

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



KATKILI CrMnFeCoNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

HADİ BİLİR

DOKTORA TEZİ

DOÇ. DR. MEHMET AKKAŞ

HAZİRAN - 2025

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Hadi BİLİR tarafından hazırlanan “**KATKILI CrMnFeCoNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **27.06.2025** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Mehmet AKKAŞ Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Bahattin AYDINLI Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Mehmet Akif ERDEN Karabük Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Harun ÇUĞ Karabük Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Elif AŞIKUZUN TOKEŞER Kastamonu Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Selahattin KAYMAKCI

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Hadi BİLİR

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KATKILI CrMnFeCoNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

HADİ BİLİR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:DOÇ. DR. MEHMET AKKAŞ

II. DANIŞMAN: DOÇ.DR. CAN DOĞAN VURDU

Yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar), yaklaşık eşit atomik oranlarda beş veya daha fazla elementin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve yüksek konfigürasyonel entropileri sayesinde tek fazlı katı çözümleri yapıları oluşturan yeni nesil mühendislik malzemeleridir. Bu yapılar, yüksek mekanik dayanım, iyi süneklik, termal kararlılık ve aşınma/korozyon direnci gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu sınıfta en çok incelenen sistemlerden biri olan Cantor alaşımı (CrMnFeCoNi), düşük sıcaklıklarda bile FCC yapısını koruyan, sünekliği ve mekanik kararlılığı yüksek bir YEA örneğidir. Ancak, Cantor alaşımının özelliklerini daha da geliştirmek amacıyla çeşitli element katkıları üzerine araştırmalar devam etmektedir. Literatürde özellikle Bor (B), Silisyum (Si), Alüminyum (Al) ve Aktif Karbon (C) gibi elementlerin katkısı ile faz oluşumları, mikroyapı morfolojisi ve mekanik performans arasında güçlü ilişkiler kurulduğu bildirilmektedir. Bu çalışmada, Cantor esaslı CrMnFeCoNi alaşımı %2,5; %5 ve %7,5 oranlarında B, Si, Al ve aktif C elementleri ile katılanmış; katkı türlerinin ve oranlarının yanı sıra sinterleme sıcaklıklarının mikroyapı, faz yapısı ve mekanik özelliklerden sertlik üzerindeki etkileri detaylı şekilde araştırılmıştır. Numuneler, mekanik karıştırma sonrası 600 MPa basınç altında soğuk presleme ile şekillendirilmiş ve atmosfer kontrollü fırında 1000°C ve 1200°C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Üretilen örneklerin karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapısal analiz, X-ışını kırınımı (XRD) ile faz analizi ve Vickers mikrosertlik testi ile mekanik performans değerlendirilmiştir. Bu kapsamlı analizler, katkı elementlerinin ve sinterleme koşullarının YEA sistemlerinde yapı-özellik ilişkisini nasıl etkilediğine dair önemli bilimsel bulgular tesbit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER:Yüksek Entropili Alaşım (YEA), Sinterleme, Mekanik Karıştırma, Takviye Elementler

Haziran 2025, 158 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF REINFORCED CrMnFeCoNi HIGH ENTROPY ALLOY

HADI BİLİR

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. MEHMET AKKAŞ
CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. CAN DOĞAN VURDU**

High-entropy alloys (HEAs) are a novel class of engineering materials composed of five or more principal elements in near-equiatomic ratios. Their high configurational entropy favors the formation of single-phase solid solutions, leading to unique combinations of mechanical strength, ductility, thermal stability, and corrosion resistance. Among these, the Cantor alloy (CrMnFeCoNi) has been extensively studied due to its stable face-centered cubic (FCC) structure and remarkable ductility, even at cryogenic temperatures. To further enhance its performance and expand its application range, researchers have explored the effects of various elemental reinforcements. Elements such as boron (B), silicon (Si), aluminium (Al), and activated carbon (C) have shown potential in tailoring phase formation, refining microstructures, and improving mechanical behavior. In this study, CrMnFeCoNi-based Cantor alloys were reinforced with B, Si, Al, and C at 2.5%, 5%, and 7.5% weight fractions. The effects of reinforcement type, addition ratio, and sintering temperature on microstructural evolution, phase formation, and mechanical properties were systematically investigated. The alloy powders were mixed homogeneously via mechanical blending and compacted using cold pressing under 600 MPa. The green compacts were then sintered at 1000 °C and 1200 °C in an atmosphere-controlled furnace. Characterization of the produced samples was performed using scanning electron microscopy (SEM) for microstructural analysis, X-ray diffraction (XRD) for phase identification, and Vickers microhardness testing to evaluate mechanical performance. This comprehensive approach aims to reveal how reinforcement composition and thermal processing influence the structure–property relationships in HEA systems.

KEYWORDS: High Entropy Alloys (HEAs), Sintering, Mechanic Mixture, Reinforced Elements

June 2025, 158 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımda beni sürekli destekleyen ve her konuda yardımlarını esirgemeyen ve teşvik eden danışman hocam Doç. Dr. Mehmet AKKAŞ'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında beni destekleyen yardım eden ve manevi katkıları çok olan mesai arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Doktora dersleri esnasında her konuda yardım ve teşviklerini gördüğüm Prof. Dr. Bahattin AYDINLI, Doç. Dr. Elif AŞIKUZUN TOKEŞER ve Doç. Dr. Can Doğan VURDU hocalarıma da teşekkürleri bir borç bilirim.

Son olarak, tezimi tamamlayana kadar manevi desteklerini esirgemeyen eşim Fatmatüzzehra BİLİR'e ve çocuklarım Hande Nur, Mustafa Sencer ve Ahmet Fuad BİLİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hadi BİLİR

Kastamonu, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	21
3.1 Malzeme ve Yöntem	21
3.1.1 Tozların Hazırlanması.....	21
3.1.2 Sinterleme ve Toz Metalurjisi.....	25
3.1.3 Zımparalama	28
3.1.4 Dağlama	31
3.1.5 SEM ve EDS Görüntüleme.....	32
3.1.5.1 SEM tekniği	32
3.1.5.2 EDXS (EDS)	33
3.1.6 XRD Görüntüleme	36
3.1.7 Mikrosertlik	37
4. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA	40
4.1 SEM Görüntü Analiz Sonuçları	40
4.2 EDX ve Mapping Görüntü Analiz Sonuçları.....	100
4.3 XRD Görüntü Analiz Sonuçları.....	131
4.4 Mikrosertlik Analiz Sonuçları.....	151
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	154
KAYNAKLAR	155
ÖZGEÇMİŞ.....	158

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 İkili alaşımlarda karışım entropisinin değişimi	3
Şekil 1.2 Karışım entropilerine göre alaşımların sınıflandırılması	5
Şekil 1.3 Cantor alaşımında birim alandaki enerjinin çatlak genişlemesine karşı değişimi	6
Şekil 1.4 Alaşımların akma dayanımlarına karşı kırılma tokluklarının kıyaslaması	7
Şekil 1.5 Bridgman katılaşma yönteminin şematik görünümü	8
Şekil 1.6 LENS yönteminin şematik diyagramı	9
Şekil 3.1 Presde hazırlanan numunenin geometrisi	23
Şekil 3.2 İki küre sinterleme modeli ile sinterleme şeması.....	26
Şekil 3.3 SEM çalışma prensibi	33
Şekil 3.4 Vickers Mikrosertlik Ölçme Metodu şematik gösterimi	38
Şekil 3.5 Knoop Mikrosertlik Ölçme metodu şematik şekli	38
Şekil 4.1 Alüminyum/ %2,5/1000°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	41
Şekil 4.2 Alüminyum/ %2,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	43
Şekil 4.3 Alüminyum/ %5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	45
Şekil 4.4 Alüminyum/ %5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	47
Şekil 4.5 Alüminyum/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	49
Şekil 4.6 Alüminyum/ %7,5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	51
Şekil 4.7 Bor/ %2,5/1000°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	54
Şekil 4.8 Bor/ %2,5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX	56
Şekil 4.9 Bor/ %5/1000°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX	58
Şekil 4.10 Bor/ %5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX	60
Şekil 4.11 Bor/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	62
Şekil 4.12 Bor/ %7,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	64
Şekil 4.13 Karbon/ %2,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	68
Şekil 4.14 Karbon/ %2,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	70
Şekil 4.15 Karbon/ %5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	72
Şekil 4.16 Karbon/ %5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	74
Şekil 4.17 Karbon/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	76

Şekil 4.18 Karbon/ %7,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	78
Şekil 4.19 Silisyum/ %2,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	82
Şekil 4.20 Silisyum/ %2,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	84
Şekil 4.21 Silisyum/ %5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	86
Şekil 4.22 Silisyum/ %5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	88
Şekil 4.23 Silisyum/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	90
Şekil 4.24 Silisyum/ %7,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX.....	92
Şekil 4.25 Ana Bileşen (Cantor) 1000°C büyütme oranı: a) 1,00Kx b) 2,00Kx c) 4,00Kx d) 8,00Kx	96
Şekil 4.26 Ana Bileşen (Cantor) 1200°C büyütme oranı: a) 1,00Kx b) 2,00Kx c) 4,00Kx d) 8,00Kx	98
Şekil 4.27 Ana bileşene ait (Cantor) EDX ve mapping (1000°C)	101
Şekil 4.28 Ana bileşene ait (Cantor) EDX ve mapping (1200°C)	102
Şekil 4.29 Alüminyum katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	104
Şekil 4.30 Alüminyum katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	105
Şekil 4.31 Alüminyum katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	106
Şekil 4.32 Alüminyum katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	107
Şekil 4.33 Alüminyum katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	108
Şekil 4.34 Alüminyum katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	109
Şekil 4.35 Bor katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	111
Şekil 4.36 Bor katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	112
Şekil 4.37 Bor katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	113
Şekil 4.38 Bor katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	114
Şekil 4.39 Bor katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	115
Şekil 4.40 Bor katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	116
Şekil 4.41 Karbon katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	118
Şekil 4.42 Karbon katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	119
Şekil 4.43 Karbon katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	120
Şekil 4.44 Karbon katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	121
Şekil 4.45 Karbon katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	122
Şekil 4.46 Karbon katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	123
Şekil 4.47 Silisyum katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	125
Şekil 4.48 Silisyum katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	126
Şekil 4.49 Silisyum katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	127
Şekil 4.50 Silisyum katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	128
Şekil 4.51 Silisyum katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping.....	129
Şekil 4.52 Silisyum katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping.....	130
Şekil 4.53 Ana bileşen (Cantor) 1000°C XRD grafiği.....	132
Şekil 4.54 Ana bileşen (Cantor) 1200°C XRD grafiği.....	132
Şekil 4.55 Alüminyum katkısı /%2,5/1000°C XRD grafiği.....	134
Şekil 4.56 Alüminyum katkısı /%2,5/1200°C XRD grafiği.....	134
Şekil 4.57 Alüminyum katkısı /%5/1000°C XRD grafiği.....	135

Şekil 4.58 Alüminyum katkısı /%5/1200°C XRD grafiği.....	135
Şekil 4.59 Alüminyum katkısı /%7,5/1000°C XRD grafiği.....	136
Şekil 4.60 Alüminyum katkısı /%7,5/1200°C XRD grafiği.....	136
Şekil 4.61 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkılı Al elementinin kıyaslamalı grafiği.....	137
Şekil 4.62 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkılı Al elementinin kıyaslamalı grafiği.....	137
Şekil 4.63 Bor katkısı /%2,5/1000°C XRD grafiği.....	138
Şekil 4.64 Bor katkısı /%2,5/1200°C XRD grafiği.....	138
Şekil 4.65 Bor katkısı /%5/1000°C XRD grafiği.....	139
Şekil 4.66 Bor katkısı /%5/1200°C XRD grafiği.....	139
Şekil 4.67 Bor katkısı /%7,5/1000°C XRD grafiği.....	140
Şekil 4.68 Bor katkısı /%7,5/1200°C XRD grafiği.....	140
Şekil 4.69 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkılı Bor elementinin kıyaslamalı grafiği.....	141
Şekil 4.70 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkılı Bor elementinin kıyaslamalı grafiği.....	141
Şekil 4.71 Karbon katkısı /%2,5/1000°C XRD grafiği.....	142
Şekil 4.72 Karbon katkısı /%2,5/1200°C XRD grafiği.....	142
Şekil 4.73 Karbon katkısı /%5/1000°C XRD grafiği.....	143
Şekil 4.74 Karbon katkısı /%5/1200°C XRD grafiği.....	143
Şekil 4.75 Karbon katkısı /%7,5/1000°C XRD grafiği.....	144
Şekil 4.76 Karbon katkısı /%7,5/1200°C XRD grafiği.....	144
Şekil 4.77 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkılı karbon elementinin kıyaslamalı grafiği.....	145
Şekil 4.78 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkılı karbon elementinin kıyaslamalı grafiği.....	145
Şekil 4.79 Silisyum katkısı /%2,5/1000°C XRD grafiği.....	146
Şekil 4.80 Silisyum katkısı /%2,5/1200°C XRD grafiği.....	146
Şekil 4.81 Silisyum katkısı /%5/1000°C XRD grafiği.....	147
Şekil 4.82 Silisyum katkısı /%5/1200°C XRD grafiği.....	147
Şekil 4.83 Silisyum katkısı /%7,5/1000°C XRD grafiği.....	148
Şekil 4.84 Silisyum katkısı /%7,5/1200°C XRD grafiği.....	148
Şekil 4.85 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkılı silisyum elementinin kıyaslamalı grafiği.....	149
Şekil 4.86 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkılı silisyum elementinin kıyaslamalı grafiği.....	149
Şekil 4.87 Bir numuneye ait mikrosertlik bilgisayar ekran görüntüsü.....	152

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.2 Numunelerin hazırlanmasında kullanılan parametreler ve değerleri	22
Tablo 3.3 Ana bileşen için kullanılacak gram ağırlıkları	22
Tablo 3.4 Ana bileşene katkı elementlerinin katılma yüzdeleri.....	22
Tablo 3.5 Kullanılan elementlere ait bazı fiziksel değerleri	23
Tablo 3.6 Numunelerin fırına yerleştirilme planı	27
Tablo 3.7 Alaşımların hazırlanan numunelerinin SEM için kodlama tablosu	35
Tablo 3.8 Ana Bileşen numunelerin kodlaması	35
Tablo 4.1 Üretilen numunelerin mikrosertlik analiz sonuçları	151

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Retsch marka Mekanik karıştırıcı	24
Resim 3.2 Tozların hazneye konduktan sonra sıkılarak yerleştirilmesi.....	24
Resim 3.3 Mekanik karıştırıcının ayarlanması.....	24
Resim 3.4 Karıştırma sonucu homojen şekilde karışan yapı	25
Resim 3.5 a) Presleme aparatı, b) Hassas terazi.....	25
Resim 3.6 Sinterleme fırını (a)sıcaklık ve zaman kontrol ünitesi (b) kapak açık şekli	27
Resim 3.7 Sinter fırınının argon gazı tüpü ve numune yerleşim planı.....	28
Resim 3.8 Fırının zaman ve sıcaklık ayarı kontrol ünitesi çalışma anı.....	28
Resim 3.9 75 numaralı zımpara kullanılan nanoteknoloji labında bulunan zımparalama aparatı (Kastamonu Üniversitesi)	29
Resim 3.10 Diğer zımparalamaların yapıldığı Buehler marka zımparalama aparatı (Çankırı Karatekin Üniversitesi MYO)	30
Resim 3.11 Kullanılan (a)zımpara örneği (120 no) (b) diğer kullanılmış zımparalar.....	30
Resim 3.12 Parlatma işleminde kullanılan DIAPAT-M marka elmas solüsyon.....	30
Resim 3.13 Zımparalama işleminden geçen numunelerden örnekler	31
Resim 3.14 Asit karışımının hazırlandığı Kimya lab.ındaki bölme ve kullanılan asitler.	31
Resim 3.15 Numunelerin mikroyapısal görüntülerinin alındığı SEM cihazı (Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM)	35
Resim 3.16 XRD cihazı (Kastamonu Üniversitesi MERLAB).....	37
Resim 3.17 Mikrosertlik Cihazı (Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM)	39

1. GİRİŞ

Eski çağlardan beri insanlar kullandıkları malzemelerin özelliklerini kendi istedikleri fonksiyonları karşılayacak şekilde değiştirmek üzere doğal yapıya ek olarak farklı malzemeler ekleyerek kullanmışlardır. Saf malzemelerin kullanımı sadece o malzemenin özelliklerine uygun işlerde kullanılırken katkılı (alaşımlandırılmış) malzemeler daha fazla fonksiyona sahip olmuştur. Katılan malzemeler sayesinde yapı örneğin daha sağlam daha rijit daha dayanıklı olabilmıştır. Örneğin bin yıl önce kullanılan gümüş para çok yumuşak olduğundan içine % ağırlık olarak bakır eklenmişti ve paranın kullanılabilirliği artmıştı. Modern çağıma gelindiğinde ise demirin içine karbon eklenerek çeliğin mukavemeti ve darbe direnci gibi özellikleri arttı korozyon direnci yükseldi ve krom nikel gibi elementler katılarak paslanmazlık özellikleri kazandırıldı. Yine bakır alaşımlarına berilyum ilavesiyle güç kazandırıldı ve patlayıcı ortamlarda kıvılcılanıp patlama özelliği giderildi. Buradaki temel mantık birincil olarak belirlenen elemente ikincil bir elementin küçük miktarlarda katılıp özelliklerini yıllarca saklayabilecek özellikler kazandırmaktır. Böylece yeni yapının ismine bile yansıyacak isimlendirmeler ortaya çıkmıştır: Demir alaşımları, bakır alaşımları, alüminyum alaşımları ve nikel alaşımları gibi...

Zaman içerisinde bu mantık genişletilip yeni kompozisyonlar aramaya insanları sevk etmiştir. Yapılan yeni çalışmalarla birden fazla elementin (eşatomik) yeni bir kompozisyon oluşturması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, geleneksel alaşımlandırmaya zıt olduğundan dikkat çekmiştir. Çok sayıdaki bileşenin (element) birlikte yapacakları yeni yapının nasıl olacağı konusundaki tereddütler ve çalışma azmi ile araştırmalar hızlanmıştır.

Yeh vd. (2004) beş veya daha fazla eşit atoma yakın oranlardaki elementi karıştırarak karışımın entropisini artırmışlardır. Element sayısı arttıkça entropi artacak ve uyumlu yeni yapılar oluşacaktı. Bu yeni yapıya Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA) adını verdiler. Konsantrasyon oranlarını %5-35 arasında belirlediler.

Özellikle yüksek karışım entropisi, bileşenler arasındaki karşılıklı çözünürlüğü artırır ve beklenmeyen basit fazlar ve mikroyapıların oluşumuna sebep olur.

Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA'lar), en az beş farklı elementin eşit ya da birbirine yakın oranlarda bir araya getirilmesiyle oluşan ve tek fazlı katı çözeltili yapılarıyla dikkat çeken modern alaşım türleridir. Bu çok bileşenli yapı, yüksek karışım entropisine yol açar. Yüksek entropi, intermetalik fazların oluşmasını zorlaştırırken; bunun yerine yüzey merkezli kübik (FCC), hacim merkezli kübik (BCC) ya da her ikisinin bir arada bulunduğu basit katı çözeltilerin meydana gelmesini destekler.

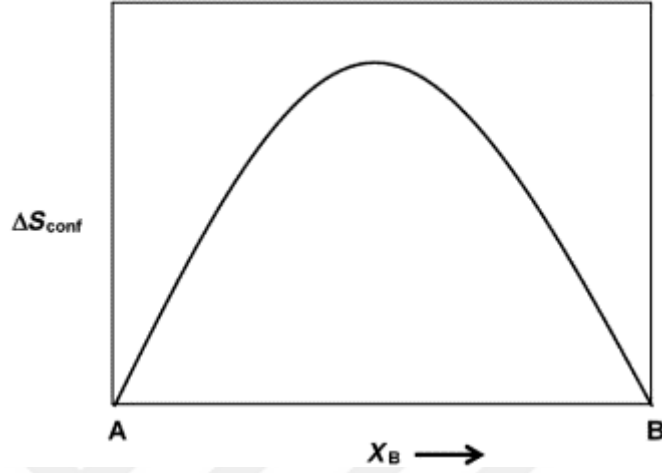
YEA'lar, geleneksel alaşımlarla kıyaslandığında dikkat çekici mekanik üstünlükler sergiler: yüksek sertlik, dayanıklılık, sıcaklık direnci ve oksidasyon/korozyon direnci bunlardan bazılarıdır. Bu alaşımlarda her bir ana element genellikle %5 ile %35 arasında bir konsantrasyona sahiptir; ayrıca, daha düşük oranlarda (%5'ten az) ikincil elementler de eklenebilir. Alaşım yapıları hem mikroyapısal sadelik hem de performans açısından oldukça caziptir ve üretimleri özel yöntemler gerektirmez mevcut üretim teknolojileri genellikle yeterlidir.

YEA'ların oluşumunda Hume-Rothery kuralları geçerlidir. Bu kurallar; kristal yapı uyumu, atom yarıçapı farkı, valans elektronu sayısı ve elektronegatiflik gibi parametrelerle açıklanır. Karışım entalpisi (ΔH_{kar}) pozitif, negatif veya sıfıra yakın olabilir ve bu değer, alaşım sisteminin faz oluşumuna yatkınlığını belirler. Entropi (ΔS_{kar}) ile entalpi arasındaki rekabet ise alaşımın tek fazlı mı yoksa çok fazlı mı olacağını belirleyen temel etmenlerdendir

YEA'ların kimyasal formüllerinin yazımı için çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Genellikle elementler alfabetik olarak sıralanır. Atomik oranlar ya alt simgeyle ya da yüzdelik oranlarla ifade edilir. Örneğin; eşatomik sistemler AlCoCrFeNiTi veya CoCrCuFeMnMoNiZr olarak gösterilirken, eşatomik olmayan sistemler $Al_{0,5}Co_{1,5}CrFeNi_{1,5}Ti_{0,5}$ şeklinde sunulabilir. Yüzdeye dayalı gösterimlerde ise $Al_{8,3}Co_{25}Cr_{16,7}Fe_{16,7}Ni_{25}Ti_{8,3}$ gibi biçimler tercih edilir.

Cantor vd. (2012) ile Yeh vd. (2004)'den akt. Karaca (2019) birbirinden bağımsız olarak YEA kavramını ortaya atmışlardır. Yeh vd., maksimum karışım entropisine ulaşmak için çok sayıda elementin eşit mol oranlarında karıştırılması gerektiği fikrinden hareketle bu yeni alaşım türünü "Yüksek Entropili Alaşım" olarak

tanımlamışlardır. Yüksek entropinin, faz oluşum mekanizmaları, kafes deformasyonları ve mikroyapısal kararlılık üzerinde önemli etkiler yarattığı vurgulanmıştır (Cantor vd., 2012’den akt. Karaca, 2019).



Şekil 1.1 İkili alaşımlarda karışım entropisinin değişimi

Yüksek entropili alaşımlarda çekirdek etkileri Yüksek entropi etkisi, kafes distorsiyonu etkisi, yavaş difüzyon etkisi ve Kokteyl etkisi olarak sıralanabilir.

Yüksek entropili alaşımlar Yeh ve ark. tarafından ilk ortaya atıldıktan sonra bile çoğu araştırmacılar tarafından şu an bile çalışılan bir kavram olmuştur. Bileşen sayısının artmasıyla karışım entropisi sayesinde tek fazlı katı ergiyikler oluşabilmektedir. Uygun mikroyapılar ve özel performanslar için geleceği olabilen yeni mühendislik malzemelerinde basit katı ergiyiklerin kararlı hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Klasik Hume-Rothery kurallarına göre ikili katı ergiyik oluşumunu kristal yapıların aynı oluşu, atomik boyut farklılığı, elektron konsantrasyonu ve elektronegatiflik değerleri arasındaki fark belirlemektedir.

Yüksek entropili alaşımlar, HMK (hacim merkezli kübik), YMK (yüzey merkezli kübik) ve HSP (hegzagonal sıkı paket) gibi basit kristal yapılara sahiptirler. Kristal kafes yapılarda, VEC “Valans Elektron Konsantrasyonu” hesabı ile tespit edilebilmektedir. VEC (Valans Elektron Konsantrasyonu) hesabında elde edilen sonuçlar doğrultusunda:

$VEC < 6,87$ olur ise, HMK

$VEC \geq 8,00$ olur ise, YMK

$VEC 6,87 < HMK-YMK \leq 8,00$ olmaktadır. VEC hesabında kullanılan denklem:

$$VEC = \sum_{i=1}^n c_i \cdot (VEC)_i \quad (1.1)$$

Burada c_i : molar konsantrasyonu'nu göstermektedir.

Yüksek entropili alaşımlarda (YEA), alaşımı oluşturan elementlerin türü kristal yapının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Yüzey merkezli kübik (YMK - FCC) yapının elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan elementler arasında Ni (Nikel), Mn (Manganez), Cu (Bakır) ve C (Karbon) yer alırken; hacim merkezli kübik (HMK - BCC) yapı için tercih edilen elementler ise Cr (Krom), Mo (Molibden), Si (Silisyum) ve Nb (Niyobyum) gibi elementlerdir. Bununla birlikte, Mn gibi bazı elementler yüksek sıcaklıklarda buharlaşma eğilimi gösterebilir ve bu durum alaşımın stabilitesi üzerinde etkili olabilir.

YEA sistemlerinin sınıflandırılması açısından karışım entropisinin (ΔS_{kar}) hesaplanması temel kriterlerden biridir. Bu değerin belirlenmesi, alaşımın faz kararlılığı ve yapısal basitliği açısından doğrudan bilgi sunar. Karışım entropisi aşağıdaki denklemle hesaplanır:

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

Burada:

- R: Evrensel gaz sabiti, 8,31 J/mol·K
- N: Alaşımda bulunan element sayısıdır.

Entropi değerleri, YEA'ların sınıflandırılmasında doğrudan kullanılır. Özellikle:

- Yüksek entropili alaşım (YEA) olarak değerlendirilebilmesi için:

$$\Delta S_{kar} > 1,6 \cdot R \quad \text{olmalıdır.}$$

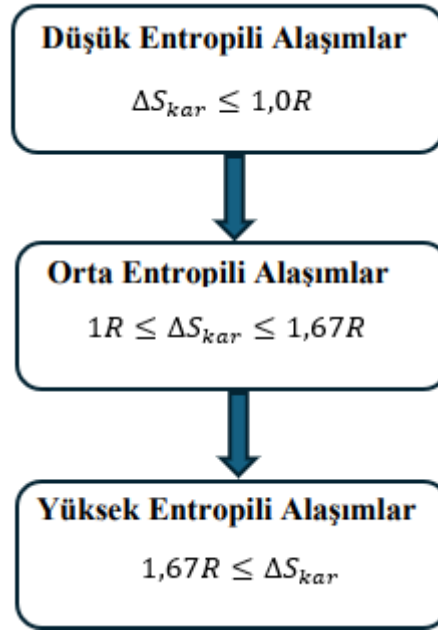
Saf metaller teorik olarak maksimum karışım entropisine sahip sistemler olup bu değer

$$\Delta S_{kar} \approx 2 \cdot R$$

olarak kabul edilir.

- Entropi değeri daha düşük olan sistemler orta veya düşük entropili alaşım sınıflarına dahil edilir.

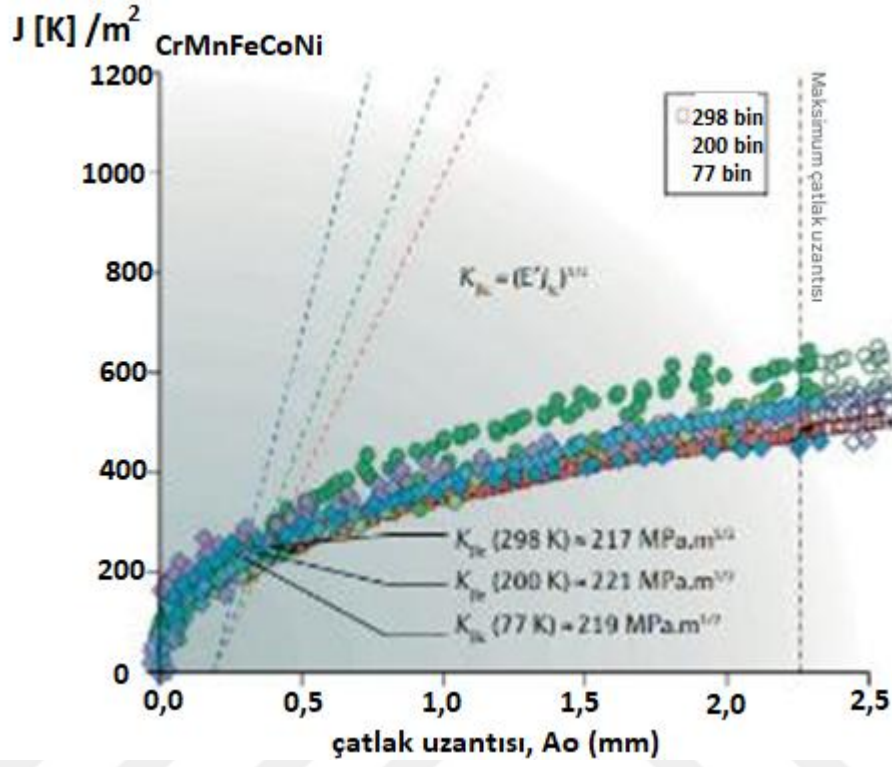
Bu entropi temelli yaklaşım, YEA sistemlerinin mikroyapı evrimini, faz dönüşümlerini ve mekanik performansını tahmin etmede önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.2 Karışım entropilerine göre alaşımların sınıflandırılması (Karaca, 2019)

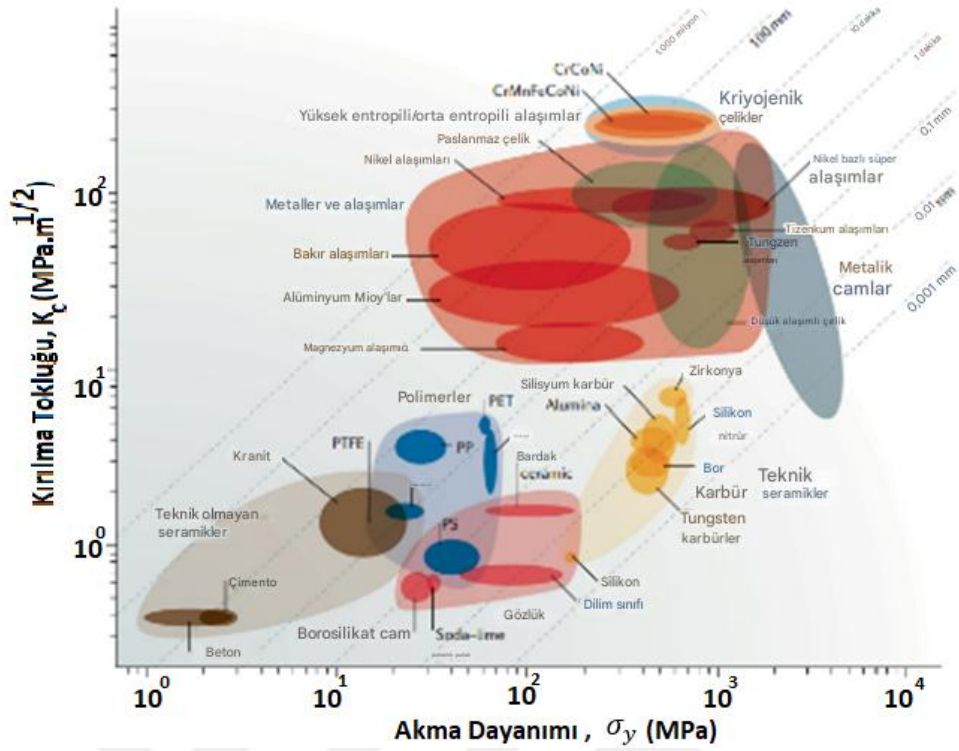
Cantor vd. eşatomik olarak Cr, Mn, Fe, Co ve Ni elementlerini alaşımlandırarak CrMnFeCoNi şeklinde gösterilen ve Cantor Alaşımı olarak isimlendirilen tek fazlı yüzey merkezli kübik katı ergiyiği elde etmiştir (Cantor vd., 2004). Yaklaşık 800°C'nin altında metalik (HMK-Cr) ve intermetalik (L10-NiMn ve B2-FeCo) fazları ayrılmıştır. Bu dönüşümlerin bazıları çok hızlı bir şekilde gerçekleşirken alaşım nanokristal konumdadır. Cantor'un raporladığı bu alaşımda mekaniksel özellikler ve

mikroyapıdaki gelişimler açıkça belirlenmiştir. Aşağıdaki görsellerde mekanik özelliklerindeki iyileşmeleri ifade eden grafikler verilmiştir. (Şekil 1.3.)



Şekil 1.3 Cantor alaşımında birim alandaki enerjinin çatlak genişlemesine karşı değişimi (Li vd., 2019)

Yine Kırılma tokluğuna karşılık akma dayanımındaki değişimlerin malzemelere göre değişimi Şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.4 Alaşımların akma dayanımlarına karşı kırılma tokluklarının kıyaslaması (Li, vd. 2019)

Yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar), farklı üretim teknikleriyle çeşitli formlarda sentezlenebilmektedir. Bu yöntemler genel olarak üç ana grupta sınıflandırılır: ergitme-döküm işlemleri, toz metalürjisi yöntemleri ve biriktirme (depozisyon) teknikleri. Bu yaklaşımlar, alaşımların istenen mikroyapı, morfoloji ve faz kararlılığına göre seçilir.

Ergitme-Döküm Yöntemleri

Ergitme tabanlı tekniklerde hem dengeli hem de hızlı soğutma koşulları altında YEA üretimi mümkündür. En sık tercih edilen yöntemler arasında vakum ark ergitme (VAM) ve vakum indüksiyon ergitme (VIM) yer alır. Bu yöntemler, oksidasyona karşı korumalı ortamlarda yüksek saflıkta alaşımların elde edilmesine olanak tanır.

Katıhal Yöntemleri: Toz Metalürjisi

Toz metalürjisi kapsamında, mekanik alaşımlama ile element tozları yüksek enerjili değirmenlerde karıştırılarak katıhal reaksiyonları başlatılır. Ardından, sinterleme

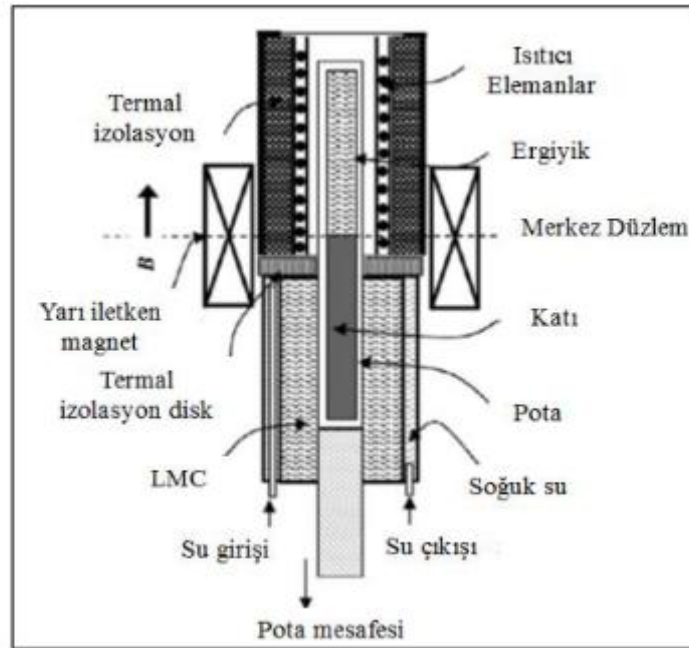
işlemi uygulanarak yoğun, kompakt malzeme yapısı elde edilir. Bu yöntem özellikle homojenlik ve ince taneli mikroyapı açısından avantaj sağlar.

Yüzey Mühendisliği ve Film Tabanlı Yöntemler

YEA'ların ince film veya kaplama formunda sentezlenmesi için püskürtme (sputtering), plazma nitrüleme ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi yüzey modifikasyon teknikleri tercih edilir. Bu yöntemler, alaşımın yüzeye özgü işlevsel özelliklerini (örneğin sertlik, aşınma direnci) artırmak amacıyla kullanılır.

Bridgman-Stockbarger Yöntemi

Bir diğer önemli üretim yöntemi ise Bridgman-Stockbarger yöntemi olarak bilinen yönlü katılaşma tekniğidir. Bu yöntem genellikle tek kristal formda alaşım elde etmek için kullanılır. Süreç, malzemenin kontrollü olarak ergitilip daha sonra tabanda yer alan bir çekirdek kristal üzerinden yavaşça soğutulması esasına dayanır. Kristal büyümesi, çekirdeğin kristal yönelimi doğrultusunda devam eder. İşlem hem dikey hem de yatay olarak gerçekleştirilebilir. Özellikle, Czochralski yönteminin uygulanamadığı durumlarda, yarı iletken kristallerin üretimi için önemli bir alternatiftir. Şekil 1.5'de Bridgman yönteminin şematik şekli verilmiştir.

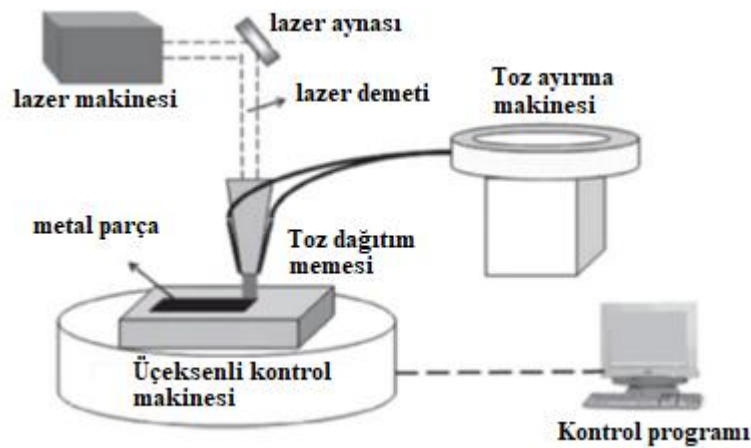


Şekil 1.5 Bridgman katılaşma yönteminin şematik görünümü (Suryanarayana, 2001)

Kütlesel üretim süreçlerinde kullanılan yenilikçi yöntemlerden biri de Laser-Engineered Net Shaping (LENS) ile isimlendirilen, yüksek entropili alaşımların (YEA) doğrudan tozdan parça haline getirilmesini mümkün kılan hızlı ve hassas bir üretim tekniğidir. Bu yöntem, yüksek güçlü bir lazer demeti aracılığıyla metal tozlarının kontrollü biçimde eritilerek katılaştırılmasına dayanır ve süreç tamamen bilgisayar destekli tasarım (CAD) altyapısıyla yönlendirilir.

LENS sisteminin işleyiş prensibinde, metalik tozlar odaklanmış bir lazer ışınına eş-eksenli şekilde hizalanmış bir nozul üzerinden doğrudan eriyik havuzuna iletilir. Eriyen tozlar ardışık olarak katılaşarak hedeflenen üç boyutlu geometriyi oluşturur. Sistem, bir X-Y hareketli tabla ve Z yönünde yükselen bir biriktirme başlığı ile çalışarak istenen şekil ve hacimdeki alaşım yapısını katman katman inşa eder. Süreç boyunca hem metal tozlarının hem de eriyik havuzunun oksidasyonunu önlemek amacıyla inert gaz atmosferi (genellikle argon) kullanılır.

LENS teknolojisi, özellikle bileşimi katmanlar arasında farklılaştırılmış yüksek entropili alaşımların üretiminde önemli avantajlar sunar. Bu, tek bir üretim döngüsünde çok fazlı veya fonksiyonel gradyanlı alaşımların oluşturulmasına olanak tanır. Bu yönüyle LENS, hem araştırma amaçlı özelleştirilmiş mikro yapılar üretmekte hem de endüstriyel ölçekli hassas komponentler geliştirmekte giderek daha fazla tercih edilmektedir. Yönteme ait şematik gösterim Şekil 1.6’da verilmiştir.



Şekil 1.6 LENS yönteminin şematik diyagramı (Zhao vd., 2009)

Sonuç olarak çok fazla geçmişı olmayan çalışma konusu bulunan yüksek entropili alaşımların yeni bir malzeme türü olarak üretilmesi ve kullanılması n açık bir çalışma alanı olarak görülmektedir. Yapılan alışmalar incelendiğinde Cantor alaşımı gibi birçok YEA oluşturulmuş ve yeni yapının özellikleri mikroyapısal, mekaniksel ve fiziksel olarak araştırmalara tabii tutulduğu görülmüştür.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

YEA'larla ilgili literatürde oldukça fazla araştırma yapılmış olup belli başlı olanları aşağıya sıralanmıştır:

Yong vd. (2014), yüksek entropili alaşımların mikroyapıları ve özellikleri üzerine yaptıkları bir çalışmada YEA'ların termodinamiğini ve oda sıcaklığında, yüksek sıcaklıklardaki, kriyojenik sıcaklıklardaki mekaniksel davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada ayrıca, $\text{CuCoNiCrAl}_x\text{Fe}$ alaşım sisteminin sertlik ve kafes sabitleri, $\text{Co}_{1,5}\text{CrFeNi}_{1,5}\text{Ti}$ ile $\text{Al}_{0,2}\text{Co}_{1,5}\text{CrFeNi}_{1,5}\text{Ti}$ alaşımlarının yüksek aşınma direnci, $\text{AlCoCrFeNi}_{1,5}\text{Ti}$ hacim merkezli kübik alaşımın oda sıcaklığında yüksek dayanımı incelenmiştir (Yong vd., 2014).

Diğer bir çalışmada, Zezhou vd. (2019), yüzey merkezli kübik alaşımlı yüksek entropili alaşımların mekaniksel özellikleri üzerine yaptıkları bir çalışmada, CrCoNi tabanlı alaşımların mekaniksel özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada yüksek mukavemet, kırılma tokluğu, sürünme, aşınma direnci gibi mekaniksel özellikler incelenmiş ve CrMnFeCoNi 'nin kompozisyon haritası çıkartılmıştır (Zezhou vd., 2019).

Emme döküm metodu ile hazırlanmış FeCoNiCuAl_X (burada X: Si, Cr, Ti, Zr ve Nd) alaşımlarının mekanik özellikleri ve mikroyapıda temel etkileşiminin etkisi üzerine yapılan bir çalışmada elementler arasındaki atomik boyut farkı, elektronegatiflik farkı, valans elektron konsantrasyonu ve karışımın entalpisi araştırılmıştır (Zhuang vd., 2012).

Alaşım vakumlu ark ergitme ve döküm metoduyla üretilen yüksek entropili $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımlarının mekanik özellikleri ve mikroyapıya alüminyum katkısının etkileri üzerine yapılan bir çalışmada; Al içeriği az olan alaşımın mikroyapı yüzey merkezli kübik yapıdan, Al içeriği artınca hacim merkezli kübik yapıya dönüştüğü gözlenmiştir (Woei-Ren Wang vd., 2012).

Başka bir çalışmada, inert atmosferde ark ergitme ve döküm yöntemiyle üretilen $\text{Al}_{25}\text{Ti}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cu}_{25}$ ve $(\text{AlTi})_{60-x}\text{Ni}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_x (x=15,20)$ yüksek entropili alaşımların mekaniksel özellikleri ve demir katkısının yapı üzerindeki etkileri çalışılmış ve plastiklik, sertlik ve elastik özelliklerindeki etkiler incelenmiştir (Eva ve Vladislav, 2015).

Ren vd. (2012) yaptığı bir çalışmada, $\text{CuCr}_2\text{Fe}_2\text{NiMn}$ yüksek entropili alaşım yaşlanma ısı işleme tabi tutularak yaşlanma davranışı üzerine yapılan bir araştırmada, alaşımın mikroyapısındaki ve sertliğindeki değişimler araştırılmıştır. Yaşlandırılmış alaşım 800°C 'de 450 Hv sertlik piki verdiği gözlenmiş ve uzun yaşlandırma süreleri boyunca sertliğinde de bağlı olarak yükselmeler gözlemlendiği diye rapor edilmiştir (Ren, vd., 2012).

1800°C 'de argon atmosferi altında vakum ark fırınında hazırlanan $\text{FeMnNiCuCoSn}_x (0,03 < x < 0,05)$ yüksek entropili alaşımların çekme özellikleri ve mikroyapısı üzerine yapılan bir çalışmada kalayın mikroyapıya etkisi araştırılmıştır. Mikroyapıdaki Sn oranına bağlı olarak oda sıcaklığında iyi çekme mukavemeti ve iyi plastisite özelliğine sahip olduğu gözlenmiştir ve ayrıca alaşımda Sn oranı 0,05'den az iken tek FCC yapıda olduğu ve Sn 0,05'den fazla iken $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$ intermetalik bileşik gözlemlendiği de rapor edilmiştir (Liu vd., 2013).

Weiping ve Zhiqiang (2013) yaptıkları çalışmada, elementlerin tozlarının yüksek performansta argon atmosferi altında 5 mm çaplı karbür bilyelerle kuru taşlama yöntemi ile karıştırılmasıyla hazırlanan $\text{FeNiCrCo}_{0,3}\text{Al}_{0,7}$ yüksek entropili alaşımının mekaniksel özellikleri ve alaşımlandırma davranışını araştırmışlar ve mekanik alaşımlandırmada kristal yapı hacim merkezli kübik yapıya dönüştüğünü ve alaşımın, sırasıyla, akma dayanımını, basma dayanımını, basma oranını ve Vickers sertliğini; 2033 ± 41 MPa; 2635 ± 55 MPa; $8,12 \pm 0,51\%$ ve 624 ± 26 Hv değerlerinde bulunduğunu rapor etmişlerdir (Weiping ve Zhiqiang, 2013).

CoFeNi eşit atomik oranlı alaşıma Al ve Si katkısıyla yapısı ve özellikleri üzerine yapılan bir diğer çalışmada; Al_xCoFeNi ve CoFeNiSi_x yüksek entropili alaşımları değişik Al ve Si molar oranlarda ($x=0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$) tasarlanarak, Al ve Si

katkısının, mikroyapı, mekaniksel davranış, elektriksel ve magnetik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Al ve Si katkısının alaşımın çok güçlü faz yapısını etkilediği gözlenmiştir ve akma dayanımı ve sertlik de Si katkısının, Al katkısından daha fazla etkilediği rapor edilmiştir (Zuo vd., 2014).

Vakum ark ergitme metoduyla elde edilen CoCrFeNiTiAl_x ($x=0; 0,5; 1,0; 1,5$ ve $2,0$ molar oranlarında) yüksek entropili alaşımlarının mekaniksel özellikleri ve mikroyapıları üzerine yapılan bir araştırmada, Al katkısının mikroyapıya ve mekaniksel özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuçta tüm alaşımların iyi bir süneklik gösterdiği gözlenmiştir (Zhang vd., 2009).

AlCoCrFeNi yüksek entropili alaşımın özellikleri ve mikroyapısına, Nb ilavesinin etkisi üzerine yapılan bir diğer çalışmada, yüksek saflıktaki argon atmosferi altında ve su soğutmalı bakır fırında ark-ergitme ile hazırlanan $\text{AlCoCrFeNb}_x\text{Ni}$ ($x=0; 0,1; 0,25; 0,5$ ve $0,75$ molar oran) yüksek entropili alaşımlarının özellikleri ve mikroyapısı araştırılmıştır. İncelenen alaşımlar için, katı solüsyon fazı hacim merkezli kübik ve $(\text{CoCr})\text{Nb}$ tipinde Laves fazı olarak iki faz bulunmuştur. Ayrıca, Nb katkısıyla, basma akma mukavemeti ve Vickers sertliğinin lineer bir artış gösterdiği tespit edilmiştir (Ma ve Zhang, 2012).

Düşük basınçta, su soğutmalı bakır çukur kap içinde yüksek saflıklı argon atmosferinde ark-ergitme yöntemi ile üretilen CoCrFeMnNiV_x ($x=0; 0,25; 0,5; 0,75$ ve 1 molar oran) yüksek entropili alaşımlarına V katkısının mikroyapı ve mekaniksel özellikleri üzerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada; kristal yapı, mikroyapı, mikrosertlik ve basma özellikleri incelenmiştir. Alaşımların mikrosertlik değerleri; CoCrFeMnNi için 144 HV , $\text{CoCrFeMnNiV}_{0.25}$ için 151 HV , $\text{CoCrFeMnNiV}_{0.5}$ için 186 HV ve CoCrFeMnNiV için 650 HV olarak rapor edilmiştir. Sonuç olarak, V ilavesinin artmasıyla mikrosertliğin belirli bir şekilde arttığı olarak rapor edilmiştir. Ayrıca, basmada; akma dayanımı, kırılma dayanımı ve kırılma zorlama oranlarının artmasıyla gözle görünür etkileri olduğu gözlenmiştir (Stepanov vd., 2015).

Senkov vd. (2010) Isıya dayanıklı yüksek entropili alaşımlar üzerine yaptıkları çalışmada vakum ark ergitme yöntemi ile üretilen birbirine yakın eş atomik

konsantrasyonlara sahip W-Nb-Mo-Ta ve W-Nb-Mo-Ta-V ısıya dayanıklı yüksek entropili alaşımların yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Sonuçta, farklı içerikleri olmasına rağmen her ikisinin de kristal yapısının tek-fazlı hacim merkezli kübik yapıya sahip oldukları rapor edilmiştir. Kafes parametreleri dörtlü alaşım için $a=3,2314(3)$ Å ve beşli alaşım için de $a=3,1832(2)$ Å olarak bulunmuştur. Ayrıca dörtlü alaşım için alaşımların yoğunluğu ve Vickers sertlik değeri sırasıyla $\rho=13,75$ g/cm³ ve Hv=4455 MPa bulunurken beşli alaşım için $\rho=12,36$ g/cm³ ve Hv=5250 MPa bulunmuştur (Senkov vd., 2010).

Bingxi vd. (2024) yaptıkları bir çalışmada son yıllarda gelişen yüksek entropili alaşımların gelecekteki gelişmeleri üzerine araştırma raporu sunmuşlardır. Çalışmalarında, yüksek entropili alaşım araştırmaları genel olarak incelenmiştir. Bazı YEA sistemlerin faz diyagramlarındaki dönüşüm, katılaşmaları, faz dönüşümleri, deformasyon mekanizması, yumuşatma davranışları, mekaniksel özellikleri, aşındırıcı ve yapıştırıcı aşınma dirençleri, kimyasal ve elektrokimyasal davranışları, YEA'ların kinetiği ve difüzyon özellikleri üzerine bir araştırma raporu hazırlamışlardır. Sonuçta, klasik alaşımlara nazaran ikiden sekize kadar elementten oluşan YEA'ların içine yeni bir elementin katılmasıyla atomik boyut, mikroyapıdaki bağlanma enerjisi, sertlik, elektriksel direnç, manyetik özellikler, termal özellikler ve X-ışını yayılımı dağılımı gibi özelliklerinin değiştikleri rapor edilmiştir. Yüksek entropili alaşımların yüksek performans gösterebileceği ve daha düşük yoğunluklu alaşımlar elde edilebileceği vurgulanmıştır. (Bingxi vd., 2024).

Nadir toprak elementi içermeyen yüksek entropili alaşımların manyetik ve manyetokalorik özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan bir çalışmada, vakum ortamında ark ergitme ve vakum döküm yöntemleriyle üretilmiş $\text{Fe}_{26,7}\text{Ni}_{26,7}\text{Ga}_{15,6}\text{Mn}_{20}\text{Si}_{11}$ kompozisyonuna sahip yüksek entropili alaşımların mikroyapı ve manyetik özellikleri çalışılmıştır. Tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte Laves fazının miktarı belirli bir sıcaklıkta minimum seviyeye inmiş; buna karşılık BCC fazının stabilitesi korunmuş ancak atomlar arası mesafelerde belirgin bir değişim gözlenmiştir. Bu durum, kristal kafesin temel simetrisinin korunduğunu ancak kafes parametrelerinin sıcaklığa duyarlı olduğunu gösterdiği rapor edilmiştir. Ayrıca, yapılan yapısal analizler sonucunda örneklerin hücre hacimleri, örgü sabitleri ve faz

oranları hesaplanmış ve bu parametrelerin tavlama sıcaklığıyla değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu değişimlerin de, alaşımın manyetik ve manyetokalorik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu rapor edilmiştir. Sonuç olarak, nadir toprak elementi içermeyen YEA'ların fonksiyonel uygulamalarda kullanılabilirliğinin arttığı ve manyetokalorik etki açısından önemli performans değerleri elde edilebileceği de rapor edilmiştir (Kağan, 2019).

Vakum ark ergitme yöntemi kullanılarak üretilen yüksek entropili CrMnFeCoNiAl alaşımına sırasıyla 24 ppm; 387 ppm; 947 ppm ve 1100 ppm miktarlarında Bor ilave edilmesi üzerine yapılan bir diğer çalışmada, bor ilavesinin mikroyapı, kristal yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri sonucunda tüm örneklerde dendritik ve interdendritik bölgelerin varlığı doğrulanmıştır. Bu mikroyapısal özelliklerin bor konsantrasyonu ile belirgin biçimde değiştiği gözlemlenmiştir. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri, farklı bölgelerden alınan örneklerdeki elementel bileşimlerin nominal kompozisyonlara yakın olduğunu göstermiştir. Elementel haritalama görüntüleri, tüm alaşım örneklerinde elementlerin homojen bir dağılım sergilediğini ve bor ilavesinin bu homojenliği bozmadığını ortaya koymuştur. Yapılan X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, tüm örneklerin yüzey merkezli kübik (FCC/YMK) kristal yapıya sahip olduğunu ve bu yapının bor katkısına rağmen korunduğu doğrulanmıştır. Sertlik testleri sonucunda, borsuz alaşımın bor içeren varyantlara kıyasla daha düşük sertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle, bor miktarındaki artışa paralel olarak sertlikte belirgin artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, bor katkısının mikroyapıyı güçlendiren etkisini ve yapısal sertlik kazandırıcı rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu bulgular, bor elementinin YEA sistemlerinde mikroyapı mühendisliği ve mekanik özellik optimizasyonunda etkili bir katkı elementi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir (Karaca ve Çarboğa, 2019).

Ark-ergitme yöntemiyle üretilmiş Isıya dayanıklı Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ yüksek entropili alaşımların mekaniksel özellikleri üzerine yapılan farklı bir çalışmada ise alaşım, çok sayıda element olmasına rağmen tek fazlı hacim merkezli kübik (BCC) kristal yapısına sahip olduğu rapor edilmiştir. Yapının 1400°C'ye maruz bırakıldığı halde kararlı kaldığı ve nötron kırınımı verilerinde süper

örgü yansımalarının olmaması yapının düzensiz kaldığını doğrulamıştır. Alaşımların basma akış özellikleri ve mikroyapı gelişimi, oda sıcaklığından 1600o'ye kadar sıcaklık aralığında incelenmiştir. 600°C ve üzerinde her iki alaşım geniş basma plastik deformasyon gösterdiği rapor edilmiştir. Her iki alaşımın da akma gerilmesi, oda sıcaklığından 600°C'ye kadar aralıkta %30-40 oranında azalmış, ancak belirtilen sıcaklığın üzerinde sıcaklığa duyarsız kaldığı gözlemlenmiştir (Oleg Senkov vd., 2011).

