

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI ORANLARDA Zr İÇEREN YÜKSEK ENTROPİLİ
CoCrFeNiZr ALAŞIMLARININ BORLANMASI

HÜSEYİN KOCALAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. YÜCEL GENÇER

HAZİRAN 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI ORANLARDA Zr İÇEREN YÜKSEK
ENTROPİLİ CoCrFeNiZr ALAŞIMLARININ
BORLANMASI

HÜSEYİN KOCALAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. YÜCEL GENÇER

HAZİRAN 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

BORONIZING OF HIGH ENTROPY CoCrFeNiZr
ALLOYS CONTAINING DIFFERENT PROPORTIONS
OF Zr

HÜSEYİN KOCALAR

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND
ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR: PROF. DR. YÜCEL GENÇER

JUNE 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun/...../.....
tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından/...../.....
tarihinde tez savunma sınavı yapılan’ın tez
çalışması Anabilim Dalında/(varsa)Anabilim Dalı
.....Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren yüksek entropili CoCrFeNiZr yüksek entropili alaşımı (YEA), kutu borlama yöntemiyle 75, 150 ve 300 dakika sürelerde, sabit 900°C sıcaklıkta borlama işlemine tabii tutulmuştur. Oluşan yüzeyin mikroyapısı, faz bileşimleri, mikrosertliği, kimyasal bileşimi gibi özellikleri X-ray kırınımı, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve mikrosertlik ölçüm cihazı ile karakterize edilmiştir. Çalışılan 3 farklı sürede de istenilen bor tabakasının oluştuğu ve altlık malzemesinin iç noktalarına doğru difüze olduğu gözlemlenmiştir. Borlanan tüm numunelerde mikrosertlik, borür tabakadan matrise doğru gidildikçe azalma göstermekte ve bununla beraber de borlama süresi arttıkça kaplama kalınlığı artmıştır. Farklı sürelerde yapılan borlama işlemleri sonrasında yapılan kalınlık ölçümlerinde en yüksek borür tabaka kalınlıklarına 300 dakika sürede yapılan borlama işlemi sonucunda ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Numunelere uygulanan borlama işlemleri sonrasında yapılan SEM – EDS analizleri sonucunda belirlenen noktalardaki elementlerin atomik % miktarlarına bakıldığında özellikle Zr ve Ni elementlerinin yoğunlaştığı noktalarda B elementinin azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla, malzeme içerisinde Zr ve Ni elementinin varlığı yapılan borlama işlemi sonrasında B elementinin malzeme içerisine difüzyonuna olumsuz yönde etki ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Entropili Alaşım, Kutu Borlama, Mikroyapı, Mikrosertlik

ABSTRACT

In this study, high-entropy CoCrFeNiZr high entropy alloy (HEA), which does not contain Zr and contains Zr in different proportions, was subjected to boriding process with the box boriding method for 75, 150 and 300 minutes at a constant temperature of 900 °C. Properties of the resulting surface such as microstructure, phase compositions, microhardness, and chemical composition were characterized by X-ray diffraction, optical microscope, scanning electron microscope and microhardness measurement device. It was observed that the desired boron layer was formed and diffused towards the inner points of the substrate material in the 3 different periods studied. In all borided samples, microhardness decreased as we moved from the boride layer to the matrix, and as the boriding time increased, the coating thickness increased. In the thickness measurements made after boriding processes carried out for different periods of time, it was observed that the highest boride layer thickness was achieved as a result of the boriding process performed in 300 minutes. When the atomic percentage amounts of the elements at the determined points were examined as a result of the SEM-EDS analysis performed after the boronizing process applied to the samples, it was observed that the B element decreased especially at the points where the Zr and Ni elements were concentrated. Therefore, it was determined that the presence of Zr and Ni elements in the material had a negative effect on the diffusion of the B element into the material after the boronizing process.

Key Words: High Entropy Alloys, Pack Boriding, Micro Structure, Micro Hardness.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Yücel GENÇER'e,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet TARAKÇI, Dr. Sezgin CENGİZ, Dr. Öğr. Gör. Kerem Özgür GÜNDÜZ'e ve bu tez çalışması süresince bana yardımcı olan Arş. Gör. Doğançan CEYLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR	3
2.1. Yüksek Entropili Alaşımlar	3
2.2. YEA'ların gösterimleri	4
2.3. YEA'ların kullanım alanları ve özellikleri	5
2.4. YEA'ların üretim yöntemleri	6
2.4.1. Katı hal üretim yöntemi	6
2.4.2. Ergitme ve döküm yöntemi	7
2.4.3. Buhar biriktirme yöntemi	10
2.5. YEA'larda çoklu ana element etkisi	11
2.5.1. Yüksek entropi etkisi	11
2.5.2. Kafes distorsiyonu etkisi	14
2.5.3. Yavaş difüzyon etkisi	15
2.5.4. Kokteyl etkisi	16
3. BORLAMA	18
3.1. Giriş	18
3.2. Borlamaya uygun malzemeler	19
3.2.1. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması	19
3.2.2. Demir Dışı Malzemelerin Borlanması	21
3.3. Borlama yöntemleri	22
3.3.1. Pasta borlama	23
3.3.2. Sıvı borlama	23
3.3.3. Gaz borlama	24
3.3.4. Plazma borlama	25
3.3.5. Kutu borlama	26
3.4. Borür Tabakaları	27
3.4.1. Alaşım Elementlerinin Etkisi	28
4. BENZER ÇALIŞMALAR	33
4.1. YEA'larla Yapılan Benzer Çalışmalar	33
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	35
5.1. Altlık malzemesinin hazırlanması	36
5.2. Borlama işlemi	37
5.3. Karakterizasyon	39

5.3.1. XRD analizi	39
5.3.2. Numunelerin Kesit Karakterizasyonu İçin Hazırlanması	40
5.3.3. SEM ve SEM-EDS Analizi	40
5.3.4. Kaplama kalınlığı belirleme	41
5.3.5. Mikrosertlik Ölçümleri	42
6. DENEYSEL SONUÇLAR	43
6.1. XRD Analizi Sonuçları	43
6.1.1. Borlanmamış Numuneler	43
6.1.2. Borlanmış Numuneler	46
6.2. SEM Analizi Sonuçları	54
6.3. Kaplama Kalınlıkları	64
6.3.1. CoCrFeNi YEA	65
6.3.2. CoCrFeNiZr0.1 YEA	67
6.3.3. CoCrFeNiZr0.2 YEA	69
6.3.4. CoCrFeNiZr0.5 YEA	71
6.3.5. Kaplama Kalınlığına Zr Etkisi	73
6.4. SEM-EDS Analizi Sonuçları	76
6.5. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	151
6.5.1. CoCrFeNi YEA	151
6.5.2. CoCrFeNiZr0.1 YEA	152
6.5.3. CoCrFeNiZr0.2 YEA	153
6.5.4. CoCrFeNiZr0.5 YEA	154
7. DEĞERLENDİRME	155
8. GENEL SONUÇLAR	160
KAYNAKLAR	161
ÖZGEÇMİŞ	164

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°	: Derece
C	: Santigrat
%	: Yüzde
dk	: Dakika
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
gr	: Gram
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
sn	: Saniye
cm	: Santimetre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
VSD	: Vickers Sertlik Değeri
XRD	: X Işını Kırınımı
YEA	: Yüksek Entropili Alaşım

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Mekanik alaşımlama işlemi şematik gösterimi.	7
Şekil 2.2: Ark ergitme fırınının şematik gösterimi.	8
Şekil 2.3: Bridgman katılaşma yönteminin şematik gösterimi.	9
Şekil 2.4: LENS yönteminin şematik gösterimi.	10
Şekil 2.5: DC ve RF püskürtme yöntemlerinin şematik gösterimi.	10
Şekil 2.6: a) HMK ve b) YMK kristal kafes yapıları 5 ana elementli.	14
Şekil 2.7: CoCrCuNiFeAl _x alaşımındaki sertlik ve kafes parametrelerinin farklı x değerlerine göre değişimi. A) CoCrCuNiFeAl _x alaşımı sertlik değeri B) YMK fazın latis sabiti değerleri, C) HMK fazın latis sabiti değerleri	16
Şekil 3.1: Demir – Bor denge diyagramı.	20
Şekil 3.2: Plazma borlama işleminin şematik görüntüsü.	25
Şekil 3.3: Kutu borlama işleminin şematik görüntüsü.	27
Şekil 3.4: Borlama sonucunda oluşan borür tabakaları.	28
Şekil 3.5: Alaşım elementlerinin borlama işlemi sonrasında oluşan borür tabakası kalınlığına etkisi.	29
Şekil 3.6: Fe-Ti alaşımındaki Ti katkısının sertlik ve borür tabak kalınlığına etkisi	31
Şekil 5.1: Deneysel Çalışma Akış Şeması.	35
Şekil 5.2: Numunelerin Ekabor2 tozu içeren potaya yerleşimini gösteren şematik resim.	38
Şekil 5.3: Borlama işleminin yapıldığı Magma Therm kutu fırın ve borlanacak numuneleri içeren alümina pota	39
Şekil 5.4: Struers Labopol-5 zımpara ve parlatma cihazı.	40
Şekil 5.5: Philips XL30 FEG marka SEM cihazı.	41
Şekil 5.6: Vickers sertlik ucu ile oluşturulan izin şematik gösterimi.	42
Şekil 6.1: CoCrFeNi YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.	43
Şekil 6.2: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.	44
Şekil 6.3: CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.	44
Şekil 6.4: CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.	45
Şekil 6.5: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi alaşımının yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a)75dk., b)150dk. ve c)300dk.	46
Şekil 6.6: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a)75dk., b)150dk. ve c)300dk.	48
Şekil 6.7: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a)75dk., b)150dk. ve c)300dk.	50
Şekil 6.8: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a)75dk., b)150dk. ve c)300dk.	52

Şekil 6.9: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	55
Şekil 6.10: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	58
Şekil 6.11: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	60
Şekil 6.12: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	63
Şekil 6.13: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	65
Şekil 6.14: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	67
Şekil 6.15: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	69
Şekil 6.16: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.	71
Şekil 6.17: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 1. bölgedeki kaplama kalınlıklarının değişimi	74
Şekil 6.18: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 1. bölgedeki kaplama kalınlıklarının değişimi	74
Şekil 6.19: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 1A ve 1B bölgelerinden oluşan borür tabakasının kalınlıklarının değişimi.	75
Şekil 6.20: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 3. Bölge (geçiş bölgesi) kaplama kalınlıklarının değişimi.	75
Şekil 6.21: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.	76
Şekil 6.22: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve işaretli noktalardan elde edilen SEM-	81

	EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12	
Şekil 6.23:	75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14.	87
Şekil 6.24:	75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.	94
Şekil 6.25:	150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.	100
Şekil 6.26:	150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.	105
Şekil 6.27:	150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12 ve n)13.	110
Şekil 6.28:	150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)8, h)9 ve i)10.	117
Şekil 6.29:	300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.	122
Şekil 6.30:	300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.	128
Şekil 6.31:	300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.	134
Şekil 6.32:	300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktaların O elementi de göz önüne alınan SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4 ve f)5.	140
Şekil 6.33:	300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7 ve i)8.	143
Şekil 6.34:	300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait O elementi de eklenerek kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5 ve g)6.	148

Şekil 6.35: CoCrFeNi YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	151
Şekil 6.36: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	152
Şekil 6.37: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	153
Şekil 6.38: CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	154

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Eş molar alaşımlarda bileşen element sayısına göre karışım entropisinin değişimi.	14
Tablo 3.1: Farklı yüzey işlemleri ile elde edilebilecek en yüksek sertlik değerleri.	19
Tablo 3.2: Borlama işleminde oluşan borür fazlarının özellikleri.	22
Tablo 3.3: Sıvı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri	24
Tablo 5.1: Hazırlanan YEA’larda kullanılan elementlerin atomik % miktarları.	36
Tablo 5.2: Bazı Ekabor ürünlerinin özellikleri	37
Tablo 6.1: CoCrFeNi alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.	66
Tablo 6.2: CoCrFeNiZr0.1 alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.	69
Tablo 6.3: CoCrFeNiZr0.2 alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.	71
Tablo 6.4: CoCrFeNiZr0.5 alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.	73
Tablo 6.5: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.21a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	79
Tablo 6.6: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.22a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	85
Tablo 6.7: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.23a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	92
Tablo 6.8: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.24a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	98
Tablo 6.9: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.25a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	104
Tablo 6.10: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.26a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	108
Tablo 6.11: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.27a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	115
Tablo 6.12: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.28a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	120
Tablo 6.13: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.29a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	126
Tablo 6.14: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın belirli noktalarından (Şekil 6.30a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	132

Tablo 6.15: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.31a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	138
Tablo 6.16: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borür tabakasının belirli noktalarından (Şekil 6.32a) O elementi göz önüne alınarak elde edilen elementlerin miktarları.	142
Tablo 6.17: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.33a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	146
Tablo 6.18: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.34a) O elementi de eklenerek SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.	150
Tablo 6.19: CoCrFeNi YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	151
Tablo 6.20: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	152
Tablo 6.21: CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	153
Tablo 6.22: CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.	154

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Son yıllarda çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmak üzere yeni malzemeler keşfetme çabalarına girilmiş ve gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Metalik malzemelerin özelliklerini geliştirebilmek için alaşımlama işlemi yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu sayede, malzemenin fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri, işlenebilirliği, ısıl işleme uygunluğu gibi özellikleri geliştirilebilmektedir. Ancak bazı durumlarda yapılan geleneksel alaşımlandırma işlemi ana malzemenin özelliklerini geliştirmeye yeterli olmamakta hatta malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu sebepten dolayı, geleneksel alaşımlandırma işlemi yerine birden çok bileşen kullanılarak alaşımlandırma yapılmaktadır. Bu yöntemle elde edilen malzemelere yüksek entropili alaşım (YEA) denmektedir.

Bileşimi oluşturacak her bir elementin oranı %5 ile %35 arasında olan bu alaşımlarda entropinin yükselmesi basit yapıda katı eriyik oluşumunu kolaylaştırarak yapıdaki faz sayısını azaltmaktadır. YEA'lar, farklı temel elementlerin bir araya gelmesiyle oluşan yapıları sayesinde yüksek mukavemet/sertlik, süneklik, aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahiptirler. Bu özellikler, geleneksel alaşımlarda genellikle bulunmayan avantajlı özelliklerdir. Bu itibarla, YEA'lar özellikle uzay, havacılık, nükleer ve kimyasal proses endüstrilerinde yüksek sıcaklıklı uygulamalarda uygulama alanı bulmuştur.

Diğer geleneksel malzemelerde olduğu gibi YEA'ların tüm (bulk) özelliklerini geliştirmenin yanında yüzey özelliklerini geliştirmeye yönelik de çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

YEA'ların yüzey kaplama tekniklerinden olan borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesine ve karakterizasyonuna yönelik sınırlı da olsa literatürde çalışmalar raporlanmıştır.

Literatürde CoCrFeNi YEA'nın yüzey modifikasyonu üzerine kısıtlı çalışmalar olsa da Zr içeren CoCrFeNi YEA'nın termokimyasal yöntemlerden olan borlama ile yüzey modifikasyonu üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, dört farklı oranda Zr içeren CoCrFeNiZr YEA'ları sabit sıcaklıkta, farklı sürelerde kutu borlama tekniği ile borlanmış ve borlanmış bu CoCrFeNiZr YEA'ların karakterizasyonu yapılmıştır.

Numunelerin borlama işlemi öncesi ve sonrasındaki karakterizasyonu için mikrosertlik cihazı, optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskoğu (SEM), SEM-Enerji Dağılım Spektroskopisi (SEM-EDS) ve X Işını Kırınımı (XRD) teknikleri kullanılmıştır.

2. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR

2.1. Yüksek Entropili Alaşımlar

Şu ana kadar, demir (Fe), alüminyum (Al), bakır (Cu), titanyum (Ti), magnezyum (Mg) ve nikel (Ni) gibi temel elementlere dayanan 30'a yakın farklı alaşım sistemi geliştirilmiştir. Bu alaşımlar tipik olarak, özelliklerini değiştirmek için diğer elementlerin yalnızca küçük eklemeleriyle birlikte tek bir ana elementten oluşur. Çoğu YEA, genellikle geleneksel alaşımların olgunluğa ulaştığı kabul edilen 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. O zamandan bu yana, ileri uygulamalar için geliştirilmiş özelliklere sahip malzemelere yönelik sürekli talebi karşılamak amacıyla termomekanik işlemler, hızlı katılaştırma, mekanik alaşımlama, püskürtmeyle şekillendirme, yarı katı şekillendirme, eşit kanallı açısız ekstrüzyon, ileri geri ekstrüzyon, süperplastik şekillendirme, yüksek gerinim oranlı süperplastik şekillendirme, karıştırma sürtünme kaynağı ve nano ölçekli malzeme üretimi gibi çeşitli yollar aranmıştır. Amaca yönelik diğer yöntemler ise, yeni geliştirilen intermetalik bileşikler ve bunların karışımları, metal matrisli kompozitler, Al-Li alaşımları, metalik camlar, kurşunsuz lehimler ve nanoyapılı malzemelerde olduğu gibi, alaşımların bileşimini değiştirmek olmuştur.

Malzemeyi alaşımlandırma ile geliştirme araştırmalarındaki asıl amaçlar şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Mukavemet ve tokluk artırma
- 2) Aşınma direnci artırma
- 3) Yüksek sıcaklık mukavemeti
- 4) Korozyon dayanımı artırma
- 5) Düşük yoğunluk
- 6) Şekillendirilebilirlik
- 7) Manyetiklik
- 8) Çevre dostu malzemeler (Geri dönüşebilir, kurşunsuz, vb.)
- 9) Bunların birkaçının/hepsinin kombinasyonu [1].

Günümüzde, YEA'lar, özgün kompozisyonları, mikro yapıları ve değiştirilebilir özellikleri ile büyük ölçüde ilgi odağı olmaktadır. Bunlar en az 5 elementin aynı veya

birbirine yakın oranlarda katı eriyik şeklinde oluşturduğu alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Birçok elementin benzer oranlarda alaşım içinde bulunması, yüksek karışım entropisine neden olur. Bu durum, intermetalik fazların oluşumunu zorlaştırırken, basit, yüzey merkezli kübik (YMK) veya hacim merkezli kübik (HMK) gibi yapılar veya bu ikisinin birleşimi olan katı eriyiklerin oluşumunu kolaylaştırır [4]. YEA'ların ana alaşım elementlerinin konsantrasyonları genellikle %5 ila %35 arasında olmaktadır. Ana elementlere ek olarak, YEA'lar küçük oranlarda (%5'in altında) diğer elementleri de içerebilir. Bu alaşımlar, geleneksel alaşımlara kıyasla önemli ölçüde yüksek karışım entropisine sahip olduğundan, YEA adını alır. Var olan fiziksel metalurji bilgisi ve ikili/üçlü faz diyagramları, bu çoklu elementlerin karmaşık ve kırılğan mikroyapıya sahip, analizi zor, pratik uygulama değeri sınırlı çok sayıda fazın ve intermetalik bileşiğin oluşabileceğini göstermektedir.

Ancak, yapılan çalışmalar, yüksek karışım entropisinin varlığının, HEA'ların katı eriyik fazların oluşumunu kolaylaştırdığını ve basit yapılar oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, fazların sayısını azaltarak kompleks ve kırılğan mikroyapının oluşma olasılığını düşürür [5].

2.2. YEA'ların Gösterimleri

YEA'lar tek bir ana elementten oluşmadığı için, bileşenlerin kimyasal formülle gösterimlerinde farklılıkla bulunmaktadır. Kolay tanımlayabilmenin yanı sıra, aynı ya da farklı sistemlere ait alaşımların karşılaştırılabilmesi adına, önce birincil elementlerin alfabetik sıralanışıyla yazılması ve ardından yine minör elementlerin alfabetik sıralanışıyla yazılması ortak yöntem sayılabilir. Her ne kadar uygun olsa da bu yöntem bilgi sağlama bakımından yetersiz kalmaktadır. Elementler Mendeleev numarasına ya da atomik numaralarına göre de sıralanabilecek ve bu sayede daha önemli hale gelebilecek olsalar da bu şekilde de çok kolay olmamaktadır. Konsantrasyon atomik orana ya da atomik yüzdeye bağlı olarak alt simge şeklinde belirtilebilir. Örneğin; iki eş atomik alaşım için CoCrCuFeMnMoNiZr ve AlCoCrFeNiTi gösterimi bu kurala uygun olup; aynı gösterimin $Al_{0,5}Co_{1,5}CrFeNi_{1,5}Ti_{0,5}$ ve $CoCr_{0,5}Cu_{0,5}Fe_{1,5}Mn_{0,5}Mo_{0,3}NiZr_{0,4}$ eş atomik olmayan alaşımlarda da uygun olduğu bilinmektedir. Söz konusu alaşımlar, yüzde atomik

oranlarına bakılarak $\text{Co}_{17,5}\text{Cr}_{8,8}\text{Cu}_{8,8}\text{Fe}_{26,3}\text{Mn}_{8,8}\text{Mo}_{5,3}\text{Ni}_{17,5}\text{Zr}_{7,0}$ ve $\text{Al}_{8,3}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{16,7}\text{Fe}_{16,7}\text{Ni}_{25}\text{Ti}_{8,3}$ şeklinde gösterilmektedir.

Literatürde, molar oran da YEA’larda kolaylıkla kullanılmaktadır. Çünkü molar oran atomik orana eşittir. Fakat, kompozisyonlara ait kimi özelliklerin vurgulanmasına ihtiyaç varsa, bu kurala kati surette uyulmalıdır [5].

2.3. YEA’ların Kullanım Alanları ve Özellikleri

Günümüzde, birçok ileri teknoloji uygulamasında hâlâ geleneksel alaşımlar kullanılsa da, sürekli olarak daha yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. Rekabet, araştırmalara duyulan ilgi, minyatürleşme, çok işlevlilik, çevresel sorunlar, pazar talepleri ve artan ürün servis ömrü gibi bir dizi etken, yeni tür malzemelerin gelişmesini desteklemektedir. Örneğin, uzun ömürlü parçalar ve sistemler, düşük değişim maliyeti ve kaynak kullanımı anlamına gelir. Ayrıca, yüksek enerji koruma etkisiyle yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında çalışabilen parçalar, enerji tüketimini, maliyeti ve çevresel kirliliği azaltabilirler [6].

YEA’ların kullanım alanları ve kullanım özellikleri şunlardır;

1. Motor malzemeleri – oksidasyon direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti ve sıcak korozyona karşı direnç,
2. Nükleer malzemeler – düşük nötron Emilimi ve yüksek sıcaklık mukavemeti,
3. Takım malzemeleri – aşınma direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti, darbe dayanımı, oksidasyon direnci,
4. Atık yakma – korozyon direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti, aşınma dayanımı ve oksidasyon direnci,
5. Refrakter bina kaplama – yüksek sıcaklık mukavemeti,
6. Hafif nakliye malzemeleri – yüksek mukavemet, sürünme dayanımı, tokluk ve yüksek işlenebilirlik,
7. Yüksek frekans iletişim malzemeleri – manyetik geçirgenlik (3GHz üzerinde) ve yüksek elektriksel mukavemet,
8. Fonksiyonel kaplamalar – yapışmaz, aşınma direnci, anti-bakteriyel, parmak izi bırakmaz,

9. Hidrojen depolama malzemeleri – düşük maliyet, hidrojenin yüksek tersinir hacimsel ve gravimetrik yoğunluğu,
10. Süper iletkenler – yüksek sıcaklık mukavemeti
11. Uçak, gemi füze – yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet,
12. Protez malzemesi – biyolojik uyum,
13. Kesici malzemeler – yüksek sertlik,
14. Nükleer endüstri – korozyon direnci,
15. Hız çelikleri – yüksek sertlik,
16. Termodinamik uygulamalar - yüksek aşınma direnci [7].

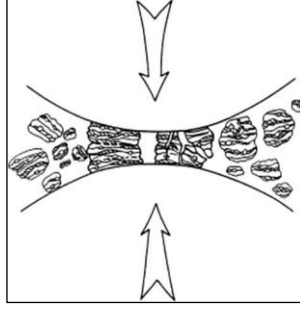
Buradan da anlaşılacağı üzere geleneksel alaşımlarda bulunmayan bu özellikler YEA'lar ile elde edilebilmektedir. Buna bağlı olarak da geliştirilen veya geliştirilecek olan YEA'lar hayatımızın hemen her alanında kullanılabilmektedir.

2.4. YEA'ların Üretim Yöntemleri

YEA'ların üretilmesi için kullanılan yöntemlerden bazıları şunlardır: Katı hal üretim yöntemi, ergitme ve döküm yöntemi ve buhar biriktirme yöntemleri [6].

2.4.1. Katı Hal Üretim Yöntemi

Raporlanan YEA'ların üretiminin küçük bir kısmı (yaklaşık %5), katı hal prosesleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle mekanik alaşımlama ve elementlerin konsolidasyonunu içerir. Mekanik alaşımlama süreci, farklı türdeş elementel tozların yüksek enerjili değirmenlerde işlenerek difüzyon yoluyla homojen bir yapı elde edilmesini içerir. Şekil 2.1'de bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği üzere, bilyalar ve tozlar arasındaki yüksek enerjili etkileşim, sürekli deformasyon, kırılma ve kaynaşma nedeniyle oluşan partiküllerin nanokristalizasyon ve hatta amorfizasyon süreçlerini içerir [4,6,8].



Şekil 2.1: Mekanik alaşımlama işlemi şematik gösterimi [6].

Mekanik alaşımlamanın 3 adımı bulunmaktadır. İlki, alaşım malzemeleri bir bilyeli değirmende çok ince tozlara öğütülmesi işlemidir. Bu adımı takiben, tozlar sıkıştırılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilir ve bu genellikle sıcak izostatik presleme (HIP) yöntemiyle uygulanır. Son olarak da, soğuk sıkıştırma işleminde iç gerilmeler olduğundan, bu gerilmeleri gidermek için ısıtım işlemi gerçekleştirilir [9].

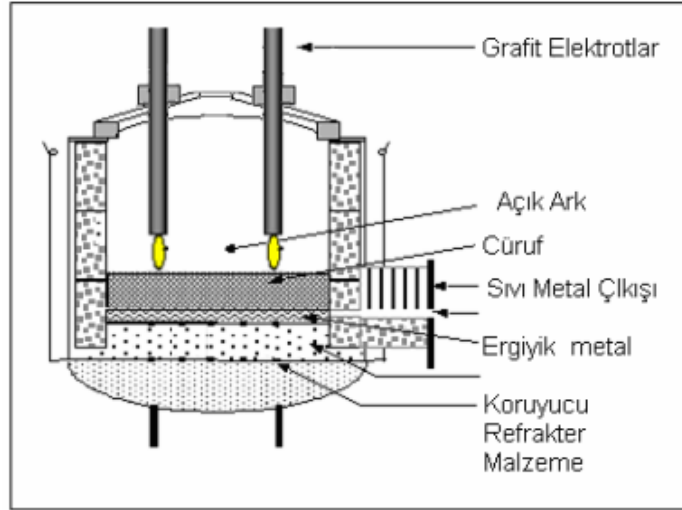
Mekanik alaşımlama yöntemiyle elde edilen YEA'lar sinterleme yöntemiyle daha yoğun parçalar haline getirilir. Geleneksel sinterleme yöntemlerinde, alaşım tozları yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalmaktadır. Bundan dolayı da nanokristalin alaşımlarda tane büyümesi meydana gelebilir. Bu alaşımlar genellikle Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemiyle sinterlenerek, tane büyümesinin önüne geçilmeye çalışılır.

SPS yöntemi, genellikle bir grafit kalıp içinde tutulurken yüksek akım şiddetlerinde darbeli akım darbeli akım (5000 A'ya kadar) ve beraberinde basınç da uygulanarak gerçekleştirilir. Darbeli akım, plazmanın partiküller arasında oluşmasına ve toz parçacıklarının hızla ısınmasına neden olur. Bu, konvansiyonel sinterleme işlemlerine kıyasla birkaç dakika gibi kısa bir sürede benzer bir sinterleme yoğunluğuna ulaşılmasını sağlar [6].

2.4.2. Ergitme ve Döküm Yöntemi

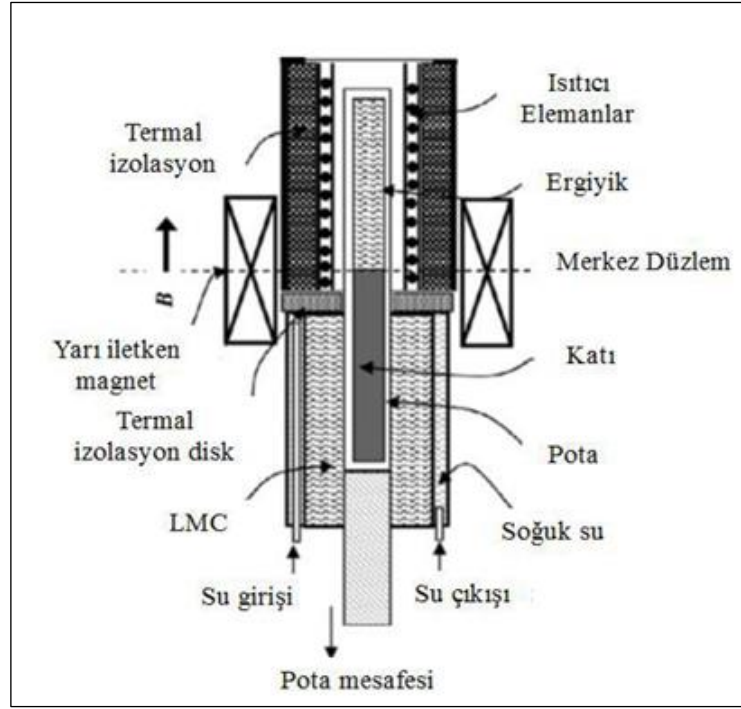
YEA'ların üretiminde için en fazla tercih edilen yöntem ergitme ve döküm yöntemidir. Ark ergitme fırınlarının en önemli özelliği, torç sıcaklığının 3000°C'ye kadar çıkması ve elektriksel olarak ayarlanarak kontrol edilebilir olmasıdır. Dolayısıyla yüksek ergitme sıcaklığına sahip elementlerin çoğu bu tür fırınlar kullanılarak ergitilir ve karıştırılabilir [10]. Şekil 2.2'de şematik bir ark ergitme fırını görülmektedir [34].

Ancak, Mg, Zn, Mn gibi ergime noktası düşük ve buharlaşması kolay elementlerin bu tip fırınlarda ergitilmesi veya karıştırılması, bileşimin tam olarak kontrol altında tutulamamasından dolayı uygun olmamaktadır. Bunun yerine indüksiyon ile veya rezistans ile ısıtma tercih edilmektedir [8].



Şekil 2.2: Ark ertme fırınının şematik gösterimi [34].

Diğer bir sıvı hal üretim tekniği ise Bridgman katılaşma tekniğidir. Bridgman yöntemi, genellikle tek kristalli ingotların dökümü için kullanılır. Bu yöntem, çok kristalli malzemelerin ergime noktasına kadar ısıtılmasını ve içinde bulunduğu kabı, çekirdek kristalin bulunduğu noktadan yavaşça soğutma adımlarını içerir.[8] Yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.3'te görülmektedir [4].



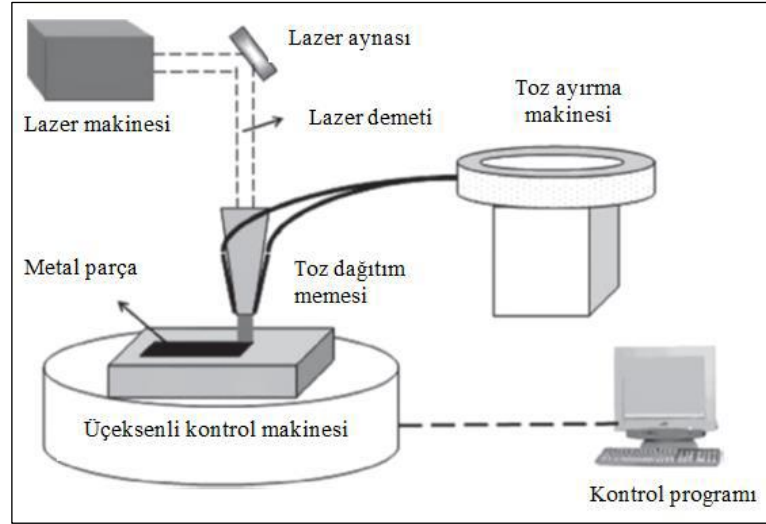
Şekil 2.3: Bridgman katılaşma yönteminin şematik gösterimi [4].

Aynı kristallografik yönlenmenin tek bir kristali, çekirdek malzemesi olarak işlev gören bir çekirdek üzerinde oluşur ve zaman içinde hazne boyunca uzayarak şekil alır. Bu süreç, yatay veya dikey yönde gerçekleşebilir. Bu yöntem, özellikle yarı iletken kristallerin üretiminde, Czochralski yönteminin uygulanmasının zor olduğu durumlarda sıkça kullanılan bir yöntemdir [5].

Cui ve arkadaşları AlCoCrFeNi ve CoCrCuFeNi YEA'larını Bridgman yöntemi ile dikey yönlü olarak üretmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda büyüme hızı arttıkça alaşımın mikroyapısı düzlemsel yapıdan hücreli yapıya dönüşmüştür. Sonuç olarak, yönlü katılaştırmanın iri dentritik yapıya sebep olduğu, dendritik ve dendritler arası bölgelerde konsantrasyon farklarının azaldığı tespit edilmiştir [5].

YEA üretiminde kullanılan diğer bir yöntem de LENS (Laser-engineered Net Shaping) yöntemidir. Şekil 2.4.'te LENS yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [12].

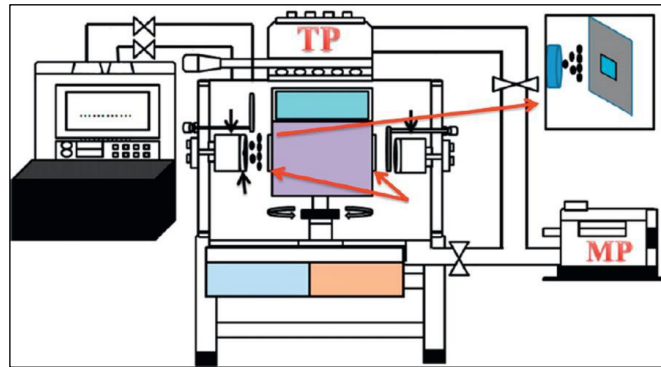
Bu yöntemde kullanılan güçlü lazer demeti ile, metalik parçalar bilgisayar destekli tasarım yardımıyla tozdan üretilmektedir. Bu teknikte metal tozu, odaklanmış bir lazer ışınına eş eksenli olarak yerleştirilen bir biriktirme başlığı ile beslenir. X-Y tablası ve birikim kafası belirli bir serbestlik derecesi ile hareket eder ve oksidasyonunu önlemek amacıyla bir gaz kullanılır [12].



Şekil 2.4: LENS yönteminin şematik gösterimi [12].

2.4.3. Buhar Biriktirme Yöntemi

Gaz halindeki yüzey modifikasyon türünde ince film kaplama yöntemleri olan magnetron püskürtme ve plazma nitrüleme en çok kullanılan 2 yöntemdir. Magnetron püskürtme tekniğinde, elektron iz uzunluğunu artırmak amacıyla manyetik ve elektrik alanlar kullanılır. Bu sayede yüksek püskürtme oranları ve düşük argon basınçlarıyla birleşerek biriktirme sağlanır. Magnetron püskürtme, DC ve RF püskürtme tekniklerini içeren bir yaklaşımı benimser. Şekil 2.5'te, DC ve RF püskürtme yöntemlerinin şematik diyagramları sunulmuştur.[4] Magnetron püskürtme, özellikle YEA'lar için en çok tercih edilen kaplama yöntemidir. Öte yandan, plazma nitrüleme yöntemi, magnetron püskürtme ile karşılaştırıldığında daha az yaygın olarak kullanılır, ancak kalın tabakaların üretimi için daha uygun bir seçenektir, çünkü yüzeyi daha fazla sertleştirir [4,7].



Şekil 2.5: DC ve RF püskürtme yöntemlerinin şematik gösterimi [4].

2.5. YEA’larda Çoklu Ana Element Etkisi

Daha önce yapılan çalışmalara dayanarak, YEA’larda çekirdek etkileri şöyle sıralanabilir;

- 1) Yüksek entropi,
- 2) Kafes distorsiyonu,
- 3) Yavaş difüzyon,
- 4) Kokteyl etkileri.

Kısacası, yüksek entropi, mikro yapıların temel olarak YMK ve HMK yapılarına sahip basit katı çözelti fazlarından oluşacak şekilde basitleştirilmesinde önemli bir rol oynar. Kafes distorsiyonu, mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri etkiler. Yavaş difüzyon, alaşımların nanokristalin ve hatta amorf yapılar geliştirmesine yol açar. Son olarak kokteyl etkileri, farklı elementler arasındaki etkileşimlerin önemli bir rol oynadığı özellikler üzerinde bileşik bir etkiye sebep olur. Yukarıda belirtilen etkenlerin hepsi, YEA'lara çok fazla üstün özellikler sağlar ve bu sayede çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir [1].

2.5.1. Yüksek Entropi Etkisi

Çoklu ana element içeren alaşımların, karmaşık ve kırılğan mikroyapılar oluşturacağı genel bir düşünce nedeniyle, bu tür alaşımlarla ilgili az sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak, YEA’lar, genellikle kimyasal olarak uyumlu elementlerden oluşur veya az sayıda hatta bazen tek fazdan oluşurlar. Bu durum, genellikle yüksek karışım entropisine bağlanır. Faz sayısı, Gibbs faz kuralında önceden belirlenen maksimum faz sayısından önemli ölçüde daha azdır. Yüksek karışım entropisi, fazların bölünmesini geliştirerek ve intermetalik bileşiklerin oluşmasını engelleyerek karşılıklı çözünmeyi artırır.

YEA’larda bazı metalik elementler arasında oluşan güçlü bağlanma sonucunda intermetalik fazlar oluşsa da, bu fazlar diğer elementlerden de fazlaca içermektedir ve bunların düzen derecesinde önemli bir azalma mevcuttur.

Katı hal termodinamiğinde, karışım entropisi, artan boşluk konsantrasyonu üzerindeki sıcaklık etkisini ve zayıf bağlı çözünen atomların artan çözünürlüğünün

açıklanmasında iyi bilinen bir faktördür. Ayrıca, intermetalik bileşikler için karışım entropisinin diğer elementlerin çözünürlüğünü genişlettiği bilinmektedir.

Tüm bu olgular, karışım entropisinin karışım entalpisi ile rekabet ettiği eşitlik 2.1 ile açıklanabilir,

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix} \quad (2.1)$$

Ayrıca $T\Delta S_{mix}$ terimi, karışım entropisinin yüksek sıcaklıklarda daha baskın hale geldiği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, YEA'lardaki yüksek entropi, eriyik haller için hem terminal eriyiklerin hem de intermetalik bileşiklerin çözünürlüğünü artırır ve özellikle yüksek sıcaklıklarda basit çok elementli eriyik fazları oluşturur. Karışım entalpisi ve karışım entropisi arasındaki bu rekabet, katı çözelti fazlarındaki karşılıklı çözünürlüğü tahmin etmede kullanılan uygun bir alaşım tasarım parametresidir [1].

Yüksek entropili ve katı eriyik fazları kararlı hale getiren yüksek entropi etkisi ilk olarak Yeh tarafından ortaya atılmıştır. [33] Bu etki biraz karmaşıktır. Çünkü daha çok faz diyagramının merkezinde yer alan eş molar veya eş molarlara yakın intermetalik bileşiklerin oluşumu beklenmektedir. Gibbs faz kuralına göre sabit basınçta verilen bir alaşım için fazların sayısı (P) 2.2. eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$P = C + 1 - F \quad (2.2)$$

Bu denklemde “C” bileşen sayısını ve “F” ise serbest değişkenlerin sayısını göstermektedir. Altı bileşenli bir sistemde sabit basınç altında maksimum 7 denge fazı oluşması beklenir. Ancak YEA'larda intermetalik fazlar yerine katı eriyik fazlar oluşmaktadır. Bu demek değildir ki bütün eş molar oranlı bileşenler katı eriyik oluşturacak. Genel olarak özenli seçilen kompozisyonlarda intermetalik fazlar yerine katı eriyik fazların oluşumu beklenebilir. Katı eriyik faz aslında normalde bir element üzerine inşa edilir. Yani bir çözücü ve diğer çözünen elementleri içerir. YEA'larda bu ayrımı yapmak eş molar oranlar sebebiyle pek mümkün değildir [5].

Bunun yanında, YEA'lardaki faz sayısının faz kuralına göre belirlenmiş azami faz sayısından büyük ölçüde düşük olduğunun belirtilmesi önemlidir. Çünkü karşılıklı

çözünürlüğü destekleyen yüksek karışım entropisi, katı eriyik oluşumunu güçlendirerek çok sayıda fazın oluşumunu sınırlandırır. Bununla beraber, YEA'ların birden fazla ana elemente sahip olması, atomların difüzyivitelelerini azaltmakta ve bunun bir sonucu olarak söz konusu alaşımlarda fazların oluşumu kinetik yönden kısıtlanmaktadır. Diğer ifadeyle, YEA'larda faz oluşumunun az sayıda oluşu yalnızca yüksek karışım entropisiyle değil, eş zamanlı olarak atomların düşük difüzyiviteleleriyle de sağlanmaktadır [6].

Karışım entropisinin biçimsel, manyetik dipol, titreşimsel ve elektronik rastgelelik olmak üzere dört temel bileşeni vardır. Ancak, bu bileşenler arasında biçimsel entropinin katkısı diğerlerine göre daha baskındır. Diğer üç bileşen arasında, titreşimsel entropinin, yüksek sıcaklıklarda karışım nedeniyle Debye sıcaklıklarından hesaplanabilen bir aşırılığı bulunmaktadır. Aşırı titreşimsel entropinin toplam karışım entropisine negatif bir katkısı olabilir, ancak bu etkileşimi birbirine benzemeyen atomlar arasında geliştirilebilir.

Entropi, element sayısının artmasıyla birlikte artar. Richard kuralına göre,

$$\Delta H_f / T_m = \Delta S_f - R \quad (2.3)$$

2.3. eşitliği ile ifade edilen mol başına entropi değişimi olan ΔS_f , katıdan sıvıya geçişteki gaz sabiti olan ΔH_f , RT_m 'den hesaplanabilir. ΔH_f , katıdaki tüm bağları kırmak için gereken enerji olarak düşünülebilir ve rasgele katı eriyik içindeki mol başına R 'nin karışım entropisi, karışım serbest enerjisini düşürmek için oldukça büyüktür. Bu tür bir karışım serbest enerjisi düşüşü, katı eriyik fazların intermetalik bileşiklere göre yüksek oluşum yeteneğine sahip olmasını sağlar. Bu, bileşen elementlerin karışım durumunu oluşturma eğilimini, özellikle yüksek sıcaklıklarda artan karışım entropisi ile artıracığı anlamına gelir. Tablo 2.1, eş molar alaşımlarda artan element sayısına göre karışım entropisi ($\Delta S_{krş}$) değerlerini göstermektedir [5].

Tablo 2.1: Eş molar alaşımlarda bileşen element sayısına göre karışım entropisinin değişimi [5].

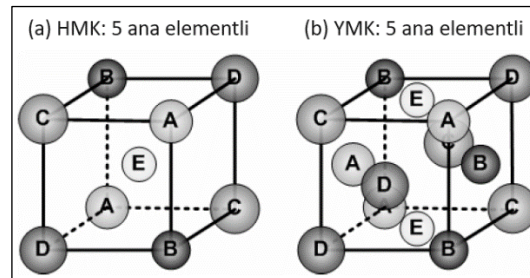
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta S_{karış}$	0	0,69R	1,1R	1,39R	1,61R	1,79R	1,95R	2,08R	2,2R	2,3R	2,4R	2,49R	2,57R

Tablo 2.1’de görüleceği üzere üçlü eş molar alaşımların karışım entropisi 1R’den biraz yüksek iken dördümlü eş molar alaşımların karışım entropisi 1R’den %61 daha fazladır. $\Delta S_{karış}$ ’in 1,5R değeri yüksek entropili ve orta entropili alaşımlar arasındaki sınır olarak önerilmektedir [5].

Yüksek entropi etkisi, temelde çoklu ana elementli katı eriyiklerin ifade edilmesinde kullanılmakta olup; maksimum entropi üretim prensibi doğrultusunda yüksek entropi, yüksek entropili katı eriyik gibi fazların intermetalik fazlar ile kıyasla daha kararlı hale getirilmesi yönünde bir eğilime sahiptir. İntermetalikler çoğunlukla düşük karışım entropili düzenli fazlardır [8].

2.5.2. Kafes Distorsiyonu Etkisi

Çok bileşenli elementlere sahip katı çözelti fazları genellikle YEA’larda bulunduğundan, geleneksel kristal yapı kavramı böylece bir veya iki elementli temelden çok elementli bir temele kadar genişletilir. Şekil 2.6., beş ana element içeren HMK ve YMK kristal yapılarını göstermektedir. Aslında, çok elementli kafes yapıları oldukça çarpıktır. Çünkü tüm atomlar çözünen atomlardır ve atom boyutları birbirinden farklıdır. Kristal veya amorf yapılardaki distorsiyon, malzemelerin mekanik, termal, elektriksel, optik ve kimyasal davranışlarını etkiler. Bu etkiye kafes distorsiyonu etkisi adı verilir. Örneğin, YEA’lardaki kafes distorsiyonu etkileri, yüksek katı eriyik sertleşmesine, termal ve elektrik direncine ve x-ışını dağılımına sebep olur [1].



Şekil 2.6: (a) HMK ve (b) YMK kristal kafes yapıları 5 ana elementli [1].

Kafes distorsiyonu etkisi, özellikle HMK yapılı YEA'ların yüksek dayanımının açıklamasında kullanılır. Ayrıca, YEA'ların çekme gevrekliği ve yavaş difüzyonu ile de ilişkilendirilmektedir. Bununla beraber, tek fazlı YMK yapılı YEA'ların çok düşük dayanımlı olduklarına da dikkat çekilmektedir, ancak bu durum kafes distorsiyonu etkisi ile açıklanamamaktadır [8].

2.5.3. Yavaş Difüzyon Etkisi

YEA'larda difüzyon ve faz dönüşüm kinetiğinin diğer geleneksel muadillerine göre daha yavaş olduğu öne sürülmektedir. Bu durum iki şekilde açıklanabilmektedir. Birinci durum şudur; YEA'larda her kafes bölgesinin komşu atomları birbirinden farklıdır. Dolayısıyla atomdan önceki ve sonraki boşluğa atlayan komşular farklıdır. Lokal atom konfigürasyonundaki farklılık, farklı bağlanmalara ve dolayısıyla her bölge için farklı lokal enerjilere yol açar. Bir atom düşük enerjili bir bölgeye atladığında hapsedilmiş gibi olur ve o bölgeden dışarı atlama şansı daha düşük olur. Bunun aksine, eğer bölge yüksek enerjili bir bölgeyse, atomun orijinal bölgesine geri dönme şansı daha yüksektir. Bu senaryolardan herhangi biri yayılma sürecini yavaşlatır. Düşük çözünen madde konsantrasyonuna sahip geleneksel alaşımlarda, bir boşluğa atlamadan önceki ve sonraki lokal atom konfigürasyonu çoğu zaman aynıdır [13].

İkinci durum şudur ki, YEA'lardaki elementlerin difüzyon oranları farklıdır. Bazı elementler, diğerlerine kıyasla daha düşük aktiviteye sahiptir ve bu elementlerin boşluklara atlamadaki başarı oranları daha düşüktür. Ayrıca, faz dönüşümleri genellikle çeşitli elementlerin tipik olarak koordineli difüzyonunu gerektirir. Örneğin, yeni bir fazın çekirdeklenmesi ve büyümesi için elementlerin istenen kompozisyona ulaşabilmesi için yeniden dağılması gerekebilir. Aynı şekilde, tane büyümesi için bütün elementlerin başarılı bir şekilde tane sınırlarını geçebilmesi gerekir. Bu durumlarda, elementlerin yavaş hareket etmesi, dönüşüm sürecini yavaşlatıcı bir etkiye sahip olabilir [13].

YEA'ların sahip oldukları bu yavaş kinetikleri kolaylıkla oluşabilen aşırı doygun ve nano boyutlu çökeltilerin dökümde bile oluşmasına izin vermektedir. Bu da YEA kaplamaların difüzyon bariyeri olarak yüksek performansına katkı sağlamaktadır.

Bununla beraber, bu durum daha iyi yüksek sıcaklık dayanımı ve yapı kararlılığı oluşturmaktadır. Yine aynı sebeple YEA'ların olağanüstü sürünme davranışına sahip olması beklenmektedir [13].

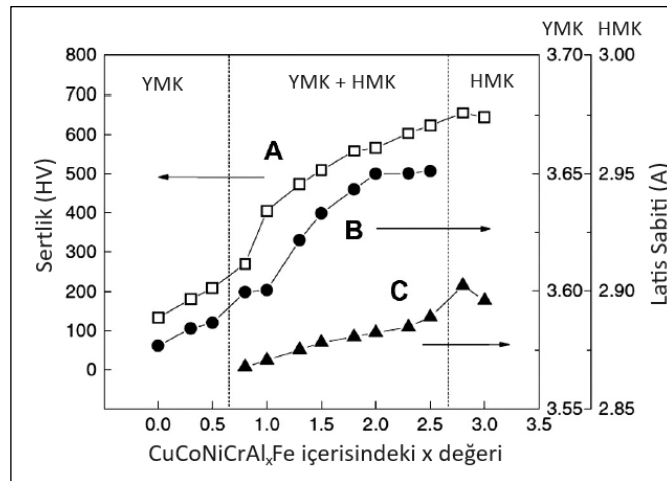
Sonuç olarak, yavaş difüzyon etkisi çekirdeklenmeyi, büyümeyi, dağılımı ve yeni faz morfolojisini difüzyon kontrollü faz dönüşümlerinde etkilemektedir. Bu durum; mikroyapının ve özelliklerin kontrolü, aşırı doygun ince çökeltilerin oluşumu, yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı, yavaş tane kabalaşması ile azaltılmış tane kabalaşması ve yüksek sürünme direnci gibi birçok avantajı sağlamaktadır [6].

2.5.4. Kokteyl Etkisi

Metalik alaşımlar için kokteyl etkisi, herhangi bir bağımsız elementten elde edilemeyen, birçok elementin karıştırılmasından sonra beklenmeyen özelliklerin elde edilebileceği anlamına gelmektedir [8].

Bu durum ilk olarak Ranganathan, (2003) tarafından açıklanmıştır [6]. YEA'larda kokteyl etkisi, YEA'ların özelliklerinin ve kompozisyonların değiştirilmesinde farklı alaşım elementlerinin eklenmesi ile büyük oranda ayarlanabileceğini belirtmektedir [6].

Örnek olarak, Şekil 2.7, CoCrCuNiAl_xFe YEA'da Al içeriğinin değiştirilmesi ile sertlik, kafes yapısı ve latis sabitlerin değişimlerini göstermektedir [1].



Şekil 2.7: CoCrCuNiFeAl_x alaşımındaki sertlik ve kafes parametrelerinin farklı x değerlerine göre değişimi. A) CoCrCuNiFeAl_x alaşımı sertlik değeri B) YMK fazın latis sabiti değerleri, C) HMK fazın latis sabiti değerleri [1].

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere Al oranının değişmesiyle YEA’nın hem mekanik hem de yapı özelliklerinde önemli değişiklikler bulunmaktadır. Ayrıca Al oranının artması ile sertlik değerinin önemli derecede arttığı görülmektedir. YMK kafes yapısına sahip YEA’nın kafes yapısı önce YMK+HMK daha sonra HMK kafes yapısına dönüştürülmüştür. Böylece YEA’nın mukavemetinde artış olduğu görülmektedir [7]. YEA’larda, en az 5 temel elementin geliştirdiği özelliklerin vurgulanması adına, kokteyl etkisi kullanılır. Çünkü; kompozisyona ya da prosese bağlı olarak 1, 2, 3 veya daha çok sayıda fazdan meydana gelebilen YEA’ların özelliklerini, tüm bileşenlerin toplamı belirler. Bu; faz boyutu ve biçimi, dağılımı, sınırları ve fazların ayrı ayrı özellikleriyle ilişkilendirilir. Bunun yanında, her faz çok bileşenli katı eriyik olup, atomik ölçekte kompozit olarak değerlendirilmektedir [12].

3. BORLAMA

3.1. Giriş

Termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemi olan borlama, esas olarak metal yüzeyine bor atomu difüzyonu olarak tanımlanabilmektedir. Bor atomları, ısı enerjisi etkisiyle altlık malzemesi yüzeyine yayılır ve altlık malzemesinin atomları ile uygun borürler oluştururlar. Borlama işlemi, aynı zamanda sert ve aşınma direnci yüksek tabakalar elde etmek için de uygulanmaktadır [14].

Borlama işlemi esas olarak, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemenin 700-1100°C sıcaklıklarda, 1-12 saat süreyle bor içeren bir bor kaynağı ile temas halinde ısıtılması şeklinde, çeşitli demir esaslı ve demir dışı malzemelere uygulanabilmektedir [3].

Borlama işlemi en fazla çelik malzemelere uygulanmasıyla beraber, Fe-C alaşımlarının haricinde sermet, demir dışı ve seramik malzemelerde de uygulanabilmektedir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Borlama yüzey işlemiyle, malzeme yüzeyinde borür tipi seramik fazlar oluşması sağlanır [12].

Borlama işlemi, çok yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) sahip olma, yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilme özelliklerinden dolayı geleneksel sertleştirme yöntemlerine göre daha avantajlıdır. Tablo 3.1’de, borlama ile diğer sertleştirme teknikleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri karşılaştırılmıştır [12].

Bununla beraber, borlama işlemi sonucunda yaklaşık 20-300 µm kalınlığında borür tabakası elde edilir. Oluşan metalik borür tabakası, yüksek sertlik, iyi aşınma ve korozyon direnci ile birlikte yüksek sıcaklıkta orta derecede oksidasyon direnci gibi olağanüstü özellikler sağlar [3].

Tablo 3.1: Farklı yüzey işlemleri ile elde edilebilecek en yüksek sertlik değerleri.

Malzeme, Altlık	Mikrosertlik, HV
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
WC+ Co	1160-1820
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483
Al ₂ O ₃ + TiC+ ZrO ₂ seramikler	1730
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	>10000

3.2. Borlamaya Uygun Malzemeler

Borlama işlemi, sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi birçok demir esaslı malzemeye uygulanabilmektedir. Bununla beraber, titanyum, molibden, krom, nikel, kobalt, niyobyum, tantalyum, tungsten gibi demir dışı metaller ve alaşımları ile bazı intermetaliklere uygulanabilmektedir. Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturma mümkün olmasıyla beraber, seramik malzemelere de bor kaplamalar uygulanabilmektedir [12,16].

Alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çelikleri, kırılğan borür fazları oluşturmaları sebebiyle borlama için uygun malzemeler değildir [15].

3.2.1. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması

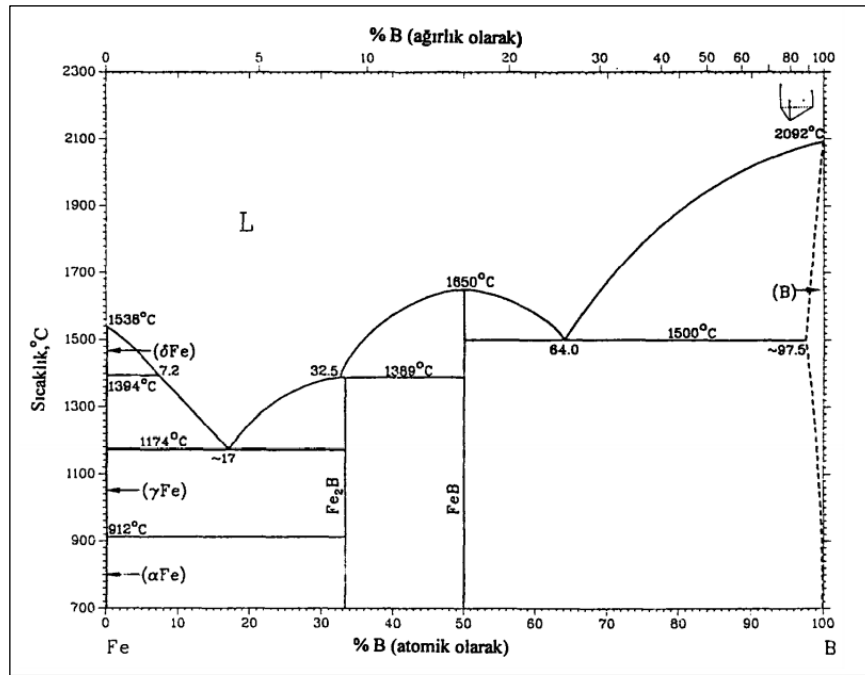
Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi ile yüzeylerinin sertleştirilmesi konusundaki ilk çalışma 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır [16].

Borlama, ostenit fazında gerçekleşen bir işlemdir. Bundan dolayı, havada sertleşen çelikler, borlamadan sonra sertlikleri hızlı bir şekilde artar. Suda sertleşen malzemeler,

borür tabakasının termal şoka maruz kalmasından dolayı su verilmesi gerekli olduğu durumlarda borlanmazlar. Buna benzer olarak, sülfürlenmiş ve kurşunlanmış çeliklere, yüzeylerinde çatlak oluşturma eğilimleri, nitrürlenmiş çeliklere ise çatlak hassasiyetleri nedeniyle borlama işlemi uygulanmaz [17].

Borlama işlemi sonrasında, karbon çeliklerinde genellikle 2 çeşit borür fazı oluşmaktadır. Bunlar, en dış yüzeyde FeB fazı ve bu faz ile matris arasında Fe₂B fazıdır [16].

İkili Fe-B denge diyagramına göre (Şekil 3.1.) [18], demir ile bor arasında ağırlık %8,83 bor oranında Fe₂B ve %16,23 bor oranında FeB bileşiği oluşmaktadır. 1174 °C sıcaklıkta ağırlık %3,8 bor oranında ise, L(γ -Fe) + Fe₂B bileşik ve fazından oluşan bir ötektik reaksiyon meydana gelmektedir [18].



Şekil 3.1: Demir – Bor denge diyagramı [18].

Bor elementinin demirde çözünürlüğü, α -Fe ve γ -Fe'de atomik %0,5'dir. Fe-B ikili denge diyagramında, atomik %7,2 B konsantrasyonuna kadar 1394°C'de δ -Fe'den γ +sıvıya dönüşen bir metatektik reaksiyon oluşurken, 912 °C 'de γ -Fe+Fe₂B'den α -Fe₂B'ye dönüşen bir reaksiyon yer almaktadır. Fe-B denge diyagramına göre; atomik %17 B içeren bileşimde α -Fe ile Fe₂B arasında 1174°C'de bir ötektik reaksiyon, 1389°C 'de sıvı+FeB arasında bir peritektik reaksiyon ve atomik %33,3 B bileşiminde

ise Fe_2B intermetalik bileşici oluşmaktadır. Atomik %50 B bileşiminde ise FeB intermetalik bileşici yer almaktadır [12].

3.2.2. Demir Dışı Malzemelerin Borlanması

Sementit karbürler, nikel, kobalt gibi refrakter metaller ve alaşımları borlama için uygun malzemelerdir. Özellikle nikel alaşımları, titanyum ve alaşımları da borlama yapılabilen malzemelerdendir. Bakır, bor atomlarının difüze olmasını engellediğinden kaplanamaz, bor bakır atomlarıyla herhangi bir reaksiyona giremez [17]. Eğer herhangi bir malzeme bakır kaplanmış ise ve bu kaplama yoğun çatlak veya porozite içermiyorsa, bor atomları ana metale ulaşamaz. Bu durumdan faydalanılarak, borlama sırasında işlem görmesi istenmeyen yüzeysel bölgeler bakır ile kaplanarak koruma sağlanabilir. Aynı özellik bronz ve pirinç kaplamalar için de geçerlidir [16].

Bazı malzemelerin borlama işlemi sırasında oluşan borür fazları ve bunların sertlikleri ile ergime sıcaklıkları Tablo 3.2.'de belirtilmiştir [16].

Tablo 3.2: Borlama işleminde oluşan borür fazlarının özellikleri [16].

Matris Malzemesi	Borür Tabakasındaki Sürekli Faz	Borür Tabakasının Sertliği (HV veya g/mm ²)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	
Co	CoB	1850	
	Co ₂ B	1500-1600	
	Co ₄ B	700-800	
Co-27.5Cr	CoB	2200(100 gr)	
	Co ₂ B	~1550(100 gr)	
	Co ₄ B	700-800	
Ni	Ni ₄ B ₄	1600	
	Ni ₂ B	1500	
	Ni ₃ B	900	
Inco 100		1700(200 gr)	
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	~2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	~1900
	TiB ₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		
	TiB ₂	3000(100 gr)	
Nb	NbB ₂	2200	3050
	NbB ₄		
Ta	Ta ₂ B		3200-3500
	TaB ₂	2500	3200
Hf	HfB ₂	2900	3250
Zr	ZrB ₂	2250	3040
Re	ReB	2700-2900	2100

3.3. Borlama Yöntemleri

Borlama işleminde bor kaynakları katı, sıvı veya gaz halinde bulunabilir. Borlama işlemi şu şekilde sınıflandırılır;

- i) Termokimyasal yöntemler (kutu borlama, sıvı borlama, gaz borlama, pasta borlama, plazma borlama ve akışkan yatakta borlama)
- ii) Termokimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme).

Bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılanı termokimyasal yöntemlerdir. Bu işlem, bor atomunun altlık malzemeye difüzyonu esasına dayalı bir kaplama yöntemi olup, yüzeydeki partiküllerin çekirdeklenme hızı, borlama süresinin ve sıcaklığının bir fonksiyonudur. Termokimyasal yöntemleri altı ana grupta incelenebilmektedir [16,20].

3.3.1. Pasta Borlama

Pasta borlama yöntemi, kutu borlamanın zor, pahalı ve daha uzun süreceği durumlarda, özellikle zaman tasarrufu sağlaması ve ekonomik olması, büyük hacimli ve karmaşık şekilli parçaların borlanması tercih edilir. Bu yöntemde, altlık malzeme ile pasta arasında hiç hava kabarcığı kalmaması gerekmekte olup, parçalar üzerinde kısmî borlama işlemlerinde de kullanılabilir [19].

Bu işlemde bor kaynağı olan malzeme macun formunda bulunmaktadır. Bu macun, borlanmak istenen yüzeye 2-5 milimetrelik kalınlıkta uygulanarak, fırınlama öncesinde kuruması beklenir. Macun tamamen kuruduktan sonra fırına yerleştirilen borlanacak parçalar, uygun sıcaklık ve sürede indüksiyonlu ısıtma ya da dirençli fırında ısıtma yöntemlerinden biri kullanılarak borlanır [20].

3.3.2. Sıvı Borlama

Sıvı borlama yönteminde bor kaynağı sıvı haldedir ve işlem 700-1000 °C aralığında gerçekleştirilmektedir. İşlem, elektrolitik olan ve elektrolitik olmayan olarak ikiye ayrılmaktadır. Sıvı borlama yönteminin birçok sakıncası bulunmaktadır;

- Borlama prosesi sonrasında parça üzerinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor bulunur. Bu kalıntıların giderilmesi ekstra maliyet ve zaman kaybına sebep olmaktadır.
- Borlama işleminin başarılı olabilmesi için sıvı banyoya tuz ilavesi yapılarak banyonun viskozitesinin artmaması sağlanmalıdır. Bu da yine ekstra maliyet oluşturmaktadır.
- Uygulama için korozif ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç duyulmaktadır [21].

Tablo 3.3'te sıvı borlama işleminde kullanılan bazı tuz banyoları verilmiştir [22].

Tablo 3.3: Sıvı ortam borlamasında kullanılan bazı bor kaynakları ve özellikleri [22].

