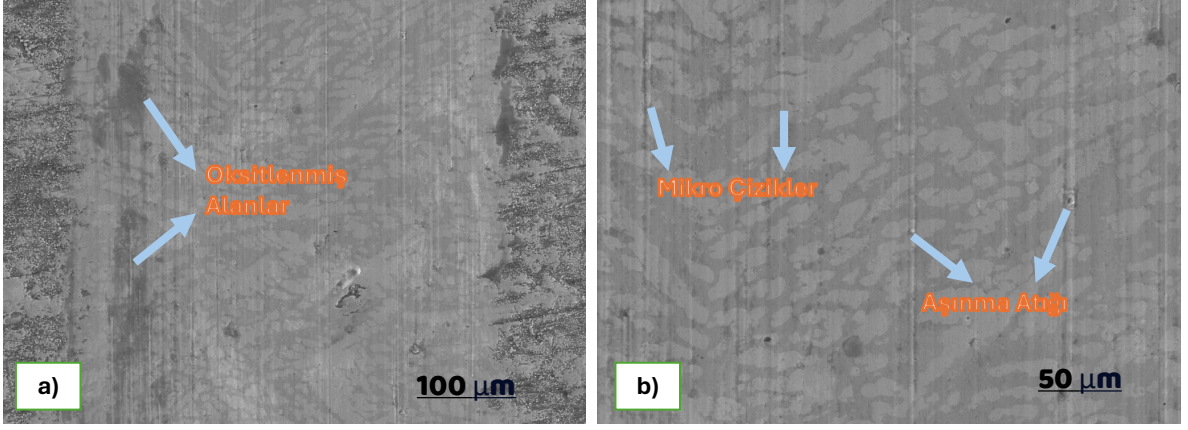


Şekil 6.23: CrFeMnNbNi YEA' ın 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerindeki aşınma izlerinin görüntüleri

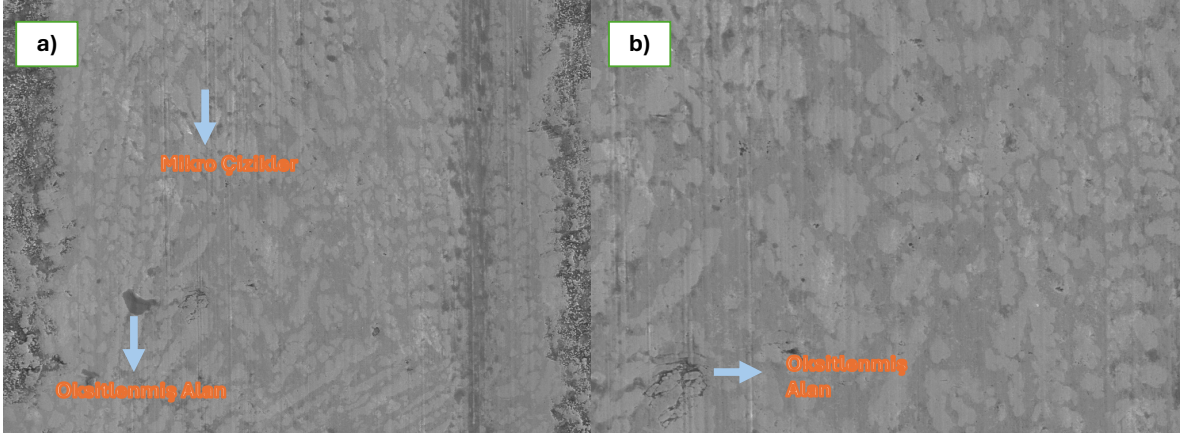
5N, 10N ve 15N yükler altında yapılan aşınma testleri sonucunda, bor kaplı CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da sunulmuştur. Görüntülerin detaylı incelenmesi, numune yüzeylerinde ağırlıklı olarak ince mikro çiziklerin ve mikro olukların bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, sınırlı sayıda oksitlenme alanları ve aşınma sonucu oluşan kalıntılar da yüzeyde gözlemlenmiştir. Bu bulgular, bor kaplamanın aşınma direncini artırırken yüzeyde belirli düzeyde mekanik deformasyonların ve oksitlenmenin meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 6.24: Bor kaplaması uygulanmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın 5 N yük altında yapılan aşınma testine ait aşınma izlerinin mikroskop görüntüleri



Şekil 6.25: Bor kaplaması yapılmış CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın 10 N yük altında yapılan aşınma testine ait aşınma izlerinin mikroskopik görüntüleri



Şekil 6.26: 15 N yük uygulanan aşınma testinde, bor kaplamalı CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin mikroskop görüntüleri