$Al_{0,3}CrFe_{1,5}MnNi_{0,5}$ yüksek entropili alaşımını ile ilgili yapılan bir çalışmada sigma fazı matrisi oluşumuna bağlı olarak sertliği araştırılmıştır. Sertleşme fazının Cr-Mn-Fe üçlü sigma fazı olduğu bulunmuş geleneksel mühendislik alaşımlarından farklı olarak nerdeyse tüm hacim merkezli kübik kristal yapı değişmeden sigma fazına dönüştüğü gözlenmiştir. Sonuç olarak, bunun bir çökelme sertleşmesi reaksiyonu olmadığı rapor edilmiştir (Ming-Hung vd., 2013).

$AlxCo_{1,5}CrFeNi_{1,5}Ti$ yüksek entropili alaşımın aşınma davranışı ve mikroyapısı üzerine yapılan bir araştırmada, faz yapıları ve mikroyapıları incelenmiş, ayrıca yapışmalı aşınma davranışı ve mekanizması araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geleneksel aşınma dayanımlı çelikler olan SUJ2 ve SKH51 ile karşılaştırılmıştır. Al ve Ti miktarlarının, özellikle sert $\gamma-(Ni, Co)_3Ti$ fazının miktarı ve morfolojisi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Yine; $Co_{1,5}CrFeNi_{1,5}Ti$ ve $Al_{0,2}Co_{1,5}CrFeNi_{1,5}Ti$ alaşımlarının, benzer sertlikteki geleneksel aşınma dayanımlı çeliklere göre en az iki kat daha iyi aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu yüksek entropili alaşımlardaki mükemmel oksidasyon direnci ve termal yumuşamaya karşı direnç, olağanüstü aşınma dayanımının başlıca nedenleri olarak rapor edilmiştir (Ming-Hao vd., 2011).

$Al_{0,5}CoCrCuFeNi$ yüksek entropili alaşımlarının yorulma davranışı üzerine yapılan diğer bir çalışmada yüksek gerilmeler altında uzun yorulma ömürleri sayesinde yorulma dayanımlarının özellikleri araştırılmıştır. YEA'ların yorulma davranışının çelikler, titanyum alaşımları ve gelişmiş dökme metalik camlar gibi birçok geleneksel alaşımla karşılaştırılabilir hatta bazı durumlarda üstün olduğu rapor edilmiştir. Alaşımlarda 540–945 MPa arasında değişen yorulma dayanım sınırı ve yorulma

dayanım sınırı ile nihai çekme dayanımı oranı olarak 0,402 ile 0,703 aralığında değerler gözlemlenmiştir. Ayrıca, alüminyum oksit inklüzyonları ve mikro çatlaklar gibi mikroyapısal kusurların YEA'ların yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkisi olabileceği gösterilmiştir. Bu tür kusurların azaltılması durumunda, YEA'ların yorulma dayanımının geleneksel alaşımların ötesine geçebileceği de rapor edilmiştir (Hemphill vd., 2012).

Tek fazlı olan CoCrFeMnNi alaşımı temel alınarak, her seferinde bir elementi değiştirerek eşatomik beş elementli olarak hazırlanan yüksek entropili alaşımların faz dengesi üzerinde entropi ve entalpinin bağıl etkisi üzerine yapılan bir çalışmada konfigürasyonel entropi ve tek fazlı (katı çözelti) yapıların kararlılığı çalışılmıştır. Bu çalışmada değiştirilen elementler (örneğin Co yerine Ti, Cr yerine Mo veya V, Fe yerine V, Ni yerine Cu) seçilirken, oda sıcaklığındaki kristal yapılarının aynı olması ve atomik boyut/elektronegatifliklerinin benzer olması dikkate alınmıştır; bu da Hume–Rothery kurallarıyla uyumlu olarak katı çözelti oluşumunu en üst düzeye çıkarması amaçlanmıştır. Karşılaştırma amacıyla orijinal CoCrFeMnNi alaşımı da hazırlanmıştır. Ancak, yüksek sıcaklıklarda yapılan üç günlük tavlama işlemlerinden sonra, yalnızca baz CoCrFeMnNi alaşımında tek faz gözlemlenmiş; diğer tüm yeni alaşımlarda çoklu fazlar olduğu tespit edilmiştir. Konfigürasyonel entropinin tek başına, faz kararlılığını belirleyen diğer itici güçlerin etkisini baskılayacak kadar güçlü olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca, her bir bileşen için (örneğin Co–Cr, Fe–Ni, Mo–Mn vb.) termodinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle birlikte bu analizler, eş atomlu, çok bileşenli alaşımlarda faz kararlılığı üzerinde esas etkili faktörlerin genellikle entalpi ve konfigürasyonel olmayan entropi olduğu rapor edilmiştir (Otto vd., 2013).

Yeh vd. (2004) yeni alaşım tasarımı üzerine yaptıkları bir çalışmada, ark-ergitme yöntemiyle birden fazla ana elementi içeren nanoyapılı yüksek entropili alaşımlar hazırladılar. 500 A akımda soğuk bakır reaktörde elde edilen alaşımlar 50 mm çapında ve 20 mm kalınlığında ingotlar halinde çubuk şekline getirildi. Ergitme ve döküm 3 kez argon altında 0,01 atm basınç altında oluşturuldu. Sonuçlarda akma gerilmeleri ve sertlik değerleri klasik alaşımlara göre kıyaslanmıştır (Yeh vd., 2004)

Yüksek entropili alaşımların fiziksel özellikleri üzerine yapılan farklı bir çalışmada YEA'ların manyetiklik, elektriksel ve termal özellikleri gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir. Manyetik özelliklerinden mıknatıslığının giderilmesi ve doyma manyetizmasını FeCoNi(AlSi)_x YEA özelinde tespit edilmiştir. Elektriksel özelliklerden de direnç ve termal iletkenlik değerleri saf elementlerle ve geleneksel alaşımlarla kıyaslanarak değerlendirilmiştir. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımlarında elektrik direncinin sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiş ve Geleneksel alaşımlarda olduğu gibi, $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımlarının direnci sıcaklık arttıkça arttığı rapor edilmiştir. $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ alaşımlarında 5 K ve 300 K sıcaklıklarında Hall katsayıları da raporlanmıştır. Bu alaşımlar 5 K'de ferromanyetik hale geldikleri için, hepsinde anomali Hall etkisi gözlemlenmiştir. Yine taşıyıcı hareketliliği, geleneksel alaşımlara göre daha düşük olduğu da rapor edilmiştir (Ming-Hung, 2013).

Yüksek entropili alaşımların üretimi, özellikleri ve kullanım alanları üzerine yapılan çalışmada YEA hakkında alaşımın tanımı, özellikleri, üretim yöntemleri, kullanım alanları irdelenmiş ve son teknolojik gelişmelerle hangi alanlarda kullanılabileceği rapor edilmiştir. Termal direnç, termal iletkenlik, korozyon ve aşınma direnci, sertlik, yüksek mukavemet ve elektriksel ve manyetik özellikler hakkında bilgiler verilmiştir. YEA'ların üretim metotlarından; katı hal, sıvı hal ve gaz hal karıştırma metotları hakkında da geniş bilgiler verilmiştir. Son olarak yakın zamanlarda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur (Özkan ve Karaoğlu, 2021)

Praveen ve Hyoun (2022), heterojen mikroyapısıyla yüksek entropili alaşımların işleme ve mekaniksel özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada heterojen mikroyapılara sahip YEA'ların mekanik davranışlarını inceleyerek, mukavemet ve sünekliğin uyumlu bir şekilde sağlanabildiği durumları incelemişlerdir. Gerilme, akma dayanımı, sıcaklık, uzama gibi mekanik özelliklerin değişimleri verilmiş ve kırılma uzaması, çekme gerilmesi gibi özellikler $\text{Fe-16Mn-10Al-0,86C-5Ni}$ alaşımı için değerlendirilmiştir (Praveen ve Hyoun, 2022).

Yüksek entropili CrMnFeCoNi Cantor alaşımı ve yeni bir yüksek entropili CrFeCoNiPd alaşımlarının yapı ve özellikleri üzerine yapılan çalışmada alaşım içindeki atomik ölçekli element dağılımları, enerji saçılımı X-ışını spektroskopisi

(EDS) yöntemiyle incelenmiştir. EDS haritalarından, beş elementin tamamında bazı rastgele yoğunluk değişimleri gözlemlenmiş; ancak Co, Cr ve Ni daha homojen bir dağılım sergilerken, Fe ve Mn daha farklılık gösterdiği rapor edilmiştir (QingQing vd., 2019).

Yapılan diğer bir çalışmada yüksek entropili alaşımlar ya yüksek mukavemet ya da yüksek süneklik sergileyebilir olduğunu, ancak her ikisinin aynı anda elde edilmesinin zor olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, düşük dökülebilirlik ve bileşimsel segregasyon gibi problemler de YEA'ların teknolojik uygulamalarında önemli engeller oluşturmakta olduğunu belirtilmiştir. Bu sorunları aşmak için, burada ötektik alaşım kavramına dayanan yeni bir YEA tasarım stratejisi önerilmiş: yani, yumuşak FCC (yüzey merkezli kübik) ve sert BCC (hacim merkezli kübik) fazlardan oluşan bir mikroyapının elde edilmesi amaçlanmıştır. Buna göre, $\text{AlCoCrFeNi}_{2,1}$ (atomik oran) bileşimine sahip bir ötektik yüksek entropili alaşım tasarlanmıştır. Döküm sonrası elde edilen alaşım ince lamelli FCC/B2 mikroyapısı sergilemiş ve oda sıcaklığında olağanüstü düzeyde hem yüksek çekme sünekliği hem de yüksek kırılma dayanımı gösterdiği rapor edilmiştir. Bu mükemmel mekanik özellikler 700°C 'ye kadar korunabildiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, bu yeni alaşım tasarım stratejisi, yüksek kırılma dayanımı ile yüksek sünekliği aynı anda sunan YEA'ların endüstriyel ölçekte üretimine kolayca uyarlanabilir olacağı rapor edilmiştir (Yiping vd., 2014).

Yong vd. (2012) YEA'ların genellikle beş veya daha fazla element içerdiğinden dolayı, faz diyagramlarının genellikle mevcut olmadığını ve alaşım tasarımı için doğrudan kullanılamayacağını söyleyerek, alaşım tasarımı ve yüksek entropili alaşımların özelliklerinin optimizasyonu üzerine bir çalışmada yaptılar. Bu çalışmada, bu duruma çözüm olarak, faz oluşumunu öngörmek için δ (atomik boyut farkı) ve X (karışım entalpisi) parametrelerinin kullanılabileceğini önerdiler. Özellikle, $X \geq 1,1$ ve $\delta \leq \%6,6$ koşulları, katı çözeltiler fazlarının oluşumu için gerekli olduğunu belirttiler. Bu kriteri test etmek amacıyla, TiZrNbMoV_x ve CoCrFeNiAlNb_x alaşımlarını hazırladılar. Bu alaşımların mikroyapıları, düşük Nb içeriğinde çoğunlukla basit hacim merkezli kübik (BCC) katı çözeltilerden oluşmakta olduğunu rapor ettiler. TiZrNbMoV_x alaşımlarının, mükemmel mekanik özelliklere sahip olduğunu tespit ettiler. Ayrıca, CoCrFeNiAl alaşımının mikroyapısını kontrol etmek için Bridgman yönlü katılaştırma

yöntemi kullandılar ve bu sayede plastikliğin yaklaşık %30 oranında arttığını rapor ettiler. Ayrıca, CoCrFeNiAl YEA'larında, sıcaklık 298 K'den 77 K'ye düşürülse bile, belirgin bir sünekten gevreğe geçiş gözlemlenmemiş olduğunu da rapor ettiler (Yong vd., 2012).

Yüksek entropili alaşımlarda bilim ve teknoloji üzerine yapılan bir çalışmada YEA'ların üstün özelliklerinden dolayı kendine özgü mikroyapılarından bahsedilmiştir. Son yıllardaki gelişiminden, üretim yöntemlerinden, bileşim tasarımından, faz oluşumu ve mikroyapılarından ve çeşitli fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden de bahsedilmiştir. Yine modelleme ve simülasyon hesaplamaları da çalışmanın konusu olmuştur. İki tür tanımlamadan dolayı bunların kompozisyon tabanlı ve entropi tabanlı tanımlamalar olduğunu rapor etmişlerdir (Weiran vd., 2018).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Malzeme ve Yöntem

3.1.1 Tozların Hazırlanması

Numunelerin hazırlanmasında kullanılacak Cr, Mn, Fe, Co ve Ni elementleri ile katkı olarak kullanılacak Bor, Silisyum, Alüminyum ve aktif Karbon tozları %99 saflıkta olarak temin edilerek %atomik oranlarına göre ön hazırlık yapıldı. Karıştırıcının hazne kapasitesine uygun olarak tozlar belli oranlarda hassas terazi ile tartıldı. Haznenin alt ve üst metalinin ağırlıkları 2387 g ve 772 g olarak toplam 3059 g bulundu. Haznenin içine konacak toz miktarı karışımın homojen olması için dolu olarak değil yaklaşık 200 g alacak şekilde belirlendi. Numunelerimizin şekli ve boyutları aşağıdaki şekilde verilmiştir. Ayrıca herbir numune 4 g olacak şekilde tasarlandı. Bunların belirlenmesinde hazne ve presin yapısal özellikleri etkin oldu.

Temin edilen metal tozları ile Aşağıdaki tabloya uygun olarak 48 numune oluşturuldu. Ana Bileşen (bundan sonra AB olarak kodlanacak) olarak Cantor elementleri alındı ki bunlar %atomik oran olarak %20 Cr; %20 Mn; %20 Fe; %20Co ve %20Ni'dir. Tezimizde takviye elementleri olarak Bor (B), Silisyum (Si), Alüminyum (Al) ve Aktif karbon(C) seçilmiştir.

Takviye oranları herbir takviye elementi için %2,5; %5 ve %7,5 olarak belirlenmiş ve sinterleme sıcaklığı olarak 1000°C ve 1200°C sıcaklıkları seçilmiştir.

Mekanik alaşımlandırma süresi AB için 12 saat daha sonraki takviyeler için her birisinde 1'er saat süre ayrılmıştır. Cihazdan karıştırma hızı 400rpm'e ayarlanmış olup numunelerin preslenmesi için başlangıçta 600MPa daha sonra duruma göre basınç değeri düşürülmüştür.

Hazırlanan numuneler presin yapısına da uygun olarak 13 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde silindirik tayin edilmiştir.

Karıştırma da kullanılan bilyeler homojen dağılım göstermesi açısından 10 mm-8mm ve 6mm çapındaki bilyelerden karıştırılmış karışmanın daha iyi olması sağlanmıştır. Toz-bilye oranı 10:1 seçilmiş karıştırma haznesinin kapasitesine göre ayarlamalar yapılmıştır.

Haznenin alabileceği kadar AB hazırlanarak uygun oranlardaki takviye ile deneyler 5 gün boyunca yapılmıştır.

Karıştırma esnasında ısınma ve hızdan dolayı çeperlere tozların yapışması sebebiyle kayıp olmaması için hazneye fazla ama aynı oranları koruyacak şekilde karışım katılmıştır.

Çalışmayı esas olan tablolar aşağıda verilmiştir:

Tablo 3.1 Numunelerin hazırlanmasında kullanılan parametreler ve değerleri

Mekanik alaşımlama süresi	12 saat
Mekanik alaşımlama hızı	400 rpm
Presleme basıncı	600MPa (değişken)
Sinterleme sıcaklığı	1000 ve 1200°C

Tablo 3.2 Ana bileşen için kullanılacak gram ağırlıkları

%Atomik Oran	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Ana Bileşen (AB) yüzdesi (%)	20	20	20	20	20
AB kütlesi (gram)	31,194	32,958	33,504	35,358	35,214

Tablo 3.3 Ana bileşene katkı elementlerinin katılma yüzdeleri

	Ana Bileşen (%) CrMnFeCoNi	B (%)	Si (%)	Al (%)	Aktif Karbon (%)
1	100				
2	97,5	2,5			
3	95	5			
4	92,5	7,5			
5	97,5		2,5		
6	95		5		

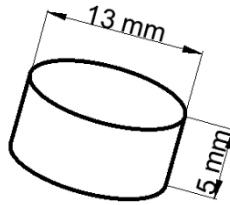
Tablo 3.4'ün devamı

	Ana Bileşen (%) CrMnFeCoNi	B (%)	Si (%)	Al (%)	Aktif Karbon (%)
7	92,5		7,5		
8	97,5			2,5	
9	95			5	
10	92,5			7,5	
11	97,5				2,5
12	95				5
13	92,5				7,5

Kullanılan metallerin bazı fiziksel özellikleri ise şöyledir:

Tablo 3.4 Kullanılan elementlere ait bazı fiziksel değerleri

	Ergime Derecesi (°C)	Atom Ağırlığı (g/mol)	Yoğunluk (g/cm ³)
Cr	1907	51,99	7,15
Mn	1246	54,93	7,26
Fe	1538	55,84	7,87
Co	1495	58,93	8,9
Ni	1455	58,69	8,9
B	2076	10,81	2,84
Si	1410	28,08	2,33
Al	660	26,98	2,7
Aktif karbon	3550	12,01	2-2,25



Şekil 3.1 Presde hazırlanan numunenin geometrisi

Deneyler yapılırken kullanılan mekanik karıştırıcıya, hassas teraziye ve prese ait resimler ise aşağıda verilmiştir:



Resim 3.1 Retsch marka Mekanik karıştırıcı



Resim 3.2 Tozların hazneye konduktan sonra sıkılarak yerleştirilmesi



Resim 3.3 Mekanik karıştırıcının ayarlanması



Resim 3.4 Karıştırma sonucu homojen şekilde karışan yapı

Mekanik karıştırıcıdan çıkan tozlar hassas terazi ile tartılarak presleme aparatı ile soğuk şekillendirme yapıldı. Aşağıdaki resimler bu cihazlara aittir.



(a)



(b)

Resim 3.5 a) Presleme aparatı, b) Hassas terazi

3.1.2 Sinterleme ve Toz Metalurjisi

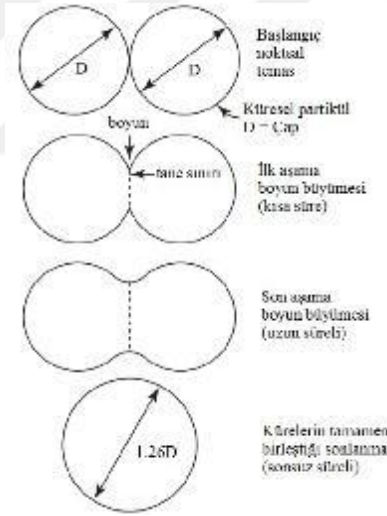
Toz metalurjisi, metal tozlarının bir araya getirilip şekillendirilmesi ve ardından yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesiyle katı parçaların üretildiği bir üretim yöntemidir.

Yapılan işlem toz metalurjisinin konusuna girmektedir. Soğuk şekillendirilen silindirik numuneler sinterleme işlemine tabii tutulur. Sinterleme metal tozlarının bağ kurarak katılaşmasını sağlayan termal bir işlemdir. Sinterleme sıcaklığı metalin ergime

noktasının altında kalmalıdır. Bu yüzden çalışmamızda 1000°C ve 1200°C sıcaklıklar seçilmiştir. Sinterleme işlemi üç temel fazdan oluşur:

1. Katı hal difüzyonu
2. Boyut küçülmesi ve gözenek azalması
3. Mikroyapı oluşumu

Katı hal difüzyonunda tanecikler arası temas noktalarında atomların hareketi vardır. İkinci fazda malzemenin yoğunluğu artar. Üçüncü fazda mekanik özellikler gelişir ve faz dönüşümleri olabilir. Sinterlenen malzeme mekanik özellikleri açısından çok daha iyi özelliklere sahip olur. Bu; tozun kalitesine, presleme koşullarına ve sinterleme parametrelerinin dikkatli yönetilmesine bağlı olarak değişebilir.



Şekil 3.2 İki küre sinterleme modeli ile sinterleme şeması (URL-1, 2023)

Çalışmamızda, soğuk preslenen numuneler, Kastamonu Üniversitesi Makine Mühendisliği İmalat laboratuvarında sinterlenmesi için hazırlanarak 2 grup halinde aşağıdaki yöntemle belirlenerek işleme tabi tutulmuştur:

Numunelerin sinterlenmesinde 3 kademe kullanılmıştır.

1. Kademedeki 1,5 saat boyunca fırın 1000°C'ye getirildi,
2. Kademedeki 3 saat boyunca 1000°C'de bekletildi ve

3. Kademedede 3 saat oda sıcaklığına düşene kadar bekletildi.

İlk aşamada bu işlem 24 numune için 1000°C’de yapıldıktan sonra aynı işlem 1200°C için tekrarlanmıştır. Numunelerin fırına yerleştirilmesi aşağıdaki tabloya uygun yapılmıştır.

Tablo 3.5 Numunelerin fırına yerleştirilme planı

Alüminyum	Silisyum	Karbon	Bor
2,5	2,5	2,5	2,5
2,5	2,5	2,5	2,5
5	5	5	5
5	5	5	5
7,5	7,5	7,5	7,5
7,5	7,5	7,5	7,5

Ana bileşenden (Cantor alaşımı: CrMnFeCoNi) 2 adet 1000°C için.

Aynı düzenle fırına diğer 24 numune ve 2 Ana bileşen numune 1200°C için konuldu.

Sinterleme fırını ve düzeneği ile ilgili görseller aşağıdadır:



(a)



(b)

Resim 3.6 Sinterleme fırını (a)sıcaklık ve zaman kontrol ünitesi (b) kapak açık şekli



Resim 3.7 Sinter fırınının argon gazı tüpü ve numune yerleşim planı



Resim 3.8 Fırının zaman ve sıcaklık ayarı kontrol ünitesi çalışma anı.

3.1.3 Zımparalama

Numuneler sinter fırınından çıktıktan sonra yüzey görüntülerinin daha iyi alınması ve diğer deneyler için (mikrosertlik ölçümü gibi) yüzeylerinin zımparalanması ve dağlanması yapıldı. İlk önce 75 numaralı zımpara ile Kastamonu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Nanoteknoloji laboratuvarında zımparalandı. Daha

sonra Çankırı Karatekin Üniversitesi MYO Malzeme Test laboratuvarında işleme devam edildi.

Tüm numuneler 320 numaralı zımpara ile zımparalandı. Daha sonra sırasıyla hassasiyet için 600; 800; 1200 ve son olarak 1500 numaralı zımparalar ile zımparalandı. Bu işlem 3 gün sürmüştür.

Zımparalama işlemlerinde aynı zımparalar tekrarla kullanılmamış aşınan zımparalar kenara ayrılmıştır.

Zımparalama süresi kaba işlemlerde 2-3 dakika arası tutulmuştur. Aynı gün tüm numuneler 600'lük zımparadan geçirilmiştir.

Ertesi gün tüm numuneler bu sefer önce 800'lük ve daha sonra 1200 numaralı zımparalar ile zımparalanmıştır.

Diğer gün ise son olarak hassas yüzey elde etmek için 1200 numaralı zımpara kullanılmış ve her numune en az 3-4 dakika zımparalanmıştır. Zımparalama işlemlerinden sonra çuha takılarak 1 micron Water-based, monocrystalline Diamond Suspension ile 5 dakikadan az olmamak üzere yüzey parlatılmıştır.

Zımparalama ve dağlama işlemine ait resimler aşağıda verilmiştir.



Resim 3.9 75 numaralı zımpara kullanılan nanoteknoloji labında bulunan zımparalama aparatı (Kastamonu Üniversitesi)



Resim 3.10 Diğer zımparalamaların yapıldığı Buehler marka zımparalama aparatı (Çankırı Karatekin Üniversitesi MYO)



(a)



(b)

Resim 3.11 Kullanılan (a)zımpara örneği (120 no) (b) diğer kullanılmış zımparalar



Resim 3.12 Parlatma işleminde kullanılan DIAPAT-M marka elmas solüsyon



Resim 3.13 Zımparalama işleminden geçen numunelerden örnekler

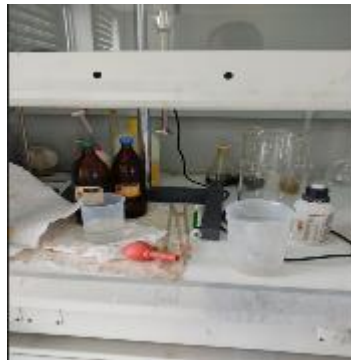
3.1.4 Dağlama

Numune yüzeylerinin daha iyi izlenebilmesi için dağlanması gerekir. Bu maksatla aşağıdaki asit karışımı hazırlanmıştır:

- 2 mL Hidrojen Florür (HF)
- 3 mL Hidroklorik asit (HCl)
- 5 mL Nitrik asit (HNO₃)
- 190 mL H₂O (Saf su)

Bu karışım hassas ve dikkatli bir şekilde Çankırı Karatekin Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünün laboratuvarında hazırlanmıştır.

Dağlama için kullanılacak asit karışımı yine Malzeme test lab.ında dikkatlice numuneler batırılarak 20-30 s ile tutuldu ve sonra etil alkol ile yüzey temizlenmiştir.



Resim 3.14 Asit karışımının hazırlandığı Kimya lab.ındaki bölme ve kullanılan asitler.

3.1.5 SEM ve EDS Görüntüleme

3.1.5.1 SEM tekniği

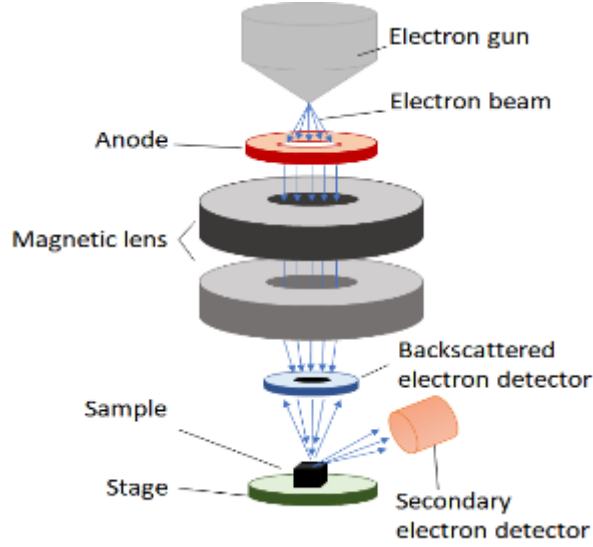
SEM (Scanning Electron Microscope), numunenin yüzeyini yüksek çözünürlükte görüntülemek için kullanılan bir mikroskoptur. Geleneksel ışık mikroskoplardan farklı olarak, ışık yerine elektron demeti kullanır.

SEM’de, bir elektron demeti ince bir prob haline odaklanır ve küçük bir dikdörtgen alan üzerinde tarama (rasterleme) yapılır. Elektronlar numune ile etkileşime girdikçe, ikincil elektronlar dahil olmak üzere çeşitli sinyaller üretilir ve tespit edilir. Bu yüksek lokalizasyonlu sinyaller, elektron demeti ile senkron şekilde taranan bir CRT (katot ışın tüpü) ekranın parlaklığını modüle etmek için kullanılır. CRT üzerinde oluşan görüntü, numunenin yüksek büyütmeli bir görüntüsüdür.

Bu teknik genellikle yıkıcı olmayan (nondestrüktif) bir yöntemdir, ancak cihazın numune gereksinimleri çoğu zaman analiz öncesinde numunede değişiklik yapılmasını gerektirir. Büyütme oranı 10X ile 300.000X arasında olup, yatay (lateral) çözünürlük 10–50 nm düzeyindedir; bu da 100 Å (angstrom) kadar küçük detayların görülmesini sağlar. Analiz derinliği ise 20–50 Å civarındadır.

SEM analizi, özellikle yüzey topografisi (şekil, doku) hakkında mükemmel bilgiler sağlar. Geri saçılan elektron (backscatter) modu kullanıldığında ise atom numarasına dayalı bileşimsel bilgi de elde edilebilir (URL-2, 2024).

Bu görüntüleme yöntemine ait şematik şekil aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3 SEM çalışma prensibi (URL-3, 2024)

3.1.5.2 EDXS (EDS)

EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopi), bir numunedeki elementlerin niteliksel ve niceliksel analizi için kullanılan bir tekniktir. Genellikle bir Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile birlikte kullanılır ve malzemenin kimyasal bileşimini belirlemede güçlü bir araçtır.

EDX, elektron demetinin numune ile etkileşimi sırasında yayılan karakteristik X-ışınlarını algılar:

- Elektron demeti, numunedeki atomların iç yörüngelerinden elektron koparır.
- Bu boşluklar, dış yörüngeden gelen elektronlarla doldurulurken özgül (karakteristik) enerjilere sahip X-ışınları yayılır.
- Bu X-ışınlarının enerjisi, her element için benzersizdir. Böylece numunedeki hangi elementlerin bulunduğu belirlenebilir.

Bir başka anlatımla EDS; yüksek enerjili elektronların bir numuneye bombardımanı sonucu oluşan X-ışınlarının toplanması ve enerjiye göre ayrılması esasına dayanan tekniktir. EDS dedektörü genellikle Taramalı Elektron Mikroskobu'na (SEM) entegre

edilmiştir ve bu iki teknik genellikle birlikte kullanılır. Elde edilen X-ışınlarının enerjileri, numunedeki elementlere özgüdür (karakteristiktir).

Cihazın elektronik sistemi, bu sinyalleri işleyerek enerjiye karşılık sinyal şiddeti histogramları oluşturur. Bu sinyal şiddeti, elementlerin göreceli yoğunluklarıyla ilişkilidir. EDS analizi, aynı zamanda numunenin elementel dağılım haritalarını da sağlayabilir ve bu haritalar, elektron mikrograflarıyla karşılaştırılabilir.

Bu yöntem, bor (B) ile uranyum (U) arasındaki tüm elementleri tespit edebilir ve genellikle yıkıcı olmayan (nondestrüktif) bir tekniktir. Tespit sınırları, yüksek atom numaralı (Z) elementlerde %0,05'e, düşük Z elementlerinde ise %2'ye kadar değişmektedir. Yaklaşık 1 mikrometre kadar küçük özellikler analiz edilebilir.

EDS, özellikle elementel bileşim ile yüzey topografisi arasındaki ilişkiyi ortaya koymak açısından son derece etkilidir (URL-4, 2024).

Çalışmamızda, zımparalanan ve dağıtılan numuneler Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM biriminde SEM ve EDS görüntüleri alınmıştır.

Numuneler SEM ve XRD görüntülemeye kolaylık olması açısından aşağıdaki tabloda görüleceği gibi kodlanmıştır:

Tablo 3.6 Alaşımların hazırlanan numunelerinin SEM için kodlama tablosu

ELEMENTLER	ALÜMİNYUM		BOR		KARBON		SİLİSYUM	
%2,5 1000°C	A11	A12	B11	B12	C11	C12	S11	S12
PRESLEME TONAJI(Ton)	~2	~2	2	2	1	1	2	2
%2,5 1200°C	A21	A22	B21	B22	C21	C22	S21	S22
PRESLEME TONAJI(Ton)	~2	~2	2	2	1	1	2	2
%5 1000°C	A31	A32	B31	B32	C31	C32	S31	S32
PRESLEME TONAJI(Ton)	~2	~2	2	2	0,5	0,5	2	2
%5 1200°C	A41	A42	B41	B42	C41	C42	S41	S42
PRESLEME TONAJI (Ton)	~2	~2	2	2	0,5	0,5	2	2
%7,5 1000°C	A51	A52	B51	B52	C51	C52	S51	S52
PRESLEME TONAJI(Ton)	~2	~2	2	2	0,5	0,5	2	2
%7,5 1200°C	A61	A62	B61	B62	C61	C62	S61	S62
PRESLEME TONAJI (Ton)	~2	~2	2	2	0,5	0,5	2	2

Tablo 3.7 Ana Bileşen numunelerin kodlaması

ALAŞIM	1000°C	1000°C	1200°C	1200°C
ANA BİLEŞEN	1	2	3	4

Kullanılan SEM cihazı ve özellikleri aşağıda verilmiştir.



Resim 3.15 Numunelerin mikroyapısal görüntülerinin alındığı SEM cihazı (Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM)

Cihazla ilgili bilgiler şöyledir:

Marka: Carl Zeiss

Model: Sigma 300 VP

Kurulum: 0,02 – 30 kV Akselerasyon voltaj aralıklı schottky termal alan emisyon tabancası; Uygun koşullarda beraber çalışabilen veya mix edilebilen ya da tek çalışabilen Inlens-SE, Sekonder, STEM, HD-Backscatter, VP-SE dedektörler; Yüksek vakumda ve 10 – 133 Pa aralığındaki değişken basınçta çalışılabilen modlar; Be (4) – Am (95) aralığında elementel yüzey analizi yapabilen 129 keV EDAX dedektör.

3.1.6 XRD Görüntüleme

XRD (X-Ray Difraksiyonu), bir katı numunenin kristal yapısını, faz bileşimini ve kafes parametrelerini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Temel prensibi, X-ışınlarının kristal düzlemlerden saçılması (difraksiyon) prensibine dayanır. Işınlar numuneye gönderildiğinde, kristal yapı içindeki atom düzlemlerinden saçılır. Bu saçılan ışınlar, belirli açılarda yapıcı girişim oluşturarak Bragg yasasına göre difraksiyon zirveleri üretir. Bragg yasası:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

Burada:

λ : X-ışını dalga boyu

d: Düzlem aralığı

θ : Girişim açısı ve

n: girişim derecesi olarak tanımlanmıştır.

Dedektör bu zirveleri kaydeder ve X-ışını difraksiyon deseni oluşturur.

XRD analizi ile hangi kristal fazların oluştuğu, kristal sistemler (kübik, hegzagonal gibi.), atom düzlemleri arasındaki mesafe, ortalama tane boyutu, kristal içi mikrogörünmeler ve bozukluklar tespit edilebilir.

Yıkıcı olmayan bir yöntem olması, fazlara özgü yüksek seçiciliği olması, kristal yapı hakkında doru bilgiler vermesi analizin avantajlarındandır. Eğer numune yüzeyi düzgün değilse ve yapı kristalize değil amorf ise sınırlayıcı olabilmektedir (URL-5, 2024).

Numuneler SEM ve EDS görüntüleri alındıktan sonra Kastamonu Üniversitesi MERLAB biriminde XRD görüntüleri alınmak üzere gönderildi. Kullanılan cihaz ve özellikleri aşağıdaki gibidir.

Marka: Bruker

Model: D8 Advance



Resim 3.16 XRD cihazı (Kastamonu Üniversitesi MERLAB)

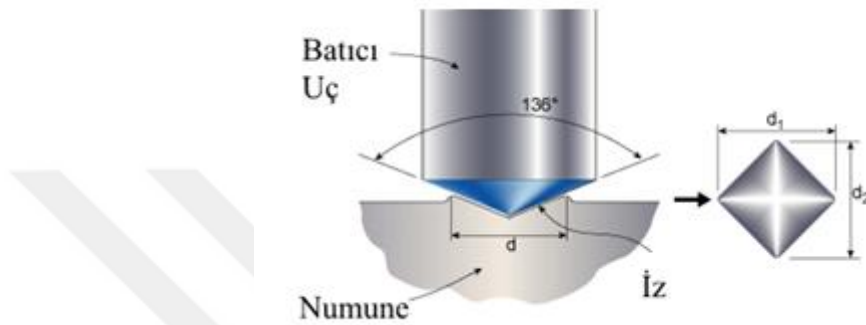
3.1.7 Mikrosertlik

Bu testler, belirli bir yük altında numunenin yüzeyine uygulanan batıcı bir uç vasıtasıyla bırakılan izin geometrisinden yararlanılarak tespit edilen değerlerden oluşur. Oluşan izin (indentasyon) boyutuna göre sertlik değerleri hesap edilir. Burada yaygın olarak iki uç kullanılır.

1. Vickers Mikrosertlik Testi: U olarak elmas piramit uç kullanılır. U açısı 136°'dir. Sertlik değeri ise:

$$HV = \frac{1,854F}{d^2} \quad (3.2)$$

Formülü ile bulunur. Burada: F, uygulanan yükü ve d ise ortalama iz çapını verir.



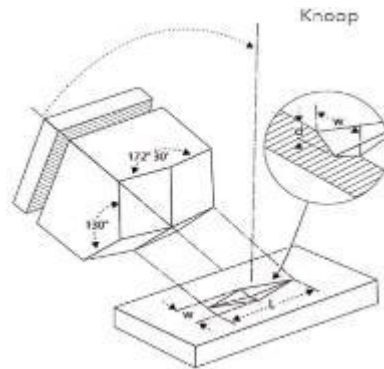
Şekil 3.4 Vickers Mikrosertlik Ölçme Metodu şematik gösterimi (URL-6, 2024)

2. Knoop Mikrosertlik Testi: Elmas esaslı asimetrik piramit formuna sahiptir. Bir tarafı daha çok uzun (boy/en oranı yaklaşık 7:1) elmas piramitten oluşur.

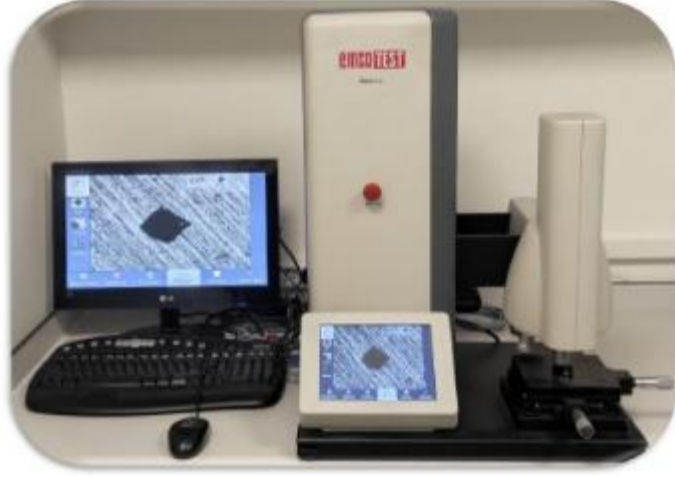
Açı değerleri şekilde belirtildiği gibidir. Knoop sertlik değeri:

$$HK = \frac{14229.F}{L^2} \quad (3.3)$$

Formülü ile bulunur. Burada F: Uygulanan yükü (kg) ve L ise uzun izi (mm) verir.



Şekil 3.5 Knoop Mikrosertlik Ölçme metodu şematik şekli (URL-7, 2024)



Resim 3.17 Mikrosertlik Cihazı (Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM)

Çalışmamızda mikrosertlik ölçümü yaptığımız cihazın özellikleri şöyledir:

Marka: Emcotest

Model: Durascan 20

Kurulum: 20x ve 60x objektifler, piramid uç

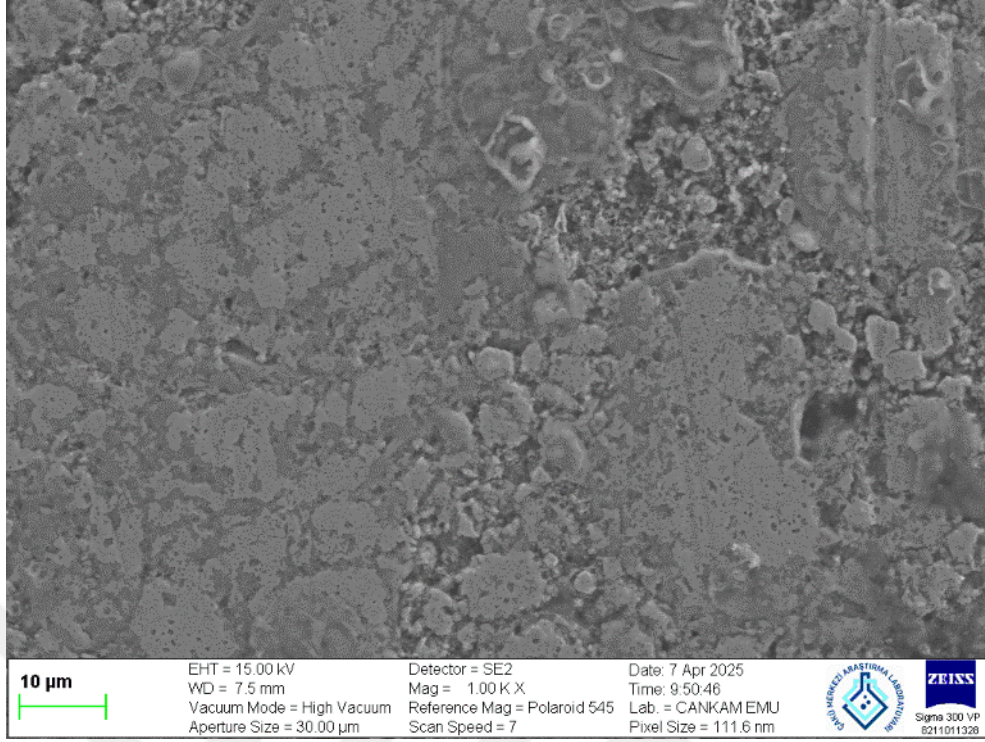
Ölçüm modları: VICKERS (ISO 6507; ASTM E384; ASTM E92)

4. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

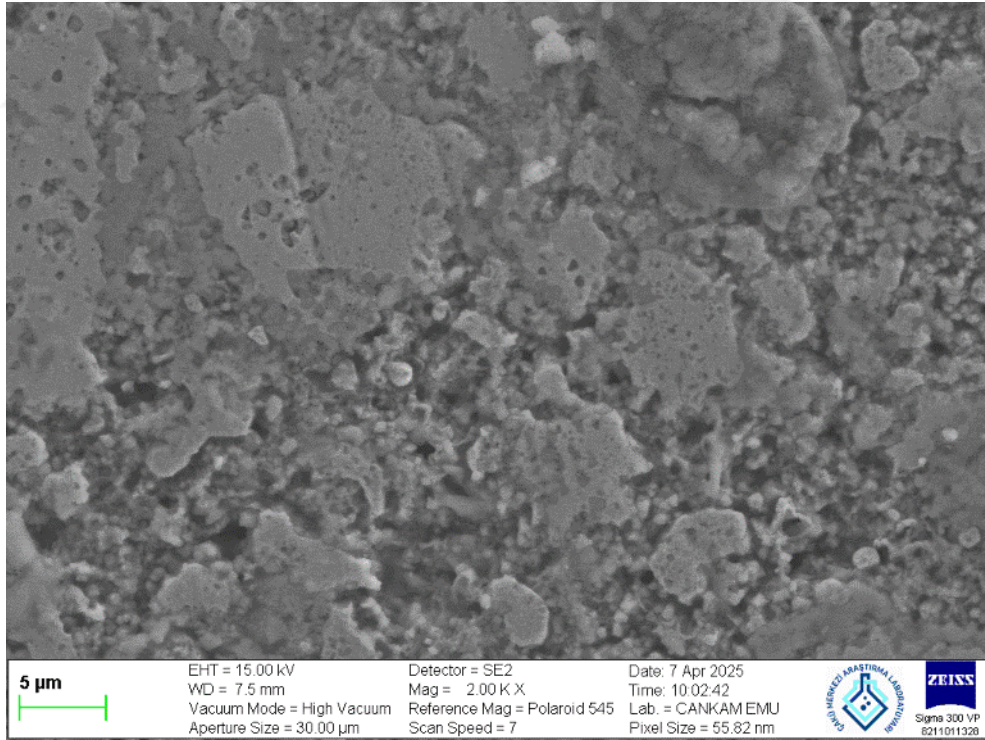
4.1 SEM Görüntü Analiz Sonuçları

Cantor alaşımı ismi verilen CrMnFeCoNi yüksek entropili alaşımdan (YEA) herbirisinden değişik deneylerde kullanılmak üzere 4'er adet numune üretilmiştir. Bunların ikisi 1000°C ve 1200°C sıcaklıklar içindir. Katkı elementi olarak bor, silisyum, alüminyum ve aktif karbon seçilerek Cantor alaşımına %2,5-%5 ve %7,5 oranlarında ve ayrıca 2 sıcaklık parametresi olmak üzere 52 numune üretilmiştir. Bu 52 numunenin 26'sı için SEM görüntüleri alınmıştır. SEM analiz sonuçları ile beraber EDX ve Haritalama görüntüleri aşağıya sırasıyla kaydedilmiştir. Analizlerde herbir numune için 1000, 2000, 4000 ve 8000 büyütme olmak üzere 4 büyütme modu ile görüntüler alınmıştır. Herbir katkı elementinin alaşıma etkisinin değerlendirmeleri görüntülerin altına kaydedilmiştir.

1000°C ve 1200°C sıcaklıklarda ve %2,5; 5 ve 7,5 oranlarında Al ilave edilerek üretilen YEA'ların SEM görüntüleri Şekil 4.1 - 4.6 aralığında verilmiştir.

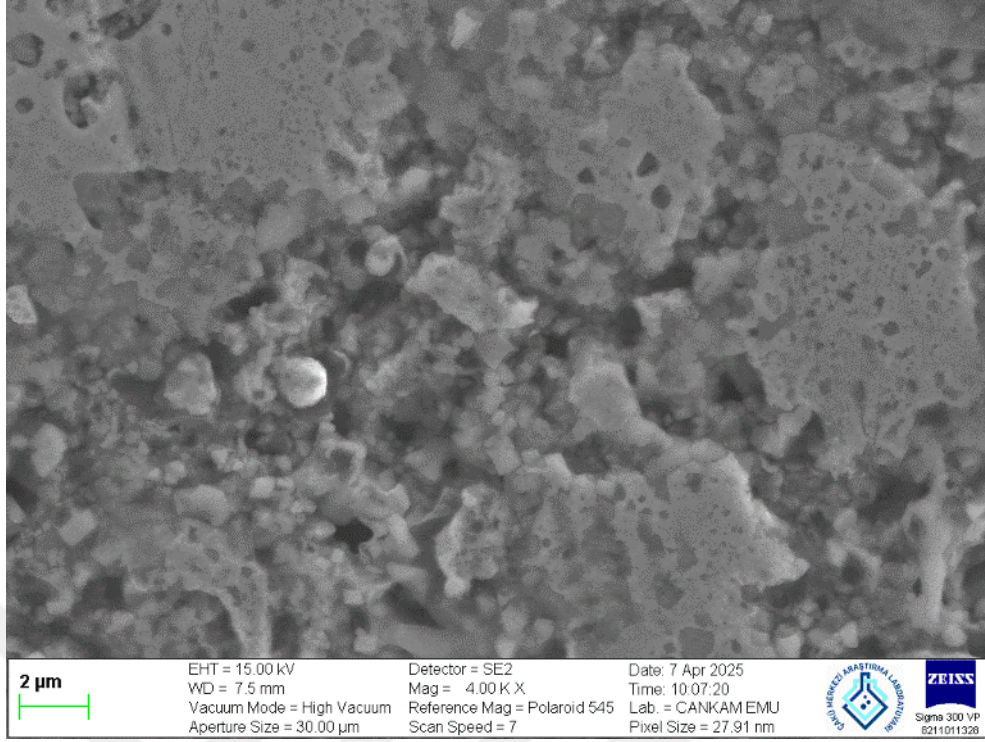


(a)

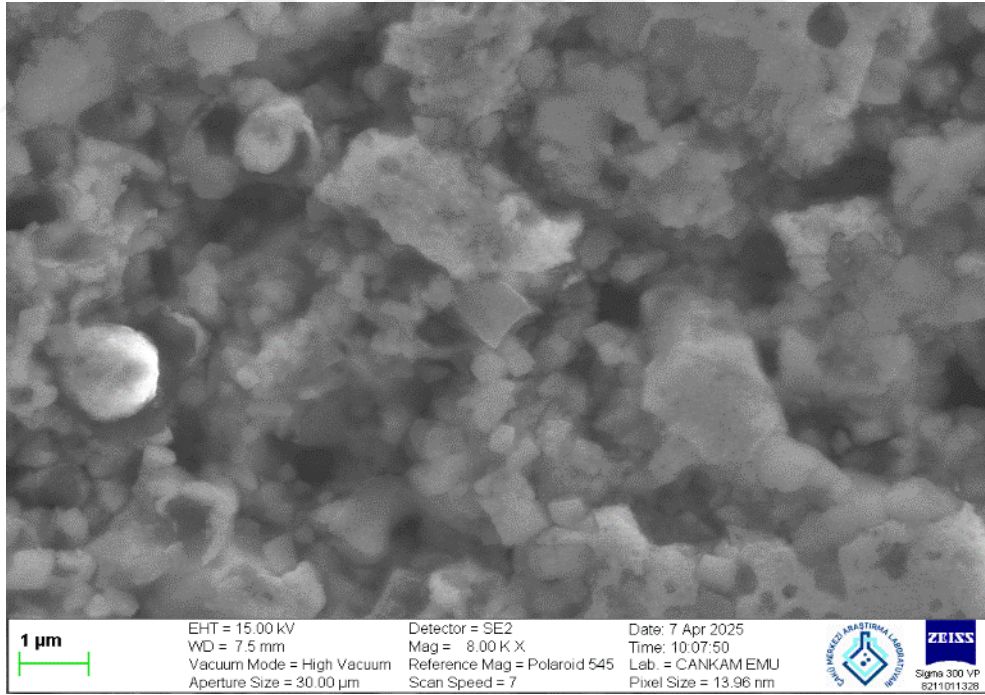


(b)

Şekil 4.1 Alüminyum/ %2,5/1000°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

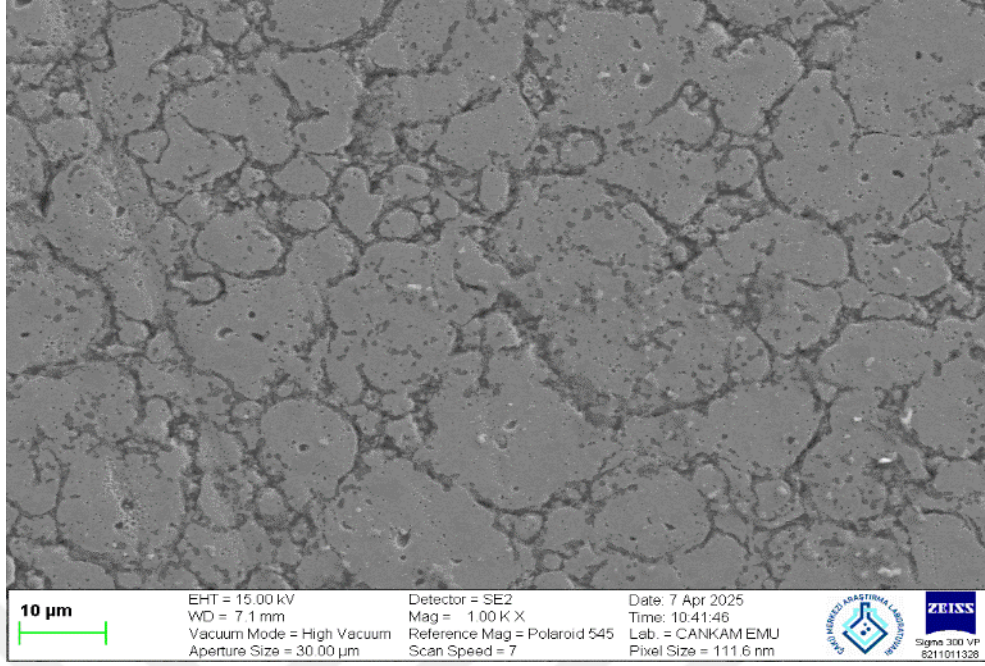


(c)

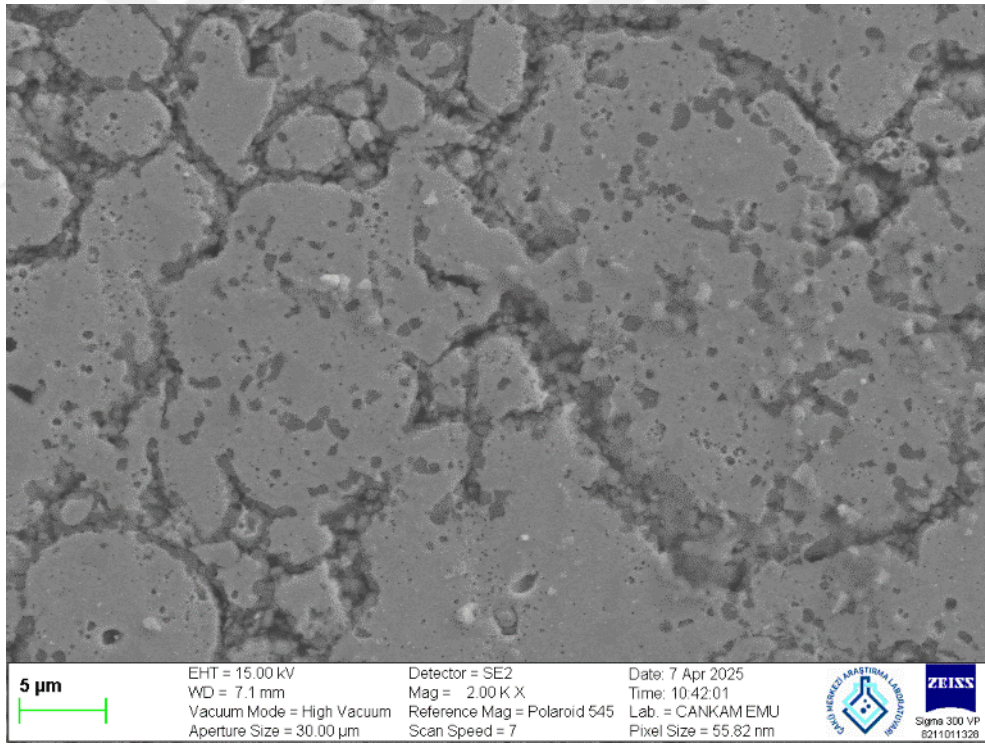


(d)

Şekil 4.1'in devamı

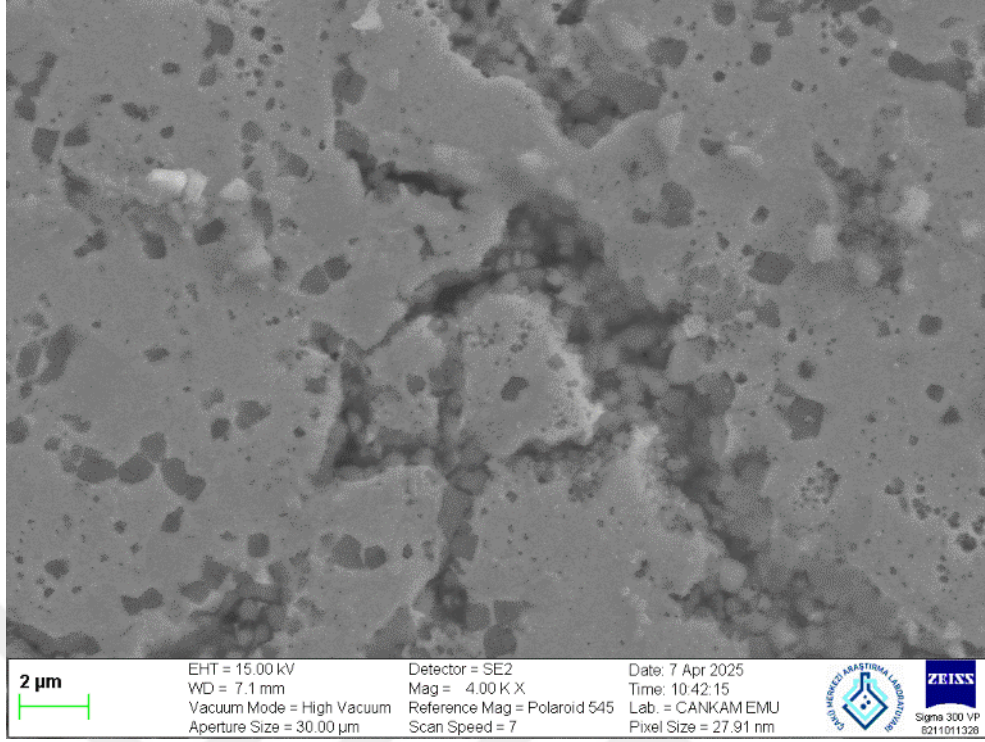


(a)