Malzeme	Formül	Teorik Bor Oranı, % ağı.	Ergime Sıcaklığı, °C
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	11,35	-
Susuz boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	21,50	741
Metabor asidi	HBO_2	24, 69	-
Sodyum bor forid	NaBF_4	9,85	-
Borik oksit	B_2O_3	31,07	450
Bor karbür	B_4C	78,28	2450

3.3.3. Gaz Borlama

Gaz borlamada en çok kullanılan ortamlar şunlardır:

- Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı
- Borhalid (iyonize bor)- H_2 /veya (75/25 N_2 - H_2) gaz karışımı
- $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ ve $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi organik bor bileşikleri

Gaz fazında borlama işleminin prosesi oldukça basit olmasına rağmen işlem karmaşık ekipmanlar gerektirmektedir. Bununla beraber iki durum da vardır:

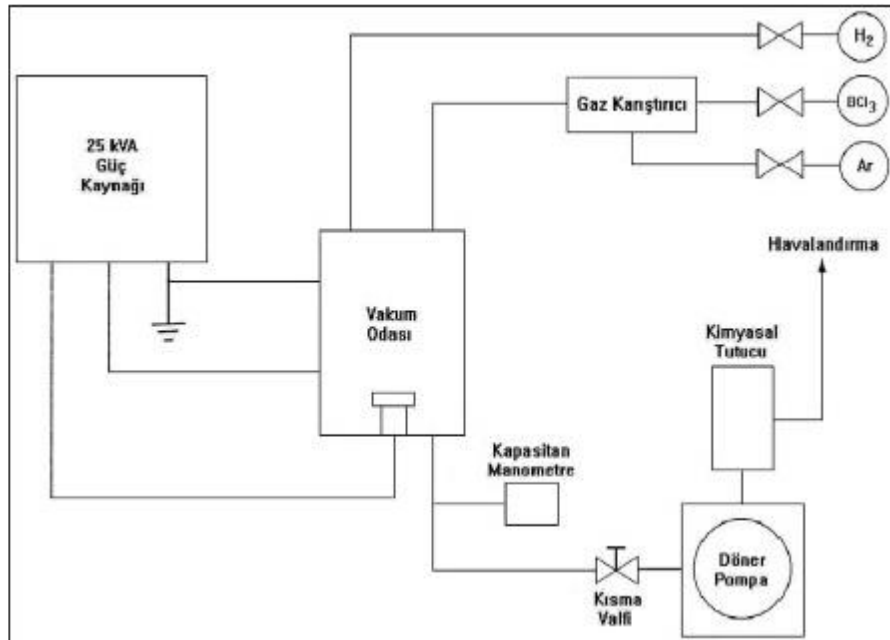
- a. Son derece tehlikeli olan siyanürün zehirlilik oranı sınırı 10 ppm iken, diboranın zehirlilik sınırı 0.1 ppm'den düşüktür.
- b. Diboran (B_2H_6) karışımının hidrojen ile seyreltilmesine rağmen, bu bileşim oldukça maliyetlidir. (B_2H_6)- H_2 karışımı zehirli ve patlayıcı özelliklere sahiptir, bu nedenle ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik malzemelerle birleştirildiğinde, borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşur. BBr_3 , yüksek maliyeti ve suyla güçlü reaksiyonu, ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3 gerektirmesi nedeniyle tercih edilmemektedir. Gaz borlama için en sık tercih edilen BCl_3 'dür. Parça gaz borlamaya tabi tutulduğunda, 1/15 BCl_3 + H_2 gaz karışımında 700-950 °C arasında ve 67 kPa basınç altında (0.67 bar) borlanır. Bazı çalışmalar, H_2 yerine 75:25 oranında N_2 : H_2 kullanmanın, FeB fazını azalttığını ve daha yüksek kaliteli tabakalar elde edilmesine olanak tanıdığını göstermiştir [18,25].

3.3.4. Plazma Borlama

Plazma borlama işlemi, diğer yöntemlere göre daha düşük sıcaklıklarda ve daha kontrollü bir şekilde uygulanmaktadır. Bu yöntemde $B_2H_6-H_2$ ve BCl_3-H_2-Ar karışımları kullanılmaktadır. $B_2H_6-H_2$ karışımı, katı ya da sıvı ortam borlama prosesiyle mümkün olamayacak düşük sıcaklıklarda ($600^\circ C$ gibi) farklı çelikler üzerinde borlu tabaka üretilmesinde kullanılmaktadır. BCl_3-H_2-Ar gazlarının karışımında gerçekleştirilen plazma borlamanın; BCl_3 konsantrasyonu kontrol edilebilirliğinin daha yüksek olması, artık gerilme düzeyinin azalması ve borlu film tabakalarına ait mikro sertlik değerlerinin daha yüksek oluşu gibi olumlu özelliklere sahip olduğu öne sürülmektedir [12].

En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalma yöntemidir. Bu yöntemde, bir elektrik gerilim kaynağı, gaz içerisindeki iki iletken plaka arasına bağlanır. Uygun şartlar sağlandığında, uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın iyonizasyon geriliminden büyükse, kullanılan bu iki plaka arasında bir elektrik akışı meydana gelir [12].

Plazma borlama işleminin şematik görüntüsü Şekil 3.2.'de verilmiştir [23].



Şekil 3.2: Plazma borlama işleminin şematik görüntüsü [23].

Bu işlemin en büyük dezavantajı, kullanılan atmosferin zehirli olmasıdır. Bunun yanı sıra aşağıda belirtilen avantajları bulunmaktadır;

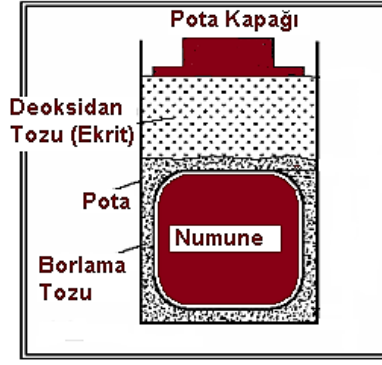
- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrollerinin gerçekleştirilebilmesi.
- Bor potansiyelinin yüksek oluşu.
- Daha ince borlu tabakalar elde edilebilmesi.
- Kullanılan sıcaklık ve işlem süresinin kısalığı.
- Yüksek sıcaklık fırınlarına ve aksesuarlara gereksinim duyulmaması [20].

3.3.5. Kutu Borlama

Kutu borlama işlemi, kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması ve çok az ekipmana gerek duyulmasından dolayı en çok tercih edilen yöntemdir. Proses sırasıyla, kutulama, ısıtma ve temizleme işlemlerinden oluşmaktadır. Uygulama sırasında borlanacak malzeme 3-5 mm kalınlıkta toz karışımı içerisinde bulunmaktadır. Kaba yüzeylerde bu kalınlık 10-20 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Kutu borlamada, çok farklı borlama bileşenleri kullanılmaktadır. Bu bileşenler, katı bor sağlayıcılar, akışkanlık sağlayıcılar ve aktivatörlerdir [15].

Kutu borlama yönteminin şematik görüntüsü Şekil 3.3.'te verilmiştir [24].

Borlama işlemi uygulanacak numune, önce istenilen boyuta getirilir ve ardından yüzeyi pürüzsüz hale getirmek için zımparalama işlemine tabi tutulur. Bu işlem için, yüksek sıcaklığa dayanıklı (metal veya seramik) bir pota içine Ekabor tozu eklenir ve borlanacak numune bu toz içine gömülür. Daha sonra potaya havanın girmesini engellemek için ekrit/alümina tozu eklenir. Borlama işlemi için hazırlanan potanın ağzı kapatılarak fırına yerleştirilir. Borlama işlemi, altlık malzeme özelliklerine ve elde edilecek borür tabaka özelliklerine bağlı olarak genellikle 700-1150 °C sıcaklıkta ve 1-10 saat arasında uygulanır. Numune, istenilen sıcaklıkta ve sürede borlama işlemine tabi tutulduktan sonra fırından çıkartılıp soğumaya bırakılır. Soğuma işlemi tamamlandığında, borlanan numune potadan çıkartılır [24].



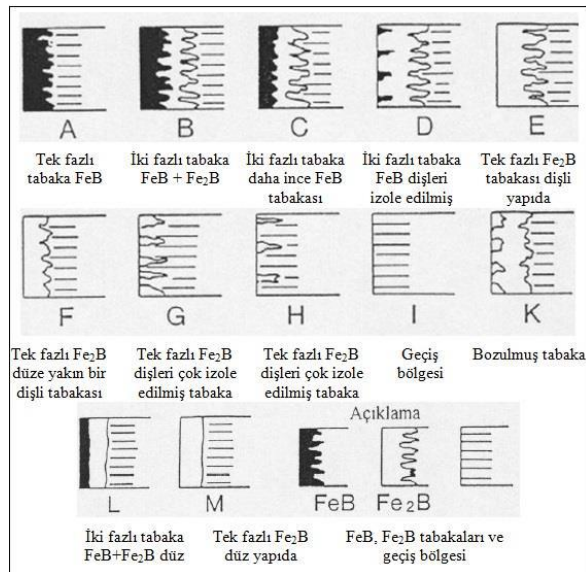
Şekil 3.3: Kutu borlama işleminin şematik görüntüsü [24].

Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri bor karbür (B_4C), ferrobor ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor verici olup, kalın borür tabakası oluştururlar. SiC ve Al_2O_3 çözünmeye yardımcı olur. Aktivatör olarak $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ kullanılır [21].

3.4. Borür Tabakaları

Bor atomları, borlanması istenen altlık malzemeye difüzyon sırasında reaksiyona girer ve bu süreçte bor bileşikleri oluşturur. Oluşan bu tabaka, tek bir fazdan oluşabileceği gibi birden çok fazı da içerebilir. Oluşan kaplamanın morfolojisi, büyümesi ve faz kompozisyonu, kullanılan ana malzemenin kimyasal bileşenine, borlama sıcaklığına, ortamına ve süresine doğrudan bağlıdır. Oluşan tabakanın mikrosertliği ise tabakanın yapısı, kompozisyonu ve ana malzemenin kompozisyonuna bağlıdır [17].

Borlama işlemi sonucunda oluşacak tabakanın özellikleri, yukarıda belirtilen parametrelere bağlı olarak düz bir yapıda veya taraksı-testere dişli yapıda olabilir. Çeliklerde borlama işlemi sonucunda başlıca iki tabaka meydana gelir. Bu tabakalar, borür tabakası ve geçiş bölgesidir. Şekil 3.4'te bu tabakalar gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Borlama sonucunda oluşan borür tabakaları.

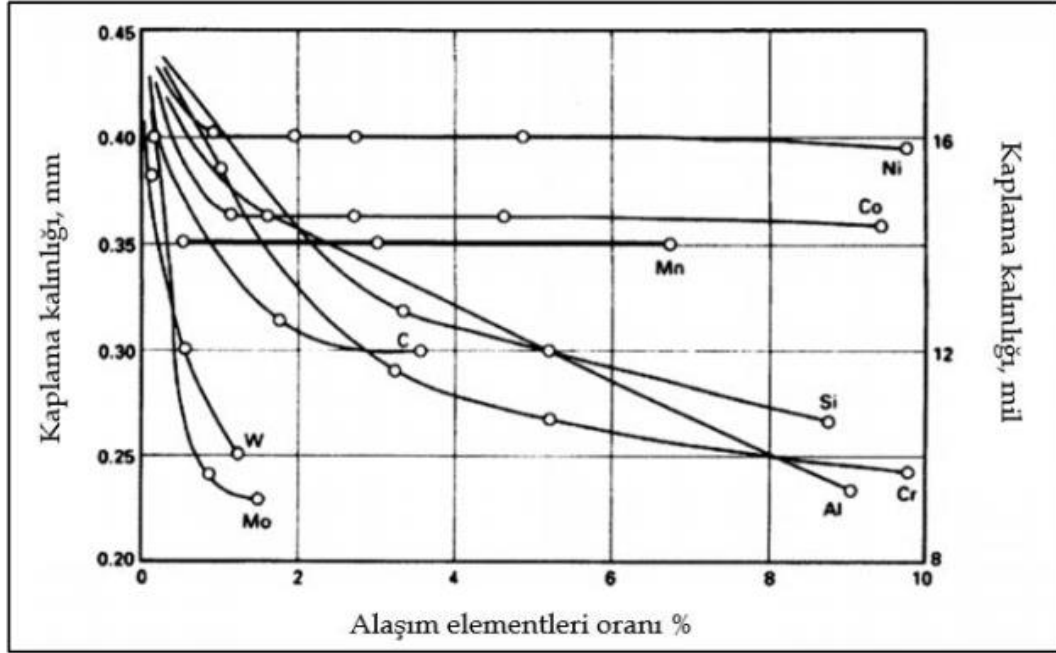
Endüstride tercih edilen borür tabaka tipi genellikle tek fazlı Fe_2B 'dir. Yüksek borlama potansiyeli durumunda ise iki fazlı borür tabakası oluşabilir. Tek fazlı Fe_2B yapısının, çift fazlı $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ yapısına göre daha çok tercih edilme sebeplerinden biri, çift fazlı yapıda FeB ve Fe_2B fazlarının birbirlerine çekme ve basma kuvvetleri uygulamaları sonucunda iki faz arasında yüzeye paralel ve/veya dik istenmeyen çatlakların oluşmasıdır. Ayrıca, tek fazlı (Fe_2B) ve taraksı borür tabakasının ısıtış işlemlere uygunluğu ve Fe_2B fazının FeB fazına göre daha az kırılğan olması da tercih sebepleri arasında bulunur. Fazlar arasında Fe_2B fazına basma gerilmeleri etki ederken, FeB fazına çekme gerilmeleri etki etmektedir. Oluşan çatlaklar nedeniyle eğer yapı termal şok ya da mekanik bir etki altında kalırsa ayrılmalara ve tabaka halinde kalkmalar gözlemlenebilir [23].

3.4.1. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alaşım elementleri, malzemelerin borlama proseslerinde borür tabakası ve geçiş bölgelerinin kristal morfolojisi, konsantrasyon miktarı, tabaka ve geçiş bölgelerinin kalınlıklarının büyümesinde ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir faktördür.

Borlama işlemi ile elde edilen borür yapısının morfolojisi matris içerisinde yer alan alaşım elementlerinin konsantrasyonuna bağlı olarak değişimler sergilemektedir.

Genel olarak alaşım elementlerinin çeliğin borlması sonrasında yapıda oluşan borür tabakası kalınlığına olan etkisini gösteren grafik şekil 3.5’te verilmiştir [3].



Şekil 3.5: Alaşım elementlerinin borlama işlemi sonrasında oluşan borür tabakası kalınlığına etkisi [3].

Karbon, demir borürler içerisinde homojen dağılım sergileyemediklerinden dolayı ana matristen içeri doğru yayılım göstermeye başlamaktadır ve bu durumun bir sonucu olarak bor tabakasının alt bölgelerinde Fe_3C , Cr_3C , Fe_6C_3 faz biçimleri olarak toplandığı bu bölgede, geçiş kısmını olumsuz anlamda değiştirerek sert bir tabaka oluşumunda etken bir faktör olmaktadır. Karbon miktarındaki yükselmeler nedeniyle ortaya çıkan bu sorun, yüzeye ideal oranlarda su verme işlemi uygulanarak, yüksek sertlik değerlerine çıkan tabaka yapısından daha yumuşak özellikte bulunan tarafa doğru istikrarlı bir yönelim sağlamaya başlar. Yapıda bulunan karbon miktarına bağlı olarak demir esaslı malzemelerin borlama sonucu yüzeyinde oluşan testere dişli morfolojik yapı giderek düzleşmeye başlamaktadır. Düşük ve orta karbona sahip çelik malzemelerde ise karbon konsantrasyondaki artış ile iğne şeklinde bir morfoloji ortaya çıkmaktadır.

Krom, çelik malzemeler içerisinde hem derinliğe hem de morfolojiye etki etmesi ile bilinmektedir. Literatür taramasında, bu konu üzerine çalışanlar, krom elementinin bor tabakasında yayılım gösterdiğinde kalınlık miktarının oranını düşürmeye yönelik bir

etkisi olduğundan bahsetmektedirler. Yüksek krom alaşım miktarına sahip çelik malzemelerde ise borlama işlemine takiben oluşan tabakası düz form şeklinde meydana gelmektedir. Bunun sebebi olarak; alaşım elementinin bor tabakasında yer alan demir atomlarının konumlarına yerleşmesine bağlı olarak düz formda oluştuğu açıklanmaktadır. Kromun sahip olduğu atom numarası değeri, demirinkine kıyasla daha düşük oranda bulunmasından dolayı, ana malzeme ile karşılaştırıldığında daha yüksek miktarlarda bor tabakasında çözünme eğilimi içerisinde ve yüzey kısımlarına itilerek difüze olmaktadır. Bor tabakasının göstermiş olduğu sertlik değeri krom kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir, yapıda yer alan Cr miktarı arttıkça bor tabakasının sertliği de artış göstermektedir.

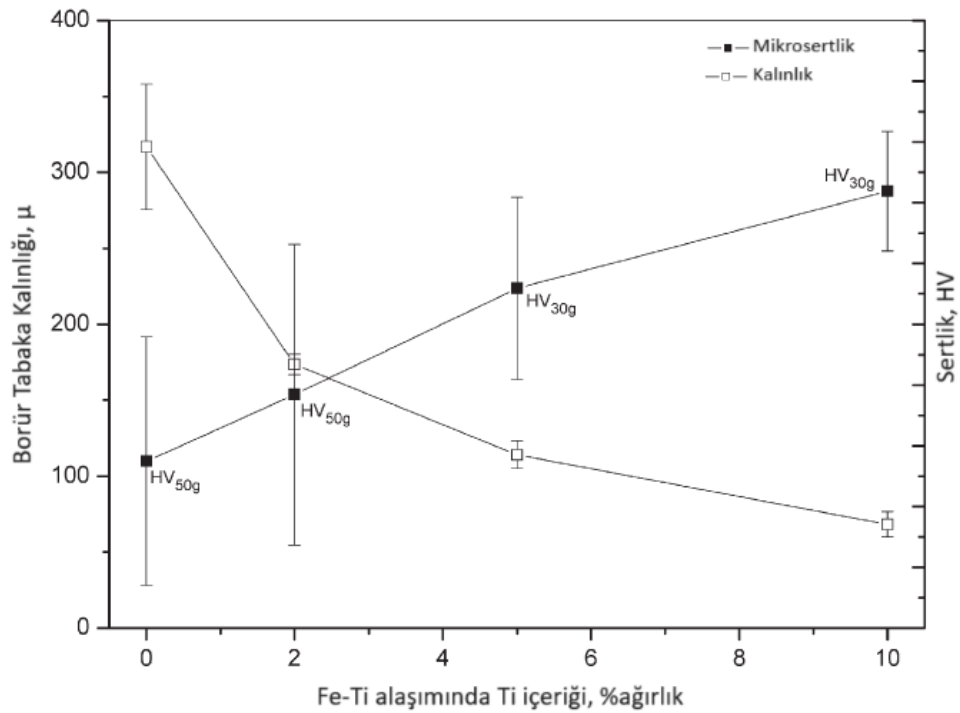
Nikel ise kromun sergilemiş olduğu bu etkilerin tam tersi olarak, geçiş kısımlarında yayılım sağlamaktadır. Nikelin tabaka kalınlık miktarına olan etkisi krom ile kıyaslandığında daha düşük seviyededir. Nikel miktarının artışıyla Fe₂B'nin sertlik değerinde de azalma olmaktadır.

Mangan, krom ile benzer özellik göstererek, yüzey kısımlarında yayılım göstermektedir. Manganın ise borür tabaka kalınlığının sertlik üzerinde negatif etkisi bulunmaktadır ayrıca mangan miktarının yapıda artışına bağlı olarak tabaka yapısı düz bir form haline gelmektedir [25]. Yapılan çalışmalarda, saf demire farklı miktarlarda mangan takviyesi yapıldığında, borlama sonucu oluşan ortalama borür tabaka kalınlığında herhangi bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bununla beraber ağırlıkça %16 Mn içeren Fe-Mn alaşımının yüzeyinde oluşan borür tabakada MnB₂ fazının oluştuğu görülmüştür [26].

Diğer alaşım elementlerine bakıldığında, etkileri yine krom ile benzerlik gösteren molibden, titanyum, tungsten, vanadyum elementleri de tabaka kalınlık oranını düşürmektedirler [31]. Buna örnek olarak, yapılan bir çalışmada alaşım içerisine eklenen Ti ve Nb elementlerinin borür tabaka kalınlığını azaltmaya yönelik etki gösterdiği tespit edilmiştir [31]. Yine benzer şekilde, yapılan başka bir çalışmada da yine alaşıma yapılan Ti ilavesinin borür tabaka kalınlığını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Şekil 3.6'daki grafikte Ti ilavesi ile tespit edilen borür tabaka kalınlığı değişimi gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, borür tabakasının kalınlığı, alaşımdaki Ti içeriği arttıkça, başlangıçta çok dik ve sonrasında kademeli olarak önemli ölçüde azalmaktadır. Bundan dolayı, saf demire düşük miktarda Ti (yaklaşık ağırlıkça %2)

katkısı, yüksek miktarda Ti (ağırlıkça %5-10) katkısına göre oluşan borür tabaka kalınlığını azaltmada daha etkilidir [35].

Ayrıca, saf demire Ti ilavesi ile ve bunun sonucunda yaklaşık 3300HV sertlik değerine sahip TiB_2 çökeltilerinin oluşmasıyla borür kaplama mikro sertliğinin önemli ölçüde arttığı deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür. Yine aynı çalışma sonucunda, saf demir üzerinde oluşan borür tabakasının mikro sertliği yaklaşık 2000HV değerlerine ulaşabilirken, ağırlıkça %10 Ti içeren Fe-Ti alaşımları için yaklaşık 2300HV değerlerine ulaşılabilirdiği görülmüştür [35].



Şekil 3.6: Fe-Ti alaşımındaki Ti katkısının sertlik ve borür tabak kalınlığına etkisi [35].

Yapıya Mo ilavesi ile, borür tabakasında ve geçiş bölgesinde Mo_2FeB_2 çökeltilerinin oluştuğu görülmüştür. Bu çökeltilerin mikrosertlik değerleri yaklaşık olarak 2600 HV ölçülmüştür. Ağırlıkça %2 ve daha fazla Mo içeriğine sahip, borlanmış alaşımlar için Mo_2FeB_2 fazının görülme ihtimalinin çok yüksek olduğundan bahsedilmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmalarda Mo_2FeB_2 fazının FeB ve Fe_2B fazından daha önce oluştuğu gözlemlenmiştir [31].

Vanadyum'un borlama üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için yapılan çalışmalarda farklı miktarlarda vanadyum içeren ikili Fe-V alaşımları hazırlanmış ve hazırlanan bu alaşımlar kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlama işlemi sonucunda, vanadyum ilavesinin borür tabaka kalınlığını azalttığı, bununla beraber bağlı FeB kalınlığını arttırdığı görülmüştür. Altlık malzemeye vanadyum ilavesinin artmasıyla daha pürüzsüz bir arayüzey elde edilmiştir. Söz konusu çalışmada borlama sonrası Fe-V ikili alaşımları yüzeyinde $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}+\text{V}_5\text{B}_6$ fazlarından oluşan borür tabakası ile Fe(V) katı çözeltilisi oluşmuş, ayrıca V_5B_6 çökeltilerinden oluşan geçiş bölgesi olduğu belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, Fe-V ikili alaşımlarında, vanadyum miktarının artması ile çökeltilerin hacminin ve boyutunun da arttığı gözlemlenmiştir. V_5B_6 çökeltilerin mikrosertliği yaklaşık olarak 3000 HV olarak ölçülürken, ana borür katmanlarının mikrosertliği saf demir için 1761 HV ve Fe-V ikili alaşımları için 1724 ile 2445 HV arasında ölçülmüştür [32].

Tabaka ile geçiş kısımlarında konum sağlayarak, yapının sahip olduğu mekanik performanslarına pozitif etki göstererek iyileştirmektedirler. Bu alaşım elementlerinin yapıda bulunması, yapı formunu iğne şeklinden düz bir geometri formuna dönüştürmektedirler. Titanyumun etkisi ise tanelerin büyümesinde, geçiş bölgesine konumlanarak büyümenin gerçekleşmesinin önüne geçmektir [25].

4. BENZER ÇALIŞMALAR

4.1. YEA'larla Yapılan Benzer Çalışmalar

Literatürde YEA'larla ilgili çok kısıtlı sayıda çalışma bulunmasıyla beraber çalışılan alaşımlara yeni element katkılama ve yüzey işlemleri ile ilgili çalışmalar ise yok denecek kadar azdır.

Literatürde raporlanan bir çalışmada CoCrFeNi alaşımına Ti ve Nb gibi refrakter elementlerin katkısının borlama davranışına etkisi incelenmiştir. [31] Çalışma sonucunda yapılan XRD analizlerinde borür katmanlarının Ni_2Si , FeB, Fe_2B , Co_2B ve Cr_5B_3 fazlarını içerdiği gözlemlenmiştir. Bununla beraber CoCrFeNiTi ve CoCrFeNiNb alaşımlarında sırasıyla TiB_2 ve NbB_2 fazları tespit edilmiştir. Alaşımların içeriğindeki Ti ve Nb elementlerinin katkısı, CoCrFeNi, CoCrFeNiTi ve CoCrFeNiNb için sırasıyla 70 μm , 7 μm ve 4,3 μm olarak ölçülen borür tabakası kalınlığında azalmaya neden olmuştur. Borür tabakası ve Si atomlarına yakın yerde biriken Si atomları altlıklara aktarılmış ve dolayısıyla borür tabakasının Si atomlarının geçişini engellediği anlaşılmıştır. Ayrıca, altlık malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının yüzey morfolojisinin de pürüzsüz olduğu gözlemlenmiştir [31].

Literatürdeki diğer bir çalışmada ise CoCrFeNi YEA'larının mukavemetini ve dayanıklılığını artıran mekanizmaları ortaya çıkarmak amaçlanmış ve kaplama işlemi için yüksek hızlı lazer kaplama işlemi kullanılmıştır. [28] Söz konusu bu çalışmada Ti, Nb ve Zr katkılarının kaplama faz yapısı, mikro yapı, element dağılımı, mikrosertlik, çekme özellikleri, tribolojik performans ve elektrokimyasal korozyon direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, Ti'nin kendi YMK yapısını koruyarak CoCrFeNi matrisi içerisinde çözünürlük olarak en yüksek afiniteye sahip olduğu görülmüştür. Buna karşılık, Nb ve Zr'nin çözünürlüğü azalmış olup, bu durum HMK fazlarının ve intermetalik bileşikler ortaya çıkarmıştır. YEA'ya Zr'nin dahil edilmesi, interdendritik bölgelerde çok sayıda $\text{Ni}_{11}\text{Zr}_9$ intermetalik bileşiğinin oluşmasına neden olmuş ve hem sünekliği hem de korozyon direncini önemli ölçüde bozmuştur [28].

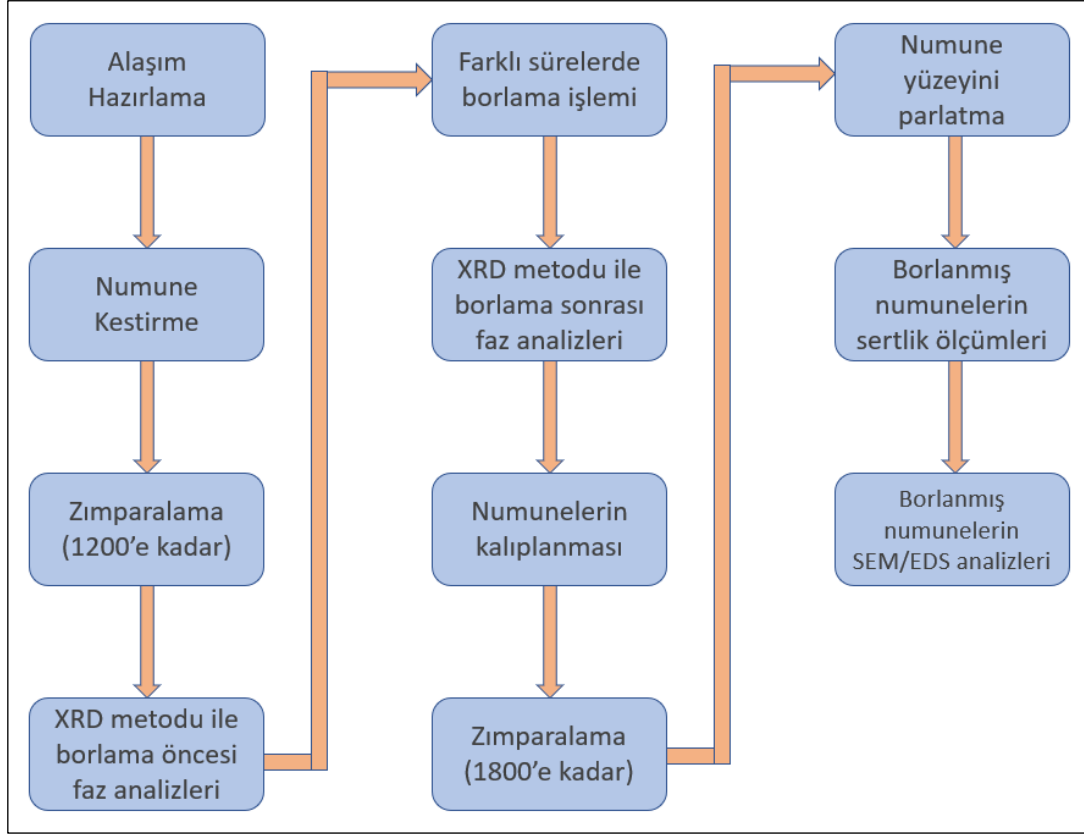
Literatürdeki başka bir çalışmada ise, CoCrFeNi alaşımına uygulanan nitrasyon işlemi sonucunda YEA'nın karakterizasyonu ve tribokorozyon davranışları incelenmiştir. [29] Bu çalışmada, ark eritme yoluyla üretilen plazma nitrülenmiş orta entropili CoCrFeNi

alaşımının mikro yapısı ve oluşum mekanizması, hem işlenmemiş hem de nitrürlenmiş alaşımın tribokorozyon davranışı ile birlikte araştırılmıştır. Nitrürlenmiş alaşımda CrN ve genleşmiş YMK'nın varlığı açıkça gözlenmiştir. Nitrür tabakası kalınlığı yaklaşık 27 μm ($\pm 5,3 \mu\text{m}$) olarak ölçülmüştür. Tribokorozyon sonuçları, nitrürlenmiş alaşımın, işlenmemiş alaşımla karşılaştırıldığında hem korozyona hem de erozyona karşı üstün bir direnç gösterdiğini kesin olarak göstermiştir. Rockwell girinti testlerinden elde edilen bulgular ise, nitrür tabakası ile alt tabaka arasındaki yapışmanın oldukça güçlü olduğunu doğrulamıştır [29].

Literatürde bulunan bir diğer çalışmada, ark ergitme yöntemiyle atomik olarak eşit miktarda element içeren AlCoCrFeNi alaşım numuneleri, 800°C, 900°C, 1000°C, 1100°C sıcaklıklarında, Ekabor-II bor tozu kullanılarak 3, 6 ve 9 saat süresince kutu borlama tekniği ile borlanmıştır. Borlanan YEA'ların SEM mikroyapısı, faz içeriği, mikrosertliği ve kimyasal kompozisyonu, X-Işınları kırınımı, SEM'i, SEM-EDS ve Vickers mikrosertlik ölçümü ile karakterize edilmiştir. Çalışma sonucunda, borlanan tüm numunelerin yüzeyinde FeB ve Fe₂B fazlarının ve bu fazlara ilave olarak borlama süresine bağlı olmaksızın 800°C'de Al₇₅Fe₂₅ ve Fe_{4,5}Ni_{18,5}B₆, 900°C'de Fe_{4,5}Ni_{18,5}B₆ ve AlB₂, 1000°C'de CrB ve AlB₂, 1100°C'de ise Co₂B ve Cr₅B₃ fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Yapılan borlama işlemi sonucunda Fe, Co ve Ni'in borür tabakasında, Cr ve Al'un matris bölgesinde, geçiş bölgesinde ise Si, Cr ve Fe elementlerinin yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Co elementinin borür tabakasından altlığa doğru gidildikçe arttığı belirlenmiştir. Oluşan borür tabakası tipik testere dişi morfolojisine sahip olduğu ve borlama şartlarına bağlı olarak geçiş bölgesinde testere dişi şeklindeki ara yüzey yapısı, daha düz bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bununla beraber, borür tabaka kalınlığının artan sıcaklık ve borlama süresi arttığı gözlemlenmiştir. Yine, artan borlama sıcaklığı ve borlama süresi ile altlık bölge sertliğinin azaldığı görülmüştür. 1100°C'de artan süre ile numunenin tamamına yakınının bor esaslı bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir [12].

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmaların akış şeması Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Deneysel çalışma akış şeması.

Öncelikle, farklı oranlarda Zr içeren CoCrFeNi alaşımları ark ergitme yöntemi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan ingot numuneler, deneysel çalışma için uygun ölçülere getirilmek üzere tel erozyon yöntemi ile kesilmiştir. Gerekli miktarlarda hazırlanan numuneler, borlama işlemi öncesinde XRD metodu ile faz analizleri yapılmak üzere 1200 numara zımparaya kadar zımparalanarak analiz için uygun hale getirilmiştir. Faz analizleri tamamlanan altlık numuneler, XRD analizi sonrasında farklı sürelerde, sabit 900°C sıcaklıkta borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama sonrasında tekrar XRD analizi ile faz analizleri yapılmış ve akabinde numuneler reçine kullanılarak kalıplanmıştır. Kalıplanmış numunelerin yüzeyleri, sertlik ölçümleri ve SEM/EDS analizleri için 1800 kum değerine kadar zımparalanmış ve sonrasında parlatma işlemi

yapılmıştır. Numuneler üzerinden sertlik ölçümleri ve SEM/EDS analizleri yapılarak da deneysel çalışma tamamlanmıştır.

5.1. Altlık Malzemenin Hazırlanması

Yüksek Entropili CoCrFeNi alaşımlarını hazırlamak için Alfa Aesar firmasından %99,9 saflıkta Co, %99 saflıkta Cr, %99,97 saflıkta Fe, %99,9 saflıkta Ni parçacıkları ve %99,9 saflıkta Zr plaka olarak temin edilmiştir. Hazırlanacak alaşımda bu metaller atomik olarak eşit olacak şekilde ağırlıkları hesaplanmıştır. Atomik olarak eşit miktarda Co, Cr, Fe, Ni içeren karışıma farklı oranlarda Zr da içerecek şekilde farklı CoCrFeNiZr YEA'ları için gerekli miktarlar belirlenmiştir. Hazırlanan YEA'lar Tablo 5.1'de gösterildiği gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 5.1: Hazırlanan YEA'larda kullanılan elementlerin atomik % miktarları.

Alaşım	Alaşım elementi ve miktarları (%at.)					
	Co	Cr	Fe	Ni	Zr	Toplam
CoCrFeNiZr0	25,53	24,53	25,46	24,48	0,00	100
CoCrFeNiZr0.1	24,36	24,78	24,36	23,83	2,67	100
CoCrFeNiZr0.2	23,50	24,29	23,68	23,81	4,72	100
CoCrFeNiZr0.5	21,75	22,94	22,16	21,50	11,65	100

Her bir YEA için Tablo 5.1'de belirtilen miktarlar Sartorius marka hassas terazide tartılarak karıştırılmıştır.

Hazırlanan karışımlar, Edmund Bühler marka Arc Melter AM modeli su soğutmalı ark ergitme fırınındaki su soğutmalı bakır kalıp üzerindeki bölmelere yerleştirildi. Cihazın vakum odası kapatıldı ve sahip olduğu yüksek vakum pompası çalıştırılarak vakum seviyesi 4×10^{-6} bar değerine ulaşılan kadar vakuma alındı. Vakuma alma işlemi bittikten sonra vakum haznesinin basıncı 750 mbar değerine ulaşana kadar argon gazı ile doldurularak ergime işlemine hazır hale getirildi ve 500 A akım şiddeti uygulanarak ergitildi. Alaşımı oluşturan elementlerin homojen karıştığından emin olmak için ark ergitme işlemi 10 dakika boyunca devam ettirildi.

İşlem sonunda her bir farklı alaşımdan yaklaşık 4cm x 1cm x 1cm ölçülerinde ingotlar hazırlanmıştır.

Ark ergitme yöntemi ile hazırlanan CoCrFeNiZr alaşımları, Isomet1000 marka hassas kesme cihazında kesilmek suretiyle dilimlenerek, farklı kompozisyonlardaki CoCrFeNiZr alaşım numunelerinden 4'er adet hazırlanmıştır. Hazırlanan numune boyutları yaklaşık 5 mm. x 5 mm. x 10 mm. olarak ölçülmüştür.

Dilimlenen numuneler sırasıyla 160 – 200 – 240 – 320 – 400 – 600 – 800 – 1000 ve 1200 numara SiC zımparalar kullanılarak sulu ortamda zımparalanmıştır.

Zımparalama işlemi sonrasında, her bir numune önce su daha sonra alkol ile yıkanarak sıcak hava ile kurutulmuşlardır.

5.2. Borlama İşlemi

Farklı oranlarda Zr içeren CoCrFeNiZr numuneler kutu borlama tekniği ile borlanmıştır.

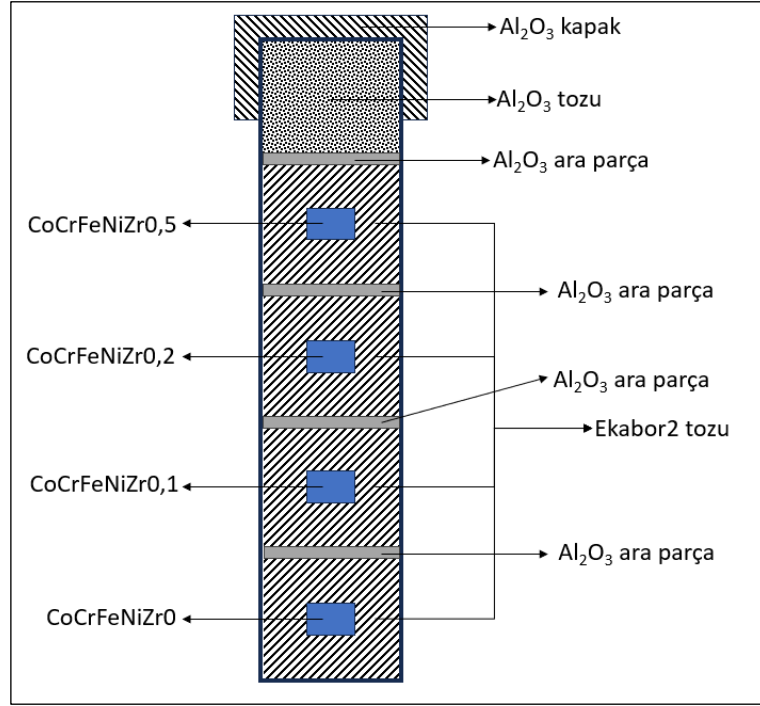
Borlama işlemi, 1200 °C sıcaklığa kadar çıkabilen dijital kontrollü Magma Therm marka kutu fırında (Şekil 5.3), alümina pota içerisinde Ekabor2 tozu kullanılarak yapılmıştır. Borlama tozu olarak kullanılan bazı Ekabor ürünlerinin özellikleri tablo 5.2'de verilmiştir [3].

Tablo 5.2: Bazı Ekabor ürünlerinin özellikleri [3].

Borlama ürünü	Tane Boyutu (µm)	Yoğunluk (gr/cm3)	Özellik
Ekabor 1	<150	1.90	Yüzey kalitesi en yüksek tabaka için birlikte bağlanmaya eğilimli
Ekabor 2	<850	1.70	Mükemmel yüzey kalitesi; işlem sonrası parçalardan kolaylıkla ayrılma
Ekabor 3	<1400	0.95	Çok iyi yüzey kalitesi, işlem sonrası toz akıcılığı daha iyi.
Ekabor HM	<150	0.95	Çok iyi yüzey kalitesi, sert metal, küçük delik ve kalın tabakalar için

Kullanılan ticari Ekabor2 tozunun kimyasal bileşimi %5 B₄C %90 SiC %5 Ekrit şeklindedir [30].

Hazırlanan altlık malzemeler, alümina pota içerisinde bulunan Ekabor2 tozuna gömülüp numuneler arasındaki belirli mesafelere de alümina parçalar yerleştirilmiştir. Oksitlenmeyi önlemek amacıyla Ekabor2 tozunun en üst kısmı alümina tozu ile kaplanmış ve sonrasında potanın üst kısmı da alümina kapak ile sıkıca kapatılmıştır. 3 farklı çalışma süresi için 3 ayrı pota hazırlanmıştır. Numunelerin yerleştirildiği potanın şematik gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2: Numunelerin Ekabor2 tozu içeren potaya yerleşimini gösteren şematik resim.

Numunelerin hazırlandığı potalar, sırasıyla kutu fırına (**Şekil 5.3**) yerleştirildikten sonra 5 °C/dk. ısıtma hızıyla 900 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Hazırlanan birinci pota, 900 °C sabit sıcaklıkta 75 dk. borlama işlemine tabi tutulmuştur. İkinci pota 150 dk. ve üçüncü pota 300 dk. 900 °C’de bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3: Borlama işleminin yapıldığı Magma Therm kutu fırın ve borlanacak numuneleri içeren alümina pota

Her bir süredeki borlama işlemi tamamlandıktan sonra fırın kapatılarak kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Fırın sıcaklığı 100°C 'ye geldiğinde borlanmış numuneleri içeren potalar fırından çıkartılmıştır.

Potalar oda sıcaklığına geldiğinde borlanmış numuneler, potadan karışmayacak şekilde tek tek çıkartılmıştır. Numunelerin üzerine yapışması muhtemel tozlar, borlama tabakasına zarar vermeyecek şekilde mekanik olarak temizlenmiş ve sonrasında alkol ile yıkanarak sıcak hava ile kurutulmuştur.

Böylece, 900°C sabit sıcaklıkta, Zr içermeyen (CoCrFeNiZr0) ve atomik olarak %2.67 (CoCrFeNiZr0.1), %4.72 (CoCrFeNiZr0.2) ve %11.65 (CoCrFeNiZr0.5) Zr içeren oranlarda, 75dk, 150dk ve 300dk olmak üzere üç farklı sürede borlanmış, toplamda 12 farklı CoCrFeNiZr numuneleri hazırlanmıştır.

5.3. Karakterizasyon

5.3.1. XRD Analizi

Borlama işlemi öncesinde numunelerin yüzeylerindeki fazları belirlemek amacıyla XRD analizi Brukers D8 (40 kW, 40 mA) marka cihaz yardımı ile Cu-K α radyasyon altında 20° ile 100° arasında, 2°/dk ile taranarak yapılmıştır. Tespit edilen fazlar, analiz sonrasındaki pikler ile veri tabanı ile eşleştirilerek belirlenmiştir.

5.3.2 Numunelerin Kesit Karakterizasyonu İçin Hazırlanması

Borlama işlemi sonrasında, numuneler kesitleri ortaya çıkacak şekilde önce kaba zımparalama ve sonrasında da ince zımparalama ile çapaklardan arındırılmıştır.

Hazırlanan numuneler polimer malzemeden yapılmış kalıplara, kesitleri alt tarafa bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerin kalıp içerisinden rahat çıkmasını sağlamak amacıyla kenarlarına vazelin sürülen kalıba reçine ve sertleştirici karışımı dökülerek 24 saat bekletilmiş ve sertleşmesi sağlanmıştır. Yeterli sertlik sağlandıktan sonra kalıp içerisinden çıkartılan numuneler sırasıyla 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 1800 numaralı SiC zımpara kağıtları kullanılarak Struers LaboPol-5 (Şekil 5.4.) marka cihaz ile sulu zımpara yapılarak aşındırılmıştır. Sonrasında içerisinde 1 µm boyutlarında alümina tozu bulunan süspansiyon kullanılarak kesitleri açığa çıkmış numuneler parlatılmıştır. Parlatılmış numuneler su ve alkol ile yıkanarak temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutularak analize hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.4: Struers Labopol-5 zımpara ve parlatma cihazı.

5.3.3. SEM ve SEM-EDS Analizi

Borlanmış ve metalografik olarak hazırlanmış numunelerin mikroyapı analizleri Philips XL30 FEG marka SEM ile SED ve BSED detektörleri kullanılarak yapılmıştır.

(Şekil 5.5). SEM, borlanan numunelerin kesitten mikroyapısını incelemenin yanında, kaplama kalınlığını belirlemek ve oluşturulan mikrosertlik izlerinin boyutlarını ölçmek amacıyla kullanılmıştır. SEM altında incelenen numunelerin farklı büyütmelerde resimleri alınmıştır.



Şekil 5.5: Philips XL30 FEG marka SEM cihazı.

Borlanmış numunelerin yüzeyindeki kaplama tabakasının elementel analizi Philips XL30 FEG marka SEM cihazına bağlı enerji dağılım spektroskopisi dedektörü (EDS) kullanılarak yapılmıştır.

SEM-EDS analizi, borlama işlemi sonrasında kaplama içinde ve kaplama – matris arayüzündeki yapıların kimyasal bileşimlerini ve elementlerin atomik dağılımlarını tespit etmek için yapılmaktadır. Bu amaçla, SEM-EDS analizinde, numunenin kaplama, geçiş ve matrise yakın bölgelerinde özellikle borürlere benzer yapılar seçilerek nokta analizler yapılmıştır.

5.3.4. Kaplama Kalınlığı Belirleme

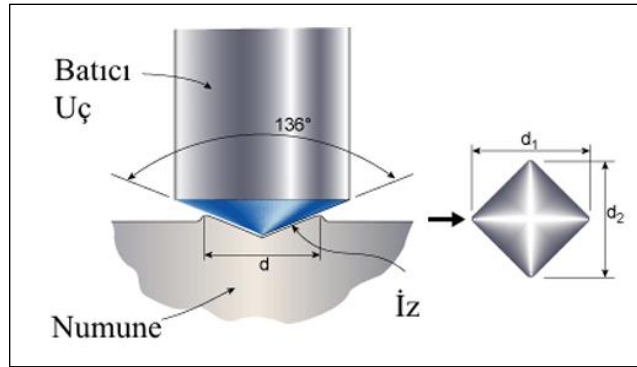
Borlanmış numuneler üzerindeki kaplama kalınlığı ölçümleri Philips XL30 FEG marka SEM cihazı kullanılarak alınan görüntüler üzerinden yapılmıştır. Her bir numune üzerindeki kaplamanın belirgin olduğu bölümlerden görüntüler alınmıştır. Farklı bölgelerden alınan görüntüler üzerinden en az 10 farklı ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalamaları alınmış ve kaplama kalınlıkları hesaplanmıştır.

5.3.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Reçine içerisine gömülerek hazırlanan borlanmış numunelerin mikrosertlik ölçümlerini yapmak için Mitutoyo HM-200 sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Numunelerin her birine 30gr. sabit yük, 10-15sn. süre ile uygulanarak kaplama yüzeyinden altlık malzemesine doğru kademeli olarak farklı bölgelerde Vickers sertlik izleri (Şekil 5.6.) oluşturulmuştur.

Oluşturulan izlerin köşegen ölçüleri SEM incelemesi sırasında elde edilen görüntüler üzerinden alınmıştır. Her bir numune üzerine en az 10 adet sertlik izi oluşturulmuş ve her bir ize göre hesaplanan sertlik değerlerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Vickers mikrosertlik ölçme yöntemi tabanı kare olan elmas piramit batıcı uç kullanılarak, malzemeye göre seçilen yük altında belirli bir süre bastırılması ile oluşan izin köşegen uzunluklarının ölçülerek hesaplanmasına dayanmaktadır [3].



Şekil 5.6: Vickers sertlik ucu ile oluşturulan izin şematik gösterimi [2].

Vickers sertlik değeri (VSD) hesaplaması için aşağıdaki eşitlik 5.1 kullanılmıştır;

$$\text{VSD} = 1,854 \cdot P/d^2 \quad [2] \text{ (5.1)}$$

Bu eşitlikte;

P : Uygulanan yük (kgf)

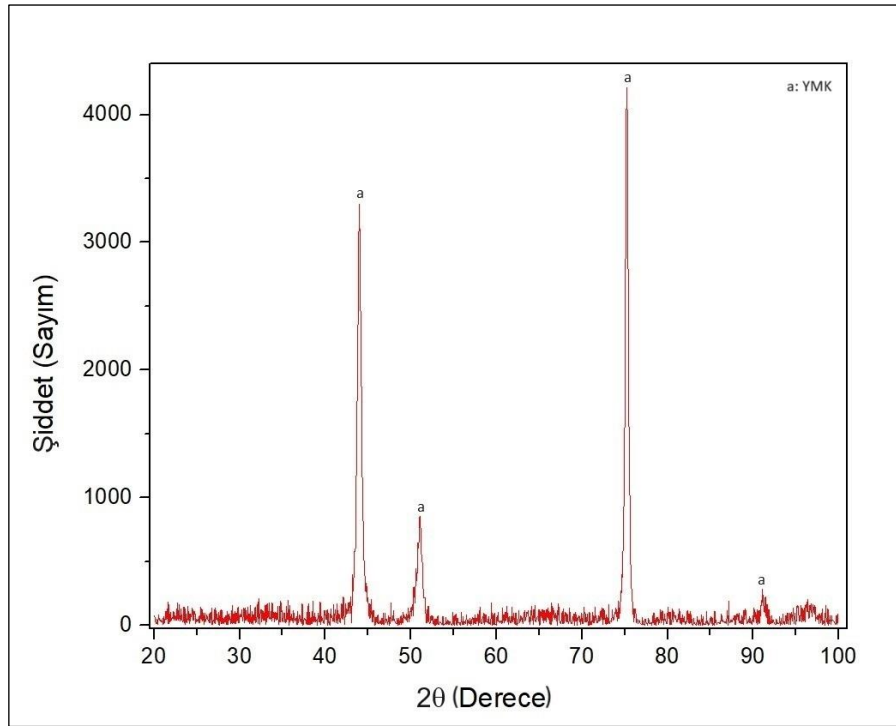
d: Köşegen uzunluğu $[(d_1+d_2)/2]$

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. XRD Analizi Sonuçları

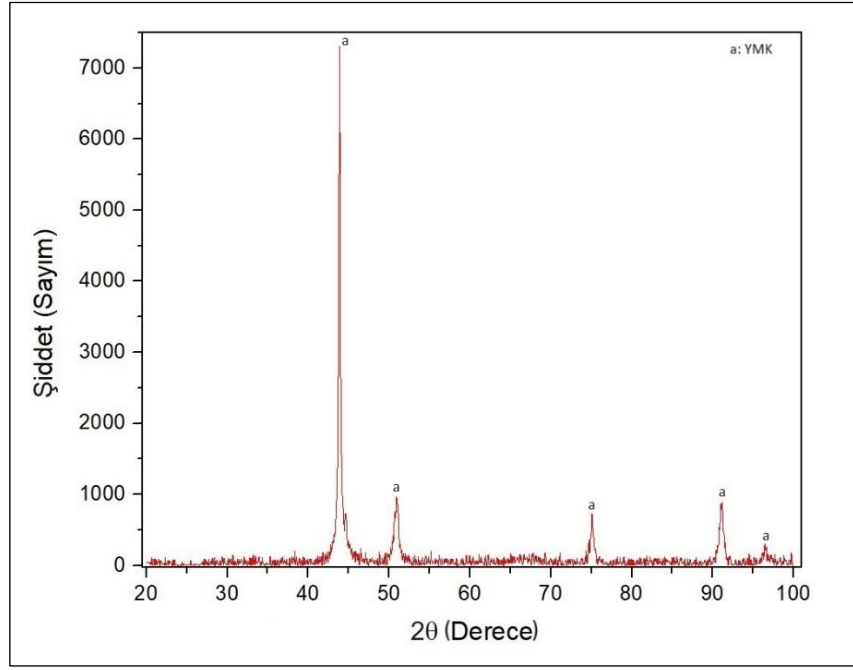
6.1.1. Borlanmamış Numuneler

Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren altlık olarak kullanılacak CoCrFeNi YEA numunelerine borlama işlemi öncesi yapılan XRD analizleri sonucunda elde edilen XRD desenleri Şekil 6.1 – 6.4’te gösterilmiştir.



Şekil 6.1.: CoCrFeNi YEA’nın borlama öncesi XRD deseni.

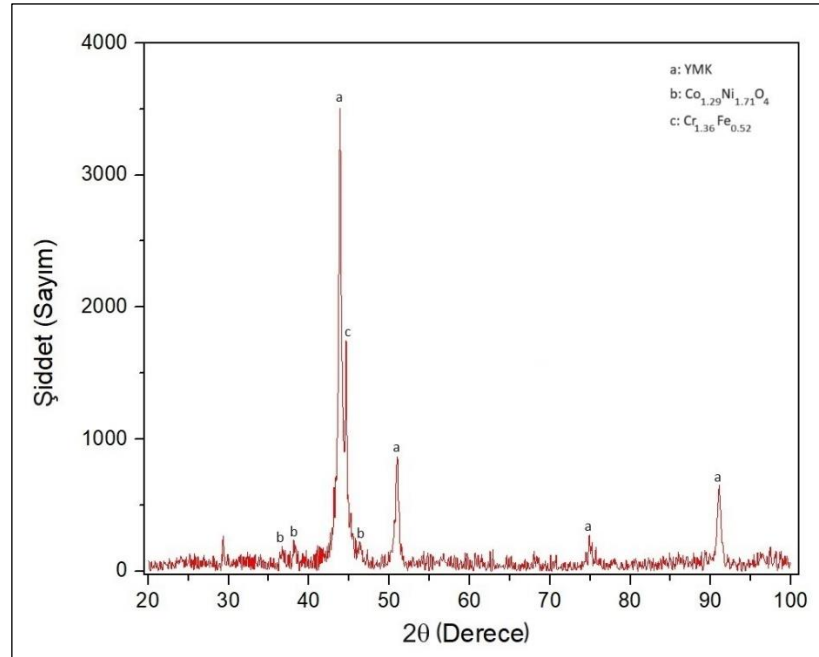
Zr içermeyen CoCrFeNi alaşımının borlama öncesindeki XRD deseni incelendiğinde, oluşan pikler, YEA’nın tek fazlı YMK yapıda olduğunu göstermektedir (Şekil 6.1) CoCrFeNiZr0.1 YEA’ya borlama işlemi öncesinde elde edilen XRD deseni Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.

CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama öncesindeki XRD desenindeki pikler, YEA'nın tek fazlı YMK yapıda olduğunu göstermektedir.

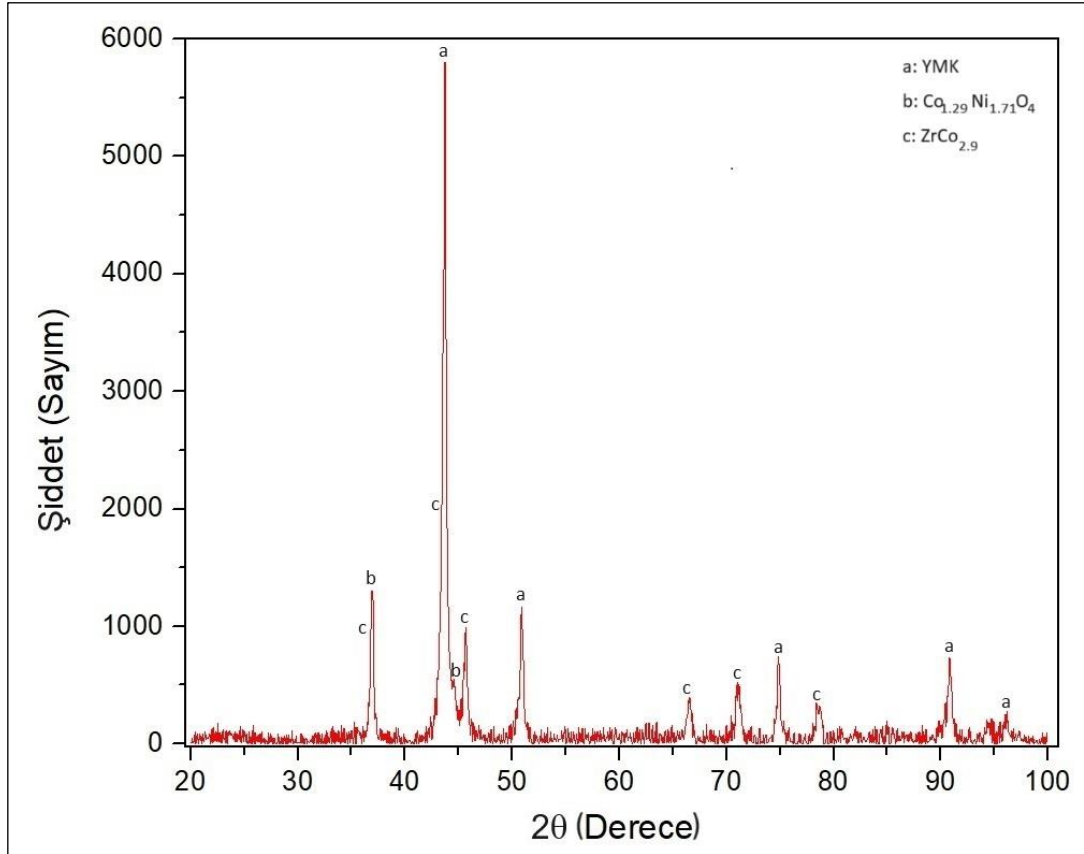
CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama işlemi öncesinde elde edilen XRD deseni Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3: CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.

CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama öncesindeki XRD desenindeki pikler ilgili veri tabanı ile ve benzer çalışmalardan elde edilen veriler ile eşleştirildiğinde, YMK yapıdaki katı ergiyik ile birlikte $\text{Co}_{1.29}\text{Ni}_{1.71}\text{O}_4$ ve $\text{Cr}_{1.36}\text{Fe}_{0.52}$ fazlarının da bu numunede olduğu anlaşılmaktadır.

CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama işlemi öncesinde yapılan XRD analizleri sonuçları Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

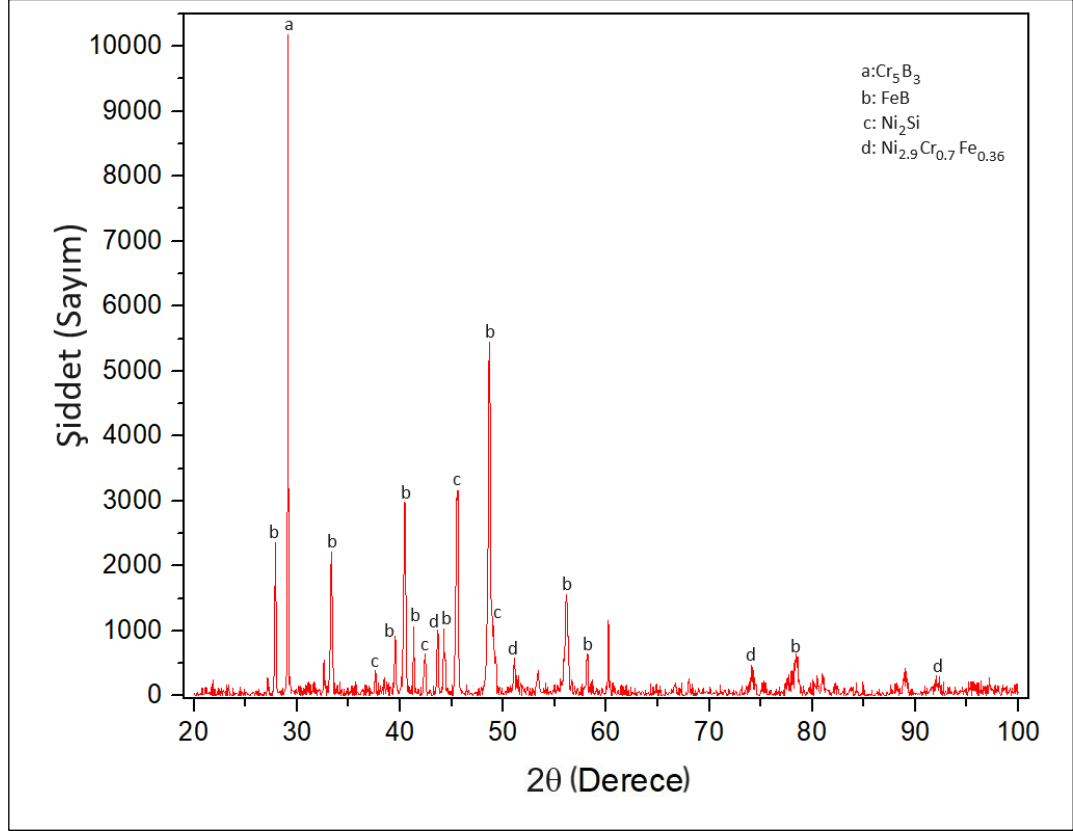


Şekil 6.4: CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama öncesi XRD deseni.

%0.5 Zr içeren CoCrFeNiZr alaşımının borlama öncesindeki XRD deseni, CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama öncesi XRD desenindeki pikler ile veri tabanındaki fazlar ve literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilen veriler ile eşleştirildiğinde bu alaşımda YMK yapıdaki katı ergiyik ile birlikte yine $\text{Co}_{1.29}\text{Ni}_{1.71}\text{O}_4$ olduğu ve ayrıca yaklaşık %at.12 Zr içeren bu alaşımda $\text{ZrCo}_{2.9}$ fazının olduğu da anlaşılmaktadır.

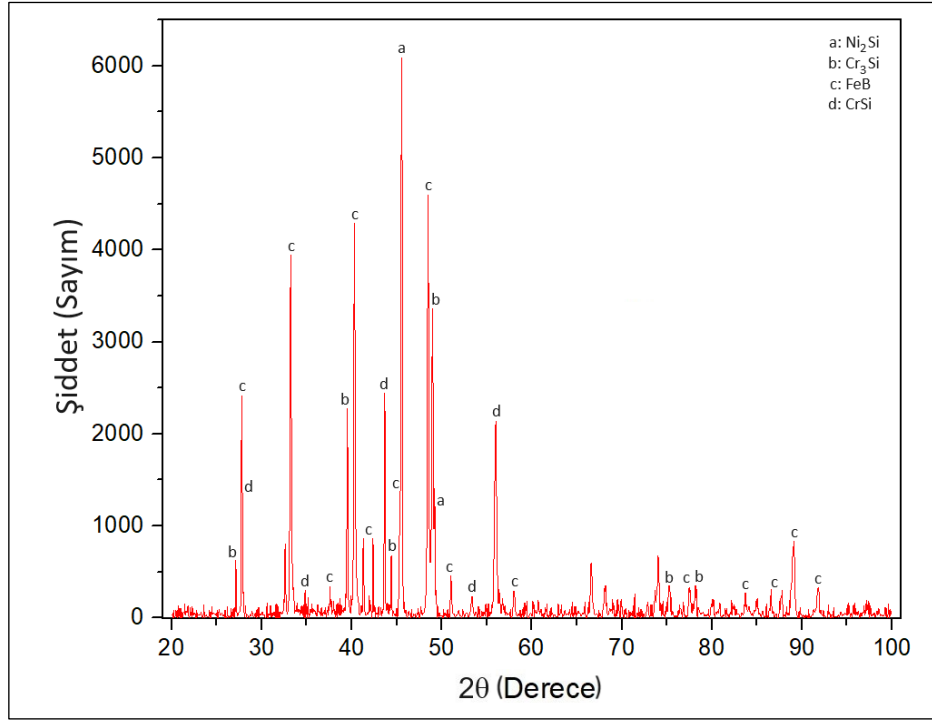
6.1.2. Borlanmış Numuneler

Farklı oranlarda Zr içeren ve Zr içermeyen CoCrFeNi YEA'nın 900°C sıcaklıkta ve farklı sürelerde borlanması sonrasında yapılan XRD analizinden elde edilen XRD desenleri Şekil 6.5 – 6.8'de verilmiştir.