Düşük büyütmede verilen görüntülere bakıldığında aşınma izi boyutundaki farklılık bor tabakasının aşınma direnci üzerindeki etkisini bir kez daha ortaya koymuştur. Sertlik farkının asıl etkisi ise aşınma izlerinde görülmüştür. YEA ve borür tabakasında meydana gelen aşınma mekanizmalarında belirgin bir farklılık gözlemlenmiştir. YEA daha yumuşak olduğundan aşınma izinde genellikle plastik deforme olmuş alanlar ve yeniden sıvanmış katman alanları baskındır. Ayrıca aşınma izinde muhtemelen aşınma atığının oluşturduğu oyuklara da rastlanmıştır. Ayrıca aşınma izinde küçük ayrılma alanları da bulunmuştur. Bu alanlar tekrarlı yükler altında oluşan delaminasyon alanları olduğu düşünülmektedir. Borlu kaplama çok daha düzgün bir aşınma izine sahiptir. Bor tabakasının yüksek mukavemeti ve

sertliği sayesinde aşındırıcı uç ancak parlatma etkisi yaratabilmiştir. Aşınma izinde az miktarda aşınma atığı görölmüştür. Bu aşınma artıkları yüzey ile aşındırıcı uç arasına sıkışıp kalmış ve bağıl hareketleri nedeniyle yüzey üzerinde hareket ederek mikro çizikler oluşturmuştur.



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında CrFeMnNbNi yüksek entropi alaşımına 950 °C'de 5 saat süreyle uygulanan borlamanın etkileri incelenmiştir. Borlama işleminin neden olduğu değişiklikler mikro yapı, mikro sertlik, nano indentasyon, aşınma ve oksidasyon davranışları açısından incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca paylaşılmaktadır.

Yapılan mikroyapı analizleri sonucunda, alaşımın dentrit ve interdentrit bölgelerden oluştuğu bu bölgelerde 4 farklı faz olduğu belirlenmiştir. Bu fazları Laves, FeNi, FeCr ve Nb'den zengin Laves oluşturmaktadır. Laves ve FeNi fazları mikro yapıda yüksek oranda bulunan fazlardan olup, faz oluşumunda karışım entalpisi ve atom boyutu farkı değerlerinin etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışma öncesinde hesaplanan termodinamik değerlere uygun olarak faz oluşumu gerçekleşmiştir. SEM-EDS analizleriyle fazların içerikleri doğrulanmış, özellikle Nb açısından zengin olan fazların, yüksek erime sıcaklığı ve atom çapı etkisiyle ayrı fazlar olarak yapı içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir. Laves fazının yapıda en baskın faz olduğu ve mikroyapının ana fazı olarak değerlendirilebileceği görülmüştür.

CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımının XRD analizinde kaydedilen pikler ve SEM mikroyapılarından yapılan çıkarımlarla üç farklı fazdan meydana geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen fazların yapısal analizleri sonucunda, bunların iki çeşit katı çözelti fazı ve bir intermetalik fazdan oluştuğu tespit edilmiştir. Katı çözelti fazlarından ilki, Fe ve Cr elementlerinin bir araya gelmesiyle oluşan ve hacim merkezli kübik kristal yapısına sahip olan FeCr fazıdır. Diğeri ise Fe ve Ni elementlerinin oluşturduğu, yüzey merkezli kübik yapıya sahip FeNi fazıdır. Bu fazlar, alaşımın mikroyapısındaki temel kristal yapılarını temsil etmekte ve malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, intermetalik fazın varlığı da alaşımın kimyasal bileşimi ve termodinamik dengesi hakkında bilgi vermektedir. Bu yapıların varlığı ve karakteristikleri, alaşımın performansını ve dayanıklılığını etkileyen kritik faktörler arasında yer almaktadır.

Borlama işlemi sonrasında yüzeyde ortalama 30-40 µm kalınlığında kompleks yapılı borürlerden oluşan bir tabaka oluşmuştur. Pürüzsüz ve homojen borür tabakasının altında 30-40 µm kalınlığında difüzyon tabakası gözlenmiştir. Borlama işlemi sonucunda, alaşım yüzeyinde oluşan bu borür tabakasının yüzey sertliğini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir.