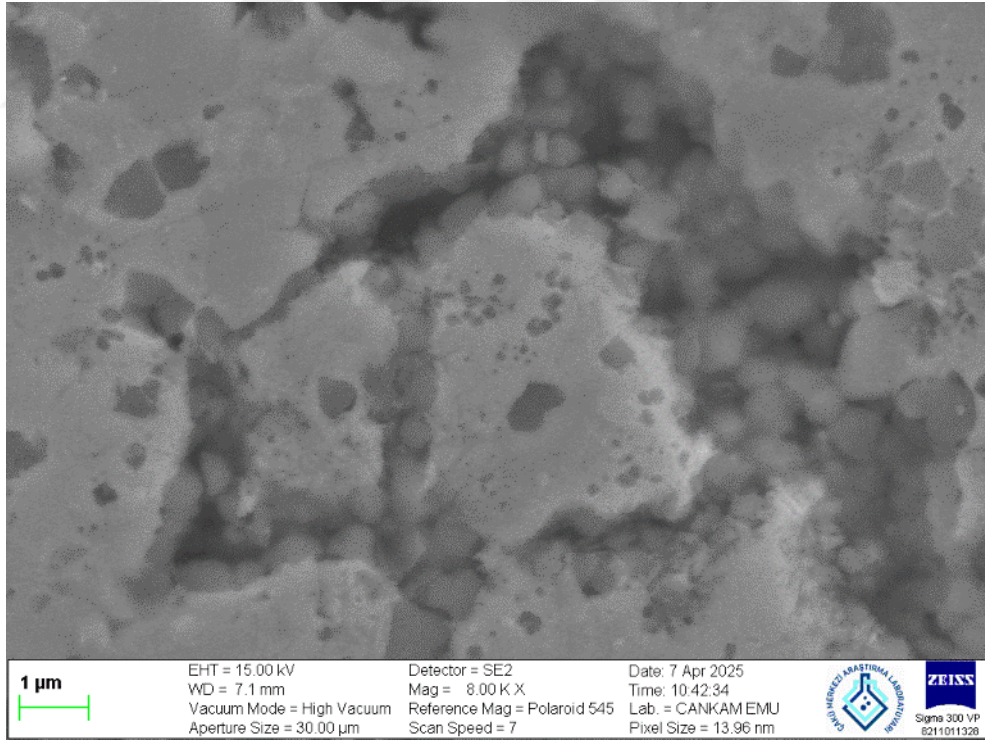


(b)

Şekil 4.2 Alüminyum/ %2,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX



(c)

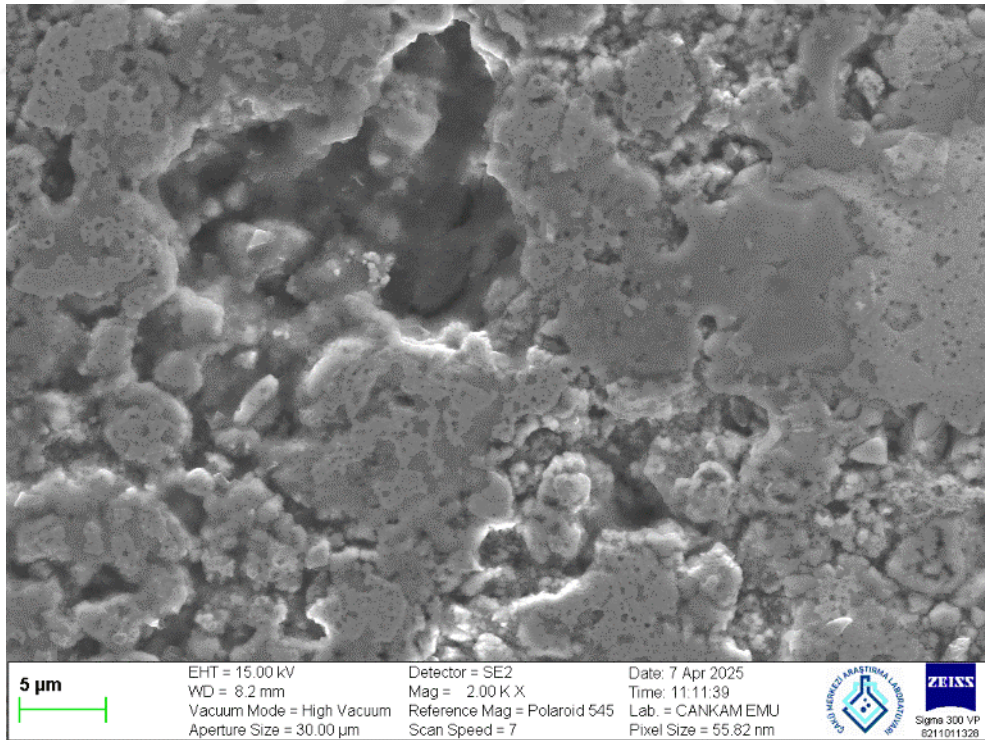


(d)

Şekil 4.2'nin devamı

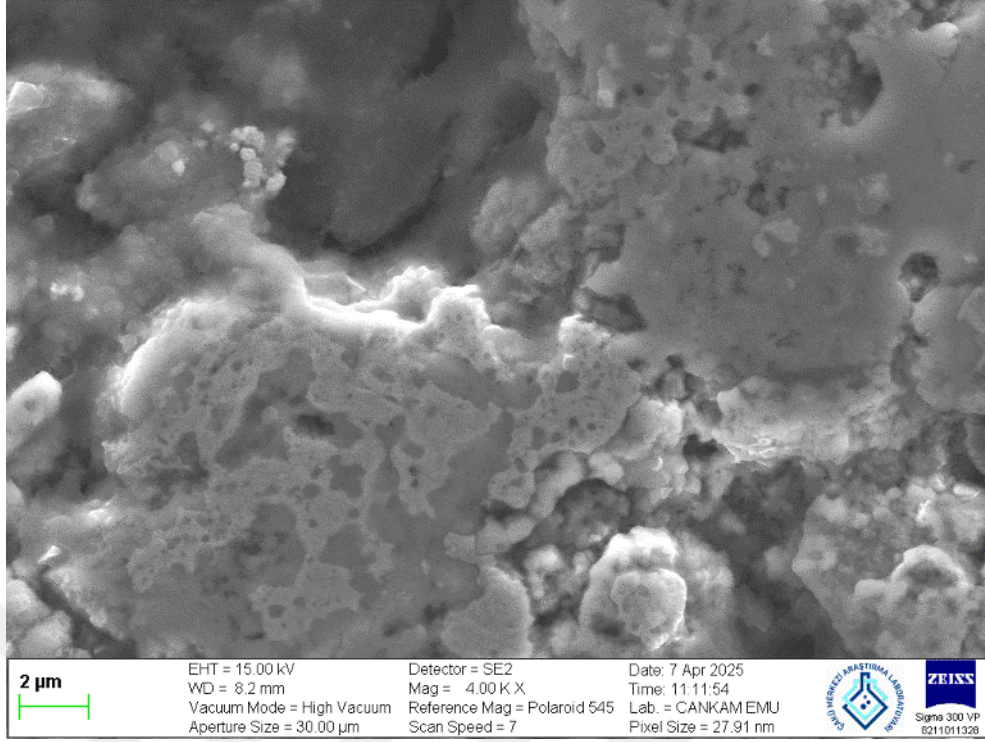


(a)

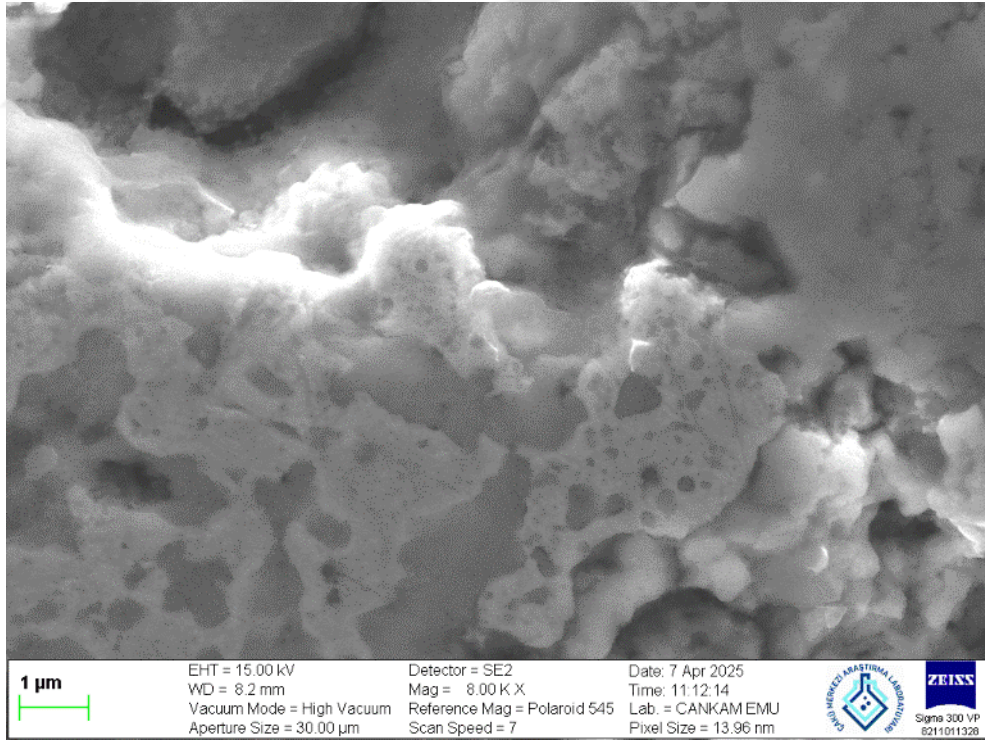


(b)

Şekil 4.3 Alüminyum/ %5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

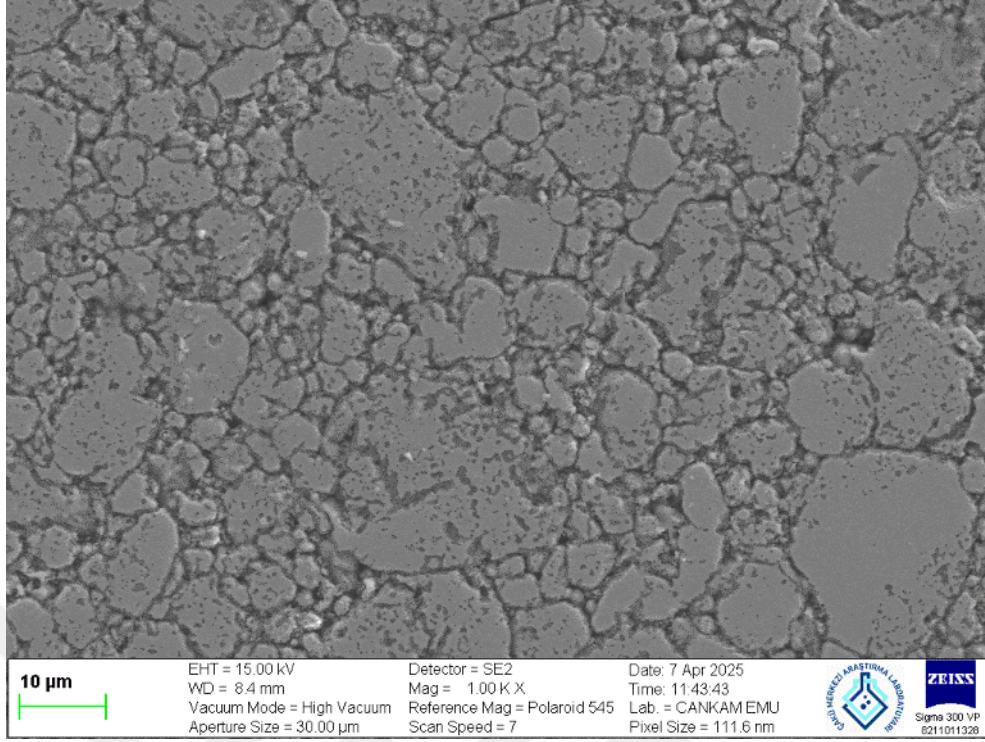


(c)

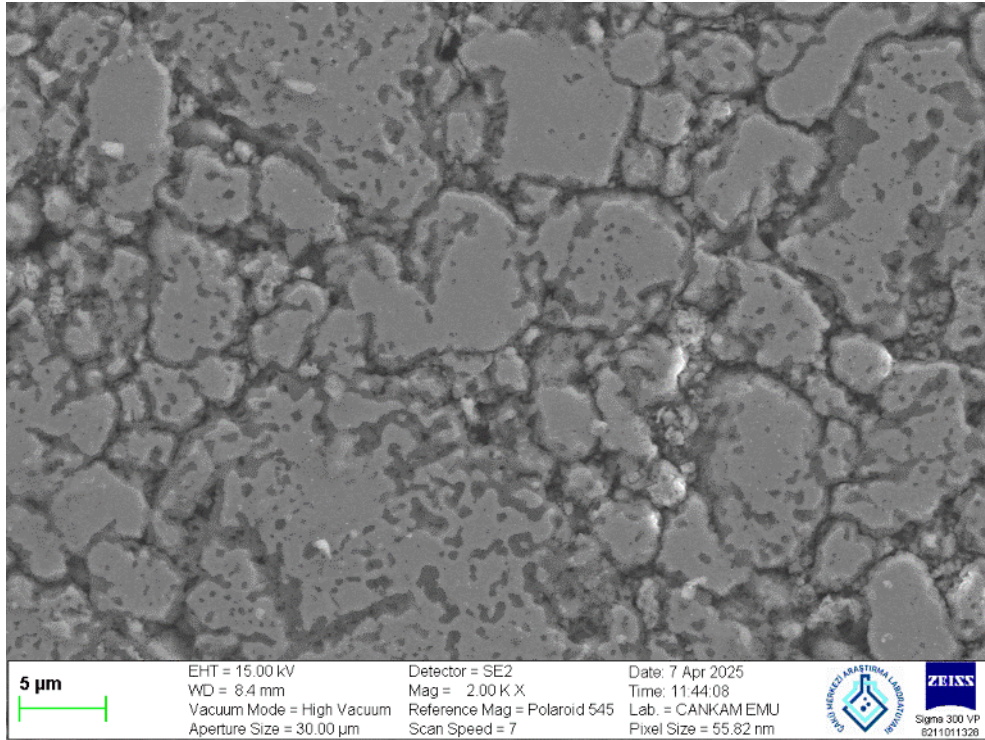


(d)

Şekil 4.3'ün devamı

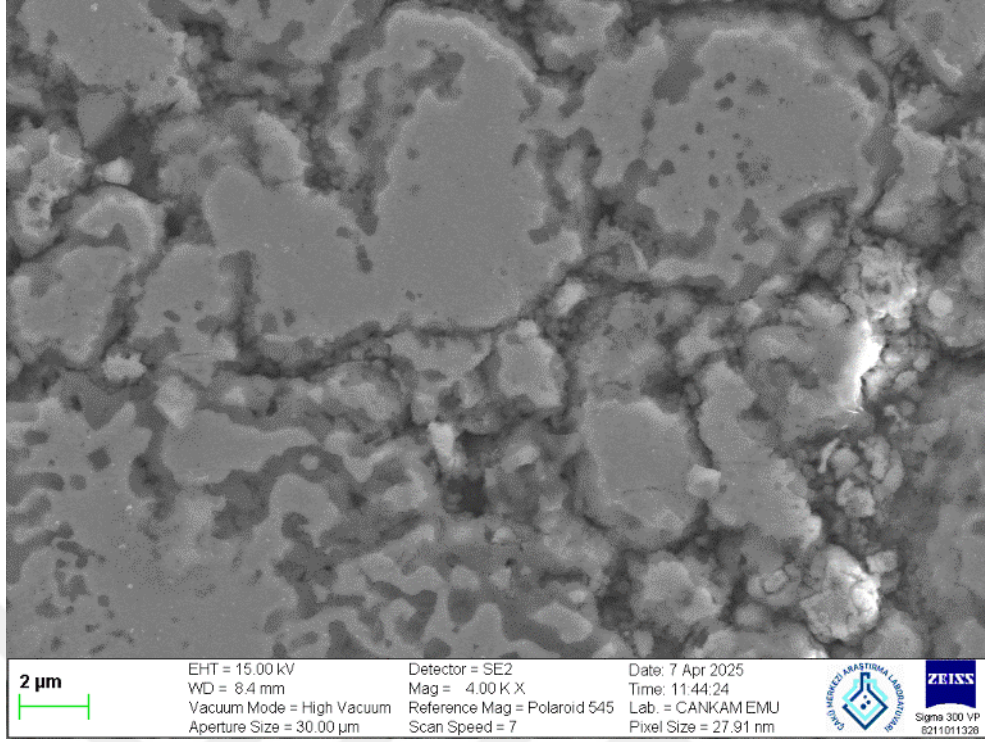


(a)

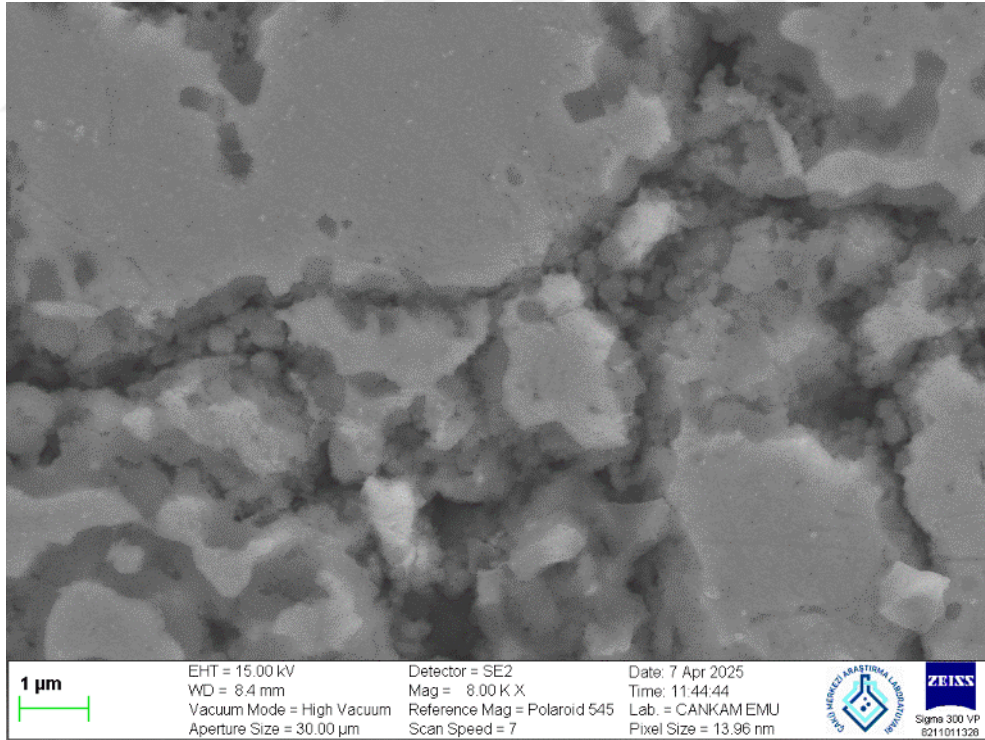


(b)

Şekil 4.4 Alüminyum/ %5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

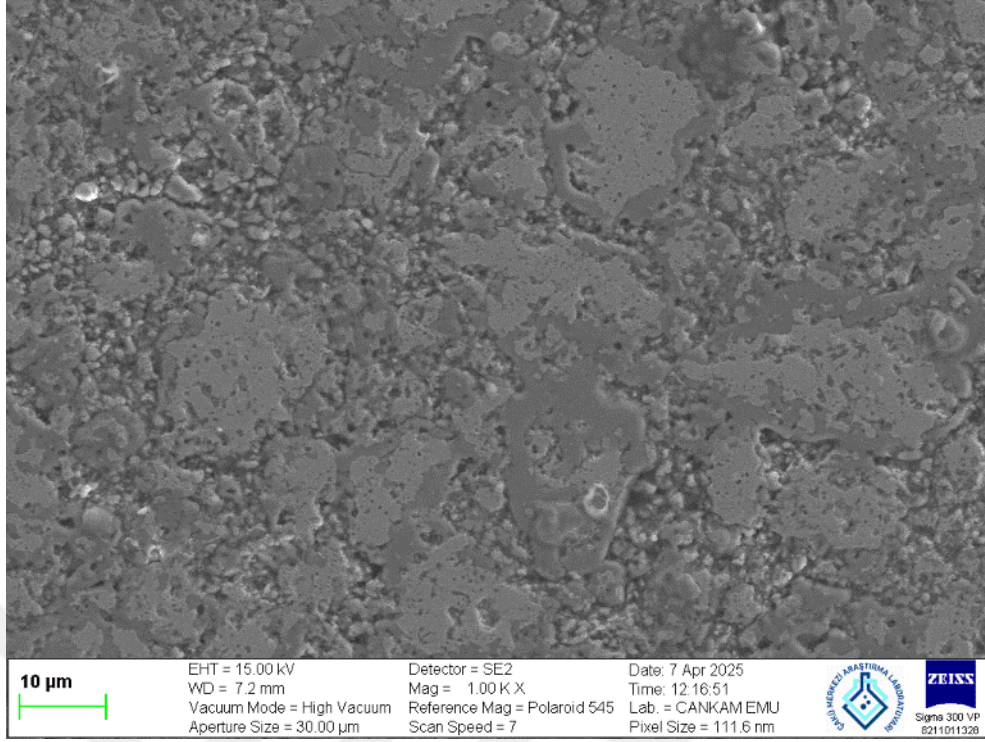


(c)

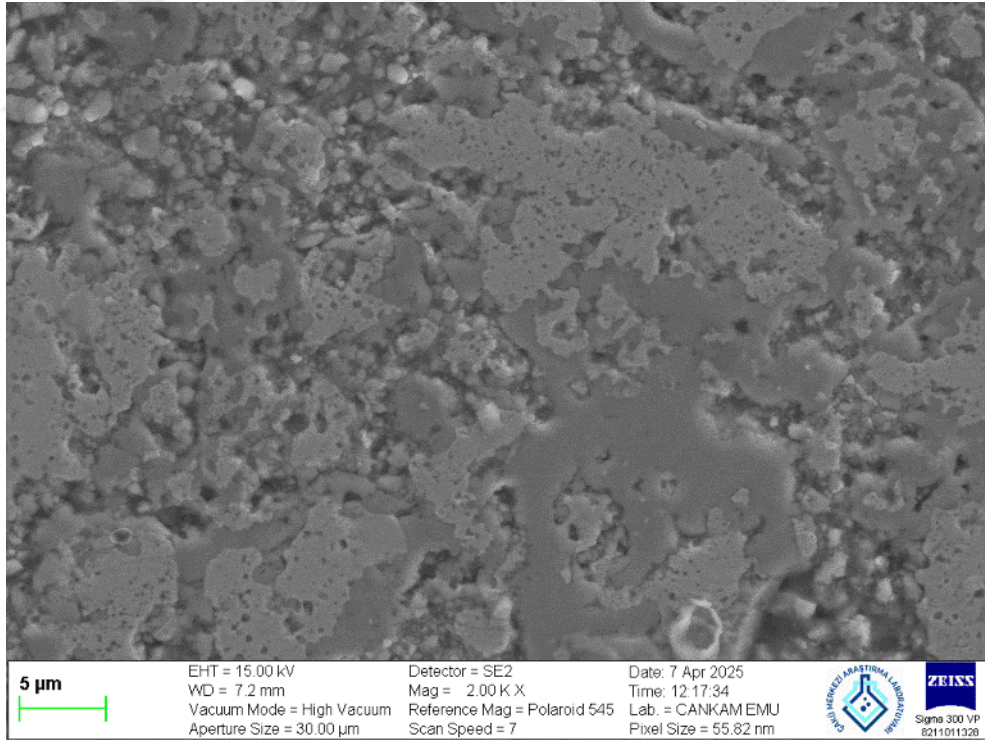


(d)

Şekil 4.4'ün devamı

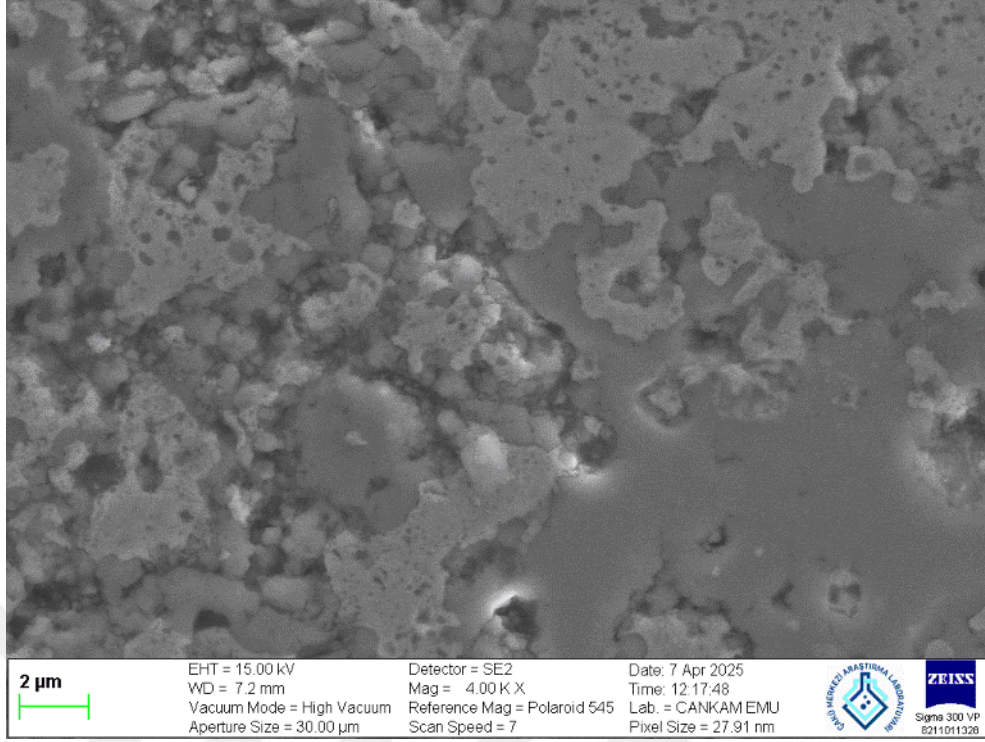


(a)

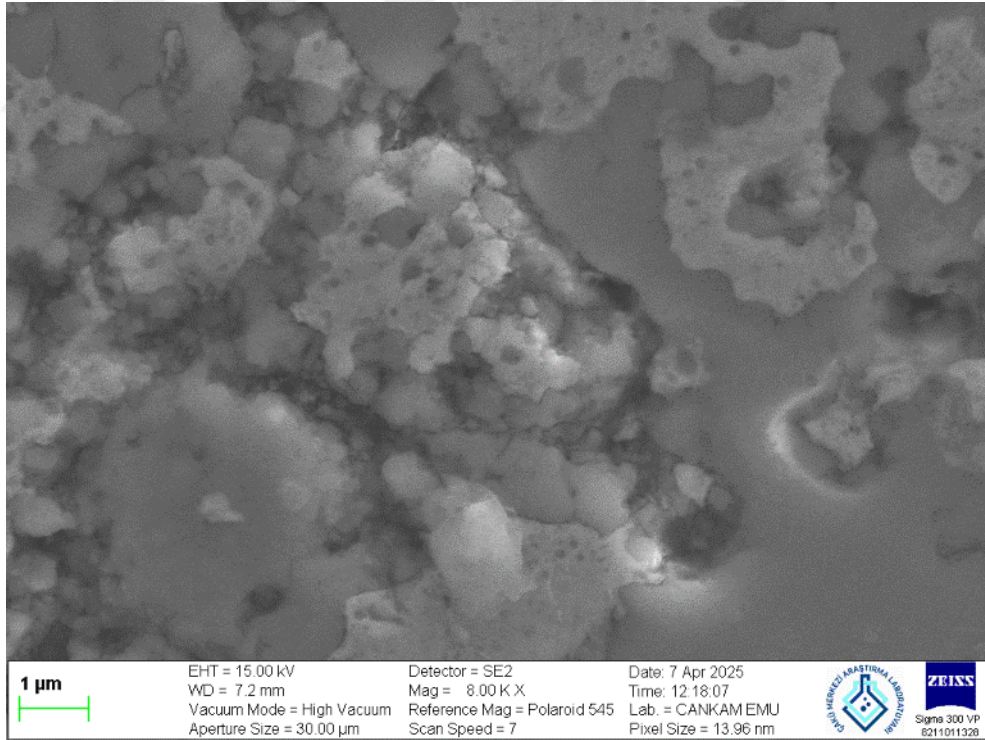


(b)

Şekil 4.5 Alüminyum/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

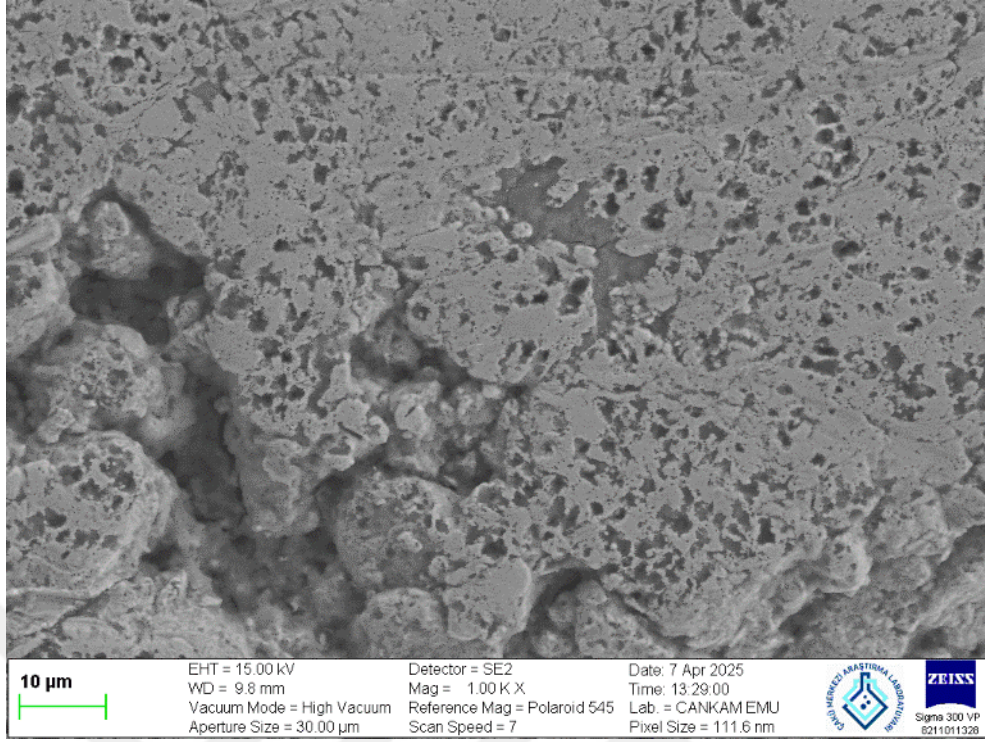


(c)

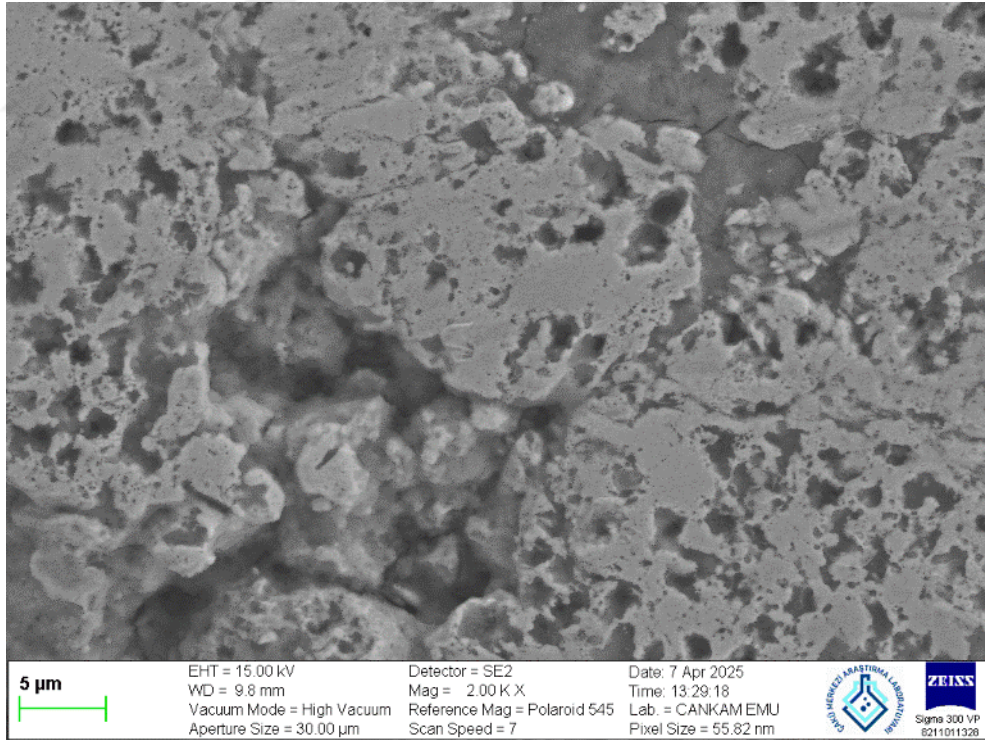


(d)

Şekil 4.5'in devamı

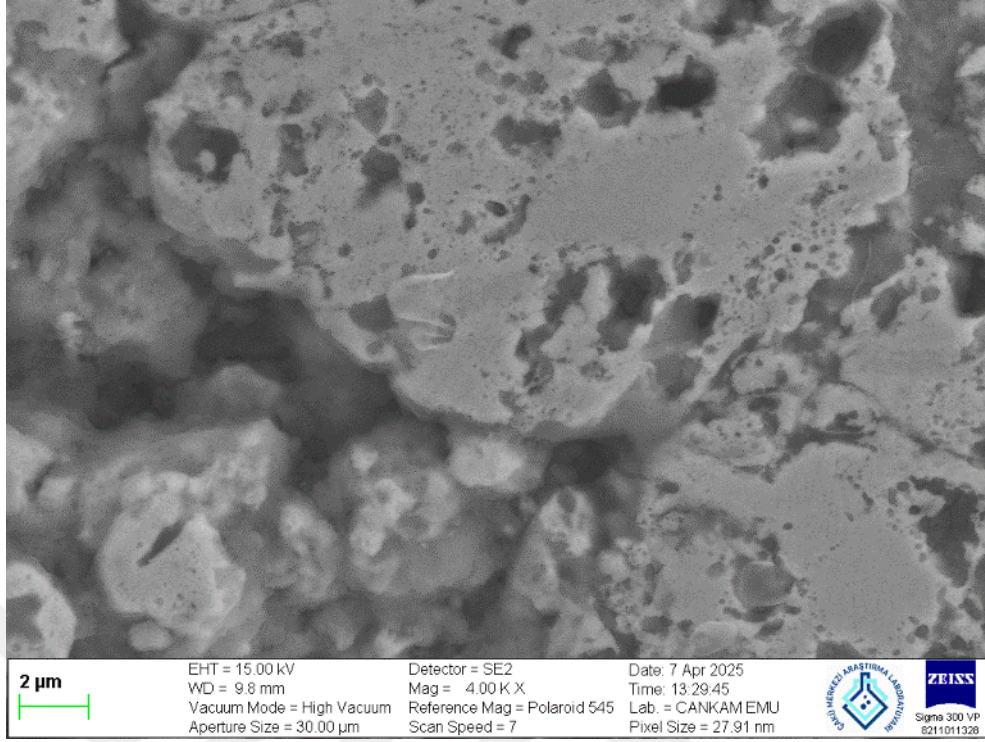


(a)

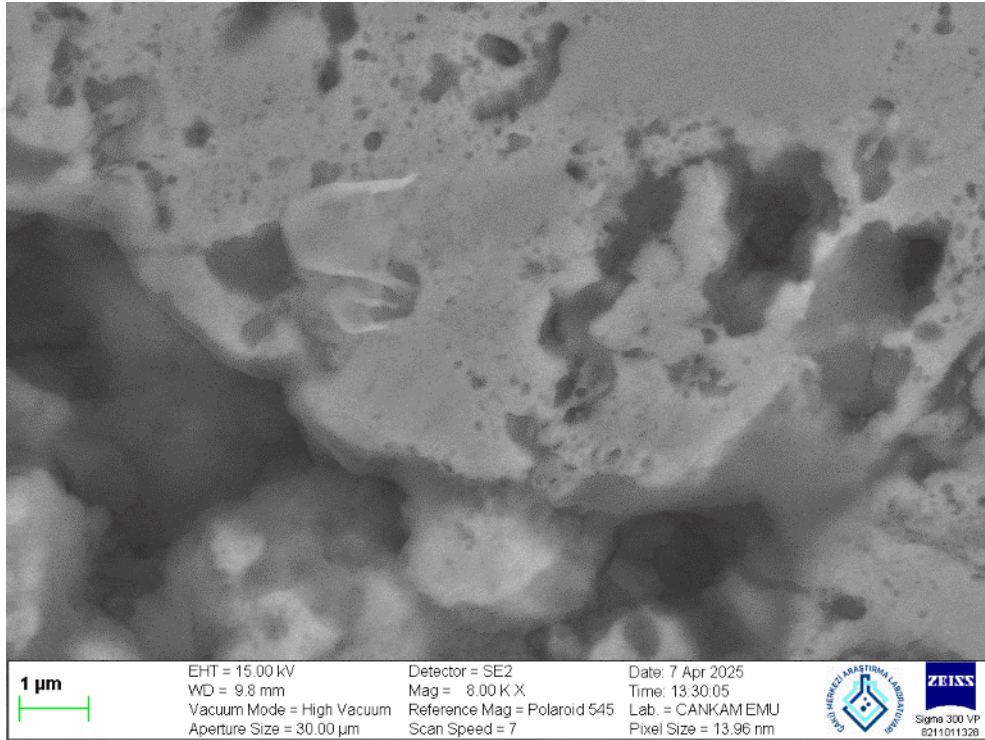


(b)

Şekil 4.6 Alüminyum/ %7,5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX



(c)



(d)

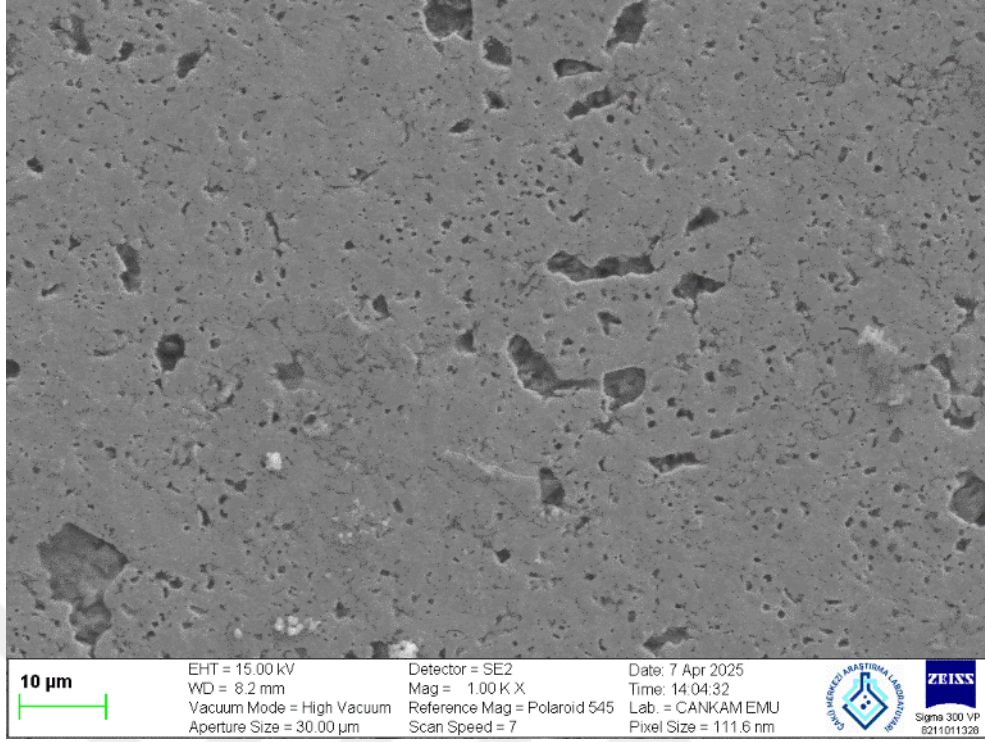
Şekil 4.6'nın devamı

Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4,5 ve Şekil 4.6'da sunulan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri detaylı bir şekilde analiz edildiğinde, incelenen numunelerde iki ayrı fazın veya mikro yapısal bölgenin belirgin bir şekilde ayırt edilebildiği gözlemlenmiştir. Görüntülerde koyu gri tonlarında izlenen alanlar, matris fazını oluşturan yüksek entropili alaşım (YEA) yapısını temsil etmektedir. Buna karşılık, parlak beyaz renkli ve keskin konturlu tanecikler ise numune içerisine takviye amacıyla ilave edilen Alüminyum (Al) fazına karşılık gelmektedir.

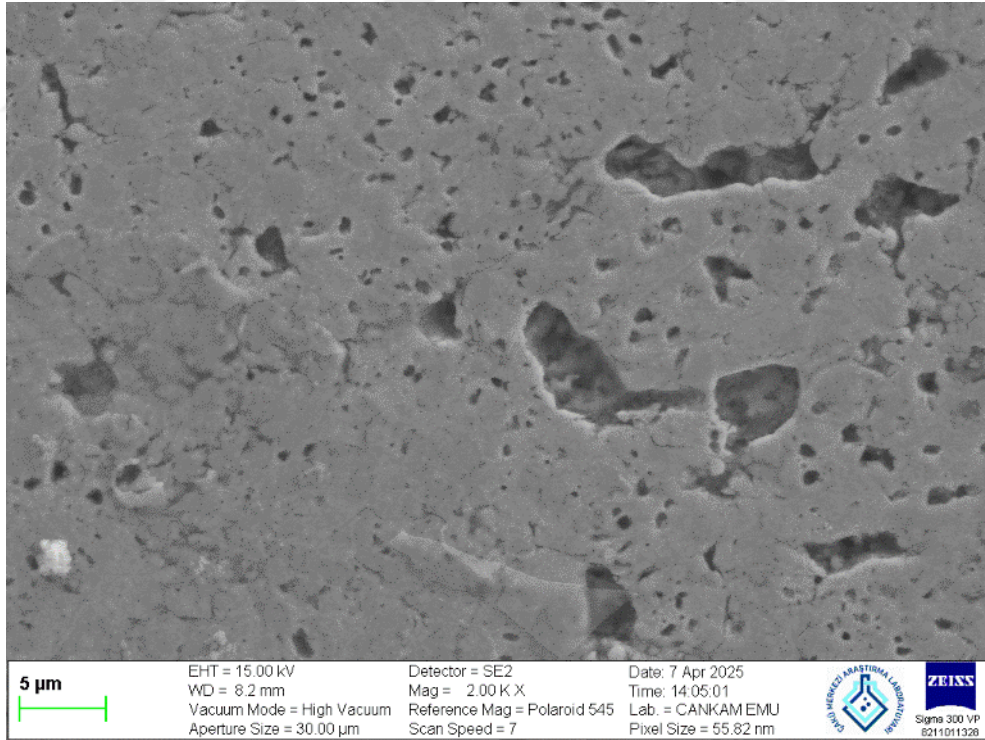
Mikroyapısal gözlemler, Al partiküllerinin matrise genel anlamda homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır. Bu homojen dağılım, kompozit yapının mekanik performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Zira, Al partiküllerinin düzensiz ve yerel yoğunluk farklılıkları oluşturacak şekilde dağılması durumunda, özellikle yük altında çatlak ilerlemesi, gerilim yığılmaları gibi olumsuz etkiler meydana gelebilmekte ve bu durum yüksek entropili alaşımın mekanik dayanımını ciddi biçimde zayıflatabilmektedir.

Özellikle verilen görüntüler dikkatle incelendiğinde, alaşım sistemine ilave edilen Al miktarının artmasıyla birlikte, beyaz renkli Al partiküllerinin hem sayıca arttığı hem de boyutsal olarak büyüme eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, kompozit sistemin mikro yapısal kontrolünün ve üretim parametrelerinin Al içeriğine bağlı olarak optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

1000°C ve 1200°C sıcaklıklarda ve %2,5; 5 ve 7,5 oranlarında Bor ilave edilerek üretilen YEA'ların SEM görüntüleri Şekil 4.7 - 4.12 aralığında verilmiştir.

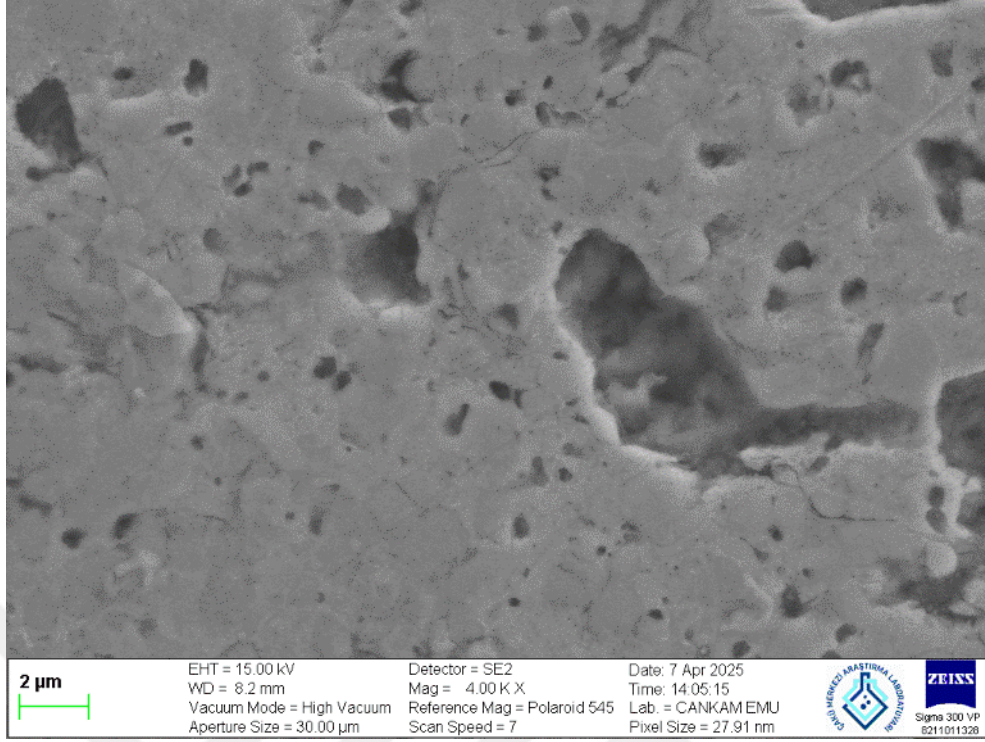


(a)

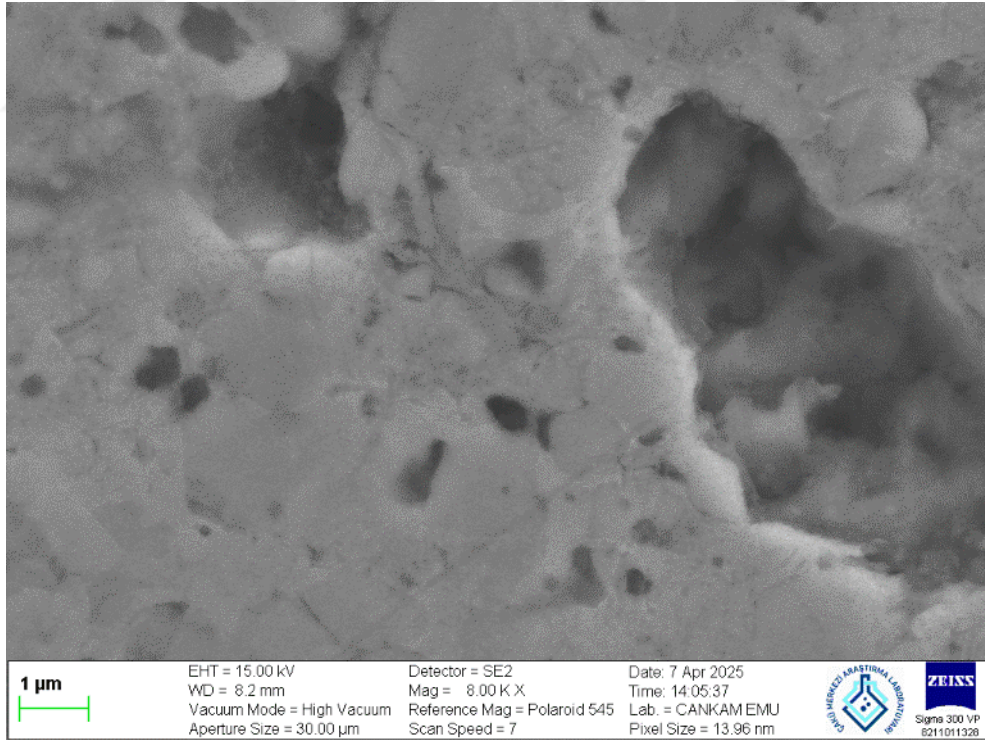


(b)

Şekil 4.7 Bor/ %2,5/1000°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

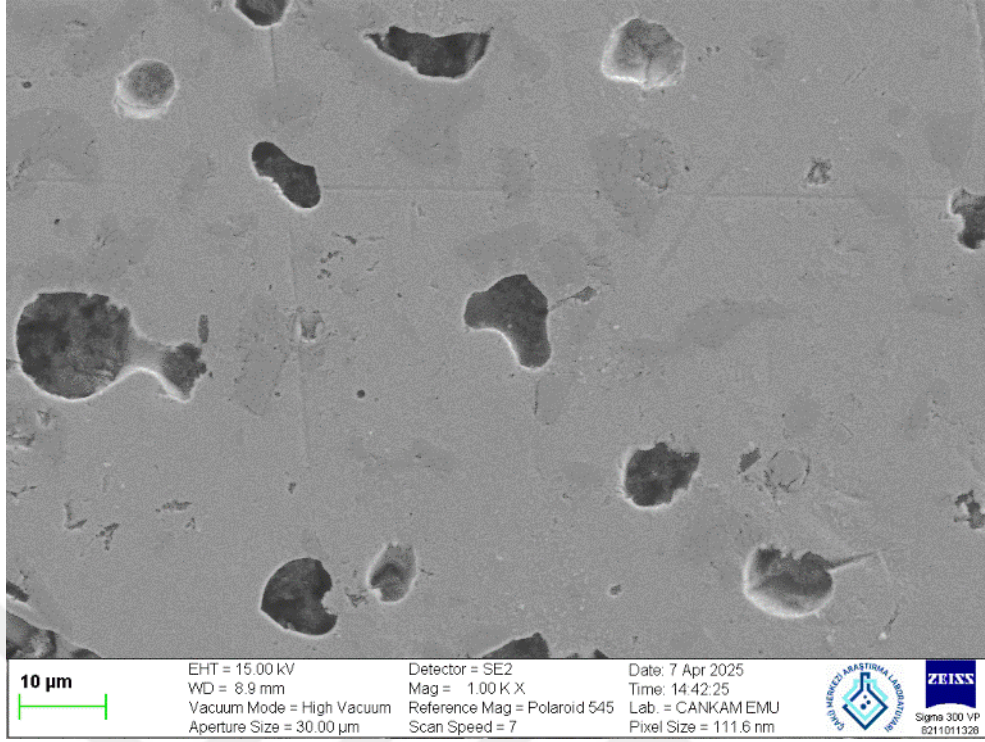


(c)

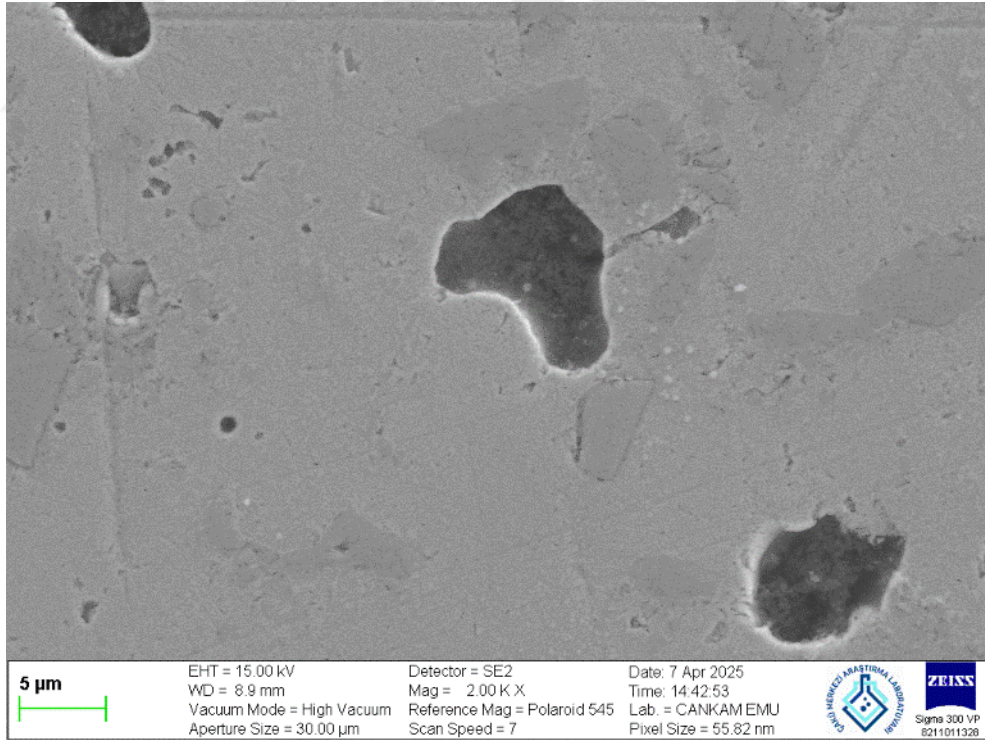


(d)