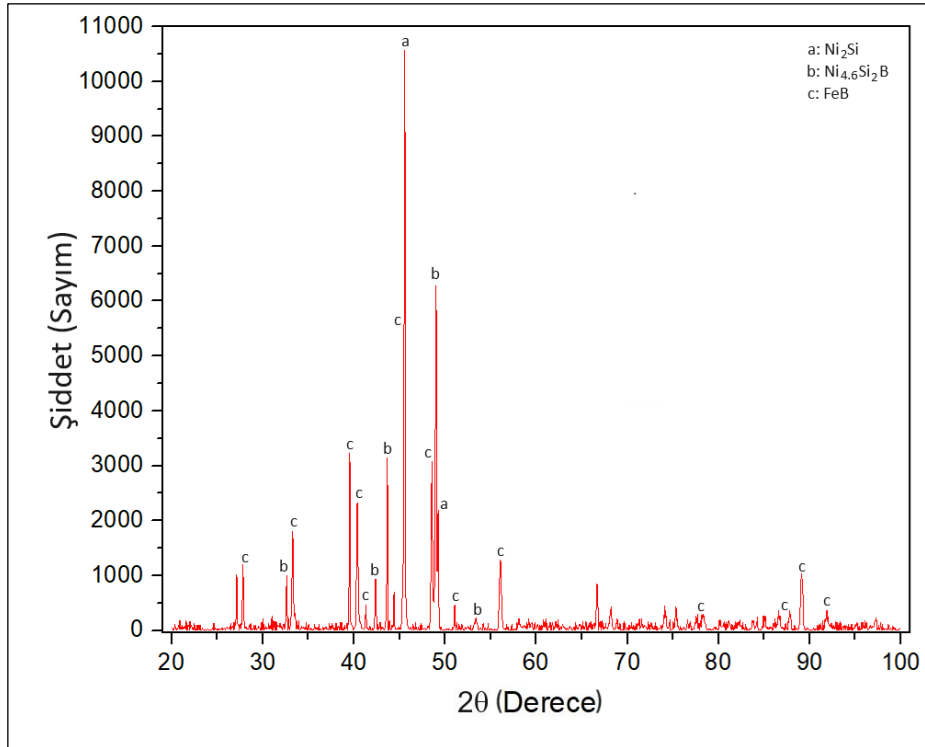


(a)

Şekil 6.5: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi alaşımının yüzeyinden elde edilen XRD desenleri; a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.



(b)



(c)

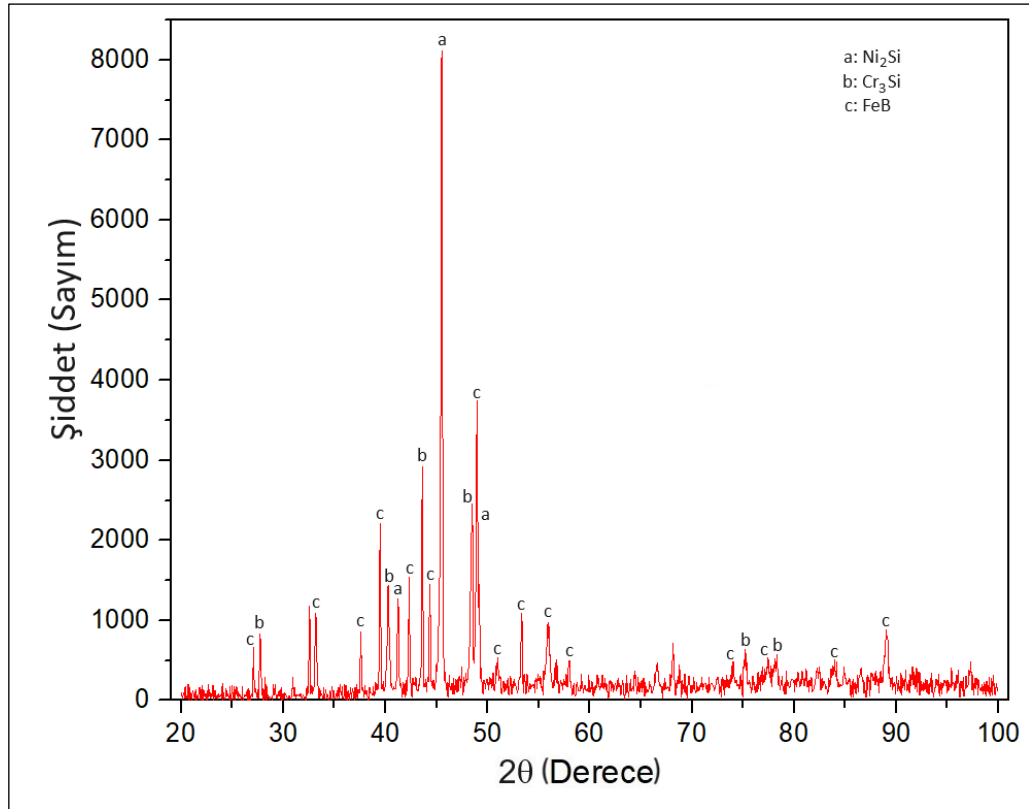
Şekil 6.5 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi alaşımlarının yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.

900°C sıcaklıkta 75dk, 150dk. ve 300dk sürelerde borlama işlemine tabi tutulan Zr içermeyen CoCrFeNi YEA'nın yüzeyinden yapılan XRD analizi sonucu elde edilen XRD desenleri Şekil 6.5'de verilmiştir. Bu XRD desenlerinde oluşan pikler, ilgili veri tabanı ile eşleştirildiğinde her üç borlama süresi sonucunda da FeB ve Ni₂Si fazlarının oluştuğu görülmektedir.

Bu fazlara ilaveten, 75dk borlanan numunenin yüzeyinde Cr₅B₃ ve Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36} fazlarının da oluştuğu açıkça görülmektedir (Şekil 6.5a).

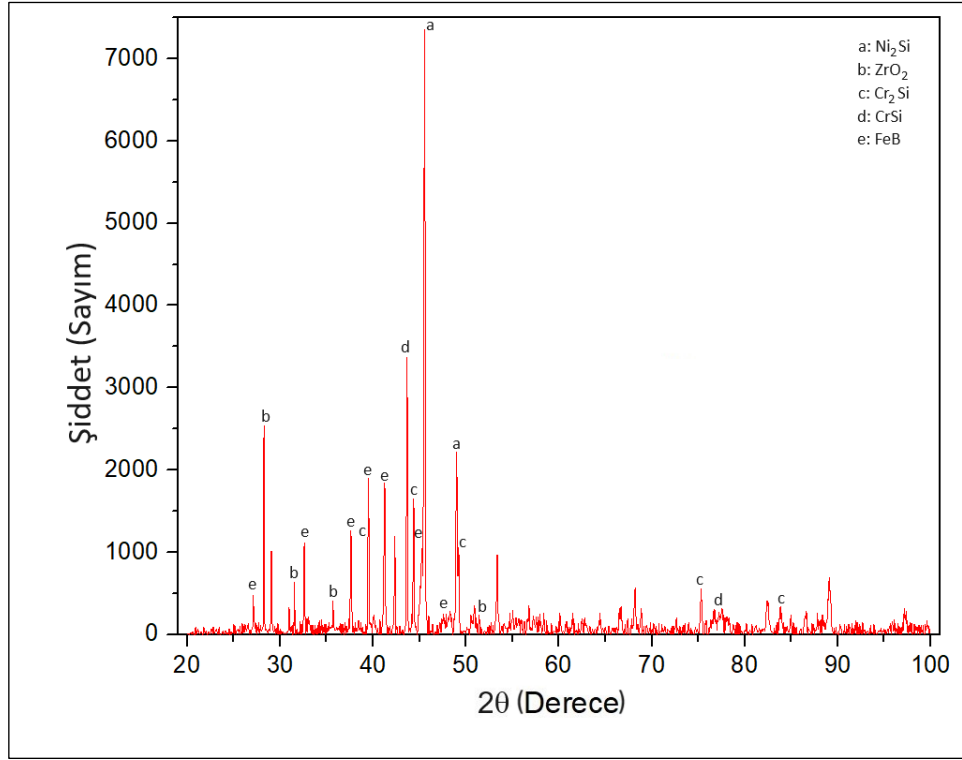
150dk borlama işlemine tabi Zr içermeyen CoCrFeNi YEA'nın yüzeyinde ilgili veri tabanındaki eşleştirme sonucu FeB ve Ni₂Si fazlarının da oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.5b).

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise FeB ve Ni₂Si fazlarının yanında ayrıca Ni_{4.6}Si₂B fazının da oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.5c).

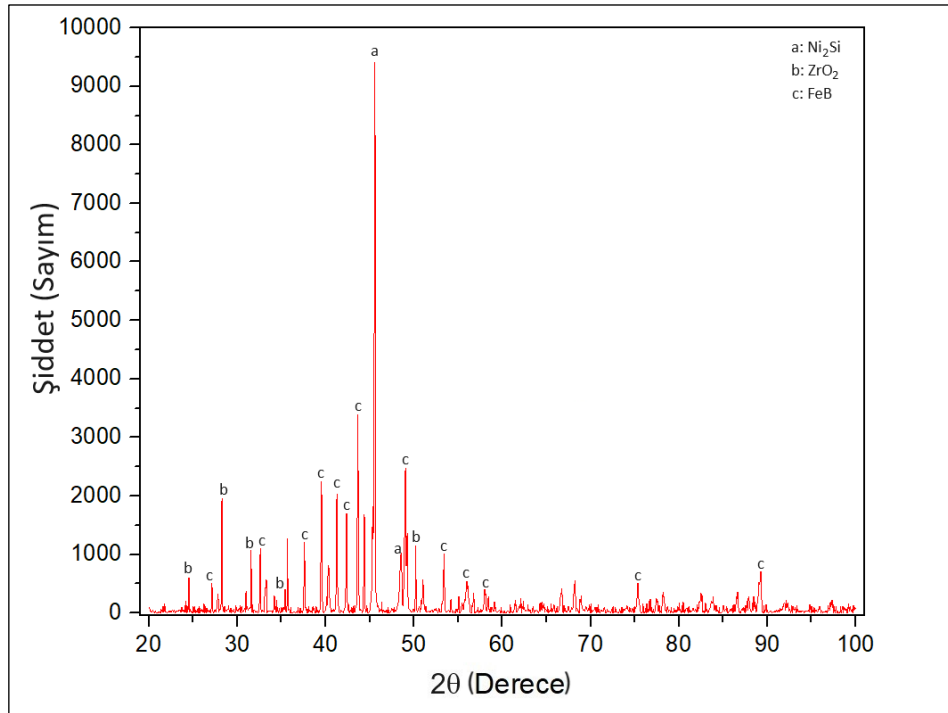


(a)

Şekil 6.6: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr_{0.1} YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.



(b)



(c)

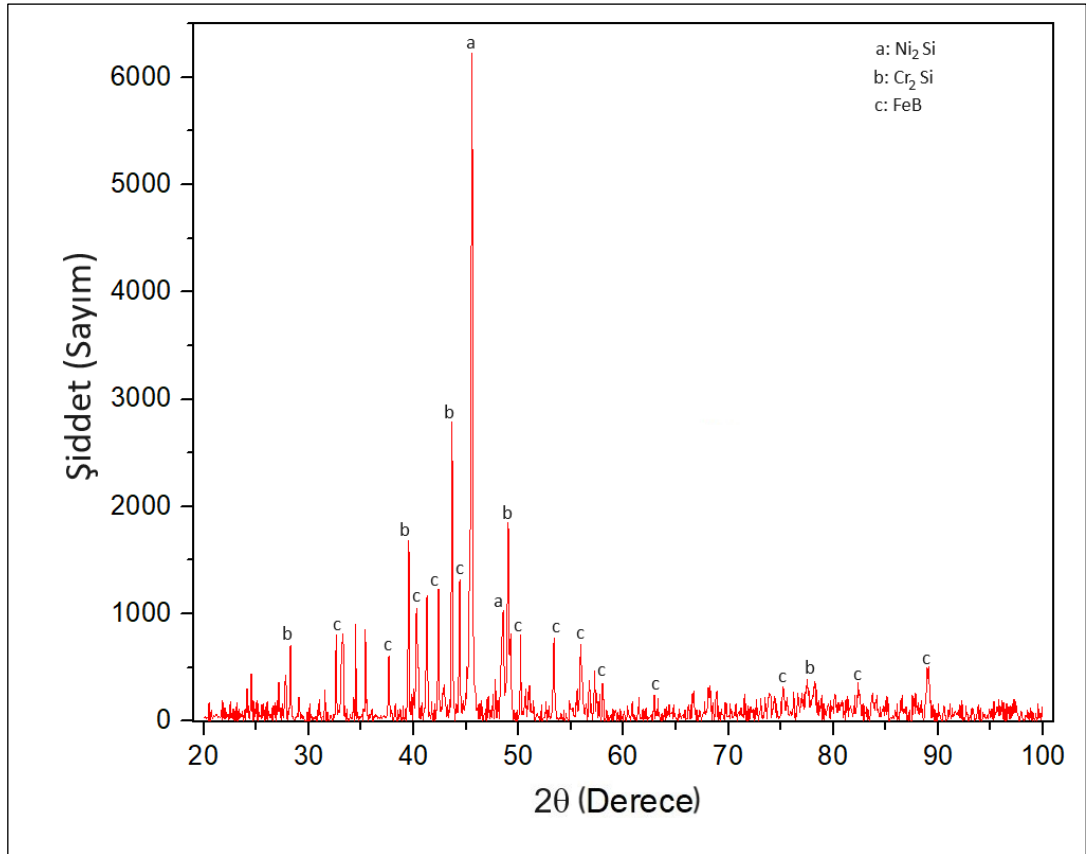
Şekil 6.6 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr_{0.1} YEA’nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.

900°C sıcaklıkta 75dk, 150dk. ve 300dk sürelerde borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın yüzeyinden yapılan XRD analizi sonucu elde edilen XRD desenleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Bu XRD desenlerinde oluşan pikler, ilgili veri tabanı ile eşleştirildiğinde her üç borlama süresi sonucunda da FeB ve Ni₂Si fazlarının oluştuğu görülmektedir.

Bu fazlara ilaveten, 75dk borlanan numunenin yüzeyinde Cr₃Si fazının da oluştuğu açıkça görülmektedir (Şekil 6.6a).

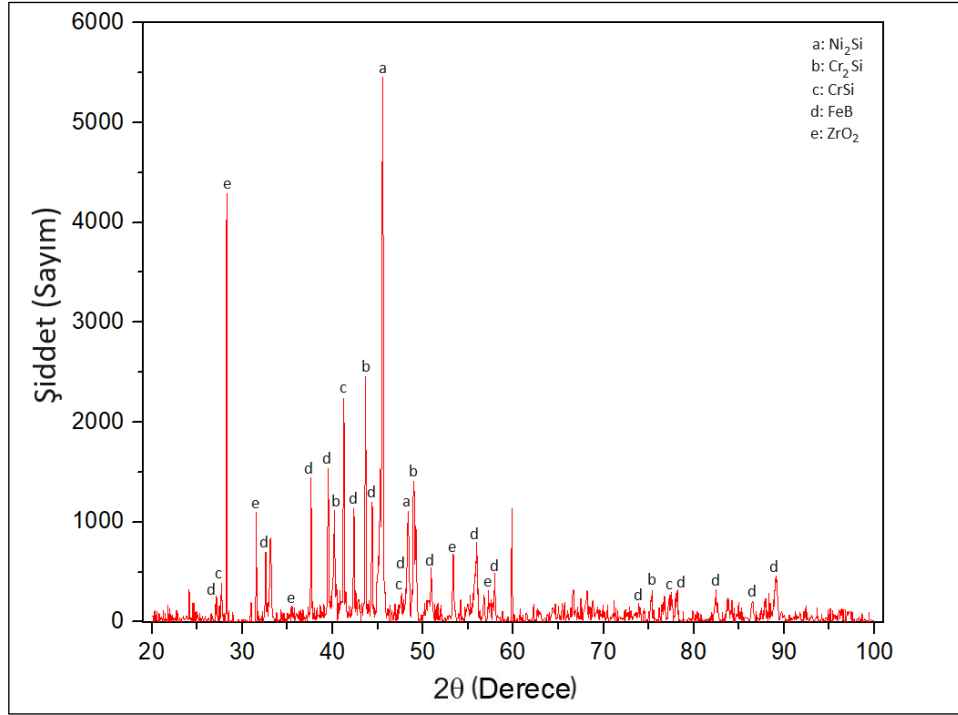
150dk borlama işlemine tabi CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın yüzeyinde ilgili veri tabanındaki eşleştirme sonucu ZrO₂, Cr₂Si ve CrSi fazlarının da oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.6b).

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise FeB ve Ni₂Si fazlarının yanında ayrıca ZrO₂ fazının da oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.6c).

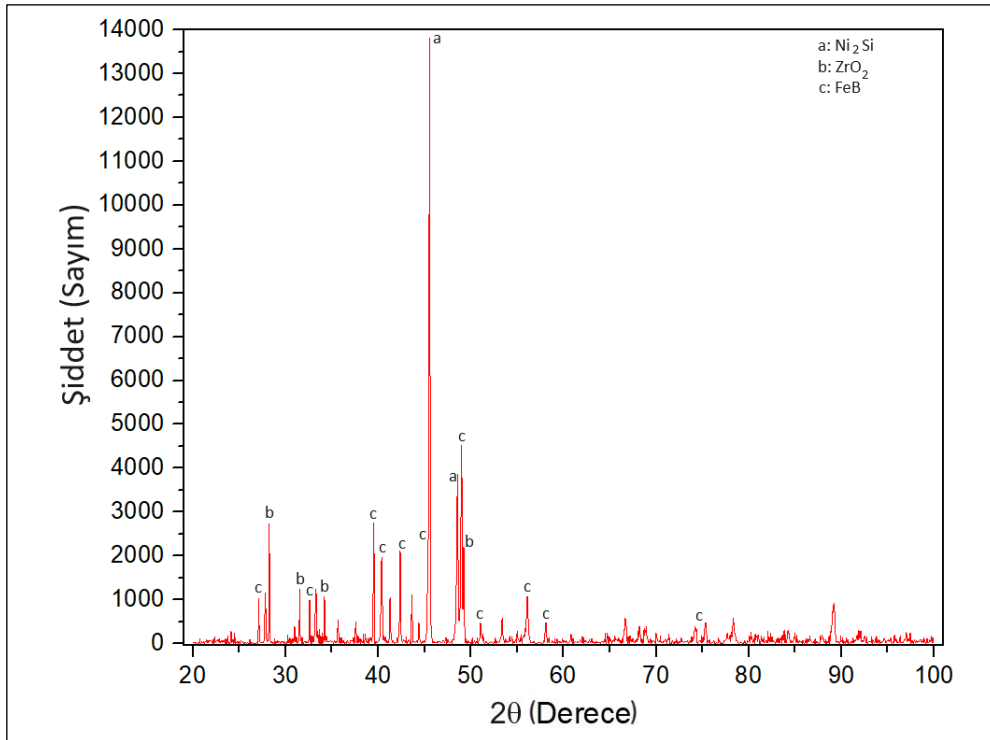


(a)

Şekil 6.7: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.



(b)



(c)

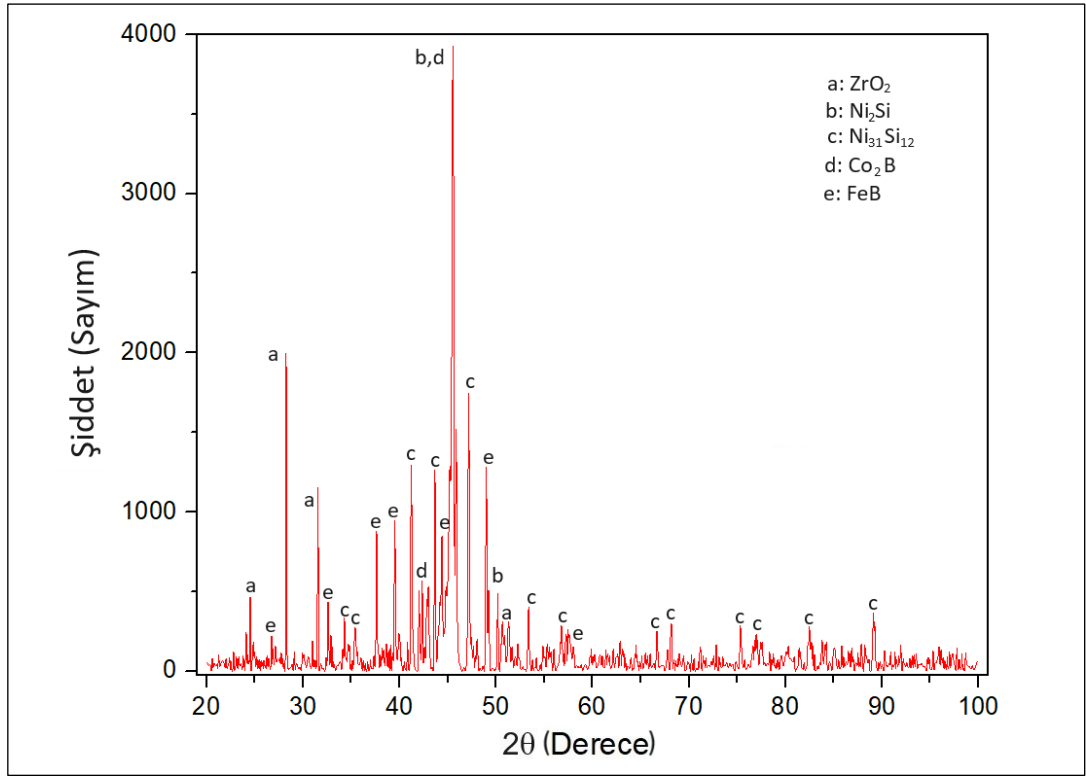
Şekil 6.7 devam: Farklı sürelerde 900°C 'de borlama işlemi uygulanan $\text{CoCrFeNiZr}_{0.2}$ YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.

900°C sıcaklıkta 75dk, 150dk. ve 300dk sürelerde borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın yüzeyinden yapılan XRD analizi sonucu elde edilen XRD desenleri Şekil 6.7'de verilmiştir. Bu XRD desenlerinde oluşan pikler, ilgili veri tabanı ile eşleştirildiğinde her üç borlama süresi sonucunda da Ni₂Si ve FeB fazlarının oluştuğu görülmektedir.

Bu fazlara ilaveten, 75dk borlanan numunenin yüzeyinde Cr₂Si fazının da oluştuğu açıkça görülmektedir (Şekil 6.7a).

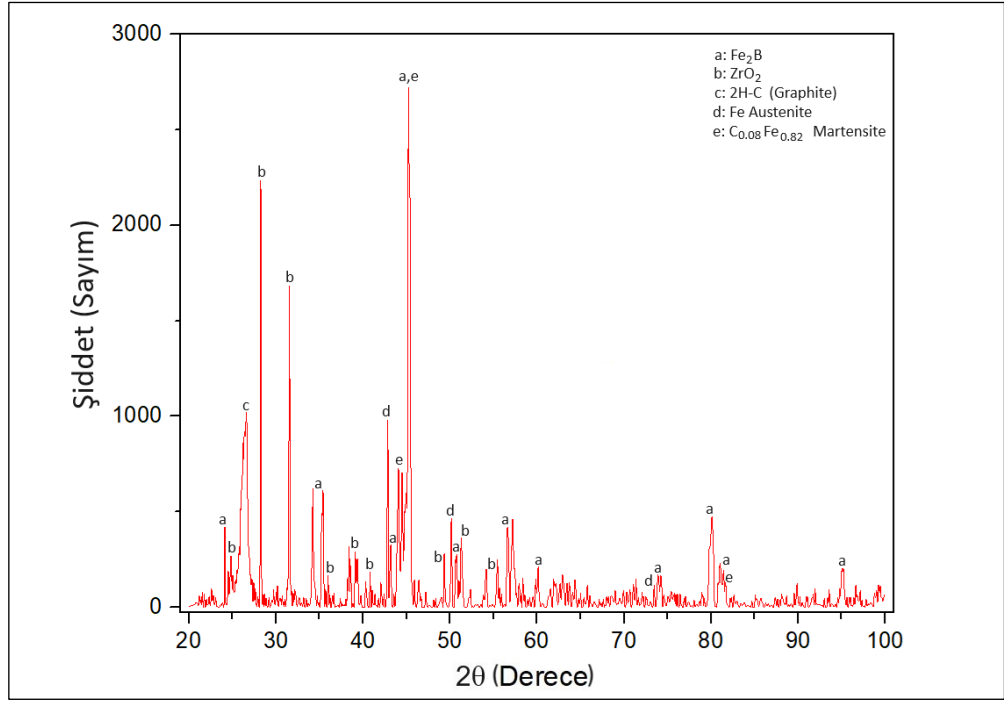
150dk borlama işlemine tabi CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın yüzeyinde ilgili veri tabanındaki eşleştirme sonucu ZrO₂, Cr₂Si ve CrSi fazlarının da oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.7b).

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise FeB ve Ni₂Si fazlarının yanında ayrıca ZrO₂ fazının da oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.7c).

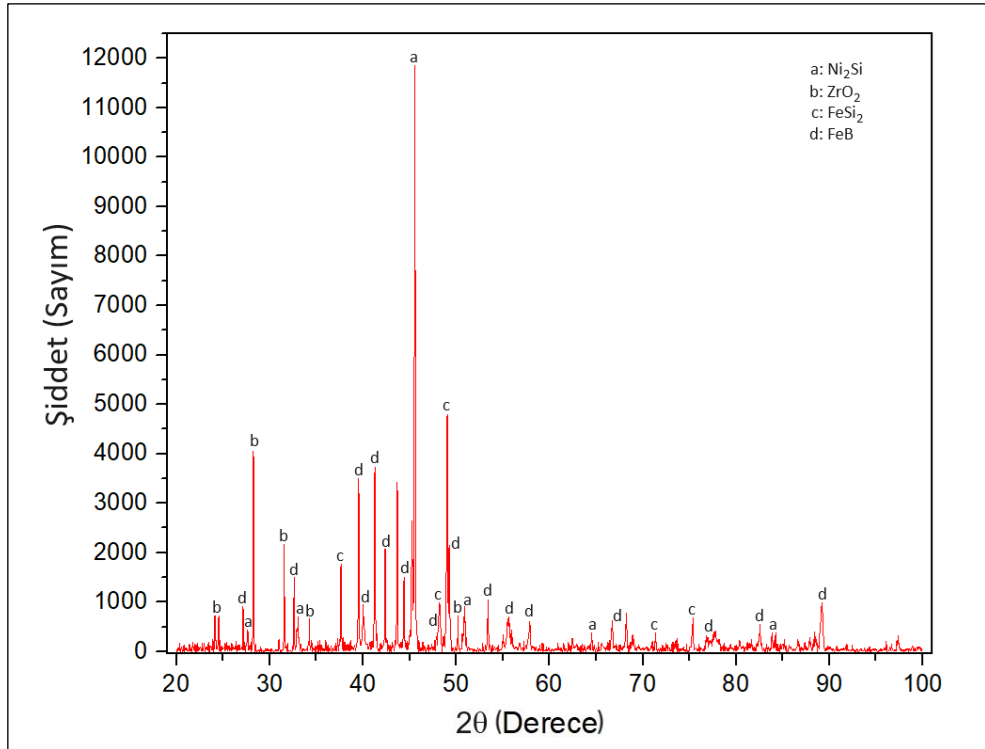


(a)

Şekil 6.8: Farklı sürelerde 900°C'de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.



(b)



(c)

Şekil 6.8 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA’nın yüzeyinden elde edilen XRD desenleri: a) 75dk., b) 150dk. ve c) 300dk.

900°C sıcaklıkta 75dk, 150dk. ve 300dk sürelerde borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın yüzeyinden yapılan XRD analizi sonucu elde edilen XRD desenleri Şekil 6.8'de verilmiştir. Bu XRD desenlerinde oluşan pikler, ilgili veri tabanı ile eşleştirildiğinde her üç borlama süresi sonucunda da ZrO₂ fazının oluştuğu görülmektedir.

Bu fazlara ilaveten, 75dk borlanan numunenin yüzeyinde Ni₂Si, Ni₃₁Si₁₂, Co₂B ve FeB fazlarının da oluştuğu açıkça görülmektedir (Şekil 6.8a).

150dk borlama işlemine tabi CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın yüzeyinde ilgili veri tabanındaki eşleştirme sonucu Fe₂B, 2H-C (Grafit), Fe(Östenit) ve C_{0.08}Fe_{0.82} Martenzit fazlarının da oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.8b).

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise ZrO₂ fazının yanında ayrıca Ni₂Si, FeSi₂ ve FeB fazlarının da oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.8c).

6.2. SEM Analizi Sonuçları

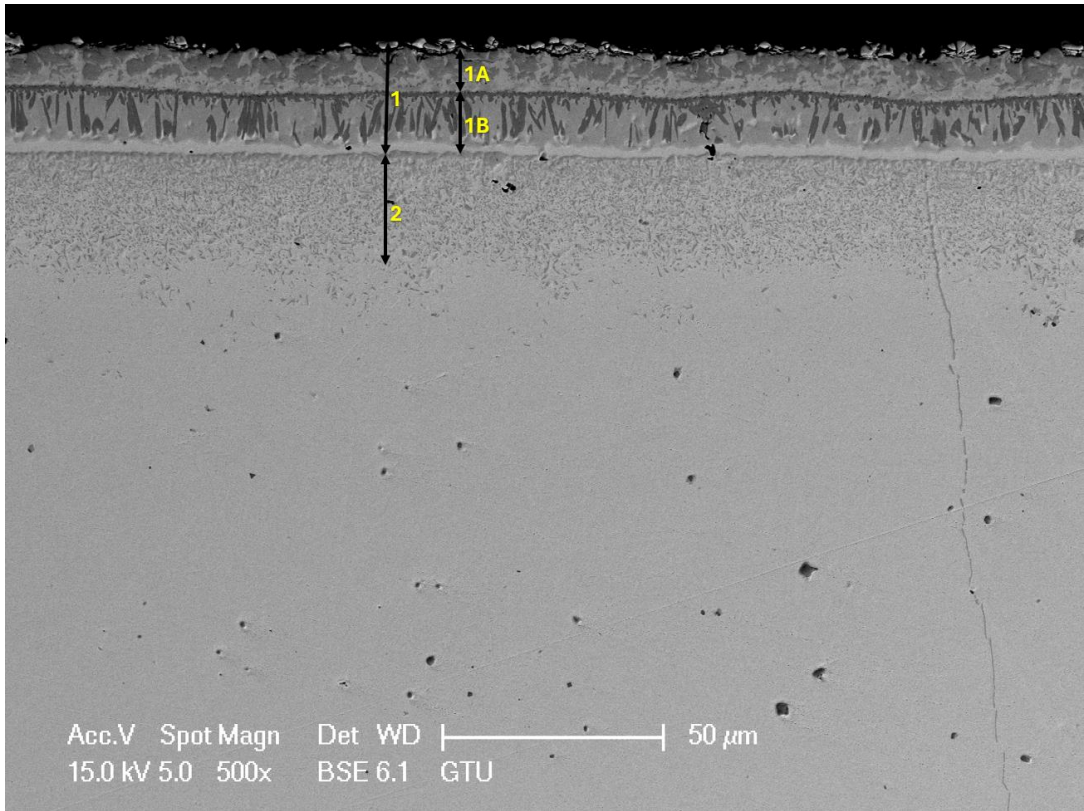
Farklı oranlarda Zr içeren ve Zr içermeyen CoCrFeNi YEA'nın 900°C sıcaklıkta, farklı sürelerde borlanması sonrasında yapılan kesitten SEM incelemesinden elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.9 – 6.11'de verilmiştir.

Zr içermeyen borlanmış CoCrFeNi YEA'ya ait numunelerin kesit SEM görüntüleri Şekil 6.9'da verilmiştir.

Bu numunelerin kesitlerini borlama sonucu borür tabaka (1) ve geçiş bölgesi (2) olmak üzere iki farklı bölgeye ayırmak mümkündür. Borür tabakayı da 2 farklı bölge (1A ve 1B) olarak değerlendirmek mümkündür. XRD sonuçları (Şekil 6.5) ve ilgili literatür ile birlikte değerlendirildiğinde 1A ile gösterilen bölge (Şekil 6.9-a) borür tabakanın dış bölgesi olup, FeB fazından oluştuğu anlaşılmaktadır. 1A bölgesinde borlama işlem süresinin artması ile dış yüzeyinin gevşek bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Borür tabakanın dış yüzeyinin kırılğan (camsı) bir yapıda olduğu ve dökülme ihtimalinin olduğu düşünülmektedir. 1B bölgesi ise borür tabakanın iç bölgesi olduğu ve kontrast farkından dolayı bu tabakanın altlığa yakın geçiş bölgesi (2) ile borür tabaka arasında sürekli dar bir bölgenin (açık renkli) oluştuğu anlaşılmaktadır.

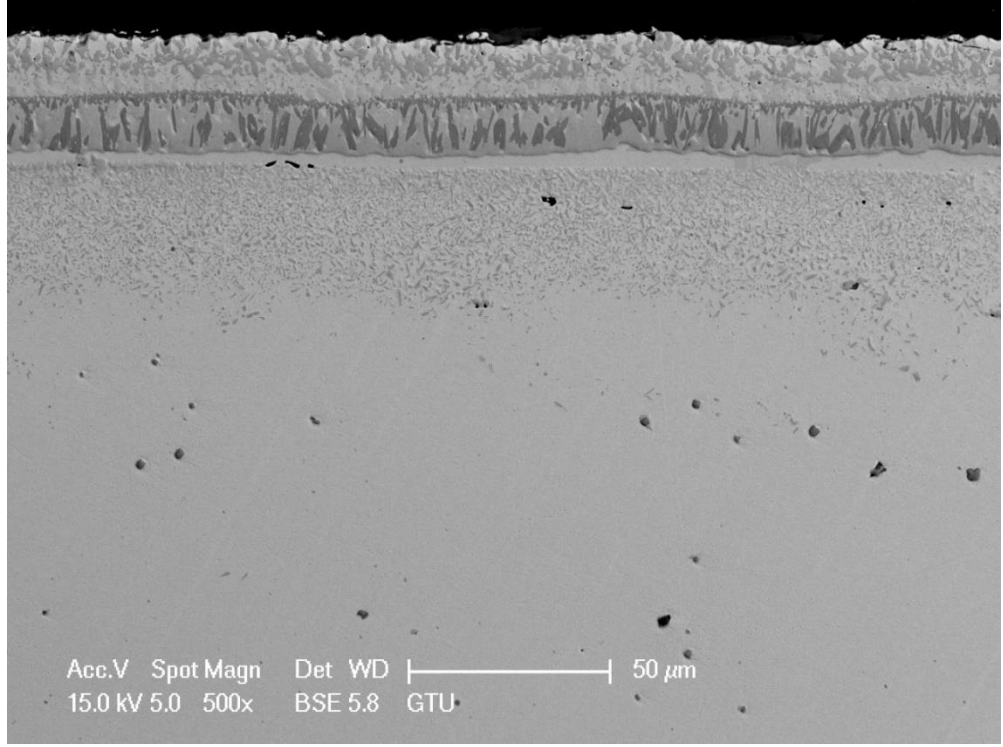
Borür tabaka ile altlık arasındaki geçiş bölgesinde (2) borlama süresine bağlı olarak küresel ve iğnesel yapıda çökelti benzeri ikincil fazlar görülmektedir. Bu çökelti benzeri yapıların borlama süresinin artması ile arttığı ve kabalaştığı görülmektedir. Ayrıca, 1B ve 2 bölgesinde miktarı fazla olmamakla birlikte bazı gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Borlamadan etkilenmeyen altlık bölgesinde ise bu gözeneklerin daha fazla miktarda olduğu görülmektedir ve bunun alaşımlandırma sürecinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kesit SEM görüntülerinden (Şekil 6.9) hem dış borür tabaka (1) kalınlığının, hem de iç borür tabaka (2) kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı görülmektedir.

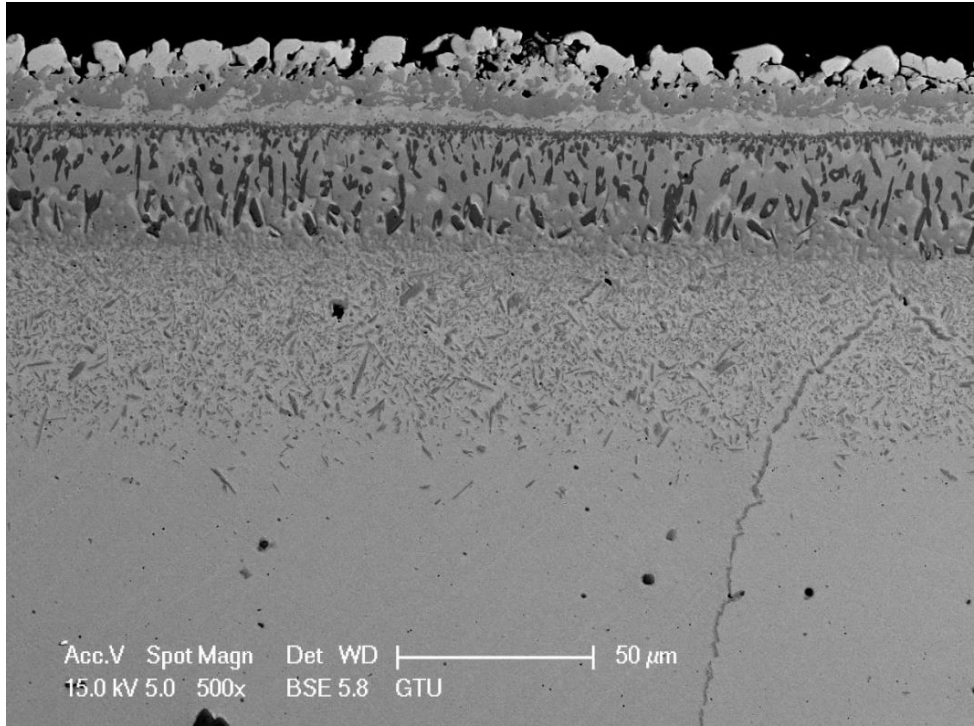


(a)

Şekil 6.9: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(b)



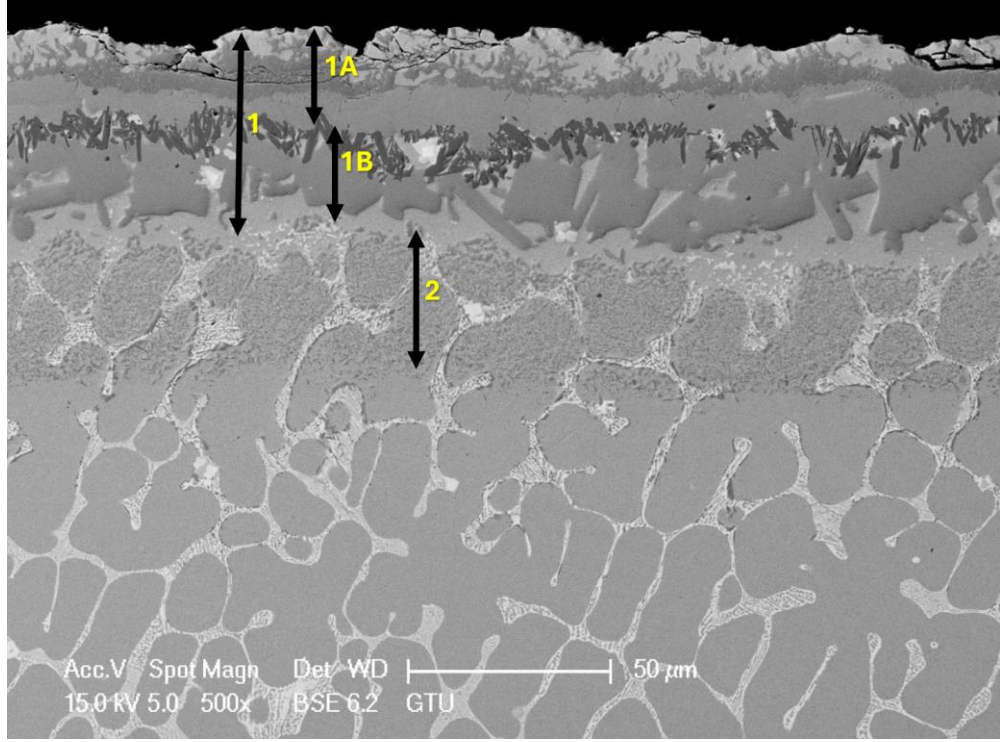
(c)

Şekil 6.9 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

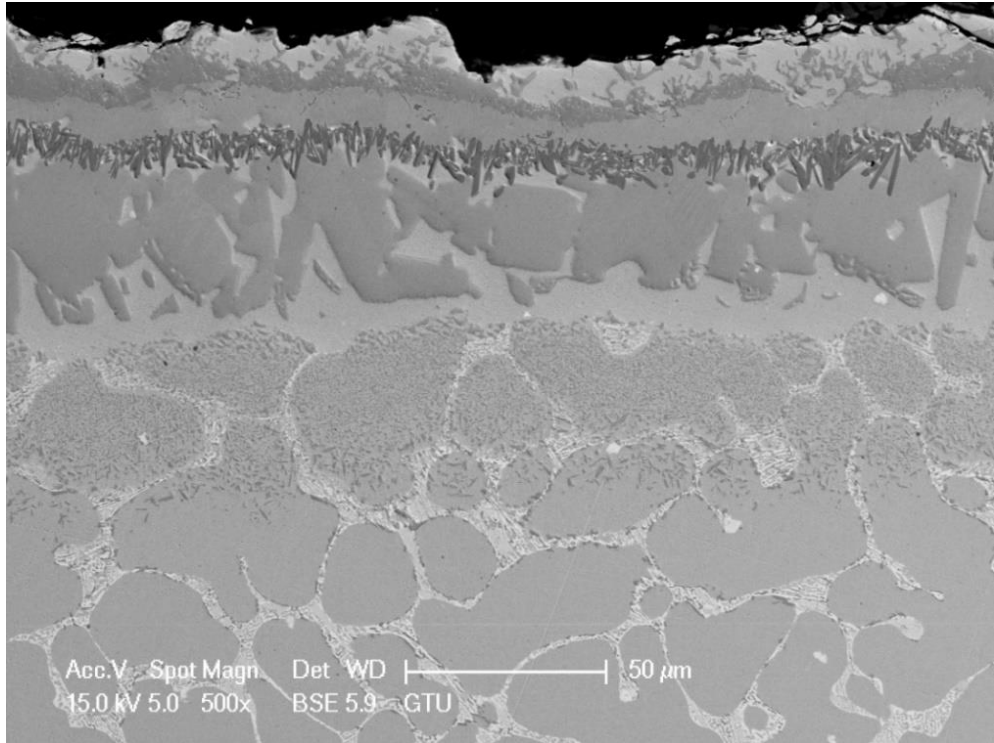
Farklı sürelerde borlanmış atomik olarak %2,67 Zr içeren CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait numunelerin kesit SEM görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir.

Kesit SEM resimleri incelendiğinde borür tabakanın farklı kontrastlara ve farklı morfolojiye sahip tabakalardan oluştuğu görülmektedir. Ancak borlanan CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın kesitini de yine genel olarak 2 farklı bölgeye ayırmak mümkündür. Yine XRD sonuçları (Şekil 6.6) ve ilgili literatür ile birlikte değerlendirildiğinde 1A ile gösterilen bölge (Şekil 6.10-a) borür tabakanın dış bölgesi olup, ağırlıklı olarak FeB fazından oluşan bir tabaka olduğu anlaşılmaktadır. Bu tabakanın gevşek bir dış bölgesi olup genel olarak bu 1A tabakasının iç tarafında sürekli bir bölge ve dış tarafında ise iki farklı renge ait bir borür tabaka olduğu görülmektedir. 1A tabakasının bazı kısımlarında çatlaklar olduğu, ayrıca bu çatlaklardan dolayı da bazı bölgelerin dökülmeye elverişli olduğu anlaşılmaktadır. 1B ile gösterilen borür tabakanın iç bölgesi olduğu ve kontrast farkından dolayı bu tabakanın da iki farklı bölgeden oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu bölgede şerit halinde iğnesel yapıda çökeltilerin oluştuğu ve borlama süresinin artması ile bu çökeltilerin arttığı ve irileştiği görülmektedir. 2 ile işaretlenen bölge ise geçiş bölgesidir. Bu bölgede borlama süresine bağlı olarak küresel ve iğnesel ikincil fazlar görülmektedir. 2 nolu bölge ile iç borür tabakanın en iç kısmında yine bir bant şeklinde sürekli bölgenin olduğu görülmektedir.

Kesit SEM görüntülerinden hem dış borür tabaka (1) kalınlığının, hem de geçiş bölge (2) kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı görülmektedir. Ayrıca altlık bölge morfolojisinin Zr içermeyen alaşıma göre değiştiği de açıkça görülmektedir. Ancak geçiş bölgesinde oluşan yapı ile bu altlık mikroyapısı arasında bir etkileşim olmadığı anlaşılmaktadır.

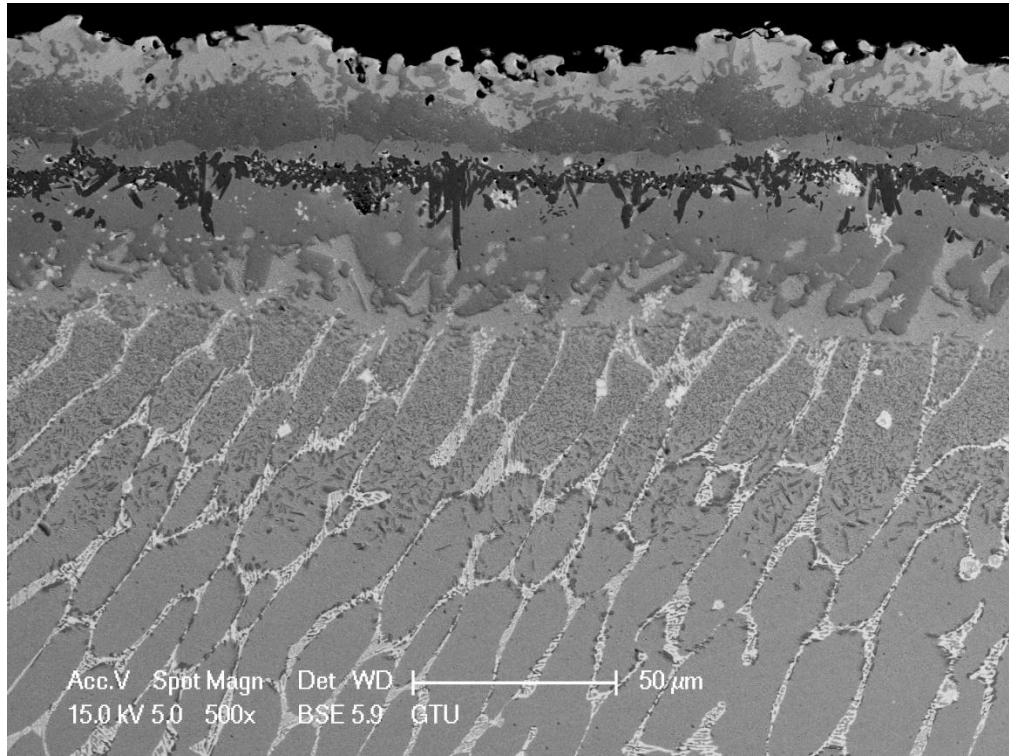


(a)



(b)

Şekil 6.10: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın yüzeyinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(c)

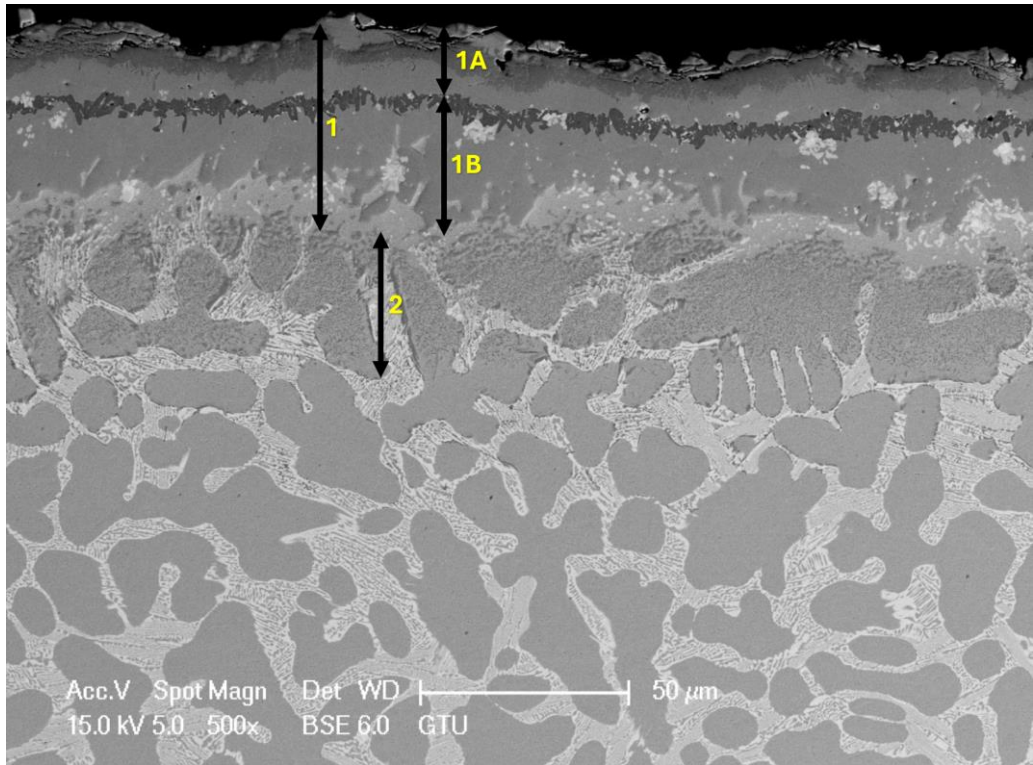
Şekil 6.10 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın yüzeyinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

Farklı sürelerde borlanmış atomik olarak %4,72 Zr içeren CoCrFeNiZr0.2 YEA’ya ait numunelerin kesit SEM görüntüleri Şekil 6.11’de verilmiştir.

Kesit Sem görüntüleri incelendiğinde borür tabakanın farklı kontrastlara ve farklı morfolojiye sahip tabakalardan oluştuğu görülmektedir. Ancak borlanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitini de yine genel olarak 2 farklı bölgeye ayırmak mümkündür. Yine XRD sonuçları (Şekil 6.7) ve ilgili literatür ile birlikte değerlendirildiğinde 1A ile gösterilen bölge (Şekil 6.11-a) borür tabakanın dış bölgesi olup, ağırlıklı olarak FeB fazından oluşan bir tabaka olduğu anlaşılmaktadır. Bu tabakanın gevşek bir dış bölgesi olup bu 1A tabakasının iç tarafında sürekli bir bölge ve dış tarafında ise iki farklı renge ait bir borür tabaka olduğu görülmektedir. 1A tabakasının bazı kısımlarında çatlaklar olduğu, ayrıca bu çatlaklardan dolayı da bazı bölgelerde dökülmeler olduğu görülmektedir. 1B ile gösterilen borür tabakanın iç bölgesi olduğu ve kontrast farkından dolayı bu tabakanın iki farklı bölgeden oluştuğu

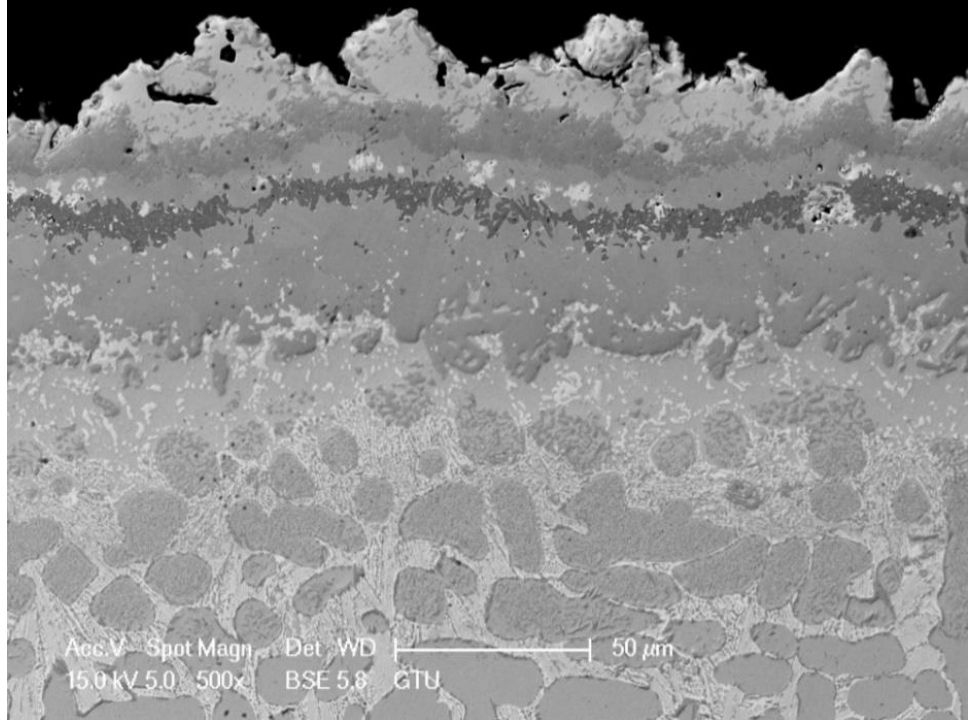
anlaşılmaktadır. Bu bölgede de diğer YEA’larda olduğu gibi yine iğnesel yapıda çökeltilerin olduğu, ancak diğerlerinde oluşan iğnesel yapıdaki çökeltilere nazaran daha küçük yapıda olduğu görülmektedir. Borlama süresinin artması ile bu bölgede oluşan çökeltilerin arttığı görülmektedir. 2 ile işaretlenen bölge ise geçiş bölgesidir. Bu bölgede borlama süresine bağlı olarak küresel ve iğnesel ikincil fazlar görülmektedir. 2 nolu bölge ile iç borür tabakanın en iç kısmında yine bir bant şeklinde sürekli bölgenin olduğu görülmektedir.

Kesit SEM görüntülerinden hem dış borür tabaka (1) kalınlığının, hem de geçiş bölge (2) kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı görülmektedir. Ayrıca, altlık bölge morfolojisinin Zr içermeyen alaşıma göre değiştiği de açıkça görülmektedir. Ancak geçiş bölgesinde oluşan yapı ile altlık mikroyapısı arasında bir etkileşim olmadığı anlaşılmaktadır.

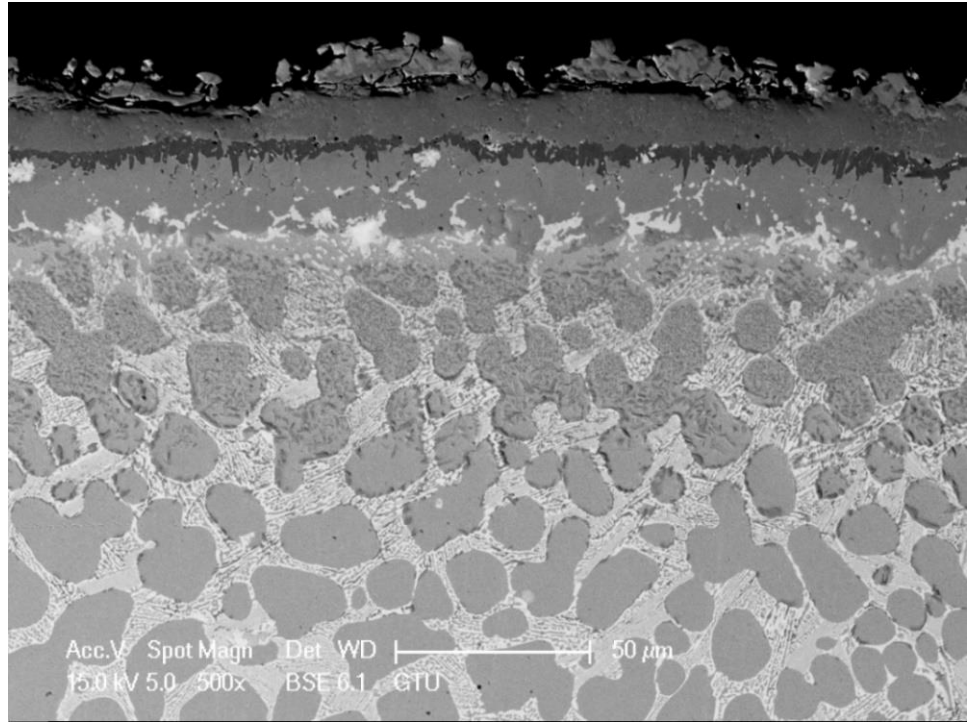


(a)

Şekil 6.11: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(b)



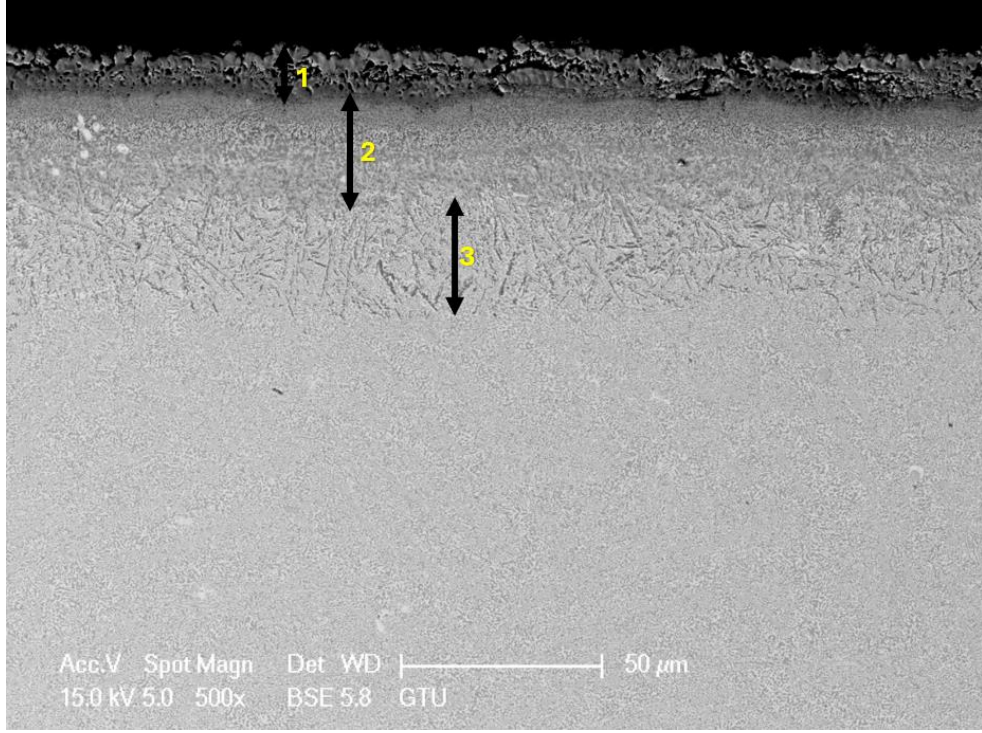
(c)

Şekil 6.11 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

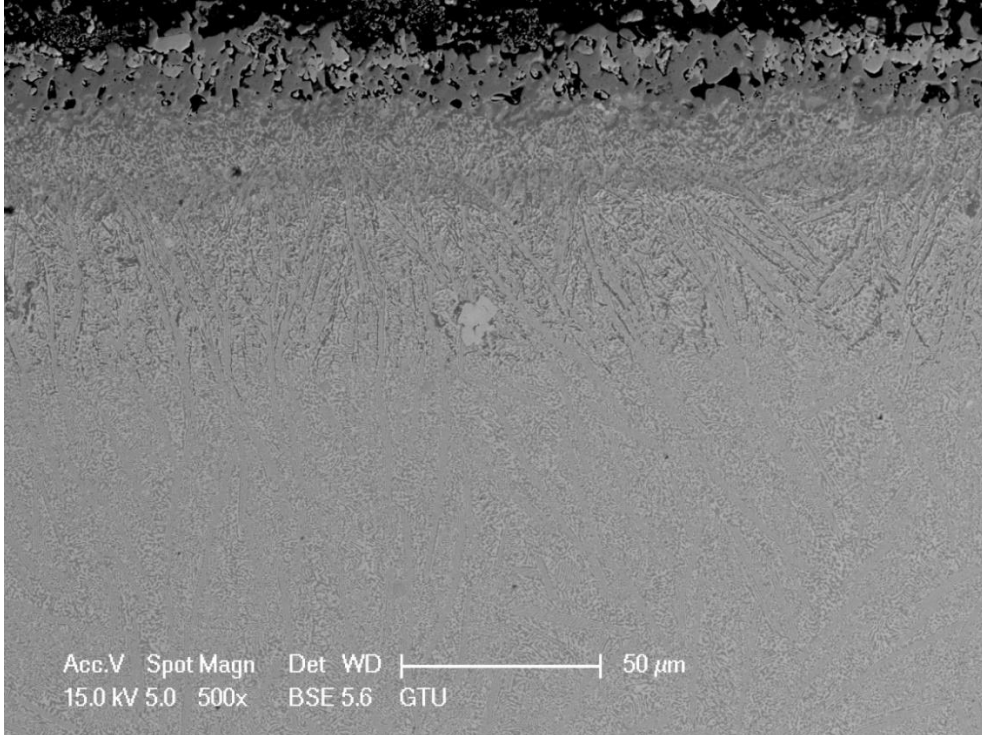
Farklı sürelerde borlanmış atomik olarak %11,65Zr içeren CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'ya ait numunelerin kesit SEM görüntüleri Şekil 6.12'de verilmiştir.

Bu numunelerin kesitlerinin borlama sonucu borür tabaka (1) ve geçiş bölgesi (2) olmak üzere iki farklı bölgeye ayırmak mümkündür. XRD sonuçları (Şekil 6.8) ve ilgili literatür ile birlikte değerlendirildiğinde 1 ile gösterilen bölge (Şekil 6.12-a) borür tabakanın dış bölgesi olup, ağırlıklı olarak FeB ve Co₂B fazından oluştuğu anlaşılmaktadır. 1 bölgesinde borlama işlem süresinin artması ile dış yüzeyinin gevşek bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Borür tabakanın dış yüzeyinin kırılğan (camsı) bir yapıda olduğu ve dökülme ihtimalinin olduğu düşünülmektedir. 2 ile gösterilen bölge ise borür tabakanın iç bölgesi olduğu ve kontrast farkından dolayı bu tabakanın altlığa yakın geçiş bölgesi olduğu anlaşılmaktadır. Zr miktarının artması ile nispeten daha homojen bir yapı oluştuğu görülmüştür. XRD sonuçları (Şekil 6.8) ile değerlendirildiğinde bu bölgede Fe ve Co'nun B ile yaptığı ve özellikle Cr, Ni ve Zr'un Si ile yaptığı fazların olması muhtemeldir. Borür tabaka ile altlık arasındaki geçiş bölgesinde (3) borlama süresine bağlı olarak küresel ve iğnesel yapıda çökelti benzeri ikincil fazlar görülmektedir. Bu çökelti benzeri yapıların borlama süresinin artması ile miktarının arttığı ve kabalaştığı görülmektedir.

Kesit SEM görüntülerinden (Şekil 6.12) hem dış borür tabaka (1) kalınlığının, hem de iç borür tabaka (2) kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı görülmektedir.