Sertlik ölçümleri sonucunda, özellikle borlama işleminden sonra yüzey sertliğinde ve buna bağlı olarak aşınma direncinde anlamlı artışlar elde edilmiştir. Borlama işlemiyle yüzeyde 2500–2800 HV<sub>0.1</sub> seviyelerinde çok yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Difüzyon bölgesinde bu değerler 900–1300 HV<sub>0.1</sub> aralığında seyretmiş, ana matris ise 564 HV<sub>0.1</sub> ortalama değerini korumuştur. Bu sonuçlar, bor tabakasının yüzeyde önemli bir sertlik artışı sağladığını ortaya koymuştur. Ortalama sertliği 564 HV olan YEA' ın yüzeyinde oluşturulan borür tabakası sayesinde sertliği yaklaşık 5 kat artarak 2800 HV'ye kadar çıkmıştır. Bu durum, borlama işleminin yüksek entropili alaşımların yüzey özelliklerini geliştirmesi açısından etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

EDS analizleri, borlama işlemi ile yüzeyde borca zengin fazlardan olan sert borür fazlarının (CrB, FeB ve Fe<sub>2</sub>B gibi) oluştuğunu ortaya koymuştur. Bor oranı, yüzeye yakın bölgelerde %60'a kadar çıkarken, matris bölgelerinde bu oran %2'nin altına düşmüştür. Bu durum, borlamanın yüzeyden içeriye doğru difüzyon kontrollü bir mekanizma ile gerçekleştiğini ortaya koymuştur.

Nanoindentasyon testlerinde en yüksek azaltılmış elastik modül ve sertliğe borür tabakasının sahip olduğu, bunu Laves fazının takip ettiği belirlenmiştir. En yumuşak ve en düşük elastik modüle sahip fazın YMK yapısına sahip FeNi olduğu belirlenmiştir. Borlama işlemi sayesinde aşınma kayıplarının %96'ya kadar azaldığı görülmüştür. Bu test borür fazlarının yüksek sertlik (24,03 GPa) ve elastik modül (302 GPa) değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Borür fazlarındaki düşük hf/hmax oranları yüksek artık gerilme durumunu işaret ederken, yüksek H/E oranları ise kırılma ve plastik deformasyon direncinin arttığını göstermiştir. Bu fazlar, yüzey mukavemetini belirgin şekilde artırmıştır. Borür tabakasının uygulanan aşınma yüküne daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. YEA ve borür tabakasında hem ortalama sürtünme katsayısı hem de sürtünme katsayısı profilleri benzer olduğu belirlenmiştir.

Yapılan kuru kayma aşınma testleri sonucunda, CrFeMnNbNi yüksek entropili alaşımın borlama işleminden sonra aşınma davranışında önemli iyileşmeler gözlemlenmiştir. Borlama işlemiyle yüzeyde oluşan sert borür tabakası, yüzey direncini artırarak malzemenin aşınmaya karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamıştır. Borlama sonrası örneklerde, borlama yapılmamış numunelere göre aşınma oranlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Aşınma sırasında oluşan sürtünme katsayısı, borlu tabakaların yüzey

sertliği nedeniyle daha kararlı ve düşük seviyelerde seyretmiştir. Borlu yzeylerde, plastik deformasyon gibi aşınma mekanizmalarının yerini daha çok mikroyarma ve oksidatif aşınma mekanizmaları almıştır. Sertlik artışına paralel olarak, aşınma derinliği de önemli lde azalmıştır. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri, borlama sonrası yzeyin daha az hasar aldığını ve malzeme kaybının minimize edildiğini göstermektedir.

Mikroyapısal analizler ve yzey karakterizasyonu sonuçları, borlama işleminin yzey özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekte yapılacak araştırmalar için sürecin daha etkili ve kontrol edilebilir bir şekilde yürütülmesine yönelik bazı tavsiyeler aşağıda belirtilmiştir.

Borlama Parametreleri değiştirilerek, farklı değerlerin etkisi incelenebilir. Örneğin; borlama süresi ve sıcaklık gibi parametrelerin değiştirilerek CrFeMnNbNi alaşımı üzerindeki etkileri incelenebilir. Böylece optimum borlama koşulları belirlenebilir.

Borlama işleminin sadece mekanik değil, aynı zamanda kimyasal dayanım üzerine de etkileri değerlendirilebilir, özellikle farklı ortam koşullarındaki korozyon davranışı araştırılabilir.

Borlama sonrası yapılan farklı ısıl işlemlerin mikroyapıya ve faz dönüşümlerine etkisi incelenebilir. Bu şekilde daha kontrollü bir faz dağılımı elde edilmesi mümkün olabilir.

Nb içeriği optimize edilerek daha dengeli ve mekanik açıdan üstün özellikler gösteren yeni kompozisyonlar geliştirilebilir.