Şekil 4.7'nin devamı

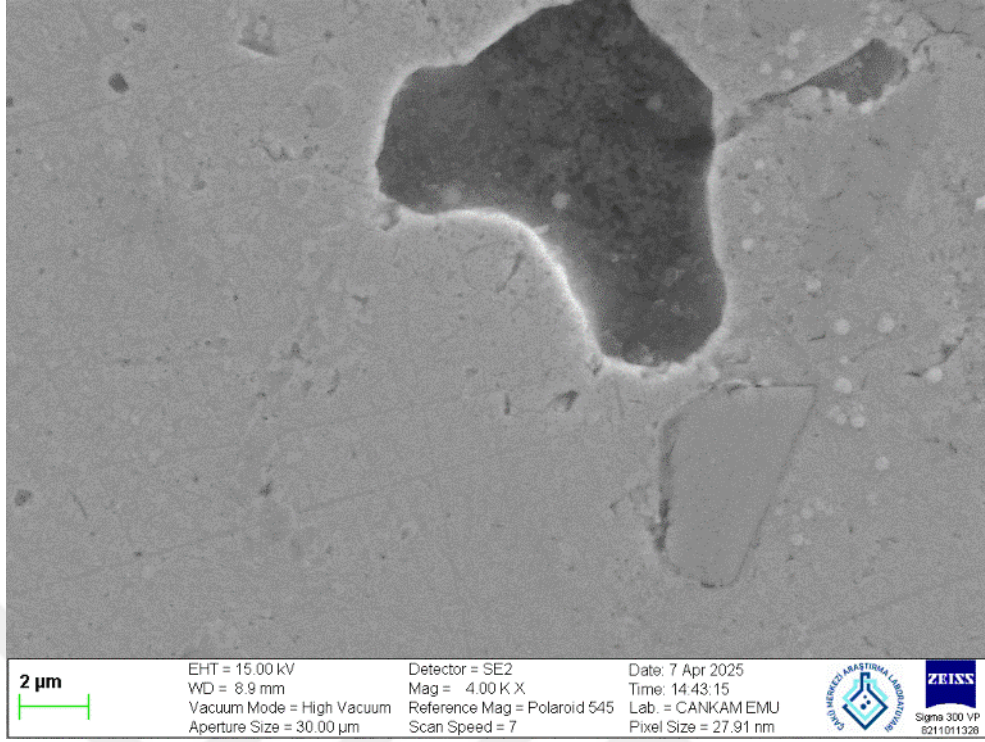


(a)

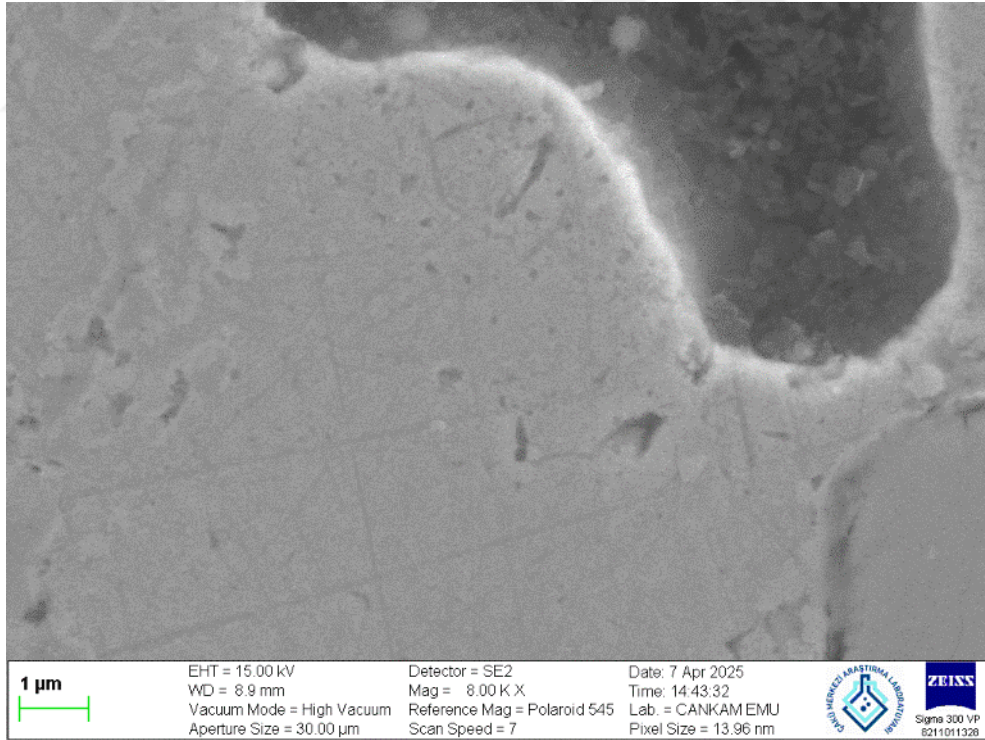


(b)

Şekil 4.8 Bor/ %2,5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

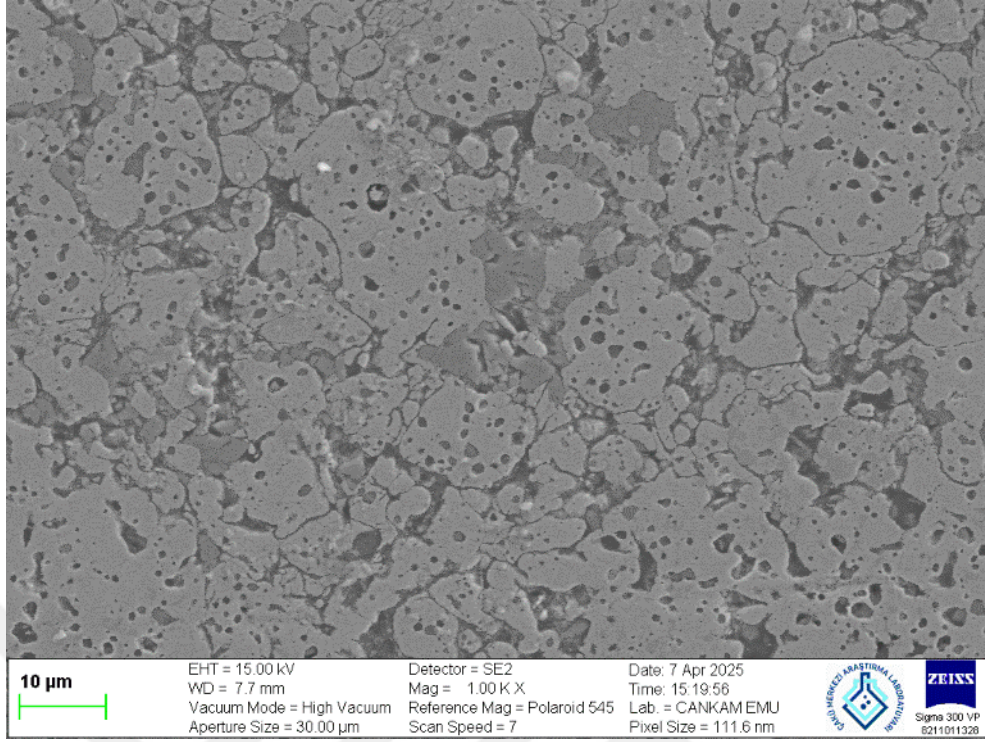


(c)

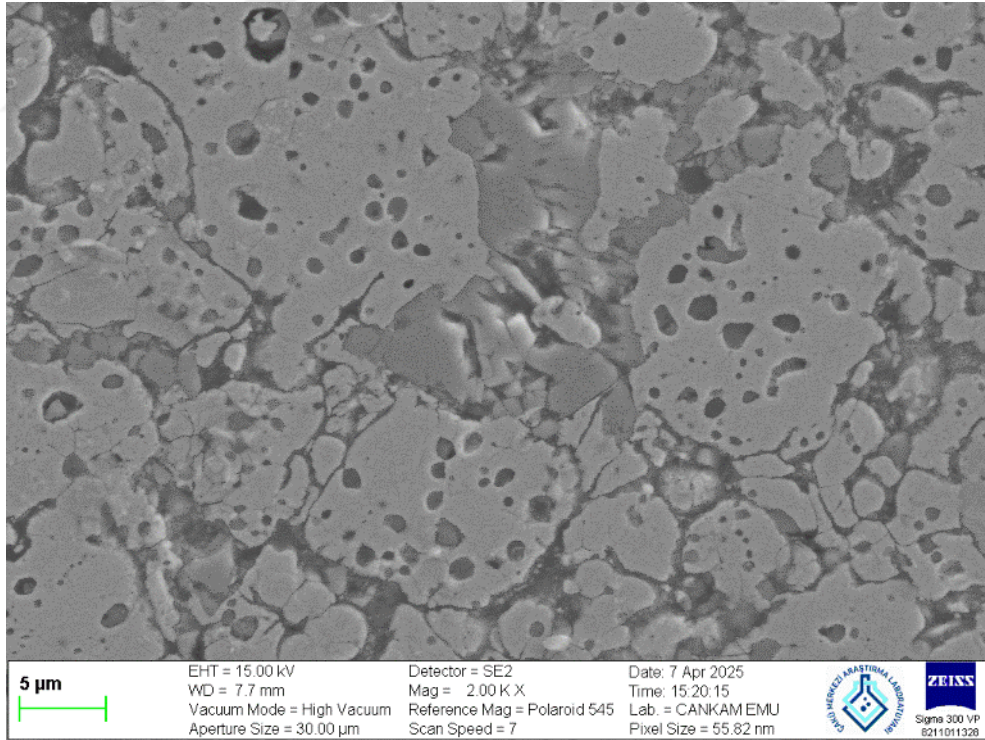


(d)

Şekil 4.8'in devamı

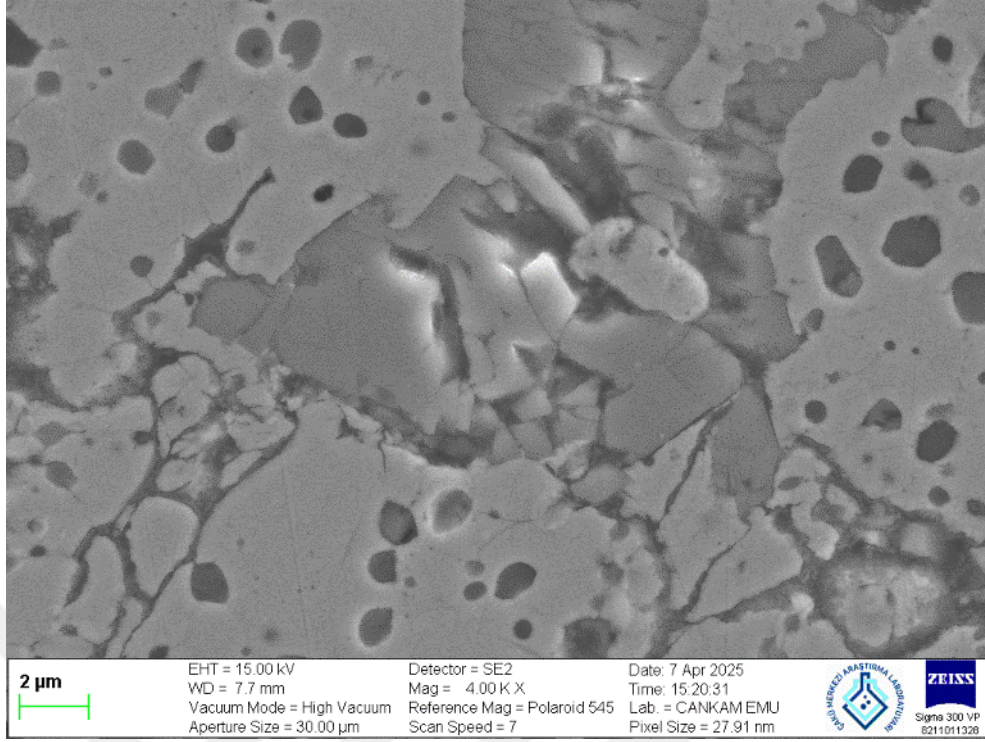


(a)

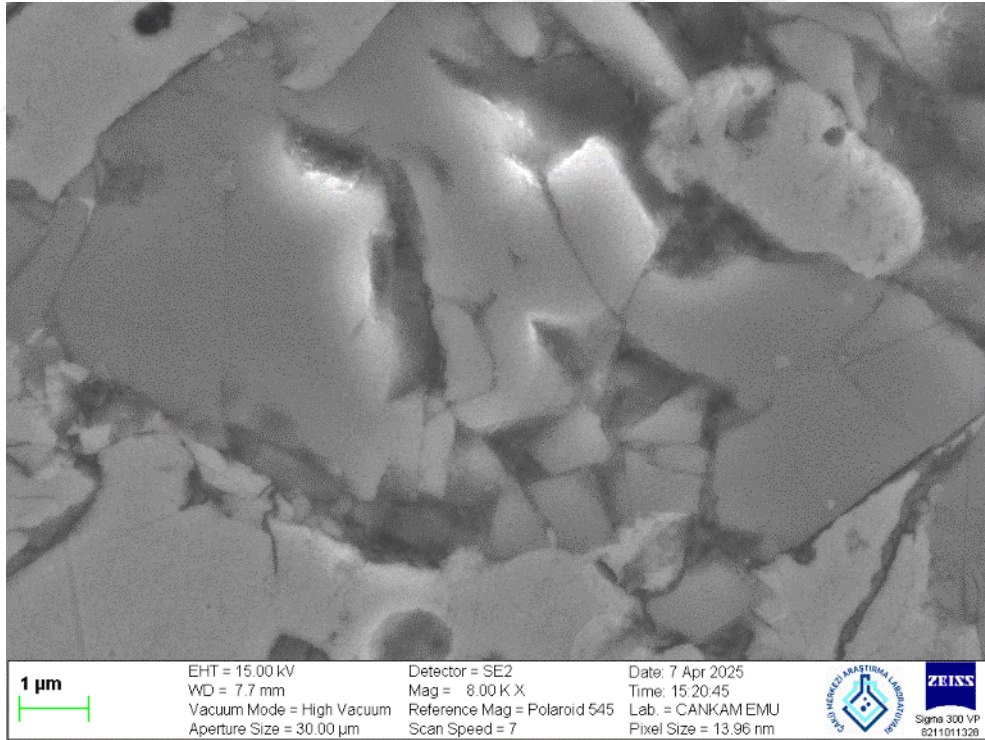


(b)

Şekil 4.9 Bor/ %5/1000°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

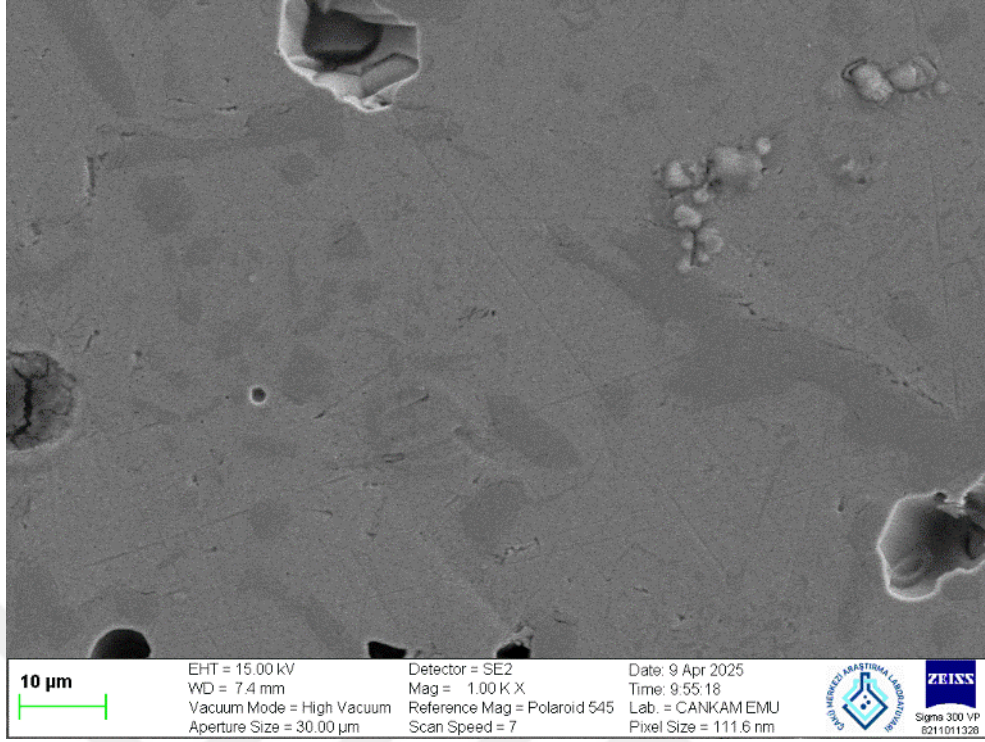


(c)

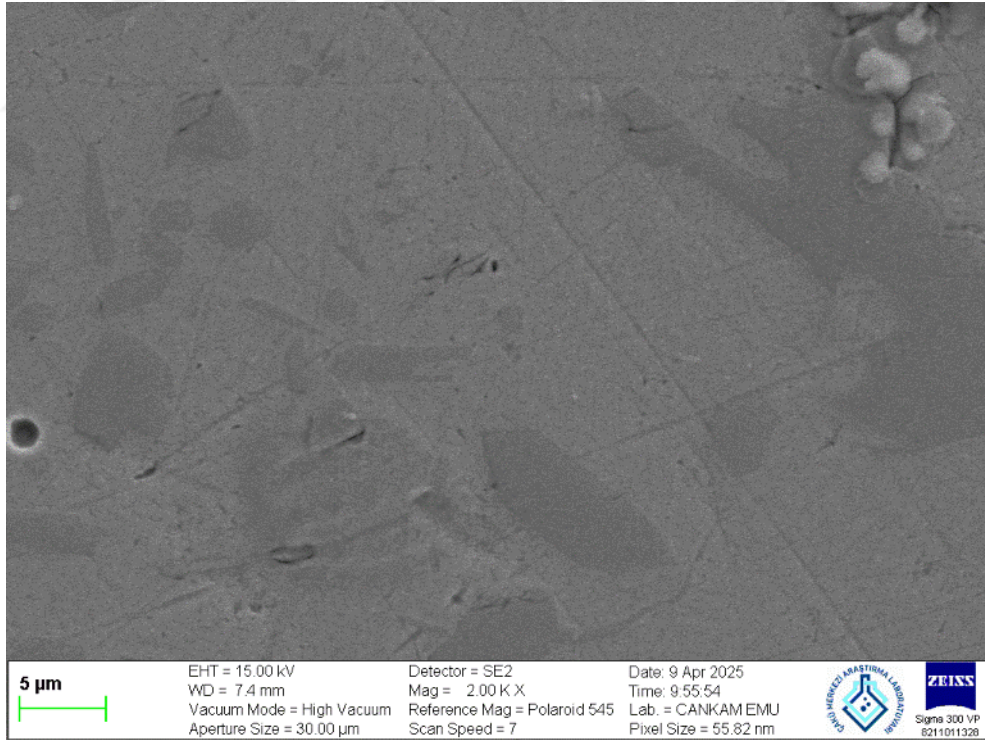


(d)

Şekil 4.9'un devamı

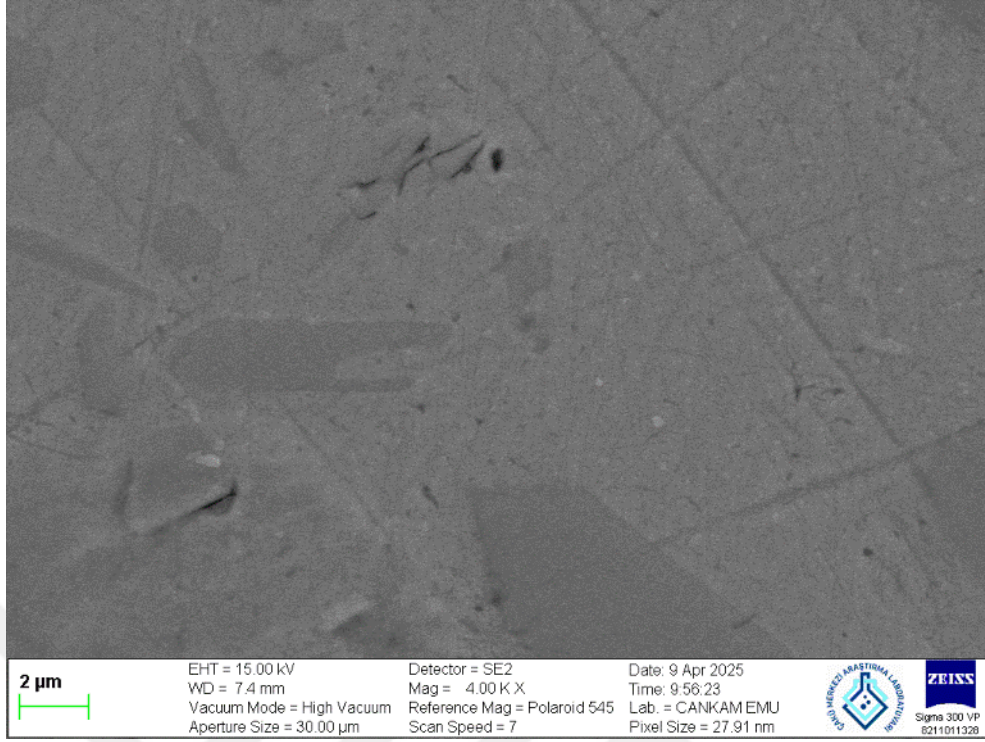


(a)

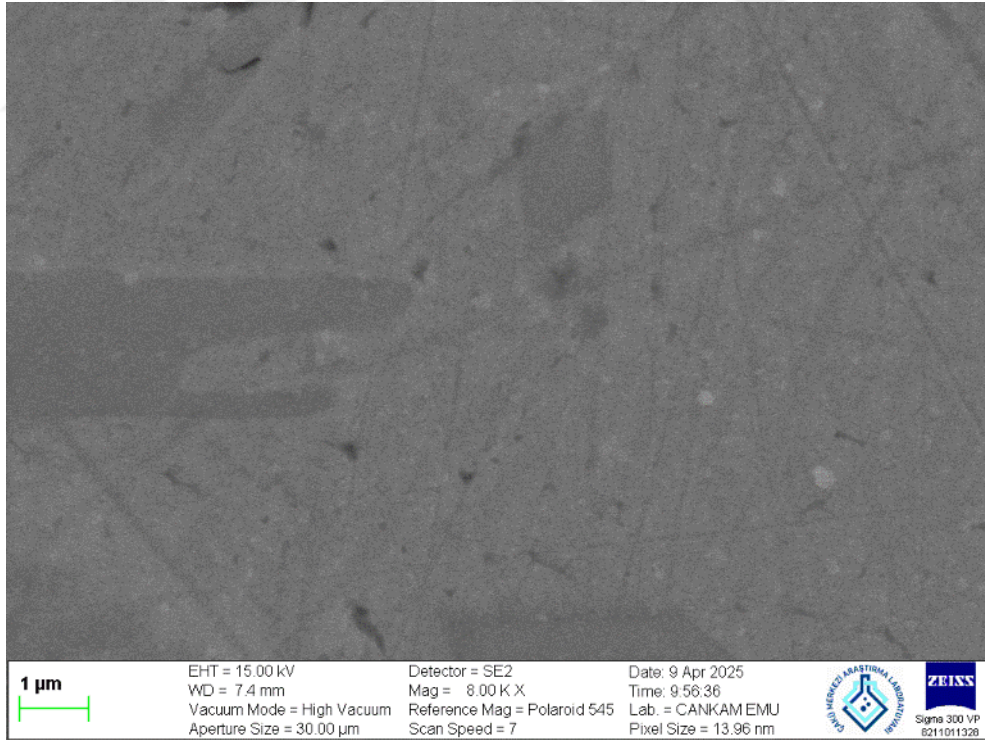


(b)

Şekil 4.10 Bor/ %5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

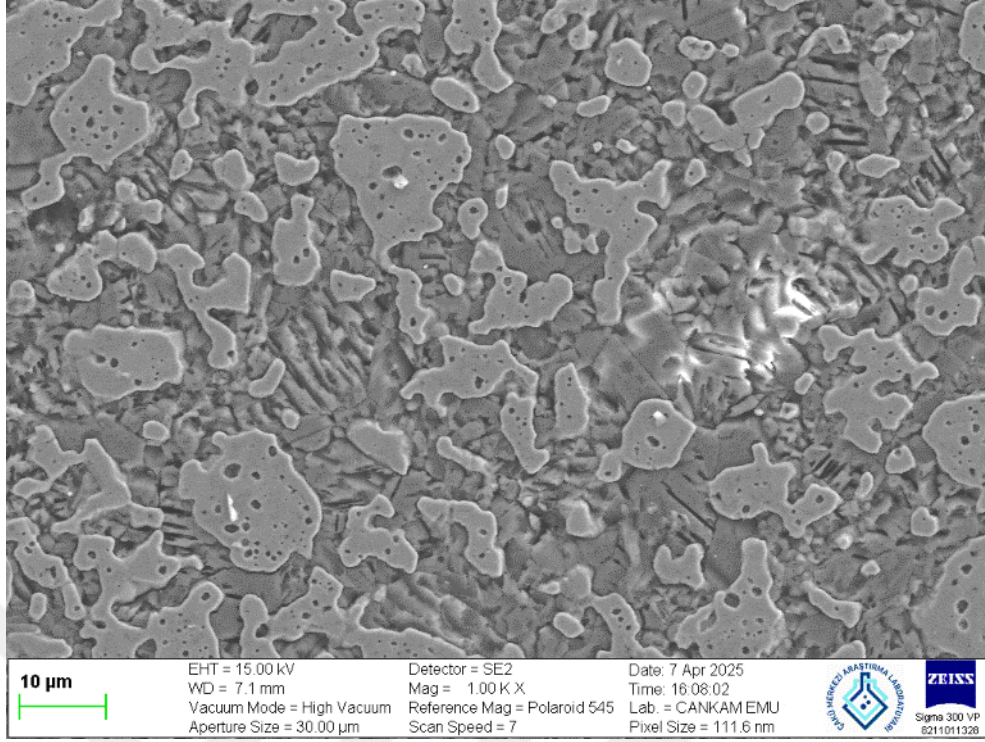


(c)

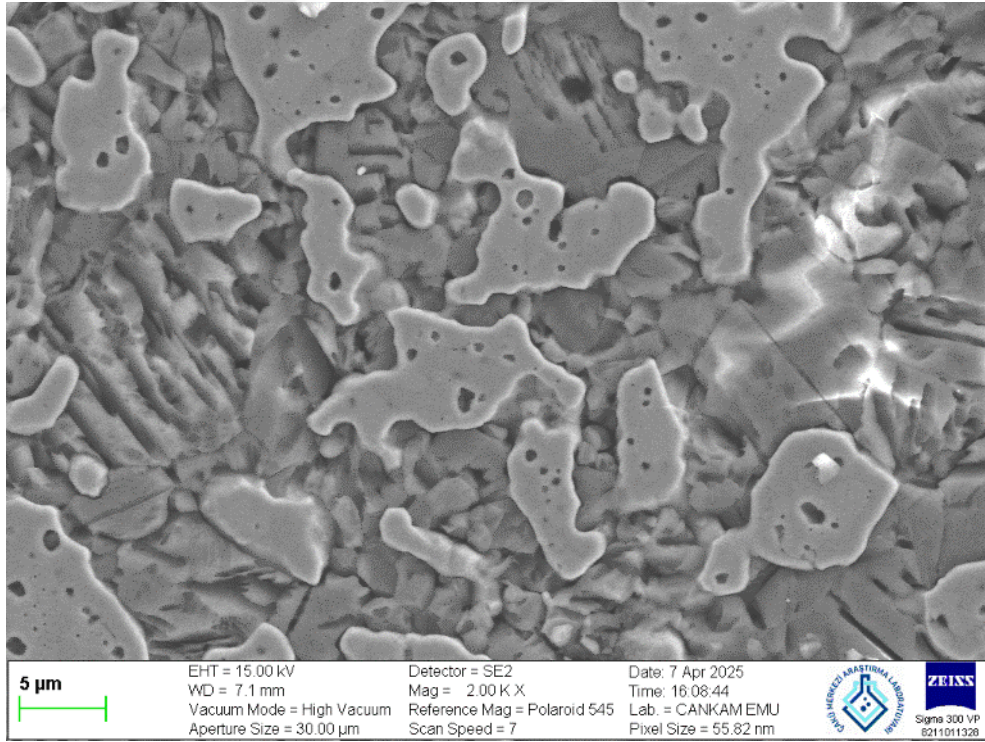


(d)

Şekil 4.10'un devamı

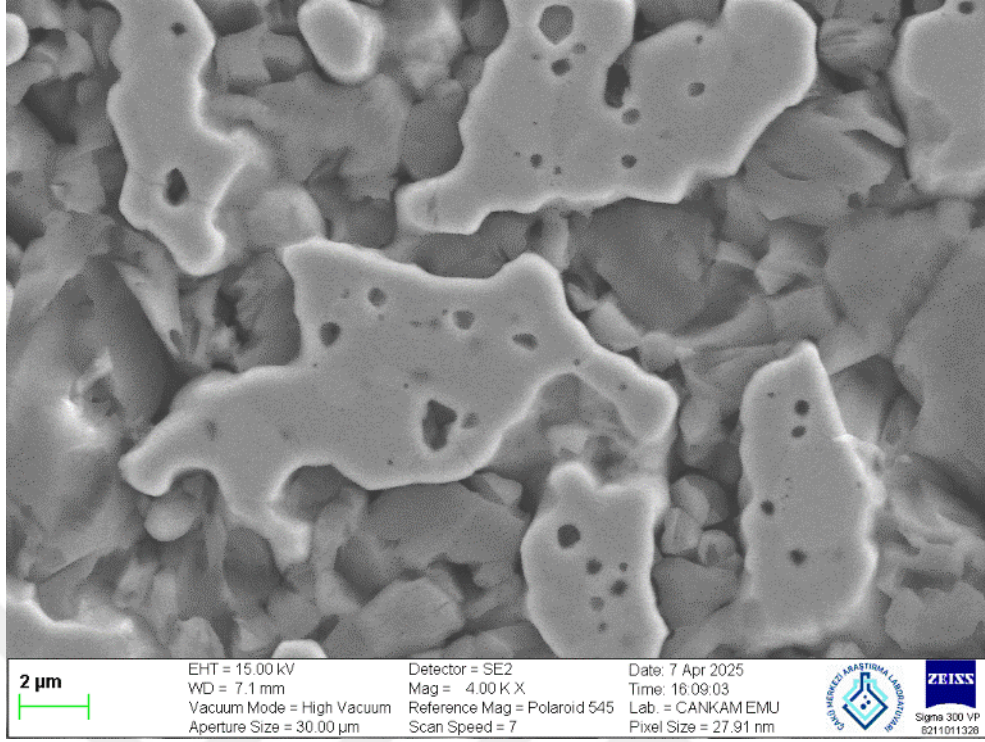


(a)

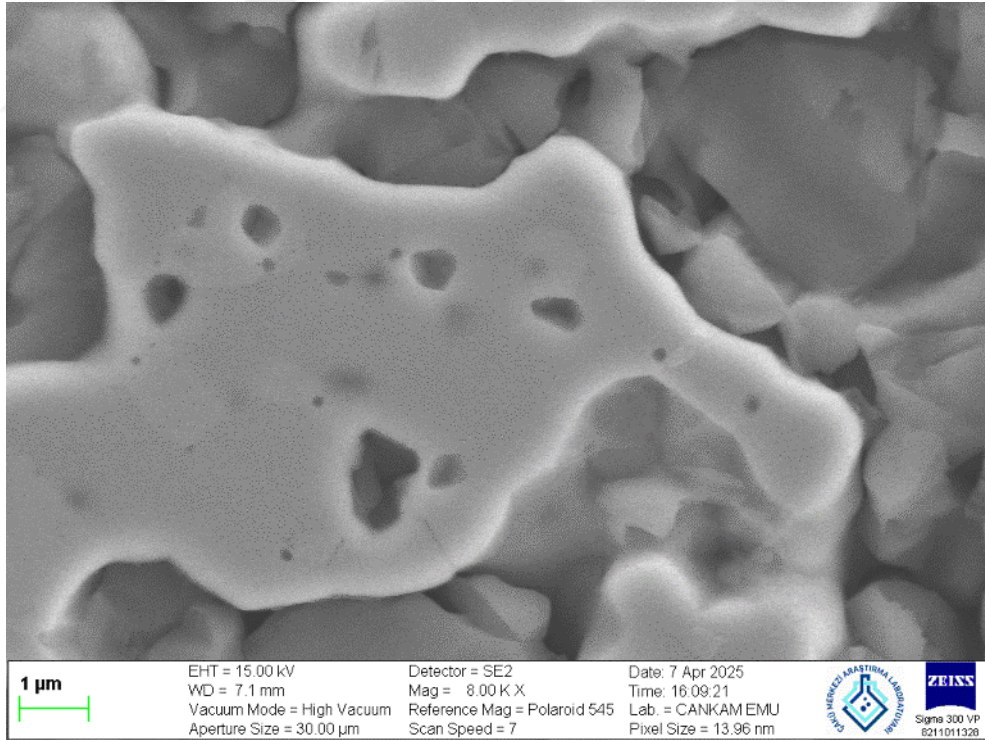


(b)

Şekil 4.11 Bor/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

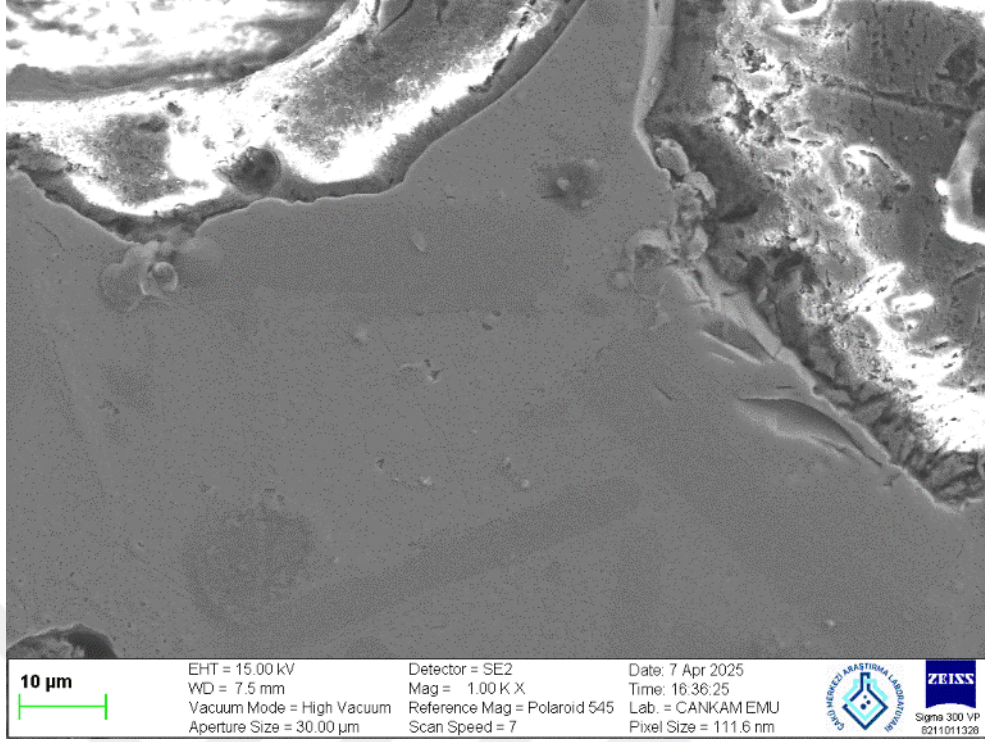


(c)

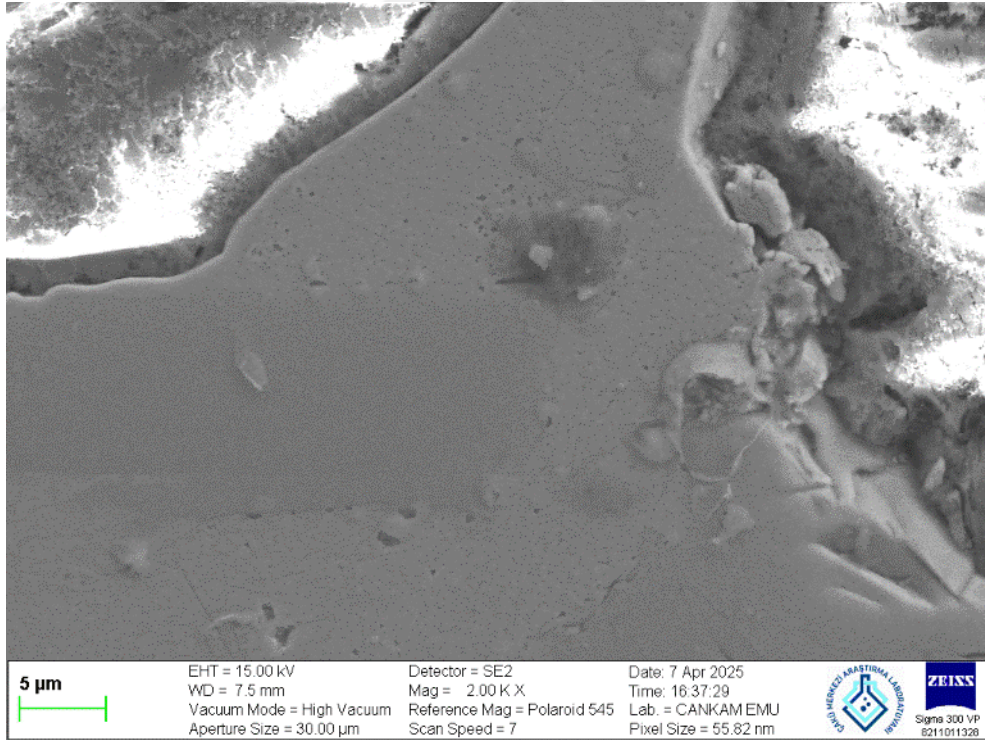


(d)

Şekil 4.11'in devamı



(a)

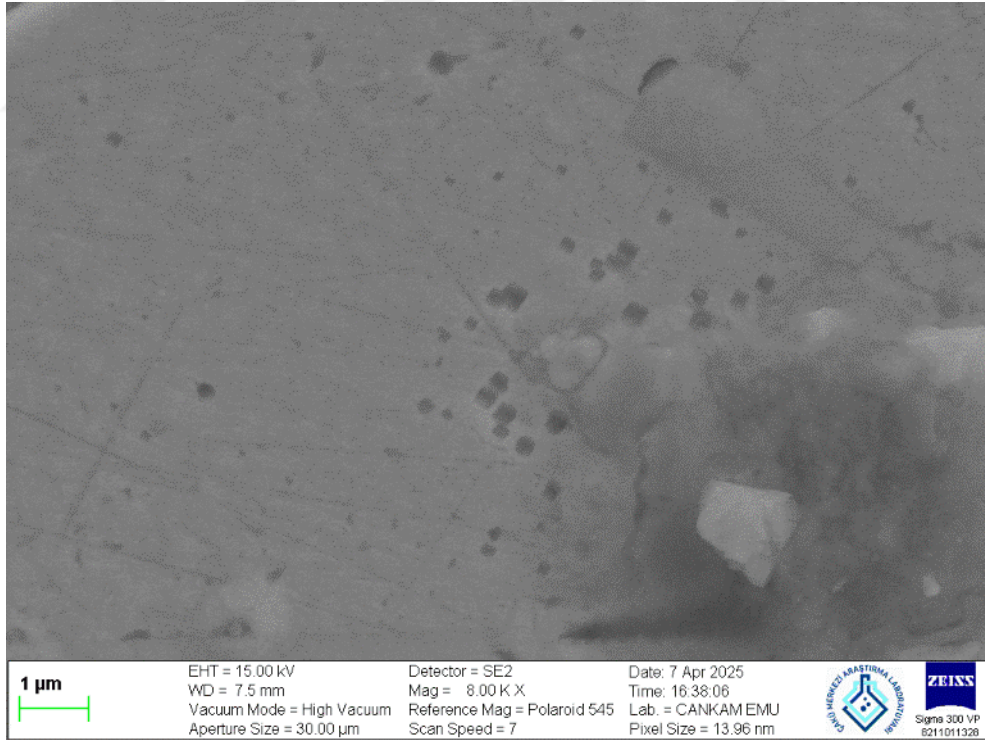


(b)

Şekil 4.12 Bor/ %7,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX



(c)



(d)

Şekil 4.12'nin devamı

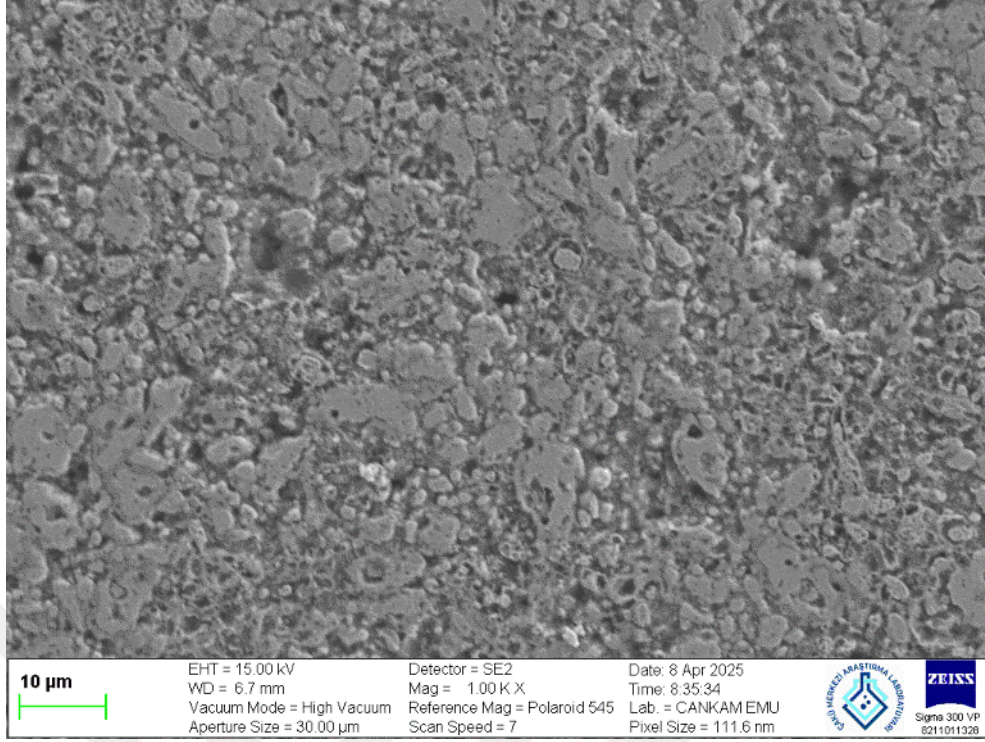
Şekil 4.7 - 4.12 üzerinde gerçekleştirilen detaylı mikroyapısal incelemeler, kompozit sistem içerisine belirli oranlarda eklenen Bor (B) elementinin, alaşım yapısındaki morfolojik etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle B içeriğinin artırılmasıyla birlikte, SEM görüntülerinde beyaz tonlarda gözlemlenen Bor partiküllerinin sayısında belirgin bir artış meydana geldiği, ayrıca bu partiküllerin boyutlarının da büyüme eğilimi gösterdiği net biçimde tespit edilmiştir. Bu gözlem, Bor katkısının sadece niceliksel değil, aynı zamanda niteliksel (boyutsal ve dağılımsal) olarak da mikroyapı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Parçacıkların sayıca çoğalması ve hacimsel büyüme göstermesi, Bor'un YEA matrisinde nükleasyon davranışının termodinamik ve kinetik faktörlere duyarlı olduğunu düşündürmektedir. Bu bağlamda, Bor partiküllerinin büyüme mekanizmasının; difüzyon oranları, yüzey enerjileri, çekirdeklenme sıklığı ve çevresel sinterleme koşulları gibi birçok değişkene bağlı olduğu ifade edilebilir. Özellikle artan B konsantrasyonu, mikro yapıda yeni faz oluşumlarını da tetikleyebileceği gibi, var olan partiküllerin koalesans (birleşme) yoluyla boyutsal olarak büyümesine de zemin hazırlayabilir. Bu durum, hem partikül-matris arayüzeyinde oluşabilecek bağlanma kalitesini hem de kompozit sistemin genel dayanım özelliklerini doğrudan etkileyebilir.

Ayrıca, büyüyen partiküller ile YEA matrisi arasındaki boyut uyumsuzluğu, gerilim birikimlerinin ve mikro çatlak başlangıç noktalarının oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, mikroyapıda gözlemlenen boyutsal farklılıkların yalnızca mikroskopik düzeyde değil, aynı zamanda makroskobik mekanik performans açısından da önemli etkileri bulunmaktadır. Özellikle toz metalurjisiyle elde edilen kompozit yapılar söz konusu olduğunda, sinterleme sıcaklığı, bekleme süresi ve basınç gibi parametrelerin Bor içeriğine göre özel olarak optimize edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, yapılan mikroyapısal analizlerin sunduğu veriler, üretim sürecine dair çeşitli optimizasyon gerekliliklerini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle katkı oranının dikkatli biçimde belirlenmesi hem faz dağılımının kontrolü hem de partikül büyümesinin istenilen düzeyde tutulması açısından kritik rol oynamaktadır. Uygun sinterleme koşulları altında Bor içeriğinin optimize edilmesi, sadece mekanik özelliklerin iyileştirilmesine değil, aynı zamanda faz kararlılığının ve mikro yapısal homojenliğin sağlanmasına da katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, Bor katkılı YEA

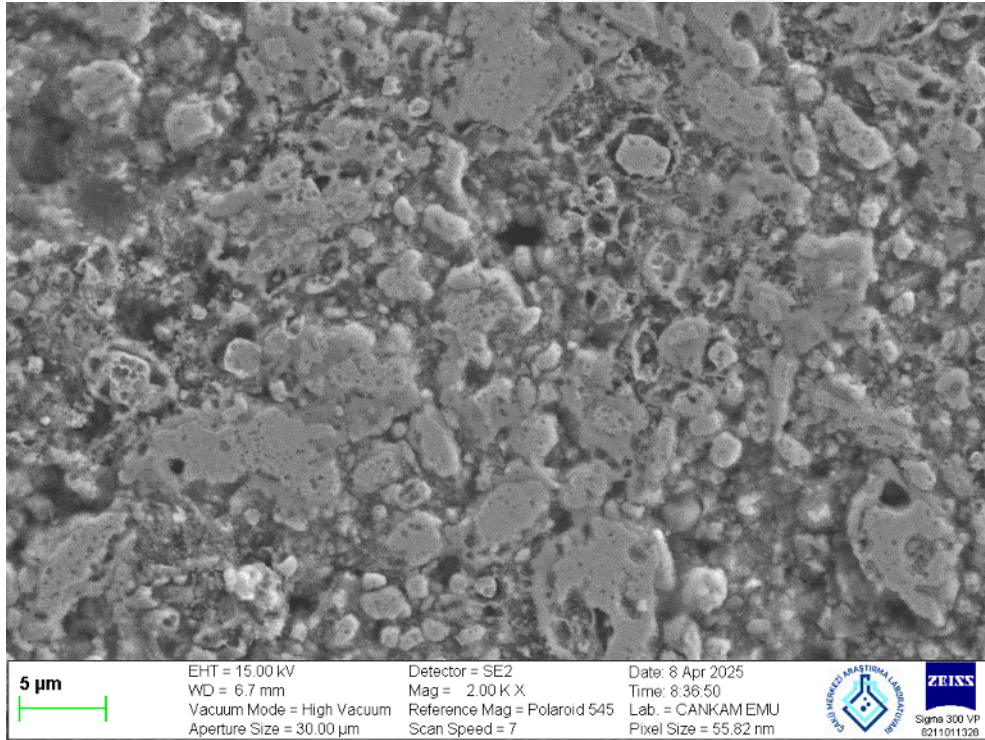
kompozitlerinin mühendislik uygulamalarında kullanılabilişliğini artırmak için üretim parametrelerinin sistematik şekilde kontrol altına alınması gerekmektedir.

1000°C ve 1200°C sıcaklıklarda ve % 2,5; 5 ve 7,5 oranlarında Karbon ilave edilerek üretilen YEA'ların SEM görüntüleri şekil 4.13 -4.18 aralığında verilmiştir.