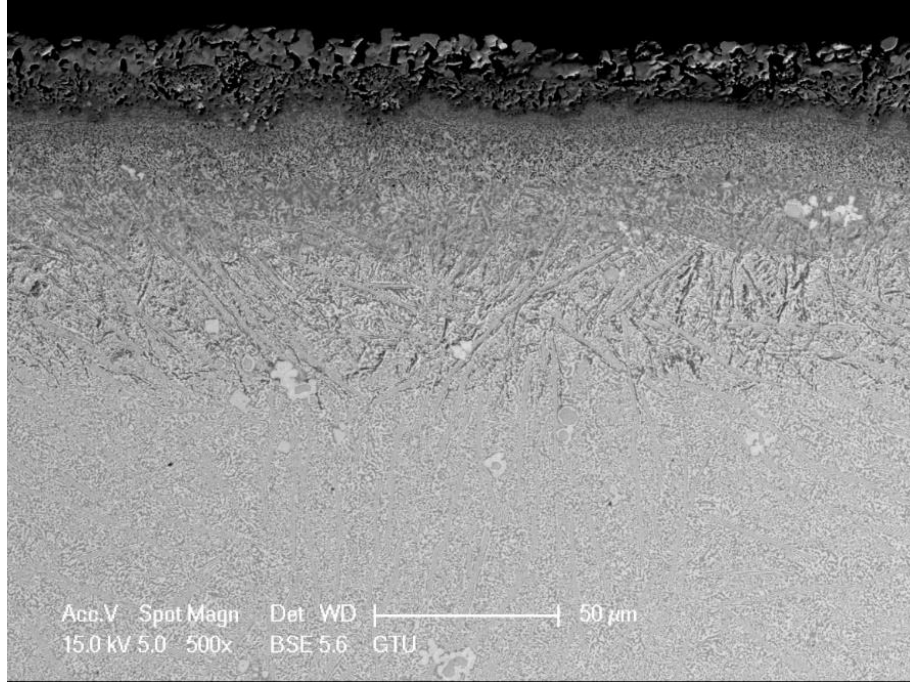


(a)



(b)

Şekil 6.12: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



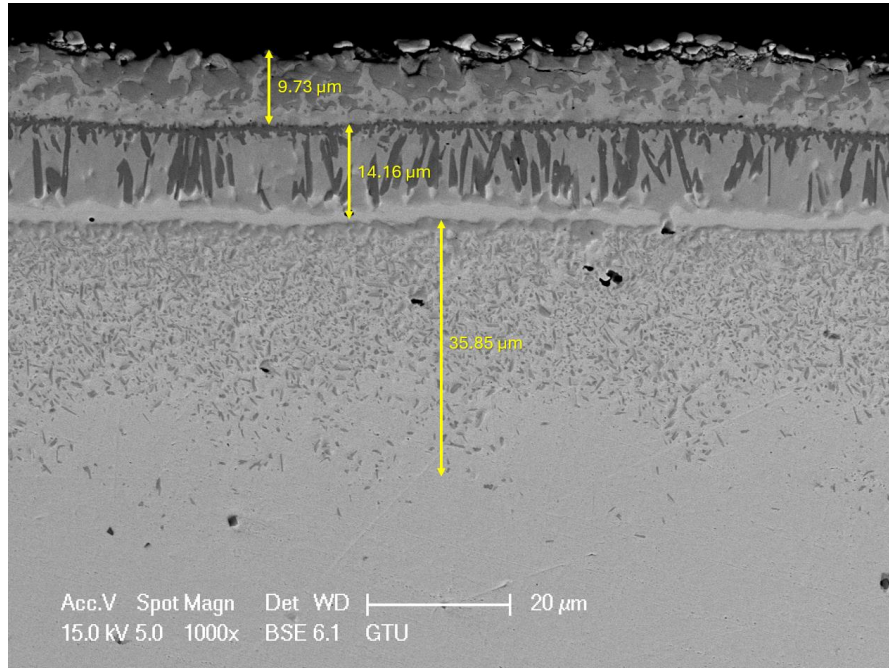
(c)

Şekil 6.12 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğrafları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

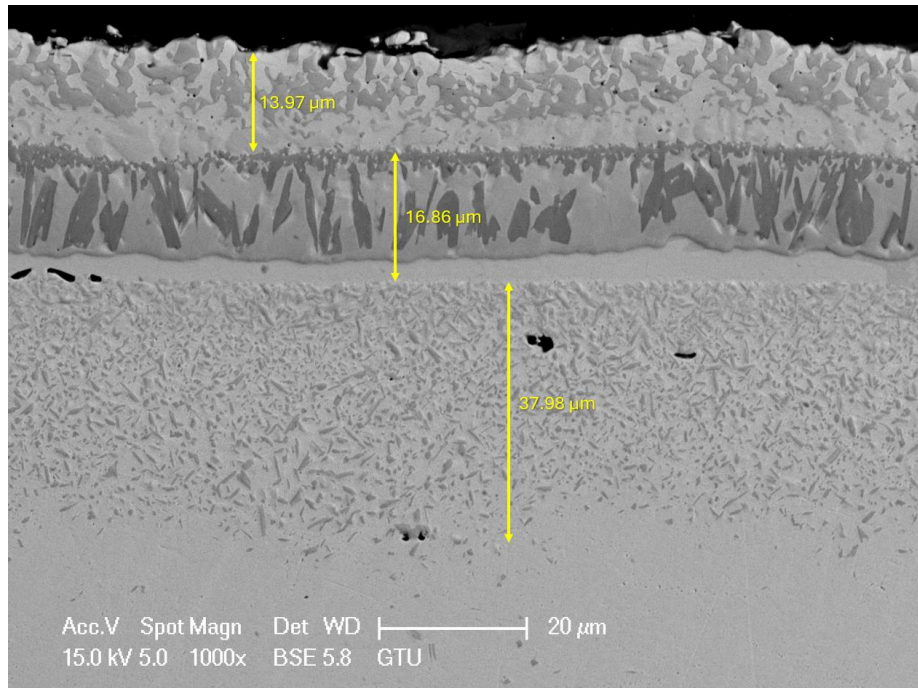
6.3. Kaplama Kalınlıkları

Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’lar aynı sıcaklıkta farklı sürelerde borlama işlemine tabi tutulduktan sonra oluşan borür tabaka kalınlıkları SEM incelemesi sırasında ölçülmüştür. Kalınlık değerleri aynı bölgeden en az 5 olmak üzere toplamda en az 15 ölçüm yapılarak aritmetik ortalamaları hesaplanmış ve standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.

6.3.1. CoCrFeNi YEA

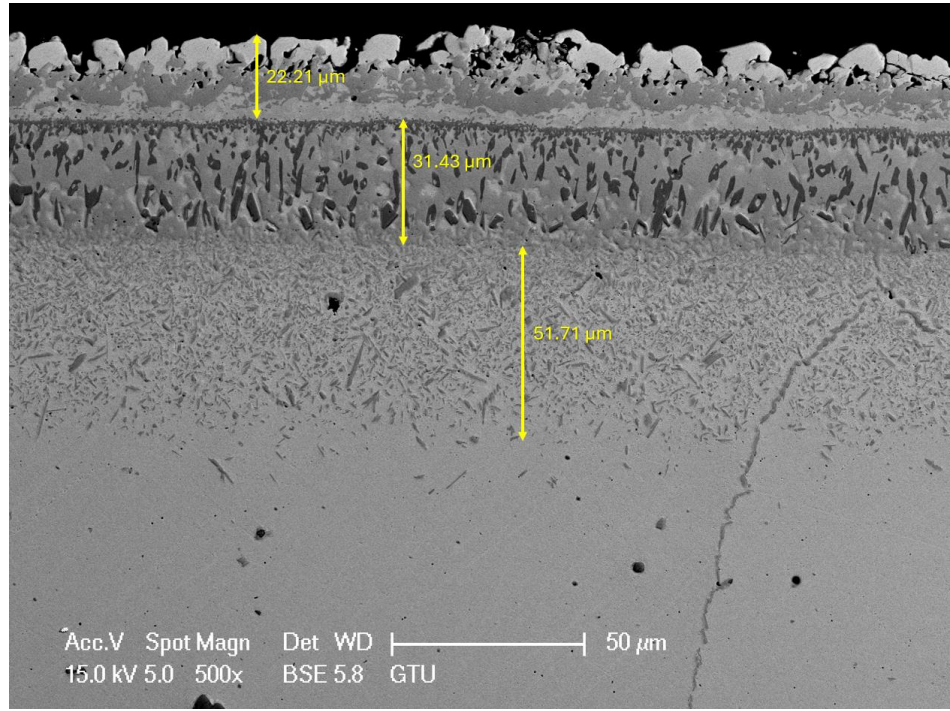


(a)



(b)

Şekil 6.13: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(c)

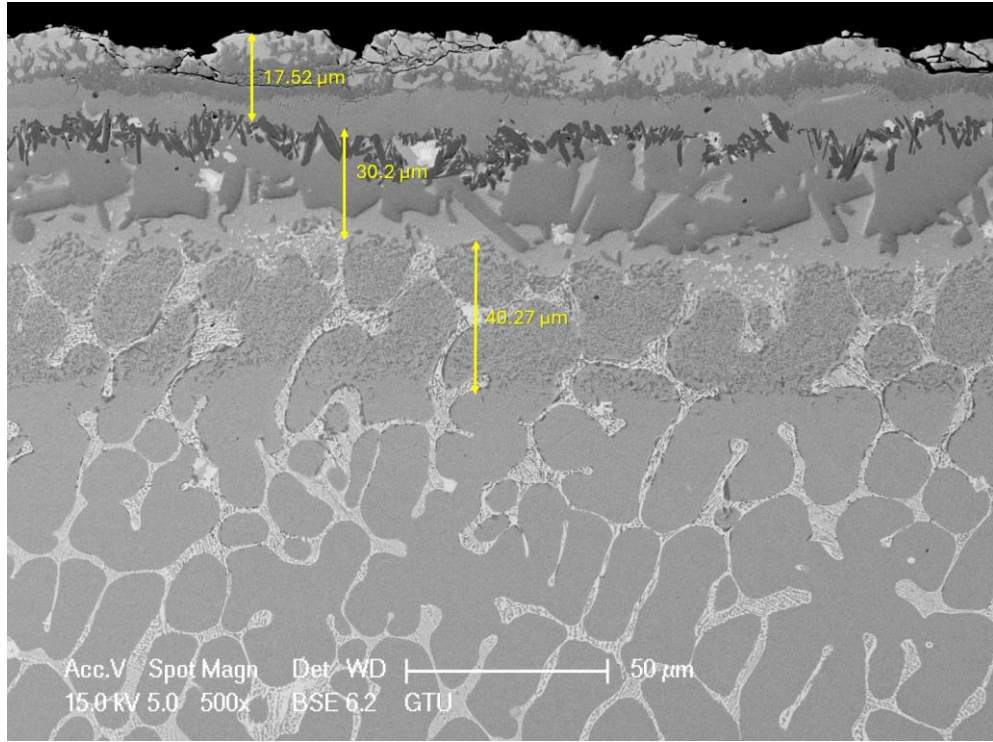
Şekil 6.13 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNi YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

Tablo 6.1: CoCrFeNi alaışımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.

Borlama Süresi (dk.)	Bölge	Ortalama Kalınlık (μm.)	Std. Sapma
75	1	9,73	±0,32
	2	14,16	±0,3-52
	3	35,85	±0,66
150	1	13,97	±0,72
	2	16,86	±1,41
	3	37,98	±1,34
300	1	22,21	±1,38
	2	31,43	±3,29
	3	51,71	±2,6

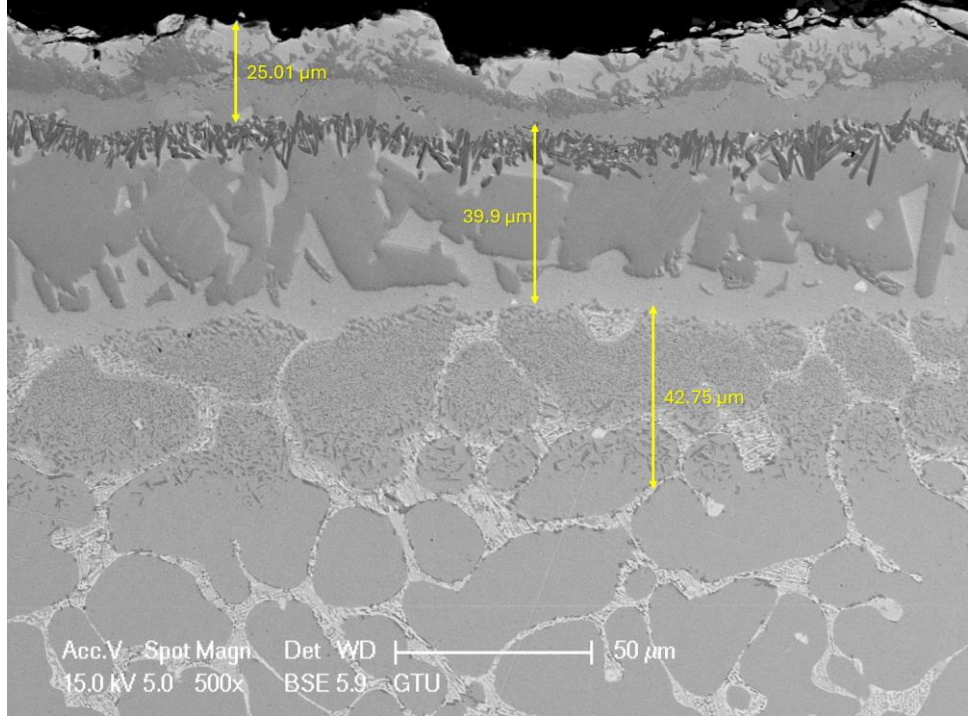
Şekil 6.13 a – b – c ve Tablo 6.1 incelendiğinde artan borlama süresi ile borür tabaka kalınlığının arttığı görülmektedir. 75dk. olan en düşük borlama süresi sonrasında borür tabaka kalınlığı ortalama 9,73µm ve en yüksek süre olan 300dk. sonrasında ise borür tabaka kalınlığı 22,21 µm olarak ölçülmüştür.

6.3.2. CoCrFeNiZr0.1 YEA

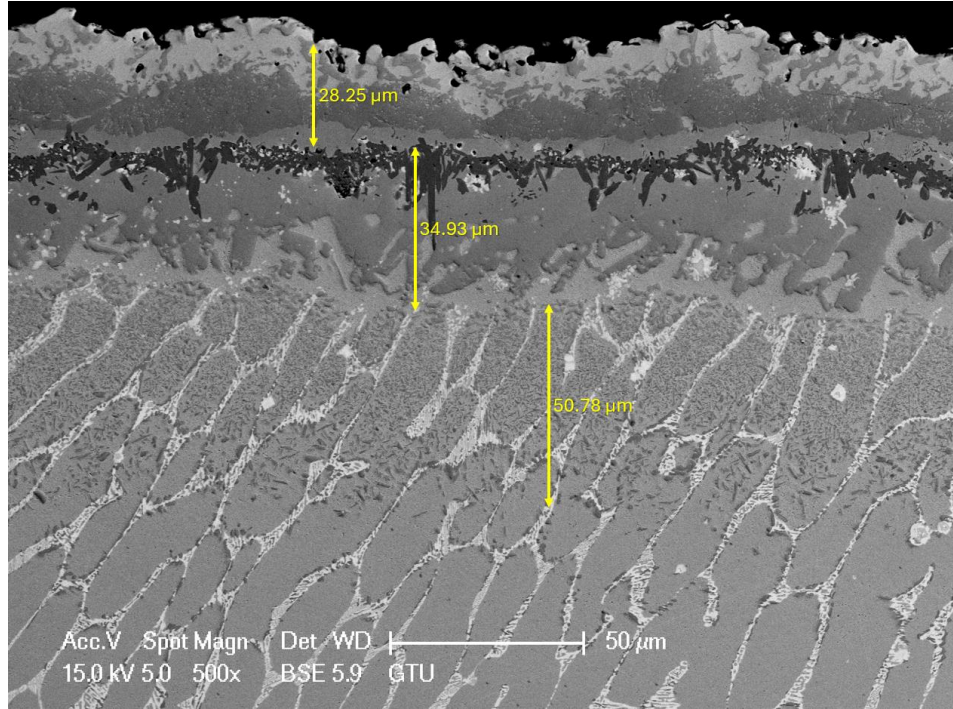


(a)

Şekil 6.14: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(b)



(c)

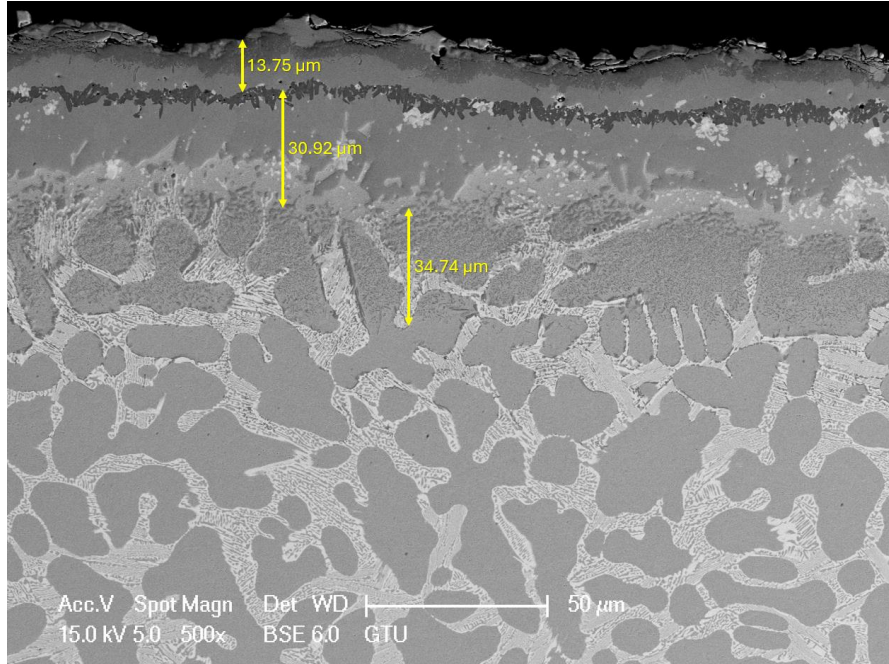
Şekil 6.14 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.1 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

Tablo 6.2: CoCrFeNiZr0.1 alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçölen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.

Borlama Süresi (dk.)	Bölge	Ortalama Kalınlık (µm.)	Std. Sapma
75	1	17,52	±0,44
	2	30,2	±2,84
	3	40,27	±3,16
150	1	25,01	±2,84
	2	39,90	±6,36
	3	42,75	±6,97
300	1	28,25	±2,57
	2	34,93	±3,94
	3	50,78	±2,38

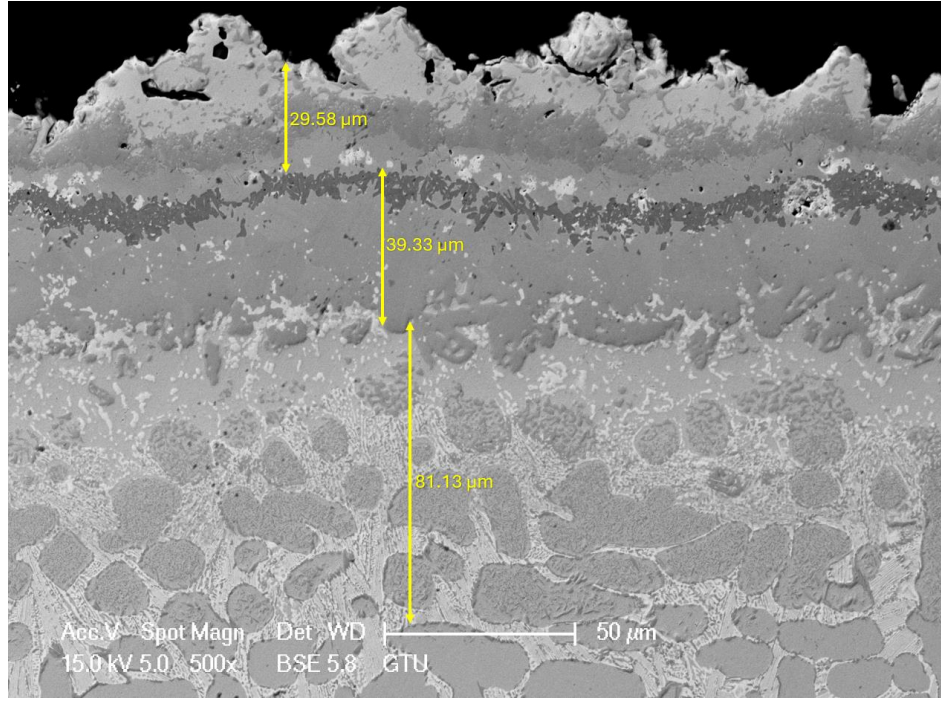
şekil 6.14 a – b – c ve Tablo 6.2 incelendiğinde artan borlama süresi ile borür tabaka kalınlığının arttığı görölmektedir. 75dk. olan en düşük borlama süresi sonrasında borür tabaka kalınlığı ortalama 15,27µm ve en yüksek süre olan 300dk. sonrasında ise borür tabaka kalınlığı 28,25 µm olarak ölçölmüştür.

6.3.3. CoCrFeNiZr0.2 YEA

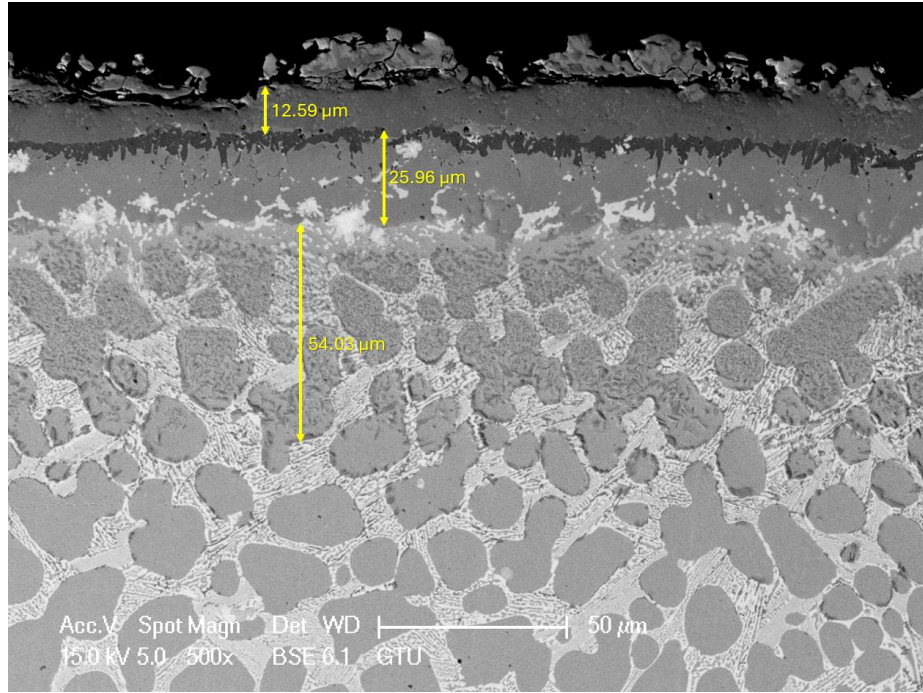


(a)

şekil 6.15: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(b)



(c)

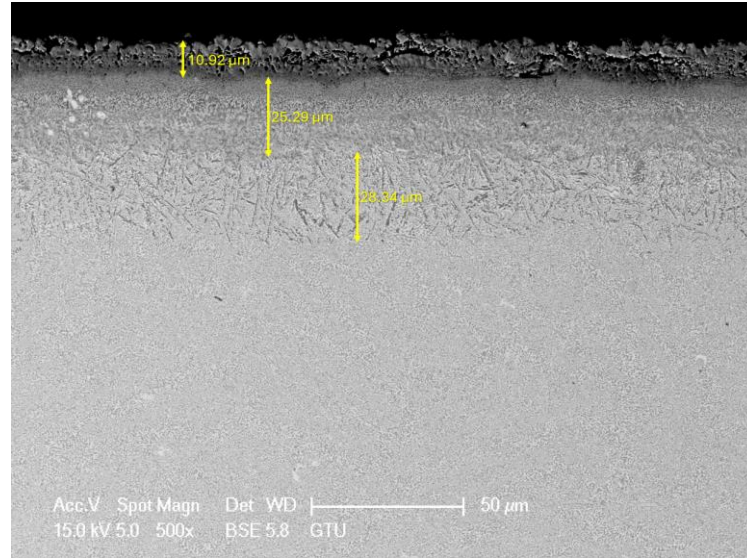
Şekil 6.15 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.2 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

Tablo 6.3: CoCrFeNiZr0.2 alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.

Borlama Süresi (dk.)	Bölge	Ortalama Kalınlık (μm.)	Std. Sapma
75	1	13,75	±2,45
	2	30,92	±4,37
	3	34,74	±3,12
150	1	29,58	±5,19
	2	39,33	±4,59
	3	81,13	±9,61
300	1	12,59	±2,98
	2	25,96	±2,98
	3	54,03	±2,28

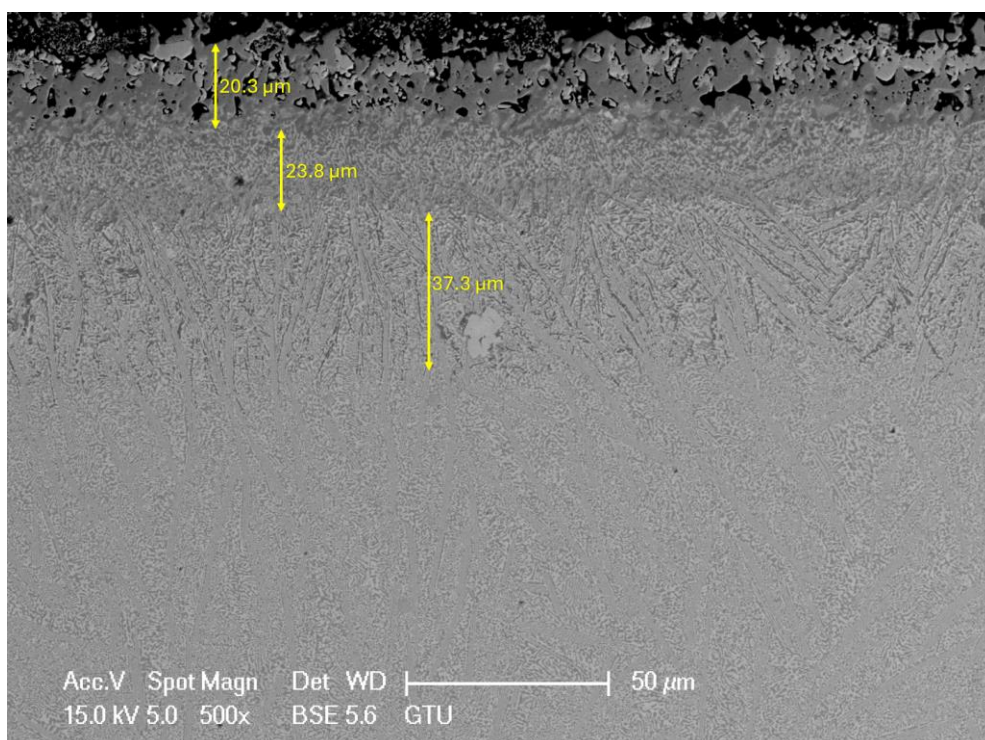
şekil 6.15 a – b – c ve Tablo 6.3 incelendiğinde artan borlama süresi ile borür tabaka kalınlığının arttığı görölmektedir. 75dk. olan en düşük borlama süresi sonrasında borür tabaka kalınlığı ortalama 13,75μm ve en yüksek süre olan 300dk. sonrasında ise borür tabaka kalınlığı 12,59μm olarak ölçölmüştür.

6.3.4. CoCrFeNiZr0.5 YEA

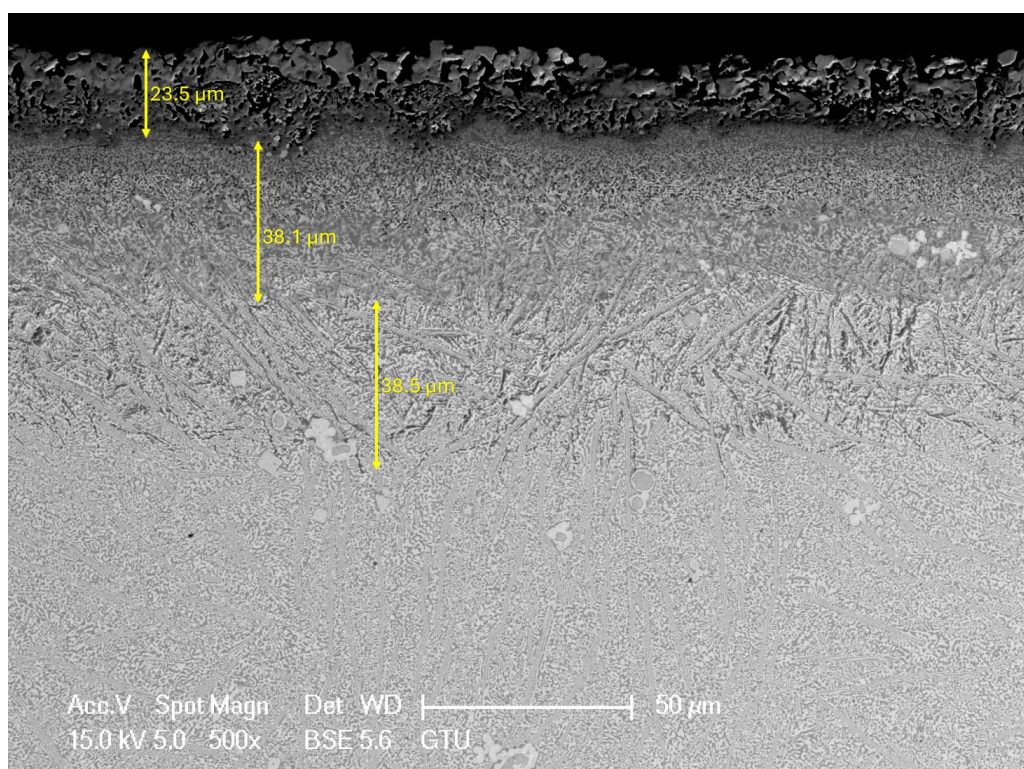


(a)

şekil 6.16: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.



(b)



(c)

Şekil 6.16 devam: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan CoCrFeNiZr0.5 YEA’nın kesitinden elde edilen SEM fotoğraflarında gösterilen tipik borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları; a)75dk. b)150dk. c)300dk.

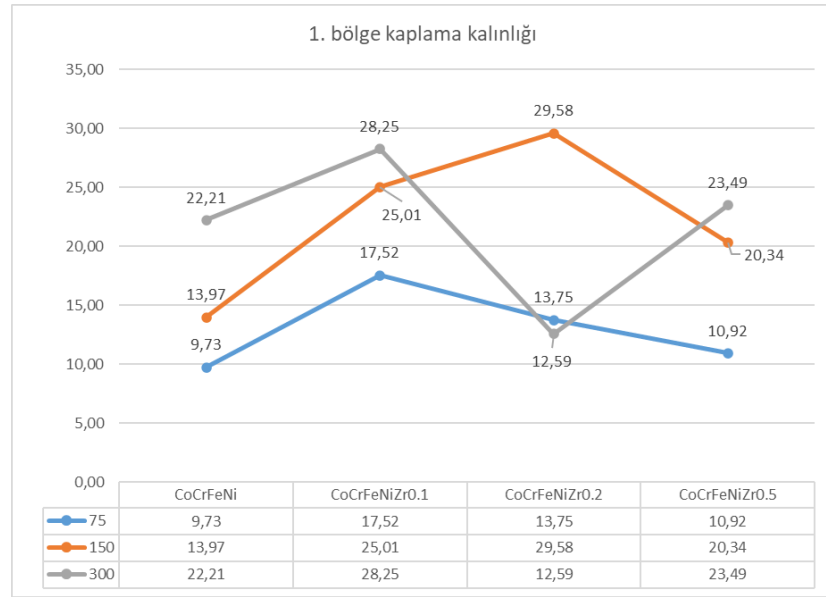
Tablo 6.4: CoCrFeNiZr0.5 alaşımının farklı sürelerdeki borlama işlemi sonrasında ölçülen borür tabaka ve geçiş bölgesi kalınlıkları.

Borlama Süresi (dk.)	Bölge	Ortalama Kalınlık (µm.)	Std. Sapma
75	1	10,92	±1.77
	2	25,29	±1,85
	3	28,34	±2,51
150	1	20,34	±1.25
	2	23,80	±3,48
	3	37,31	±2,83
300	1	23,51	±2.82
	2	38,14	±1,61
	3	38,49	±2,92

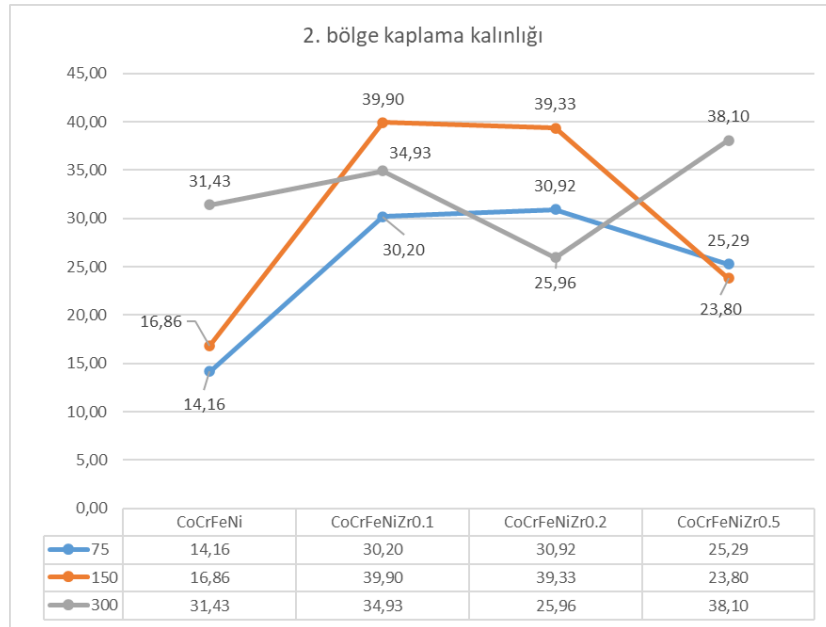
Şekil 6.16 a – b – c ve Tablo 6.4 incelendiğinde artan borlama süresi ile borür tabaka kalınlığının arttığı görülmektedir. 75dk. olan en düşük borlama süresi sonrasında borür tabaka kalınlığı ortalama 10,92µm ve en yüksek süre olan 300dk. sonrasında ise borür tabaka kalınlığı 23,5µm olarak ölçülmüştür.

6.3.5. Kaplama Kalınlığına Zr Etkisi

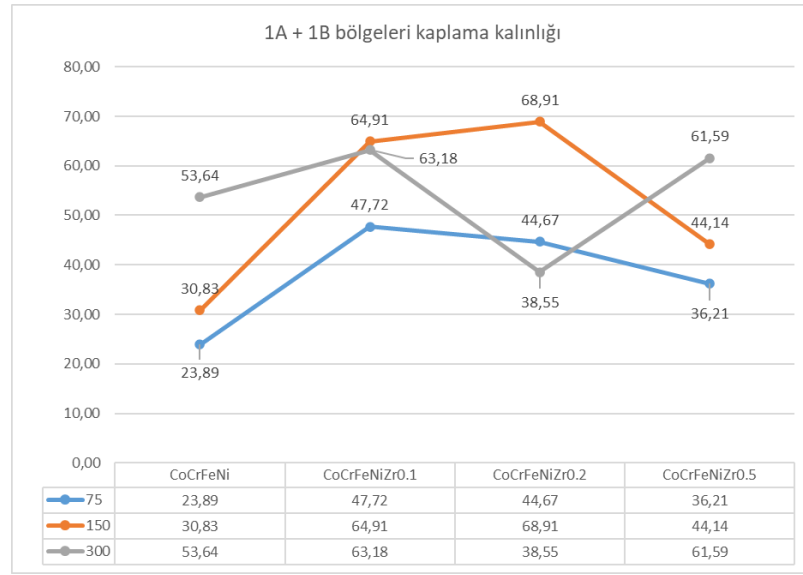
Şekil 6.17-6.18-6.19 ve 6.20’de bulunan grafikler incelendiğinde alaşım içerisine eklenen Zr oranı %3 civarında olduğunda kaplama kalınlığını olumlu yönde etkileyerek artırmakta ancak %5’civarı ve üzerindeki Zr ilaveleri kalınlıkta herhangi bir değişim etkisi oluşturmamakta hatta daha yüksek miktardaki ilaveler kaplama kalınlığının azalmasına sebep olduğu görülmektedir.



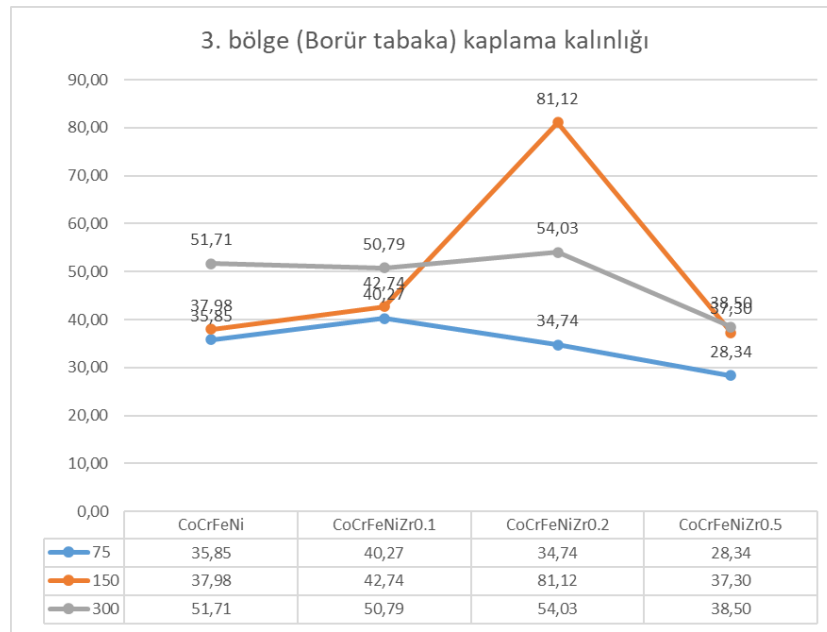
Şekil 6.17: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 1. bölgedeki kaplama kalınlıklarının değişimi



Şekil 6.18: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 2. bölgedeki kaplama kalınlıklarının değişimi



Şekil 6.19: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 1A ve 1B bölgelerinden oluşan borür tabakasının kalınlıklarının değişimi.

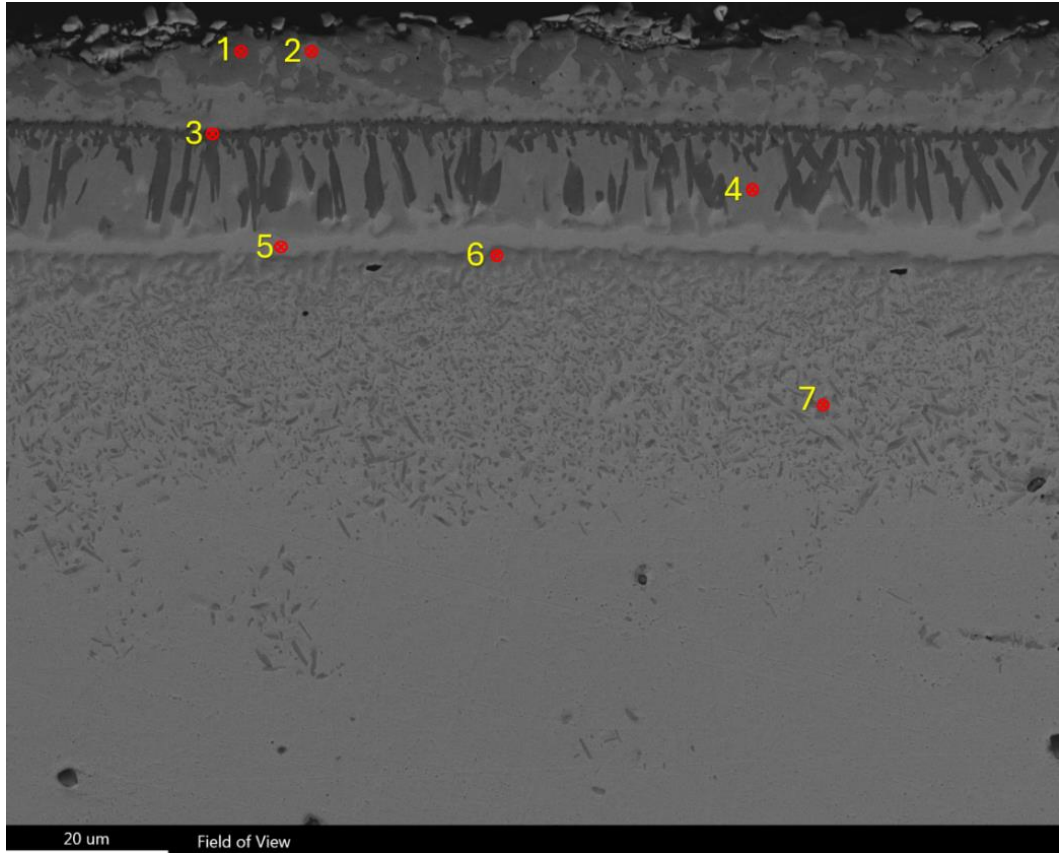


Şekil 6.20: Farklı sürelerde 900°C’de borlama işlemi uygulanan Zr içermeyen ve farklı oranlarda Zr içeren YEA’ların 3. Bölge (geçiş bölgesi) kaplama kalınlıklarının değişimi.

6.4. SEM-EDS Analizi Sonuçları

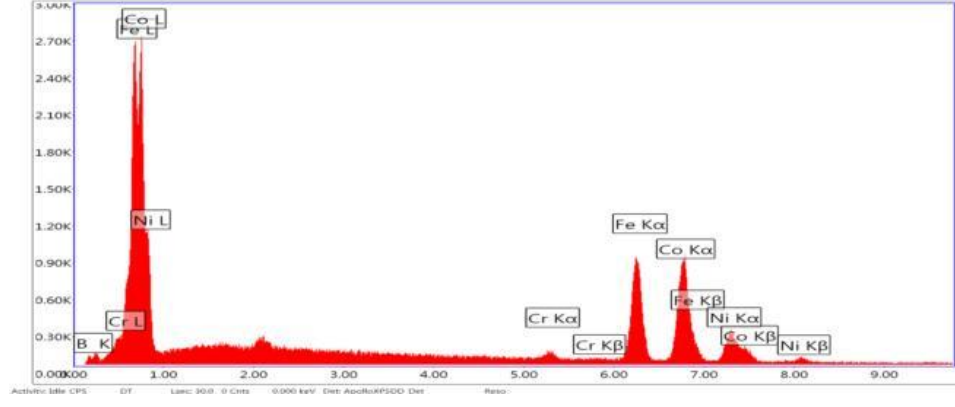
900°C’de 75dk borlama yapılan Zr içermeyen CoCrFeNi YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.21’te verilmiştir.

Şekil 6.21-a’da işaretlenen 1-7 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.21b-h’de verilmiştir. Ayrıca bu noktalardan tespit edilen element miktarları da Tablo 6.5’de verilmiştir.

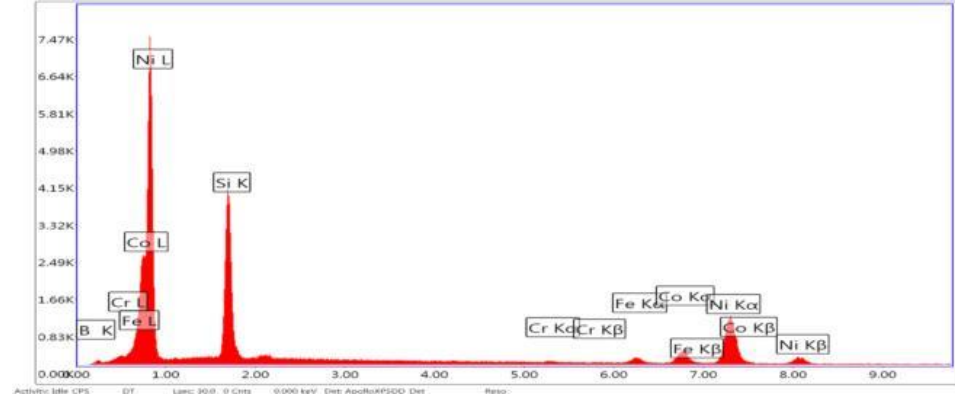


(a)

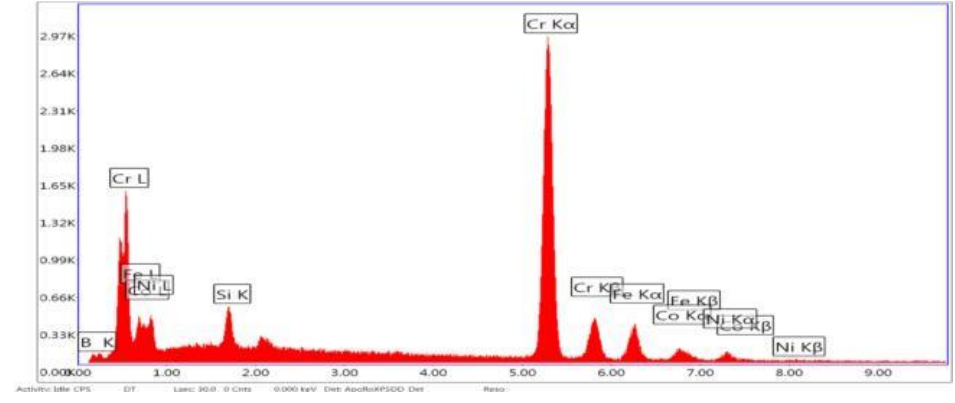
Şekil 6.21: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.



(b)

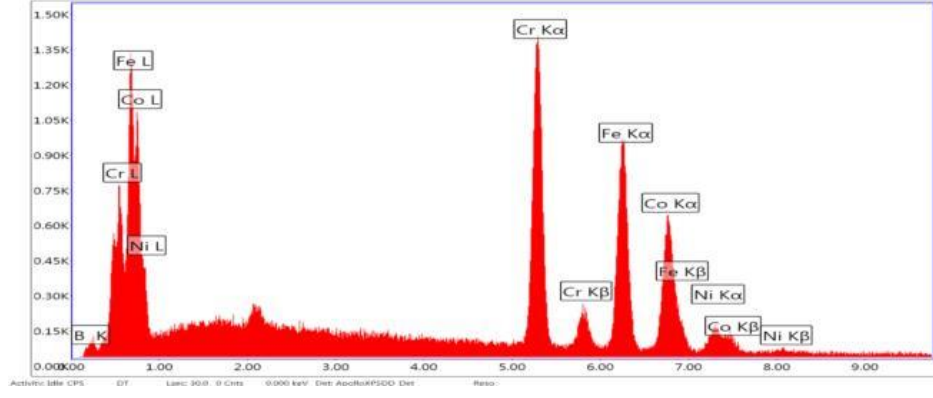


(c)

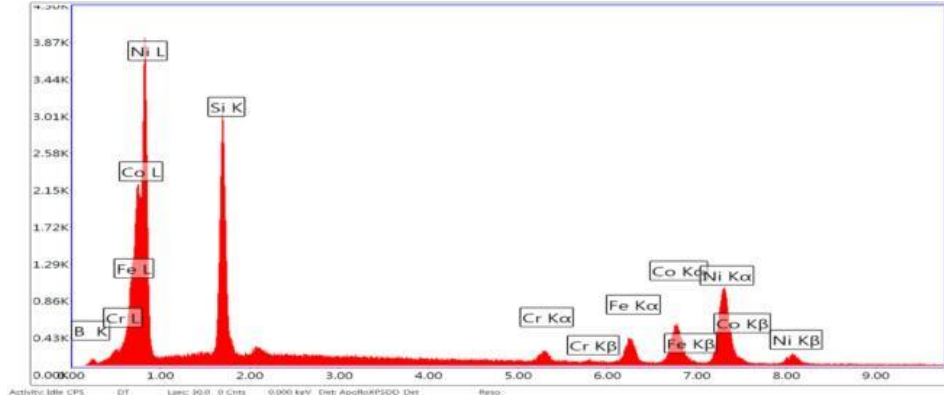


(d)

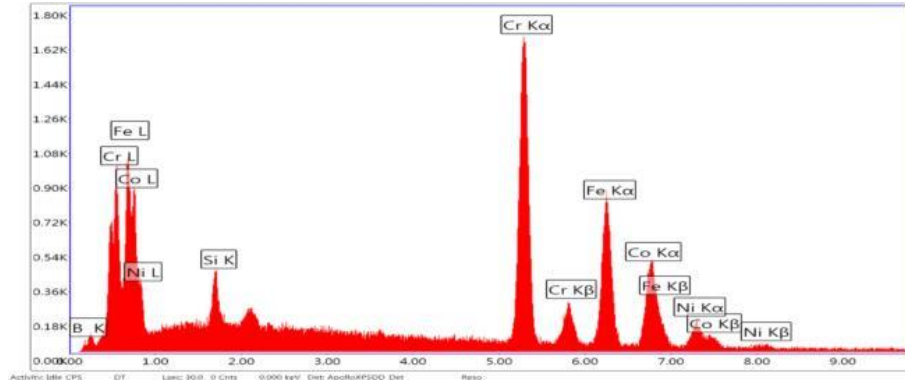
Şekil 6.21 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.



(e)



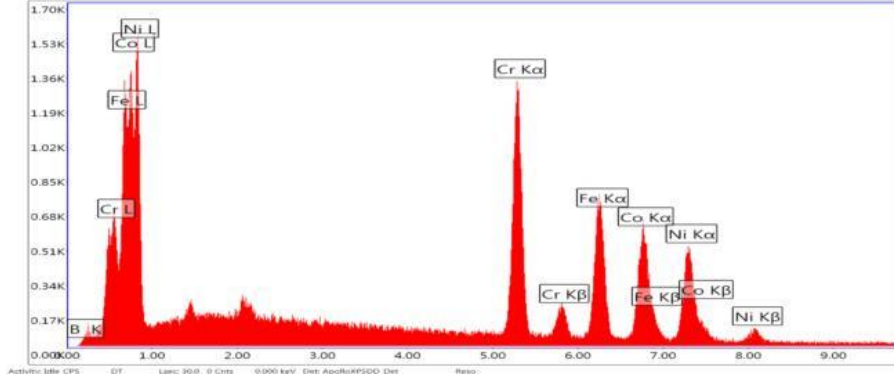
(f)



(g)

Şekil 6.21devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.

a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.



(h)

Şekil 6.21 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.

Tablo 6.5: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.21a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

	Element Miktarı (% Atomik)					
SEM-EDS Analiz Noktası	B	Cr	Fe	Co	Ni	Si
1	56,86	0,57	15,32	19,64	7,61	0,00
2	45,56	0,29	1,62	5,61	28,77	18,15
3	49,13	38,18	6,41	2,38	2,01	1,89
4	46,93	16,00	19,16	14,31	3,60	0,00
5	39,88	1,46	4,49	10,94	27,86	15,37
6	45,01	20,94	16,48	11,86	4,09	1,62
7	44,08	14,39	13,49	13,53	14,51	0,00

Şekil 6.21 ve Tablo 6.5 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B, Co, Fe ve Ni elementlerinin miktarlarının dikkate değer şekilde fazla olduğu görülmektedir. Borlamanın en kuvvetli olarak görüldüğü bu noktada %56,86 B, %19,64 Co, %15,32 Fe ve %7,61 oranında Ni tespit edilmiştir. Bu noktada alaşım elementlerinden Co ve Fe'nin yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bununla beraber, yine borür tabakasının en dış yüzeyine yakın diğer bir nokta olan 2 noktasında yine borlamanın etkisi ile B elementinin %45,56 oranında olduğu ve alaşım elementlerinden olan Fe ve Co'nun miktarlarının yok denecek kadar az olduğu, buna

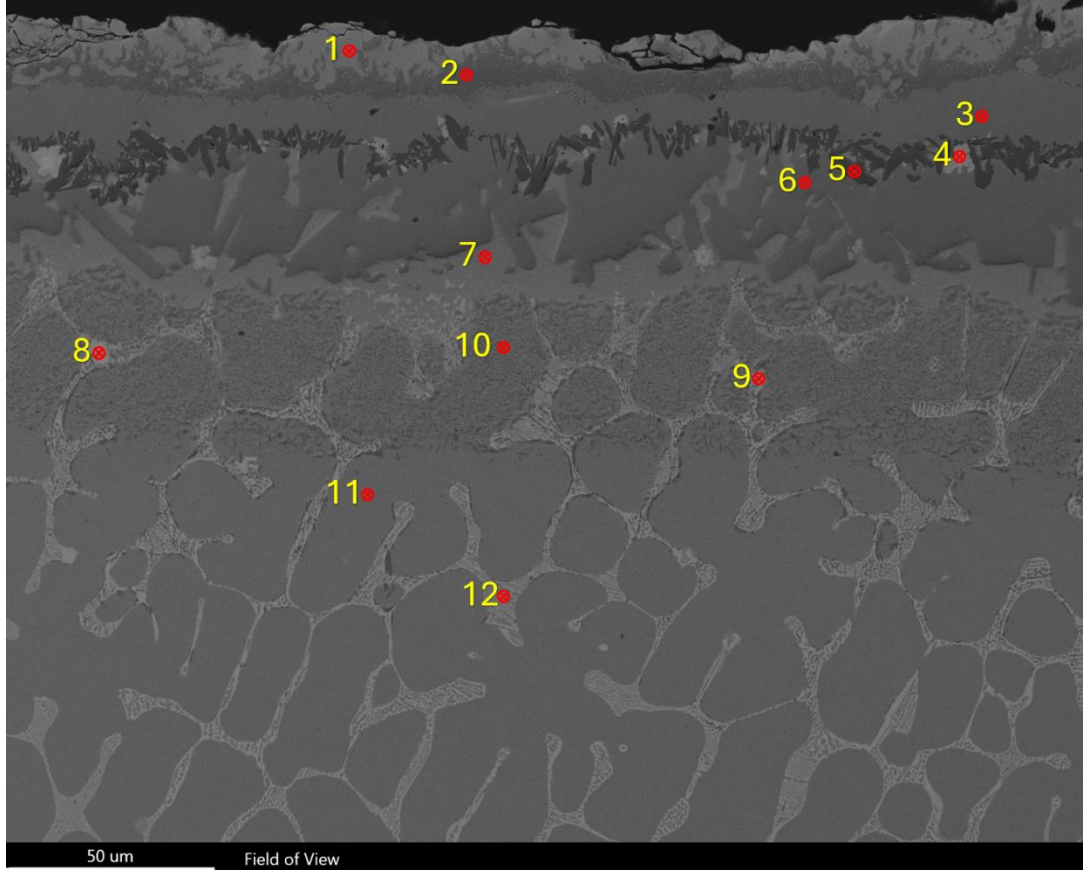
karşılık Ni oranının ciddi şekilde artarak %28,77 oranında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 1 noktasal alanında tespit edilmeyen Si'nin bu noktada %18,15 oranında olduğu görülmüştür. Tespit edilen bu Si'nin borlama işlemi sırasında kullanılan borlama tozundan kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

3 ile işaretlenen noktada, borür tabakasına benzer şekilde yüksek miktarda B ve borür tabakasından farklı olarak Fe, Co, Ni ve Si miktarlarının oldukça düşük olduğu, buna karşılık Cr elementinin miktarının ciddi şekilde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, tespit edilen B miktarı %49,13, alaşım elementlerinden Cr miktarı %38,18 olarak görülmüştür. Geçiş bölgesi içerisinde belirlenen 4 noktasında da borlama kaynaklı B elementinin yüksek miktarda olduğu görülmüştür. Ayrıca alaşım elementlerinden Cr, Fe ve Co'nun bu noktada atomik olarak daha homojen dağıldığı ancak Ni elementinin ciddi oranda düştüğü görülmüştür.

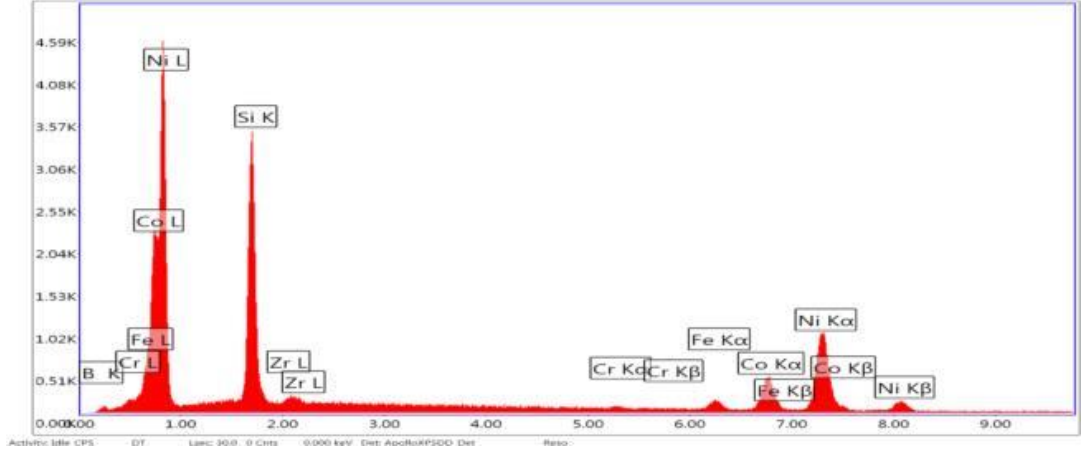
Altlık bölgesine yakın olan üçüncü bölgedeki 5, 6 ve 7 noktalarında da B'nin 900°C'de 75 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNi YEA'da yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 75dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.22'de verilmiştir.

Şekil 6.22-a'da işaretlenen 1-12 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.22b-m'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.6'de verilmiştir.