Bu alaşımın özellikle yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda (kesici takımlar, yzey kaplamalar, biyomalzemeler vb.) kullanılabilirliği üzerine uygulamalı çalışmalar yapılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- A. Chaudhari, A.S. Awale, A. K. C. (2019). Surface integrity characterization of austenitic, martensitic and ferritic stainless steel under different grinding process. *Materials Research Express*, 6(4), 045601–045612.
- A. Takeuchi, A. I. (2005). Classification of Bulk MetaHeat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element. *46(12)*, 2817–2829.
- Al., X. D. et. (2024). Review on wear resistance of laser cladding high-entropy alloy coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 34- 56.
- Ali N, Zhang L, L. D. (2022). Strengthening mechanisms in high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 923, 166422–166430.
- Alkan, S., Günen, A., Gülen, M. ve Gök, M. S. (2024). *Surface and Coatings Technology*, 476, 130276. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.130276
- Arif Z U, Khalid M Y, ur Rehman E, Ullah S, A. M. and T. A. (2021). A review on laser cladding of high-entropy alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 225.
- Ashby, M. F., Jones, O. (1987). *Engineering Materials I: An Introduction to Their Properties and Applications*, 121–156.
- B. Cantor, I. T. H. C. P. K. A. J. B. V. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, 213–218.
- Bach F.W., D. T. (2000). *Moderne Beschichtungsverfahren*. Willey-VCH, Weinheim-New York, 80–103.
- B.D. Loretto, S. (2005). *Electroplating: Basic Principles, Processes and Applications*.
- Beake, B. D. (2022). The influence of the H/E ratio on wear resistance of coating systems. *Surface and Coatings Technology*, 442, 128272. doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128272
- Bhushan B, G. B. (1991). *Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments*.
- Bradley, E. F. (1979). *Source Book on Materials for Elevated-Temperature Applications*.
- B.S. Murty, J.-W. Yeh, S. Ranganathan, P. B. (2019). High-entropy alloys.
- C. Huang, Y.Z. Zhang, R. Vilar, J. Y. S. (2012). Dry sliding wear behavior of laser clad TiVCrAlSi high entropy alloy coatings. *Materials and Design*.
- C.-H. Lai, S.-J. Lin, J.-W. Yeh, S.-Y. C. (2006). *Malzeme Bilgisi*. Palme Yayıncılık.
- C. Ng, S. Guo, J. Luan, S. Shi, C.T. Liu. (2012). Entropy-Driven Phase Stability and Slow Diffusion Kinetics in an Al<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi High Entropy Alloy.

- C. J. Tong, M.R. Chen, S.K. Chen, J.W. Yeh, T.T. Shun, S.J. Lin, S. Y. C. (2005). Mechanical performance of the AlxCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements, 1263–1271.
- C. Oses, C. Toher, S. C. (2020). High-entropy ceramics. *Nature Reviews Materials*.
- Can Ahmet Çetin. (n.d.). *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*.
- Chanda, B. ve Das, J. (2018). *Advanced Engineering Materials*, 20(4). doi:10.1002/adem.201700908
- Chen, S.T., Tang, W.Y., Kuo, Y.F., Chen, S.Y., Tsau, C.H., Shun, T.T. ve Yeh, J.W. (2010). Microstructure and properties of age-hardenable AlxCrFe1.5MnNi0.5 alloys. *Materials Science and Engineering A*.
- Chen, T.K., Shun, T.T., Yeh, J.W. ve Wong, M. S. (2004). Nanostructured nitride films of multi-element high-entropy alloys. *Surface and Coatings Technology*, 93–200.
- Chen Z., Sun W., Huang Y., Zhou H., Y. K. ve L. J. (2022). The effect of laser energy density on microstructural evolution and mechanical properties of laser clad 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 448, 128899.
- Crane, F. A. ve Charles, J. A. (1984). *Selection and Use of Engineering Materials*.
- Çay, V. V. (2009). Sade karbonlu çeliklerin TIG ve plazma ile yüzey kaplamasında koruyucu gaz ve tozların yüzey modifikasyonuna etkilerinin incelenmesi.
- Daniel O. Svensson. (2014). *High Entropy Alloys: Breakthrough materials for aero engine applications*. Chalmers University of Technology.
- D.B. Miracle, O. N. S. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511.
- Döleker, K. M., Özgürlük, Y., Gokcekaya, O., Günen, A. ve Erdoğan, A. (2023a). High-temperature corrosion and oxidation properties of borided CoCrFeNiAl0.5Nb0.5 HEA. *Surface and Coatings Technology*, 470. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.129856
- Döleker, K. M., Özgürlük, Y., Gokcekaya, O., Günen, A. ve Erdoğan, A. (2023b). *Surface and Coatings Technology*, 470, 129856. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.129856
- E.J. Pickering, ve N. G. Jones. (2016). High-entropy alloys. *International Materials Reviews*, 61(3), 183–202.
- E.P. George, W.A. Curtin, ve C. C. Tasan. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*, 188, 435–474.
- Erdoğan, M. (2000). *Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri*.
- Erdoğan, M. (2001). *Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri demir dışı alaşımlar*.