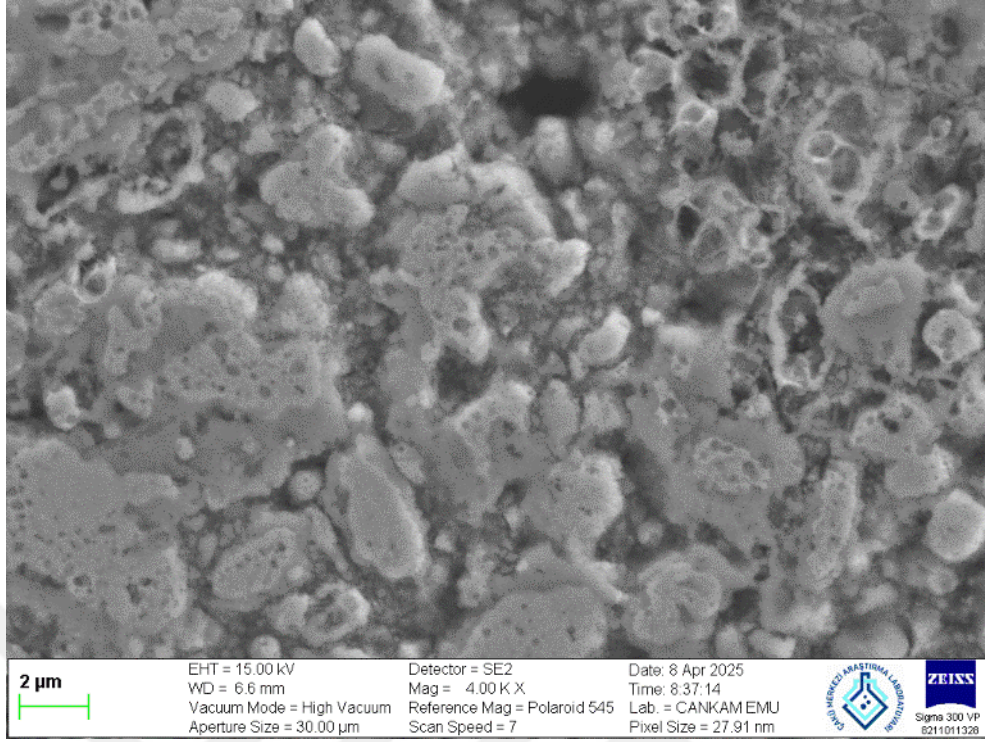


(a)

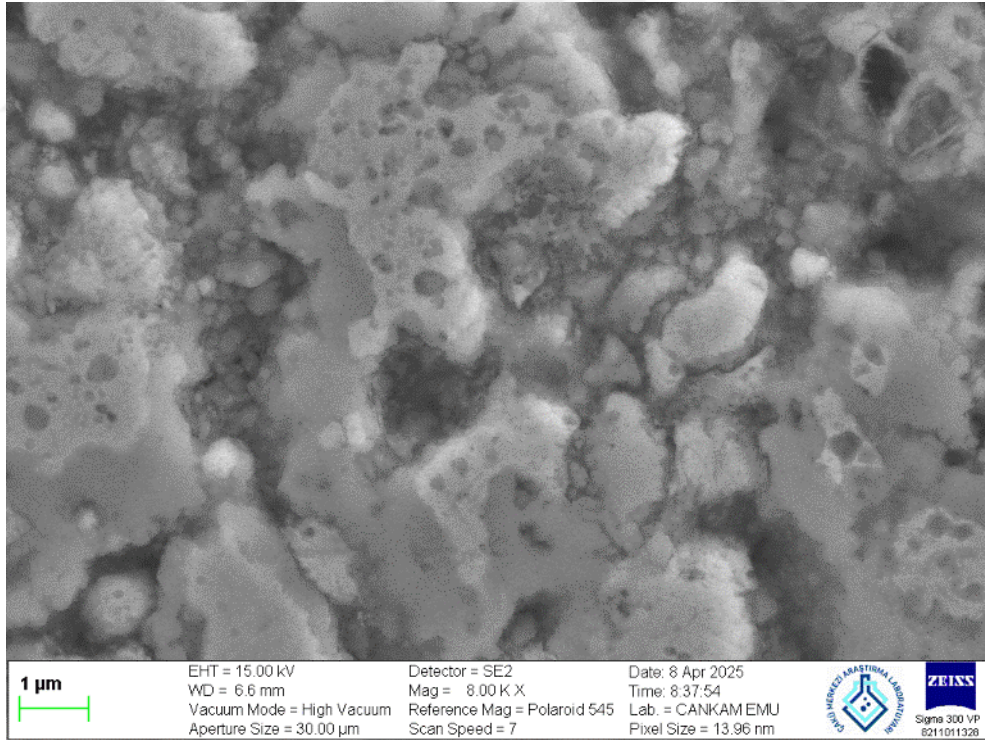


(b)

Şekil 4.13 Karbon/ %2,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

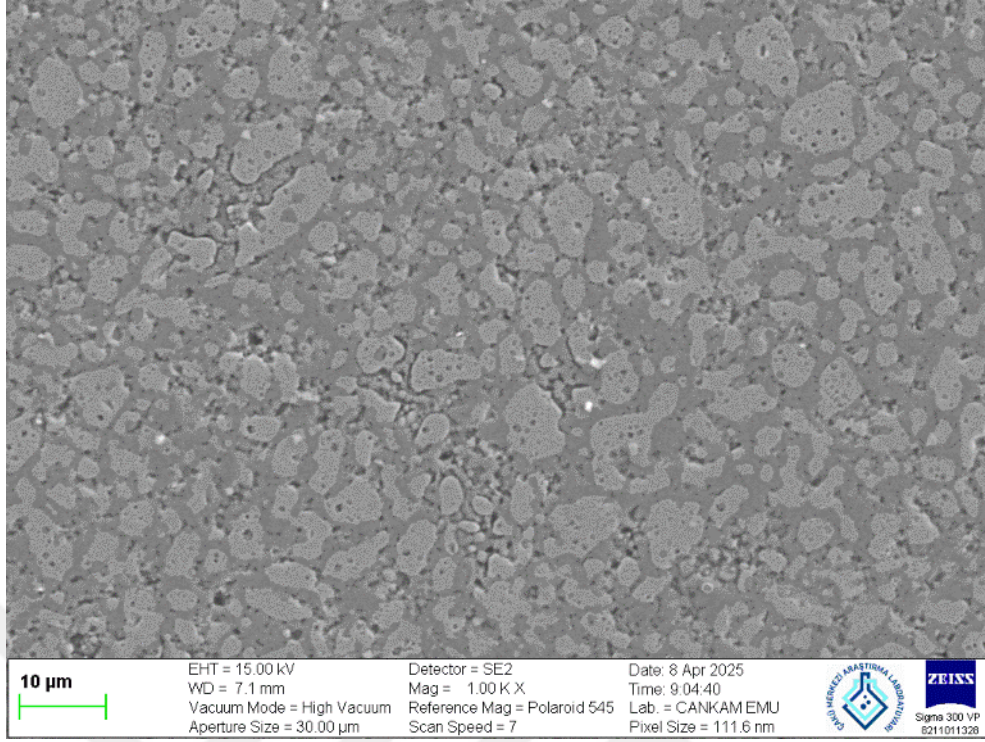


(c)

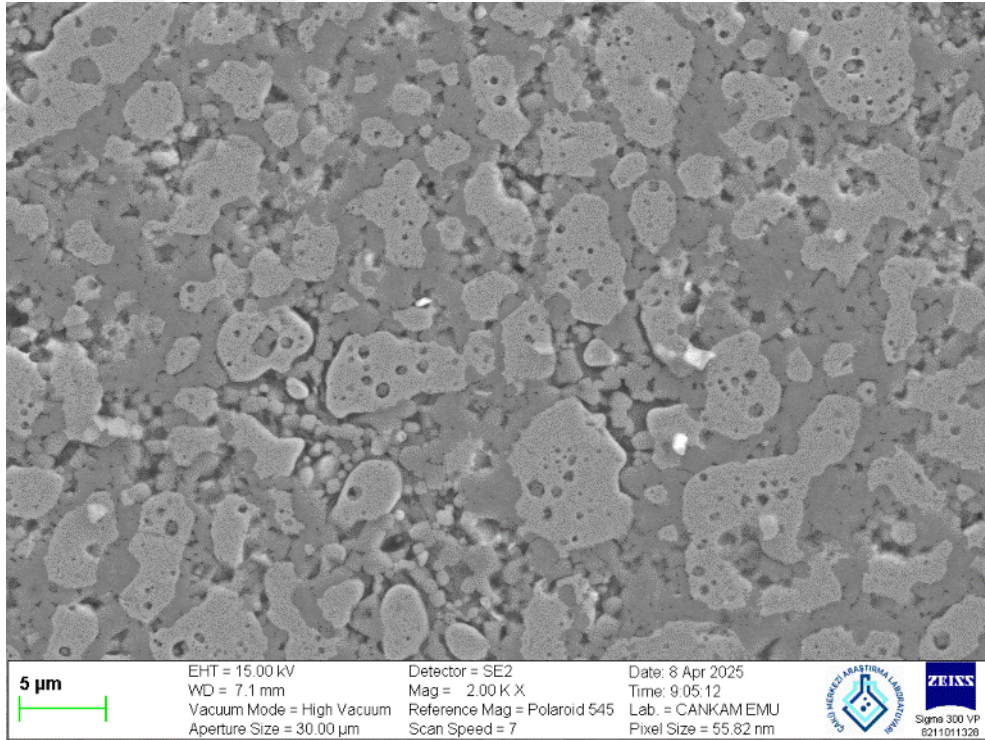


(d)

Şekil 4.13'ün devamı

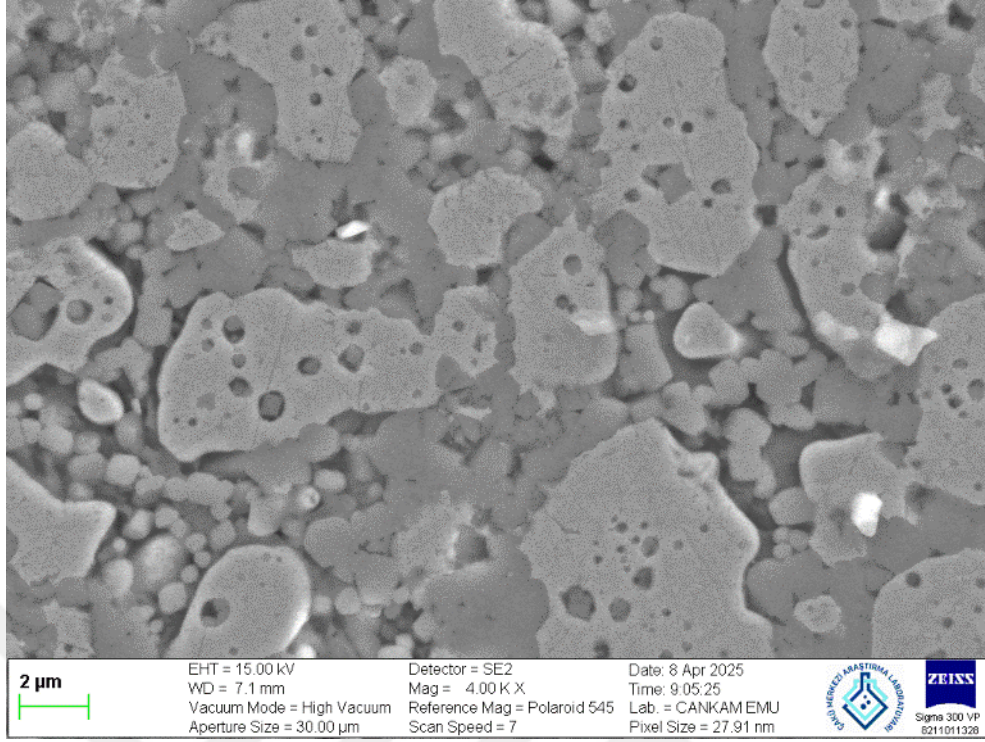


(a)

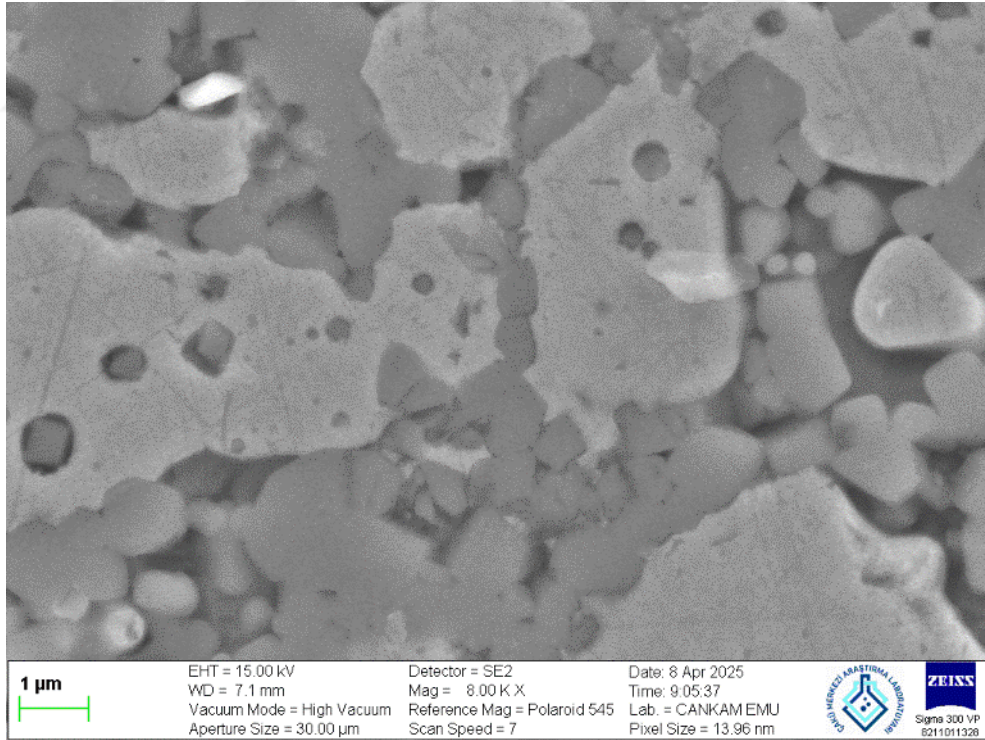


(b)

Şekil 4.14 Karbon/ %2,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

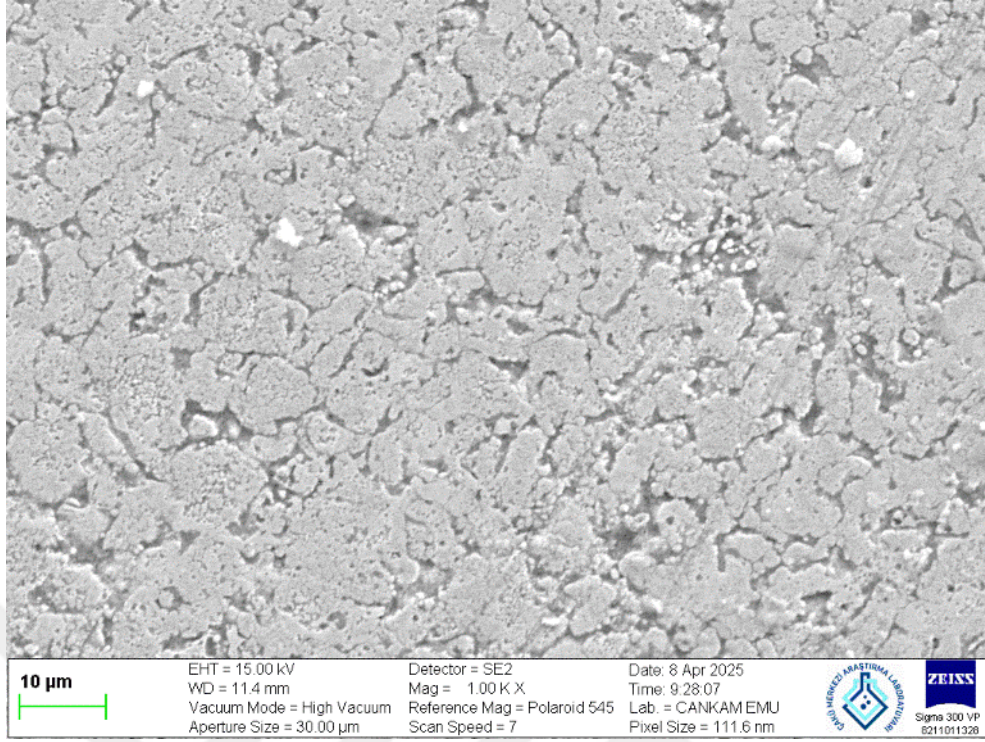


(c)

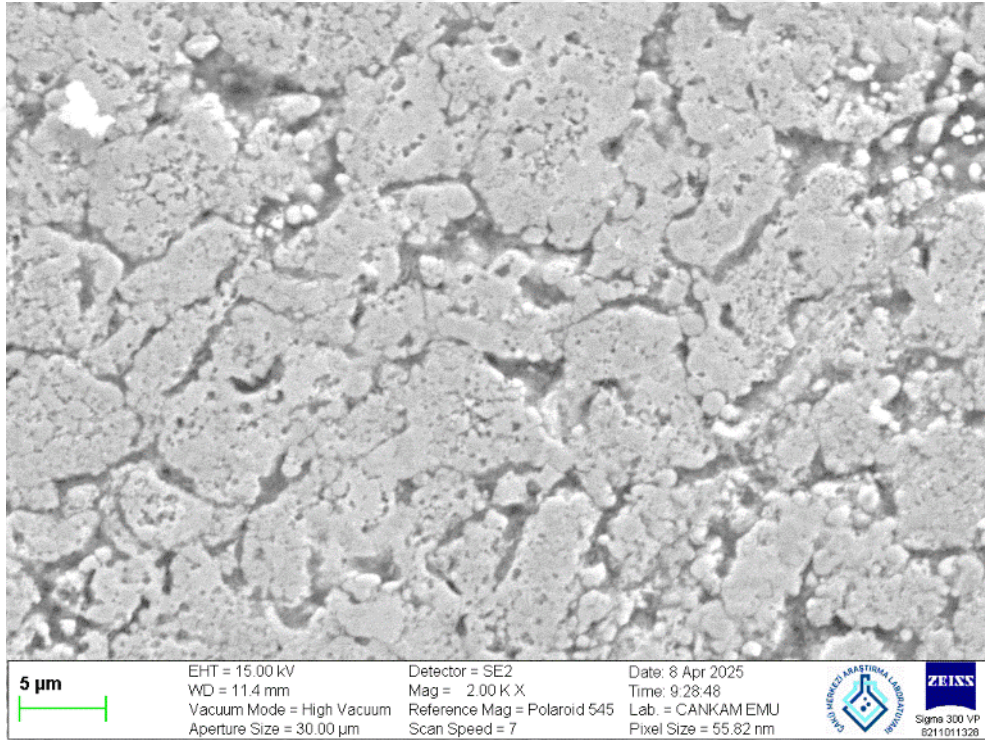


(d)

Şekil 4.14'ün devamı

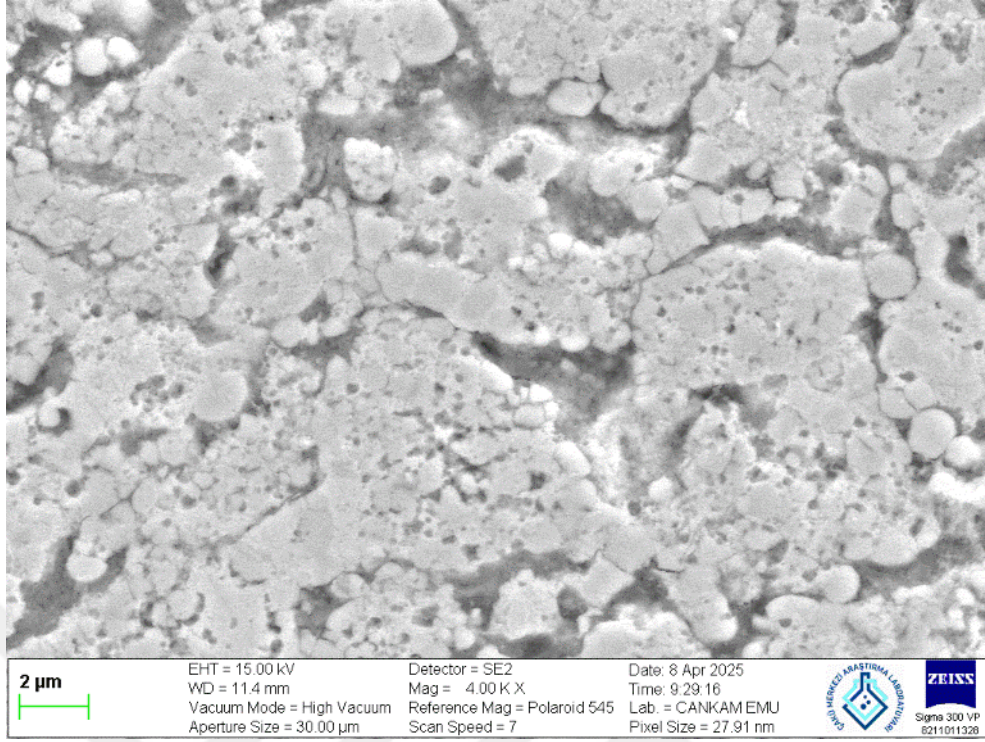


(a)

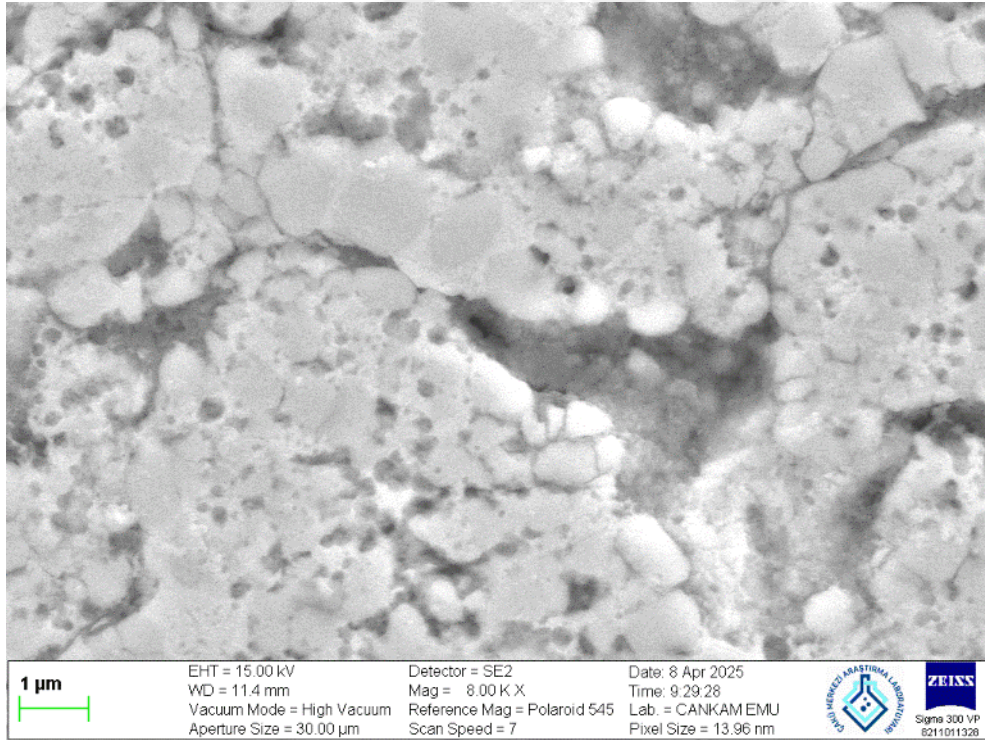


(b)

Şekil 4.15 Karbon/ %5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

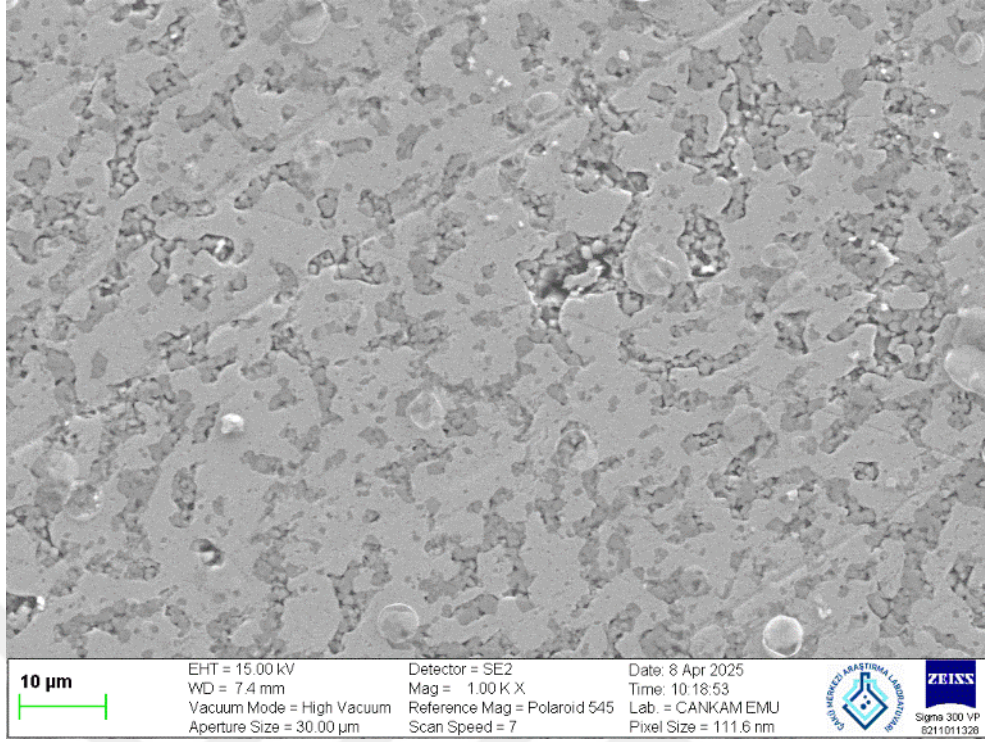


(c)

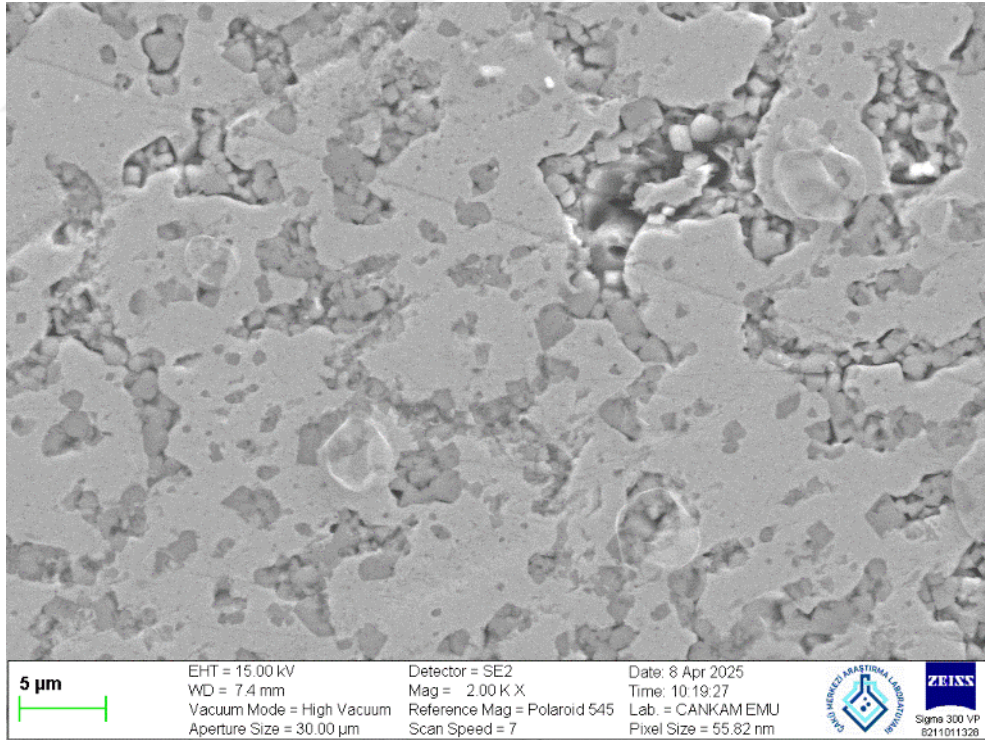


(d)

Şekil 4.15'in devamı

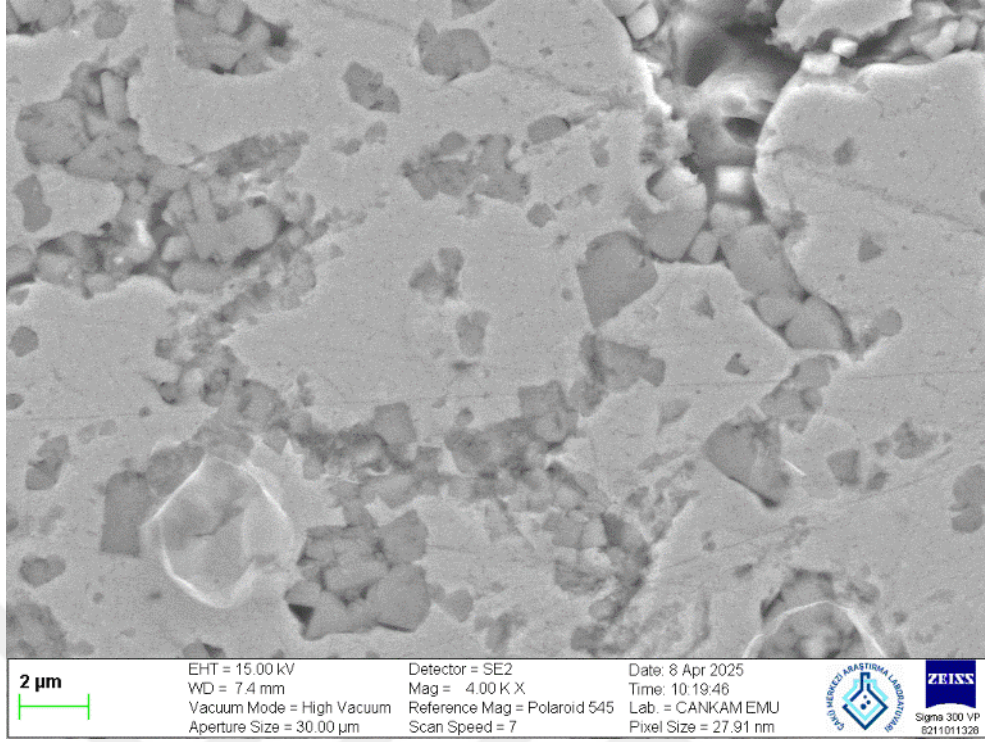


(a)

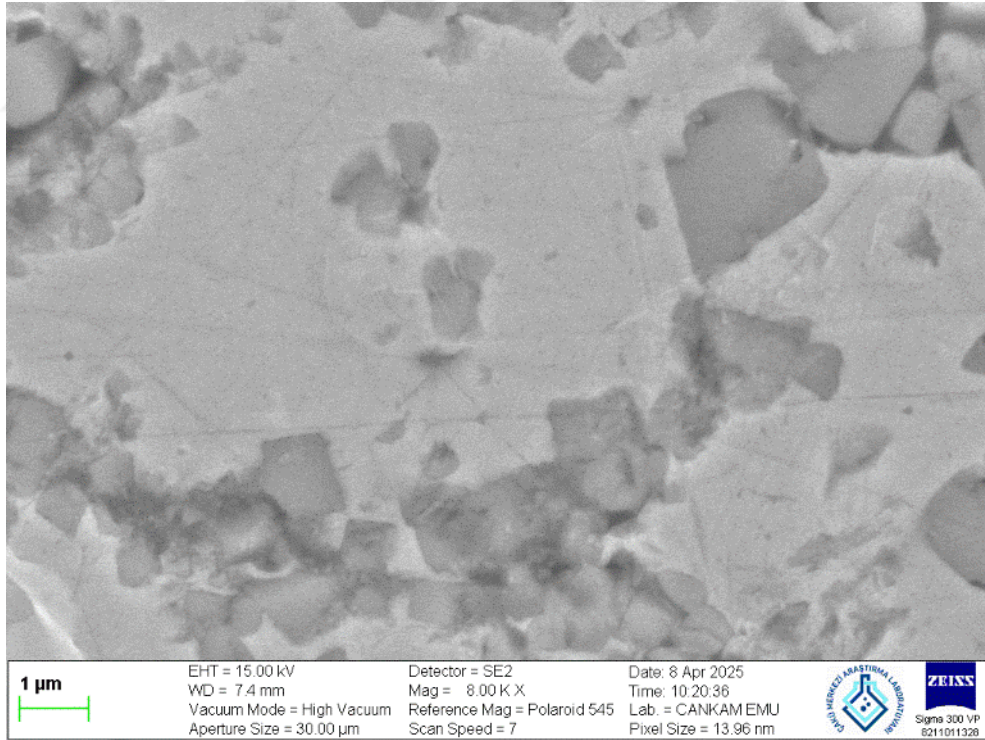


(b)

Şekil 4.16 Karbon/ %5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

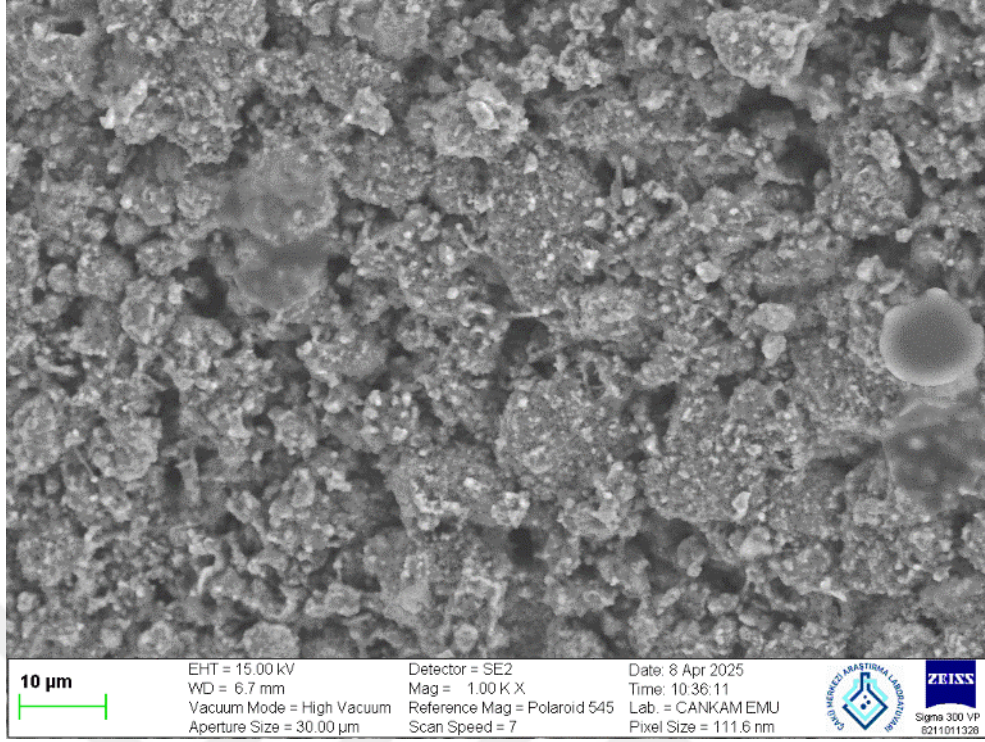


(c)

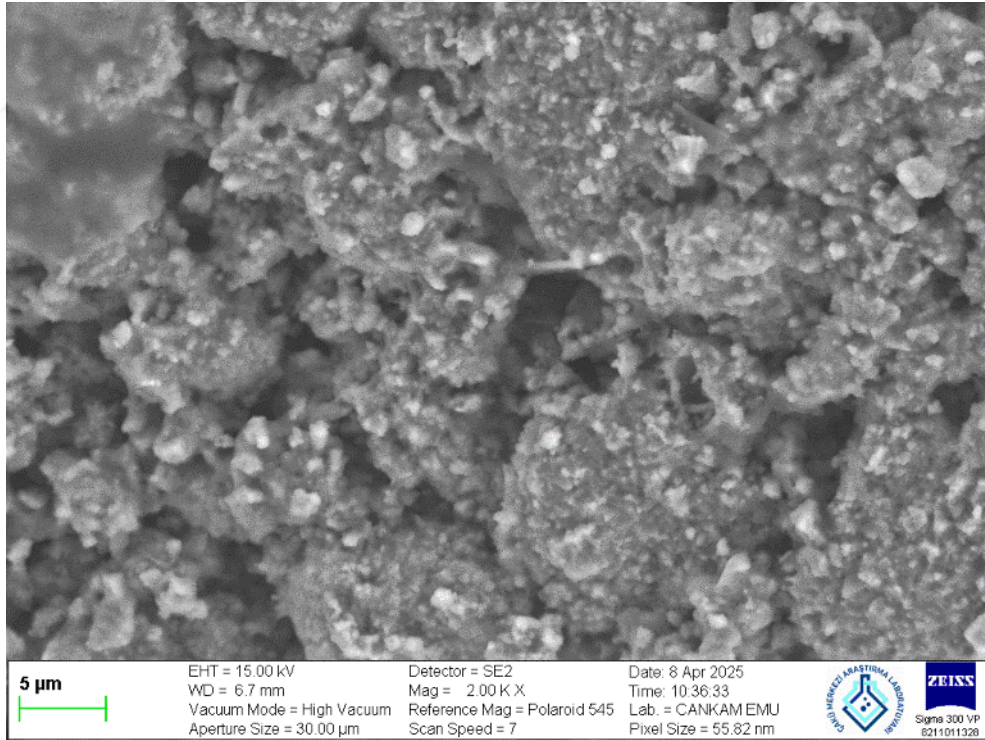


(d)

Şekil 4.16'nın devamı

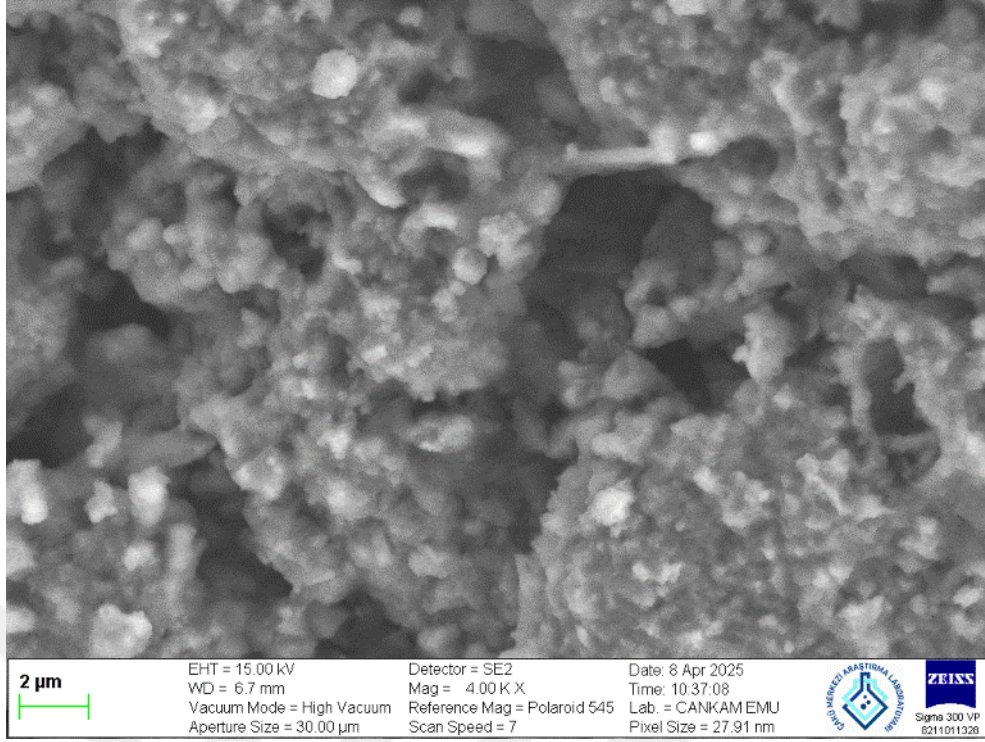


(a)

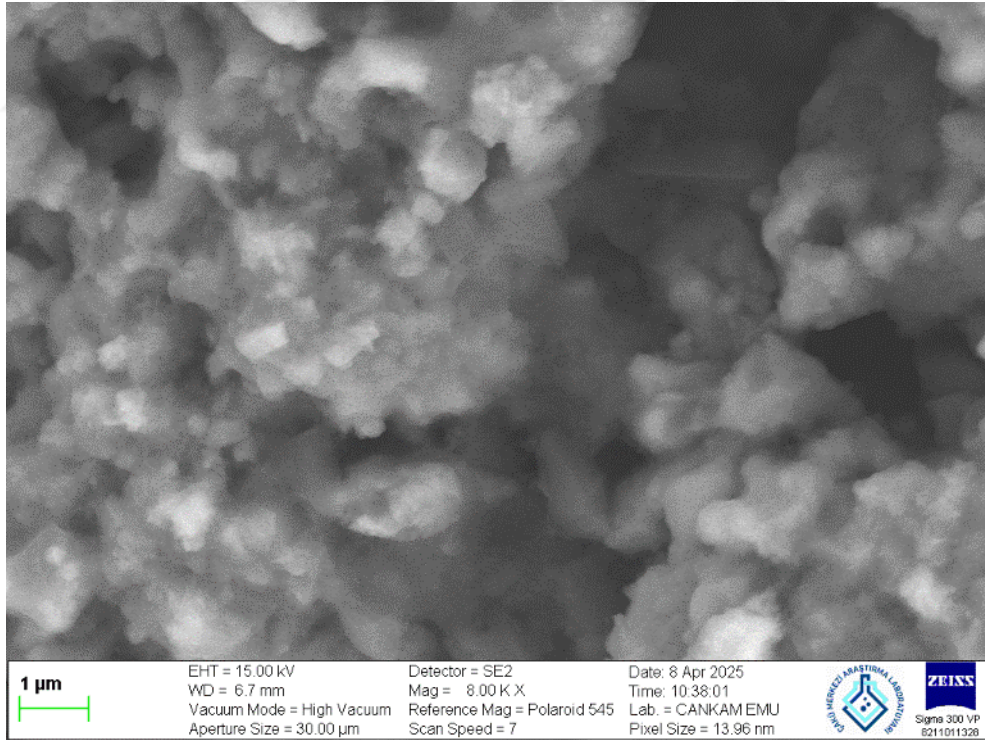


(b)

Şekil 4.17 Karbon/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

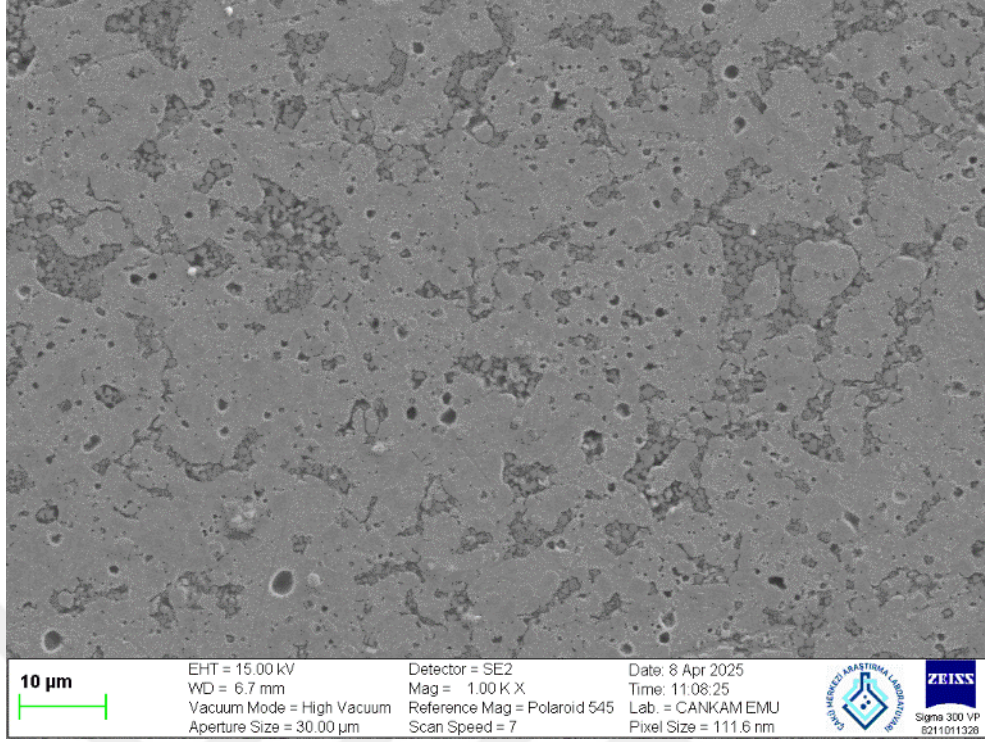


(c)

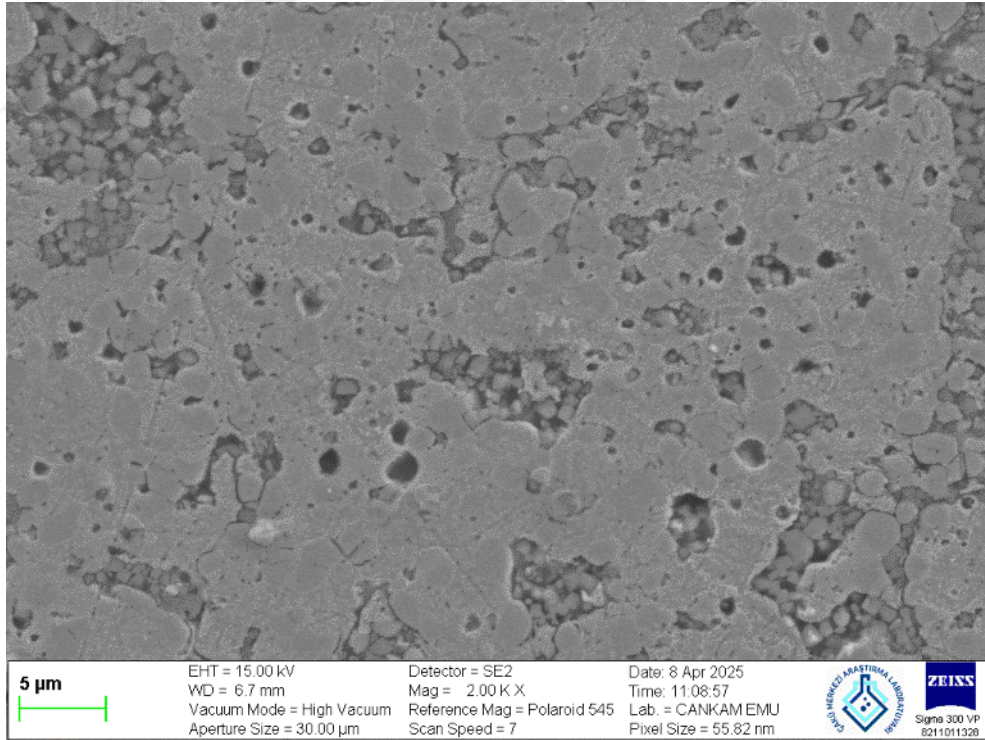


(d)

Şekil 4.17'nin devamı

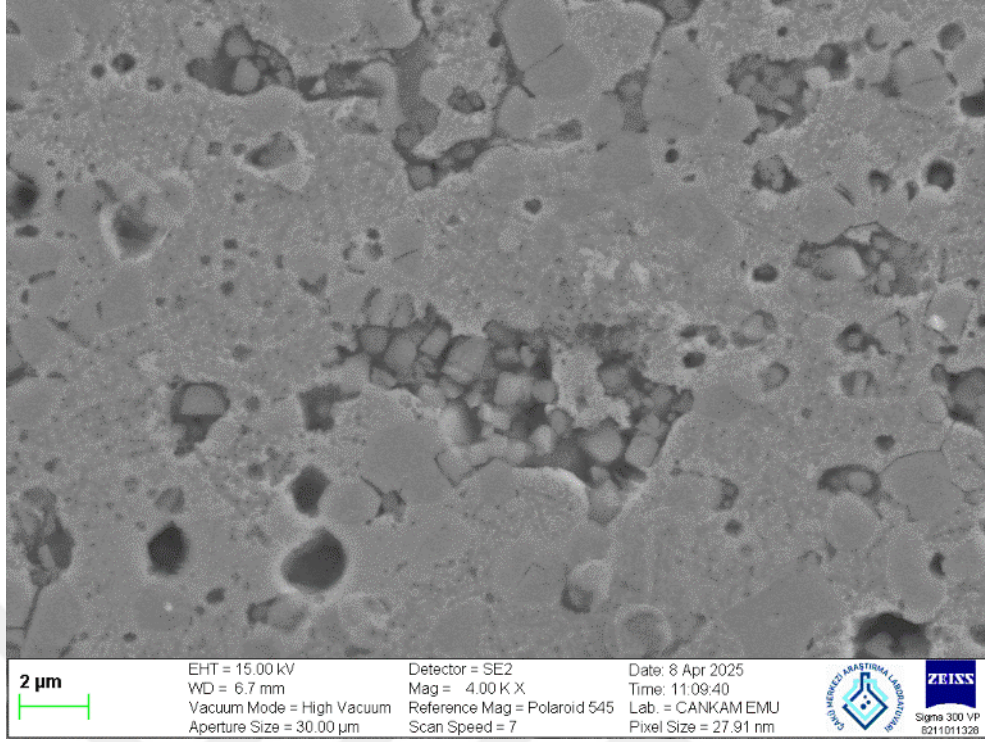


(a)

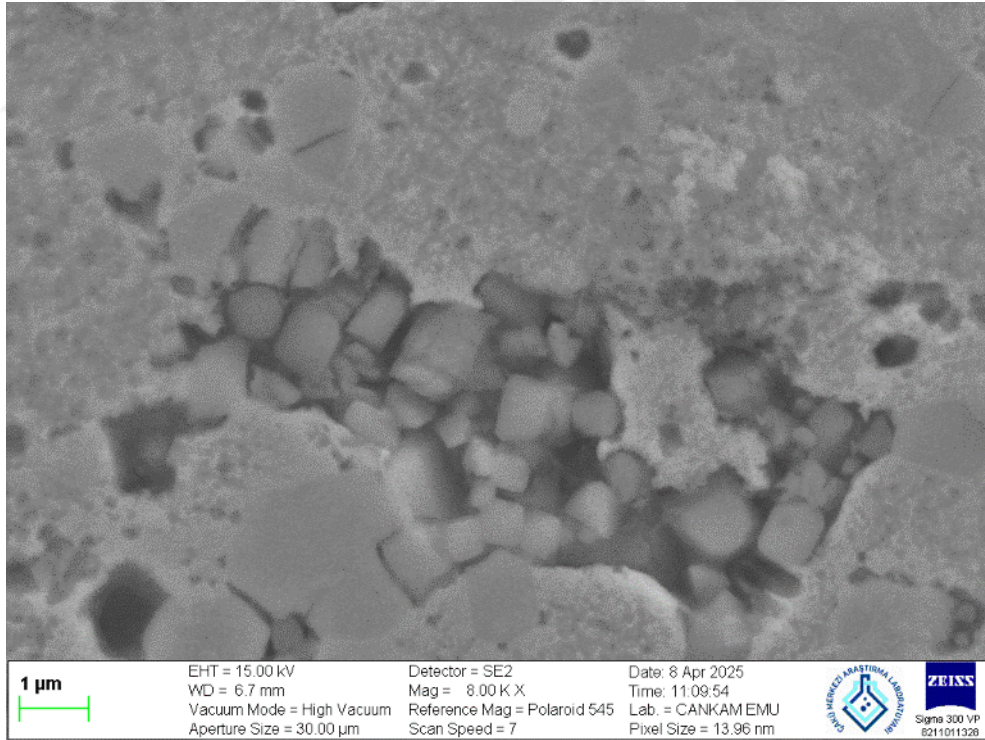


(b)

Şekil 4.18 Karbon/ %7,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX



(c)



(d)

Şekil 4.18'in devamı

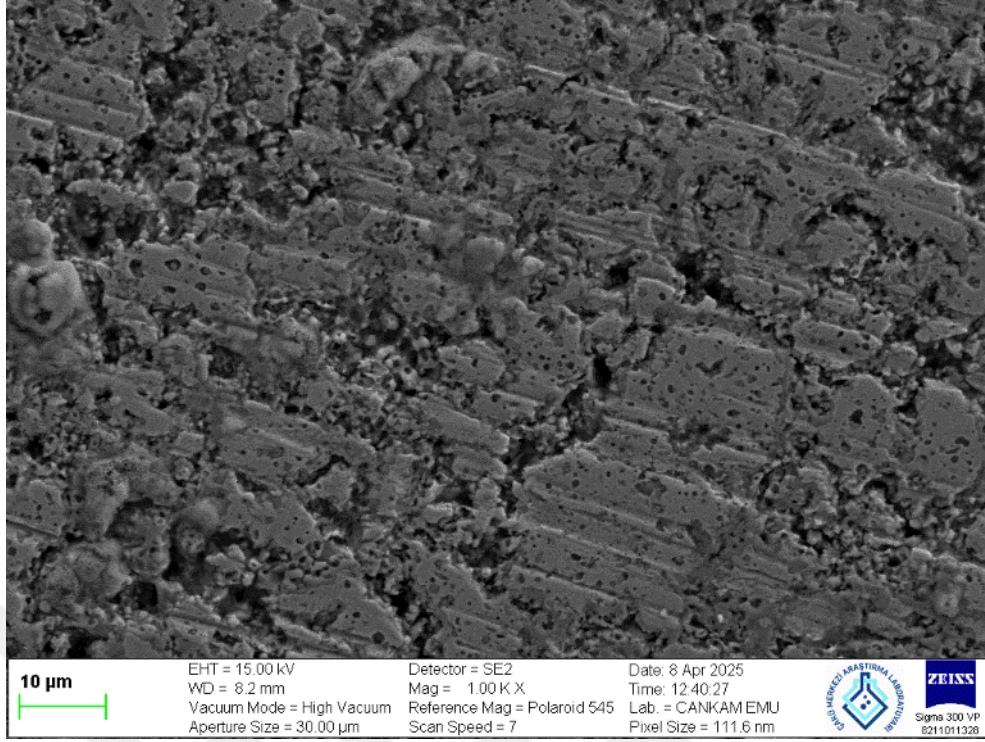
Şekil 4.13 ile Şekil 4.18 arasında yer alan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen ayrıntılı mikroyapı incelemeleri, kompozit yapılı yüksek entropili alaşım (YEA) sistemine belirli oranlarda eklenen Karbon (C) elementinin, alaşımın mikro yapısal özelliklerine olan etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Yapılan gözlemler sonucunda, Karbon katkısının, sistemde sadece görsel ve yapısal farklılıklara neden olmakla kalmadığı, aynı zamanda morfolojik değişimleri de önemli ölçüde etkilediği anlaşılmıştır. Özellikle Karbon içeriğinde meydana gelen artışla birlikte, SEM görüntülerinde parlak beyaz renkte gözlemlenen Karbon esaslı ikinci faz partiküllerinin sayıca arttığı ve bu partiküllerin boyutsal olarak da büyüme eğiliminde olduğu dikkat çekmektedir. Bu bulgular, Karbon ilavesinin yalnızca miktarsal değil, aynı zamanda mikro yapının kalitatif bileşimini de doğrudan etkileyen bir unsur olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen bu yapısal değişimler, Karbon katkısının YEA matrisinde nükleasyon ve partikül büyümesi davranışlarını belirleyen kinetik ve termodinamik parametrelere karşı oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Karbonun katı fazda çözünürlüğünün sınırlı olması nedeniyle, belirli bir derişimin üzerinde ikinci faz oluşumları kaçınılmaz hale gelmekte ve bu durum mikroyapıda morfolojik çeşitliliğin artmasına neden olmaktadır. Parçacıkların hem sayıca çoğalması hem de hacimsel büyüme göstermesi, Karbonun YEA matrisi içerisinde aktif olarak yeniden dağıldığını ve potansiyel olarak çekirdeklenme bölgelerinde yeni faz oluşumlarını teşvik ettiğini göstermektedir. Bu bağlamda, Karbon esaslı fazların oluşum mekanizmalarının; atomik difüzyon hızları, yüzey gerilimi, çökeltme kinetiği ve uygulanan sinterleme sıcaklık/süre parametreleri gibi birçok mikro ve makroskobik değişkene bağlı olduğu söylenebilir.

Özellikle artan Karbon konsantrasyonu, hem mevcut fazlar arası dengeyi bozarak yeni ara fazların oluşmasına neden olabilir hem de halihazırda bulunan Karbon partiküllerinin koalesans mekanizmasıyla birleşerek daha büyük yapılar oluşturmaya zemin hazırlayabilir. Bu durum, mikroyapı homojenliğini azaltabileceği gibi, parçacık-matris arayüzeylerinde bağlanma zayıflıklarına ve dolayısıyla mekanik dayanımda düşüşlere neden olabilir. Bu tür yapısal düzensizlikler, mikro ölçekte çatlak başlama noktalarının oluşmasına, gerilim yığılmalarının artmasına ve zamanla yorulma direncinde azalmaya yol açabilir. Özellikle parçacık boyutlarındaki büyüme ile YEA matrisinin yapısal uyumu bozulduğunda, termomekanik yükler altında

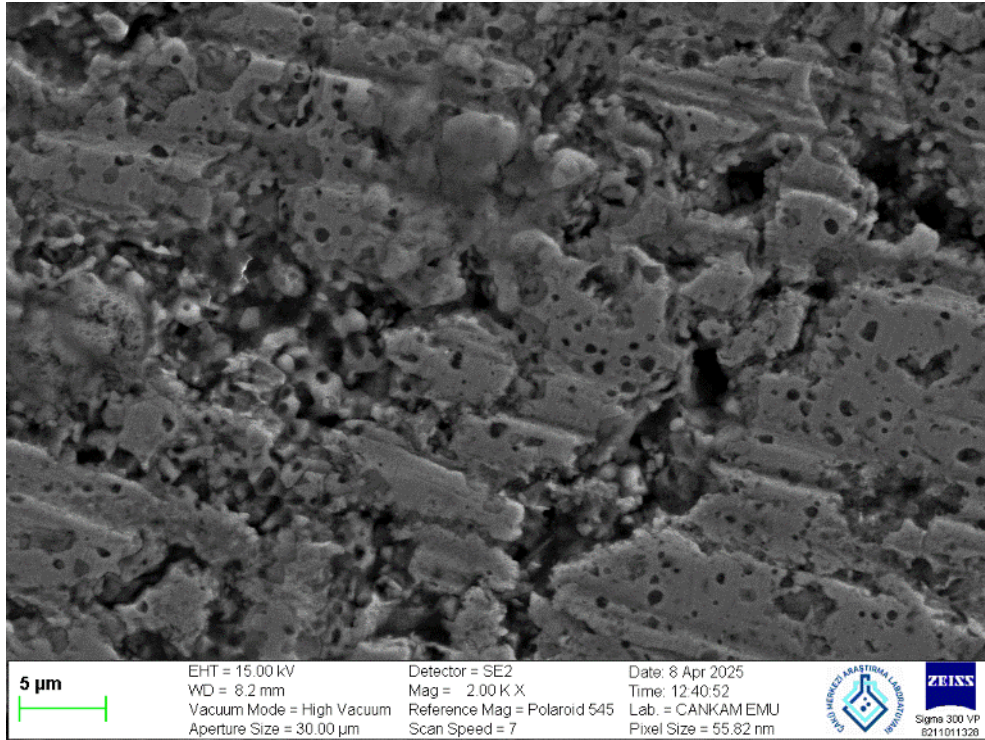
performans kaybı gözlenebilir. Bu nedenle, elde edilen mikroyapı verileri yalnızca morfolojik analiz açısından değil, aynı zamanda kompozit sistemin makroskobik düzeydeki mekanik özellikleri açısından da değerlendirilmelidir. Karbon partiküllerinin boyut ve dağılım kontrolünün sağlanabilmesi için, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bu tür kompozit malzemelerde sinterleme sıcaklığı, presleme basıncı, ısıtılma işlem süresi ve atmosfer koşulları gibi üretim parametrelerinin Karbon içeriğine duyarlı şekilde optimize edilmesi elzemdir.

Sonuç olarak, Şekil 4.13–4.18 arasında sunulan SEM verilerine dayanarak yapılan mikroyapısal analizler, Karbon katkısının YEA sistemine olan etkilerinin yalnızca mikroskobik değil, aynı zamanda makroskobik malzeme davranışı üzerinde de doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle üretim süreci boyunca Karbon ilavesine bağlı olarak ortaya çıkabilecek mikro yapı değişimleri dikkatle izlenmeli ve üretim parametreleri buna göre düzenlenmelidir. Böylece, hem mekanik performansın artırılması hem de uzun vadeli yapısal kararlılığın sağlanması mümkün olacaktır. Tüm bu değerlendirmeler doğrultusunda, Karbon katkılı YEA kompozitlerinin endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini artırabilmek adına, üretim sürecinin sistematik olarak kontrol altında tutulması ve optimize edilmesi gerekliliği kaçınılmazdır.

1000°C ve 1200°C sıcaklıklarda ve %2,5; 5 ve 7,5 oranlarında Silisyum (Si) ilave edilerek üretilen YEA'ların SEM görüntüleri Şekil 4.19 -4.24 aralığında verilmiştir.