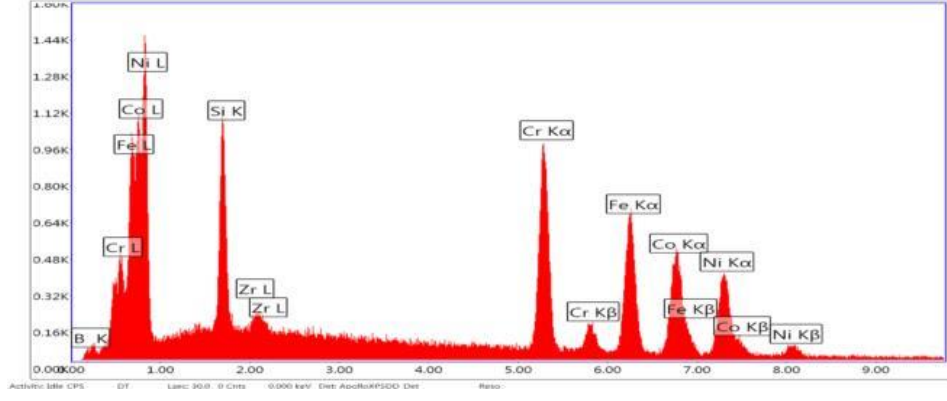


(a)

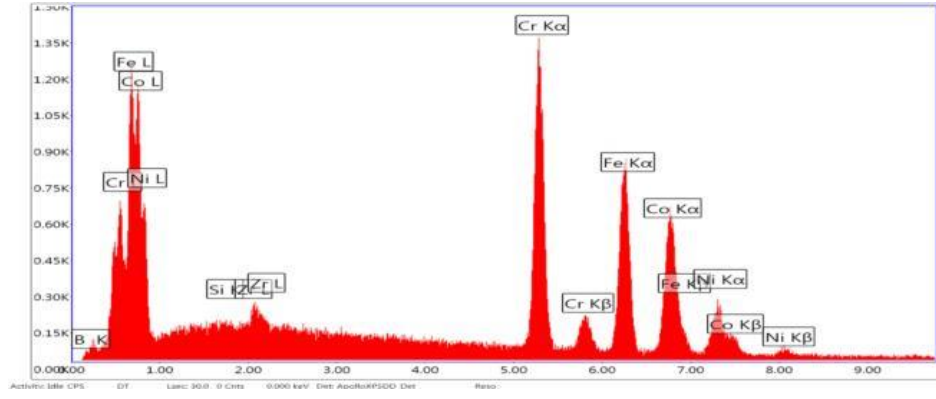


(b)

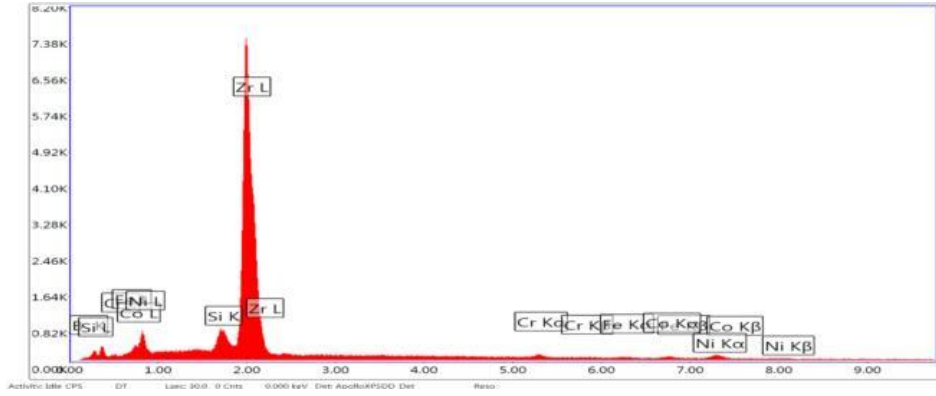
Şekil 6.22: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(c)

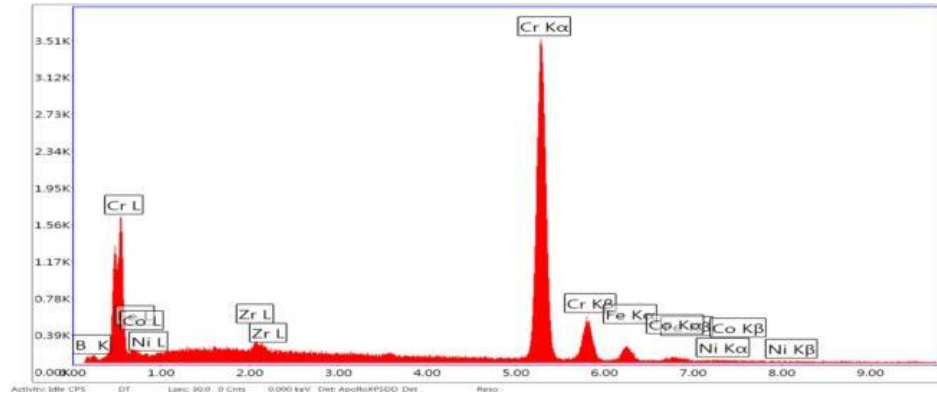


(d)

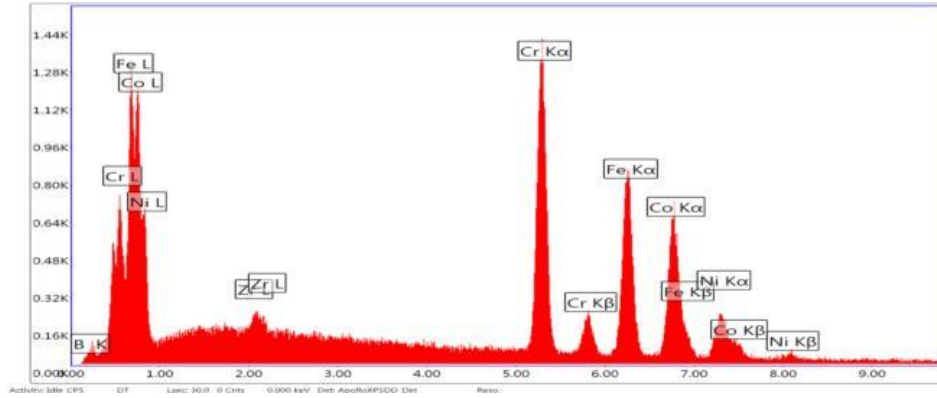


(e)

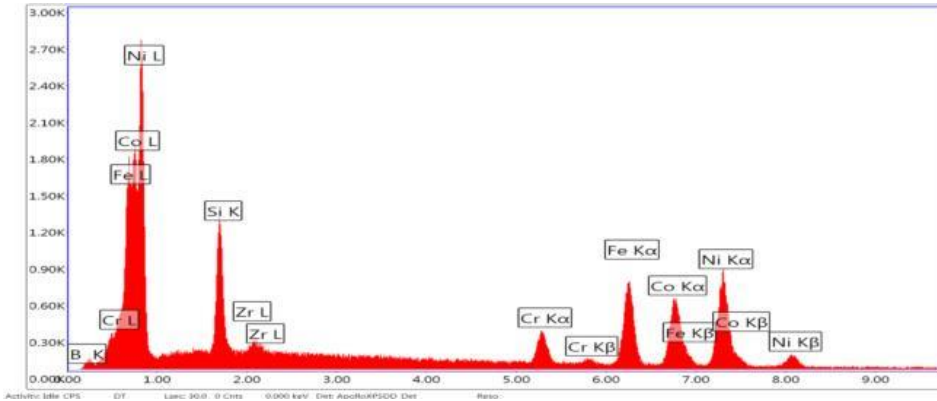
Şekil 6.22 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(f)

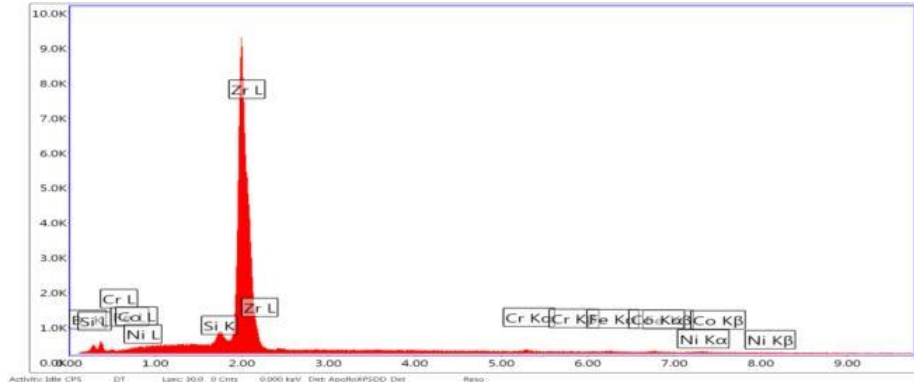


(g)

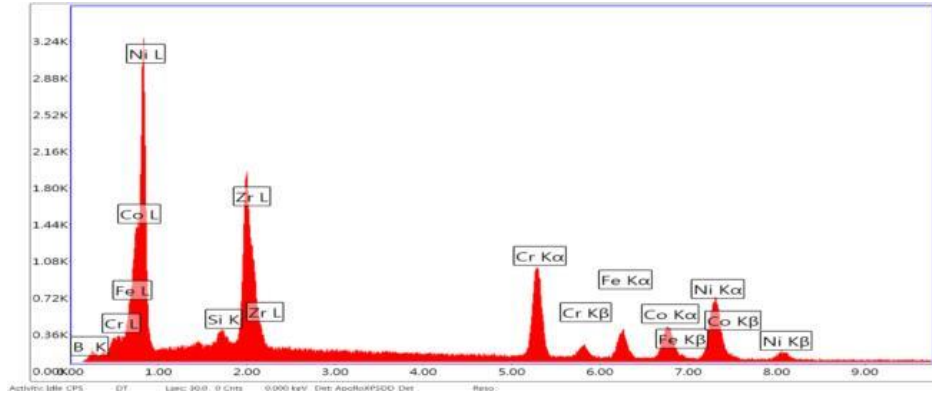


(h)

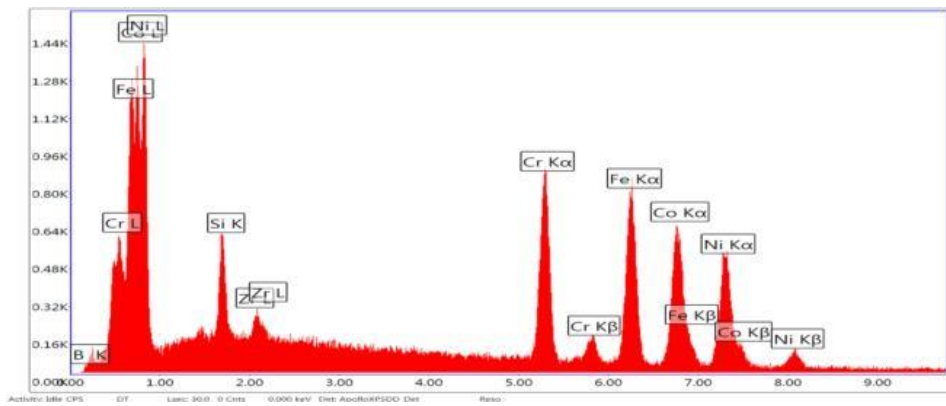
Şekil 6.22 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(i)

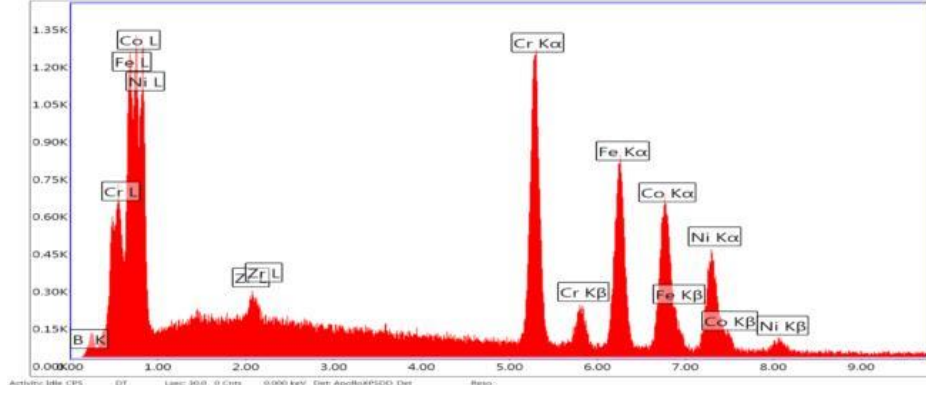


(j)

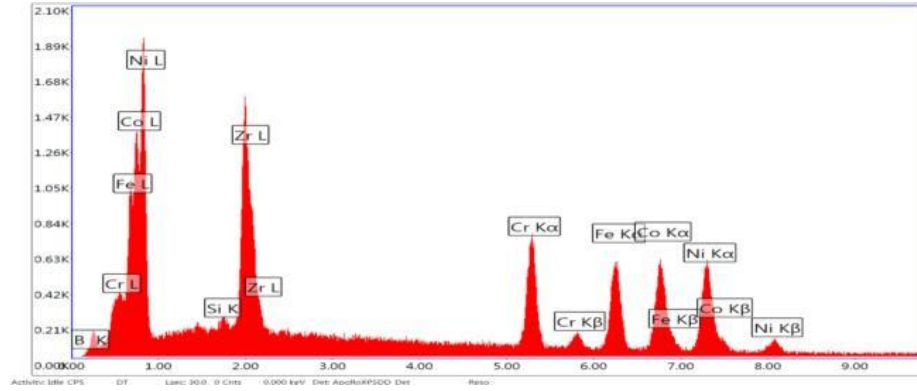


(k)

Şekil 6.22 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(l)



(m)

Şekil 6.22 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.

Tablo 6.6: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil6.22a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	40,39	17,88	0,07	0,34	1,79	9,56	29,97
2	45,03	5,53	0,12	11,48	12,88	12,37	12,59
3	42,95	0,04	0,10	16,16	17,45	16,26	7,04
4	26,77	3,91	56,93	2,28	1,45	2,45	6,22
5	48,50	0,00	0,16	46,56	3,33	1,01	0,43
6	47,47	0,00	0,09	15,16	16,07	14,95	6,26
7	42,46	6,33	0,10	2,91	11,94	13,23	23,03

Tablo 6.6 devam							
8	20,21	1,31	71,54	1,78	1,86	1,44	1,87
9	39,38	0,93	7,52	13,52	5,83	9,37	23,43
10	43,47	2,42	0,08	9,29	14,12	14,84	15,78
11	43,97	0,00	0,12	13,82	14,78	14,90	12,40
12	45,74	0,00	5,23	8,17	10,35	13,17	17,34

Şekil 6.22 ve Tablo 6.6 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B, Ni ve Si elementlerinin miktarlarının dikkate değer şekilde fazla olduğu görülmektedir. Bu noktada %40,39 B, %29,97 Ni, ve %17,88 oranında Si tespit edilmiştir. Tespit edilen bu Si'nin borlama işlemi sırasında kullanılan borlama tozundan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bu noktada alaşım elementlerinden Ni'nin yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bununla beraber, yine borür tabakasının en dış yüzeyine yakın diğer bir nokta olan 2 noktasında yine borlamanın etkisi ile B elementinin %45,03 oranında olduğu ve alaşım elementlerinden olan Ni'nin yanı sıra Fe, Cr ve Co'nun da miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür. Yüzeye yakın olan bu 1 ve 2 noktalarında alaşıma ilave edilen Zr'nin yok denecek kadar az olduğu da tespit edilmiştir.

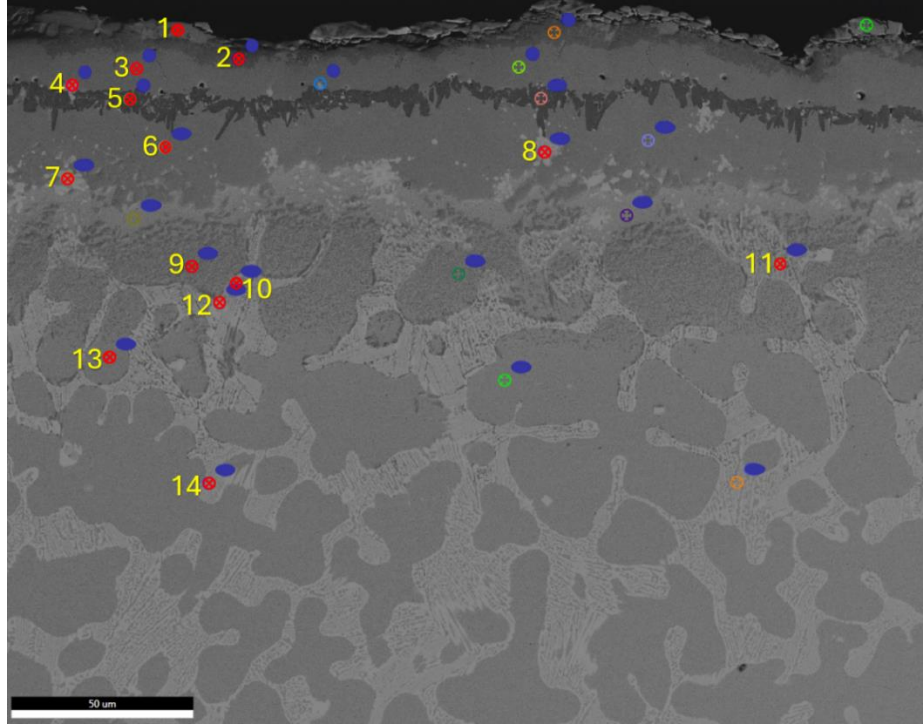
3 ve 5 ile işaretlenen noktalarda, borür tabakasına benzer şekilde yüksek miktarda (%42,95 ve %48,50) B tespit edilmiştir. 3 noktasında alaşım elementlerinden Cr, Fe ve Co neredeyse eşit miktarlarda dağılmış, Ni'nin ise nispeten daha düşük miktarlarda olduğu görülmüştür. 4 noktasında alaşıma ilave edilen Zr'nin %56,93 atomik oranda olacak şekilde çökelti oluşturduğu ve bundan dolayı da B miktarının diğer noktalara göre daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bir diğer nokta olan 6 noktasındaki elemental yapı ise 3 noktasındaki yapı ile benzerlik göstermektedir. 7 noktasında alaşım elementlerinden Ni'nin yoğunlaştığı, Zr'nin ise çok düşük olduğu tespit edilmiştir.

Altılık bölgesine yakın olan üçüncü bölgedeki 8 noktasında 4 noktasına benzer şekilde Zr'nin çökelti oluşturduğu ve buna bağlı olarak da B miktarının düştüğü görülmektedir. Buradaki Zr %71,54, B ise %20,21 oranında bulunmaktadır.

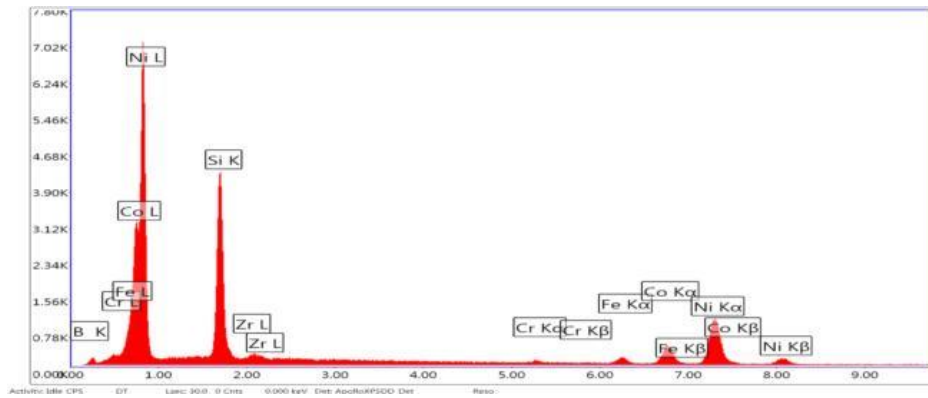
Diğer 9, 10, 11 ve 12 noktalarında Zr oranının azalması ile B'nin miktarlarının arttığı açıkça görülebilmektedir. 900°C'de 75 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.1 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C’de 75dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.23’te verilmiştir.

Şekil 6.23-a’da işaretlenen 1-14 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.23b-o’da verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.7’de verilmiştir.

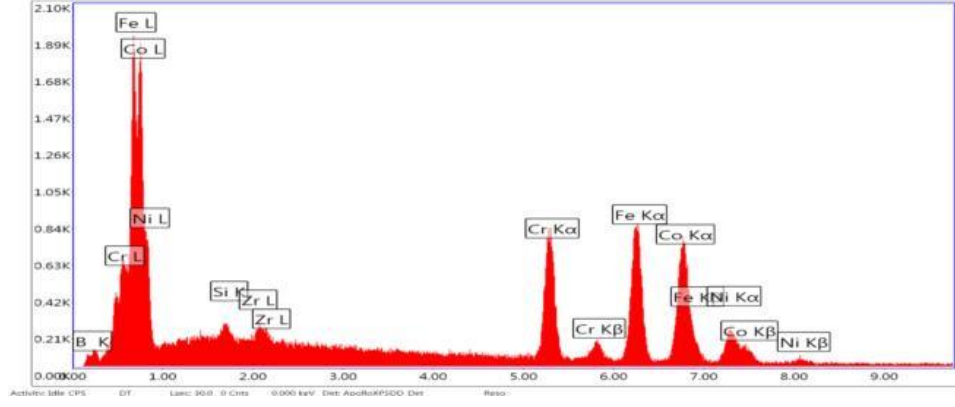


(a)

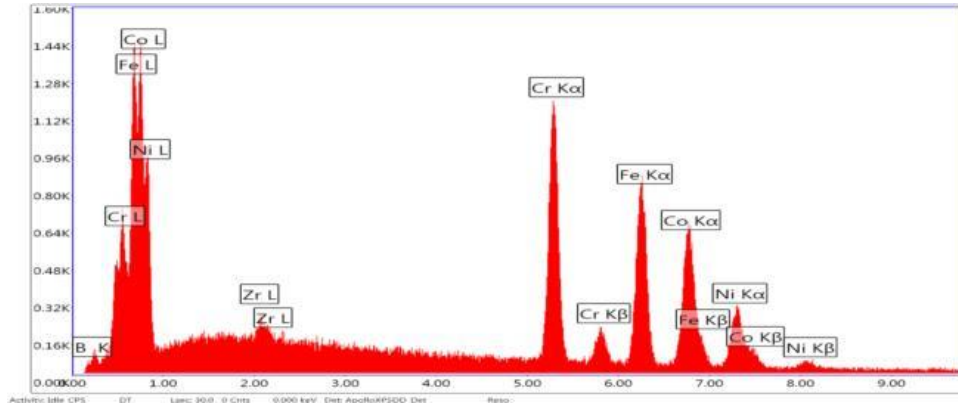


(b)

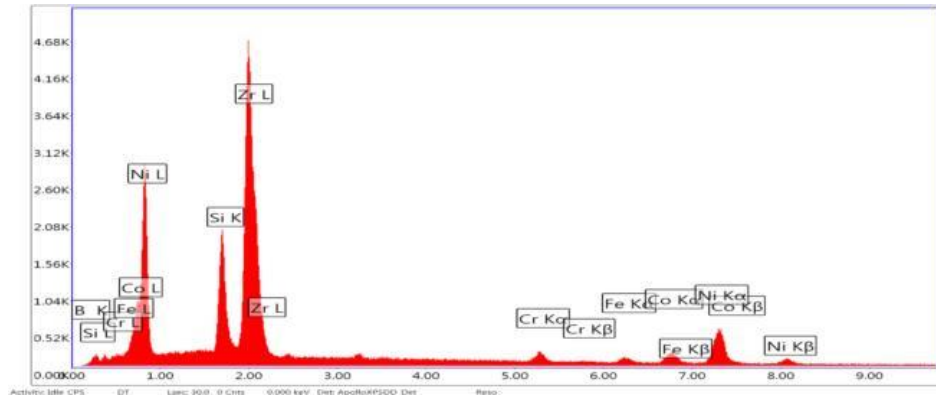
Şekil 6.23: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA’ya ait SEM görüntüsü ve işaretli bölgelerin spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14 noktalarına ait spektrumlar.



(c)

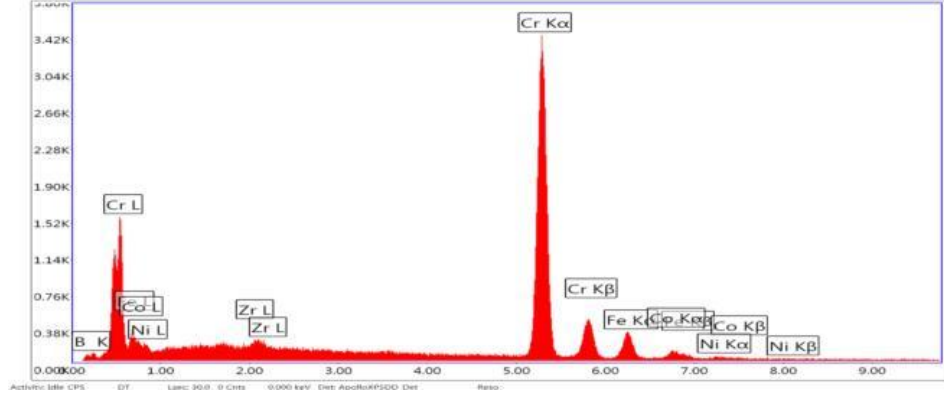


(d)

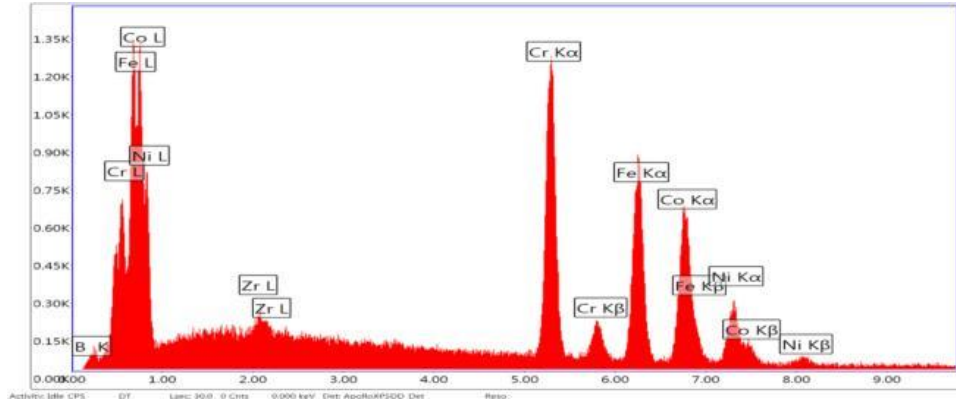


(e)

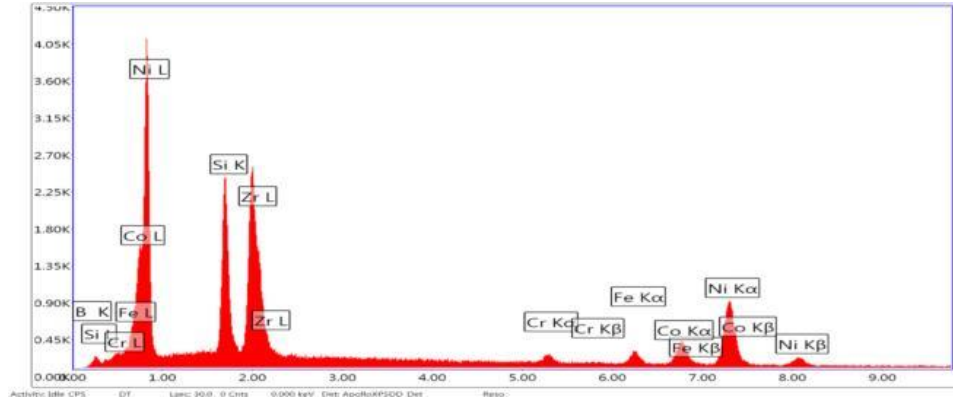
Şekil 6.23 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait SEM görüntüsü ve işaretli bölgelerin spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14 noktalarına ait spektrumlar.



(f)

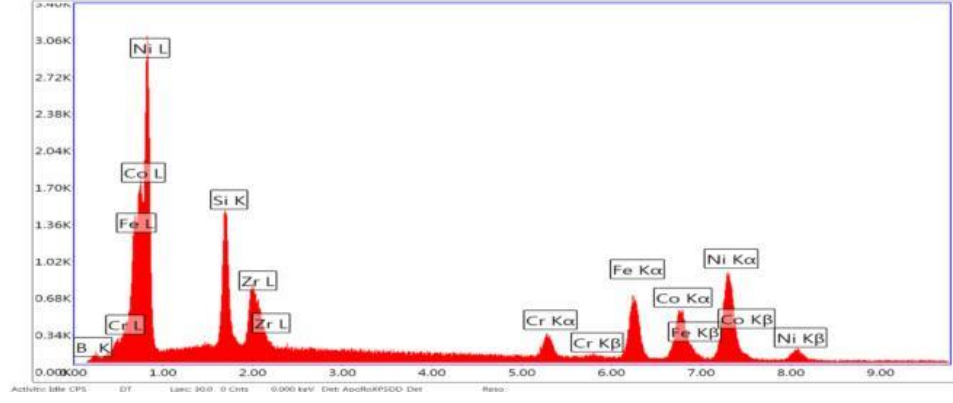


(g)

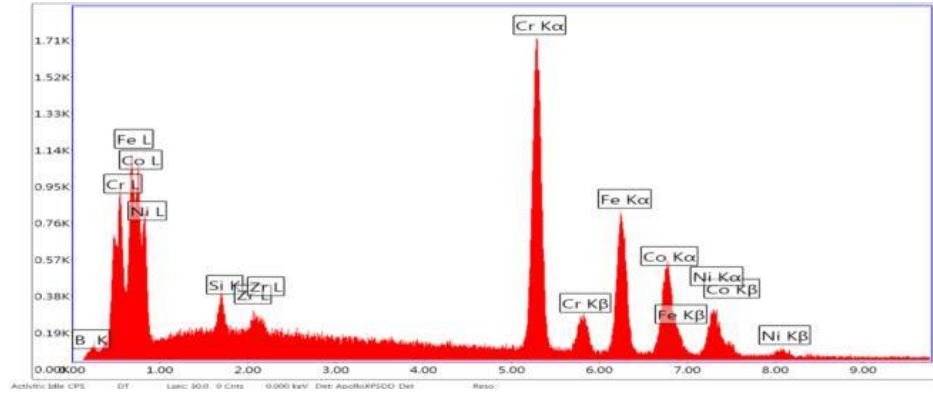


(h)

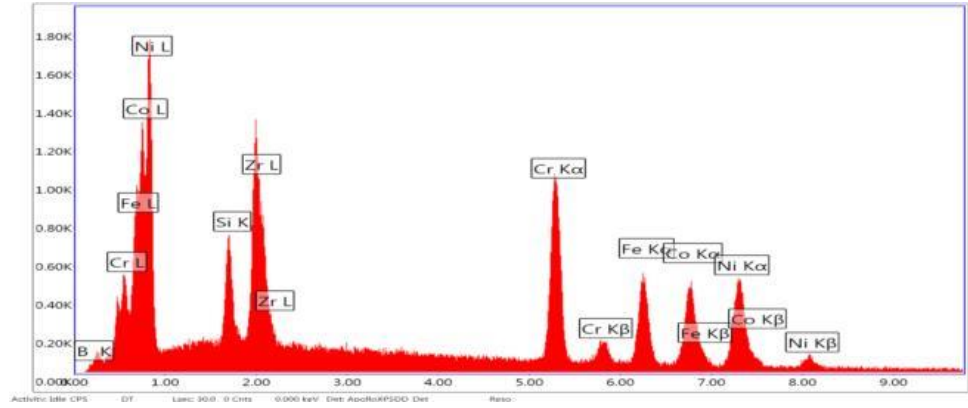
Şekil 6.23 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait SEM görüntüsü ve işaretli bölgelerin spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14 noktalarına ait spektrumlar.



(i)

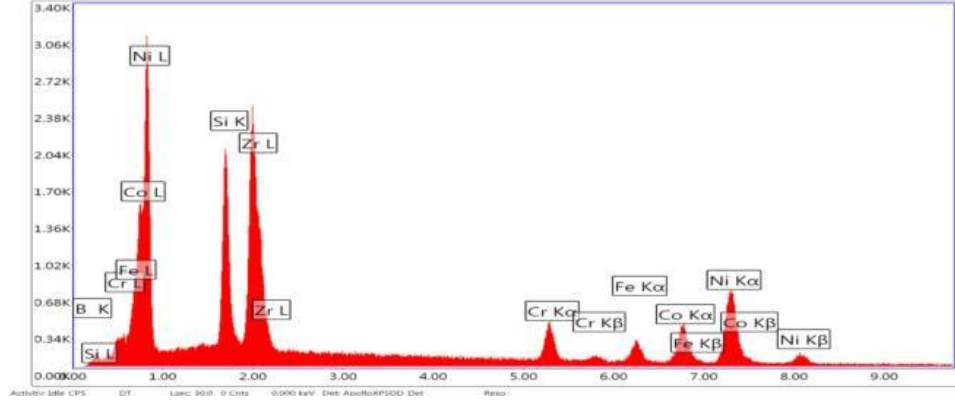


(j)

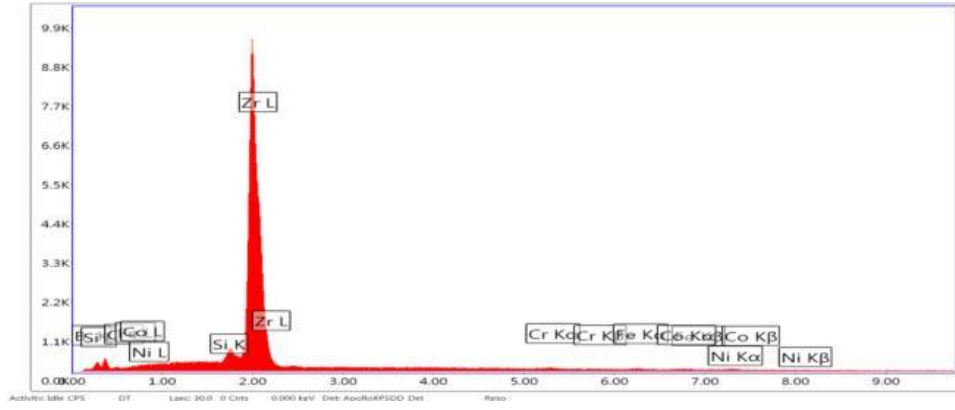


(k)

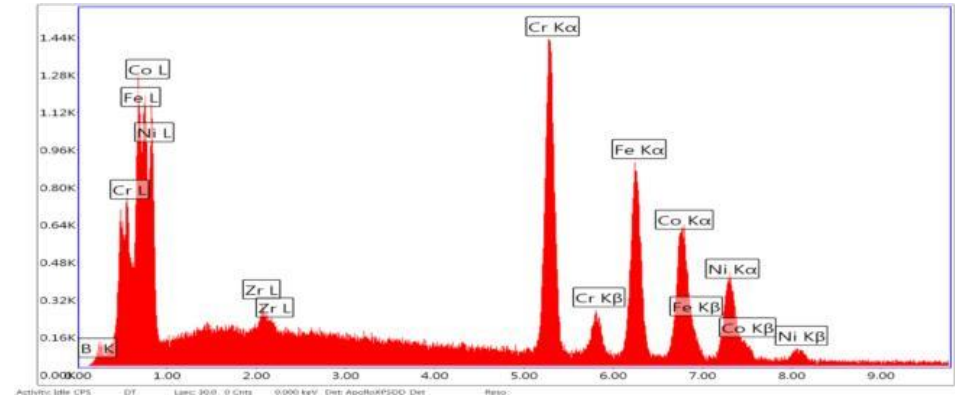
Şekil 6.23 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait SEM görüntüsü ve işaretli bölgelerin spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14 noktalarına ait spektrumlar.



(l)

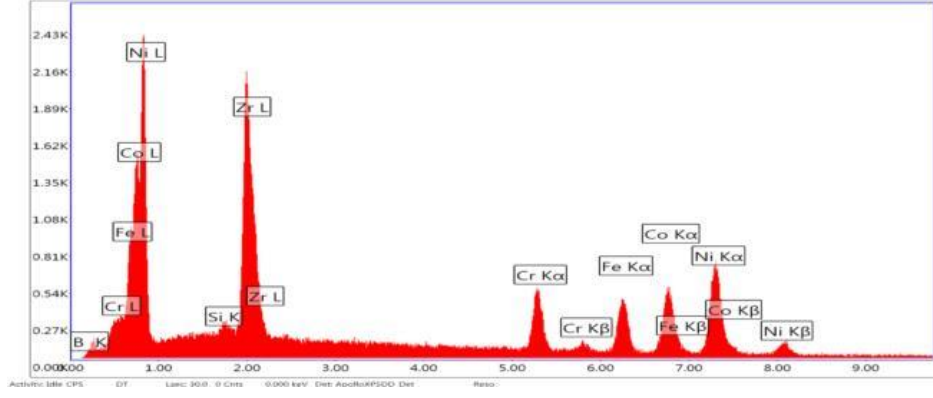


(m)



(n)

Şekil 6.23 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait SEM görüntüsü ve işaretli bölgelerin spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14 noktalarına ait spektrumlar.



(o)

Şekil 6.23 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait SEM görüntüsü ve işaretli bölgelerin spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13 ve o)14 noktalarına ait spektrumlar.

Tablo 6.7: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil6.23a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	52,75	15,90	0,12	0,37	1,32	6,64	22,89
2	54,65	0,64	0,13	7,94	15,00	16,24	5,41
3	50,12	0,00	0,14	12,28	15,13	14,41	7,92
4	34,65	11,61	22,58	2,42	1,91	5,28	21,56
5	47,64	0,00	0,11	44,01	5,77	1,83	0,64
6	47,22	0,00	0,09	14,16	15,88	15,56	7,09
7	39,19	12,40	9,56	1,49	2,87	7,49	26,99
8	38,62	7,68	2,48	2,55	10,34	11,69	26,64
9	41,60	0,95	0,09	21,21	15,49	12,50	8,16
10	41,77	3,11	4,46	13,37	9,56	11,46	16,28
11	35,29	11,33	9,71	4,80	3,90	9,67	25,31
12	20,43	0,53	73,22	1,48	1,36	1,23	1,75
13	43,37	0,00	0,06	15,54	15,68	14,08	11,27
14	39,04	0,13	8,28	6,47	8,53	13,37	24,18

Şekil 6.23 ve Tablo 6.7 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1,2 ve 3 noktaları B'nin en yoğun olduğu bölgelerdir. Aynı zamanda Ni ve Si elementlerinin miktarlarının dikkate değer şekilde fazla olduğu görülmektedir. Bu noktalarda %50'nin üzerinde B tespit edilmiş olup, 1 noktasında alaşım elementi Ni'nin yoğunlaştığı ve atomik oranının %22,89 olduğu ve %15,9 oranında da Si olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu Si'nin borlama işlemi sırasında kullanılan borlama tozundan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Yüzeye yakın olan bu 1, 2 ve 3 noktalarında alaşıma ilave edilen Zr'nin yok denecek kadar az olduğu da tespit edilmiştir. Buna karşılık yine borür tabakasında bulunan 4 noktasında Zr'nin çökelti oluşturduğu ve atomik oranının %22,58 olduğu, buna karşılık yine B miktarının azaldığı ve %34,65 olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, bu noktada borlama kaynağı kaynaklı Si çökeltilerinin de varlığı tespit edilmiştir.

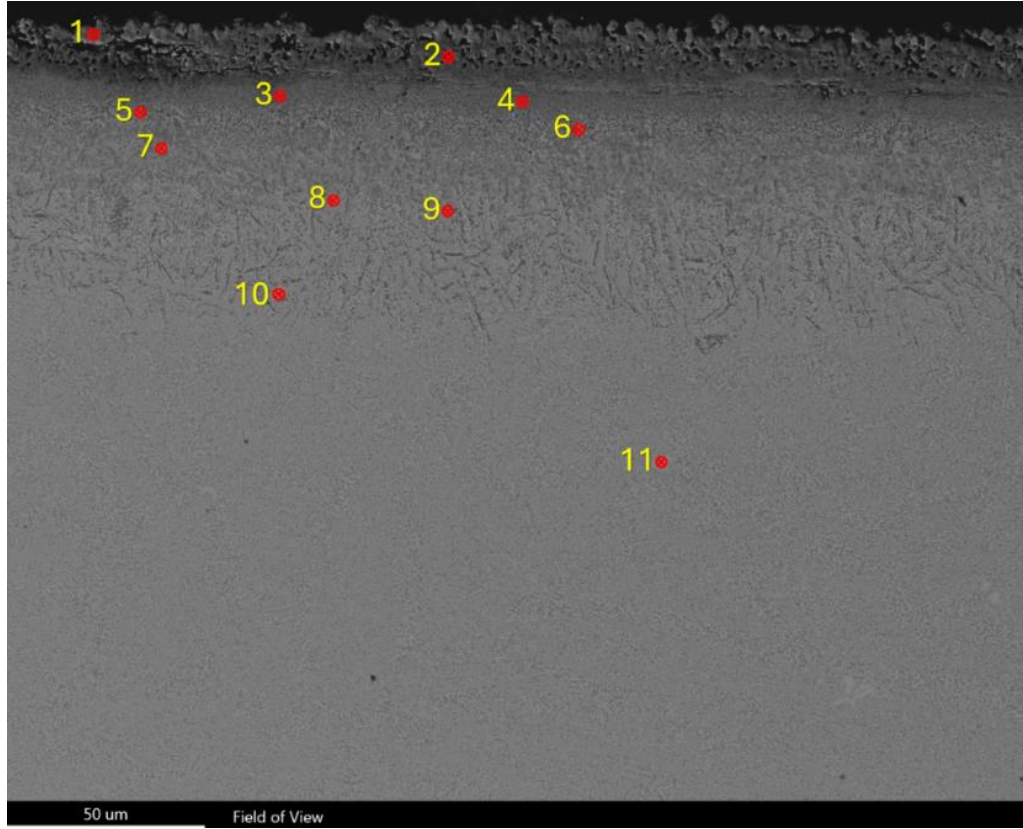
5 noktasında, borür tabakasına benzer şekilde yüksek miktarda (%47,64) B tespit edilmiştir. Bu noktada alaşım elementlerinden Cr'nin %44,01 oranında olduğu ve diğer elementlerin miktarlarının ise ciddi oranda düştüğü görülmüştür.

6, 7 ve 8 noktalarında yine B'nin oranının %40 civarlarında olduğu ve alaşımdaki Zr'nin artması ile nispeten daha düşük olduğu görülmüştür. Bu noktalardan 7 ve 8 noktalarında ise Ni oranının ciddi miktarda arttığı ve %26,99 ve %26,64 oranlarında varlığı tespit edilmiştir.

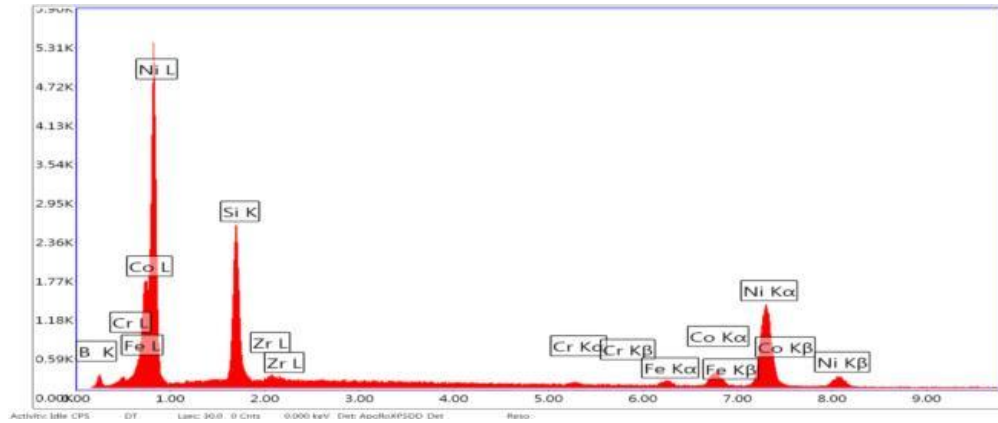
9, 10 ve 11 noktalarında Zr oranının daha düşük olduğu ve B'nin miktarlarının da arttığı açıkça görülebilmektedir. 12 noktasında ise Zr'nin %73,22 oranında bulunduğu var buna karşılık yine B miktarının azaldığı ve %20,43'e düştüğü tespit edilmiştir. 900°C'de 75 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.2 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 75dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.24'te verilmiştir.

Şekil 6.24-a'da işaretlenen 1-11 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.24b-l'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.8'te verilmiştir.

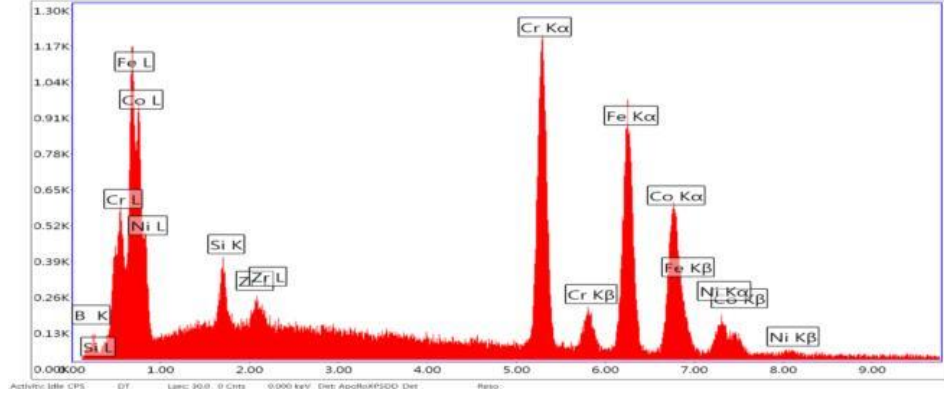


(a)

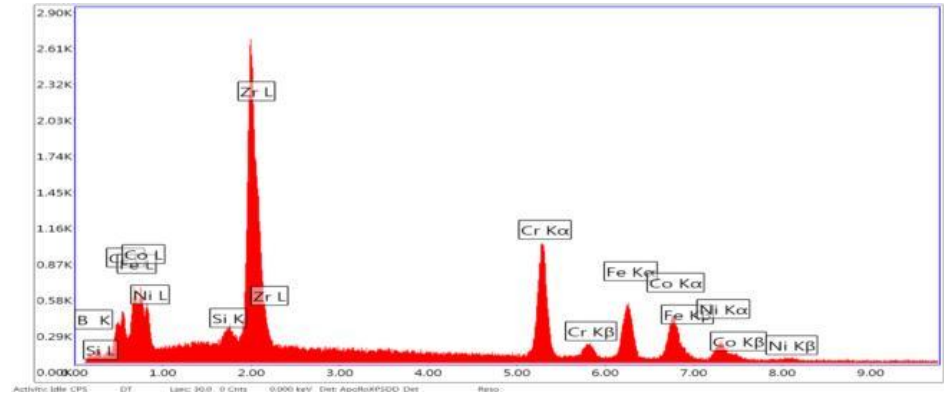


(b)

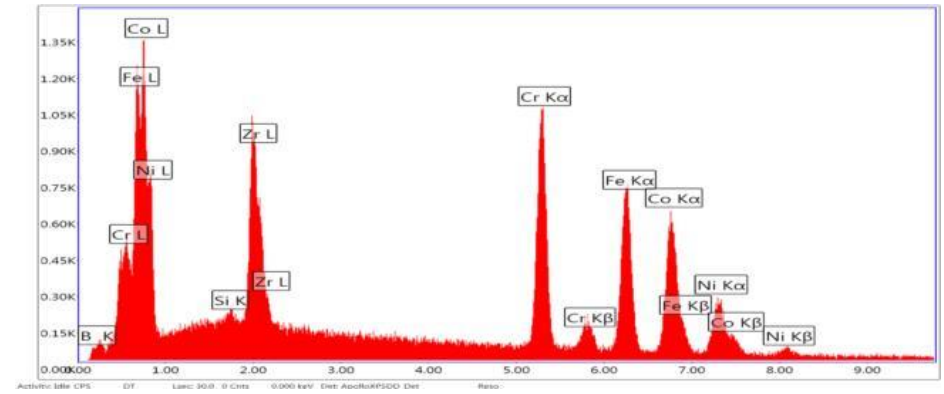
Şekil 6.24: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(c)

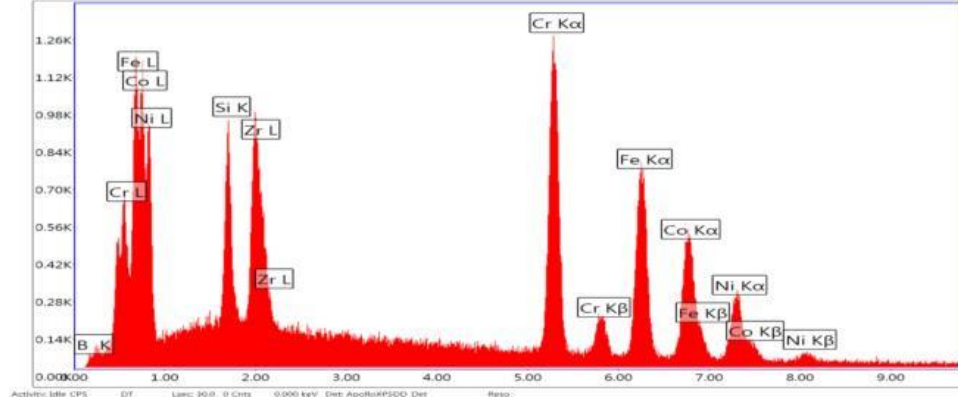


(d)

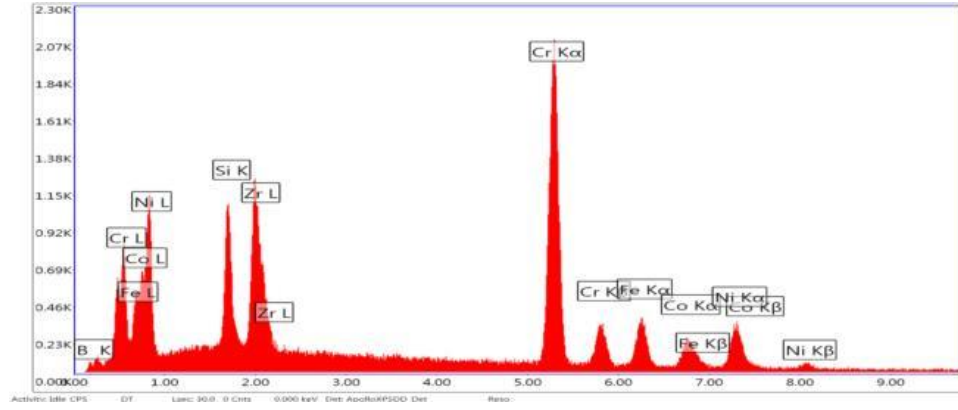


(e)

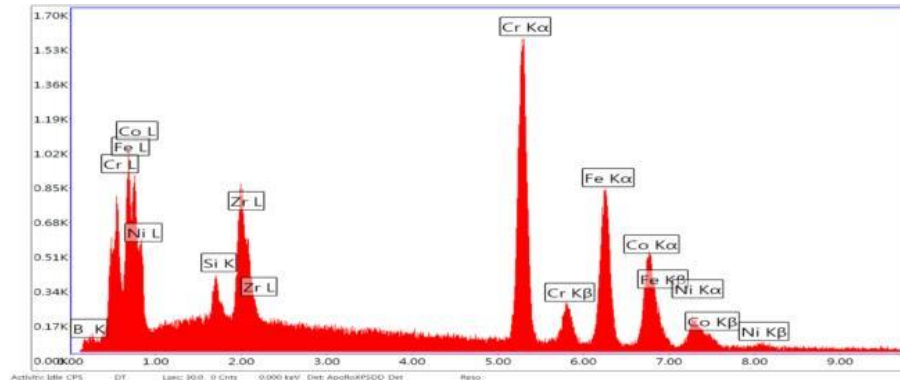
Şekil 6.24 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(f)

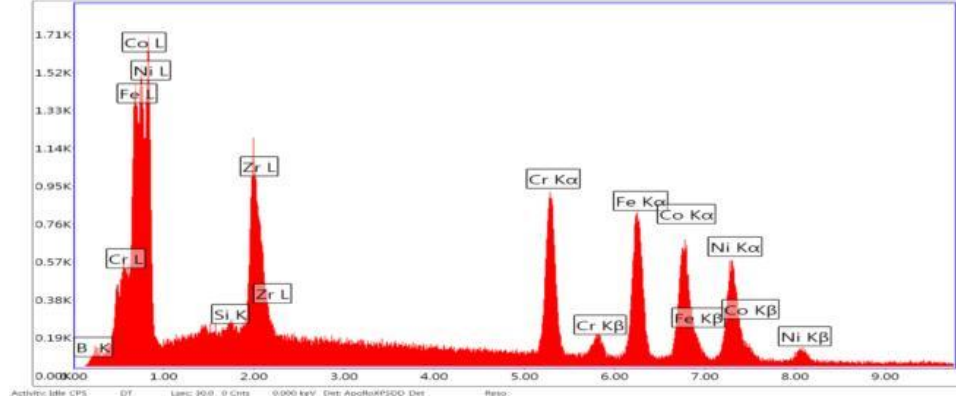


(g)

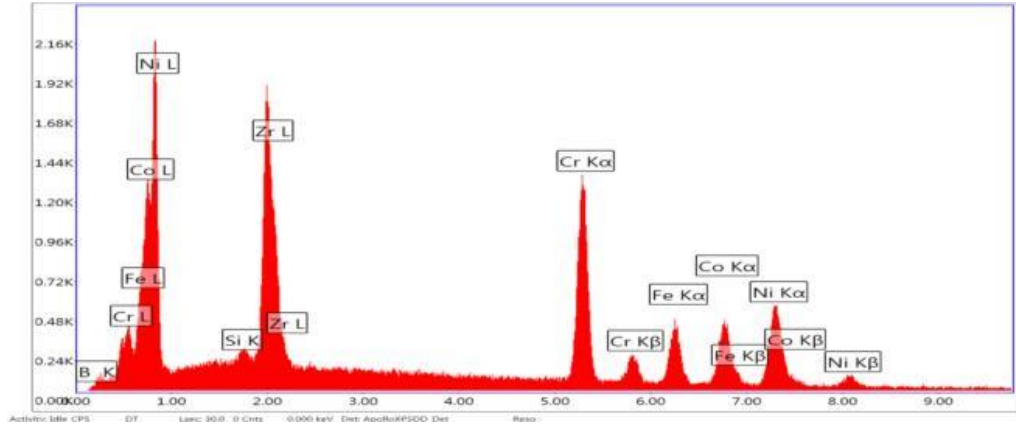


(h)

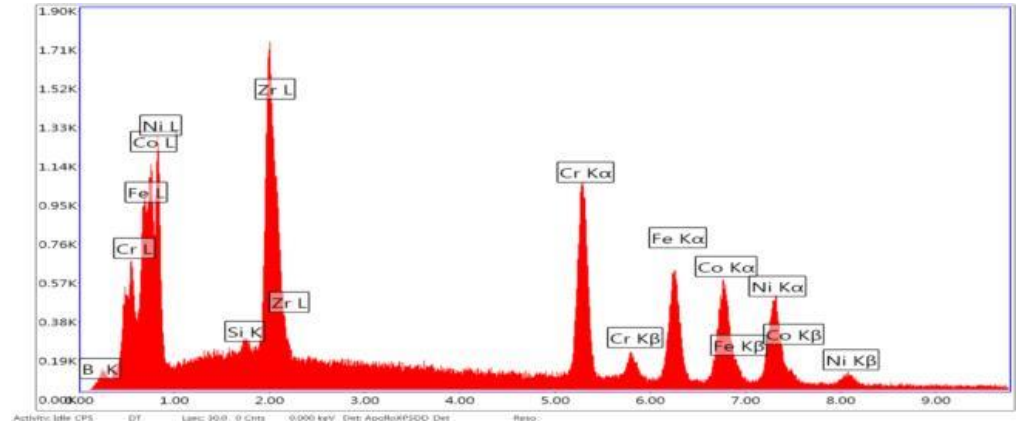
Şekil 6.24 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(i)

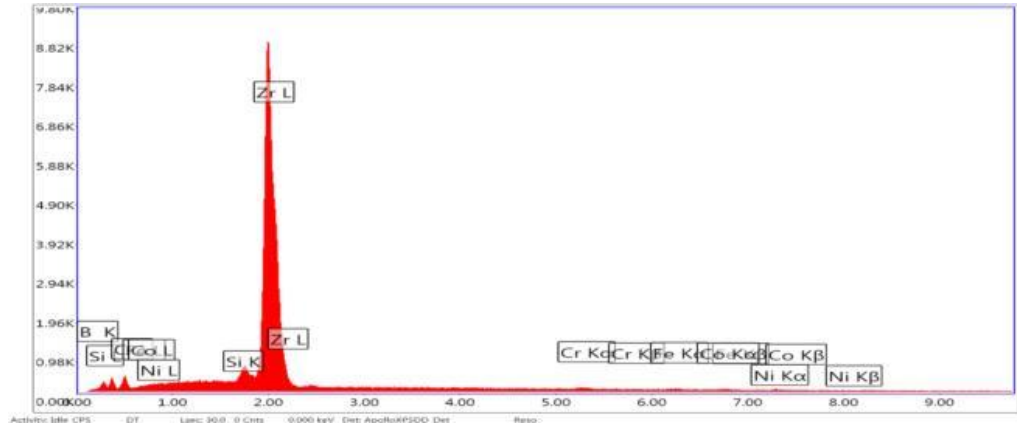


(j)



(k)

Şekil 6.24 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(I)

Şekil 6.24 devam: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.

Tablo 6.8: 75dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.24a) SEM-EDS ile edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	56,67	9,48	0,05	0,37	0,84	3,82	28,77
2	46,41	1,13	0,08	14,26	19,21	14,95	3,96
3	43,53	0,22	11,42	15,77	12,19	11,14	5,73
4	43,88	0,14	3,42	13,19	15,52	15,67	8,18
5	39,36	4,11	3,26	15,42	16,35	12,91	8,59
6	43,27	4,84	3,95	27,35	6,58	4,90	9,12
7	44,38	1,02	2,53	19,12	16,56	11,78	4,60
8	37,72	0,11	3,81	10,62	15,41	15,43	16,92
9	33,52	0,04	7,64	19,14	8,41	11,75	19,49
10	39,04	0,03	6,38	13,52	11,96	13,79	15,29
11	22,90	0,53	70,83	1,75	1,54	1,30	1,15

Şekil 6.24 ve Tablo 6.8 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 ve 2 noktaları B'nin en yoğun olduğu noktalardır. 1 noktasında alaşım

elementlerinden olan Ni'nin yoğunlaştığı (%28,77) ve bunun yanı sıra da borlama tozundan kaynaklandığı düşünülen Si elementi de (%9,48) bulunmaktadır. Yüzeye yakın olan bir diğer nokta olan 2 noktasında ise B'nin yanında ayrıca alaşım elementleri olan Cr'nin %14,26, Fe'nin %19,21 ve Co'nun da %14,95 oranında bulunduğu görülmüştür. Bu 1 ve 2 noktalarında alaşıma ilave edilen Zr'nin yok denecek kadar az olduğu da tespit edilmiştir.

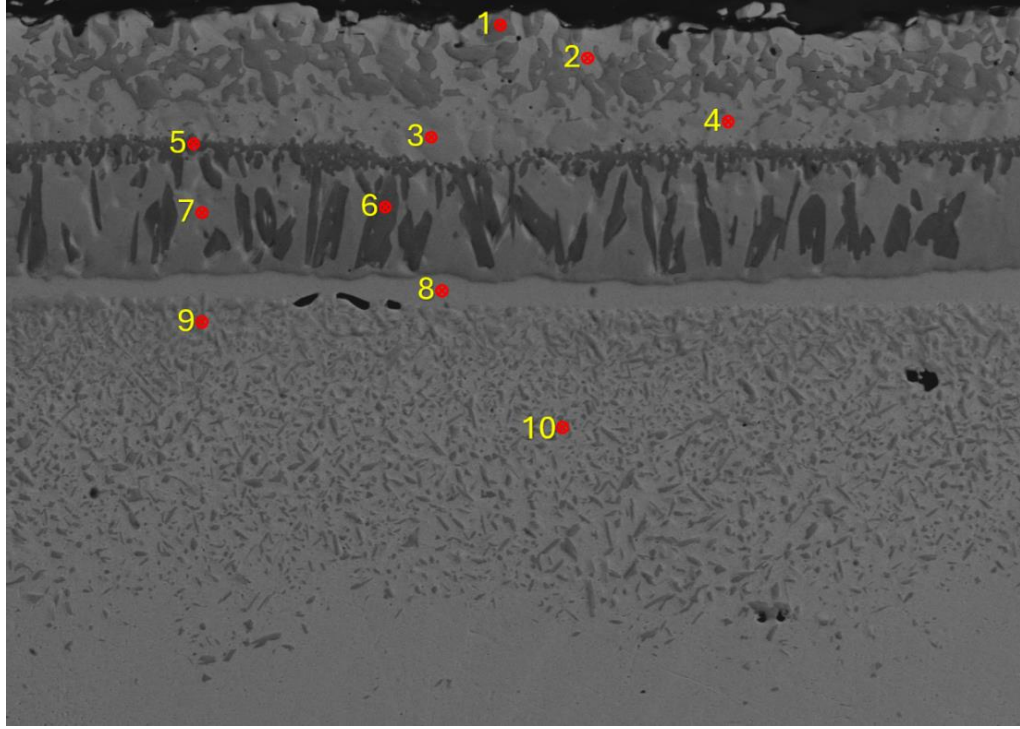
3 ile işaretlenen noktada, borür tabakasına benzer şekilde yüksek miktarda (%43,53) B tespit edilmiştir. Bu noktada alaşıma ilave edilen Zr'nin borür tabakasına göre daha fazla yoğunlaşarak %11,42 oranında bulunduğu anlaşılmaktadır. 4 noktasında ise Zr oranının daha düşük olduğu görülmektedir.

Geçiş bölgesi içerisinde belirlenen 5, 6 ve 7 noktalarında yine B'nin oranının %40 civarlarında olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu noktalarda kısmi olarak Si tespit edilmiş olup özellikle 6 ile işaretlenen noktada Cr elementinin oranın çok daha yüksek olduğu, buna karşılık Fe ve Co elementlerinin oranlarının daha düşük olduğu da tespit edilmiştir.

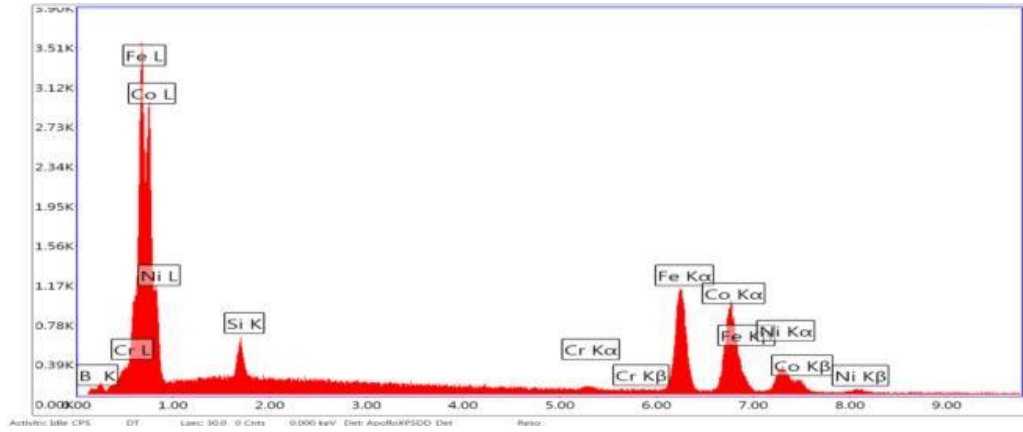
Altlık bölgesine yakın olan üçüncü bölgedeki 8, 9, 10 ve 11 noktalarında Zr oranının nispeten daha yüksek olduğu ve B'nin miktarlarının da benzer şekilde azaldığı açıkça görülebilmektedir. Özellikle 11 noktasında Zr'nin %70,83 oranında bulunduğu, buna karşılık B miktarının azaldığı ve %22,90'a düştüğü tespit edilmiştir. 900°C'de 75 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu ancak altlık malzemesine doğru ilerlendikçe difüzyon miktarının azaldığı % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 150dk borlama yapılan Zr içermeyen CoCrFeNi alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.25'de verilmiştir.

Şekil 6.25-a'da işaretlenen 1-10 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.25b-k'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.9'te verilmiştir.