- Fındık, F. (2008). Malzeme Bilgisi.
- Gali, A., ve E. P. George. (2013). Tensile properties of high- and medium-entropy alloys, 74–78.
- Gao, M.C., Yeh, J.W., Liaw, P.K. ve Zhang, Y. (2016). High-Entropy Alloys. Springer.
- German, R.M. (1984). Powder Metallurgy Science.
- Gao, M. C., Yeh, J. W., Liaw, P. K. ve Zhang, Y. (2016). High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications. Springer.
- Guo, S., ve Liu, C. T. (2011). Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. Progress in Natural Science: Materials International, 21, 433–446.
- Guo, S., Hu, Q., Ng, C. ve Liu, C.T. (2013). More than entropy in high-entropy alloys: Forming solid solutions or amorphous phase. Intermetallics, 96–103.
- Groover, M. P. (1996). Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems.
- Günen, A. (2021). Surface and Coatings Technology, 421, 127426. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127426
- Günen, A., ve Kanca, E. (2017). Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 23(4), 411–416. doi:10.5505/pajes.2017.56689
- Günen, A., Keddani, M., Alkan, S., Erdoğan, A. ve Çetin, M. (2022). Materials Characterization, 186, 111778. doi:10.1016/j.matchar.2022.111778
- Günen, A., Keddani, M., Sunbul, S. E., İcin, K., Doleker, K. M., Gök, M. S., Dal, S. ve Erdoğan, A. (2022a). Journal of Alloys and Compounds, 929, 167310. doi:10.1016/j.jallcom.2022.167310
- Günen, A., Keddani, M., Sunbul, S. E., İcin, K., Doleker, K. M., Gök, M. S., Dal, S. ve Erdoğan, A. (2022b). Powder-pack boronizing of CoCrFeNiAl<sub>0.5</sub>Nb<sub>0.5</sub> HEA. Journal of Alloys and Compounds, 929, 167310. doi:10.1016/j.jallcom.2022.167310
- Güneş, N. ve Gökten, R. M. (2023). Abrasion Resistance Prediction of True Marbles Using Chemical Composition. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 1245–1256.
- Gürü, M. ve Yalçın, H. (2006). Malzeme Bilgisi. Palme Yayıncılık.
- He, Y., Zhang, J., Zhang, H. ve Guo, S. (2017). Effects of different levels of boron on microstructure and hardness of CoCrFeNiAl<sub>x</sub>Cu<sub>0.7</sub>Si<sub>0.1</sub> high-entropy alloy coatings. Coatings.

- Huang, P.K., Yeh, J.W., Shun, T.T. ve Chen, S.K. (2004). Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating. *Advanced Engineering Materials*, 6(12), 74–78.
- Huo, W.-y., Shi, H.-f., Ren, X. ve Zhang, J. -y. (2015a). Microstructure and wear behavior of CoCrFeMnNbNi high-entropy alloy coating. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Huo, W.-y., Shi, H.-f., Ren, X. ve Zhang, J. -y. (2015b). Microstructure and wear behavior of CoCrFeMnNbNi high-entropy alloy coating by TIG cladding. *Journal of Materials Engineering*.
- Ioannis S. Aristeidakis, M.-I. T. T. (2016). High Entropy Alloys. University of Thessaly Department of Mechanical Engineering Laboratory of Materials. Yüksek Lisans Tezi.
- J.-H. Li ve M.-H. T. (2020a). Theories for predicting simple solid solution high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 80–87.
- J.-H. Li ve M.-H. T. (2020b). Theories for predicting simple solid solution high-entropy alloys: Classification, accuracy, and important factors impacting accuracy. *Scripta Materialia*.
- Jiang, H., Jiang, L., Qiao, D., Lu, Y., Wang, T., Cao, Z. ve Li, T. (2017). *Journal of Materials Science ve Technology*, 33(7), 712–717. doi:10.1016/j.jmst.2016.09.016
- J.W. Yeh. (2006). Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie*.
- J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau ve S. Y. C. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303. doi:10.1002/adem.200300567
- J.W. Yeh, S.Y. Chang, Y.D. Hong, S.K. Chen, ve S. J. L. (2007). Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu-Ni-Al-Co-Cr-Fe-Si alloy systems with multi-principal elements. *Acta Materialia*, 103(1), 41–46.
- J.Y. He, H. Wang, H.L. Huang, X.D. Xu, M.W. Chen, Y. Wu, X.J. Liu, T.G. Nieh, K. An, ve Z. P. Lu. (2016). A precipitation-hardened high-entropy alloy with outstanding tensile properties. *Nature Materials*.
- Kailas, S. V. (2004). *Material Science*. Dept. of Mechanical Engineering.
- Kao, Y.-F., Chen, T.-J., Chen, S.-K. ve Yeh, J.-W. (2009). Microstructure and mechanical property of as-cast high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 488(1), 57–64.
- Karaaslan, A. (2010). Mühendislik Alaşımları İçin Faz Diyagramları, 1–343.