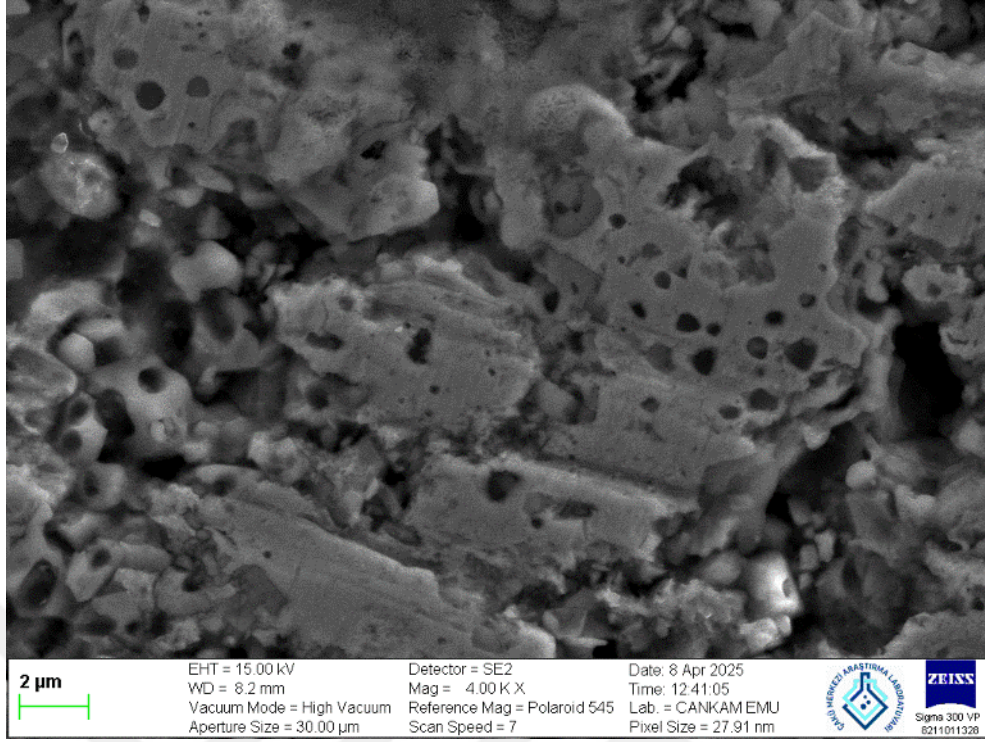


(a)

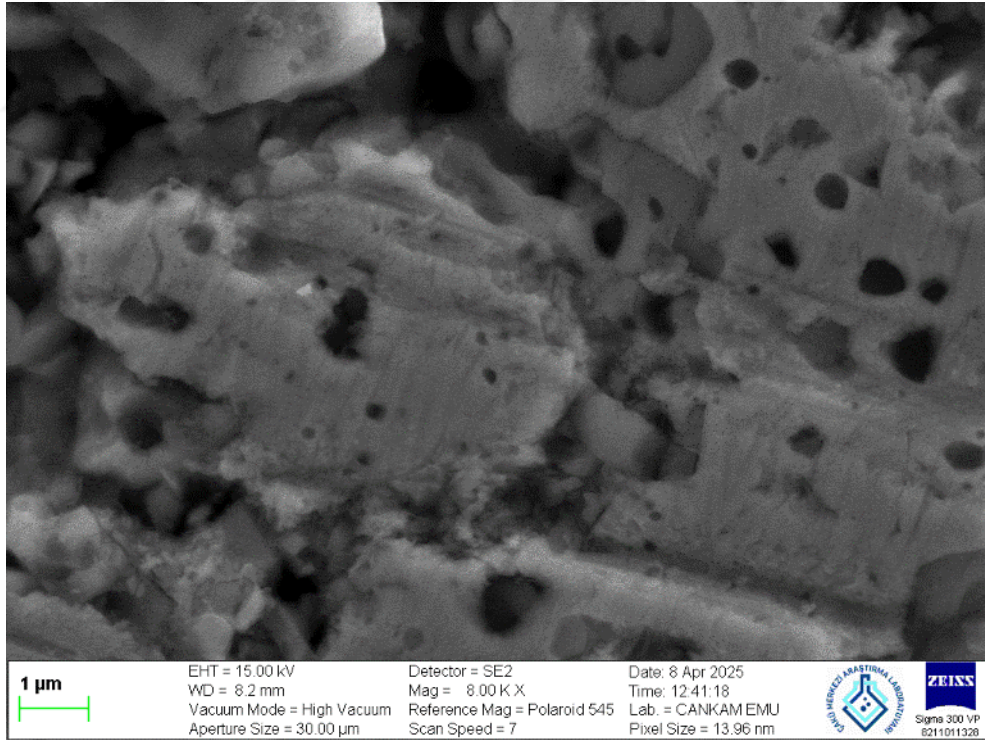


(b)

Şekil 4.19 Silisyum/ %2,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

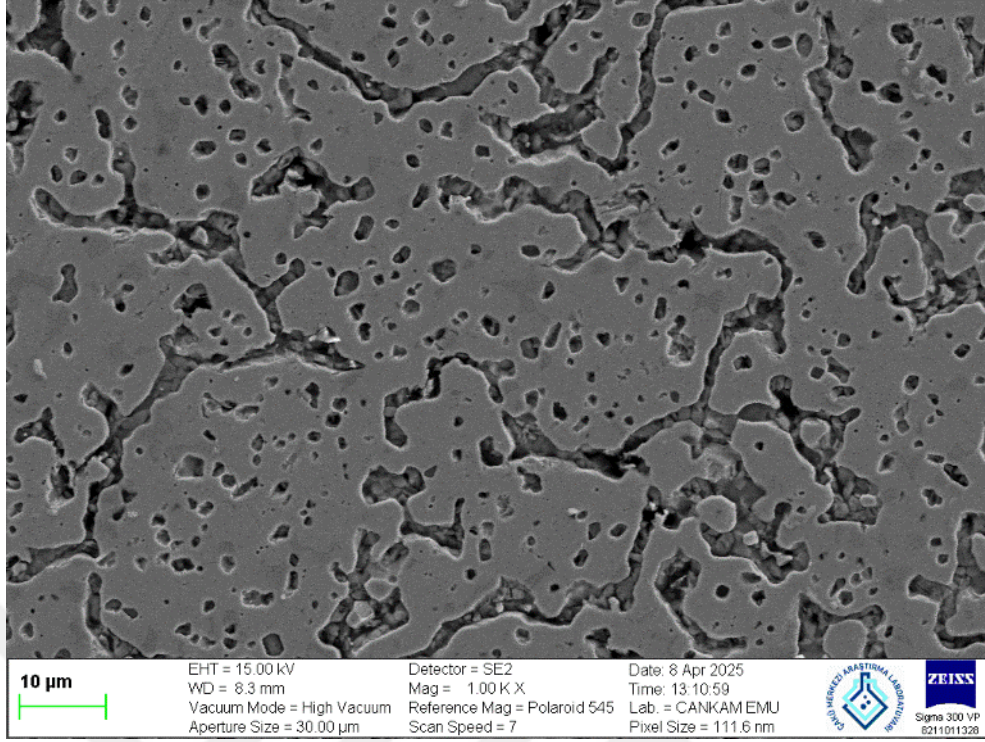


(c)

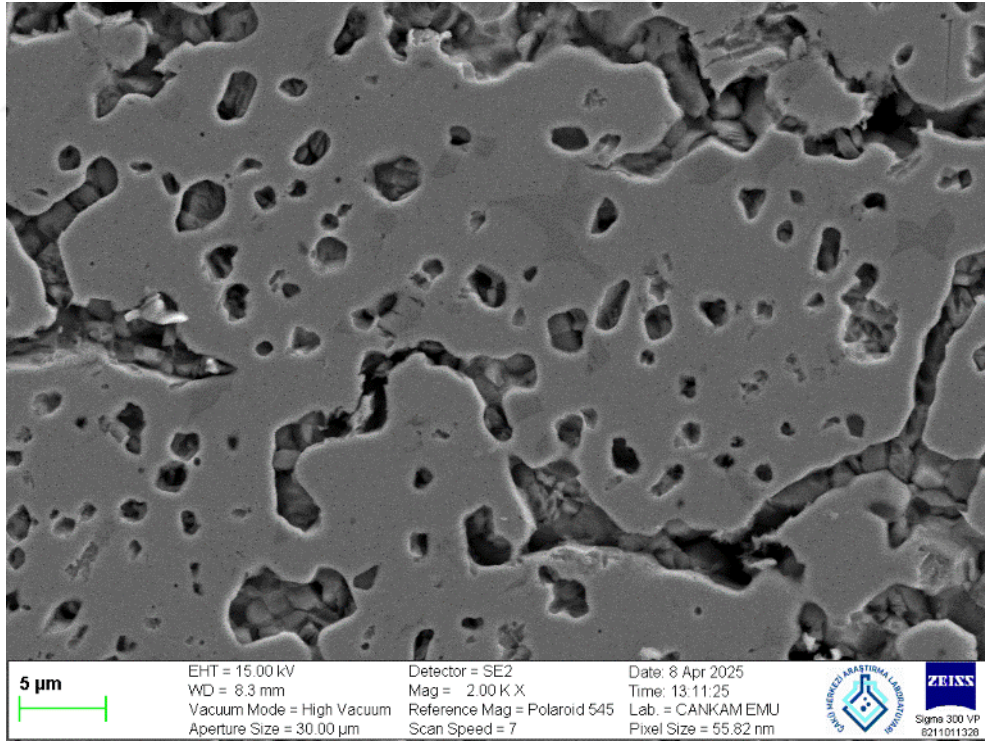


(d)

Şekil 4.19'un devamı

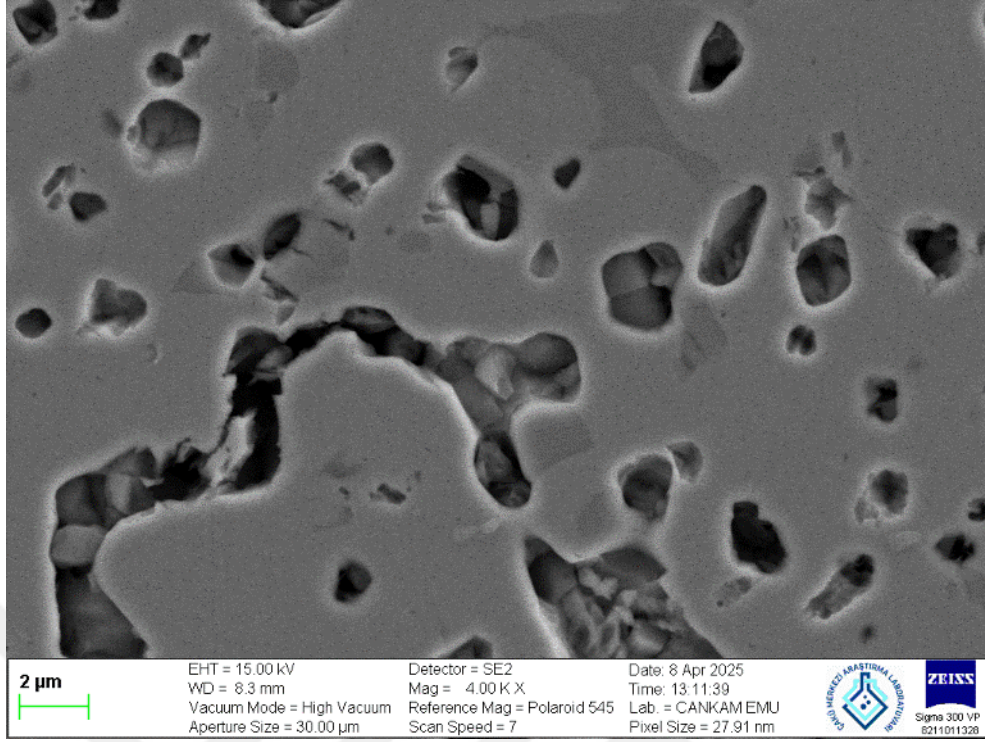


(a)

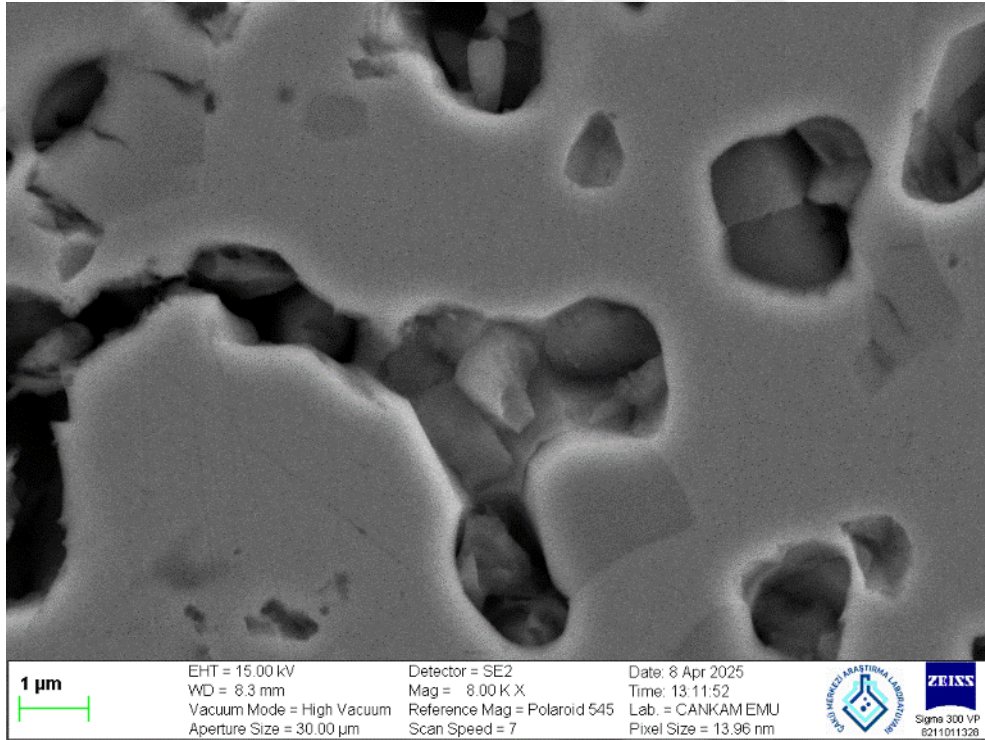


(b)

Şekil 4.20 Silisyum/ %2,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

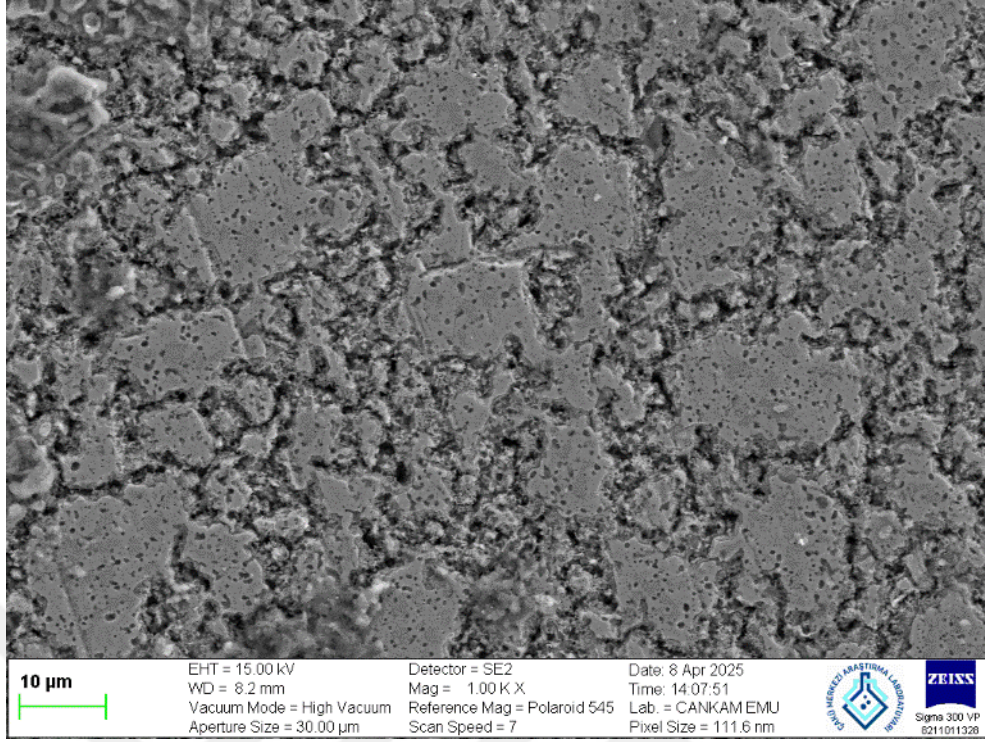


(c)

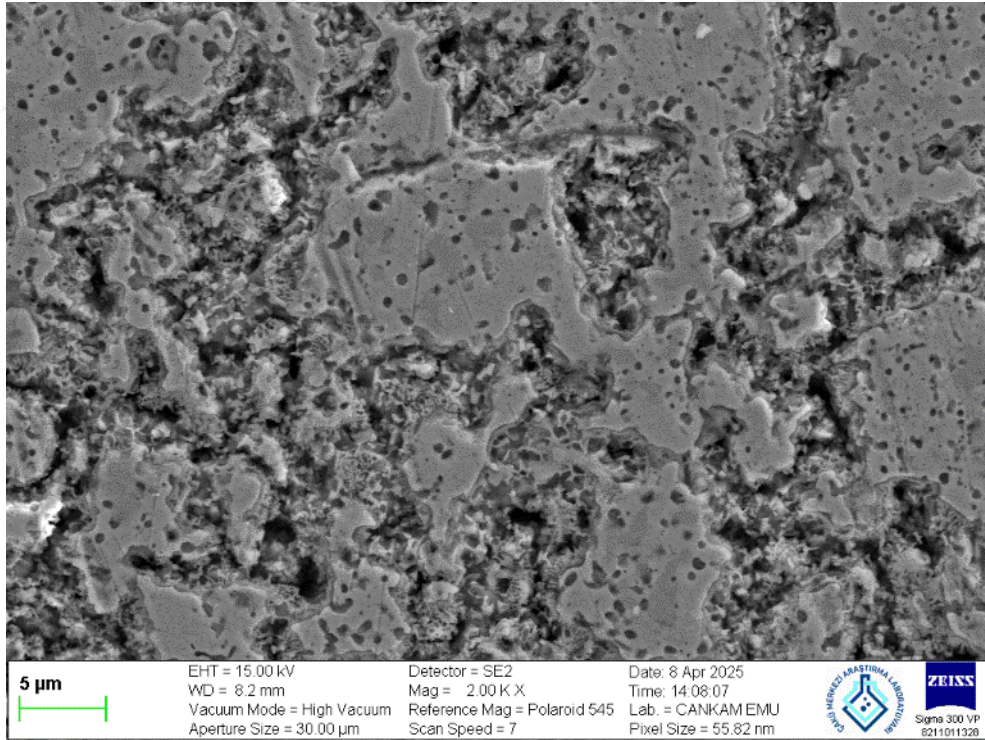


(d)

Şekil 4.20'nin devamı

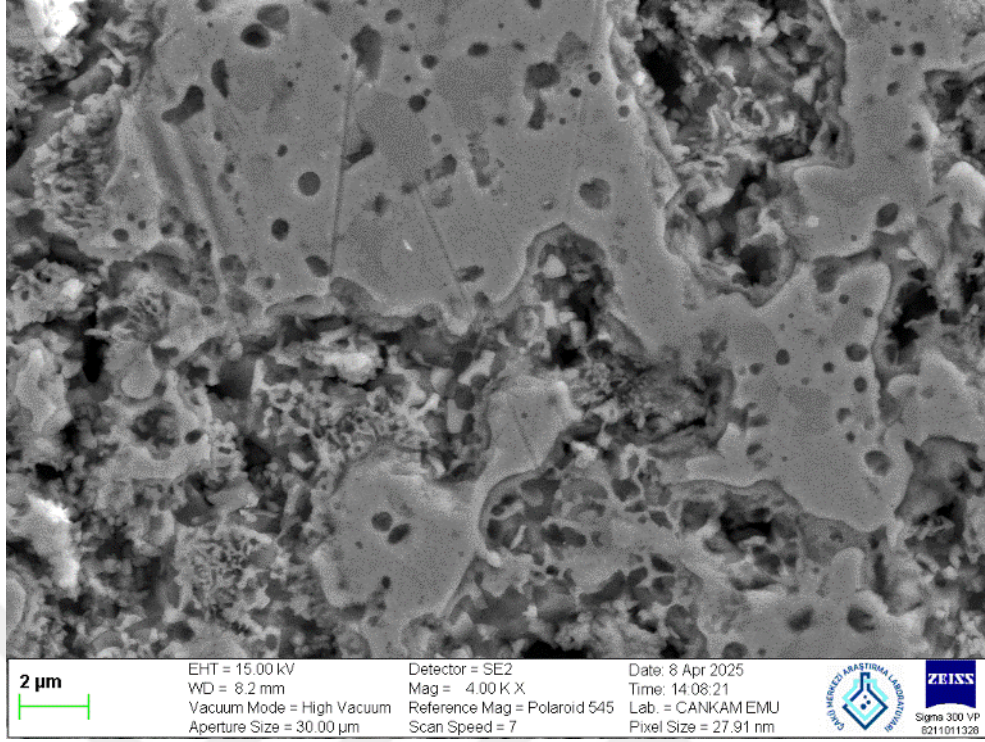


(a)

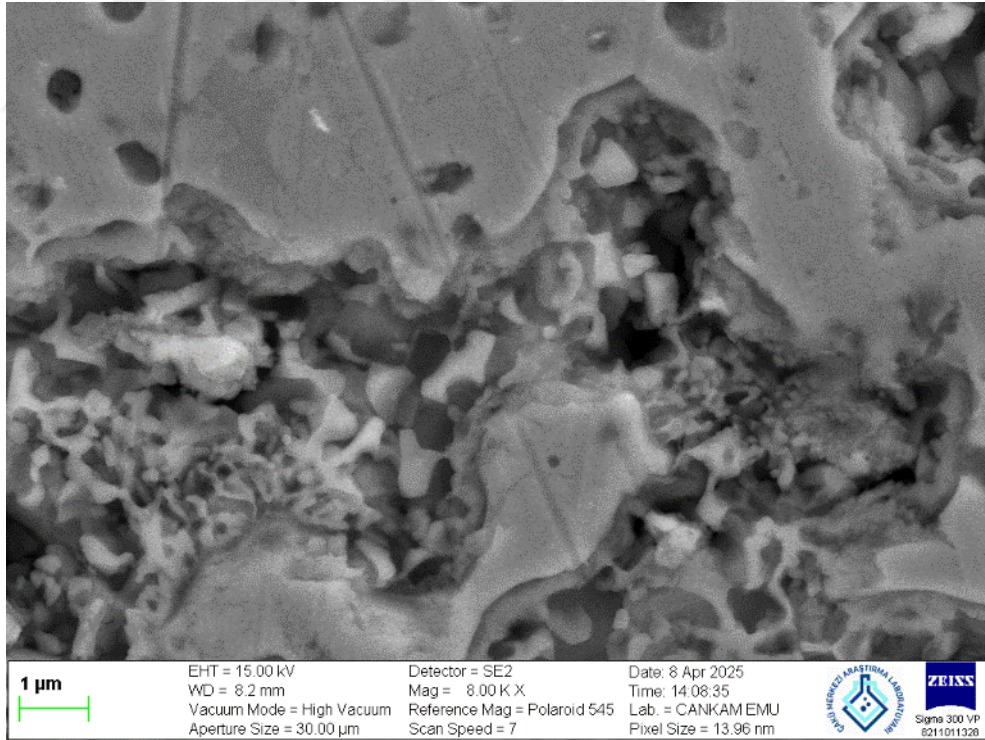


(b)

Şekil 4.21 Silisyum/ %5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

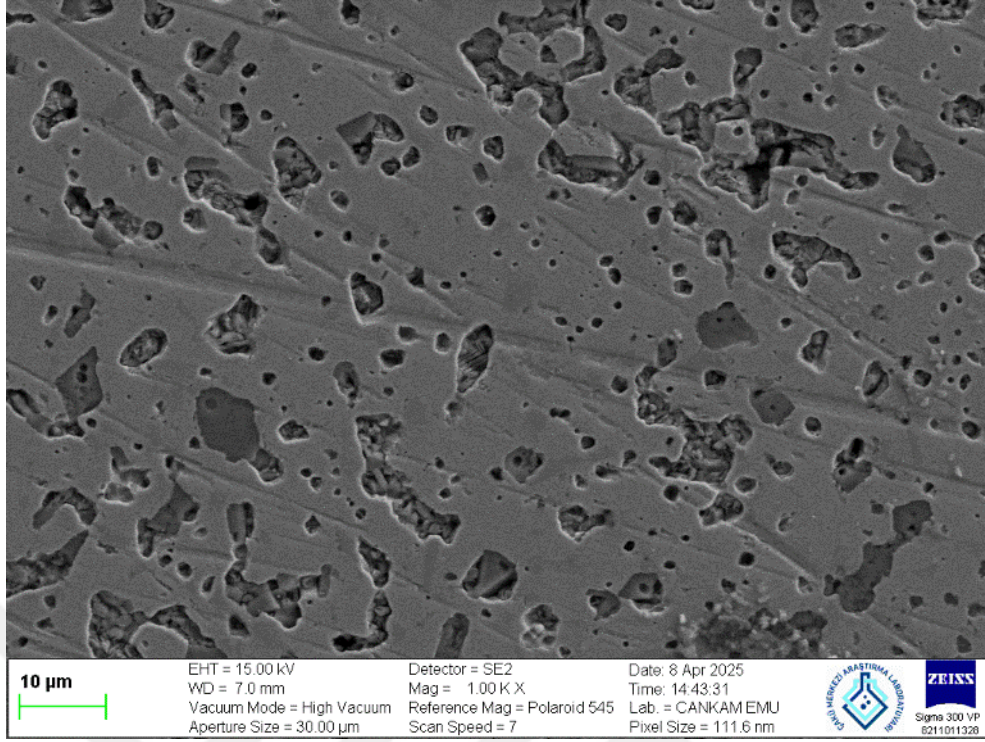


(c)

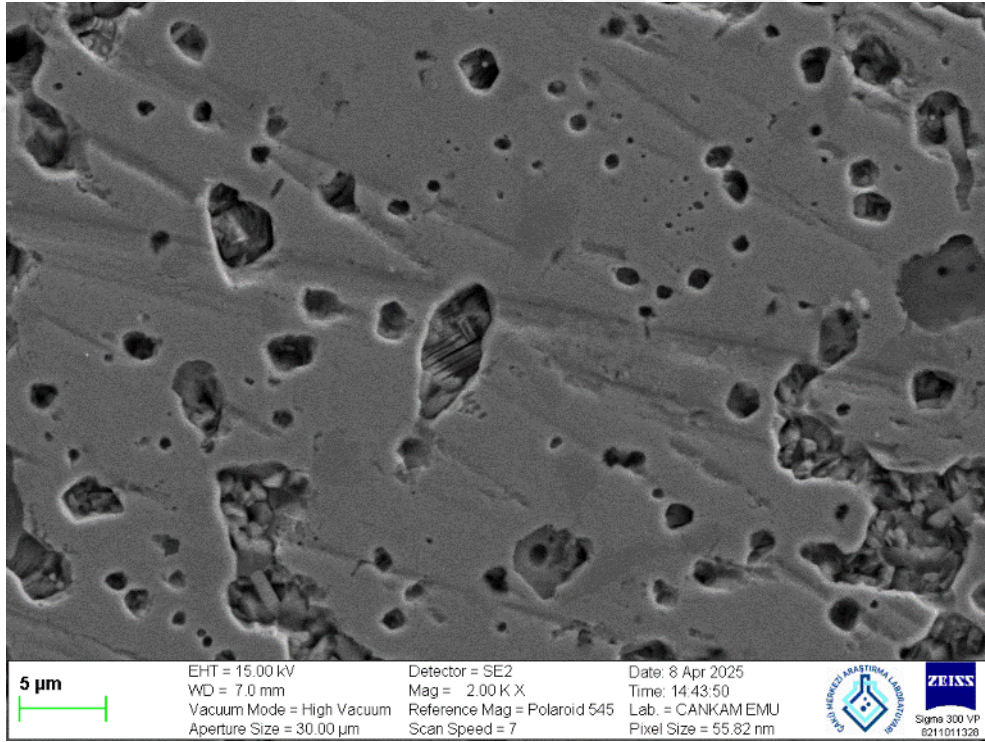


(d)

Şekil 4.21'in devamı

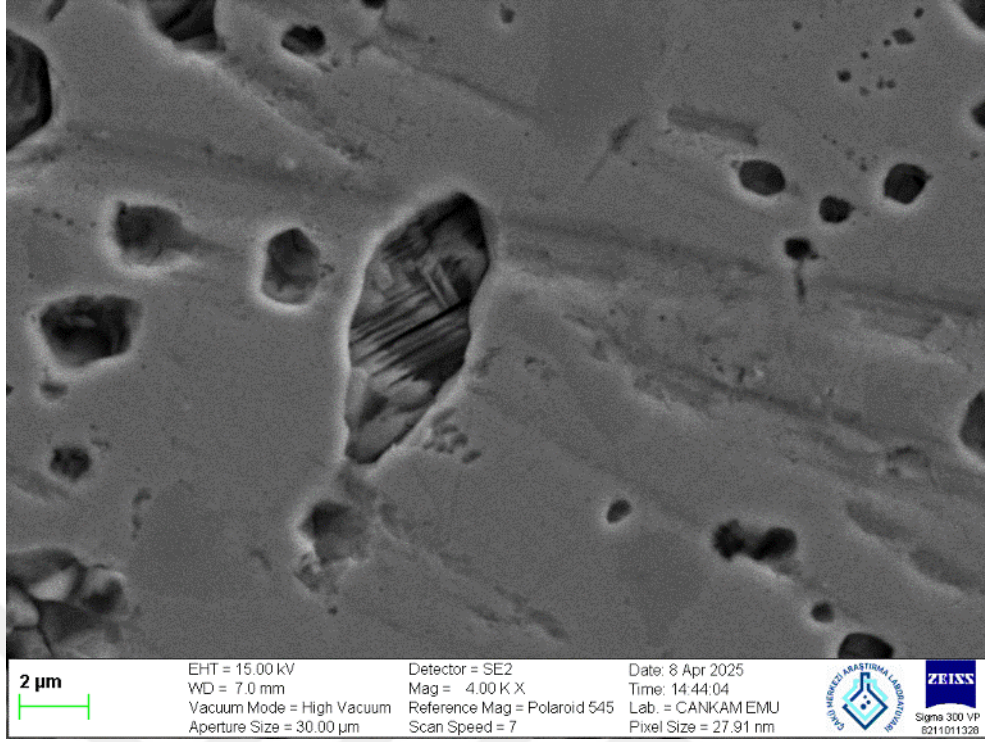


(a)

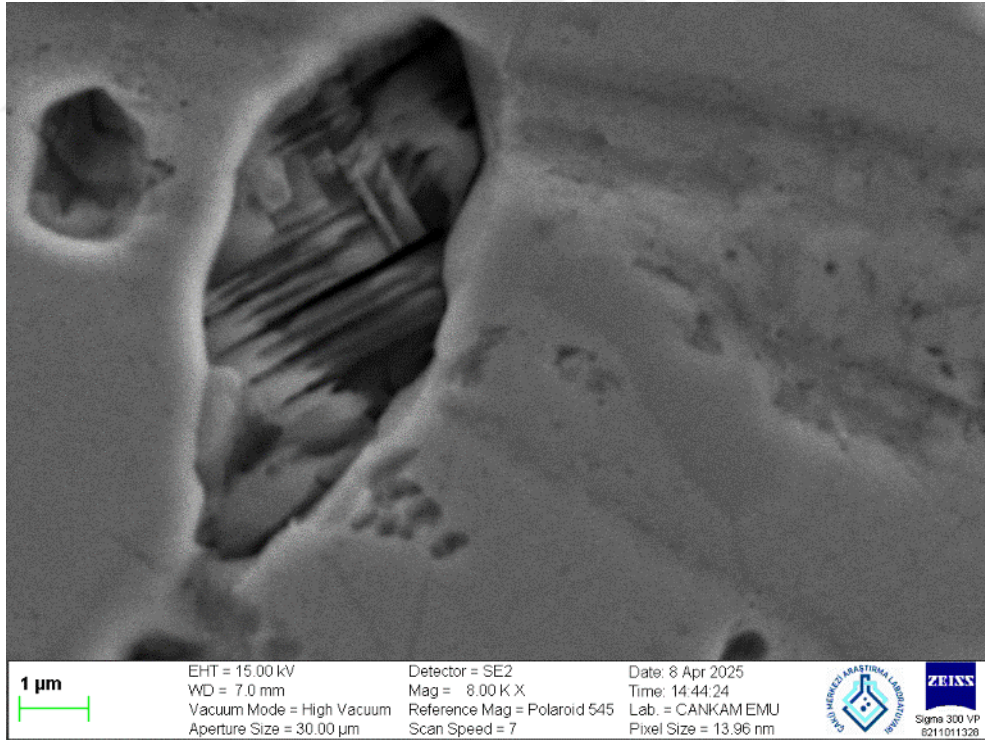


(b)

Şekil 4.22 Silisyum/ %5/1200°C büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

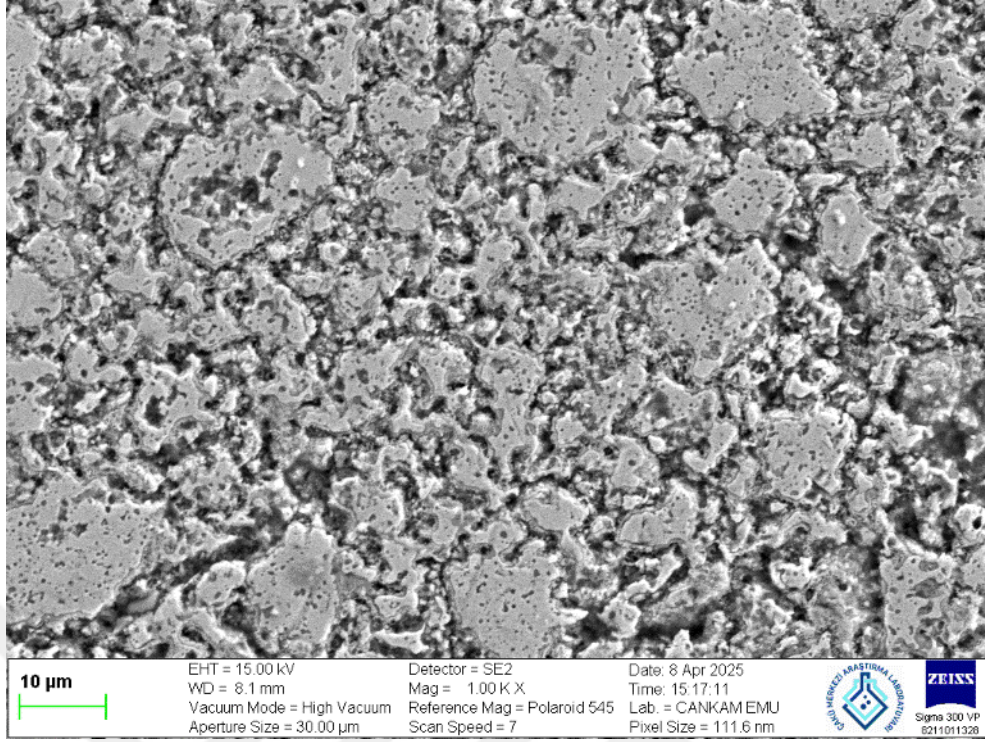


(c)

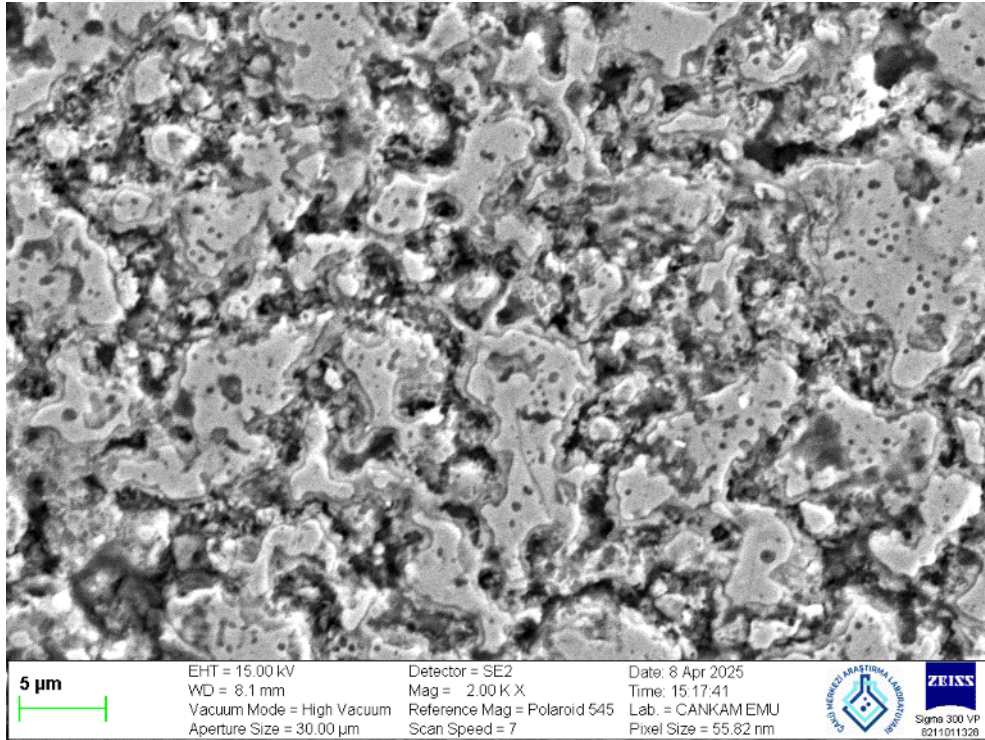


(d)

Şekil 4.22'nin devamı

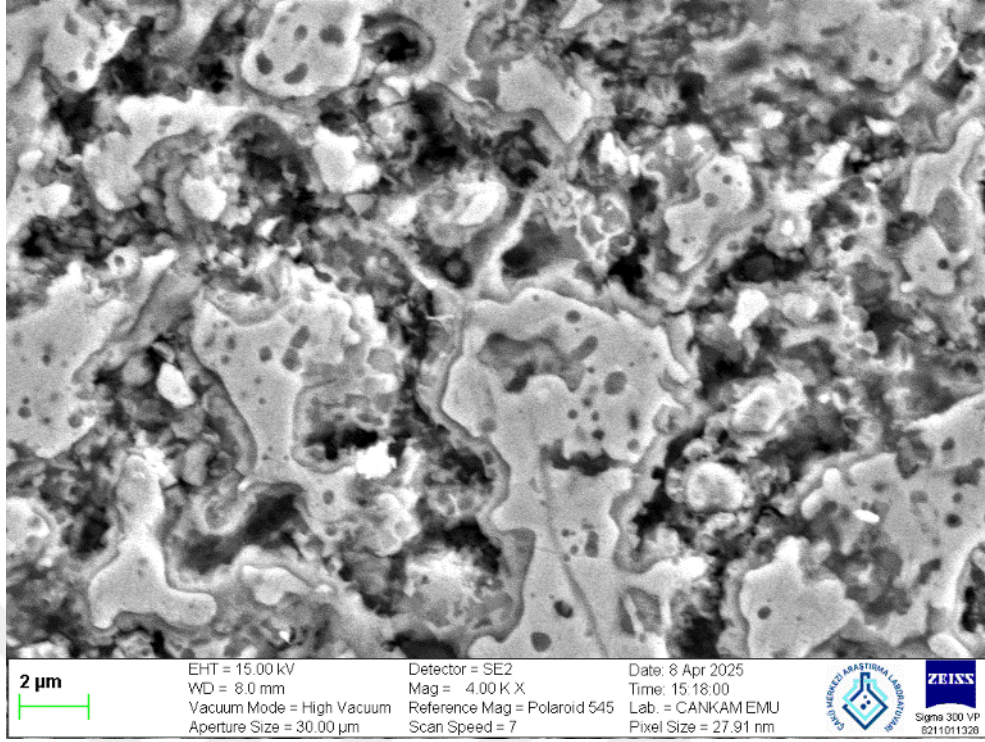


(a)

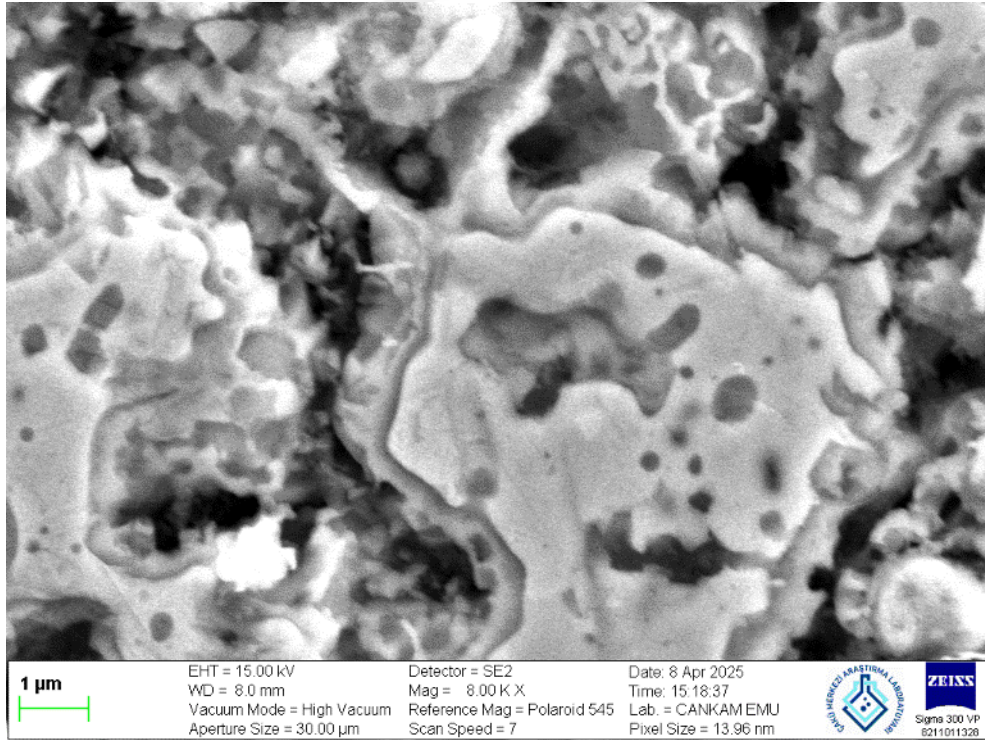


(b)

Şekil 4.23 Silisyum/ %7,5/1000°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX

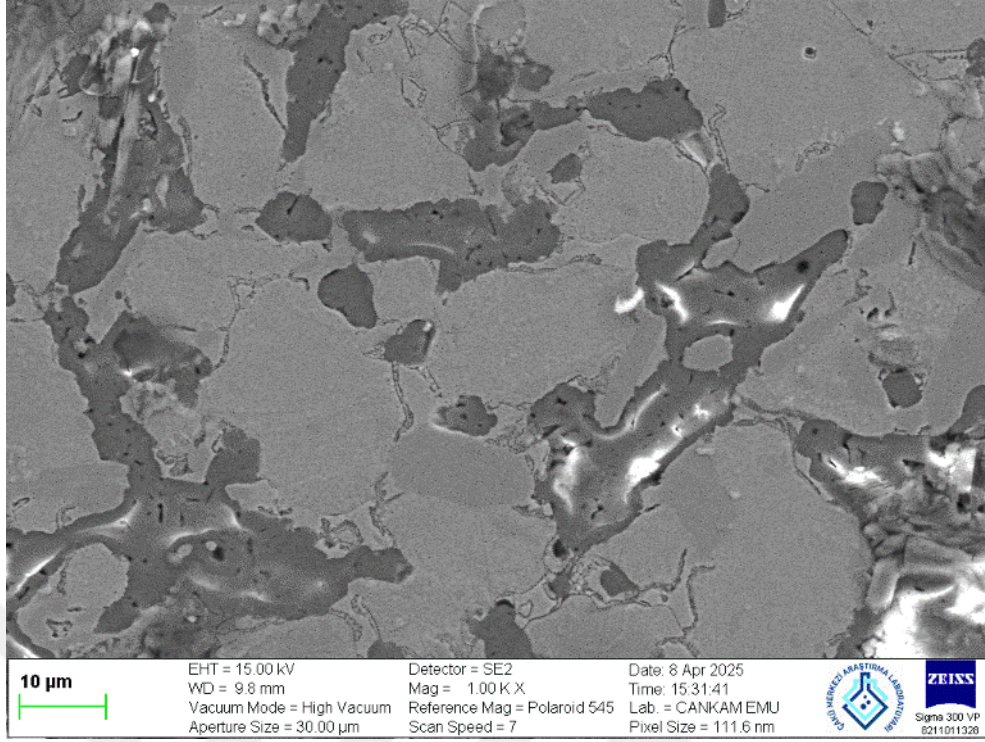


(c)

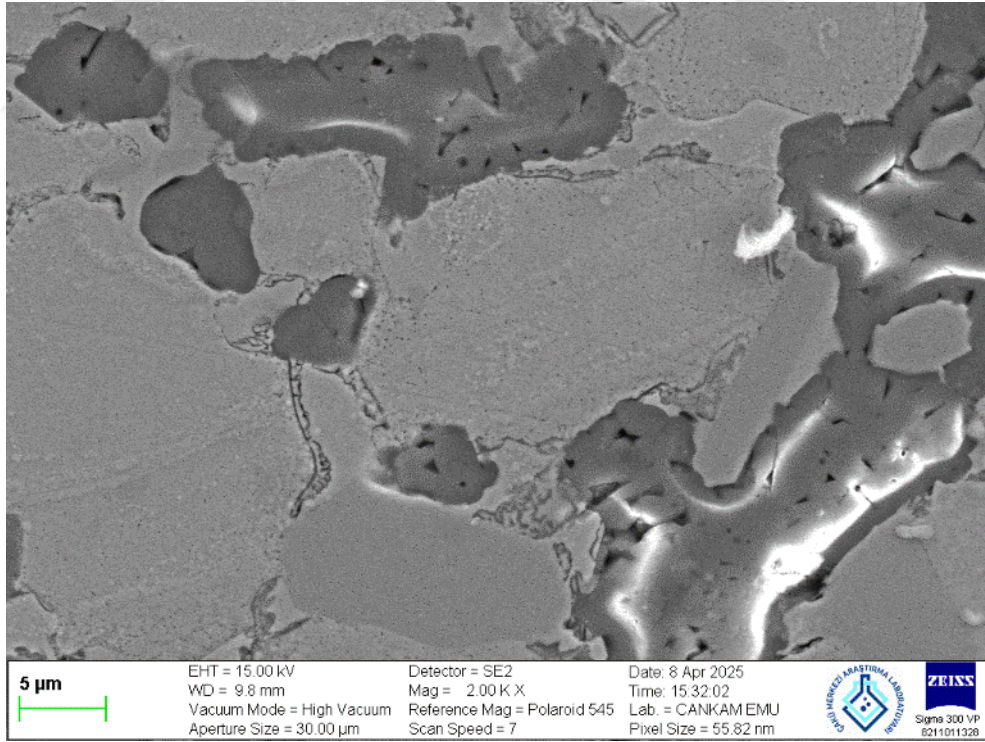


(d)

Şekil 4.23'ün devamı

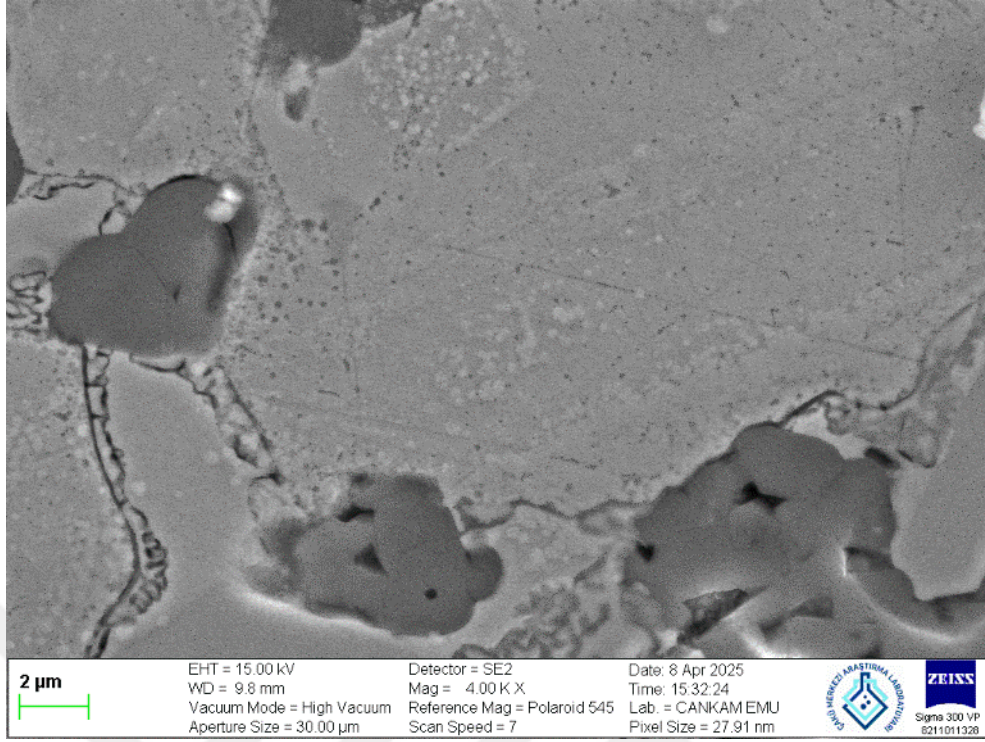


(a)

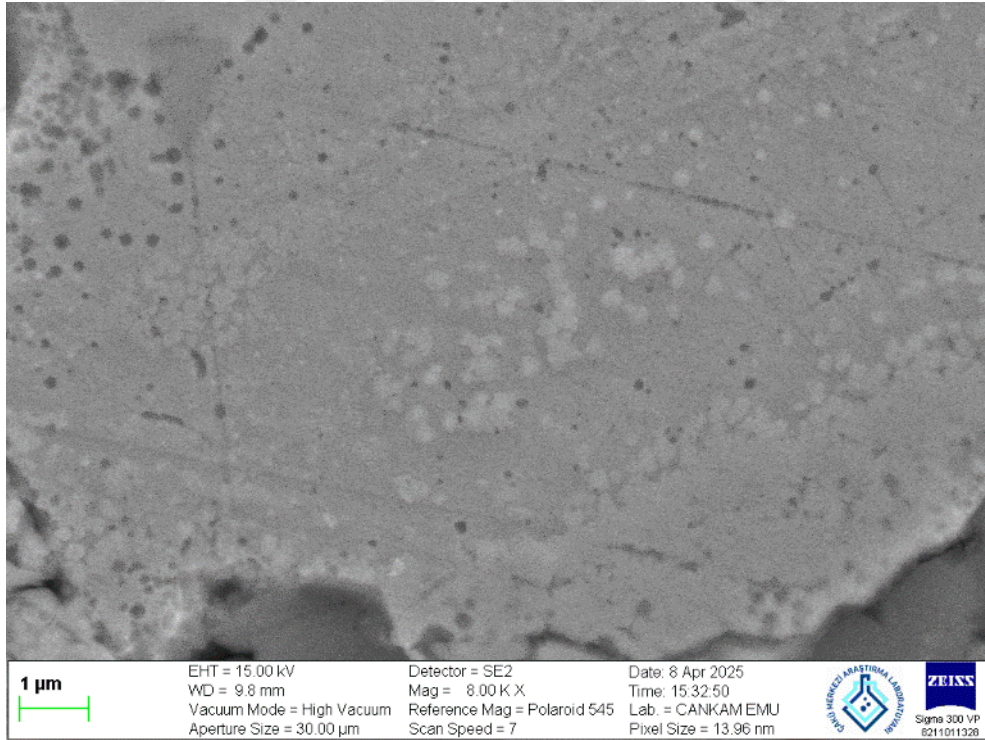


(b)

Şekil 4.24 Silisyum/ %7,5/1200°C Büyütme oranı a) 1KX b) 2KX c) 4KX d) 8KX



(c)



(d)

Şekil 4.24'ün devamı

Şekil 4.19 ile Şekil 4.24 arasında yer alan Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı mikroyapısal incelemeler, kompozit yapıya sahip yüksek entropili alaşım (YEA) sistemine belirli oranlarda ilave edilen Silisyum (Si) elementinin, alaşımın mikro yapı düzeyindeki morfolojik özelliklerine doğrudan ve kayda değer etkilerde bulunduğunu açıkça göstermektedir. Yapılan detaylı gözlemler neticesinde, Silisyum katkısının sistem içerisinde yalnızca görsel kontrast farklılıkları yaratmakla kalmadığı, aynı zamanda mikroyapı bileşenlerinde kompozisyonel ve yapısal anlamda önemli değişimlere yol açtığı tespit edilmiştir. Özellikle Silisyum içeriğinde meydana gelen artışla paralel olarak, SEM görüntülerinde yüksek yansıtıcılık gösteren ve parlak beyaz tonlarda gözlemlenen Silisyum esaslı ikinci faz partiküllerinin hem sayısal olarak çoğaldığı hem de boyutsal olarak büyüme eğilimi sergilediği belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu durum, Silisyum ilavesinin sadece kantitatif (miktar bazlı) bir değişken olmadığını, aynı zamanda mikroyapının kalitatif özelliklerini de (örneğin partikül boyutu, şekli ve dağılım karakteristiği gibi) etkileyen belirleyici bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

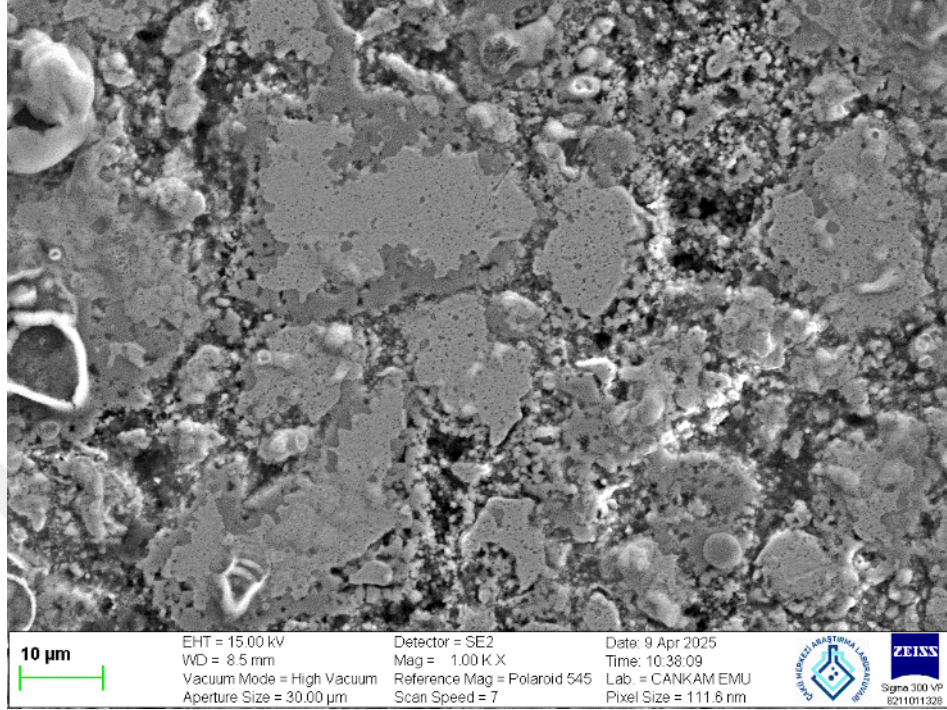
Söz konusu yapısal değişiklikler, Silisyum katkısının YEA matrisi içerisindeki nükleasyon mekanizmaları ile partikül büyümesi süreçlerinin termodinamik kararlılıkla birlikte kinetik değişkenlere de son derece duyarlı olduğunu göstermektedir. Bilindiği üzere, Silisyumun alaşım sistemleri içerisindeki katı faz çözünürlüğü sınırlı olduğundan, belirli bir konsantrasyon eşiğinin üzerine çıktığında faz ayrışması kaçınılmaz hale gelmekte ve bu durum mikro yapısal çeşitliliğin artmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, Silisyum atomlarının matristeki dağılıma davranışları, yeni fazların çekirdeklenmesini teşvik etmekte ve bu çekirdeklerin büyüme kinetiği, difüzyon hızları, yüzey enerjileri ile sinterleme parametreleri gibi bir dizi fiziksel ve kimyasal faktör tarafından kontrol edilmektedir.