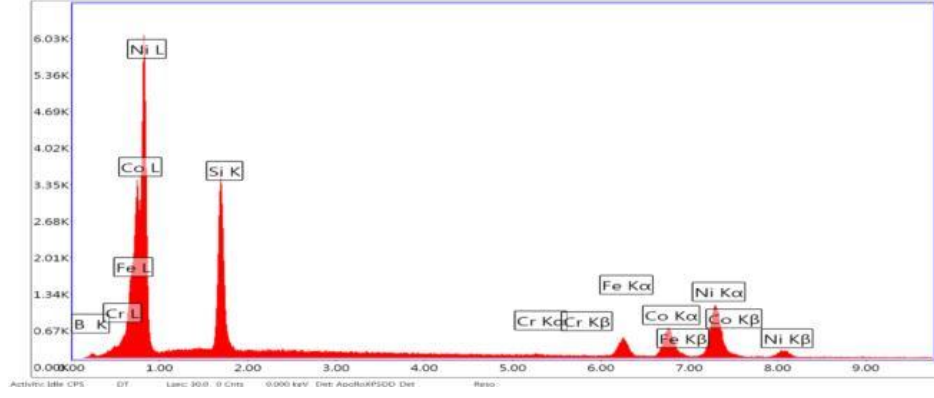


(a)

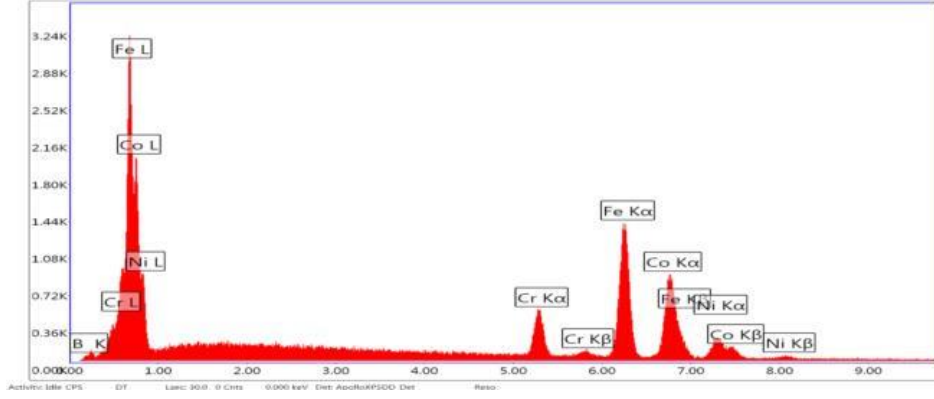


(b)

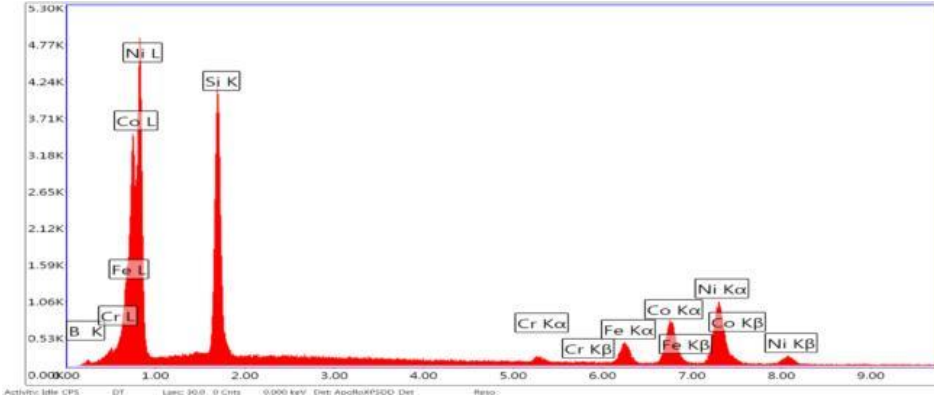
Şekil 6.25: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesiten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(c)

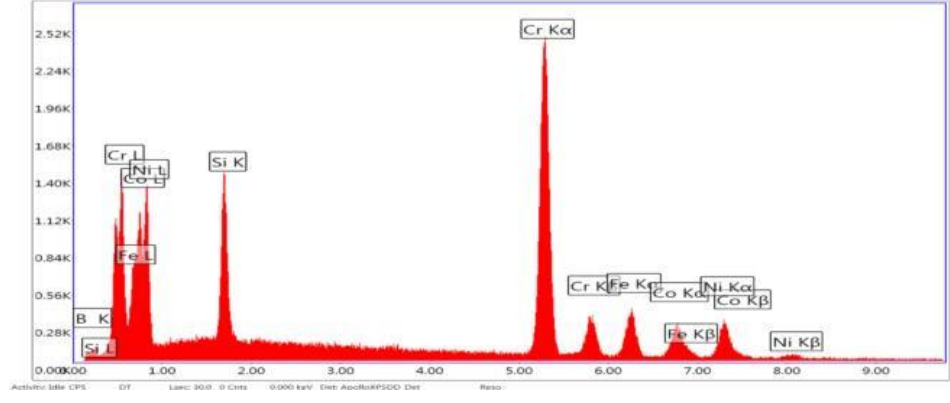


(d)

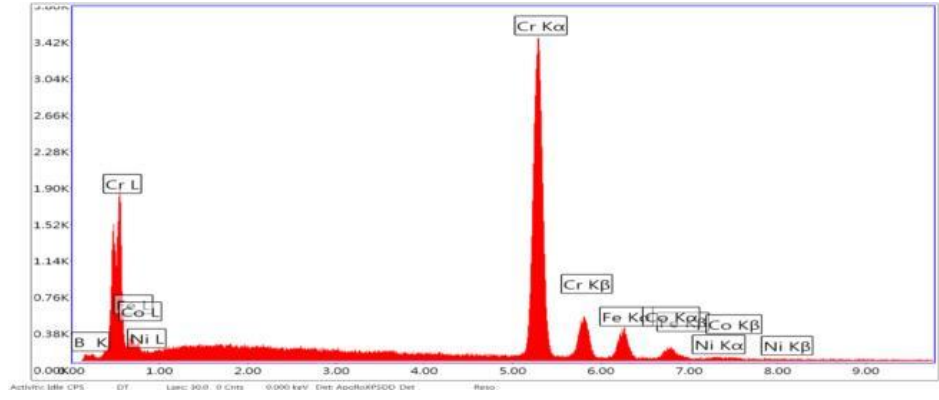


(e)

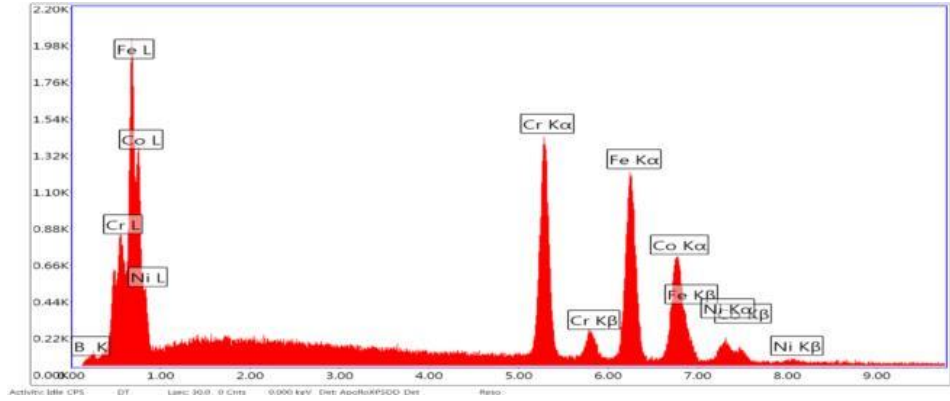
Şekil 6.25 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesiten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(f)

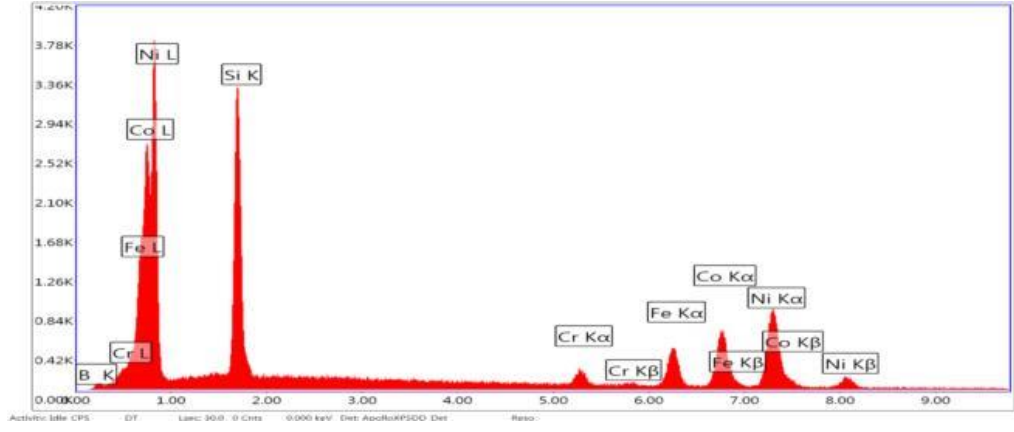


(g)

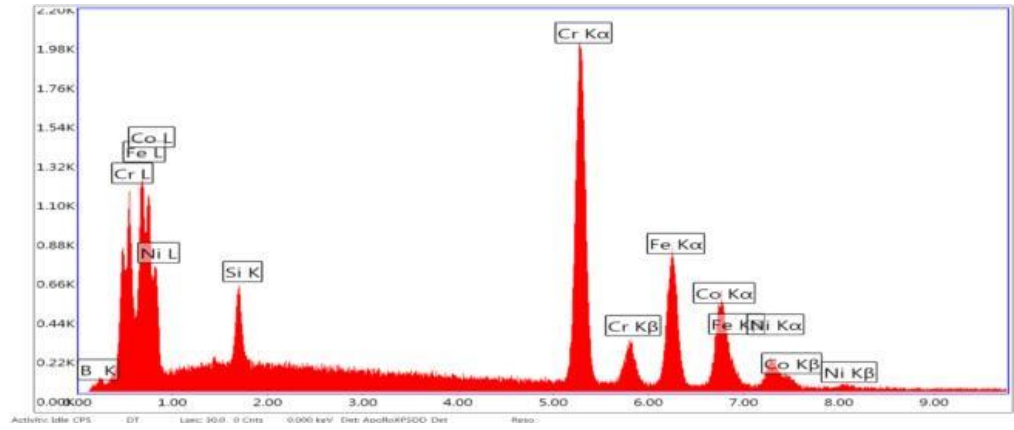


(h)

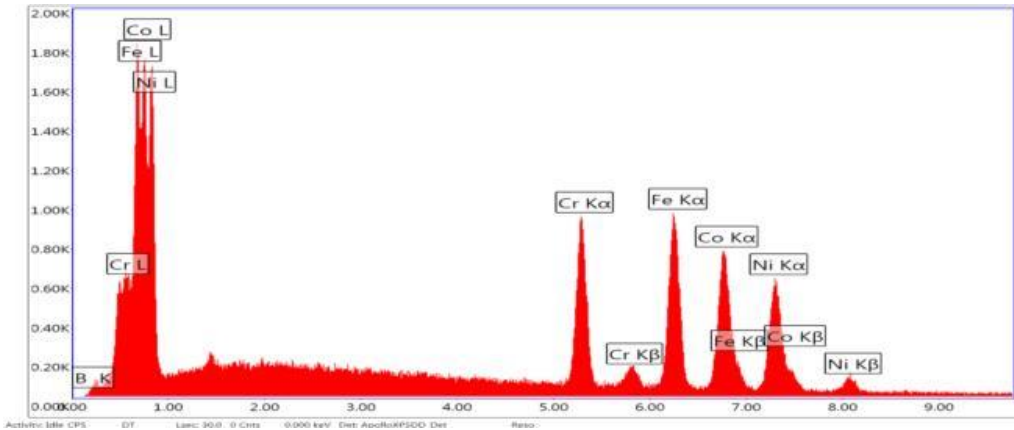
Şekil 6.25 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesiten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(i)



(j)



(k)

Şekil 6.25 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesiten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.

Tablo 6.9: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.25a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

	Element Miktarı (% Atomik)					
SEM-EDS Analiz Noktası	B	Si	Cr	Fe	Co	Ni
1	52,07	1,89	0,33	18,17	19,76	7,79
2	40,24	16,01	0,32	4,97	11,37	27,09
3	48,24	0,00	4,09	23,33	18,35	5,99
4	35,86	19,63	0,95	4,48	13,79	25,29
5	49,69	5,59	26,42	6,00	5,16	7,14
6	48,08	0,00	42,54	6,18	2,63	0,57
7	44,61	0,00	14,11	22,16	15,40	3,71
8	33,85	17,46	1,77	6,77	14,04	26,11
9	40,05	2,31	24,32	15,51	12,68	5,13
10	38,60	0,00	9,45	16,53	17,46	17,96

Şekil 6.25 ve Tablo 6.9 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B oranının çok yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktada alaşım elementlerinden olan Cr'nin eser miktarda olmasına karşılık Fe %18,17, Co %19,76 ve Ni ise %7,79 oranında tespit edilmiştir. Borür tabakası içerisindeki bir diğer nokta olan 2 noktasında ise borlama tozu kaynaklı Si %16,01, alaşım elementlerinden Ni ise %27,09 oranında olduğu anlaşılmıştır. Bu noktadaki B oranı ise 1 noktasına göre biraz daha düşük olup %40,24 olarak görülmüştür.

3 ile işaretlenen noktada, borür tabakasına benzer şekilde yüksek miktarda (%48,24) B tespit edilmiştir. Bu noktada B'nin yanı sıra alaşım elementlerinden Fe ve Co'nun da yüksek miktarlarda bulunduğu tespit edilmiştir. Aynı bölgedeki 4 noktasında ise B oranı nispeten düşerek %35,86 olmuş buna karşılık Si miktarı ise %19,63 olarak görülmüştür.

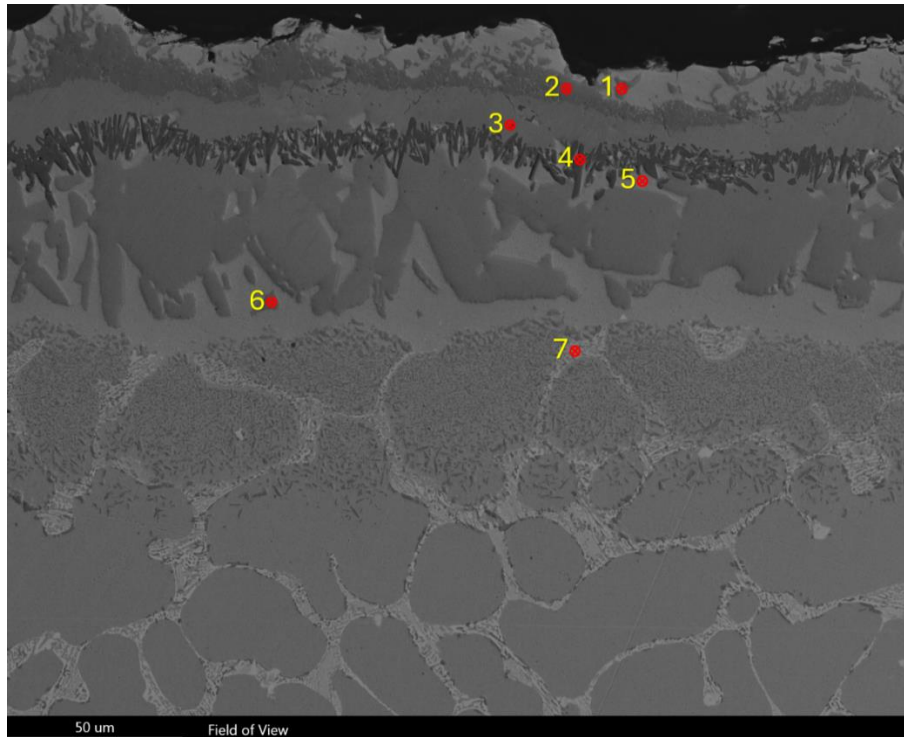
Geçiş bölgesi içerisinde belirlenen 5, 6 ve 7 noktalarında yine B'nin oranının yüksek olduğu net bir şekilde görülmektedir. 5 noktasında %49,69, 9 noktasında %48,08 ve 10 noktasında ise %44,61 oranında B tespit edilmiştir. Özellikle 6 noktasında Cr

elementinin oranın çok daha yüksek olduğu, buna karşılık Fe, Co ve Ni elementlerinin oranlarının daha düşük olduğu da tespit edilmiştir.

8 noktasında yüksek oranda Si (%17,46) tespit edilmiştir. Bununla beraber bu bölgede Ni oranının da artmasıyla atomik olarak B oranının (%33,85) düştüğü görülmüştür. Altlık bölgesine yakın olan 9 ve 10 noktalarında ise yine B oranının %40,05 ve %38,6 olduğu tespit edilmiş ve özellikle 9 noktasında alaşım elementlerinden Cr oranının %24,32 olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık olarak, 10 noktasında ise alaşım elementlerinin daha homojen bir dağılım gösterdiği görülmüştür.

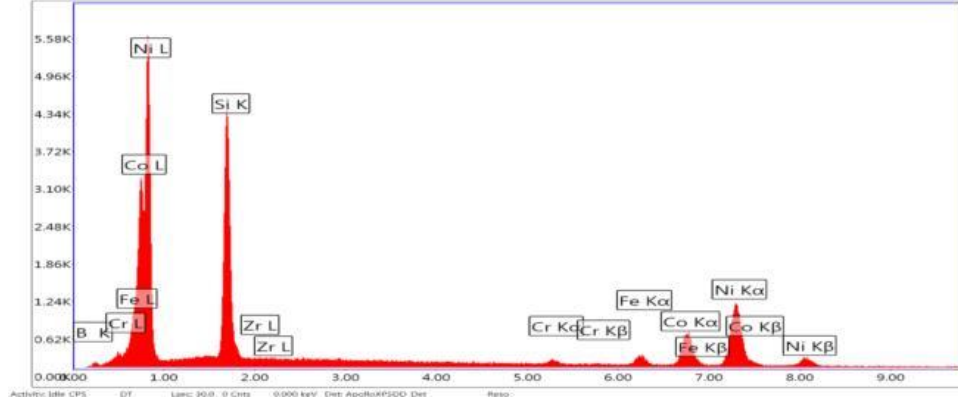
900°C’de 150dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.26’da verilmiştir.

Şekil 6.26-a’da işaretlenen 1-7 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.26b-h’de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.10’da verilmiştir.

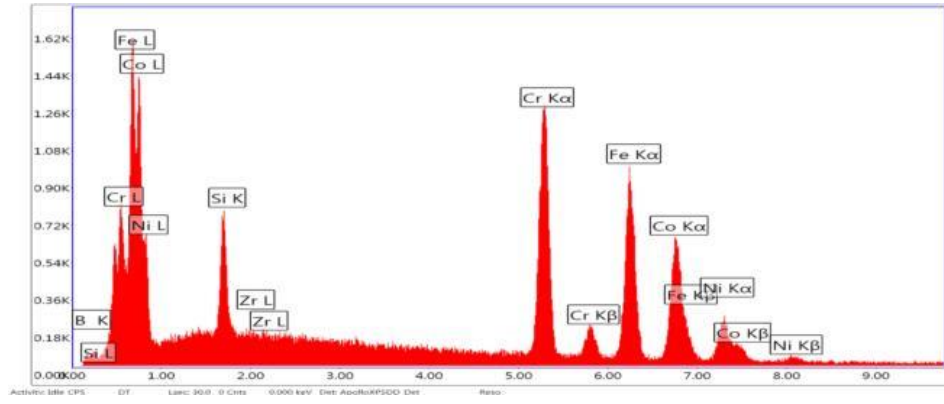


(a)

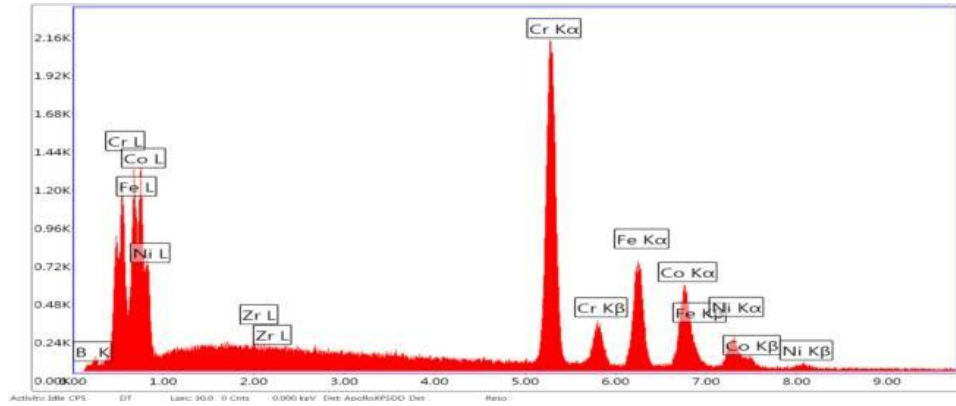
Şekil 6.26: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.



(b)

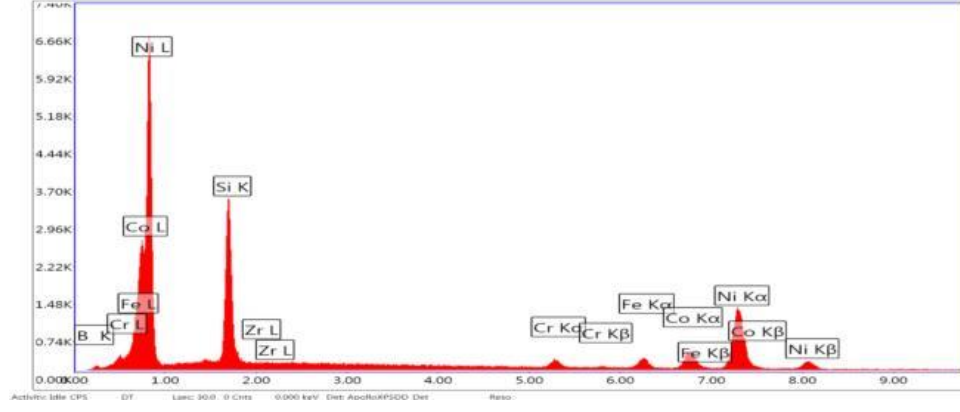


(c)

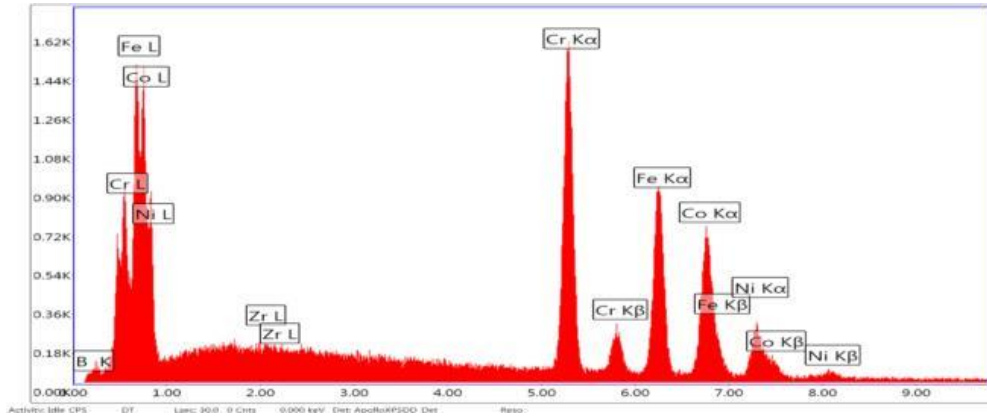


(d)

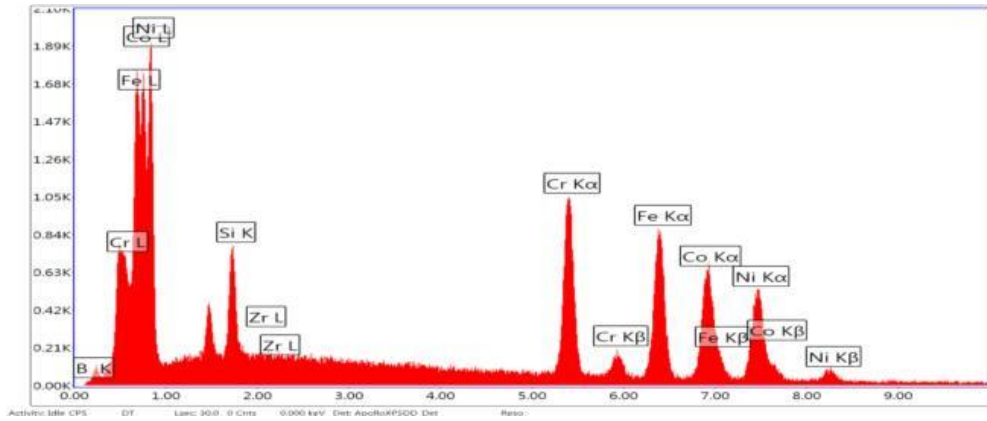
Şekil 6.26 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.



(e)

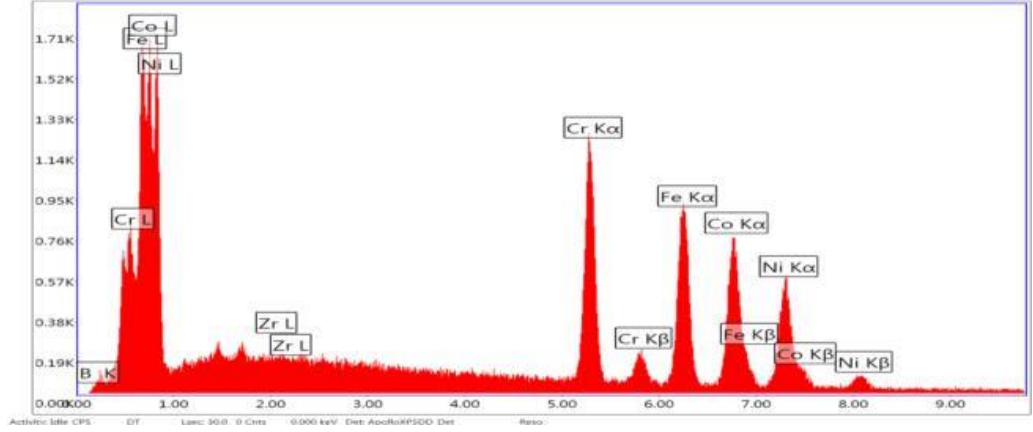


(f)



(g)

Şekil 6.26 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.



(h)

Şekil 6.26 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7.

Tablo 6.10: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.26a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	35,53	20,48	0,02	0,73	2,24	11,79	29,21
2	42,91	3,22	0,04	14,83	17,62	15,01	6,38
3	44,04	0,00	0,05	24,73	12,97	12,43	5,79
4	36,21	16,83	0,03	1,60	2,77	7,49	35,07
5	47,83	0,00	0,04	15,51	15,51	14,89	6,23
6	41,38	3,14	0,02	10,93	14,65	14,54	15,35
7	42,82	0,00	0,06	11,68	15,11	15,69	14,63

Şekil 6.26 ve Tablo 6.10 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B oranının diğer noktalara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktada alaşım elementlerinden Ni ve borlama tozu kaynaklı olduğu tahmin edilen Si'nin oranının yüksek olduğu da belirlenmiştir. Borür tabakası içerisindeki bir diğer nokta olan 2 noktasında ise borlama tozu kaynaklı Si oranı %3,22, Ni ise %6,38 olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık Zr haricindeki diğer alaşım elementleri olan Cr %14,83, Fe %17,62 ve Co ise %15,01 olarak görülmüştür.

3 ile işaretlenen noktada, B oranı %44,04 olarak görülmüş, bununla beraber bu bölgeden Cr miktarının da yüksek olup %24,73 olduğu tespit edilmiştir.

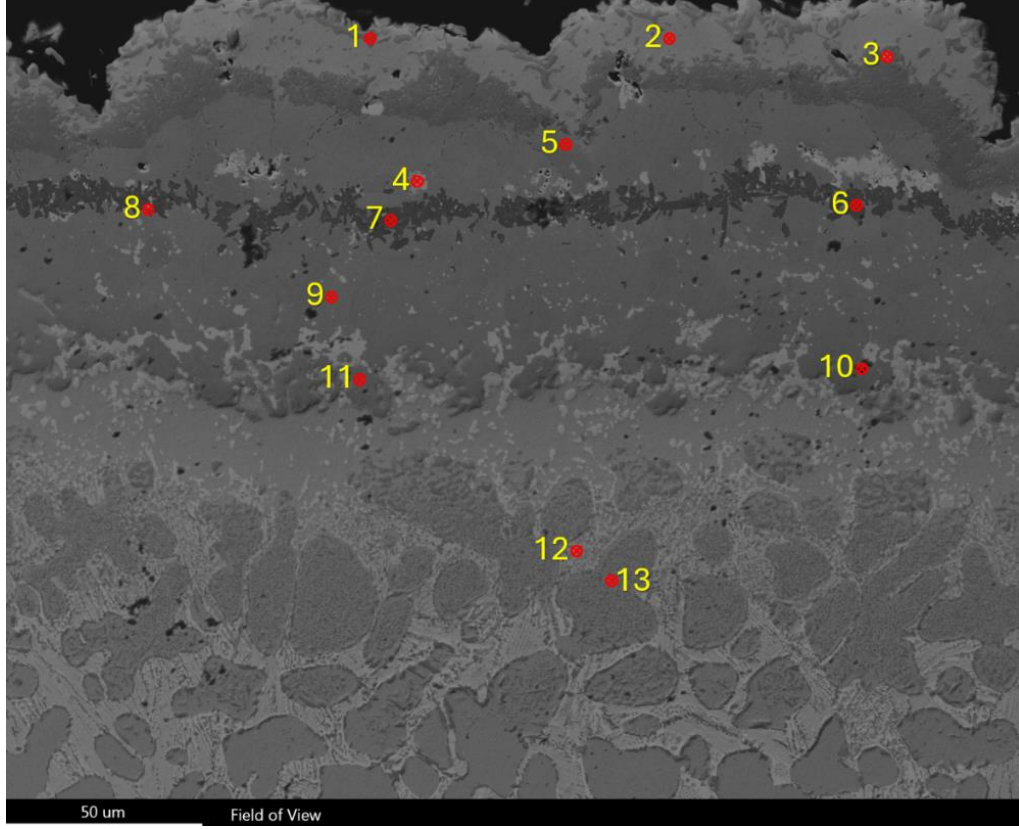
4 numaralı noktada, B oranı diğer noktalara göre bir miktar düşük olup %36,21 olarak tespit edilmiş ve yine Si oranı da artarak %16,83 olarak tespit edilmiştir. Bu noktada B'nin yanı sıra alaşım elementlerinden Ni'nin de yüksek miktarlarda bulunduğu tespit edilmiştir. Ni bu noktada %35,07 olarak görülmüştür.

Geçiş bölgesi içerisinde belirlenen 5 ve 6 noktalarında yine B'nin oranının yüksek olduğu net bir şekilde görülmektedir. 5 noktasında %47,83, 6 noktasında %41,38 oranında B tespit edilmiştir. Bu noktalarda diğer alaşım elementleri homojen bir dağılım göstermektedir.

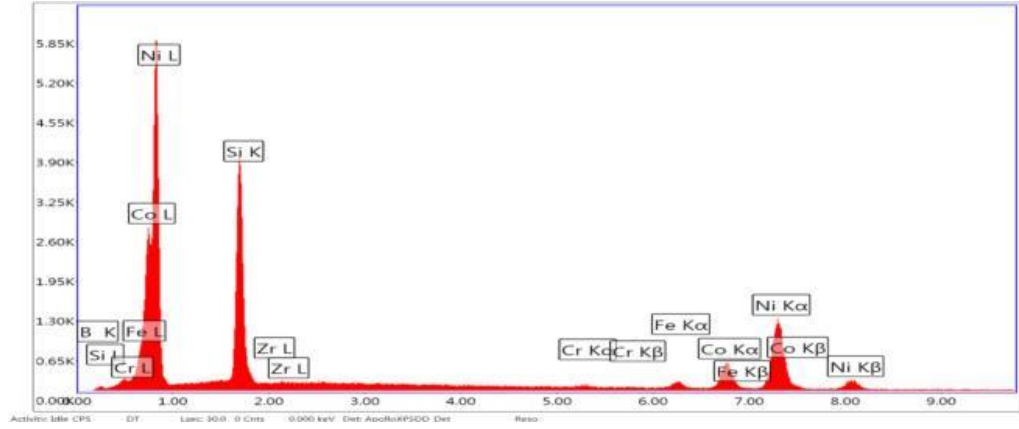
Altlık bölgesine yakın olan bölgedeki 7 noktasında ise B oranı %42,82 tespit edilmiş ve alaşım elementlerinin ise homojen olarak dağılım gösterdiği görülmüştür. 900°C'de 150 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.1 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 150dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.27'de verilmiştir.

Şekil 6.27-a'da işaretlenen 1-13 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.27b-n'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.11'de verilmiştir.

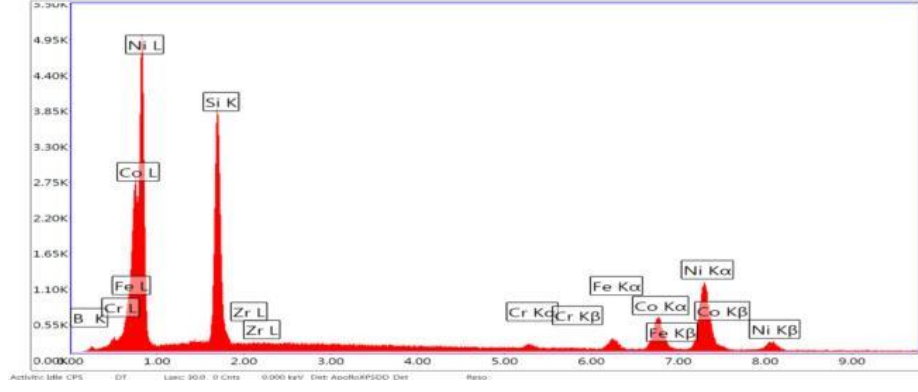


(a)

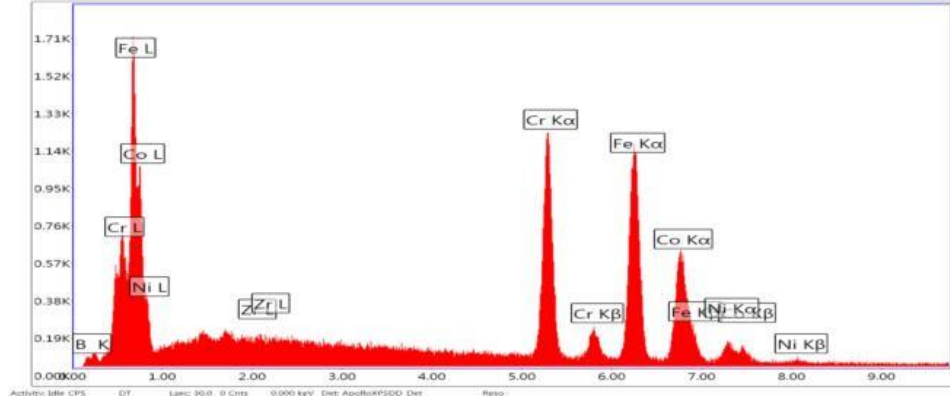


(b)

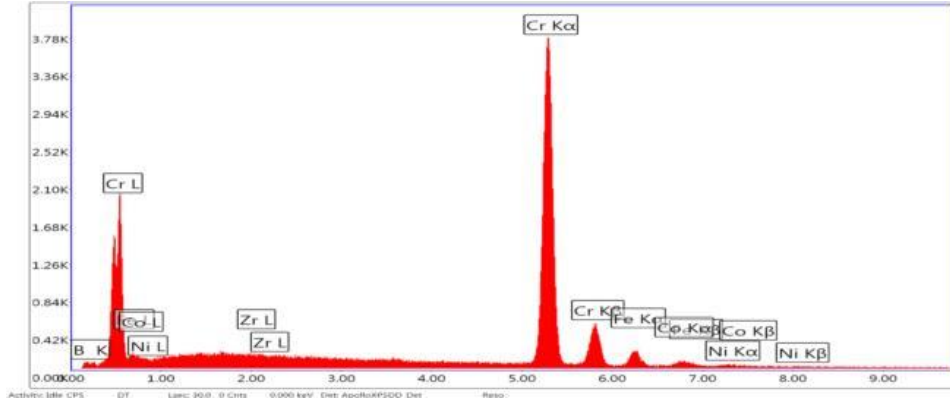
Şekil 6.27: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12 ve n)13.



(c)

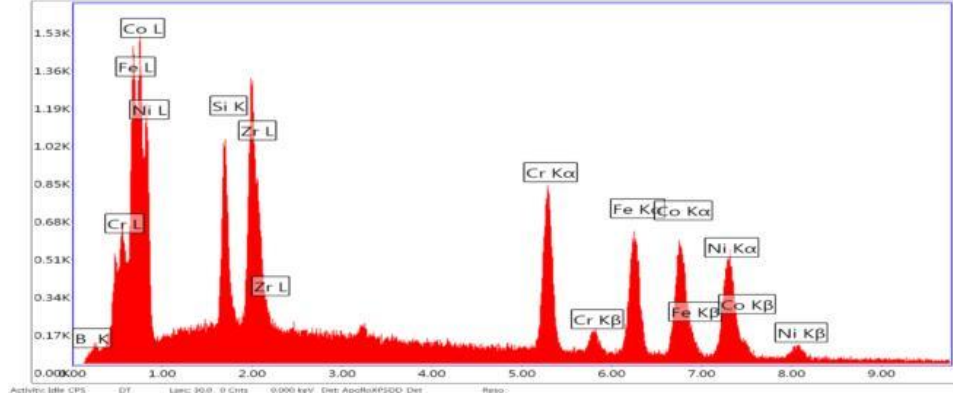


(d)

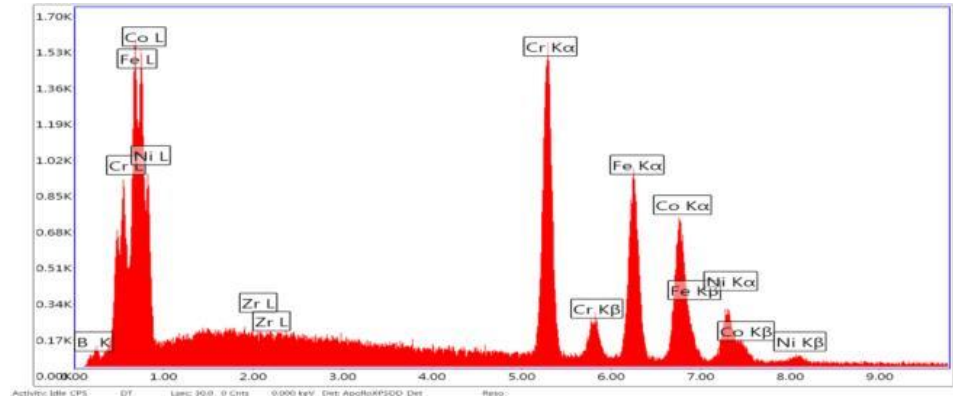


(e)

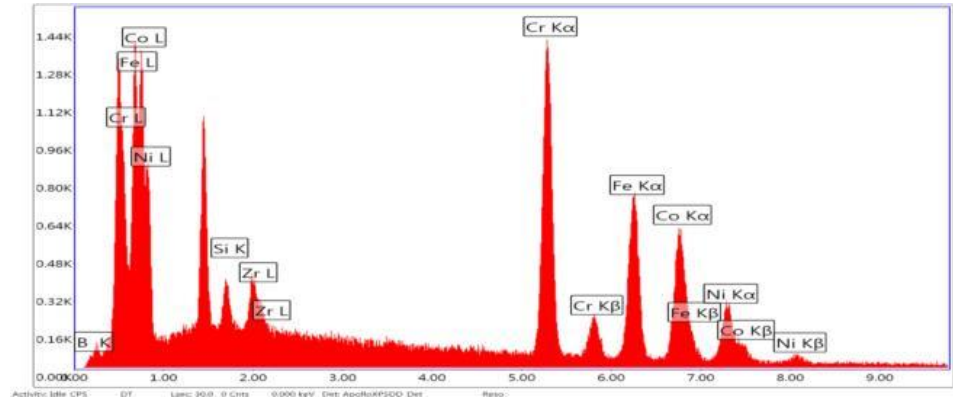
Şekil 6.27 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12 ve n)13.



(f)

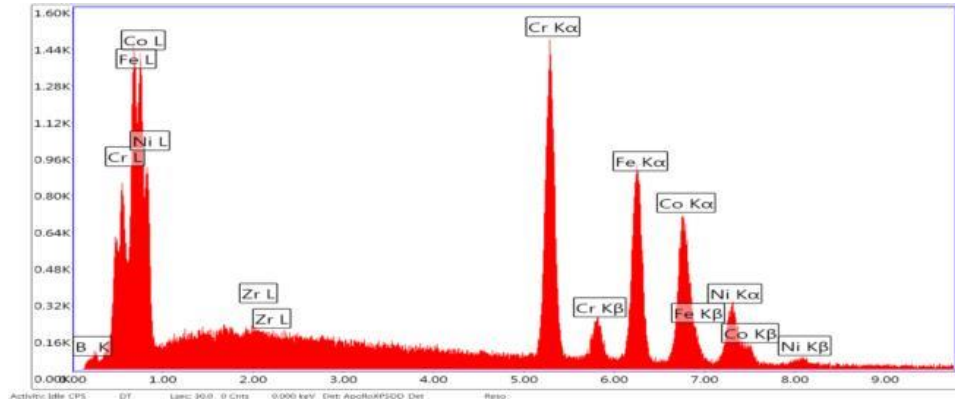


(g)

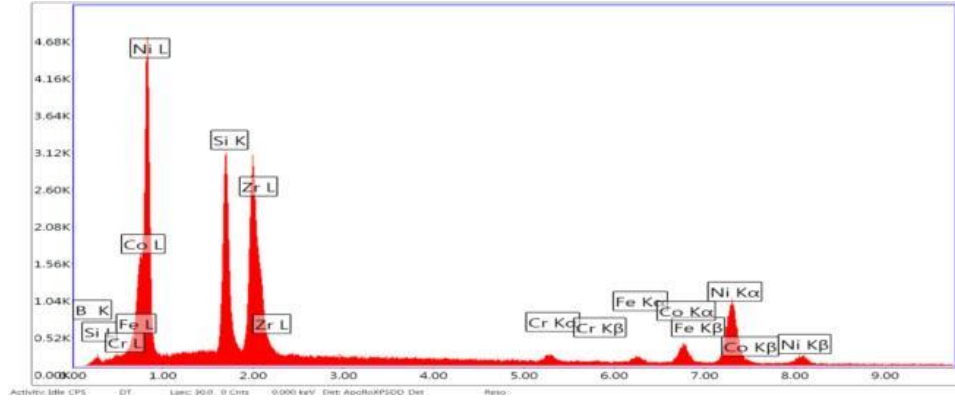


(h)

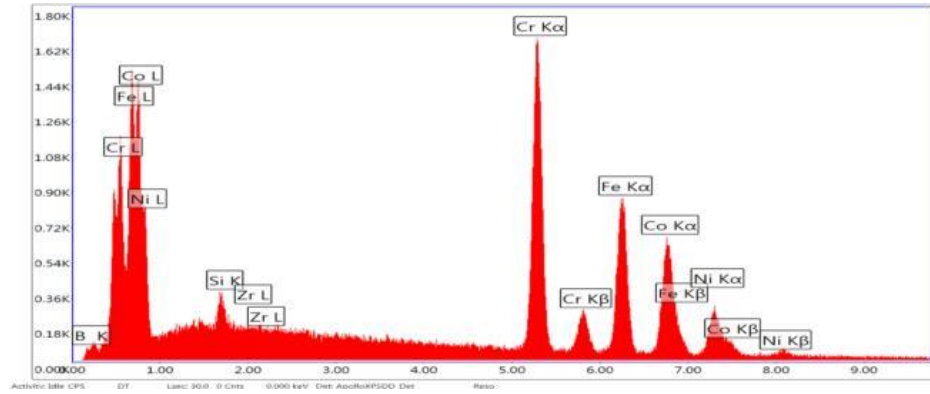
Şekil 6.27 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12 ve n)13.



(i)

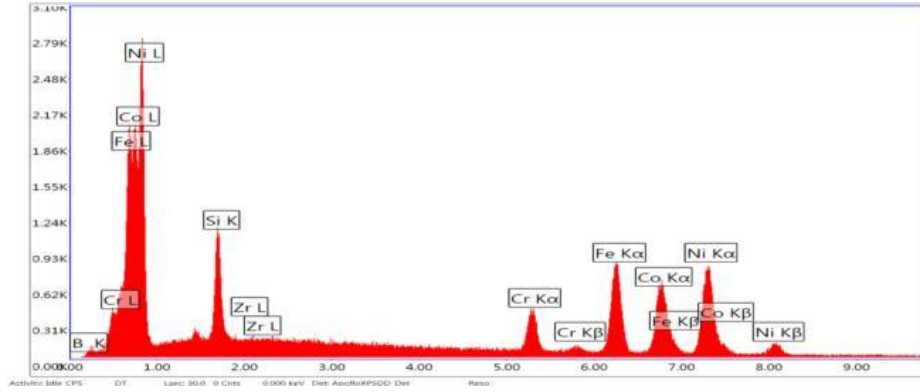


(j)

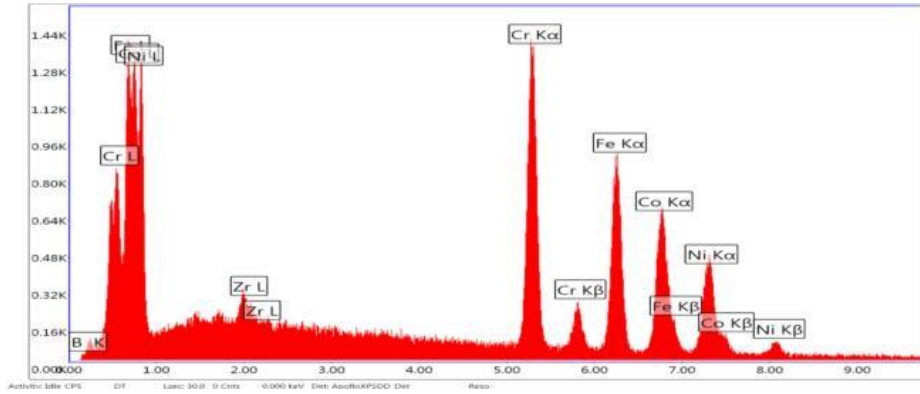


(k)

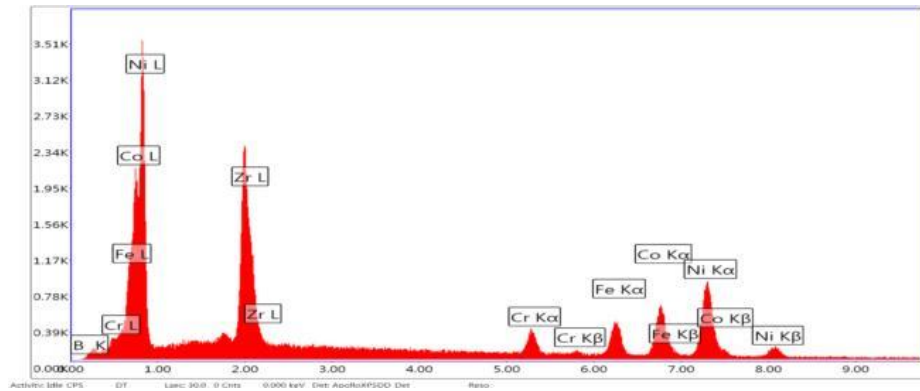
Şekil 6.27 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12 ve n)13.



(l)



(m)



(n)

Şekil 6.27 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.2} YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12 ve n)13.

Tablo 6.11: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.27a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

	Element Miktarı (% Atomik)						
SEM-EDS Analiz Noktası	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	32,39	20,80	0,00	0,45	1,58	9,83	34,96
2	30,12	20,86	0,00	0,82	2,62	12,27	33,30
3	46,94	0,00	0,02	12,95	22,96	14,04	3,08
4	44,14	0,00	0,05	49,95	3,70	1,46	0,70
5	41,32	4,68	4,29	9,15	11,22	13,48	15,86
6	46,38	0,00	0,01	15,40	15,96	15,08	7,16
7	44,44	1,09	0,83	16,34	14,67	14,59	8,04
8	43,75	0,00	0,05	15,30	16,84	16,04	8,01
9	32,95	16,20	11,54	1,37	1,52	6,56	29,87
10	46,06	0,90	0,04	17,56	15,05	13,58	6,81
11	38,05	5,34	0,01	3,91	13,89	14,89	23,91
12	41,08	0,00	0,45	15,05	15,62	14,74	13,06
13	39,80	0,00	8,72	3,23	7,03	13,90	27,31

Şekil 6.27 ve Tablo 6.11 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 ve 2 noktalarında B oranının diğer noktalara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktalarda alaşım elementlerinden Ni ve borlama tozu kaynaklı olduğu tahmin edilen Si'nin oranının yüksek olduğu da belirlenmiştir. Ayrıca Co elementinin de diğer alaşım elementlerin göre daha yüksek oranda bulunduğu görülmektedir. Ancak, bu noktalarda Zr elementinin yok denecek kadar az olduğu da görülmüştür. Borür tabakası içerisinde belirlenen 3, 4 ve 5 noktalarında B miktarının dış yüzeye oranla daha yüksek olduğu, tam tersi şekilde Ni oranının yüksek miktarlarda azaldığı da belirlenmiştir. 4 noktasında Zr elementinin yine yok denecek kadar az olduğu ancak buna karşılık da Cr elementinin %49,95 oranında olduğu tespit edilmiştir.

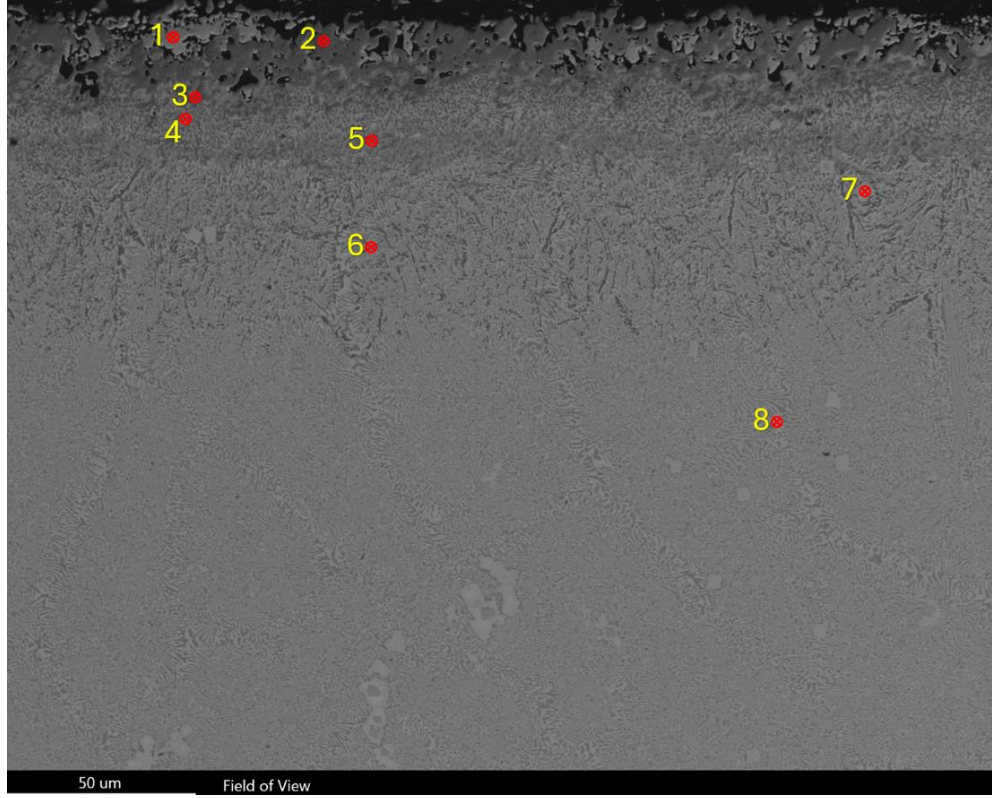
6, 7 ve 8 numaralı noktaların element oranlarının birbirine benzer olduğu, Zr oranının çok düşük, Ni haricindeki diğer alaşım elementlerinin oranlarının homojene yakın bir

dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu noktalardaki Ni oranı ise %8 civarlarında olduğu görülmüştür. B oranının ise 6 noktasında %46,38, 7 noktasında %44,44 ve 8 noktasında ise %43,75 olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

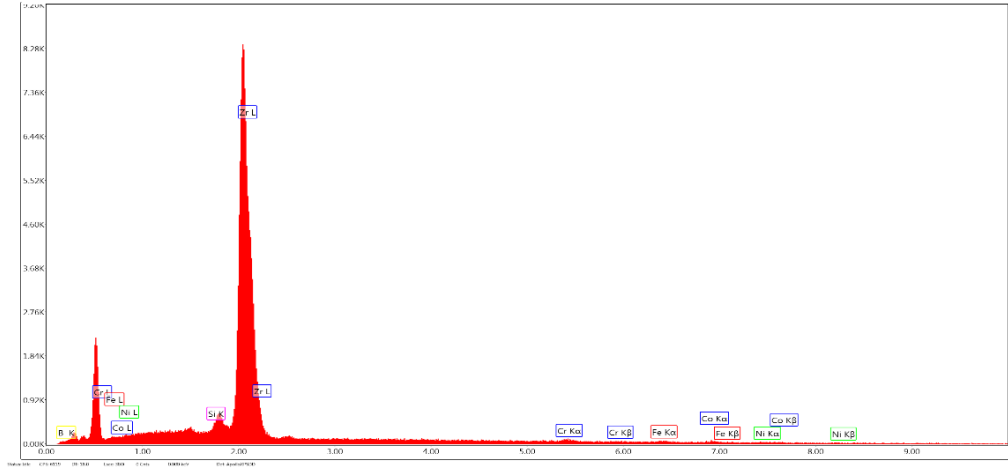
9 ile işaretlenen noktada Zr ve Ni oranlarının artması ile B oranının diğer noktalara göre daha düşük olmasına sebep olmuştur. Bu noktada B oranı %32,95, Zr oranı %11,54 ve Ni oranı ise %29,87 olarak tespit edilmiştir. Bu noktada ayrıca Si oranının da %16,2 olduğu gözlemlenmiştir. 10 noktasında ise Zr ve Ni oranının düşük olması sebebiyle B oranının yükselmiş olduğu görülmektedir. 9 noktasına benzer şekilde 11 noktasında da Ni oranı %23,91 olduğunda B oranı düşerek %38,05 olarak ölçülmüştür. Altlık bölgesine yakın olan bölgedeki 12 numaralı noktada alaşım elementleri nispeten homojen bir şekilde dağılmış, buna karşılık B oranı ise %41,08 olarak görülmüştür. 13 noktasında ise yine Ni oranının artması ile B miktarı % 39,8'e düşmüştür. 900°C'de 150 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr_{0.2} YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 150dk borlama yapılan %0.5 Zr içeren CoCrFeNiZr alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.28'de verilmiştir.

Şekil 6.28-a'da işaretlenen 1-8 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.28b-i'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.12'de verilmiştir.

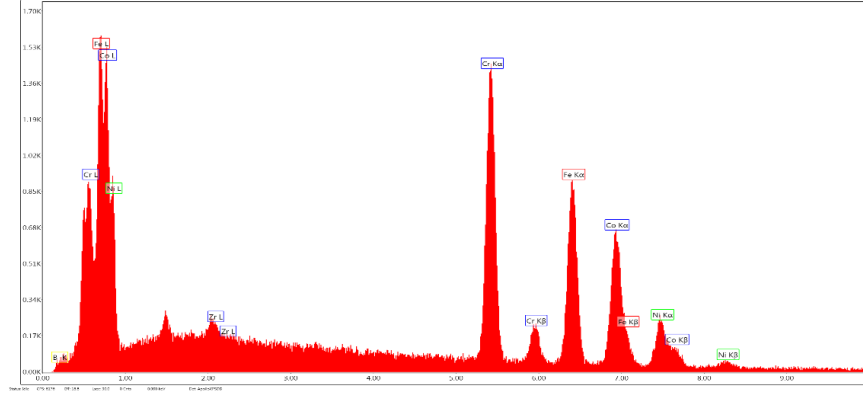


(a)

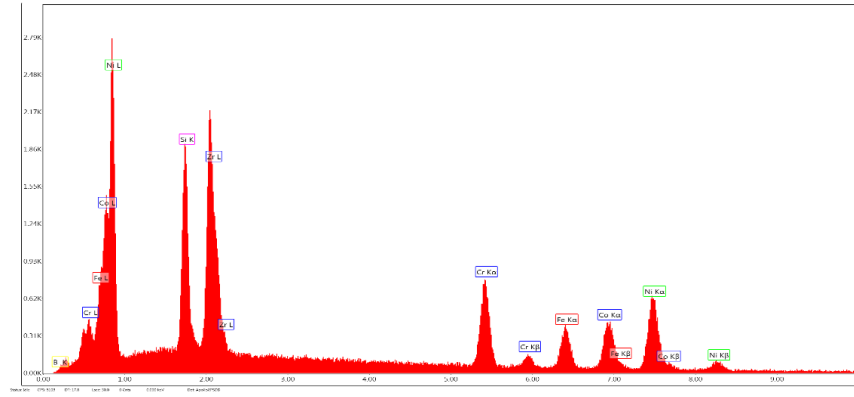


(b)

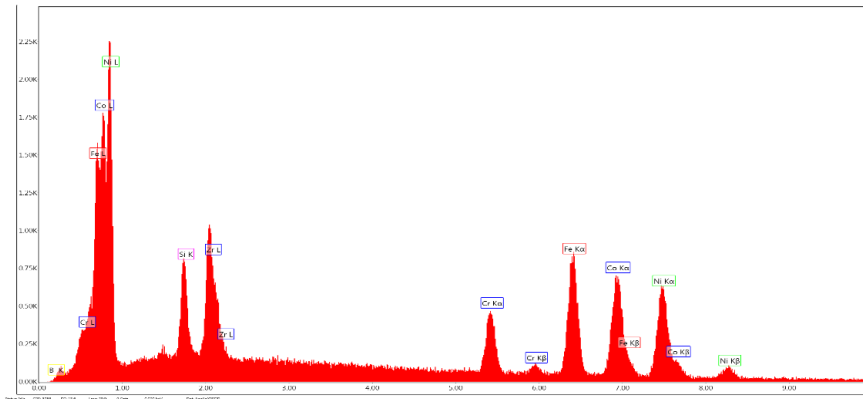
Şekil 6.28: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)8, h)9 ve i)10.



(c)

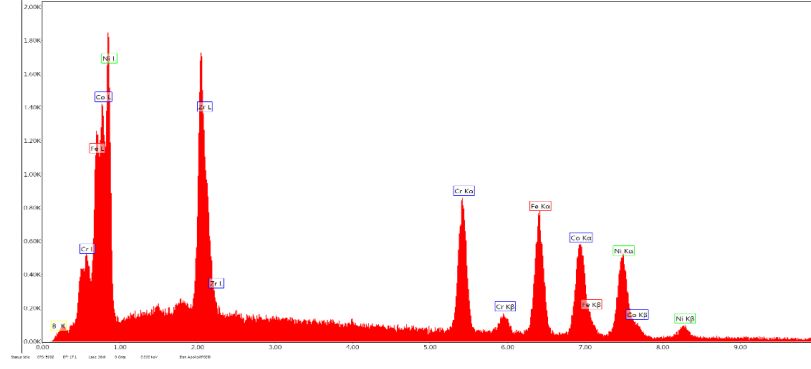


(d)

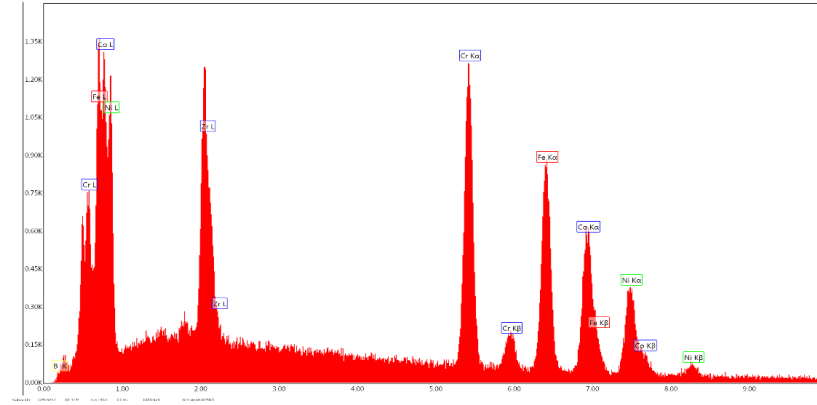


(e)

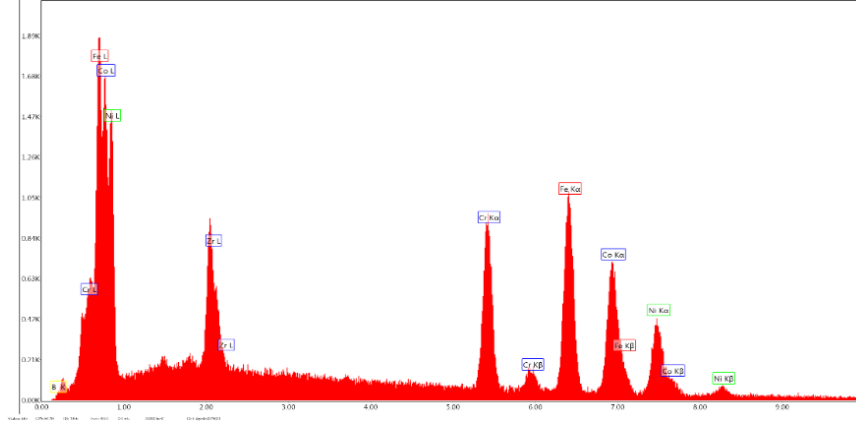
Şekil 6.28 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)8, h)9 ve i)10.



(f)

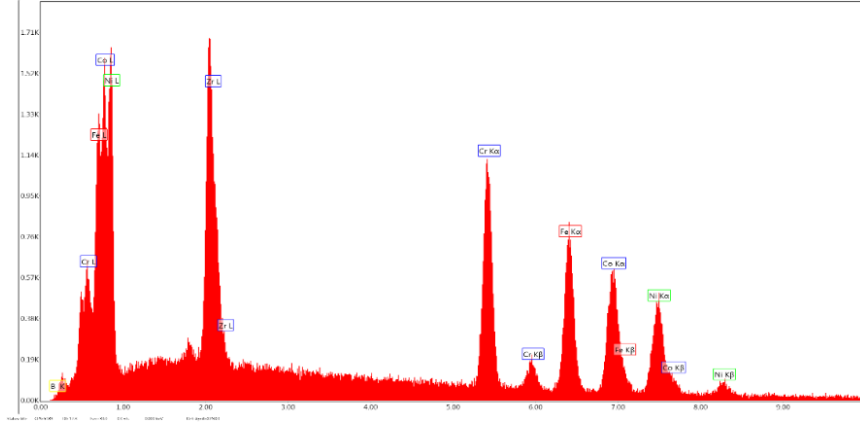


(g)



(h)

Şekil 6.28 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)8, h)9 ve i)10.



(i)

Şekil 6.28 devam: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)8, h)9 ve i)10.

Tablo 6.12: 150dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.28a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	34,32	21,20	0,01	0,62	2,50	12,01	29,34
2	31,68	14,26	0,02	8,25	9,25	13,85	22,69
3	38,79	0,00	0,05	13,58	12,84	15,48	19,26
4	42,16	5,98	0,02	18,24	14,14	12,54	6,92
5	44,67	0,00	0,01	5,68	18,47	14,32	16,85
6	43,85	12,62	0,05	12,95	15,54	9,41	5,58
7	39,65	4,16	2,24	11,74	8,73	16,52	16,96
8	34,92	0,00	1,72	10,52	12,82	11,74	28,28

Şekil 6.28 ve Tablo 6.12 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 ve 2 noktalarında B oranının diğer noktalara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktalarda alaşım elementlerinden Ni ve borlama tozu kaynaklı olduğu tahmin edilen Si'nin oranının yüksek olduğu da belirlenmiştir. Bundan dolayı B miktarının düşük olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Co elementinin de diğer alaşım elementlerin göre daha yüksek oranda bulunduğu görülmektedir. Ancak, bu noktalarda Zr elementinin yok denecek kadar az olduğu da görülmüştür.

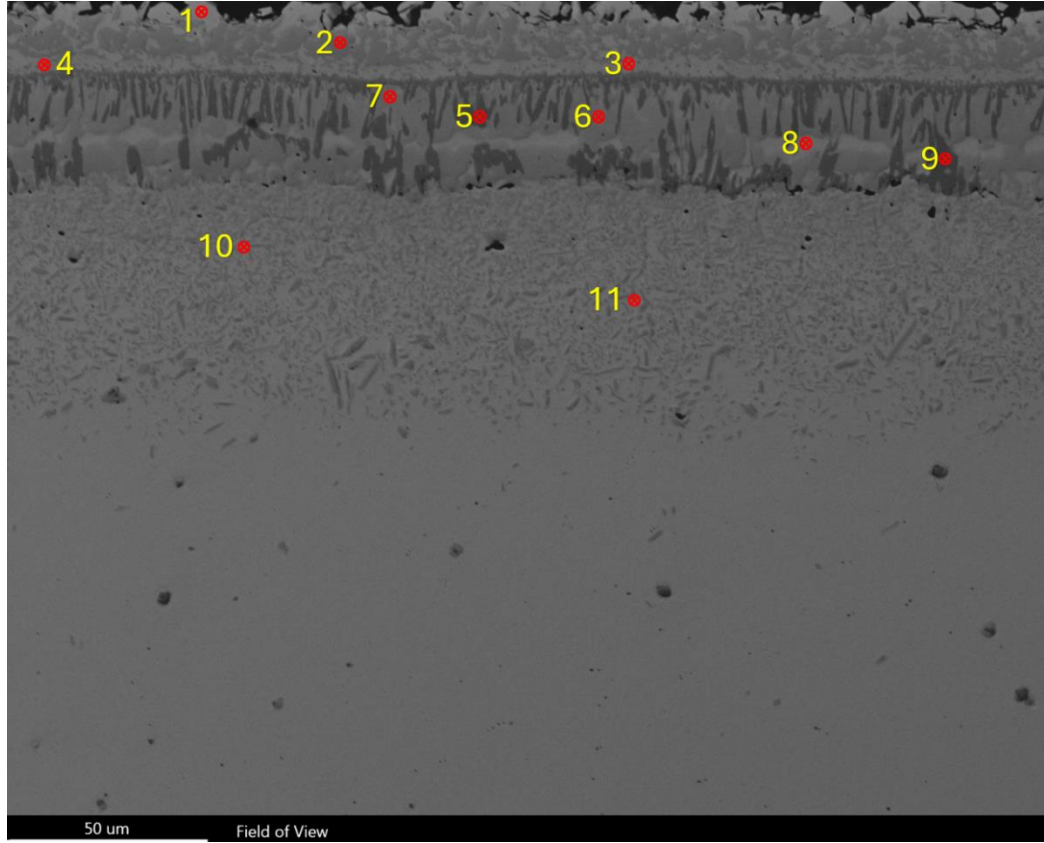
3 ile işaretlenen noktanın element oranlarının birbirine benzer olduğu, Zr oranının çok düşük, Ni haricindeki diğer alaşım elementlerinin oranlarının homojene yakın bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu noktalardaki Ni oranı ise diğer elementlerden bir miktar yüksek olduğu ve %19,26 civarlarında olduğu görülmüştür. B oranının ise bu noktada dış bölgelere göre daha yükselerek %38,79 olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

4 ve 5 noktalarında B oranının daha da yüksek olduğu görülmüştür. Bu noktalardan 4 noktasında B oranı %42,12, Si oranı %5,98'dir. Ni oranı dış noktalara göre daha düşük olup %6,92 olarak ölçülmüştür. 5 noktasında ise Si görülmemekle birlikte Co oranının azalarak, Ni oranının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

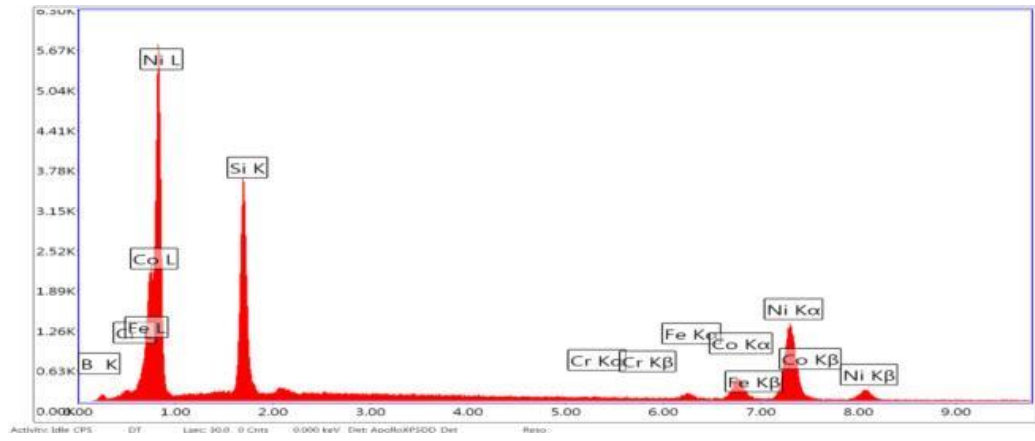
Altılık bölgesine yakın olan bölgedeki 6, 7 ve 8 noktalarında altılığa yaklaşıldıkça B miktarının azaldığı görülmüştür. Bununla beraber 6 noktasında %12,62 olarak ölçülen Si miktarı da 7 ve 8 noktalarında azalmıştır. Ni ise 8 noktasında %28,28 oranında görülmüş olup bu noktadaki en yüksek seviyede tespit edilmiştir. 900°C'de 150 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.5 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 300dk borlama yapılan Zr içermeyen CoCrFeNi alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.29'da verilmiştir.