- Keating, P. H. (2007). *Carburizing: A Comprehensive Guide to Surface Hardening of Steels*.
- Kim, R. E., Moon, J., Kim, E. S., L. J. ve K. H. S. (2022). Surface heterostructuring of laser-clad 316L stainless steel. *Scripta Materialia*, 208, 114373. doi:10.1016/j.scriptamat.2021.114373
- K.K. Alaneme, M.O. Bodunrin ve S. R. O. (2016). Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *Journal of Materials Research*, 384–393.
- Küçük, Y., Döleker, K. M., Gök, M. S., Dal, S., Altınay, Y. ve Erdoğan, A. (2022). Microstructure, hardness and high temperature wear characteristics of boronized Monel 400. *Surface and Coatings Technology*, 436. doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128277
- K.Y. Tsai, M.H. Tsai ve J. W. Yeh. (2013). Sluggish diffusion in Co–Cr–Fe–Mn–Ni high-entropy alloys.
- L., G. E. S. ve S. (2009). *Austempering: Theory and Practice*.
- Lai, C.H., Lin, S.J., Yeh, J.W. ve Chang, S. Y. (2006). Preparation and characterization of AlCrTaTiZr multi-element nitride coatings.
- Lei, Z., Liu, X., Wu, Y., Wang, H., Jiang, S., Wang, S., Hui, X., Wu, Y., Gault, B., Kontis, P., Raabe, D., Gu, L., Zhang, Q., Chen, H., Liu, J., An, K., Zeng, Q., Nieh, T.-G. ve Lu, Z. (2018). Enhanced strength and ductility in a high-entropy alloy via ordered oxygen complexes. *Nature*.
- Li, Z., Tasan, C.C., Springer, H., Gault, B. ve Raabe, D. (2017). Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys. *Nature*.
- Li, X., Feng, Y., Wang, X., vd. (2022). Microstructure and mechanical properties of laser-processed alloys.
- Liao, W. ve Sun, L. (2010). *Chromizing: Theory, Applications, and Techniques*. Wiley-VCH.
- Liu, W. H., He, J. Y., Huang, H. L., Wang, H., Lu, Z. P. ve Liu, C. T. (2015). Effects of Nb additions on the microstructure and mechanical property of CoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*, 60, 1–8. doi:10.1016/j.intermet.2015.01.004
- Liu Xiaotao, Lei Wenbin, Ma Lijuan, Liu Jinling, Liu Jing, C. J. (2016). *Rare Metal Materials and Engineering*.
- Liu, Y., Tan, N., Li, Y., Zhang, G., Yin, W., Li, G., Cai, Y., Zhou, Y., Han, S. ve Liu, C. (2024). Microstructure, hardness, and tribological properties of CoCrFeNiX (X =