Silisyumun belirli bir kritik derişimin üzerinde sisteme dahil edilmesi, sadece mevcut fazlar arasındaki dengeyi bozmakla kalmayıp aynı zamanda yeni intermetalik veya yarı-kararlı fazların oluşumunu tetikleyebilir. Ayrıca, daha önce oluşmuş olan Si esaslı fazların koalesans (birleşme) yoluyla daha büyük hacimlere ulaşması da mümkündür. Bu tür büyüme davranışları, matris ile parçacık arasında oluşan arayüzeylerde

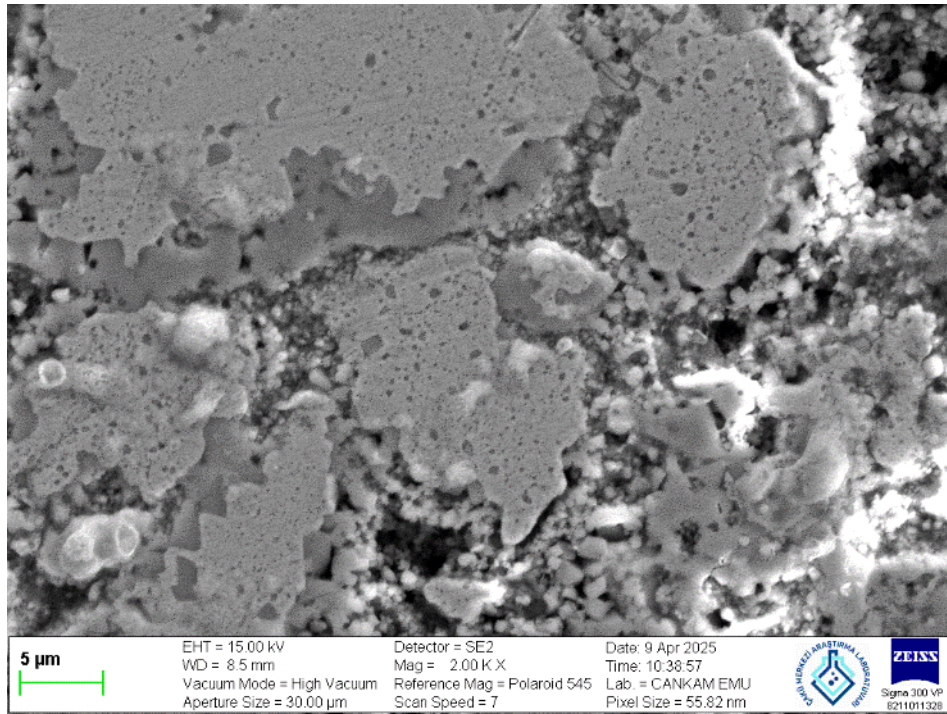
bağlanma kalitesini olumsuz etkileyebilir; zira, artan boyut farkı ve uyumsuzluk gerilmeleri, mikroyapı bütünlüğünün bozulmasına, lokal gerilim birikimlerine ve çatlak başlangıçlarının oluşmasına yol açabilmektedir. Bu da özellikle yorulma direnci, darbe tokluğu ve çekme dayanımı gibi mühendislik açısından kritik olan mekanik özelliklerde düşüşlerle sonuçlanabilir. Bununla birlikte, büyüyen parçacıkların dağılımındaki düzensizlikler, özellikle termomekanik yüklemelere maruz kalan uygulamalarda performans zayıflıklarına yol açabilir. Zira homojen faz dağılımı, yük altında gerilme transferinin dengeli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Mikroyapı içerisinde gözlemlenen boyutsal büyüme ve düzensiz dağılım, bu dengeyi bozarak çatlak ilerlemesini hızlandırabilir ve erken hasarlara sebebiyet verebilir. Dolayısıyla, Silisyum esaslı fazların mikroyapı içerisindeki büyüklüğü, dağılım karakteristiği ve faz kompozisyonu gibi parametrelerin titizlikle kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu tür kontrolün sağlanabilmesi için, toz metalurjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen YEA kompozit yapılarında sinterleme sıcaklığı, presleme basıncı, ısıtma işlem süresi, bekletme atmosferi gibi üretim değişkenlerinin Silisyum içeriğine uygun biçimde optimize edilmesi kaçınılmazdır.

Sonuç olarak, Şekil 4.19 ile Şekil 4.24 arasında elde edilen SEM verileri doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, Silisyum katkısının YEA sisteminde yalnızca mikro ölçekli yapısal değişimlere değil, aynı zamanda malzemenin makroskobik mekanik performansına da doğrudan etki ettiğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sebeple, üretim süreci boyunca Silisyum ilavesinin sebep olabileceği tüm mikroyapısal dönüşümler dikkatle izlenmeli, üretim parametreleri dinamik biçimde uyarlanmalı ve optimize edilmelidir. Bu yaklaşım sayesinde hem mikro yapısal bütünlük korunabilir hem de malzemenin uzun vadeli yapısal stabilitesi ve mühendislik uygulamalarındaki işlevselliği artırılabilir. Özellikle yüksek performans gerektiren endüstriyel uygulamalar için geliştirilen Silisyum katkılı YEA kompozitlerinin başarısı, üretim sürecine yönelik yürütülecek sistematik bir kontrol ve bilimsel temelli bir optimizasyon stratejisiyle doğrudan ilişkilidir. Bu yönüyle, yapılan bu mikroyapısal analiz çalışması, yalnızca mevcut sistemi açıklamakla kalmayıp aynı zamanda gelecekteki tasarım ve üretim süreçlerine yönelik yol gösterici bir temel teşkil etmektedir.

1000°C ve 1200°C sıcaklıklarda ana bileşen olarak üretilen YEA'ların SEM görüntüleri Şekil 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.

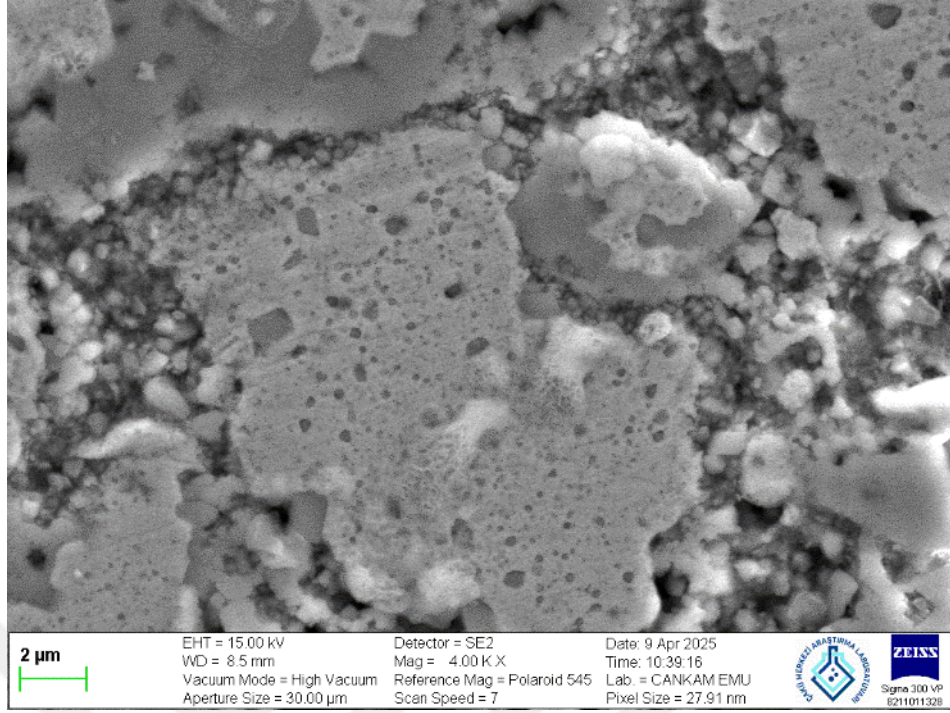


(a)

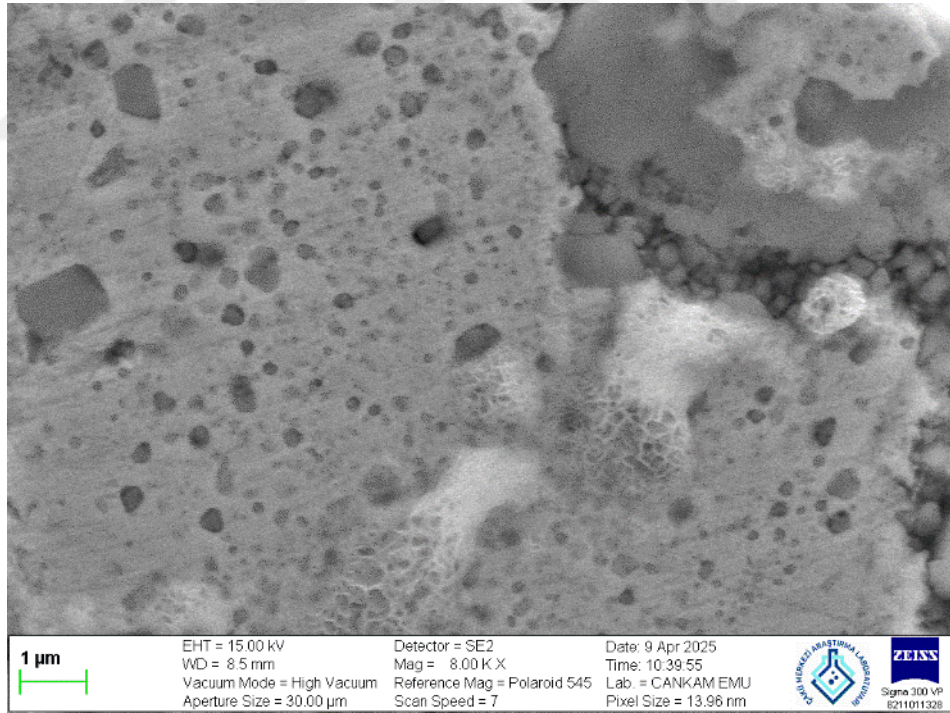


(b)

Şekil 4.25 Ana Bileşen (Cantor) 1000°C büyütme oranı: a) 1,00Kx b) 2,00Kx c) 4,00Kx d) 8,00Kx

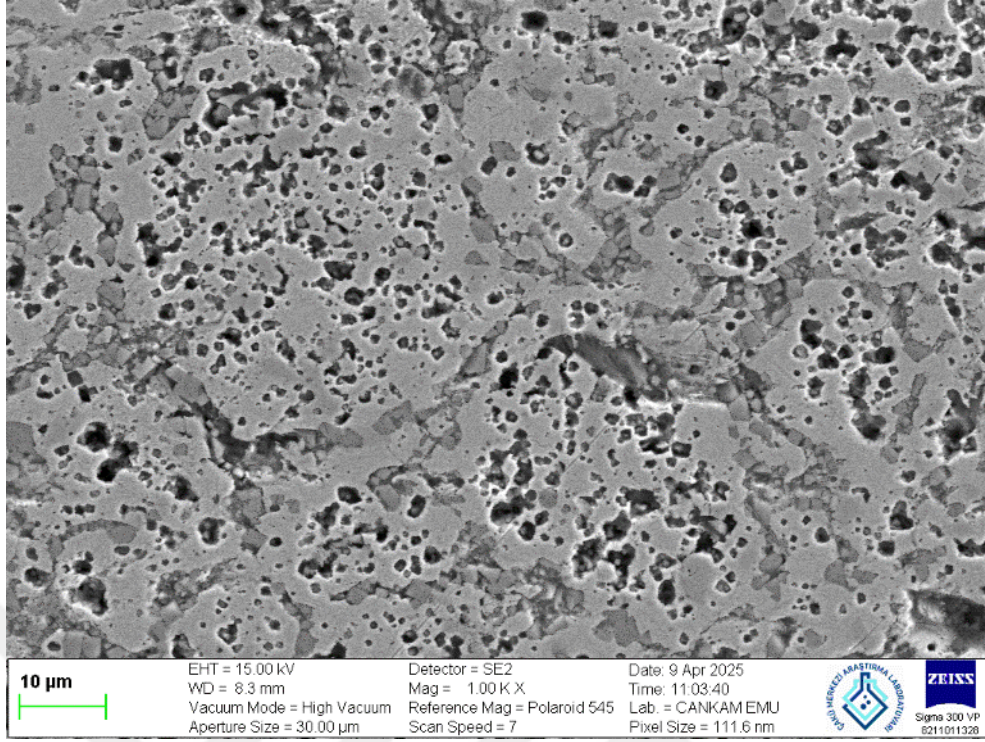


(c)

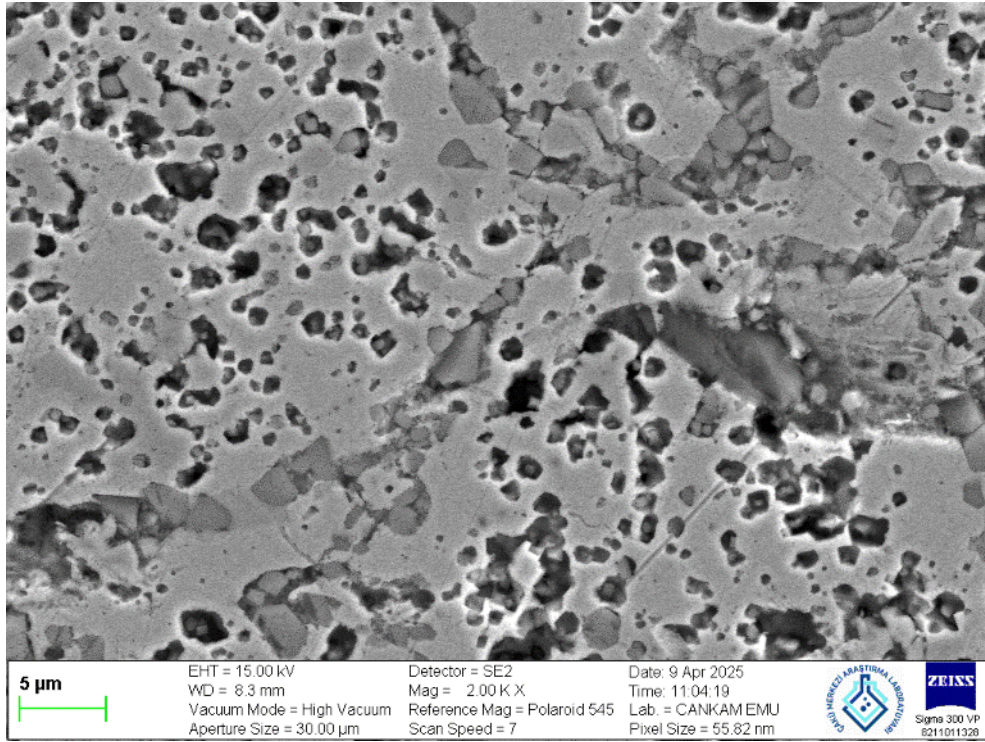


(d)

Şekil 4.25'in devamı

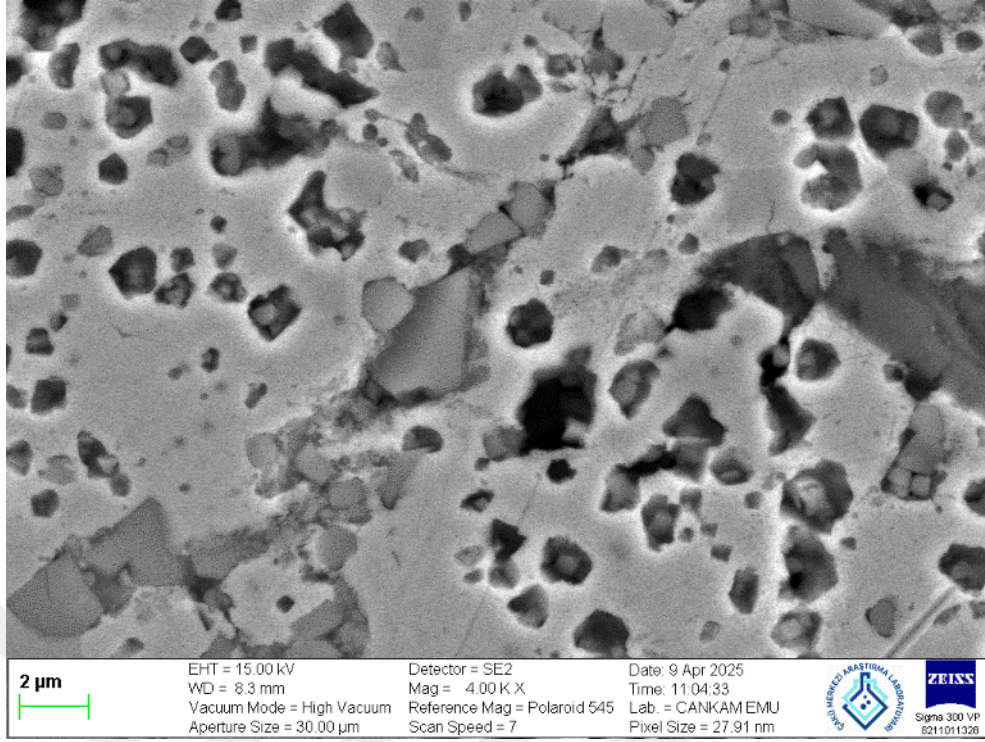


(a)

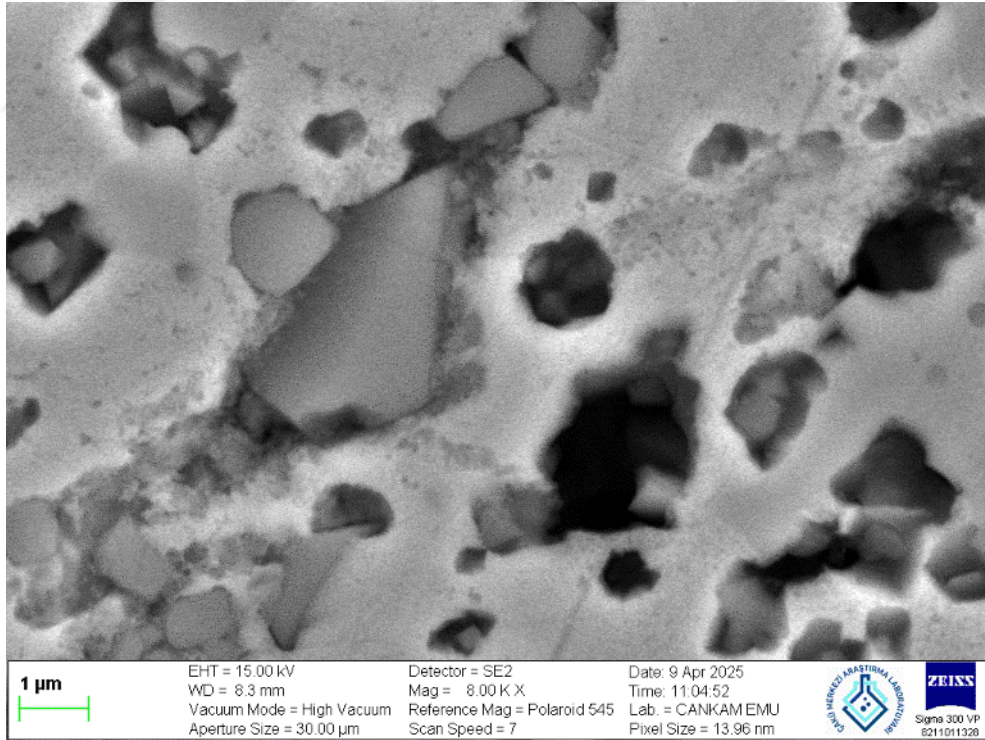


(b)

Şekil 4.26 Ana Bileşen (Cantor) 1200°C büyütme oranı: a) 1,00Kx b) 2,00Kx c) 4,00Kx d) 8,00Kx



(c)



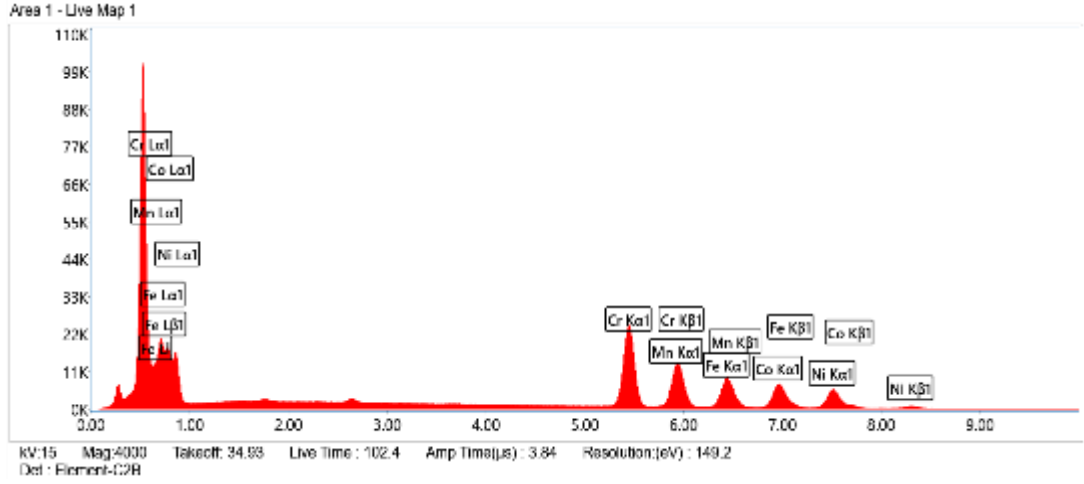
(d)

Şekil 4.26'nın devamı

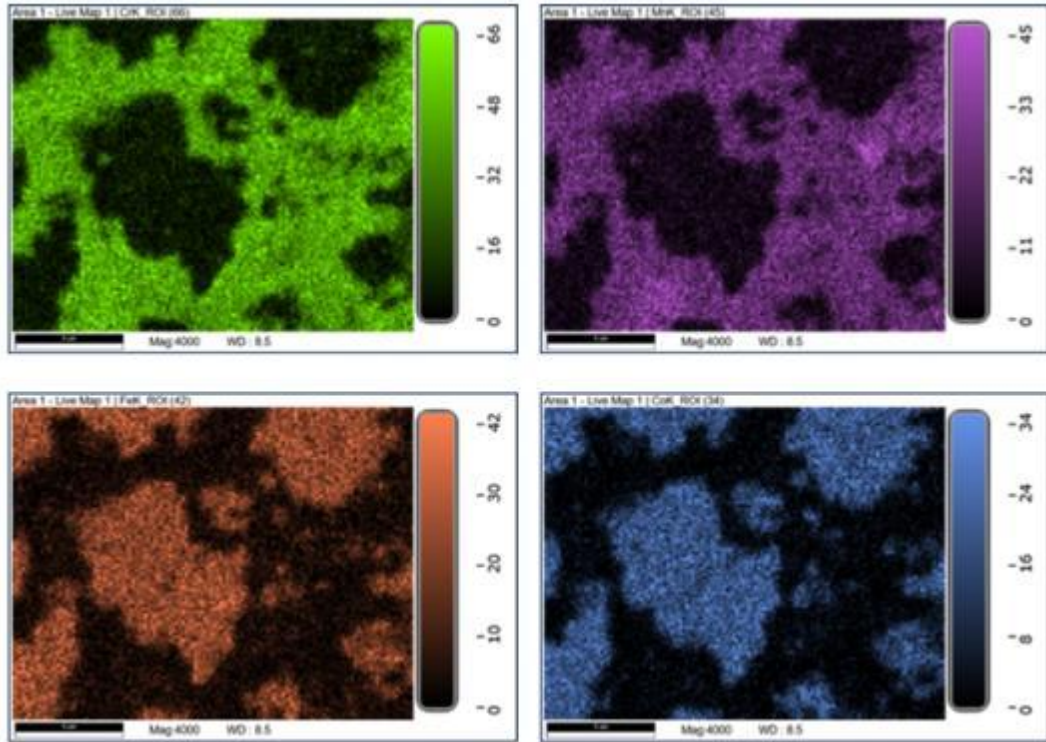
Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da yer alan Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope - SEM) görüntülerine dayanılarak yapılan kapsamlı mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları, kompozit yapıdaki yüksek entropili alaşım (YEA) sistemine ait mikro yapı davranışlarının, katkı maddeleri ve üretim koşulları doğrultusunda önemli ölçüde değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle gözlemlenen morfolojik farklılıklar, katkı elementlerinin YEA matrisinde nükleasyon, faz ayrışması ve partikül büyümesi gibi temel mikroyapısal süreçler üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğunu açık bir şekilde göstermektedir. İlgili SEM görüntüleri incelendiğinde, büyüme eğiliminde olan parçacıkların düzensiz dağılım sergilemesi, mikroyapı homojenliğinde önemli sapmalara yol açmaktadır. Bu tür morfolojik düzensizliklerin, özellikle yüksek sıcaklık, tekrarlı yükleme veya titreşim gibi zorlu hizmet koşullarında çalışan yapısal bileşenlerin mekanik performansını olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir. Zira, homojen faz dağılımı, uygulanan dış yüklerin mikroyapı boyunca dengeli bir şekilde iletilmesini ve stres konsantrasyonlarının önlenmesini sağlayarak, malzemenin dayanım ve servis ömrünü artıran kritik bir faktördür. Ancak, mikroyapı içerisinde belirgin bir şekilde gözlemlenen partikül büyümesi ve bu partiküllerin düzensiz şekilde konumlanması, söz konusu gerilme transfer mekanizmasında bozulmalara neden olabilmekte; bu da özellikle çatlakların başlangıç noktalarının oluşması ve ilerlemesi açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. Mikroskobik düzeydeki bu yapısal düzensizlikler, zamanla makroskopik seviyede erken hasarlara, yorulma dayanımında düşüşlere ve kırılma tokluğunda azalmaya neden olabilir. Bu nedenle, YEA kompozit sistemlerinde faz dağılımının düzenli ve kontrollü bir şekilde sağlanması, sadece yapısal kararlılık açısından değil, aynı zamanda uzun ömürlü ve güvenilir mühendislik uygulamaları için de büyük önem arz etmektedir.

4.2 EDX ve Mapping Görüntü Analiz Sonuçları

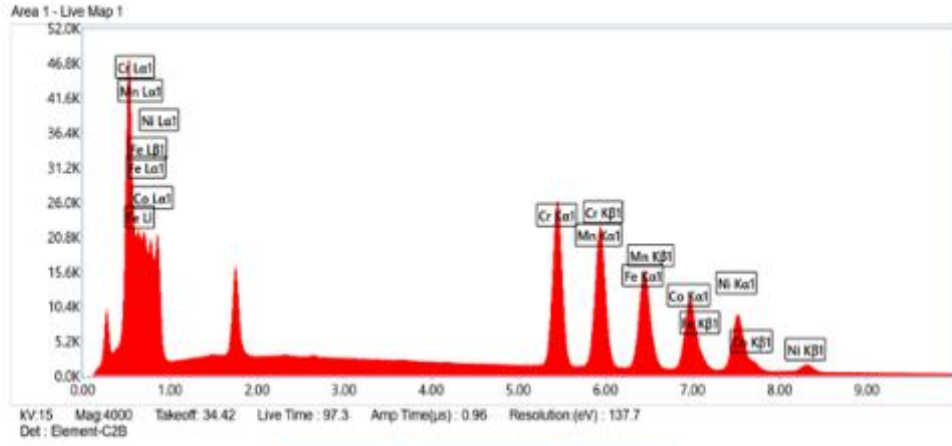
SEM görüntüleme ile birlikte numunelere ait EDX analizi yapılmış ayrıca haritalama (Mapping) görüntüleri de alınmıştır. Bunlara ait görüntüler aşağıya kaydedilmiştir.



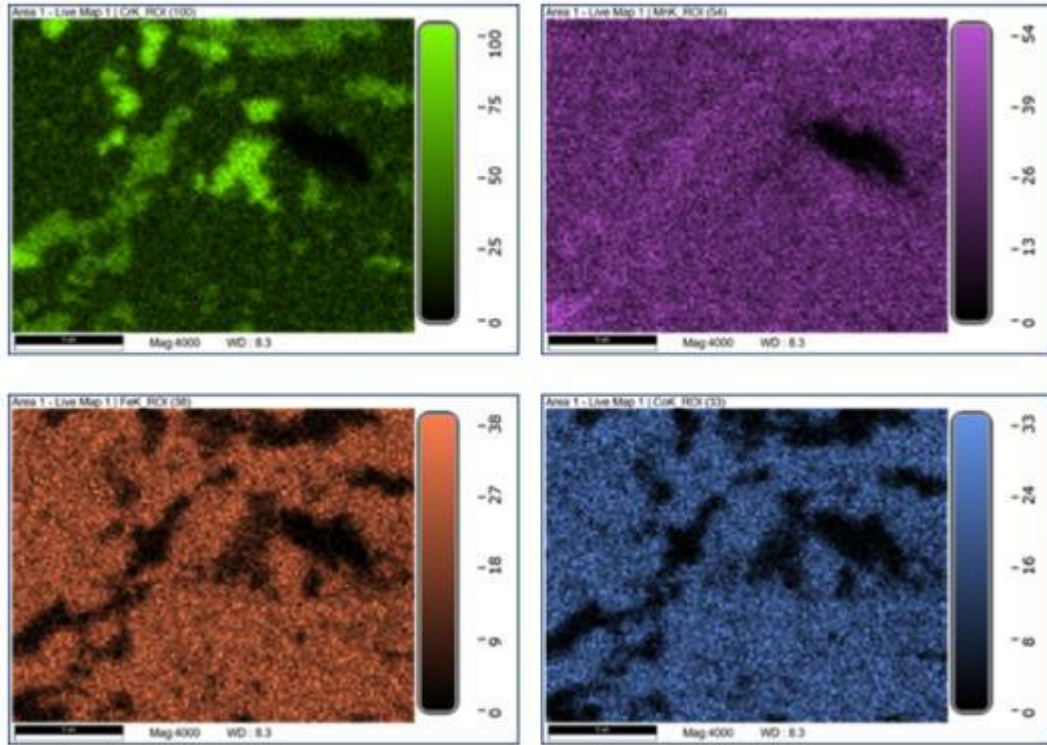
Element	Weight %	Atomic %
Cr K	31.99	34.07
Mn K	16.53	16.66
Fe K	16.04	15.90
Co K	18.05	16.96
Ni K	17.39	16.40



Şekil 4.27 Ana bileşene ait (Cantor) EDX ve mapping (1000°C)



Element	Weight %	Atomic %
Cr K	23.18	24.85
Mn K	20.83	21.14
Fe K	18.45	18.42
Co K	18.59	17.59
Ni K	18.94	17.99

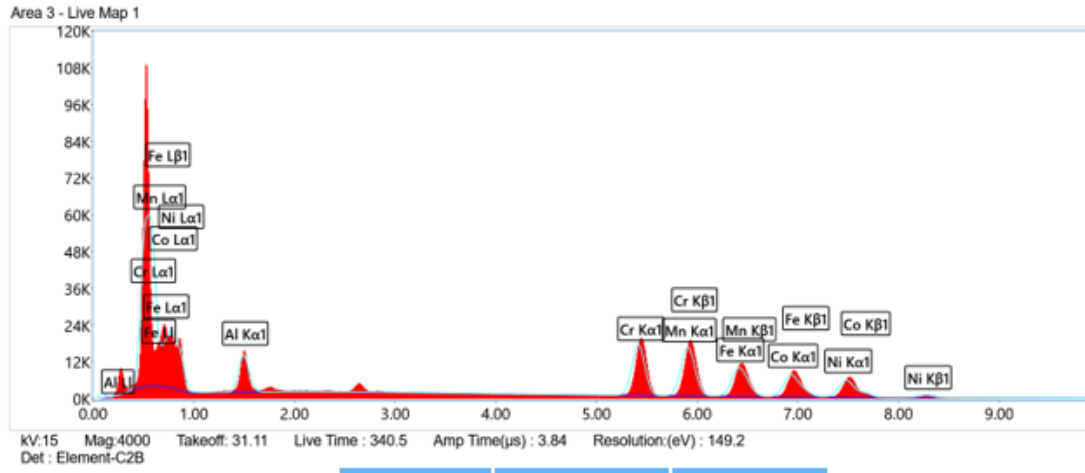


Şekil 4.28 Ana bileşene ait (Cantor) EDX ve mapping (1200°C)

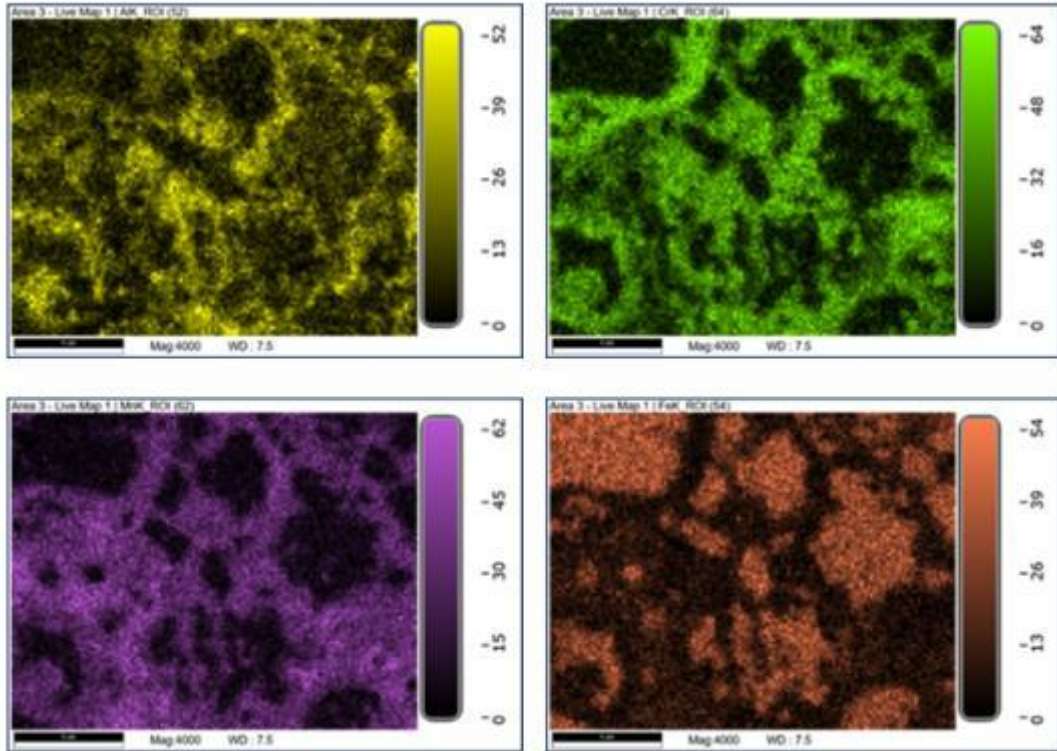
Yüksek entropili alaşım (YEA) sistemlerinde, alaşımı oluşturan temel elementler ile takviye amacıyla ilave edilen fazların mikro yapısal düzeydeki dağılım karakteristiklerini belirlemek amacıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tabanlı

elemental haritalama yöntemleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) analiz teknikleri birlikte kullanılmıştır. Bu analizler kapsamında elde edilen veriler, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’te detaylı biçimde sunulmuştur. Yürütülen incelemelerde, YEA sisteminin temel bileşenlerini Krom (Cr), Mangan (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) gibi geçiş metalleri oluşturmaktadır.

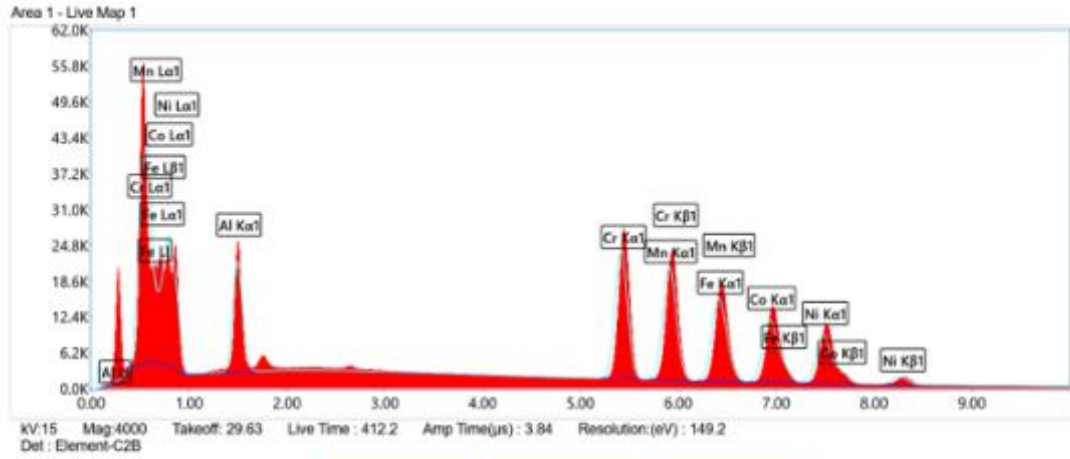




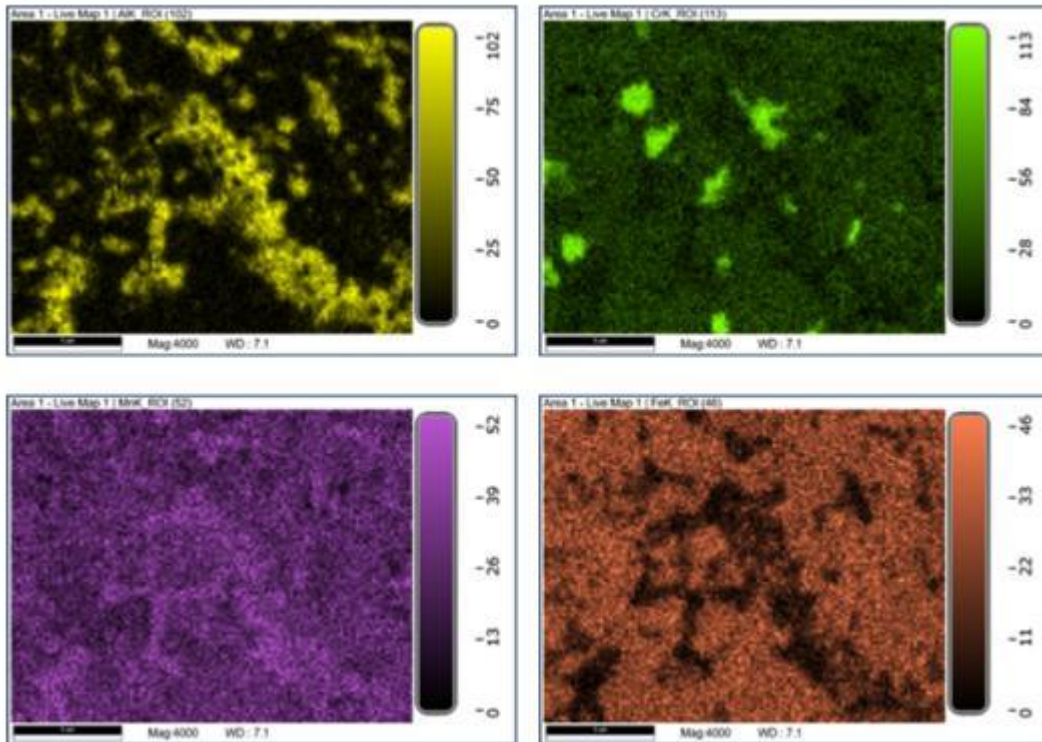
Element	Weight %	Atomic %
Al K	5.34	10.45
Cr K	20.50	20.81
Mn K	21.86	21.01
Fe K	16.26	15.37
Co K	18.31	16.40
Ni K	17.74	15.96



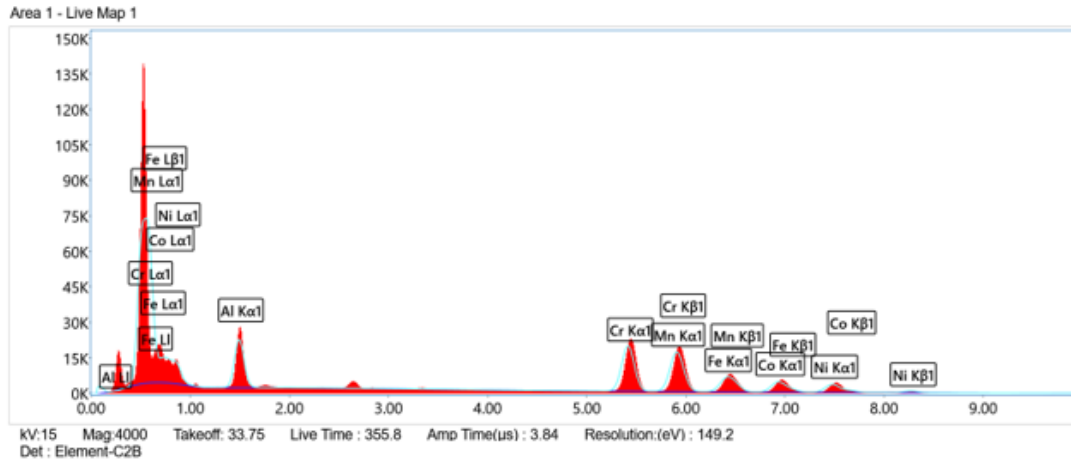
Şekil 4.29 Alüminyum katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping



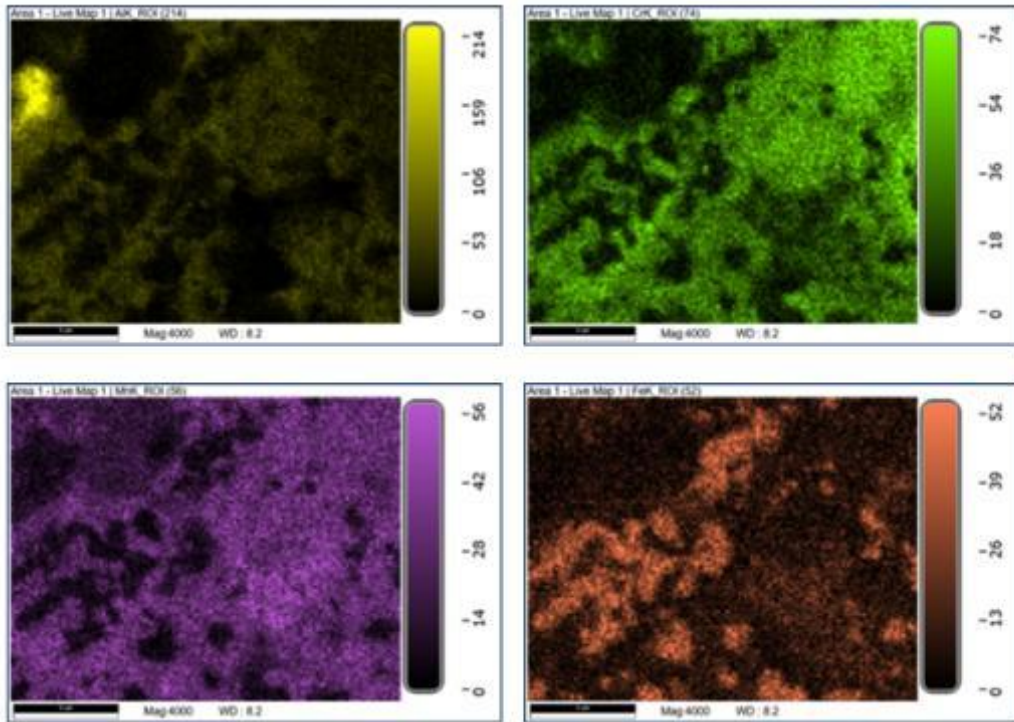
Element	Weight %	Atomic %
Al K	5.94	11.58
Cr K	19.38	19.61
Mn K	18.25	17.47
Fe K	18.06	17.01
Co K	19.22	17.16
Ni K	19.16	17.17



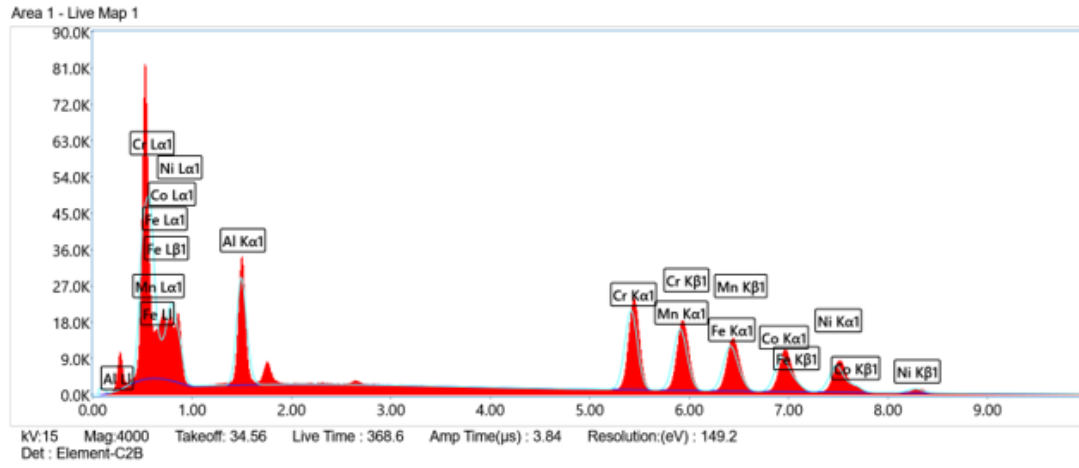
Şekil 4.30 Alüminyum katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping



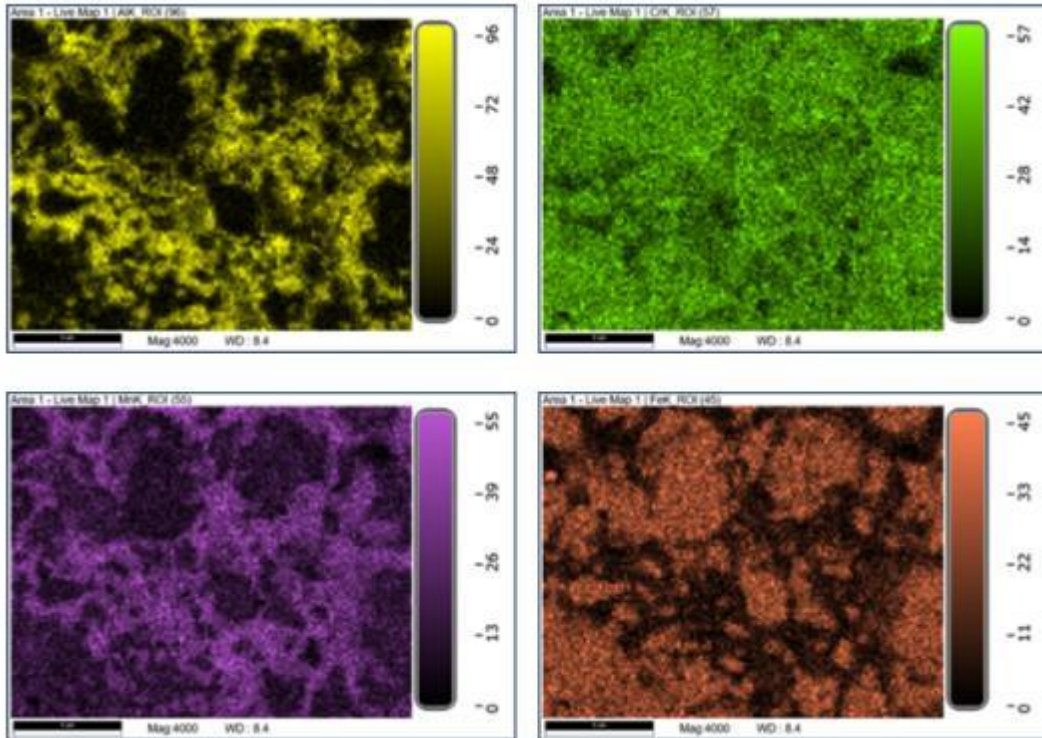
Element	Weight %	Atomic %
Al K	9.81	18.17
Cr K	27.79	26.71
Mn K	25.97	23.63
Fe K	11.59	10.37
Co K	12.60	10.69
Ni K	12.25	10.43



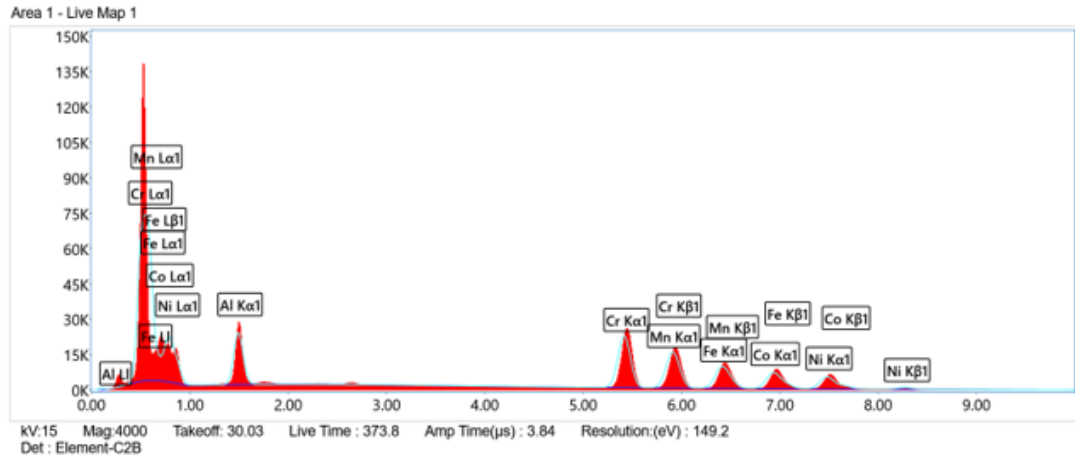
Şekil 4.31 Alüminyum katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping



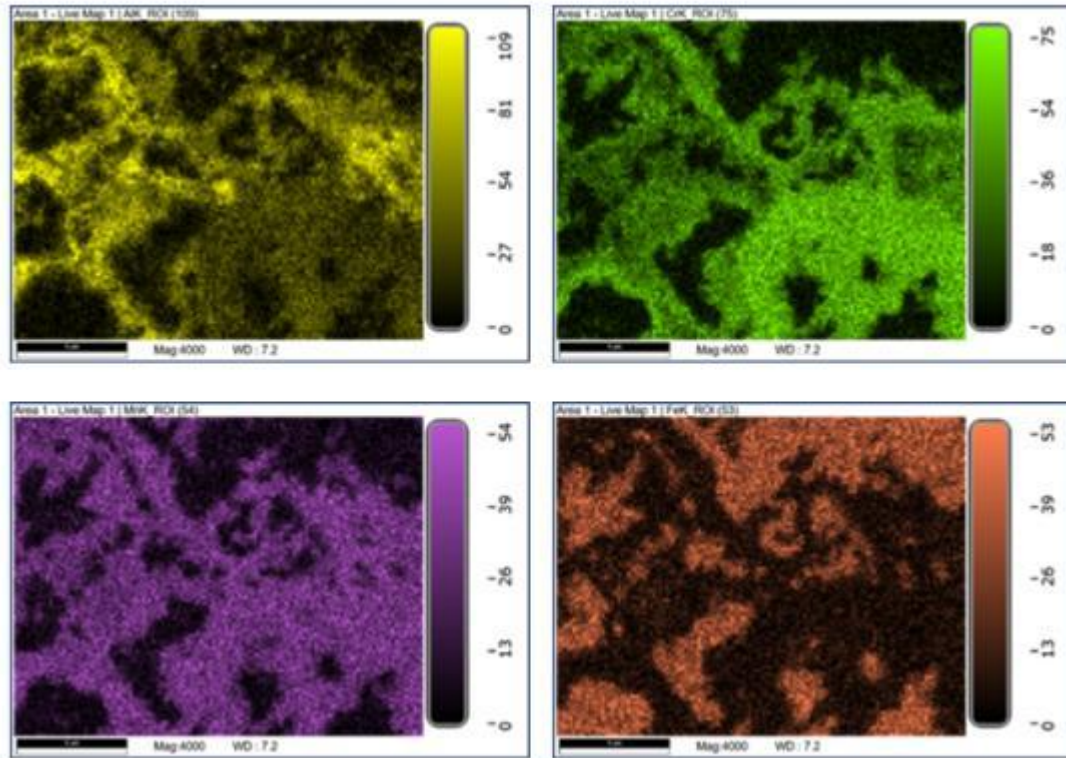
Element	Weight %	Atomic %
Al K	9.62	18.05
Cr K	20.65	20.11
Mn K	16.73	15.42
Fe K	16.97	15.39
Co K	18.28	15.71
Ni K	17.74	15.31