Şekil 6.29-a'da işaretlenen 1-11 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.29b-l'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.13'da verilmiştir.

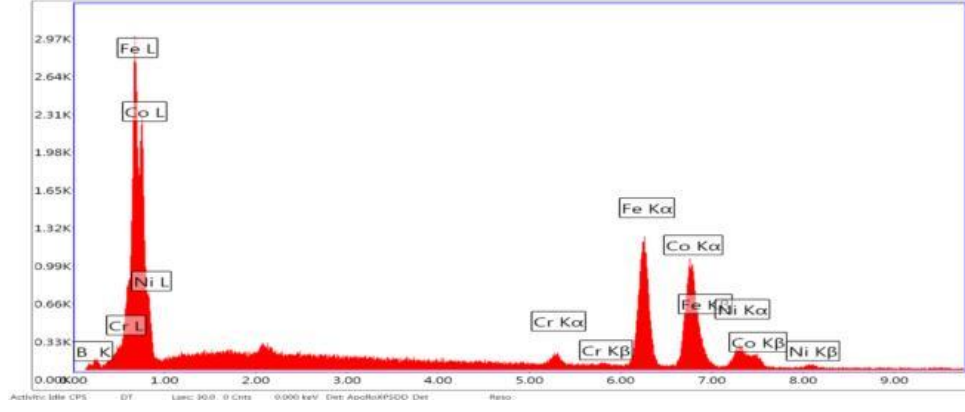


(a)

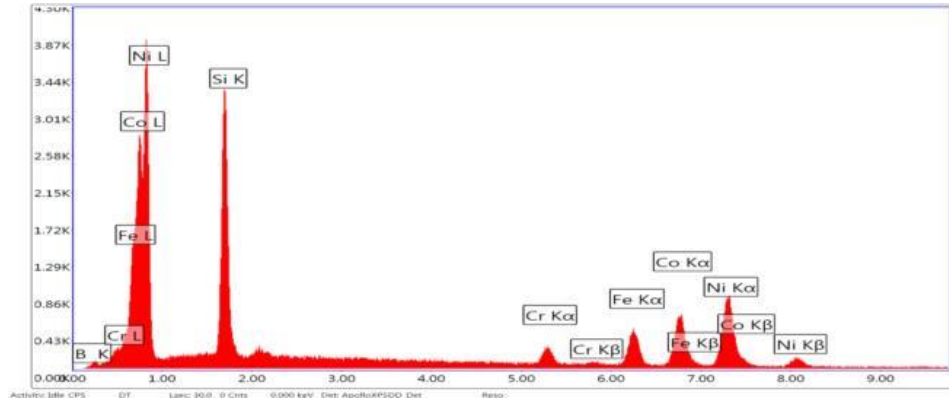


(b)

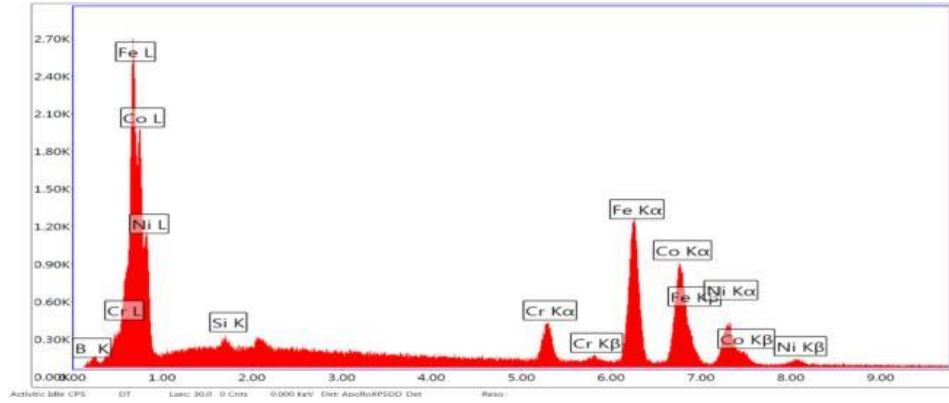
Şekil 6.29: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(c)

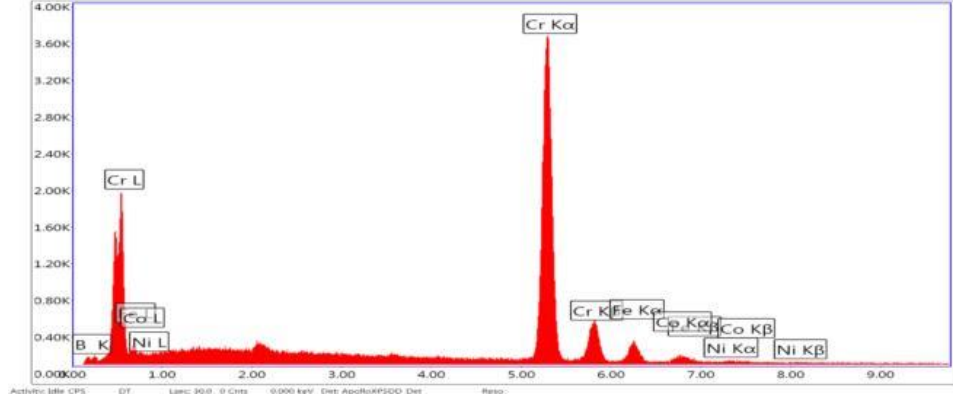


(d)

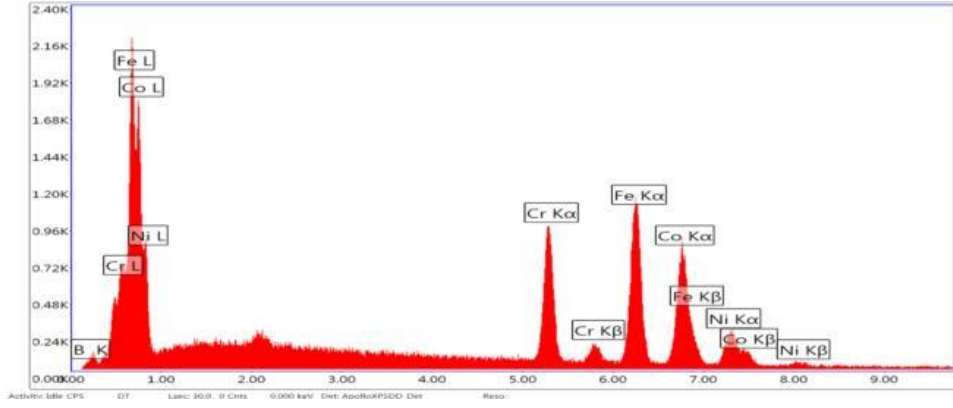


(e)

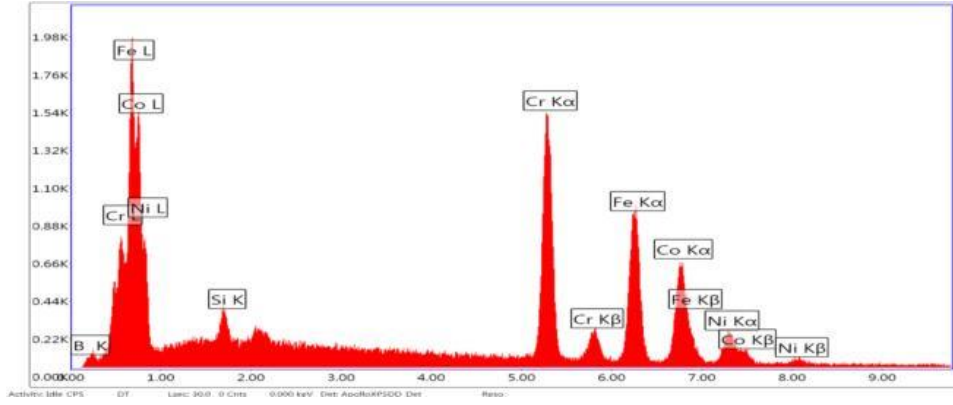
Şekil 6.29 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(f)

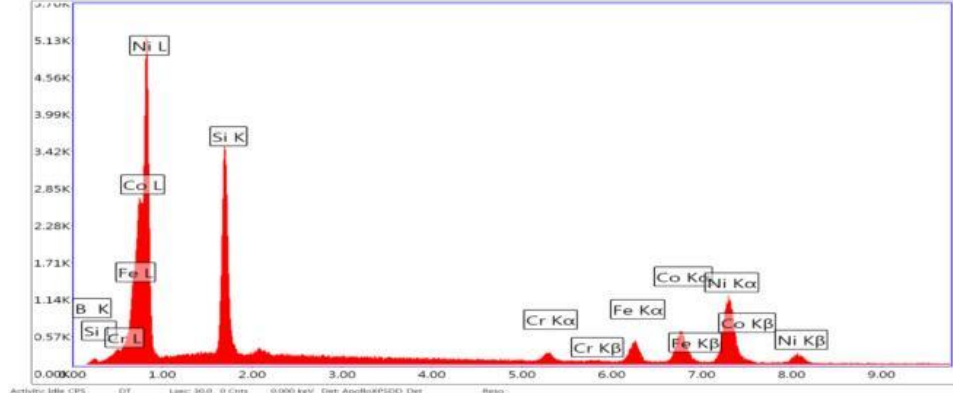


(g)

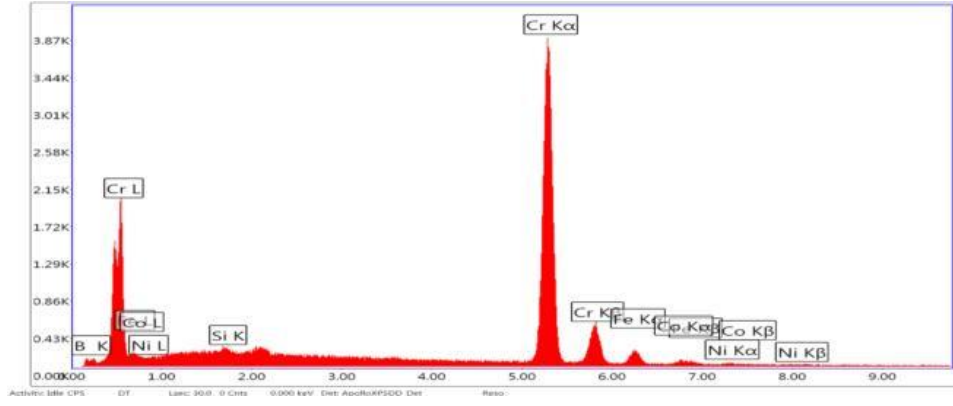


(h)

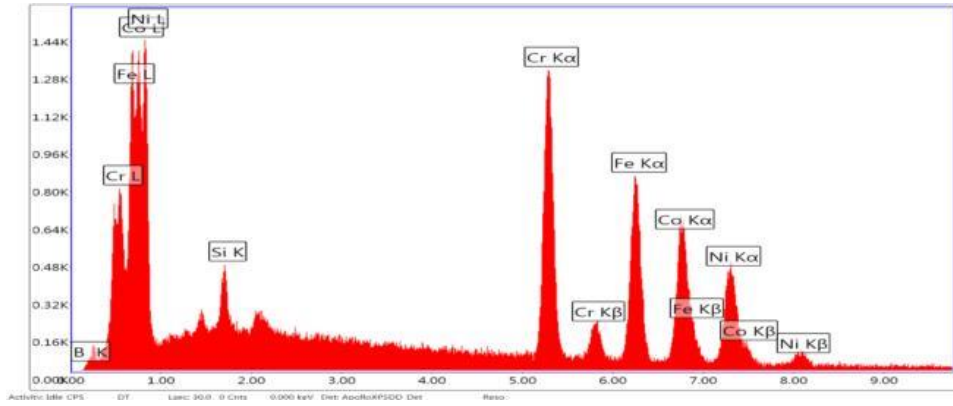
Şekil 6.29 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(i)

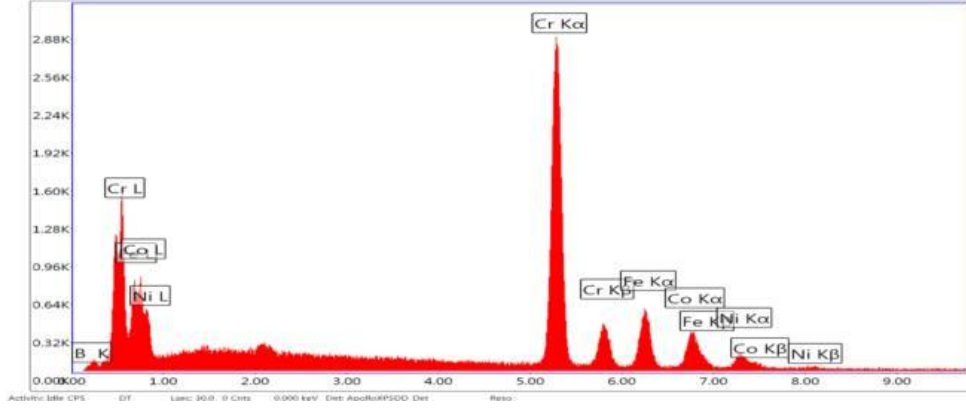


(j)



(k)

Şekil 6.29 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.



(I)

Şekil 6.29 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10 ve l)11.

Tablo 6.13: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNi YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.29a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)					
	B	Si	Cr	Fe	Co	Ni
1	42,02	16,75	0,19	1,08	6,88	33,09
2	53,13	0,00	0,81	19,69	20,97	5,40
3	38,35	16,20	2,07	6,46	13,06	23,88
4	44,93	0,33	3,12	21,88	19,57	10,16
5	50,82	0,00	43,14	4,09	1,52	0,42
6	51,07	0,00	8,25	18,56	16,04	6,08
7	45,23	1,03	16,37	17,93	13,79	5,64
8	41,05	15,71	1,36	4,40	9,87	27,61
9	48,81	0,26	46,45	3,11	0,94	0,42
10	38,96	1,50	14,63	15,39	15,38	14,14
11	45,68	0,00	34,06	9,42	7,27	3,57

Şekil 6.29 ve Tablo 6.13 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B ve Ni elementlerinin miktarlarının dikkate değer şekilde fazla olduğu bununla beraber de borlama tozu kaynaklı olduğu düşünülen Si'nin de oranının yüksek olduğu görülmektedir. Bu noktada %42,02 B, %33,09 Ni, %16,75

oranında Si tespit edilmiştir. Bu noktada alaşım elementlerinden Cr, Fe ve Co'nun oranlarının diğer elementlere göre çok daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla beraber, yine borür tabakasının en dış yüzeyine yakın diğer bir nokta olan 2 noktasında yine borlamanın etkisi ile B elementinin %53,13 oranında olduğu ve alaşım elementlerinden olan Fe ve Co'nun miktarlarının 1 noktasına göre daha yüksek olduğu, buna karşılık Ni oranının ciddi şekilde azalarak %5,40 oranında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 1 noktasında tespit edilen Si'nin bu noktada görülmediği de tespit edilmiştir.

3 noktasında, B miktarı nispeten daha düşük olarak %38,35 olduğu, Si ve Ni miktarının da 1 noktasındaki gibi diğer elementlere göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. 4 ile işaretlenen noktada etkin bir B oranının olduğu ve diğer alaşım elementlerinden Cr'nin en az, Fe ve Co'nun daha yüksek olduğu görülmüştür.

5, 6 ve 7 noktalarından 5 noktasında B miktarının %50,82'ye, Cr miktarının da %43,14'e kadar çıktığı, bununla beraber de diğer alaşım elementlerinin miktarlarının ciddi oranda düştüğü tespit edilmiştir. 6 ve 7 noktalarındaki element oranları ise birbirine benzer olmakla beraber, 6 noktasında B oranı 7 noktasından daha yüksek olup Cr elementi oranı ise daha düşüktür.

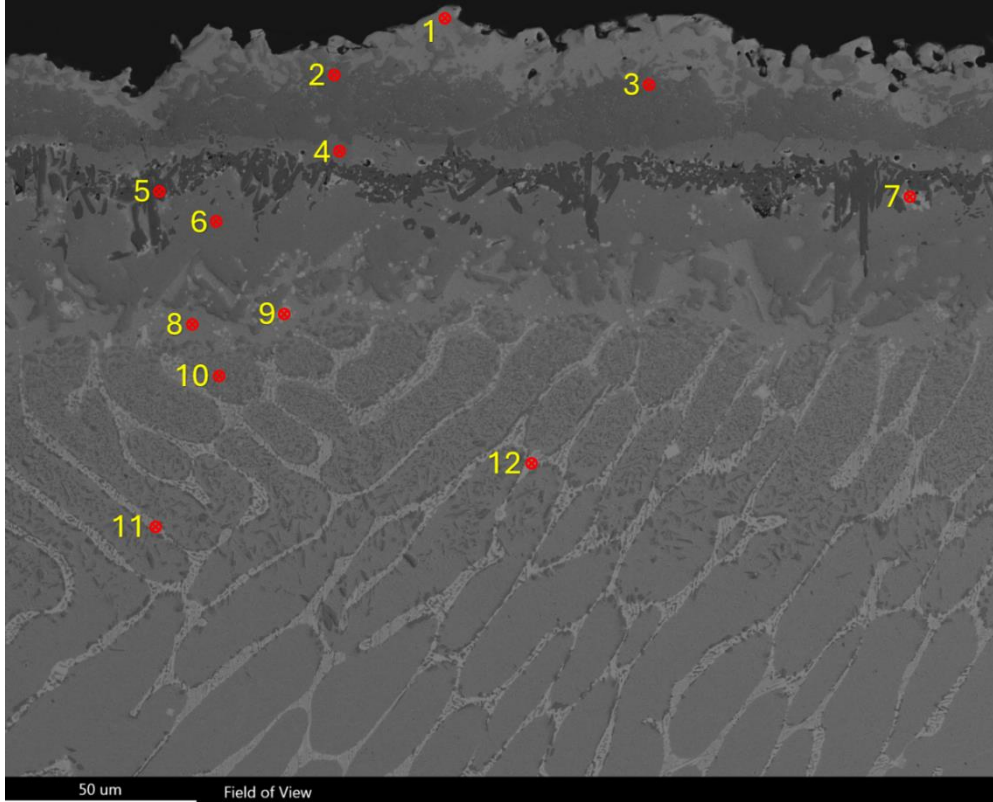
8 noktasındaki element oranları malzemenin en dış kısmındaki borür tabakası ile benzerlik göstererek B'nin yanında Si ve Ni oranlarının da yüksek olduğu görülmüştür. 9 noktasında ise, 5 noktası ile benzer oranlar tespit edilmiştir. Bu noktada %48,81 oranında B ve %46,45 oranında Cr bulunmaktadır.

Altlık bölgesine yakın olan bölgedeki 10 noktasında %38,96 oranında B tespit edilirken, 11 noktasında ise %45,68 oranında B tespit edilmiştir. Ayrıca 10 noktasında, diğer alaşım elementlerinin homojen bir dağılımda olduğu da görülmüştür. 11 noktasında ise Cr'nin yoğunlaşarak %34,06 olduğu görülmüştür.

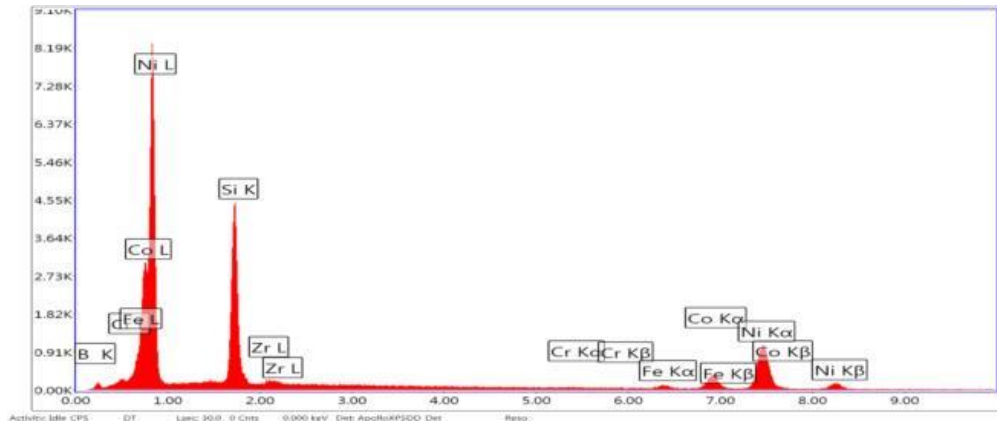
900°C'de 300 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNi YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 300dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.30'da verilmiştir.

Şekil 6.30-a’da işaretlenen 1-12 noktalarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.30b-m’de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.14’de verilmiştir.



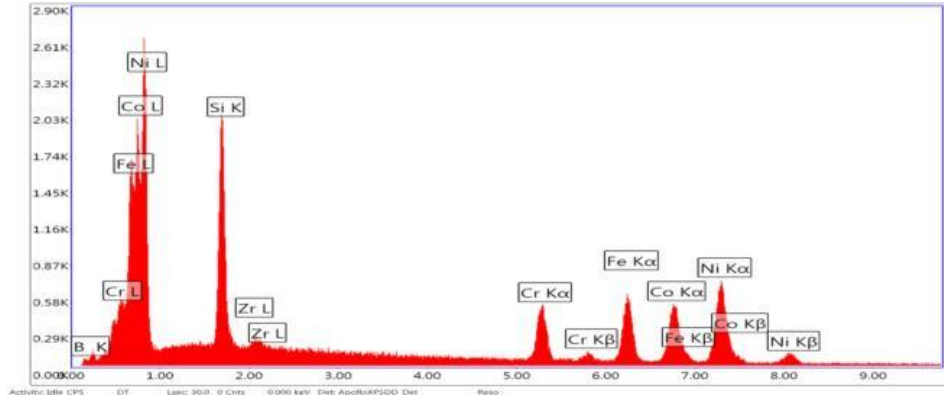
(a)



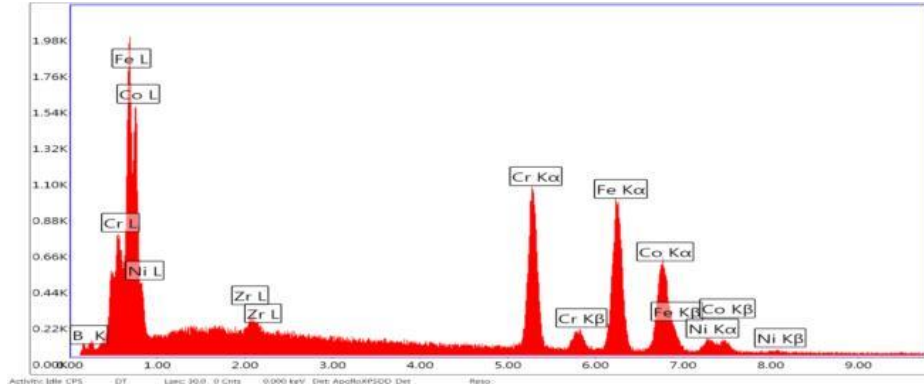
(b)

Şekil 6.30: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.

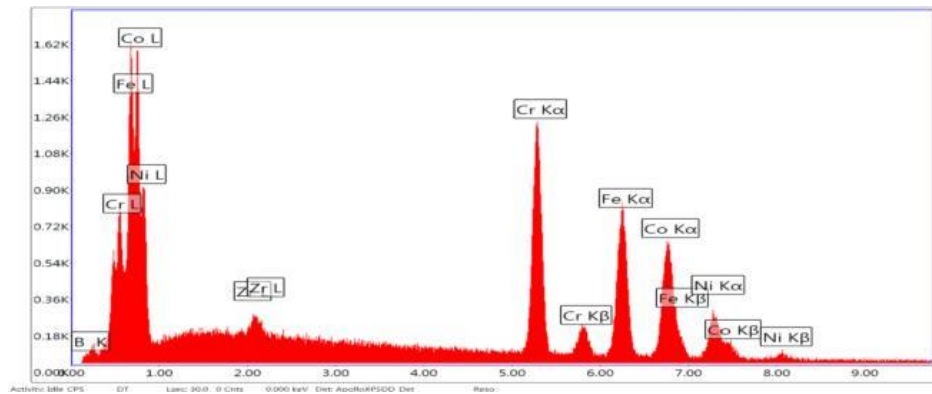
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(c)

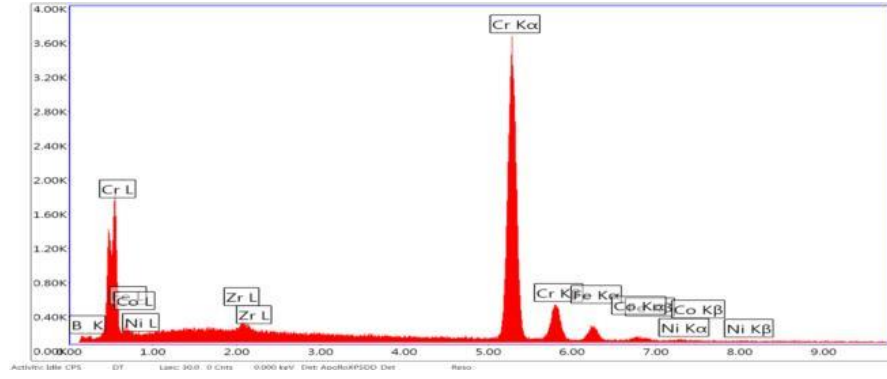


(d)

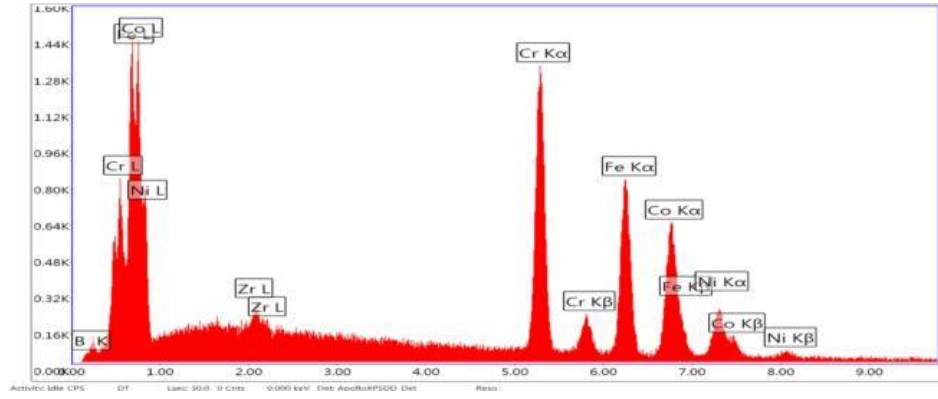


(e)

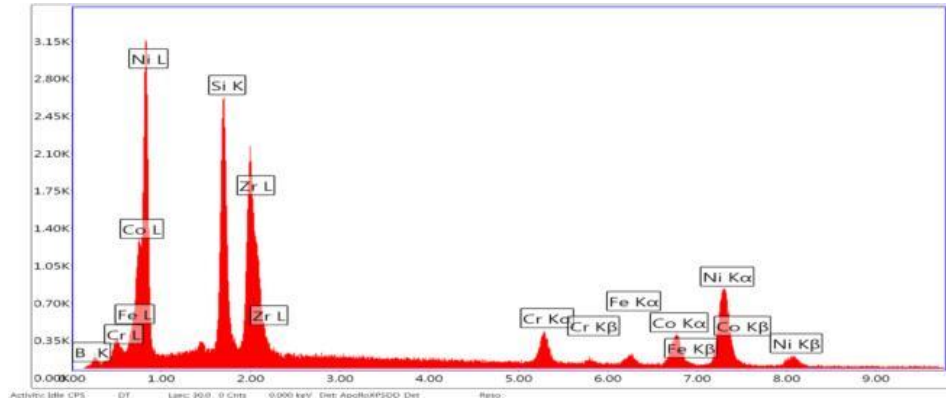
Şekil 6.30 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(f)

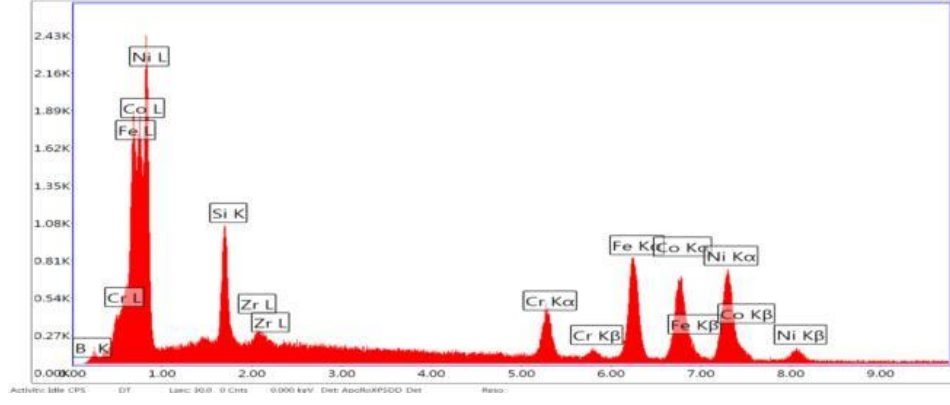


(g)

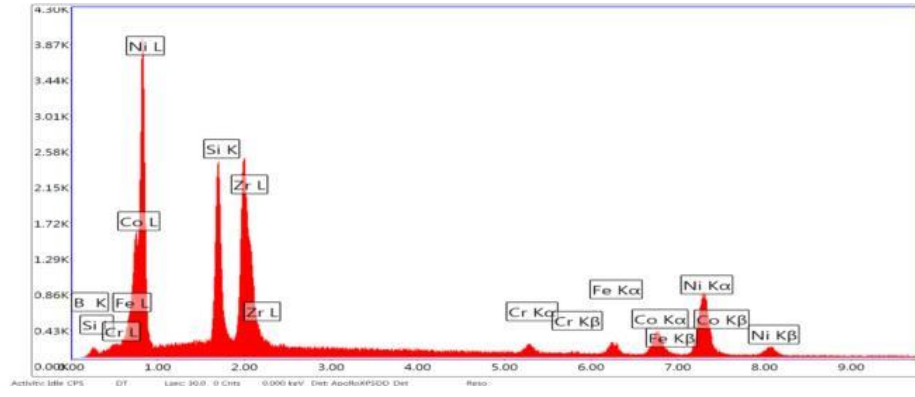


(h)

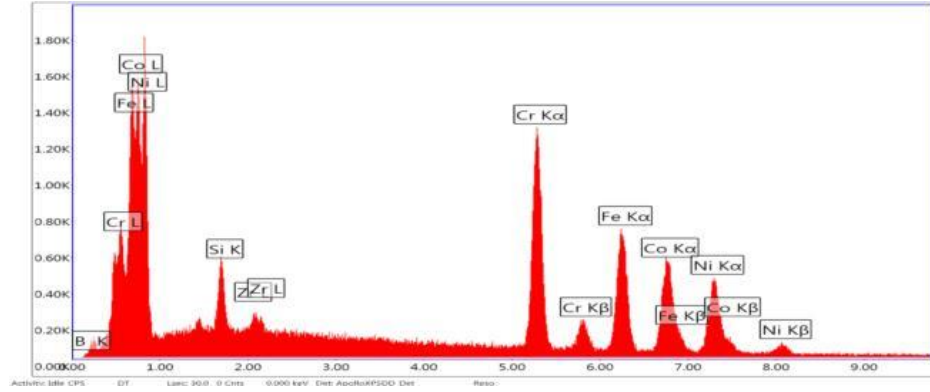
Şekil 6.30 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(i)

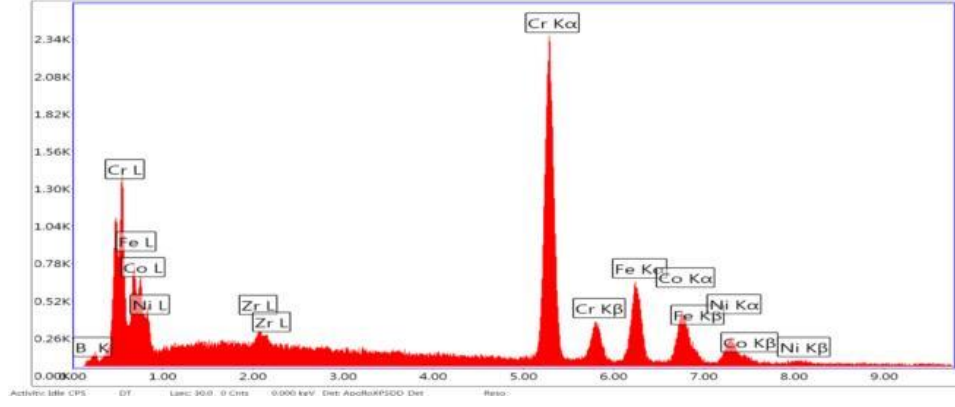


(j)

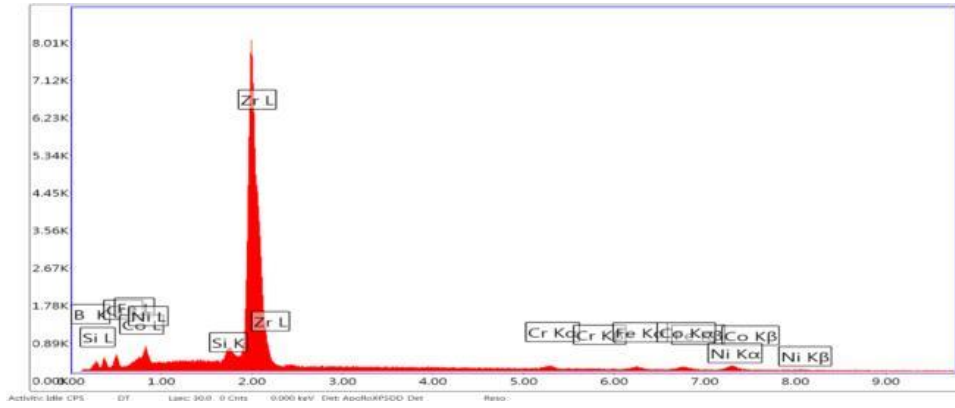


(k)

Şekil 6.30 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.



(l)



(m)

Şekil 6.30: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11 ve m)12.

Tablo 6.14: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.30a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	55,27	15,34	0,08	0,18	0,82	5,36	22,95
2	54,87	8,20	0,12	4,03	7,18	9,09	16,51
3	55,41	0,00	0,13	10,52	17,98	13,66	2,31
4	51,44	0,00	0,13	12,71	14,45	14,29	6,97
5	48,69	0,00	0,13	46,30	3,58	0,96	0,35
6	50,28	0,00	0,12	14,12	14,89	14,33	6,26

Tablo 6.14: Devam							
7	37,67	14,37	8,20	3,99	1,67	7,68	26,41
8	42,33	4,90	0,11	3,84	13,44	14,56	20,82
9	38,33	13,07	9,90	1,51	2,64	7,69	26,86
10	44,72	2,11	0,10	14,08	13,26	12,84	12,89
11	49,26	0,00	0,10	26,21	10,70	8,58	5,17
12	27,28	0,47	56,19	2,47	2,95	4,09	6,54

Şekil 6.30 ve Tablo 6.14 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B miktarı %50'nin üzerinde olup en yüksek seviyededir. Bununla beraber bu noktada Si ve Ni oranının ciddi şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Dış yüzeye yakın olan diğer noktalar olan 2 ve 3 noktalarında da B miktarı yine %50'nin üzerindedir. 2 noktasında Si oranı bir miktar düşüp %8,20 olmuştur. 3 noktasında ise Si elementine rastlanmamıştır. 2 noktasında Ni oranı, diğer alaşım elementlerine göre daha yüksekken 3 noktasında Ni miktarı ciddi oranda düşüp diğer elementlerin oranları yükselmiştir. Bu noktaların tamamında Zr oranı ise %1 civarında görülmüştür.

4 ile işaretlenen noktada, B miktarı yine %50'nin üzerindedir, diğer alaşım elementlerinde ise dengeli bir dağılım tespit edilmiştir. 5 noktasında ise B oranı %50'nin altına düşerek %48,69 olmuştur. Buna karşılık Cr elementinin oranı ise %46,30 olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, Fe, Co ve Ni oranları ise çok düşük kalmıştır.

6 noktasında B oranı %50,28 olarak görülürken diğer alaşım elementleri ise homojen bir dağılım göstermiştir. 7 noktasında ise B miktarı düşük olup %37,67 olarak görülmüştür. Bununla beraber Si miktarı ise %14,37 olmuştur. 8 noktasında B ile Ni oranlarını yüksek olması göze çarparken bu noktada da yine Si tespit edilmiştir. Si'nin bu noktadaki oranı ise %4,90 olmuştur. 9 noktasında ise 7 noktasına benzer şekilde B oranı nispeten düşük olup Si miktarı %13,07 olarak tespit edilmiştir.

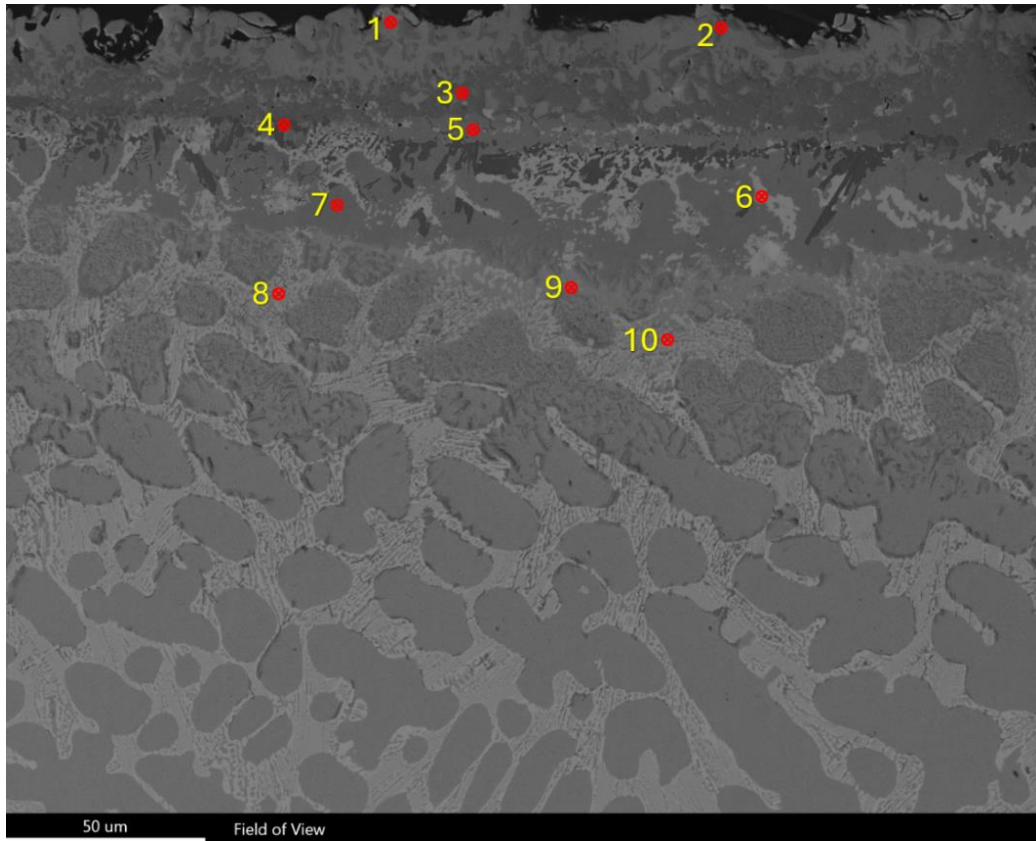
Altlık bölgesine yakın olan 10 noktasında %44,72 oranında B tespit edilirken, 11 noktasında ise %49,26 oranında B tespit edilmiştir. Ayrıca 10 noktasında, diğer alaşım elementlerinin homojen bir dağılımda olduğu da görülmüştür. 11 noktasında ise Cr'nin yoğunlaşarak %26,21 olduğu görülmüştür.

Bu bölgede bulunan bir diğer nokta olan 12 noktasında ise B miktarı ciddi şekilde düşük olup (%27,28) Zr'nin bu bölgede çok yüksek (%56,19) oranda bulunduğu tespit edilmiştir.

900°C'de 300 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.1 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 300dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.31'de verilmiştir.

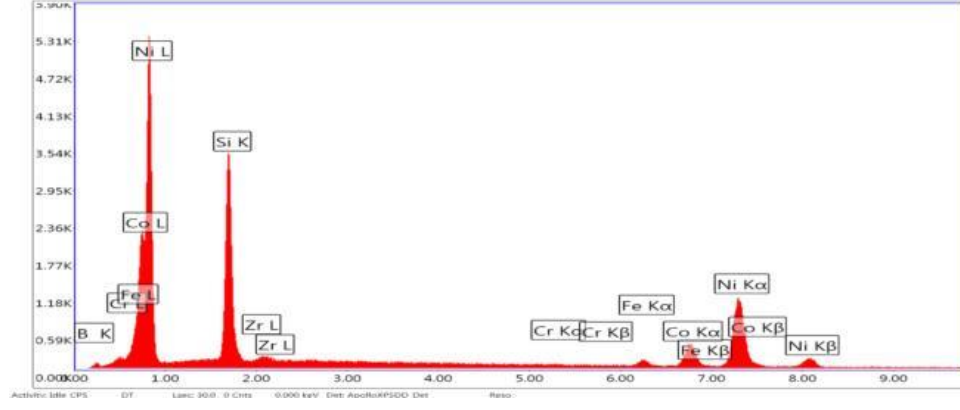
Şekil 6.31-a'da işaretlenen 1-10 alanlarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.31b-k'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.15'de verilmiştir.



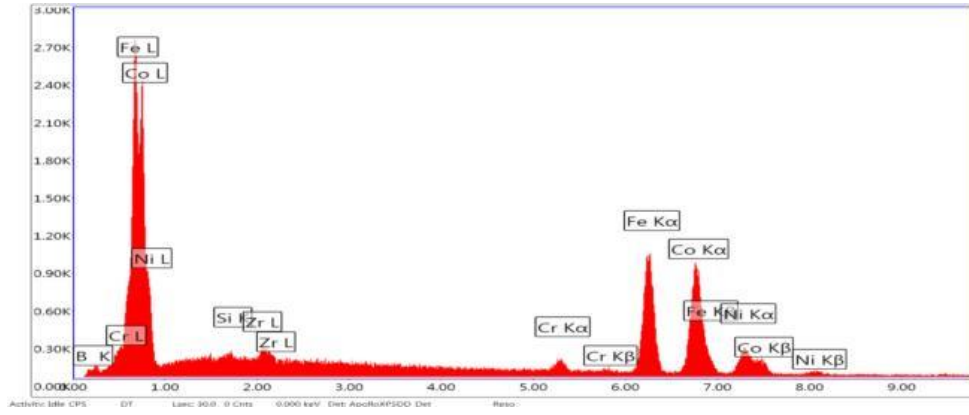
(a)

Şekil 6.31: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.

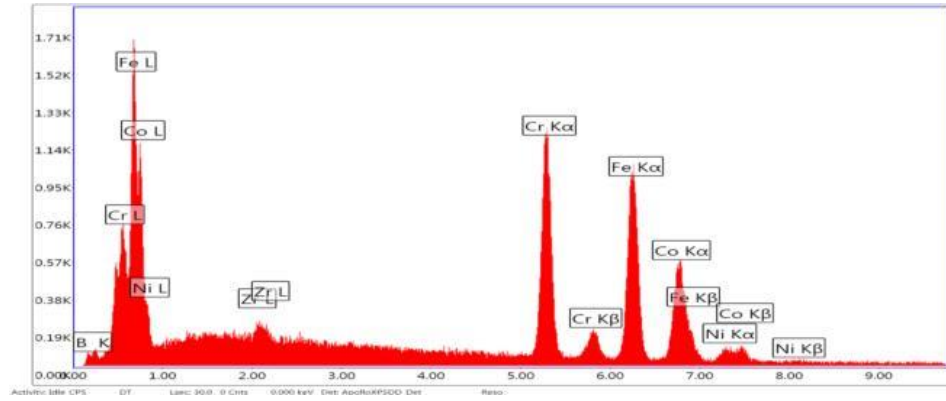
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(b)

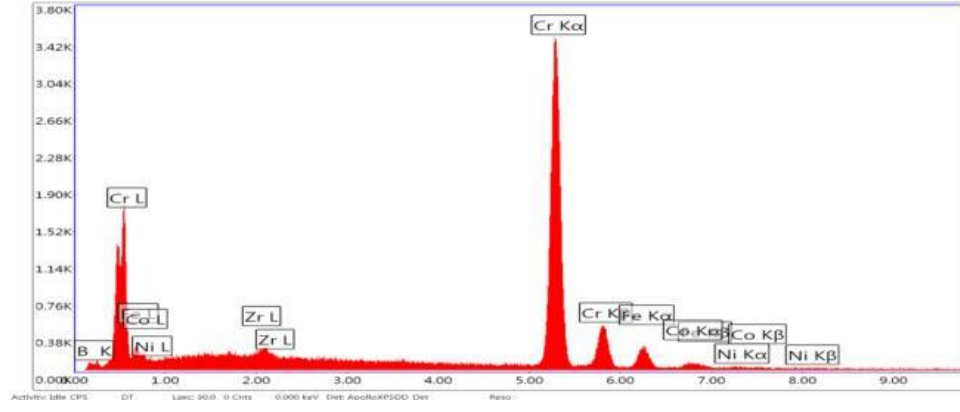


(c)

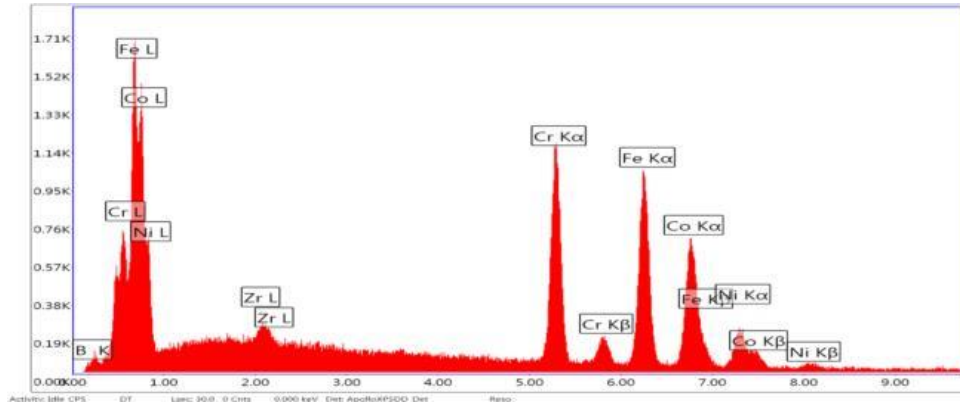


(d)

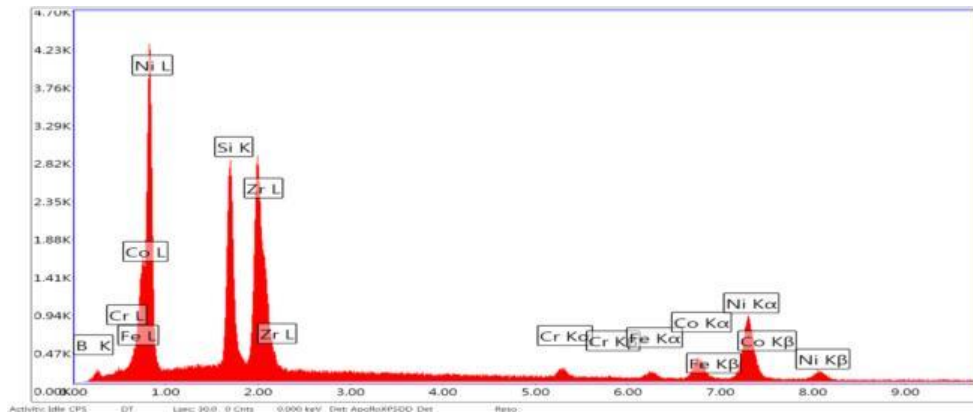
Şekil 6.31 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(e)

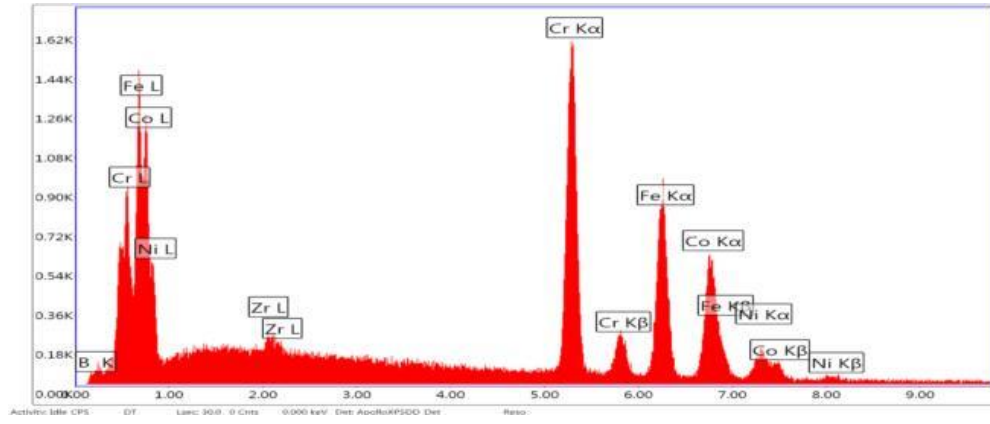


(f)

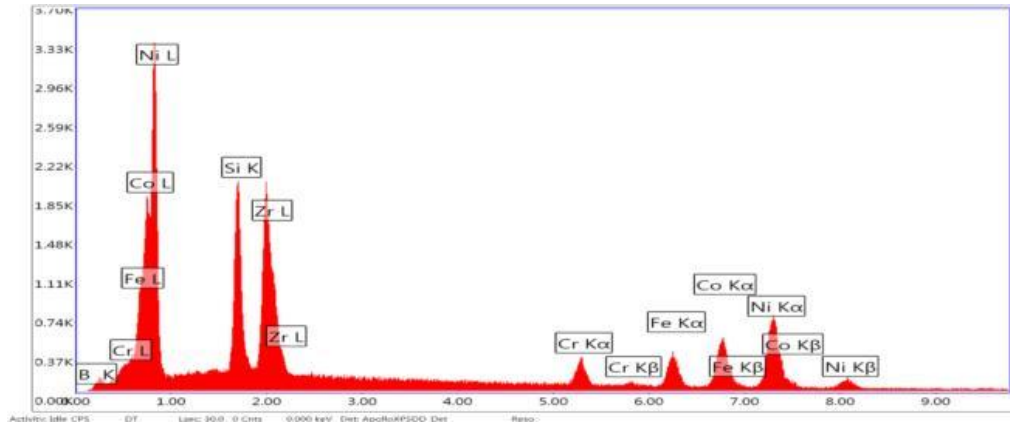


(g)

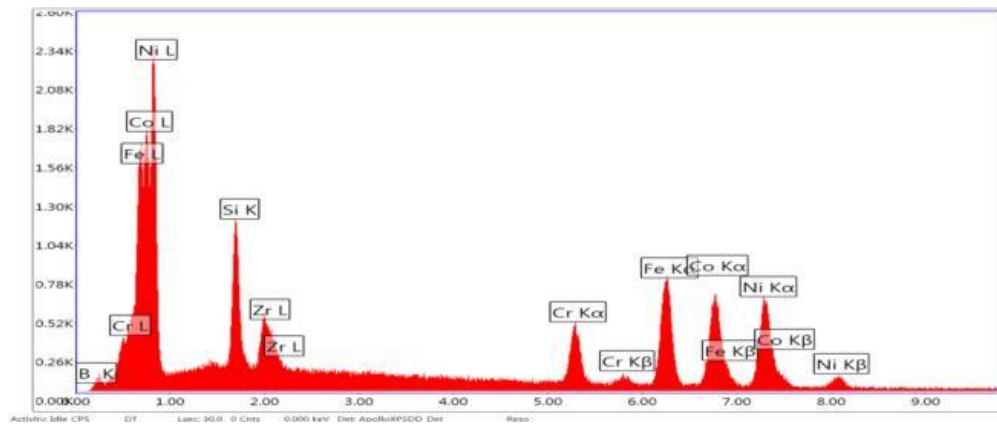
Şekil 6.31 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.2} YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(h)

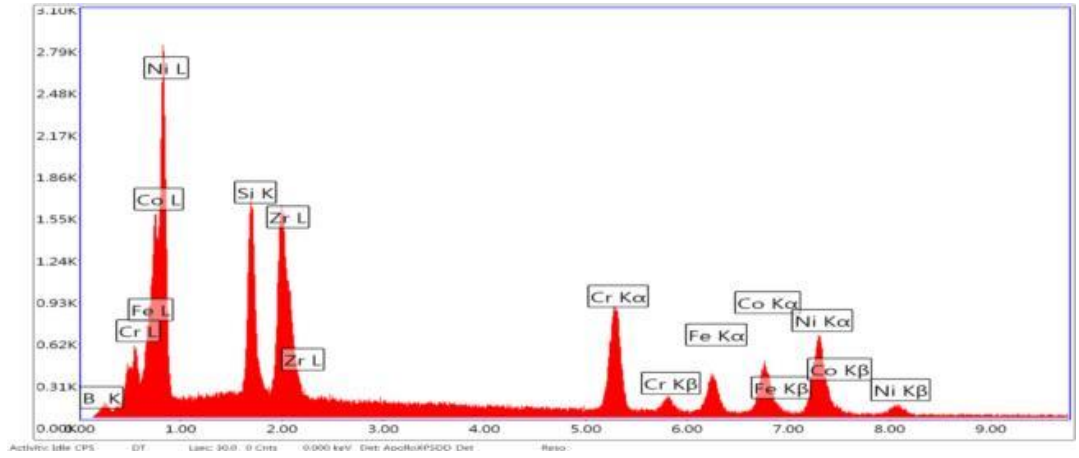


(i)



(j)

Şekil 6.31 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.



(k)

Şekil 6.31 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9 ve k)10.

Tablo 6.15: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.31a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	39,64	17,88	0,06	0,20	1,28	8,03	32,91
2	51,24	0,22	0,09	0,95	18,91	21,87	6,71
3	52,79	0,00	0,12	12,95	19,79	12,31	2,05
4	50,53	0,00	0,14	43,33	4,42	1,14	0,44
5	49,84	0,00	0,13	11,76	17,92	14,83	5,52
6	39,04	14,70	10,63	1,53	1,54	6,77	25,79
7	49,11	0,00	0,08	17,29	16,21	13,27	4,04
8	43,57	9,84	6,67	2,73	5,17	10,91	21,11
9	43,76	5,40	1,31	4,25	13,01	14,09	18,17
10	44,37	7,95	5,46	10,28	5,14	8,69	18,11

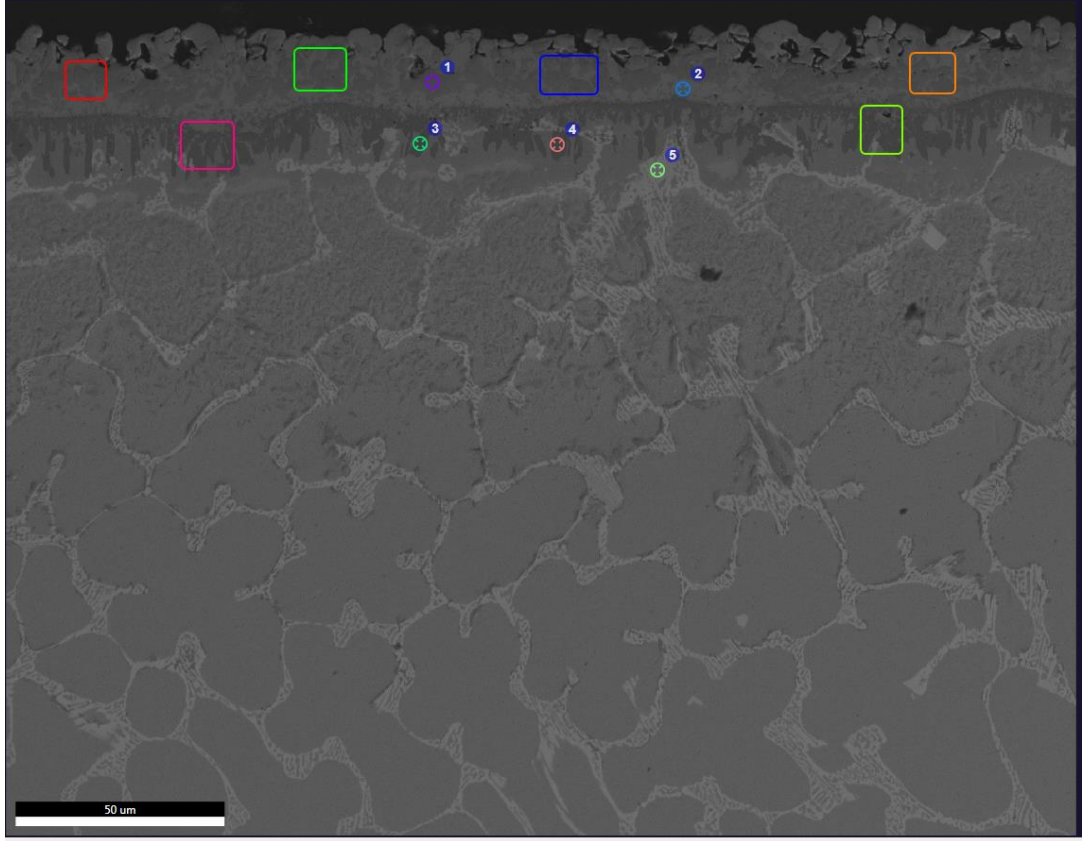
Şekil 6.31 ve Tablo 6.15 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B miktarı %39,64 olarak görülmüştür. Bununla beraber bu noktada Si ve Ni oranının ciddi şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Bu noktada %17,88 Si ve %32,91 Ni bulunmaktadır. Dış yüzeye yakın olan diğer nokta olan 2 noktasında B miktarı yine %50'nin üzerinde olup %51,24 olarak tespit edilmiştir. Borür tabakası içindeki 3 noktasında ise B miktarı en yüksek seviyedir. Bu noktada B oranı %52,79 olarak ölçülmüştür. Bu noktada Si bulunmamakla birlikte Fe oranı diğer noktalara göre daha yüksektir. Co oranı bir miktar düşüp %12,31 olmuştur.

4 noktasında, B miktarı %50 civarındadır, bununla beraber bu noktada Cr oranı çok yüksek olup %43,33 olarak ölçülmüştür. Aynı bölgedeki 5 noktasında ise B oranı yine %50 civarında olup %49,84 olmuştur. Bu noktadaki diğer alaşım elementlerinden Cr %11,76, Fe %17,92, Co %14,83 ve Ni ise %5,52 olarak tespit edilmiştir.

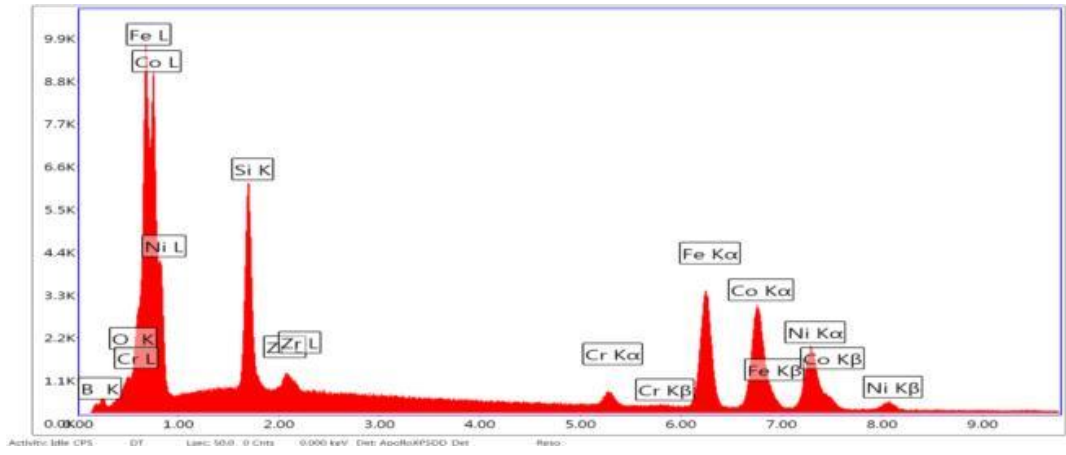
6 noktasında Si, Ni ve Zr oranının artması ile B oranı %39,04'e düşmüştür. Bu noktada %25,79 Ni, %14,70 Si ve %10,63 oranında Zr olduğu anlaşılmıştır. Yine bu bölgedeki 7 noktasındaki element oranları 5 noktası ile benzerlik göstermektedir. B oranı %50'ye yaklaşırken Ni hariç diğer alaşım elementler ise nispeten homojen bir dağılım göstermektedir.

Altlık bölgesine yakın olan bölgedeki 8, 9 ve 10 noktalarında %43'ün üzerinde B tespit edilirken, bu noktalarda Si varlığı da gözlemlenmiştir. Si, 8 noktasında %9,84, 9 noktasında %5,40 ve 10 noktasında ise %7,95 oranındadır. Ayrıca bu noktalarda alaşım elementi Ni'nin de diğer alaşım elementlerine göre daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır.

CoCrFeNiZr_{0.2} YEA'nın 300dk. borlama işlemi sonucunda elde edilen XRD desenlerinde (Şekil 6.7c) görülen ZrO₂ piklerine istinaden numunenin borür tabakasının SEM-EDS analizi O elementi de göz önünde tutularak tekrar yapılmıştır. Bu analiz sonucunda elde edilen SEM görüntüsü ve SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.32a-f'de ve elementlerin miktarları Tablo 6.16'da verilmiştir.

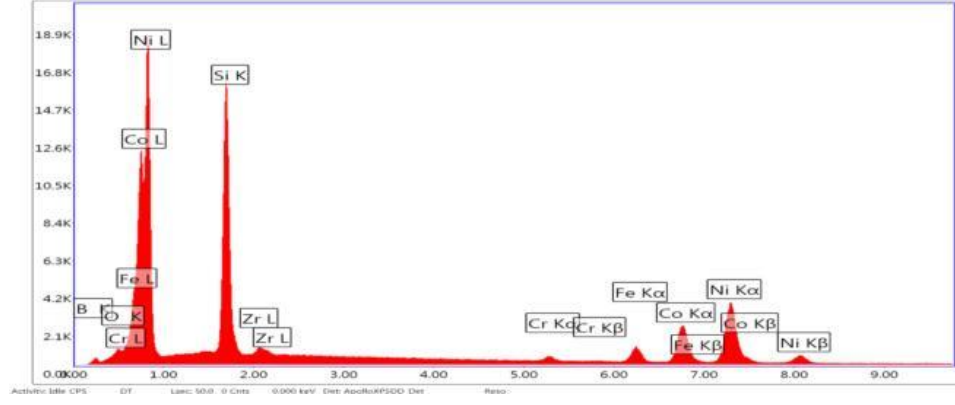


(a)

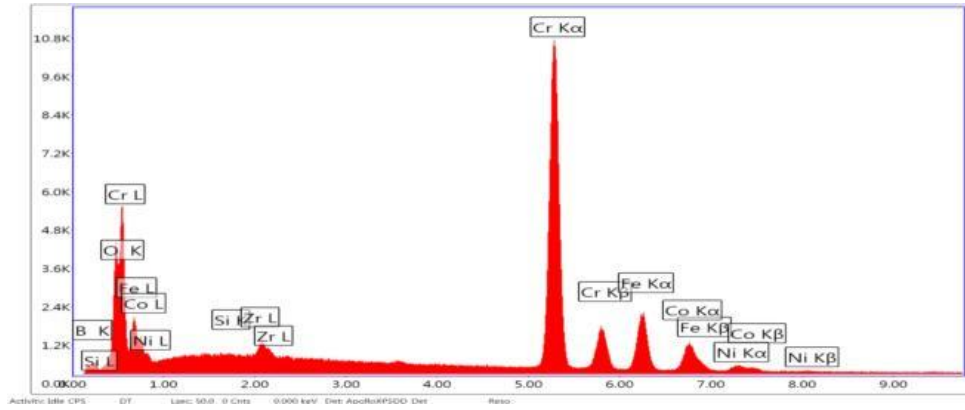


(b)

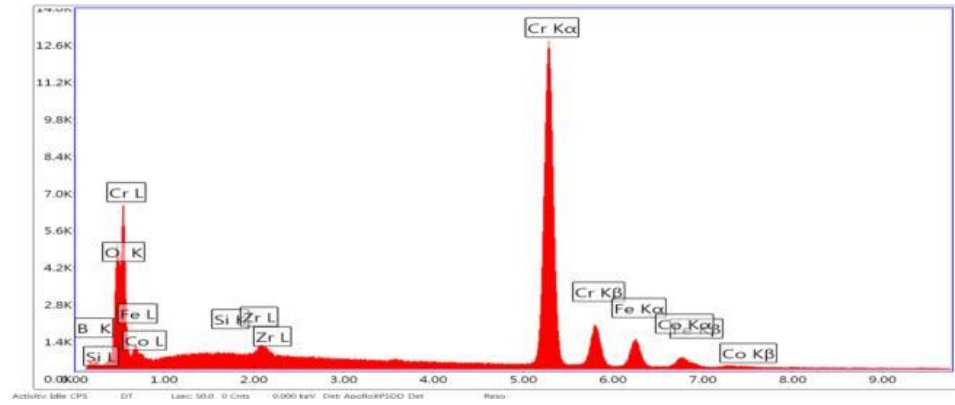
Şekil 6.32: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktaların O elementi de göz önüne alınan SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4 ve f)5.