- Mo, Ti, W) high entropy alloy coating. *Surface and Coatings Technology*, 483. doi:10.1016/j.surfcoat.2024.130761
- Liu, Y., Zhang, L. ve Xu, C. (2018). *Laser Surface Hardening of Metals: Fundamentals, Techniques, and Applications*. Springer.
- Ma, S. G. ve Zhang, Y. (2012). *Materials Science and Engineering: A*, 532, 480–486. doi:10.1016/j.msea.2011.10.110
- Ma, S., Zhang, S., Gao, M., Liaw, P. ve Zhang, Y. (2013). A successful synthesis of the CoCrFeNiAl<sub>0.3</sub> single-crystal, high-entropy alloy. *Acta Materialia*.
- Manzoni, A., Daoud, H., Völkl, R. ve Glatzel, U. (2013). Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy.
- Martienssen, W. ve Warlimont, H. (2006). *Springer handbook of condensed matter and materials data*. Springer.
- Megep. (2007). *Malzeme Bilgisi*.
- Middleburgh, S., King, D., Lumpkin, G., Cortie, M. ve Edwards, L. (2014). *Journal of Alloys and Compounds*.
- Miracle, D. B. ve Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511.
- Murty, B. S. (2018). High entropy alloys [Çevrimiçi kaynak]. Alındığı adres: <https://mme.iitm.ac.in/Murty/Hea-1> (Erişim tarihi: 15.08.2025).
- Mostajeran, A., Shoja-Razavi, R., Hadi, M., Erfanmanesh, M. ve B. M. (2020). Evaluation of the mechanical properties of WC-FeAl composite coating fabricated by laser cladding. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 88, 105.
- Mo, N., McCarroll, I., Tan, Q., Ceguerra, A., Liu, Y., Cairney, J., Dieringa, H., Huang, Y., Jiang, B., Pan, F., Bermingham, M. ve Zhang, M.-X. (2019). Understanding solid solution strengthening at elevated temperatures in a creep-resistant Mg–Gd–Ca alloy. *Acta Materialia*.
- Novak, T. G., Vora, H. D., Mishra, R. S., Young, M. L. ve Dahotre, N. B. (2014). Synthesis of Al<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi and Al<sub>0.5</sub>CoCrFeMnNi high-entropy alloys by laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions B*.
- Parida, P., Ghosh, D., Nandi, M. ve Mandal, F. (2013). *Nitriding and Nitrocarburizing: Theory and Industrial Practice*.
- Poletti, M. G. ve Battezzati, L. (2014). Electronic and thermodynamic criteria for the occurrence of high entropy alloys. *Acta Materialia*.

- Ranganathan, S. (2003). Alloyed pleasures: multimetallic cocktails. *Current Science*, 85(10), 1404–1406.
- Robotti, M. (2016). Functional surfaces obtained by thermal spray techniques.
- Senkov, O. N. ve Miracle, D. B. (2001). Effect of the atomic size distribution on glass forming ability of amorphous metallic alloys. *Materials Research Bulletin*, 36(12), 2183–2198. doi:10.1016/S0025-5408(01)00715-2
- Senkov, O. N., Miller, J. D., Miracle, D. B. ve Woodward, C. (2015). Accelerated exploration of multi-principal element alloys with solid solution phases. *Nature Communications*.
- Shun, T.-T., Hung, C.-H. ve Lee, C.-F. (2010). Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*.
- Singh, S., Wanderka, N., Kiefer, K., Siemensmeyer, K. ve Banhart, J. (2011). Effect of decomposition of the Cr–Fe–Co rich phase of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy on magnetic properties.
- Smith, O. (1979a). *Engineering Materials Reference*.
- Smith, O. (1979b). *The Science of Engineering Materials*.
- Sun, J., Zhao, Y., Yang, L., Zhao, X., Qiu, W. ve Tang, Y. (2019). Effect of shielding gas flow rate on cladding quality of direct laser fabrication AISI 316L stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 51–65.
- Takeuchi, A. ve Inoue, A. (2005). Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element. *Materials Transactions*, 46(12), 2817–2829.
- Tian, F., Varga, L. K., Chen, N., Shen, J. ve Vitos, L. (2015). Empirical design of single phase high-entropy alloys with high hardness. *Intermetallics*, 58, 1–7.
- Toyserkani, E., Khajepour, A. ve Corbin, S. (2004). *Laser cladding*. CRC Press.
- Tsai, M. H. ve Yeh, J. W. (2014). High-Entropy Alloys: A Critical Review. *Materials Research Letters*, 2(3), 107–123.
- Tsai, D.C., Deng, M.J., Chang, Z.C., Kuo, B.H., Chen, E.C. ve Chang, S.Y. (2015). Oxidation resistance and characterization of (AlCrMoTaTi)-Six-N coating deposited via magnetron sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 647, 179–188.
- Valtierra, S. ve Manjón, J. (2010). Induction Hardening. In Totten, G.E. (Ed.), *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (2nd ed.). CRC Press.