(c)

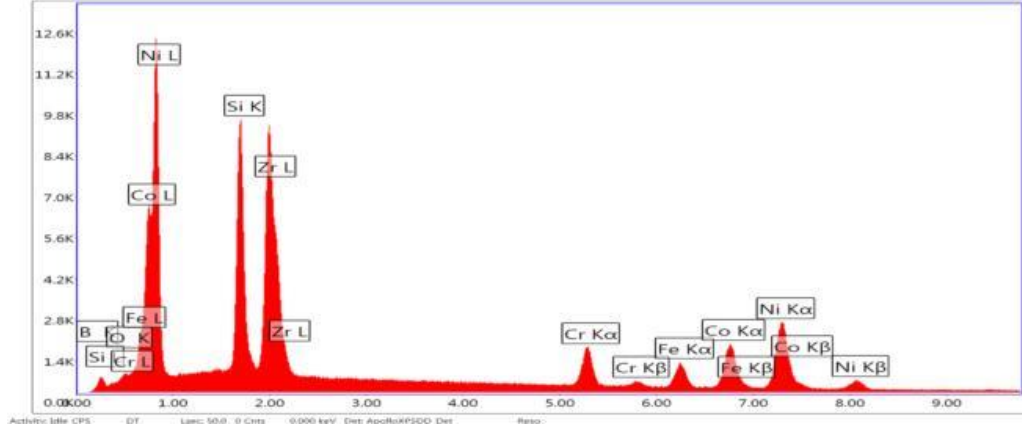


(d)



(e)

Şekil 6.32 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktaların O elementi de göz önüne alınan SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4 ve f)5.



(f)

Şekil 6.32 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktaların O elementi de göz önüne alınan SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4 ve f)5.

Tablo 6.16: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borür tabakasının belirli noktalarından (Şekil 6.32a) O elementi göz önüne alınarak elde edilen elementlerin miktarları.

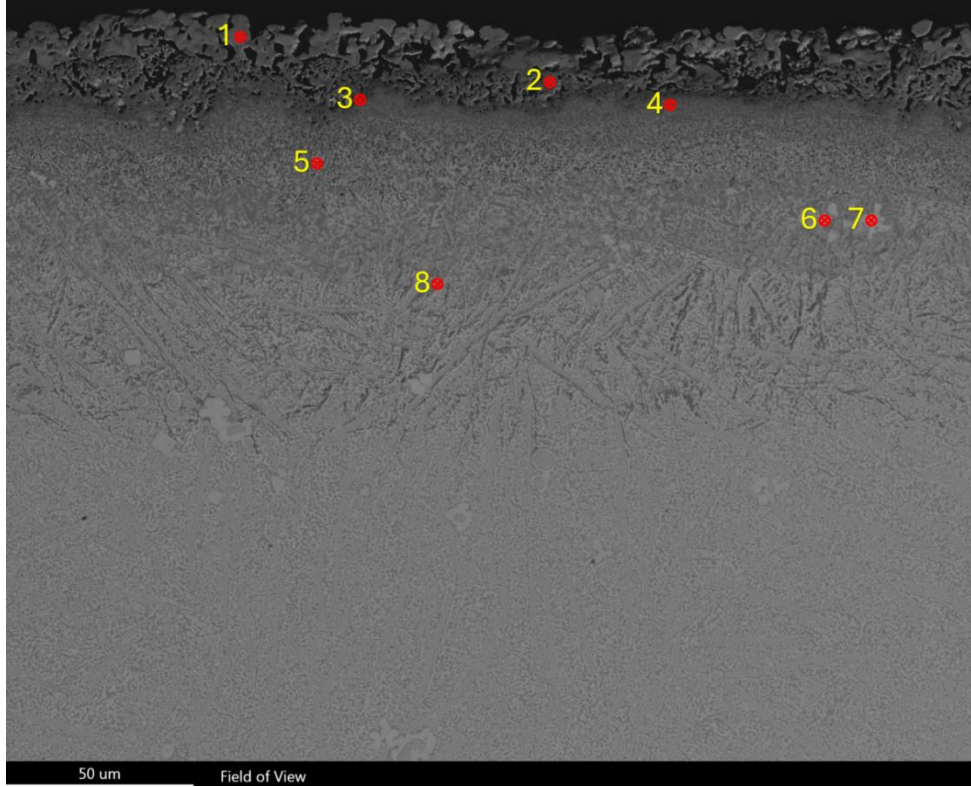
SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)							
	B	O	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	56,11	1,15	6,01	0,12	0,76	11,36	13,83	10,67
2	45,58	1,49	17,32	0,13	0,53	2,58	10,39	21,98
3	49,06	3,85	0,04	0,12	31,57	8,82	5,18	1,36
4	48,40	4,68	0,20	0,18	38,96	5,38	2,20	0,00
5	44,11	0,86	11,36	8,03	4,18	3,69	9,32	18,46

Elde edilen bu verilere göre, XRD analizlerinde tespit edilen ZrO₂ piklerine istinaden O elementinin bu noktalarda diğer elementlere oranla daha düşük olduğu, bu noktalarda yoğunlaşmadığı ve borür tabakasında çok önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

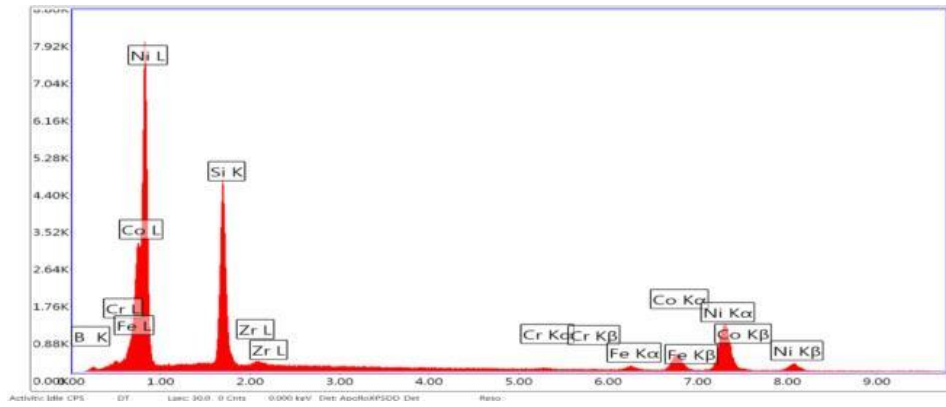
900°C'de 300 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.2 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 300dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 alaşımına ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları Şekil 6.33'de verilmiştir.

Şekil 6.33-a’da işaretlenen 1-8 alanlarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla Şekil 6.33b-i’de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.17’de verilmiştir.



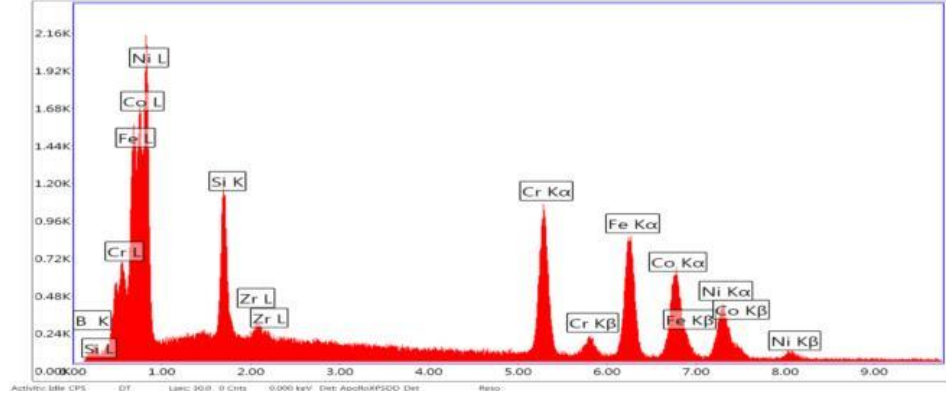
(a)



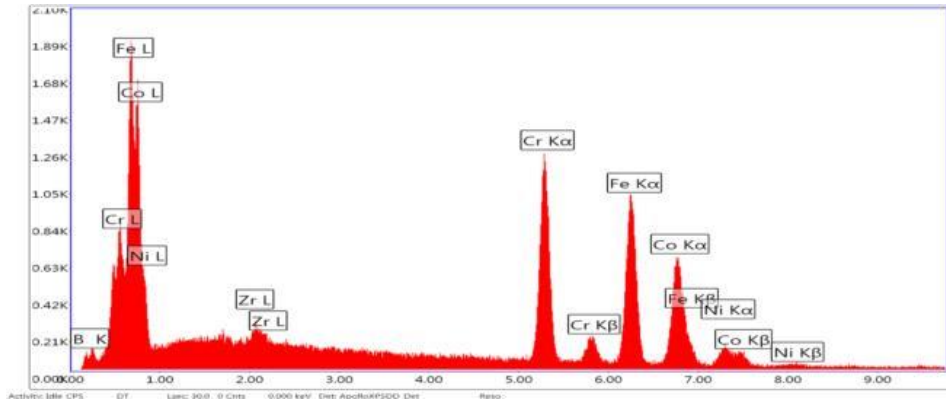
(b)

Şekil 6.33: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA’ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları.

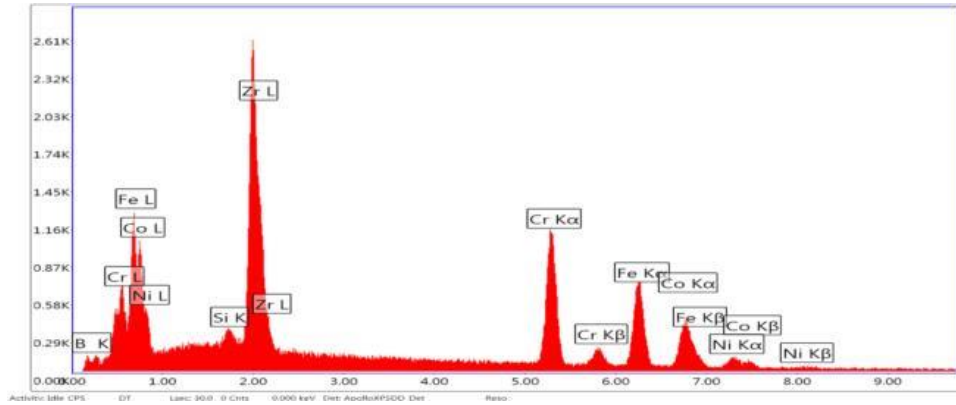
a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7 ve i)8.



(c)

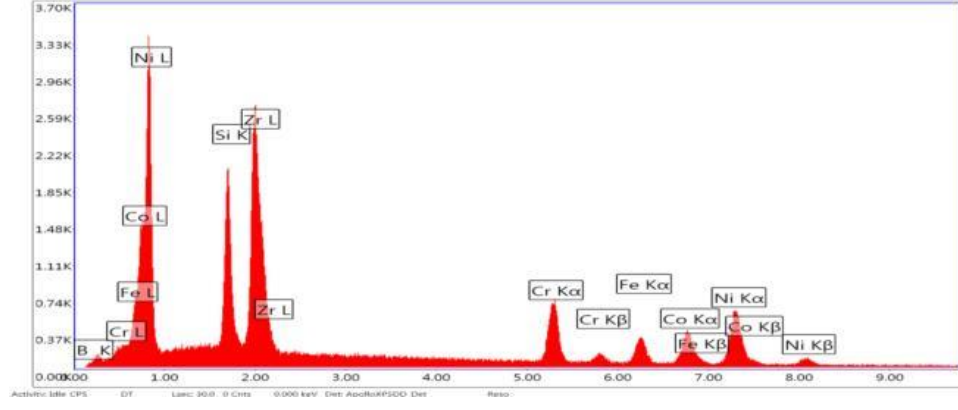


(d)

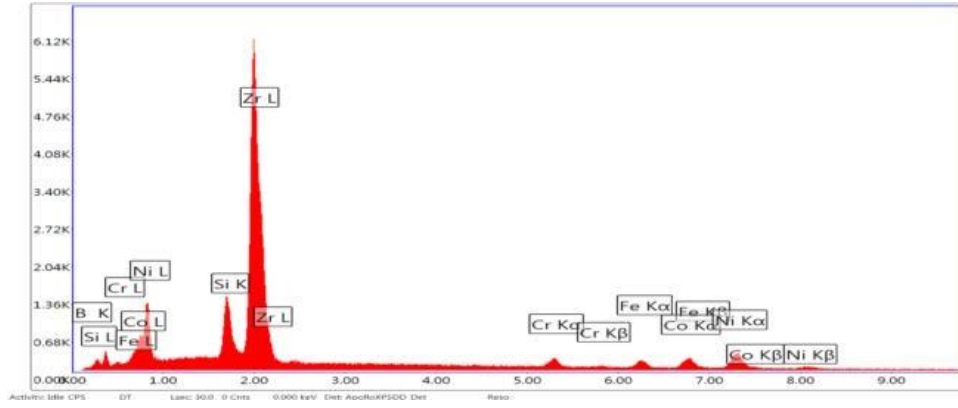


(e)

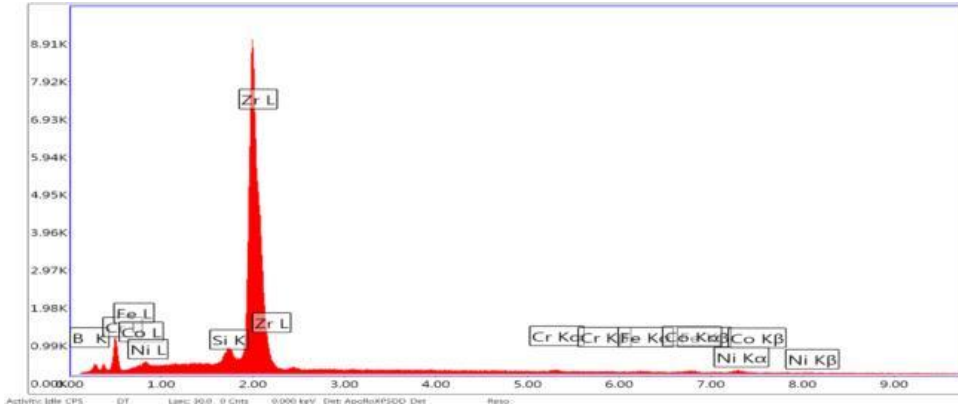
Şekil 6.33 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7 ve i)8.



(f)

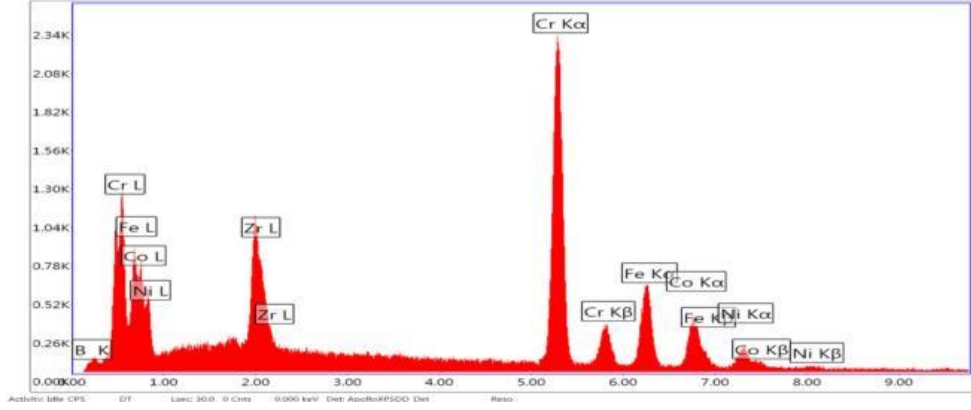


(g)



(h)

Şekil 6.33 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7 ve i)8.



(i)

Şekil 6.33 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüde işaretli noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7 ve i)8.

Tablo 6.17: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.33a) SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

SEM-EDS Analiz Noktası	Element Miktarı (% Atomik)						
	B	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
1	45,79	18,35	0,11	0,33	1,02	6,87	27,53
2	49,93	4,82	0,10	9,50	13,58	12,30	9,79
3	58,79	0,00	0,12	10,55	15,55	12,23	2,76
4	50,86	0,51	8,59	13,97	14,13	9,44	2,50
5	43,25	9,26	9,29	8,06	4,88	7,97	17,29
6	37,33	7,42	29,39	3,02	3,54	6,34	12,96
7	25,82	2,53	62,47	1,54	1,52	2,49	3,63
8	46,54	0,00	2,99	27,56	11,13	7,82	3,97

Şekil 6.33 ve Tablo 6.17 birlikte incelendiğinde borür tabakasının en dış yüzeyine yakın olan 1 noktasında B miktarı %45,79 olarak görülmüştür. Bununla beraber bu noktada Si ve Ni oranının ciddi şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Bu noktada %18,35 Si ve %27,53 Ni bulunmaktadır. Dış yüzeye yakın olan diğer nokta olan 2 noktasında B miktarı neredeyse %50 olup, bu noktada Si ve Ni miktarı 1 noktasına göre daha düşüktür.

3 ile işaretli noktada, B oranı en yüksek seviyede olup %58,79 olarak ölçülmüştür. Bununla beraber bu noktada Si'ye rastlanmamış olup Ni oranı da çok düşüktür. 1, 2 ve 3 noktalarında Zr oranı da yok denecek kadar azdır. 4 noktasında ise B oranı %50,86,

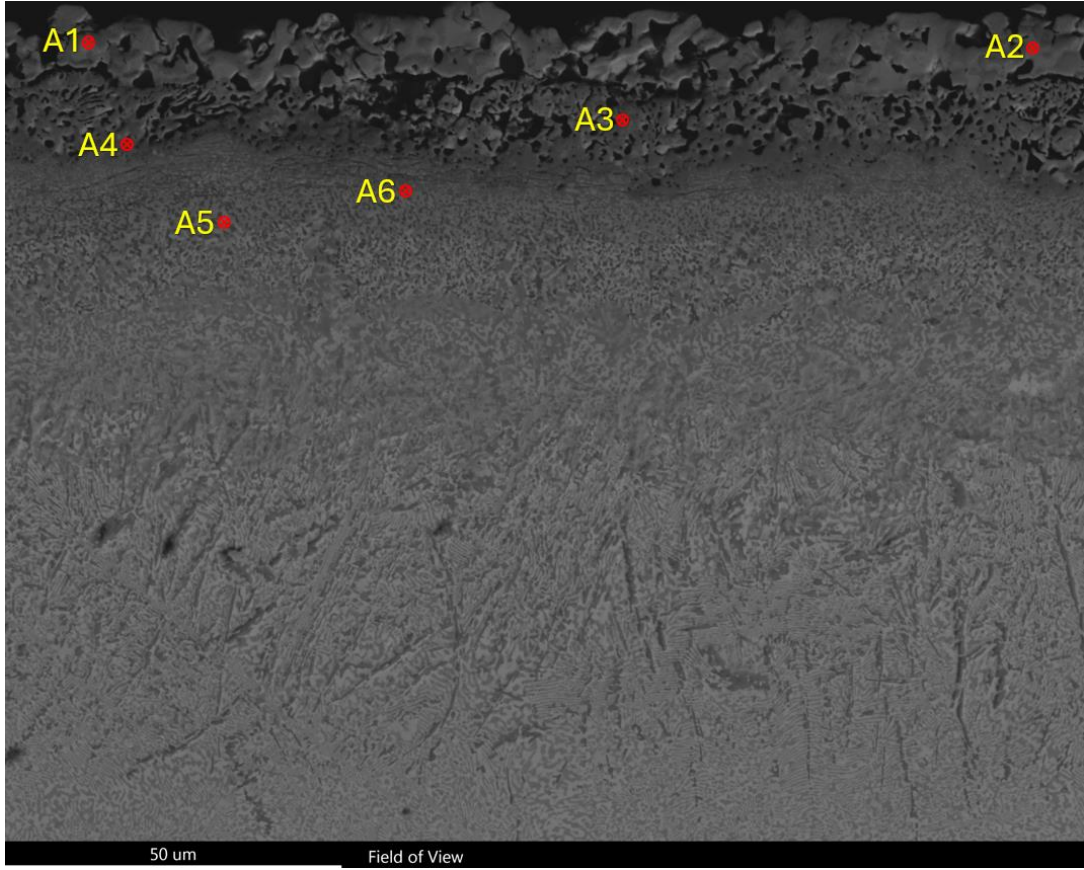
Zr %8,59'dur. alaşım elementlerinden Ni bu noktada da çok dūřık olmakla beraber oranı %2,50'tir. Dięer alaşım elementlerinden Co %9,44, Cr %13,97 ve Fe %14,13 oranında tespit edilmiştir.

5 noktasında B oranı %43,25 olup bununla beraber Si, Ni ve Zr oranlarında da bir miktar artış görülmüştür. Bu noktada %17,29 Ni, %9,26 Si, %9,29 Zr, %8,06 Cr, %4,88 Fe ve %7,97 oranında Co bulunmaktadır.

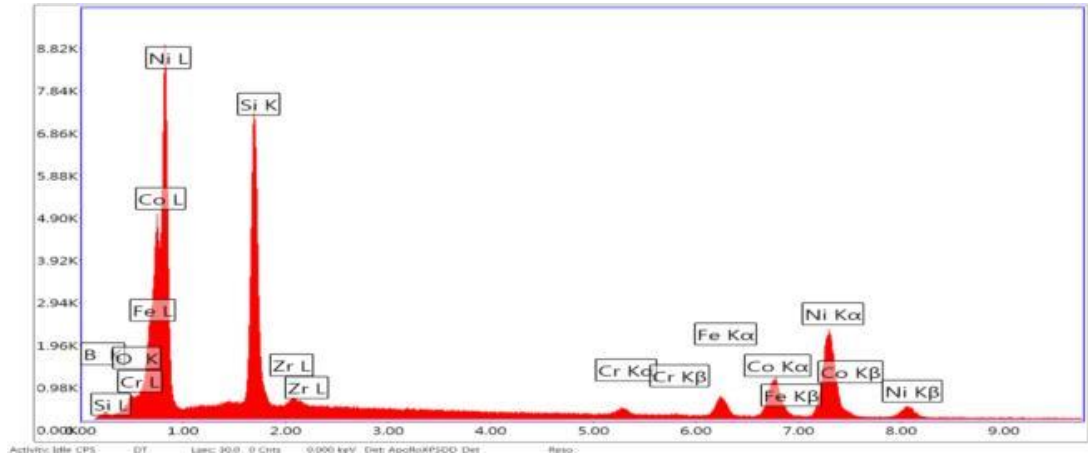
Altığa yakın olan noktalardan 6 noktasının oranları 5 noktasına benzemekle beraber B oranı %37,33 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca bu noktada Zr oranı bir miktar yüksek olup %29,39 olarak llmüřtür. 7 noktasında ise Zr oranı çok yüksek olup %62,47'dir, bununla ters orantılı olarak da B oranı %25,82'ye dūřmüřtür. Altlık bölgesine en yakın nokta olan 8 noktasında B oranı %46,54, Cr %27,56, Fe %11,13, Co, %7,82, Ni ise %3,97 oranında bulunmaktadır. Bu noktada Si'ye rastlanmamıştır. 900°C'de 300 dk. borlama işlemine tabi tutulan CoCrFeNiZr0.5 YEA'da B'nin yeterince difüze olduğu % atomik miktarlardan net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

900°C'de 300dk borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 alaşımına ait XRD desenlerinde görülen ZrO₂ fazlarına istinaden bu YEA'ya O elementini de göz önüne alarak tekrar SEM-EDS analizi yapılmıştır. Yapılan bu işlem sonucunda elde edilen SEM görüntüsü ve bu görüntüde SEM-EDS yapılan işaretlenmiş belirli noktalar ile bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları şekil 6.34'de verilmiştir.

şekil 6.34-a'da işaretlenen A1-A6 alanlarından elde edilmiş SEM-EDS spektrumları sırasıyla şekil 6.34b-g'de verilmiştir. Ayrıca bu noktalarda tespit edilen element miktarları da Tablo 6.18'de verilmiştir.

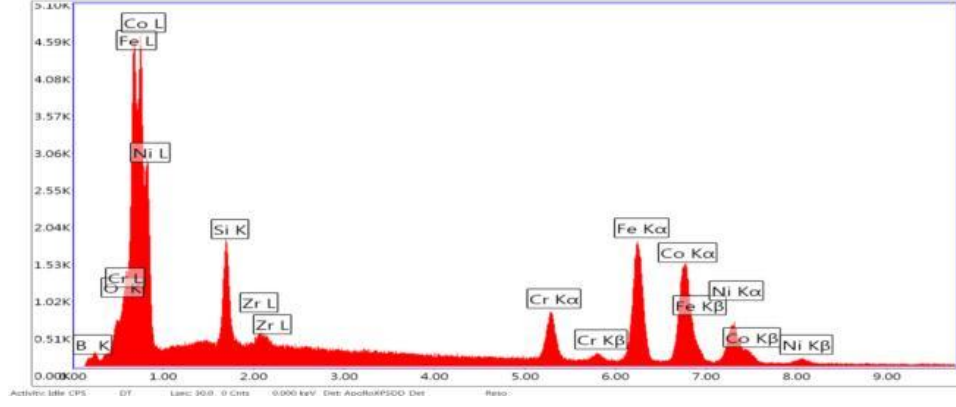


(a)

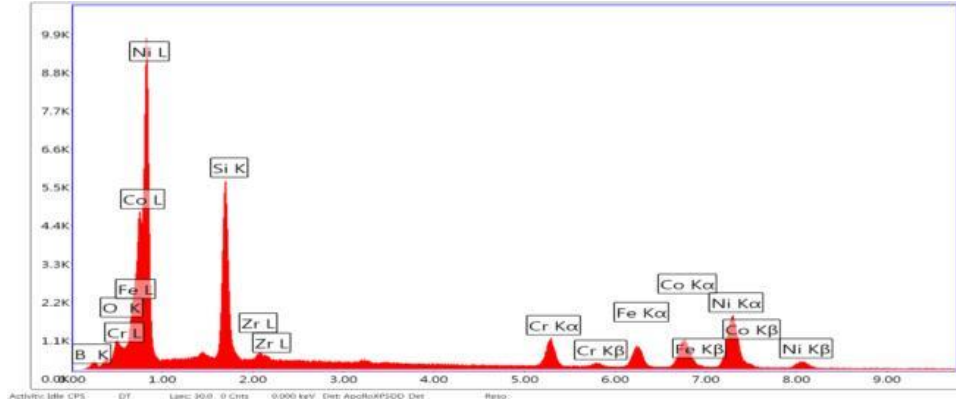


(b)

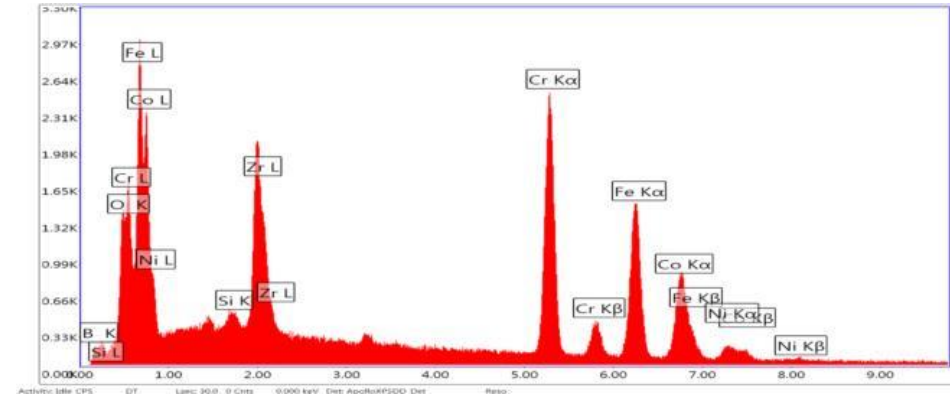
Şekil 6.34: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait O elementi de eklenerek kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5 ve g)6.



(c)

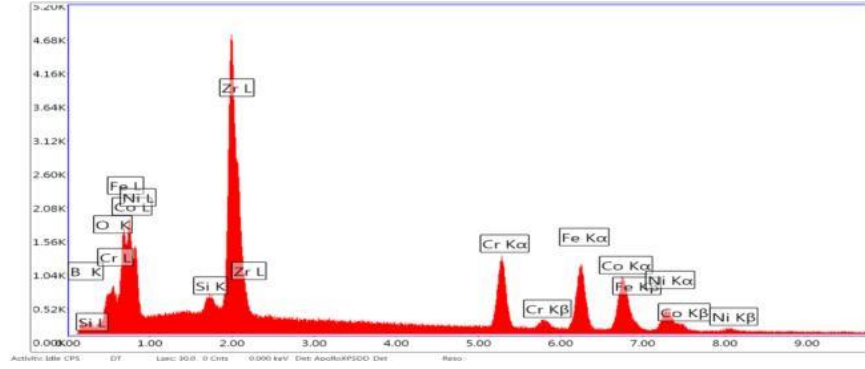


(d)

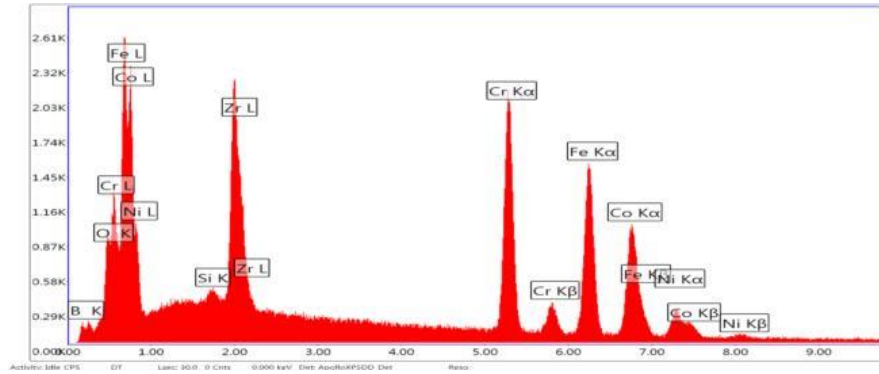


(e)

Şekil 6.34 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr_{0.5} YEA'ya ait O elementi de eklenerek kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5 ve g)6.



(f)



(g)

Şekil 6.34 devam: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'ya ait O elementi de eklenerek kesitten alınan SEM görüntüsü ve bu noktalardan elde edilen SEM-EDS spektrumları. a)SEM görüntüsü. b)1, c)2, d)3, e)4, f)5 ve g)6.

Tablo 6.18: 300dk. borlama yapılan CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın belirli noktalarından (Şekil 6.34a) O elementi de eklenerek SEM-EDS ile elde edilen elementlerin miktarları.

	Element Miktarı (% Atomik)							
SEM-EDS Analiz Noktası	B	O	Si	Zr	Cr	Fe	Co	Ni
A1	49,13	1,91	14,16	0,10	0,71	2,56	7,98	23,45
A2	55,23	2,03	3,39	0,13	2,97	13,65	15,12	7,48
A3	51,99	2,97	11,03	0,13	3,45	4,09	7,83	18,51
A4	53,41	4,09	0,50	3,07	13,46	13,93	9,51	2,03
A5	52,84	2,74	0,44	8,62	7,39	10,80	11,32	5,85
A6	50,77	2,45	0,39	3,70	12,08	14,78	12,19	3,64

Elde edilen bu verilere göre, XRD analizlerinde tespit edilen ZrO_2 piklerine istinaden O elementinin bu noktalarda diğer elementlere oranla daha düşük olduğu, borür tabakasında çok önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

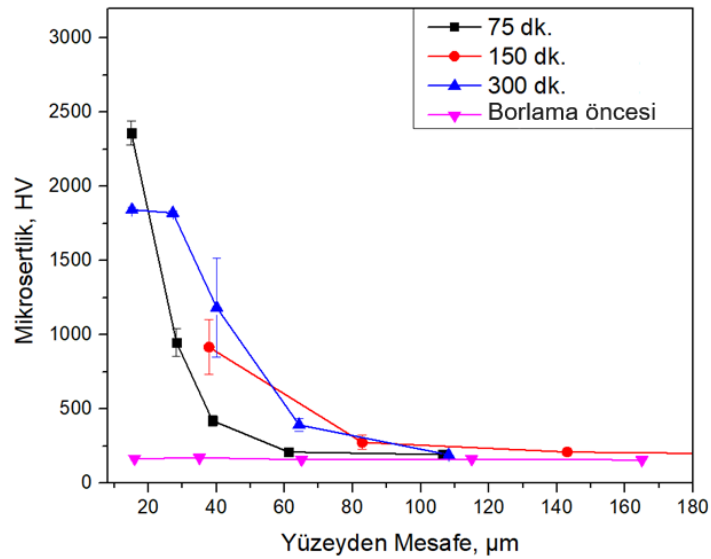
6.5. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Borlama işlemi öncesinde ve sonrasında numunelerin kesitinden oluşturulan Vickers mikrosertlik izlerinden elde edilen mikrosertlik değerleri Tablo 6.19-6.22 ve Şekil 6.35-6.38’de verilmiştir.

6.5.1. CoCrFeNi YEA

Tablo 6.19: CoCrFeNi YEA’nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Borlama Öncesi		75dk. Borlama sonrası		150dk. Borlama sonrası		300dk. Borlama sonrası	
Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV
17	165	15	2359			15	1843
32	172	39	421	38	917	40	1183
69	159	61	211	83	275	64	394
118	163	107	193	143	211	108	191
180	157			228	191		



Şekil 6.35: CoCrFeNi YEA’nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

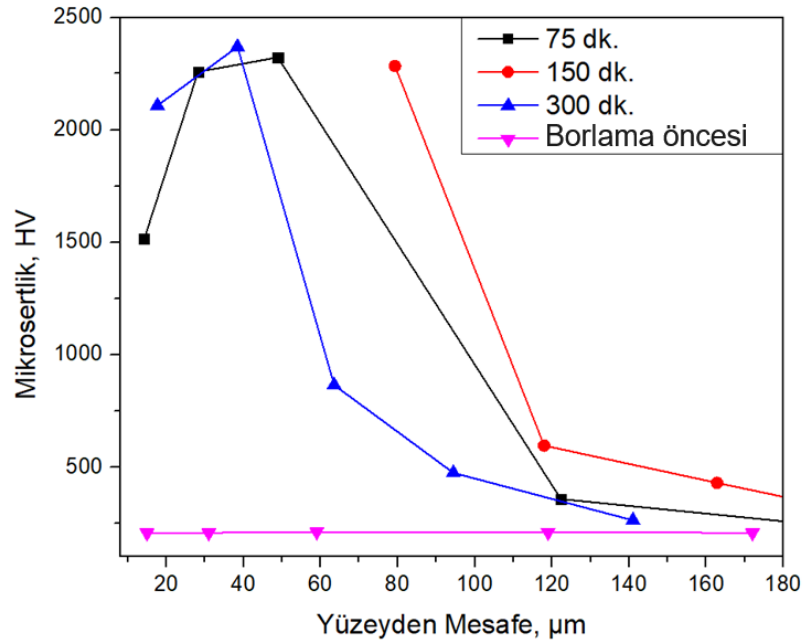
Her üç işlem süresi sonucunda yapılan mikrosertlik ölçümleri ile elde edilen grafiklerden de açıkça anlaşılabacağı üzere malzeme yüzeyinden içerilere doğru gidildikçe sertlik değerinin ciddi bir şekilde düştüğü görülmektedir.

Yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde ise, borlama öncesinde tespit edilen ortalama 160HV sertlik değerinin borlama sonrasında 2000HV seviyelerine kadar yükseldiği ve borlama süresinin artması ile de elde edilen bu sertlik değerinin altlık malzemesine doğru gidildikçe de elde edilebildiği anlaşılmaktadır.

6.5.2. CoCrFeNiZr0.1 YEA

Tablo 6.20: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasında numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Borlama Öncesi		75dk. Borlama sonrası		150dk. Borlama sonrası		300dk. Borlama sonrası	
Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV
15	206	14	1514	79	2284	18	2108
31	207	28	2258	118	595	38	2369
59	211	49	2322	163	429	64	865
119	209	122	357	208	267	94	473
172	207	192	238	302	247	141	262



Şekil 6.36: CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasında numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Her üç işlem süresi sonucunda yapılan mikrosertlik ölçümleri ile elde edilen grafiklerden de açıkça anlaşılabacağı üzere malzeme yüzeyinden içerilere doğru gidildikçe sertlik değerinin ciddi bir şekilde düştüğü görülmektedir.

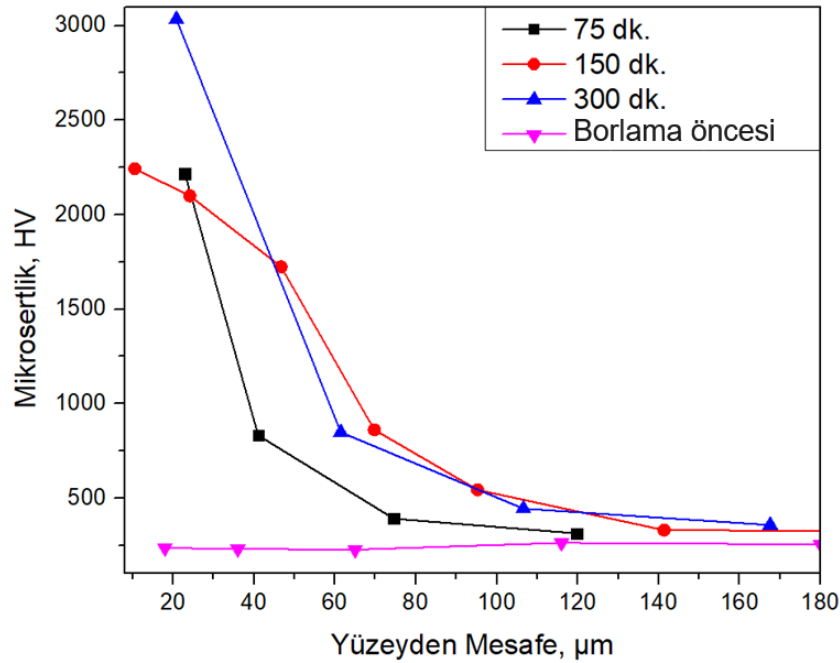
Yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde ise, borlama öncesinde bu alaşım için ortalama 210HV sertlik değeri tespit edilmiştir. Bu sertlik değerinin borlama sonrasında 2200HV seviyelerine kadar yükseldiği ve borlama süresinin artması ile de elde edilen bu sertlik değerinin altlık malzemesine doğru gidildikçe de elde edilebildiği anlaşılmaktadır.

Ayrıca, 75dk. ve 150dk. borlanan numunelerin en dış yüzeyinde mikrosertlik değerinin nispeten düşük olduğu görülmektedir. Bunun kaplamanın dış yüzeyinin kırılgan ve gevşek karakterde olmasından dolayı dökülmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.5.3. CoCrFeNiZr0.2 YEA

Tablo 6.21: CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Borlama Öncesi		75dk. Borlama sonrası		150dk. Borlama sonrası		300dk. Borlama sonrası	
Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV
18	236	23	2216	24	2099	21	3033
36	231	41	832	47	1724		
65	227	75	391	70	862	61	848
116	263	120	313	95	543	107	445
180	255			141	330	168	357
				206	325		



Şekil 6.37: CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Her üç işlem süresi sonucunda yapılan mikrosertlik ölçümleri ile elde edilen grafiklerden de açıkça anlaşılabacağı üzere malzeme yüzeyinden içerilere doğru gidildikçe sertlik değerinin ciddi bir şekilde düştüğü görülmektedir.

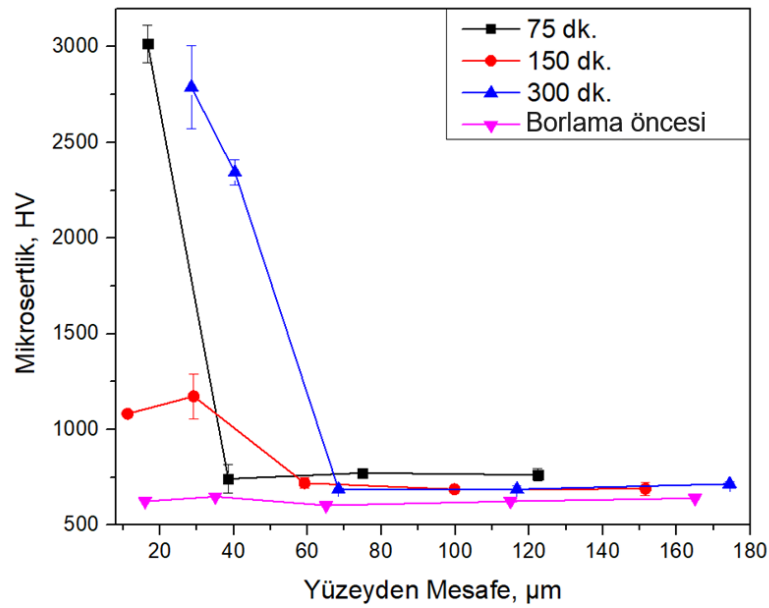
Yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde ise, borlama öncesinde bu alaşım için ortalama 230HV sertlik değeri tespit edilmiştir. Bu sertlik değerinin borlama sonrasında 2200HV seviyelerine kadar yükseldiği hatta 300dk. işlem sonrasında 3000HV değerine kadar

çıkabildiği ve borlama süresinin artması ile de elde edilen bu sertlik değerinin altlık malzemesine doğru gidildikçe de elde edilebildiği anlaşılmaktadır.

6.5.4. CoCrFeNiZr0.5 YEA

Tablo 6.22: CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Borlama Öncesi		75dk. Borlama sonrası		150dk. Borlama sonrası		300dk. Borlama sonrası	
Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV	Mesafe, μm	Sertlik, HV
16	625	17	3015	11	1082	29	2789
35	649	39	742	29	1173	40	2343
65	603	75	773	59	720	68	688
115	625	122	763	100	687	117	688
165	641			152	690	174	716



Şekil 6.38: CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama işlemi öncesi ve farklı sürelerde borlama işlemi sonrasındaki numune kesitinden alınan mesafeye bağlı mikrosertlik değerleri.

Her üç işlem süresi sonucunda yapılan mikrosertik ölçümleri ile elde edilen grafiklerden de açıkça anlaşılabacağı üzere malzeme yüzeyinden içerilere doğru gidildikçe sertlik değerinin ciddi bir şekilde düştüğü görülmektedir.

Yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde ise, borlama öncesinde bu alaşım için ortalama 620HV sertlik değeri tespit edilmiştir. Bu sertlik değerinin borlama sonrasında 2700HV seviyelerine kadar yükseldiği ve borlama süresinin artması ile de elde edilen bu sertlik değerinin altlık malzemesine doğru gidildikçe de elde edilebildiği anlaşılmaktadır.

7. DEĞERLENDİRME

Saflık derecesi yüksek beş farklı element (Co, Cr, Fe, Ni, Zr) atomik olarak eşit miktarda kullanılarak ark ergitilmesi ile oluşturulan CoCrFeNiZr YEA numunelerin, XRD, SEM ve sertlik ölçümleri neticesinde YEA numunelerinin borlanması süre ve sıcaklık değişkenleri ile kaplama kalınlığının, kaplama faz kompozisyonunun, morfolojisinin ve kaplama sertliklerinin dikkate değer şekilde değiştiği görülmektedir.

Zr içermeyen CoCrFeNi YEA yüzeyinde borlama öncesinde $\text{Ni}_{2.9}\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.36}$ fazının oluştuğu gözlenmektedir. Bununla beraber, 75dk., 150dk. ve 300dk. yapılan borlama işleminden sonra YEA yüzeyinde ise FeB ve Ni_2Si fazlarının oluştuğu görülmüştür.

Bunun yanı sıra, 75dk borlama sonucunda FeB ve Ni_2Si fazına ek olarak Cr_5B_3 ve $\text{Ni}_{2.9}\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.36}$ fazlarının da oluştuğu açıkça görülebilmektedir.

Aynı alaşımın 150dk borlama işlemi sonucunda da FeB ve Ni_2Si fazları ile birlikte Cr_3Si ve CrSi fazları da tespit edilmiştir.

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise FeB ve Ni_2Si fazlarının yanında ayrıca $\text{Ni}_{4.6}\text{Si}_2\text{B}$ fazının da oluştuğu görülmektedir.

SEM kesit resimlerinde de bu farklı fazların bulunduğu görülmekte olup XRD analizi sonucu bulunan bu fazların yapılan SEM-EDS sonuçları ile de paralel olduğu görülmektedir. (Şekil 6.5, Şekil 6.29a-l, Tablo 6.13)

Mikrosertlik değerlerindeki saçılım ve nispeten bazı numunelerin aynı mesafelerde farklı değerlerin bulunması alaşım elementlerinin farklılığından dolayı farklı fazların özellikle zamana bağlı olarak da değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

CoCrFeNiZr0.1 YEA yüzeyinde de borlama işlemi öncesinde $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ fazı gözlemlenmiştir. Aynı alaşımın 75dk, 150dk ve 300dk borlamalar sonucu oluşan pikler, fazlara ait veri tabanı ile eşleştirildiğinde her üç işlem sonucunda da Ni_2Si ve FeB fazlarının oluştuğu görülmektedir.

Bunun yanı sıra, 75dk borlama sonucunda FeB ve Ni_2Si fazına ek olarak Cr_3Si ve fazının da oluştuğu açıkça görülebilmektedir.

Aynı alaşımın 150dk borlama işlemi sonucunda da FeB ve Ni_2Si fazları ile birlikte ZrO_2 , Cr_2Si ve CrSi fazları da tespit edilmiştir.

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise FeB ve Ni₂Si fazlarının yanında ayrıca ZrO₂ fazının da olduğu görülmektedir.

SEM kesit resimlerinde de bu farklı fazların bulunduğu görülmekte olup XRD analizi sonucu bulunan bu fazların yapılan SEM-EDS sonuçları ile de paralel olduğu görülmektedir. (Şekil 6.6, Şekil 6.30, Tablo 6.14)

CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın borlama işlemi öncesinde yüzeyinde FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06} fazı ile birlikte ayrıca Co_{1.29}Ni_{1.71}O₄ olduğu görülmüştür.

Aynı alaşımın 75dk, 150dk ve 300dk borlamalar sonucunda yine Ni₂Si ve FeB fazları oluşmuştur.

75dk borlama sonucunda FeB ve Ni₂Si fazına ek olarak Cr₂Si fazının da olduğu açıkça görülebilmektedir.

150dk borlama işlemi sonucunda da FeB ve Ni₂Si fazları ile birlikte ZrO₂, Cr₂Si ve CrSi fazları da tespit edilmiştir.

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise FeB ve Ni₂Si fazlarının yanında ayrıca ZrO₂ fazının da olduğu görülmektedir.

Yapılan XRD analizi sonucuna göre CoCrFeNiZr0.1 ve CoCrFeNiZr0.2 YEA'ların benzer sürelerde yapılan borlama işlemi sonucunda oluşan fazlar biribiri ile benzerlik göstermektedir. (Şekil 6.7, Şekil 6.31, Tablo 6.15)

CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın borlama öncesindeki yüzey analizinde FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06} fazı ile birlikte yine Co_{1.29}Ni_{1.71}O₄ olduğu ve bunlara ek olarak da ZrCo_{2.9} fazının olduğu gözlemlenmiştir.

75dk, 150dk ve 300dk borlamalar sonucu oluşan pikler, fazlara ait veri tabanı ile eşleştirildiğinde her üç işlem sonucunda ortak olarak sadece ZrO₂ fazı tespit edilmiştir.

Bunun yanısıra, 75dk borlama sonucunda ZrO₂ fazına ek olarak Ni₂Si, Ni₃₁Si₁₂, Co₂B ve FeB fazlarının da olduğu açıkça görülebilmektedir.

Aynı alaşımın 150dk borlama işlemi sonucunda da ZrO₂ fazı ile birlikte Fe₂B, 2H-C (Grafit), Fe(Östenit) ve C_{0.08}Fe_{0.82} Martenzit fazları da tespit edilmiştir.

300dk borlama prosesi sonrasında yapılan XRD analizi sonucunda ise ZrO_2 fazının yanında ayrıca Ni_2Si , $FeSi_2$ ve FeB fazlarının da olduğu görülmektedir. (Şekil 6.8, Şekil 6.33, Tablo 6.17)

XRD analizinde genel olarak Cr içeren fazların SEM analizlerinde parlak bir görüntü oluşturduğu görülmektedir. Bu durum mevcut literatür çalışmaları ile örtüşmektedir.

Literatürde de rapor edildiği üzere genellikle Fe_2B fazı yüzeyde önce oluşmakta ve daha sonra yüzeyde artan bor potansiyeline bağlı olarak bu fazın borür tabakasının dış kısmından başlamak üzere FeB fazına dönüştüğü bilinmektedir. Yani, borür tabakasının dış bölgesinde FeB fazı iç bölgesinde ise Fe_2B fazı bulunmaktadır. En şiddetli pikin tüm sıcaklık ve sürelerde yapılan borlama işlemlerinde Fe_2B fazına ait olduğu görülmektedir. Ancak, XRD sonuçlarının hepsinde Fe_2B fazı görülmemiştir. Bunun oluşan borür tabakanın fazla kalın olmasından dolayı XRD tarafından Fe_2B fazının tespit edilmesi şeklinde yorumlanmıştır. Esasen yüzeyde belirli miktarda borür tabakası giderildiği takdirde Fe_2B fazının da varlığı veya $(Fe,M)_2B$ faz karışımları bulunabileceği düşünülmektedir. SEM kesit resimleri ve SEM-EDS sonuçları bunu teyit eder mahiyettedir. Demir esaslı malzemelerde yapılan borlama işlemleri ile ilgili literatürleri incelediğimizde, demir esaslı olan çift fazların (Fe_2B , FeB) $CoCrFeNiZr$ YEA'da da benzer şekilde tüm borlanan numunelerde olduğu görülmektedir. Bu durum demirin bor ile bileşik oluşturma eğiliminde olmasından kaynaklıdır [17]. Kaplama kısmındaki, geçiş bölgesindeki ve matris bölgesindeki ağırlıklı fazların belirlenmesi adına ek olarak SEM-EDS analizinden faydalanılarak elementer ve haritalama analizleri yapılmıştır.

SEM görüntülerinde, genel olarak borlanmış numunelerde 3 bölge gözükmemektedir; borür kaplama bölgesi, geçiş bölgesi ve altlık (matris) bölgesi. Borür tabaka bölgesi genel olarak iki belirgin bölgeye ayrılarak incelense de gerek saf malzemelerin gerekse demir esaslı malzemelerin borür tabakasından çok farklı olarak çok katmanlı bir yapının olduğu görülmektedir. Bu katmanlı yapı borlama süresine ve Zr oranına bağlı olarak farklılık gösterse de genel yapı itibarıyla alışılagelen alaşımların yüzeyinde oluşan borür tabakadan farklı olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum YEA'da bulunan elementlerin difüzyonundaki farklılık ve farklı elementlerin bor ile oluşturduğu bileşiklerin farklılığına mal edilmiştir. Difüzyon miktarı arttığından artan süre, altlık bölgesine doğru iğnesel ve farklı geometrik karakterdeki fazların miktarını ve boyutunu arttırdığı açıkça görülmüştür. Ayrıca, borlama süresinin artması sebebiyle kaplama tabakası ve geçiş bölgesinde oluşan boşlukların ve gözenekli yapının arttığı gözlenmiştir. Literatürde rapor edildiği gibi FeB

ve Fe₂B fazlarının sahip olduğu farklı termal genleşme katsayıları nedeniyle, borlama işleminin ardından yapılan hava ortamında soğutma işlemi bu iki faz arasında çatlak oluşumuna ve zaman zaman kaplamada dökülmelere sebep olmaktadır [26]. Bu çalışmada benzer durum her numunede olmasa da bir çok numunede görülmüştür.

Artan süreyle kaplama kalınlıklarının arttığı gözlemlenmektedir. Artan süre ile artan difüzyon miktarından kaynaklı kaplama kalınlığının arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum demir esaslı veya demir dışı malzemelerin borlanması ile ilgili olan literatür ile örtüşmektedir.

Borlama öncesi Zr içermeyen CoCrFeNi YEA'nın mikrosertlik değerinin ortalama 163 HV olduğu görülmektedir. Bu değerin 75dk. borlama sonrasında bu değer yüzeye yakın bölgelerde 2300HV değerine, 300dk. borlama sonrasında ise yüne yüzeyde 1800HV değerlerine kadar yükseldiği görülmüştür. 150dk. borlama sonrasında yüzeyde taraksı bir yapı oluştuğu için kesin bir ölçüm yapılamamıştır.

Borlama öncesinde CoCrFeNiZr0.1 YEA'nın sertliği ortalama 208HV, CoCrFeNiZr0.2 YEA'nın sertliği 242HV ve CoCrFeNiZr0.5 YEA'nın sertliği 628HV iken, borlama işlemleri ile bu değerin büyük oranlarda arttığı tespit edilmiştir.

Tanelerin yönlenmesinden dolayı enine kesitten ve yüzeyden seçilen bölgelerden alınan sertliklerde farklılık meydana geldiği düşünülmektedir.

Artan süre ile bor difüzyonunun artması, altlık numunesindeki sertliğin azalmasına neden olmuştur. Bunun sebebi, yüzeyde oluşan borlu fazların artması, yüzeyde sertliğin artmasına sebebiyet verirken, altlık kısmında difüzyon ile elementlerin yüzeye çıkması, sertliğin azalmasına neden olmuştur. Benzer literatür çalışmalarının sonuçlarını incelediğimizde, kaplama kısmındaki sertlik değeri artan sıcaklık ve süre ile artarken, matris bölgesinin sertlik değerinin sertliği sağlayan elementlerin numune yüzeyine difüzyonu sebebiyle azaldığını görüyoruz [27].

SEM-EDS analizi ile elementlerin mikroyapıya etkisi açıkça görülmektedir. YEA'da Fe, Co ve Ni'in borür tabakasında, Cr ve Al'un matris bölgesinde yoğunlaşmasından dolayı, borlanan numunelerin borür tabakasında testere dişi şeklinde sert tabaka görülmektedir. Geçiş bölgesinde Si, Cr ve Fe elementlerinin yoğunlaşması, testere dişi şeklindeki ara yüzey yapısının daha düz bir yapıya dönüşmesine sebebiyet vermiştir. Matris bölgesinde ise borlanmış tabakanın rastlanmadığı bölgelerde eş eksenli tanelere rastlanmıştır.

Elementlerin borlama üzerine olan etkisi mevcut literatürdeki bilgilerde de Cr'un B ile oluşturduğu CrB fazının Cr miktarıyla orantılı olarak sertliği arttırdığı görülmektedir [26].

Artan süre ile borlanan numunelerin yüzeyindeki porozite içeren boşluklu gevrek yapıların artması ve yüksek sıcaklarda borun difüzyonun artan süre ile neredeyse numunenin tamamını kapsaması borlamanın YEA üzerindeki önemli etkilerindendir. Bu da malzemenin yüzeyinin mekanik özelliklerini geliştirmek istediğimizde, istenilen uygulamaya göre optimum bir sıcaklık ve süre belirlemenin, bu yüzey geliştirme işleminden alacağımız verimin artmasındaki önemini göstermektedir.

8. GENEL SONUÇLAR

- Atomik olarak eşit miktarda element kullanılarak hedeflenen miktara uygun bir içerikte CoCrFeNi ve 3 farklı miktarda Zr içeren CoCrFeNiZr YEA'ları ark ergitme yöntemi ile başarılı bir şekilde elde edilmiştir.
- Borlanmış CoCrFeNi YEA'da FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir.
- Borlanmış CoCrFeNiZr YEA'larda FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir. Borür tabakasının en dış bölgesi gevşek ve kırılğan kabuk şeklinde olduğu görülmüştür.
- Borlanmış YEA'larda 3 bölge gözükmemektedir; borür tabaka, geçiş bölgesi ve altlık (matris) bölgesi. Borür tabakası genel olarak 2 bölgeden oluşmaktadır. Ancak borür tabakanın farklı karakterlerde çok katmandan oluştuğu görülmüştür.
- Geçiş bölgesinde iğnemsiz veya farklı geometrik şekillerde kaplama süresine bağlı olarak miktarı ve boyutu artan çözelti benzeri yapılar oluşmuştur.
- YEA'larda Fe, Co ve Ni'in borür tabakasında, Cr'un altlık bölgesinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Altlık bölgesi ile borür tabakası arasındaki geçiş bölgesinde Si (Ekabor-II tozu kaynaklı), Cr ve Fe elementlerinin yoğunlaştığı ortaya konmuştur. Co elementi ise borür tabakasından matris bölgesine doğru gidildikçe artış göstermektedir.
- Artan borlama süresi ile bor tabakasının kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.
- Sertliği arttıran elementlerin numune yüzeyinde bor ile yeni fazlar oluşturmamasından dolayı borlama sıcaklığı ve süresi ile altlık bölge sertliğinin azaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Jien-Wei Yeh, (2006) “Recent Progress in High-Entropy Alloys”, Annales De Chimie – Science des Materiaux.
- [2] Hitit Üniversitesi, “Mikrosertlik Ölçümü Deney Föyü”.
- [3] Birlik Z., (2022), “Plastik Enjeksiyon Kalıp Çelik Yüzeylerinin Borlama İle Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [4] Erdoğan A., Zeytin S., (2019), “Yüksek Entropili Alaşımlar: Prensipler ve Alaşım Tasarımı”, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 8 (2), 1160-1178.
- [5] Erdogan A., (2018), “Yüksek Entropili Alaşımlarda Mikroyapı Oluşumu Ve Alaşım Elementlerinin Yapıya Etkileri”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [6] Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., (2014), “High Entropy Alloys”, Elsevier, 1-190.
- [7] Kaya F., (2021), “Titanyum (Ti) Katkılı AlCoCuNi Yüksek Entropili Alaşımların Mekaniksel Alaşımlama İle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi.
- [8] Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Michael C.G., Dahmen K.A., vd., (2014), “Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys”, Progress in Materials Science, 61
- [9] Düşünmez Ö., (2018), “Yüksek Entropili Alaşım Tasarımı Anlayışı ile Düşük Yoğunluklu Çeliklerin Tasarlanması ve Üretilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
- [10] Chen Y.Y., Duval T., Hung U.D., Yeh J.W., Shih H.C., (2005), “Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys - a comparison with type-304 stainless steel”, Corrosion Science;47(9):2257–79
- [11] Suryanarayana C., (2001), “Mechanical alloying and milling”, Prog Mater Sci;46:1–184.
- [12] Burkut E., (2022), “Yüksek Entropili AlCoCrFeNi Alaşımının Üretilmesi Ve Termokimyasal Yöntem İle Borlanması”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [13] Tsai M.H., Yeh J.W., (2014), “High-Entropy Alloys: A Critical Review”, Mater. Res. Lett., Vol. 2 (3), 107–123.

- [14] Sarper S.S., (2004), “Borlamanın Demir Esaslı T/M Parçaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 151s.
- [15] Yapar U., (2003), “Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [16] Şen U., (1997), “Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] Sinha A.K., (1991), “Boriding(Boronizing)”, ASM Handbook, 4, pp. 437-447, J. Heat Treating, OH, USA.
- [18] Massalski T.B., Murray J.L., Bennet L.H., Baker H., (1986), “Binary Alloy Phase Diagrams”, American Society For Metals, 1, pp. 1100.
- [19] Karaman Y., (2003), “Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama”, Y. Lisans Tezi, Süleyman Demirel Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 121s.
- [20] Tezcan R., (1996), “Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları”, Y. Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 46.
- [21] Uluköy A., Can A.Ç., (2006), “Çeliklerin Borlanması”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 12 (2), 189-198.
- [22] Matuschka A.G., (1980), “Boronizing”, The Alden Pres Ltd., Oxford, England, 11, 45-93- 100.
- [23] Maçkan B.N., (2019), “Fe-Cr-Ni Üçlü Alaşımlarının Borlanması ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [24] Sarı M., (2019), “Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi.
- [25] Öztürk K., (2021), “Plastik Kalıp Çeliklerinin Korozyona Karşı Korunmasında Kutu Borlama İşleminin Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [26] Genç Y., (2011), “Influence of Manganese on the Pack Boriding Behaviour of Pure Iron”, Surface Engineering, 27 (8), 634-638
- [27] Çalık A., (2002), “Türkiye’nin Bor Madenleri ve Özellikleri”, Mühendis ve Makine, 508, 36- 41.

- [28] Zhou J., Cheng Y., Wan Y., Chen H., Wang Y., Yang J. (2024), “Strengthening by Ti, Nb, and Zr doping on microstructure, mechanical, tribological, and corrosion properties of CoCrFeNi high-entropy alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*.
- [29] Cengiz S., Ceylan D., Devecili A.O., Gencer Y., Tarakci M. (2024), “Nitriding of CoCrFeNi medium entropy alloys: Characterization and tribocorrosion behaviour”, *Surface & Coatings Technology*, 479.
- [30] Günen A., Kanca E., (2017), “Farklı bor kimyasalları ile borlanmış Inconel 625 alaşımının karakterizasyonu”, *Pamukkale Univ. Muh Bilim Derg*, 23 (4), 411-416.
- [31] Azakli Y., Cengiz S., Tarakci M., Gencer Y., (2016), “Characterisation of boride layer formed on Fe–Mo binary alloys”, *Surface Engineering*, 32 (8), 589- 595.
- [32] Gündüz, K.Ö., Gencer Y., Tarakci M., Calik A., (2013), “The Effect Of Vanadium On The Boronizing Properties Of Pure Iron”, *Surface & Coatings Technology*, 221, 104-110.
- [33] Yeh J.W., (2011), “Recent progress in high-entropy alloys”, Presentation at Changsha meeting
- [34] Avcı U., (2006), “Küçük boyutlu bir elektrik ark ergitme fırınının üretimi ve optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi
- [35] Gencer Y., Tarakçı M., Çalık A., (2008), “Effect of titanium on the boronizing behaviour of pure iron”, *Surface & Coatings Technology*, 203(1-2), 9-14.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Kocalar, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü 2010 yılında başarı ile tamamlamıştır. 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2010 yılından 2021 yılları arasında Göktaş Yassı Hadde Mam., Ağır Haddecilik A.Ş. ve Redon Teknoloji firmalarında sırasıyla bakım mühendisi, proje mühendisi ve üretim-planlama yöneticisi olarak görev yaptı. 2021 – 2023 yılları arasında bilişim sektöründe hizmet veren Track Bilişim firmasında Kıdemli ERP Uygulama Danışmanı olarak çalışmıştır. Halen Romanya-Bükreş’te bulunan bir firmada ERP uzmanı olarak çalışmaktadır.