- Wang, L.M., Chen, C.C., Yeh, J.W. ve Ke, S. T. (2011). The microstructure and strengthening mechanism of thermal spray coating  $\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Cr}_{0.2}\text{Si}_{0.2}\text{AlTi}_{0.2}$  high-entropy alloys.
- Wang, R., Zhang, Z. ve Zhong, J. (2020). *Journal of Physics: Conference Series*, 1648(3), 032031. doi:10.1088/1742-6596/1648/3/032031
- Wernick, S., Pinner, R. ve Sheasby, P. G. (2000). *The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys*. Elsevier.
- Wu, Y., Zhang, F., Yuan, X., Huang, H., Wen, X., Wang, Y., Zhang, M., Wu, H., Liu, X., Wang, H., Jiang, S. ve Lu, Z. (2021). Short-range ordering and its effects on mechanical properties of high-entropy alloys. *Journal of Materials Science ve Technology*.
- Xu, S.S., Li, J.P., Cui, Y., Zhang, Y., Sun, L.X., Li, J., Luan, J.H., Jiao, Z.B., Wang, X.L., Liu, C.T. ve Zhang, Z.W. (2020). Mechanical properties and deformation mechanisms of a novel austenite-martensite dual phase steel. *International Journal of Plasticity*, 128.
- Xu, X., Liu, P., Guo, S., Hirata, A., Fujita, T., Nieh, T., Liu, C. ve Chen, M. (2015). Nanoscale phase separation in a fcc-based  $\text{CoCrCuFeNiAl}_{0.5}$  high-entropy alloy. *Acta Materialia*.
- Yang, X. ve Zhang, Y. (2012). Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 132(2-3), 233–238.
- Yang, T., Zhao, Y.L., Tong, Y., Jiao, Z.B., Wei, J., Cai, J.X., Han, X.D., Chen, D., Hu, A., Kai, J.J., Lu, K., Liu, C.T. (2018). Multicomponent intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys. *Science*.
- Ye, Y.F., Wang, Q., Lu, J., Liu, C. T. ve Yang, Y. (2016). High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*, 19(6), 349–362.
- Yu, Y., Liu, W., Zhang, T., Li, J., Wang, J., Kou, H. ve Li, J. (2014). Microstructure and tribological properties of  $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.5}$  high-entropy alloy in hydrogen peroxide solution. *Metallurgical and Materials Transactions A*.
- Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L. ve Liaw, P. K. (2008). Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, 10(6), 534–538.
- Zhang, H., He, Y., Pan, Y., He, Y. ve Shin, K. (2010). Synthesis and characterization of  $\text{NiCoFeCrAl}_3$  high entropy alloy coating by laser cladding. *Advanced Materials Research*.

- Zhang, F., Zhang, C., Chen, S.-L., Zhu, J., Cao, W.-S. ve Kattner, U. R. (2014). An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations. *Calphad*.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. ve Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1–93.
- Zhang, M., Zhou, X., Xu, Y. ve Li, J. (2017). Synthesis and characterization of refractory TiZrNbWMo high-entropy alloy coating by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 311–321.
- Zhang, W., Tang, R., Yang, Z.B., Liu, C.H., Chang, H., Yang, J.J., Liao, J.L., Yang, Y.Y. ve Liu, N. (2018). Preparation, structure, and properties of high-entropy alloy multilayer coatings for nuclear fuel cladding: A case study of AlCrMoNbZr/(AlCrMoNbZr)N. *Journal of Nuclear Materials*, 512, 15–24.
- Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L. ve Liaw, P.K. (2008). Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. ve Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*.
- Zhang, R., Zhao, S., Ding, J., Chong, Y., Jia, T., Ophus, C., Asta, M., Ritchie, R.O. ve Minor, A.M. (2020). Short-range order and its impact on the CrCoNi medium-entropy alloy. *Nature*.
- Zhang, Y., Li, C., Pang, X., Song, C., Ni, F. ve Zhang, Y. (2021). Wear of high-entropy alloys. *Wear*, 477, 203809. doi:10.1016/j.wear.2021.203809
- Zhang, Y., Ting, T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. ve Ping, Z. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61(September 2013), 1–93.
- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. ve Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1–93.
- Zhang, Z. ve Jiang, B. (2017). *Boriding Treatment of Steels and Other Alloys*. Springer.
- Zhang, Z. ve Kovacevic, R. (2019). Laser cladding of materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 63–75. doi:10.1016/j.jmapro.2019.01.001.
- Zhou, Y.J., Zhang, Y., Wang, F.J. ve Chen, G.L. (2008). Phase transformation induced by lattice distortion in multiprincipal component CoCrFeNiCuxAl<sub>1-x</sub> solid-solution alloys. *Applied Physics Letters*.

Zhu, L., Wang, S., Pan, H., Yuan, C. ve Chen, C. (2020). Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 344–354.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Dilara BENZEK

Doğum Yeri ve Tarihi :

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel Faaliyet/Yayımlar : Boriding effect on CrFeMnNbNi high entropy alloy:  
Microstructure, micro-nano properties, wear behaviour

### İş Deneyimi

Stajlar :

Projeler ve Kurs Belgeleri :

Çalıştığı Kurumlar :

**İletişim**

E-Posta Adresi :

**Tarih** : 20/08/2025 (Tez Savunma Tarihi)