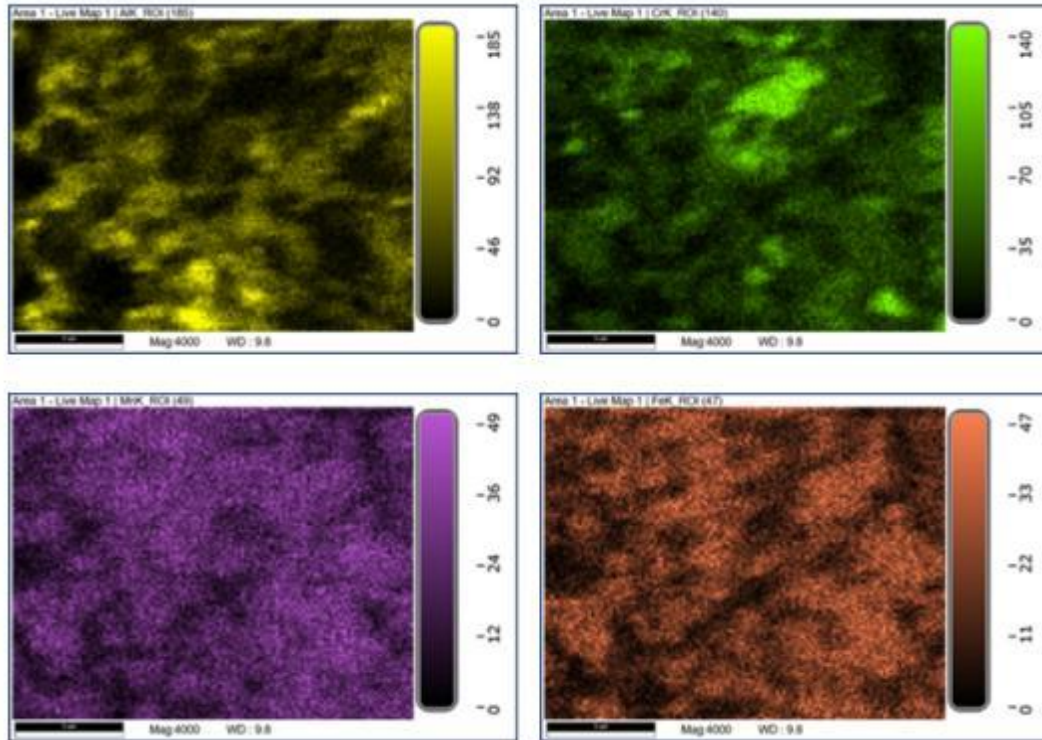
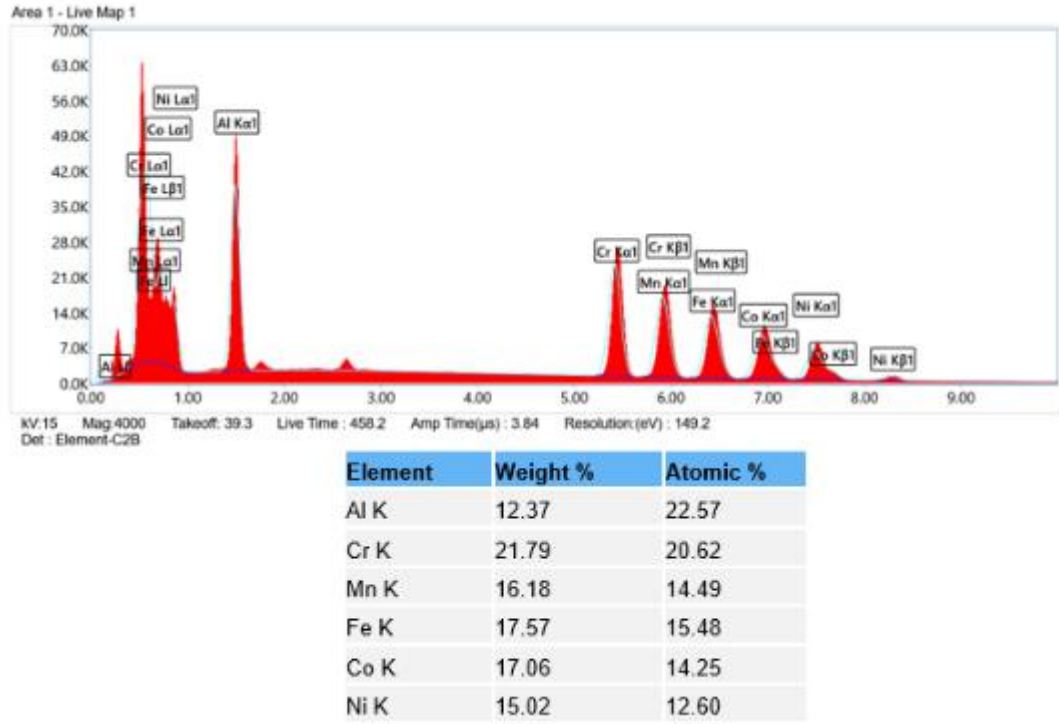
Şekil 4.32 Alüminyum katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping



Element	Weight %	Atomic %
Al K	8.91	16.75
Cr K	25.72	25.08
Mn K	18.24	16.83
Fe K	15.43	14.01
Co K	16.21	13.95
Ni K	15.48	13.37



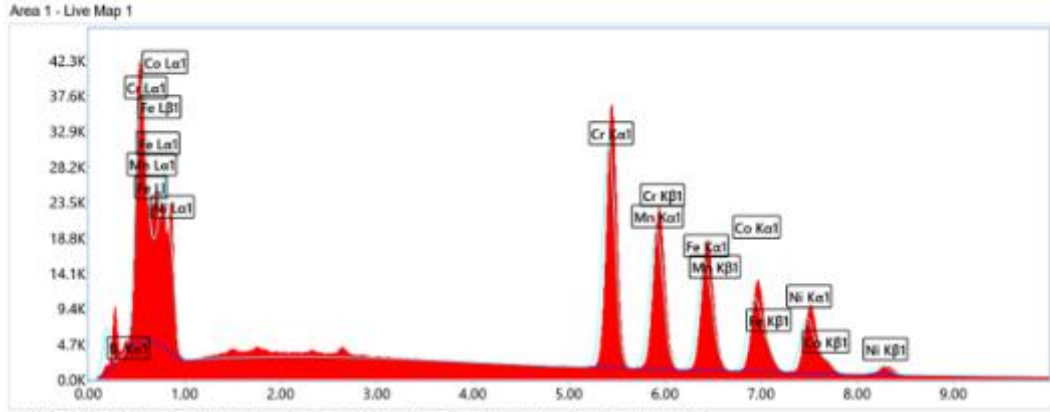
Şekil 4.33 Alüminyum katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping



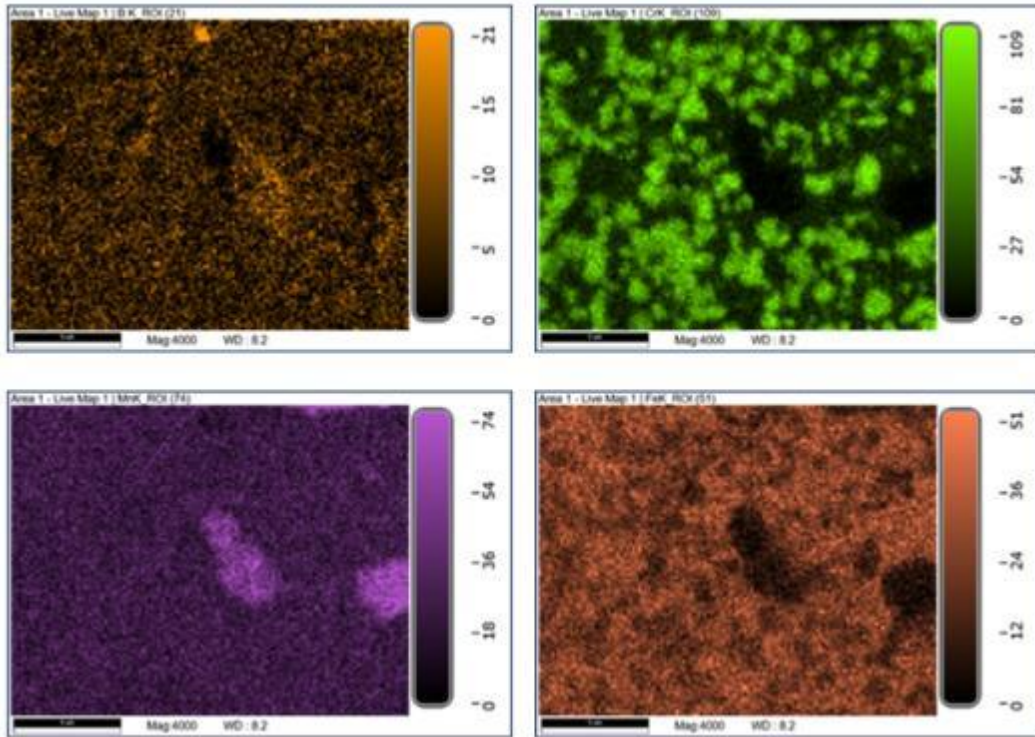
Şekil 4.34 Alüminyum katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping

Yüksek entropili alaşım (YEA) sistemlerinde, alaşımı oluşturan temel elementler ile takviye amacıyla ilave edilen fazların mikro yapısal düzeydeki dağılım karakteristiklerini belirlemek amacıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tabanlı

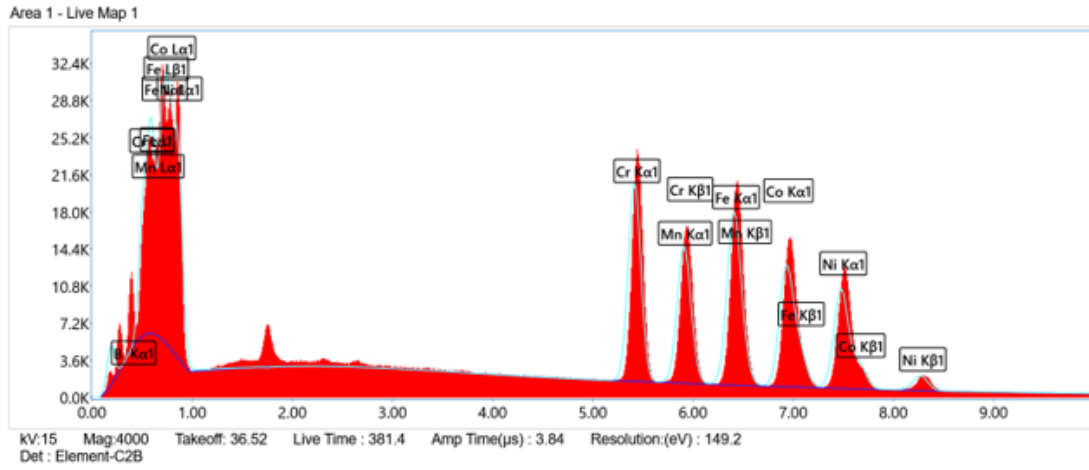
elemental haritalama yöntemleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) analiz teknikleri birlikte kullanılmıştır. Bu analizler kapsamında elde edilen veriler, Şekil 4.29 ile 4.34 arasında detaylı biçimde sunulmuştur. Yürütülen incelemelerde, YEA sisteminin temel bileşenlerini Krom (Cr), Mangan (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) gibi geçiş metalleri oluşturmakta olup, bu yapı içerisine takviye fazları olarak Al elementleri belirli oranlarda eklenmiştir. Sunulan SEM tabanlı elementel dağılım haritaları dikkatle incelendiğinde, takviye amacıyla eklenen Al elementlerinin alaşım matrisi içerisinde oldukça düzgün ve homojen bir dağılım sergilediği açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu durum, parçacıkların YEA matrisine entegre olma biçiminin, üretim sürecinde uygulanan sinterleme koşulları, katkı oranları ve difüzyon mekanizmalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Elementlerin mikroyapı boyunca eşit bir biçimde dağılması, özellikle çok fazlı ve kompleks yapıya sahip alaşımlarda oldukça arzu edilen bir özelliktir. Çünkü bu homojen dağılım durumu, sadece mikroskobik yapısal dengeyi değil; aynı zamanda malzemenin makroskobik özelliklerini de olumlu yönde etkilemektedir. Nitekim elementlerin düzensiz veya lokal yoğunluk farklılıkları gösteren biçimde dağılması durumunda, gerilim yığılmaları, faz ayrışmaları veya kırılğan bölgeler gibi istenmeyen yapısal kusurların ortaya çıkması muhtemeldir. Buna karşın, elde edilen SEM ve EDS analiz sonuçları, katkı elementlerinin alaşım matrisiyle yüksek uyum gösterdiğini ve bu durumun YEA sisteminin fiziksel, kimyasal ve mekanik performans parametrelerine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır.



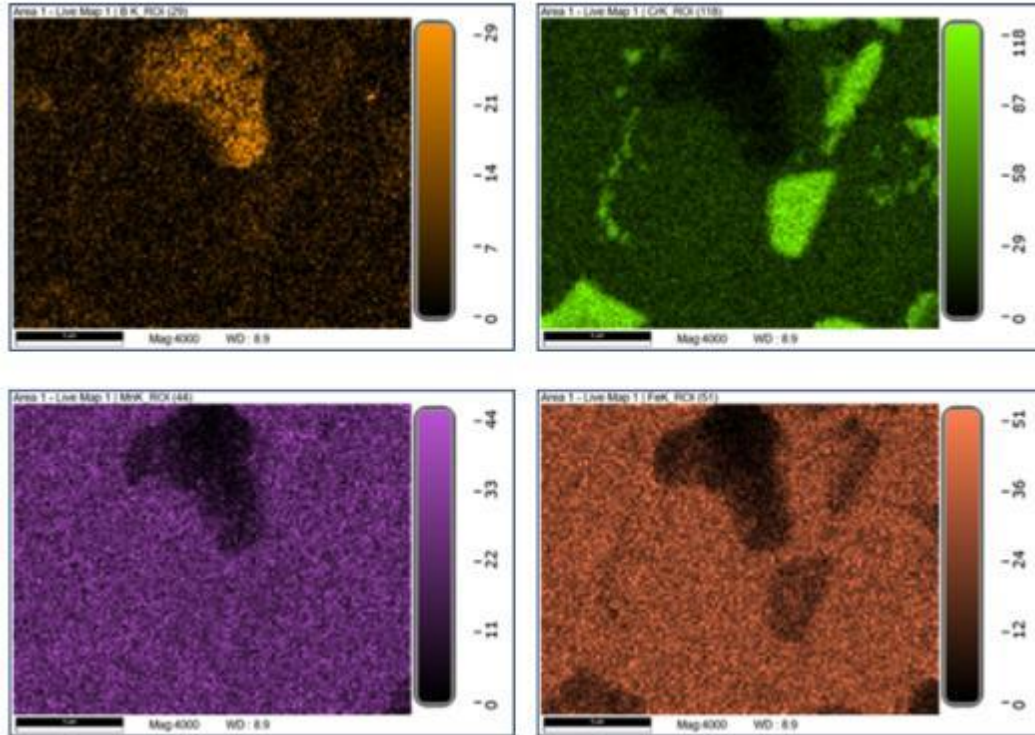
Element	Weight %	Atomic %
B K	19.71	55.77
Cr K	22.35	13.15
Mn K	13.67	7.61
Fe K	15.79	8.65
Co K	14.61	7.58
Ni K	13.88	7.23



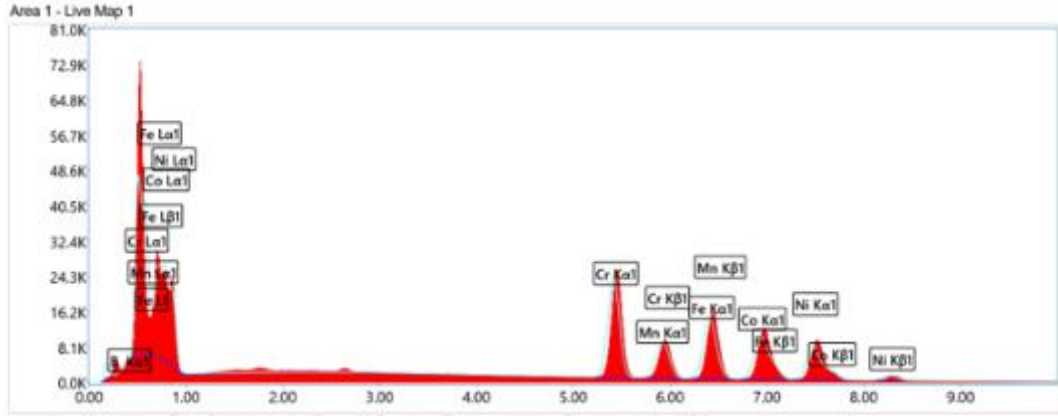
Şekil 4.35 Bor katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping



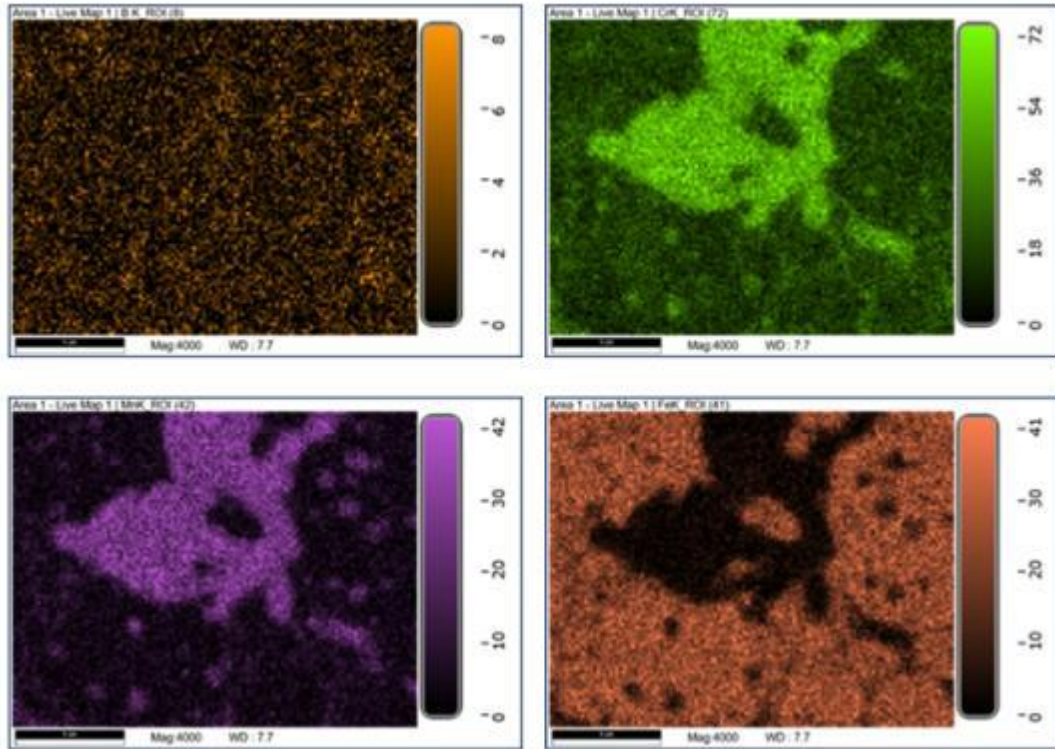
Element	Weight %	Atomic %
B K	15.19	48.27
Cr K	14.90	9.84
Mn K	10.59	6.62
Fe K	20.21	12.43
Co K	19.11	11.14
Ni K	20.00	11.70



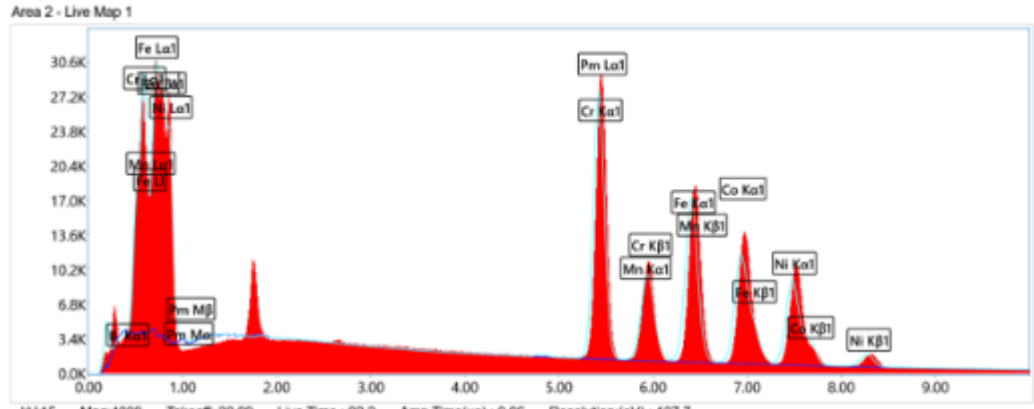
Şekil 4.36 Bor katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping



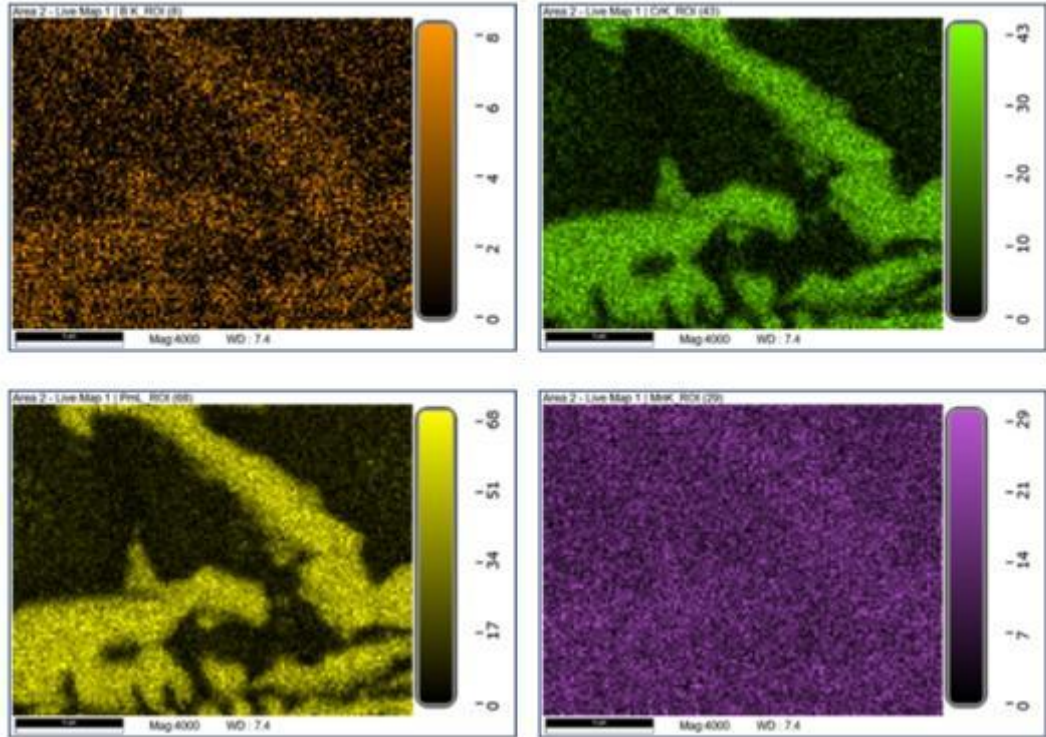
Element	Weight %	Atomic %
B K	14.94	47.65
Cr K	21.09	13.98
Mn K	5.83	3.66
Fe K	20.30	12.53
Co K	18.86	11.03
Ni K	18.98	11.15



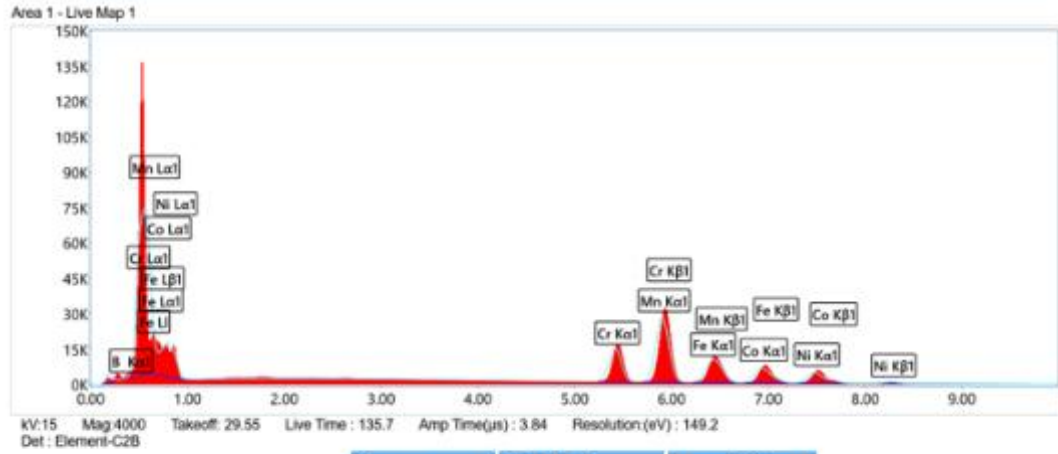
Şekil 4.37 Bor katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping



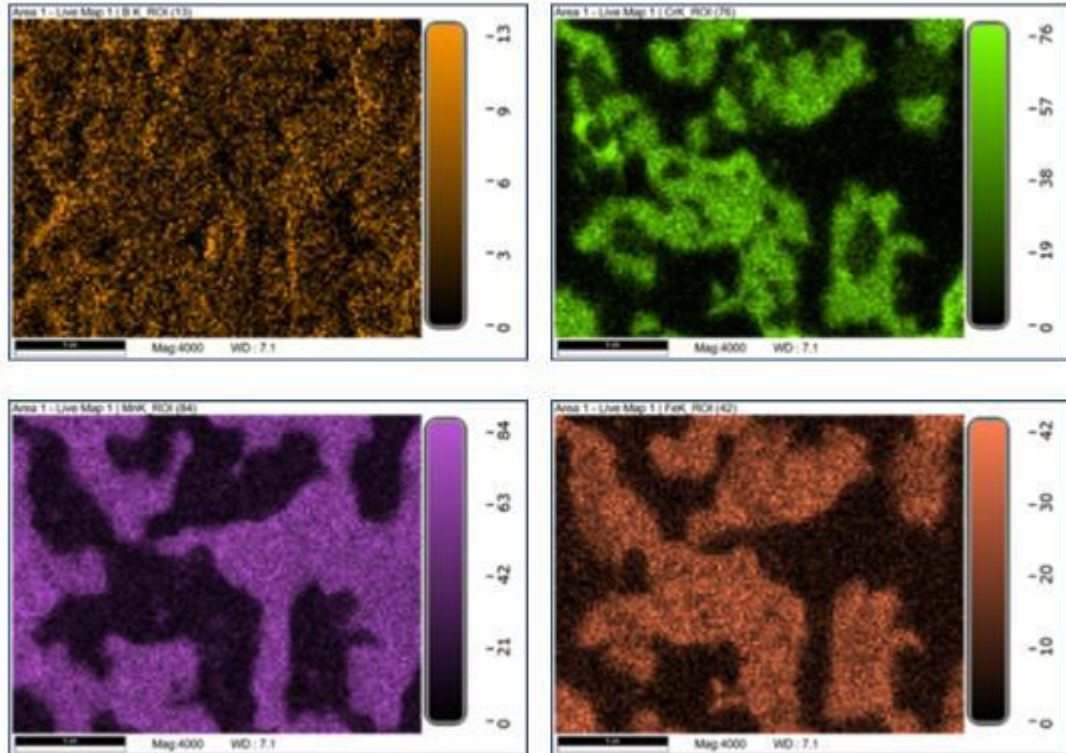
Element	Weight %	Atomic %
B K	36.39	77.66
Cr K	9.04	4.01
Mn K	2.40	1.01
Fe K	13.64	5.63
Co K	11.74	4.60
Ni K	12.07	4.74
Pm L	14.73	2.34



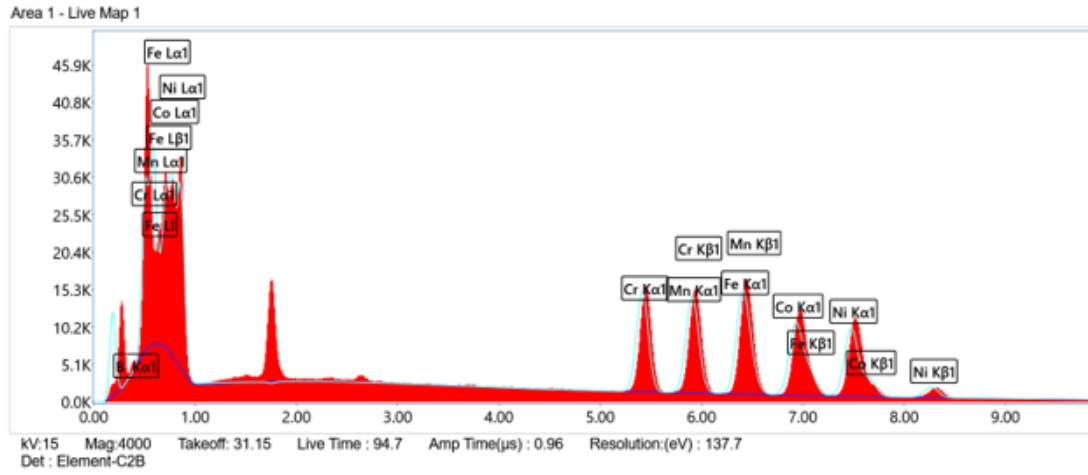
Şekil 4.38 Bor katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping



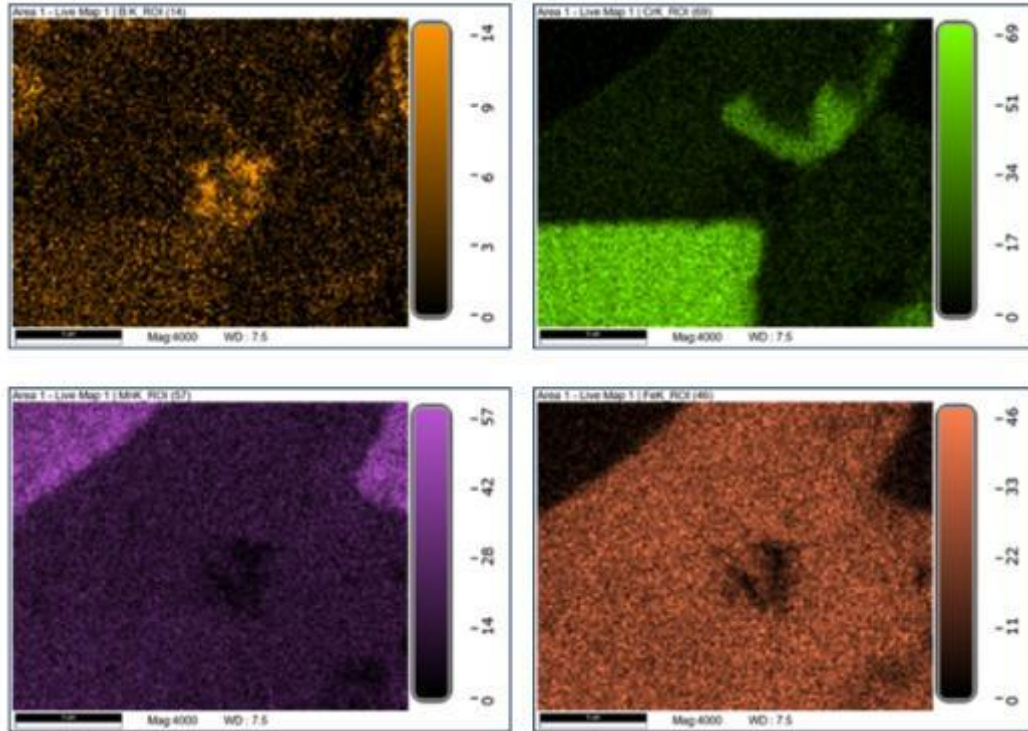
Element	Weight %	Atomic %
B K	17.27	51.78
Cr K	13.93	8.68
Mn K	32.74	19.32
Fe K	11.43	6.64
Co K	12.90	7.10
Ni K	11.73	6.48



Şekil 4.39 Bor katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping



Element	Weight %	Atomic %
B K	30.52	69.65
Cr K	9.89	4.69
Mn K	10.52	4.72
Fe K	15.51	6.85
Co K	15.23	6.38
Ni K	18.33	7.71

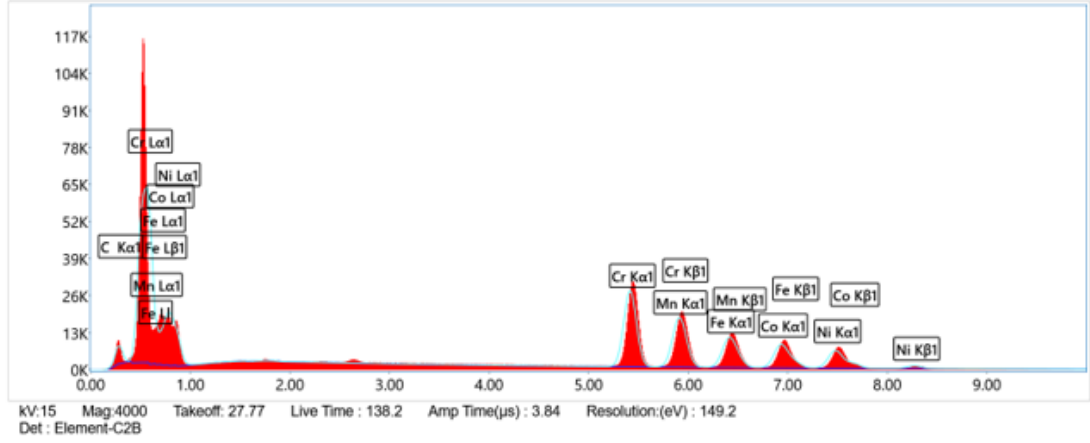


Şekil 4.40 Bor katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping

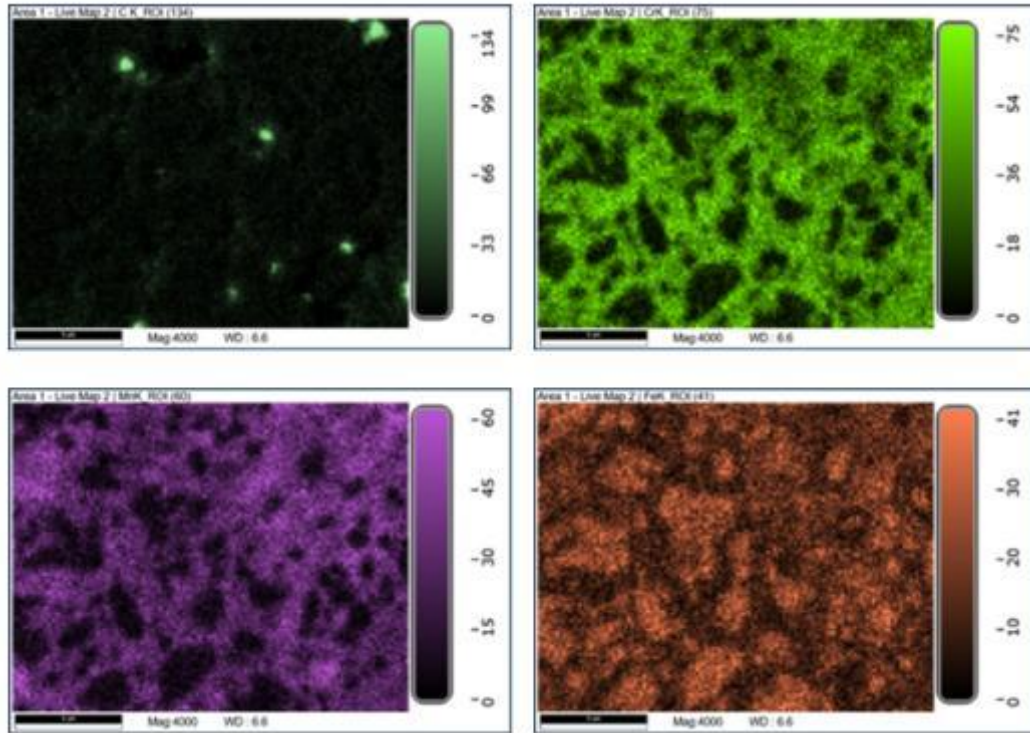
Yüksek entropili alaşım (YEA) sistemlerinde, alaşımı oluşturan temel elementler ile takviye amacıyla ilave edilen fazların mikro yapısal düzeydeki dağılım karakteristiklerini belirlemek amacıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tabanlı

elemental haritalama yöntemleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) analiz teknikleri birlikte kullanılmıştır. Bu analizler kapsamında elde edilen veriler, Şekil 4.35 ile 4.40 arasında detaylı biçimde sunulmuştur. Yürütülen incelemelerde, YEA sisteminin temel bileşenlerini Krom (Cr), Mangan (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) gibi geçiş metalleri oluşturmakta olup, bu yapı içerisine takviye fazları olarak B elementleri belirli oranlarda eklenmiştir. Sunulan SEM tabanlı elementel dağılım haritaları dikkatle incelendiğinde, takviye amacıyla eklenen B elementlerinin alaşım matrisi içerisinde oldukça düzgün ve homojen bir dağılım sergilediği açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu durum, parçacıkların YEA matrisine entegre olma biçiminin, üretim sürecinde uygulanan sinterleme koşulları, katkı oranları ve difüzyon mekanizmalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Elementlerin mikroyapı boyunca eşit bir biçimde dağılması, özellikle çok fazlı ve kompleks yapıya sahip alaşımlarda oldukça arzu edilen bir özelliktir. Çünkü bu homojen dağılım durumu, sadece mikroskobik yapısal dengeyi değil; aynı zamanda malzemenin makroskobik özelliklerini de olumlu yönde etkilemektedir. Nitekim elementlerin düzensiz veya lokal yoğunluk farklılıkları gösteren biçimde dağılması durumunda, gerilim yığılmaları, faz ayrışmaları veya kırılğan bölgeler gibi istenmeyen yapısal kusurların ortaya çıkması muhtemeldir. Buna karşın, elde edilen SEM ve EDS analiz sonuçları, katkı elementlerinin alaşım matrisiyle yüksek uyum gösterdiğini ve bu durumun YEA sisteminin fiziksel, kimyasal ve mekanik performans parametrelerine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

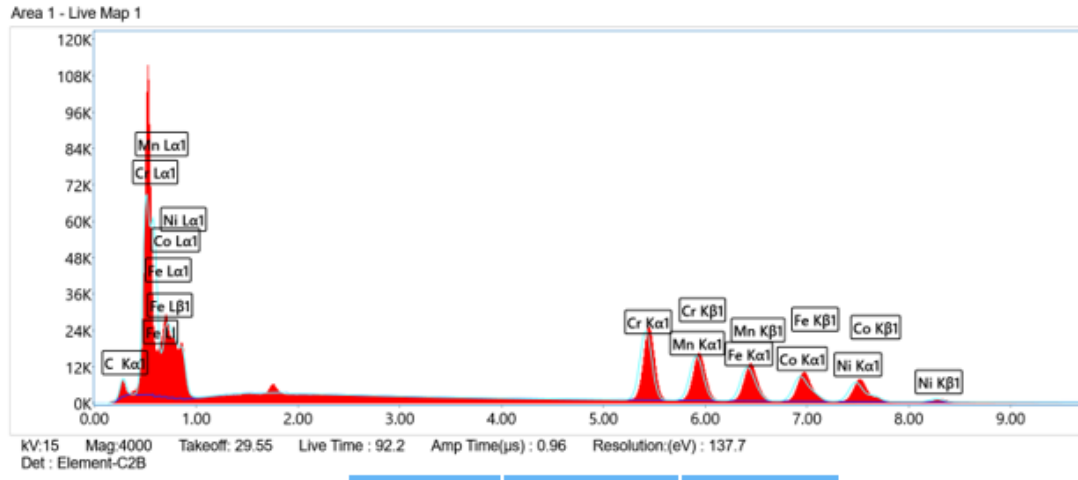
Area 1 - Live Map 2



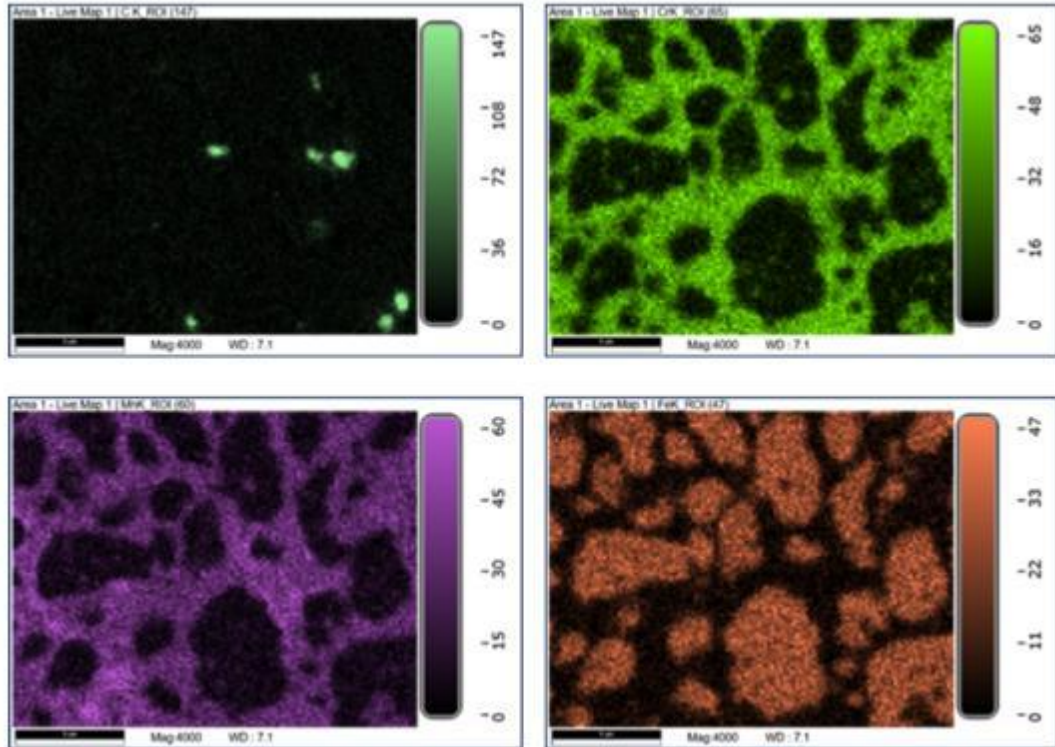
Element	Weight %	Atomic %
C K	16.33	47.41
Cr K	24.33	16.32
Mn K	15.91	10.10
Fe K	13.69	8.55
Co K	15.21	9.00
Ni K	14.52	8.63



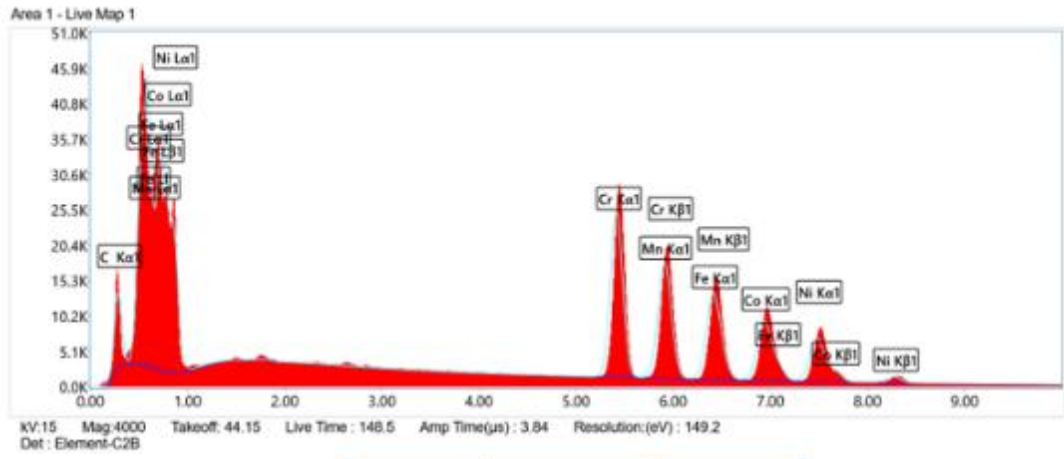
Şekil 4.41 Karbon katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping



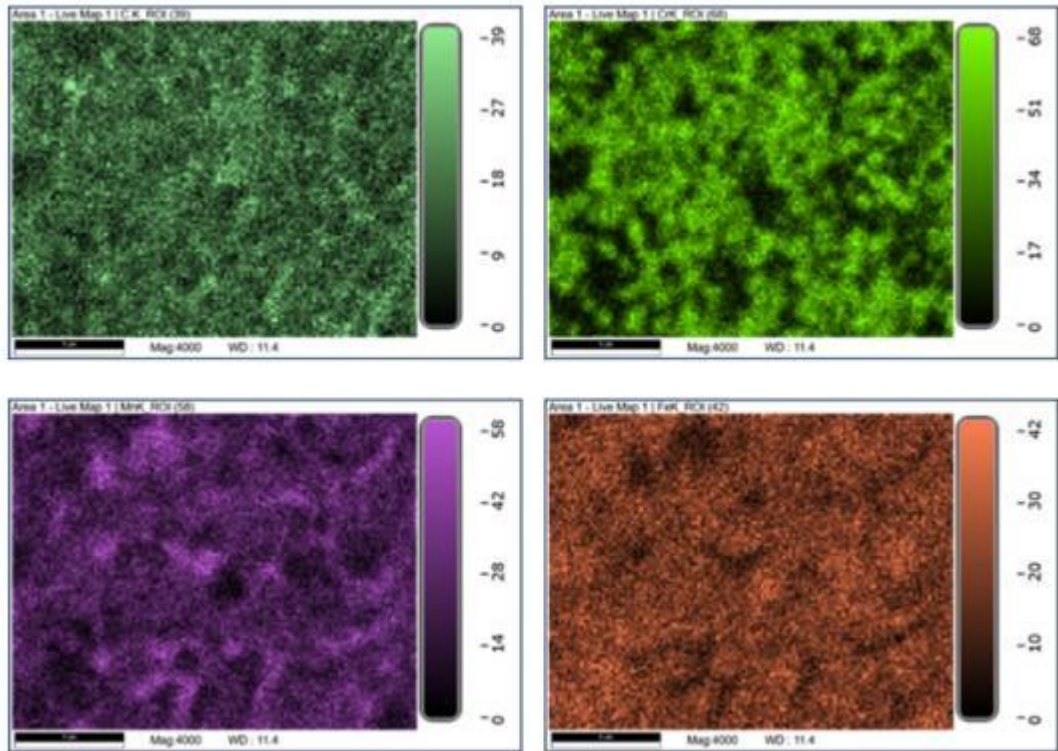
Element	Weight %	Atomic %
C K	14.24	43.51
Cr K	22.21	15.68
Mn K	14.24	9.51
Fe K	16.10	10.58
Co K	16.76	10.44
Ni K	16.46	10.29



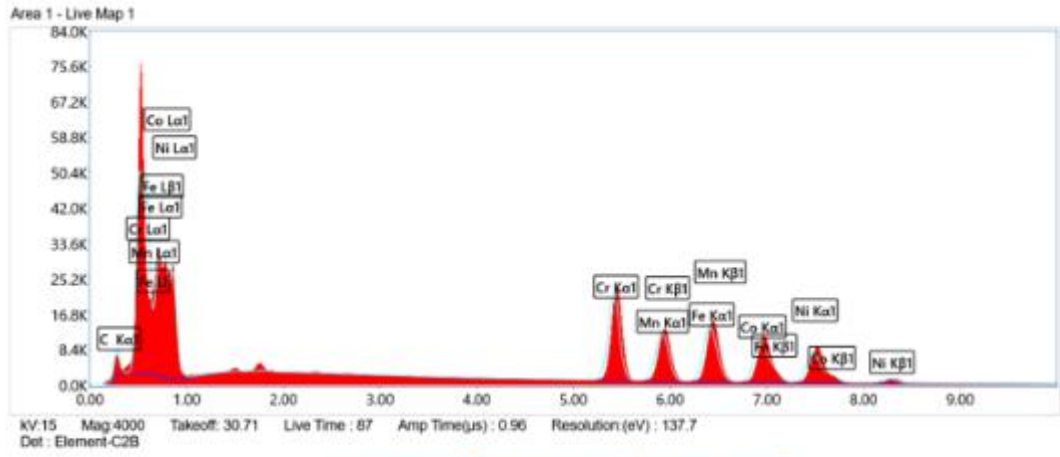
Şekil 4.42 Karbon katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping



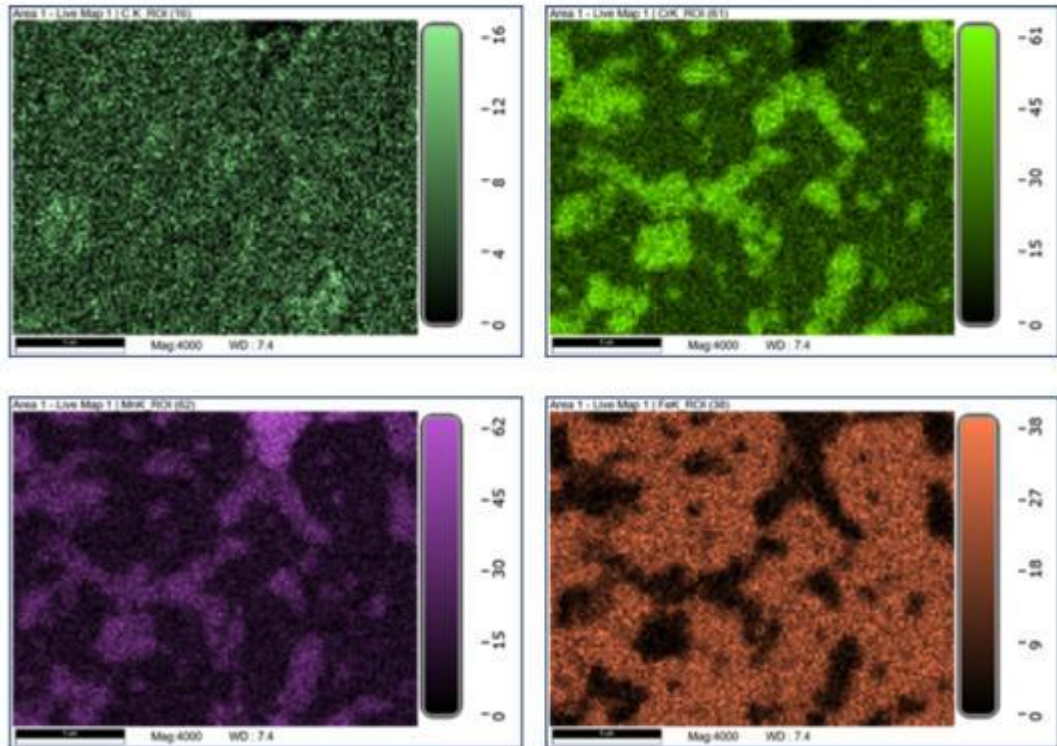
Element	Weight %	Atomic %
C K	24.02	59.43
Cr K	19.38	11.07
Mn K	13.86	7.50
Fe K	14.94	7.95
Co K	14.39	7.26
Ni K	13.41	6.79



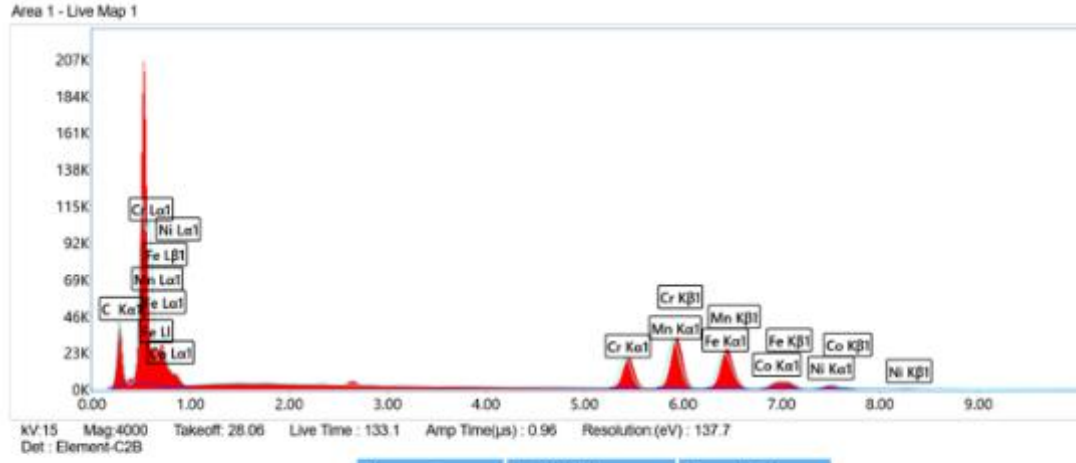
Şekil 4.43 Karbon katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping



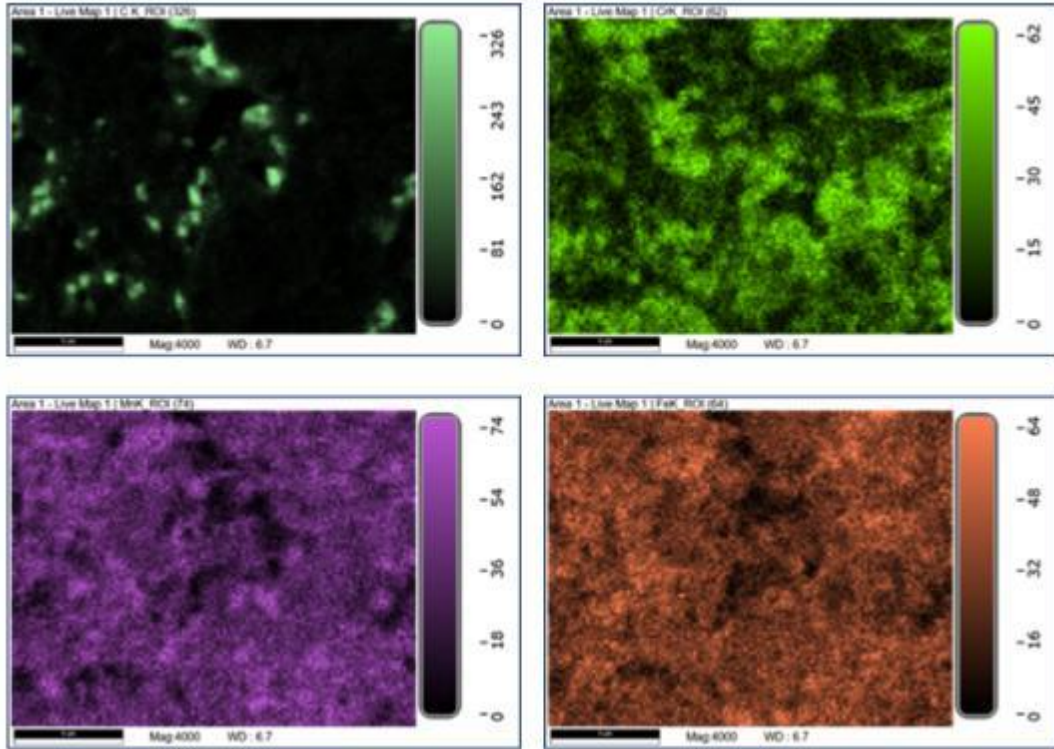
Element	Weight %	Atomic %
C K	14.77	44.69
Cr K	19.38	13.55
Mn K	10.39	6.87
Fe K	18.89	12.30
Co K	18.26	11.26
Ni K	18.30	11.33



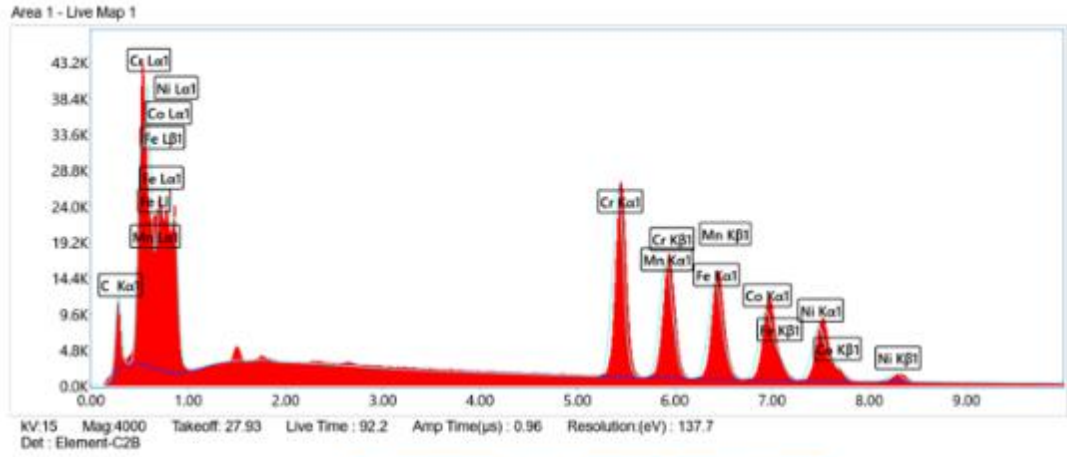
Şekil 4.44 Karbon katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping



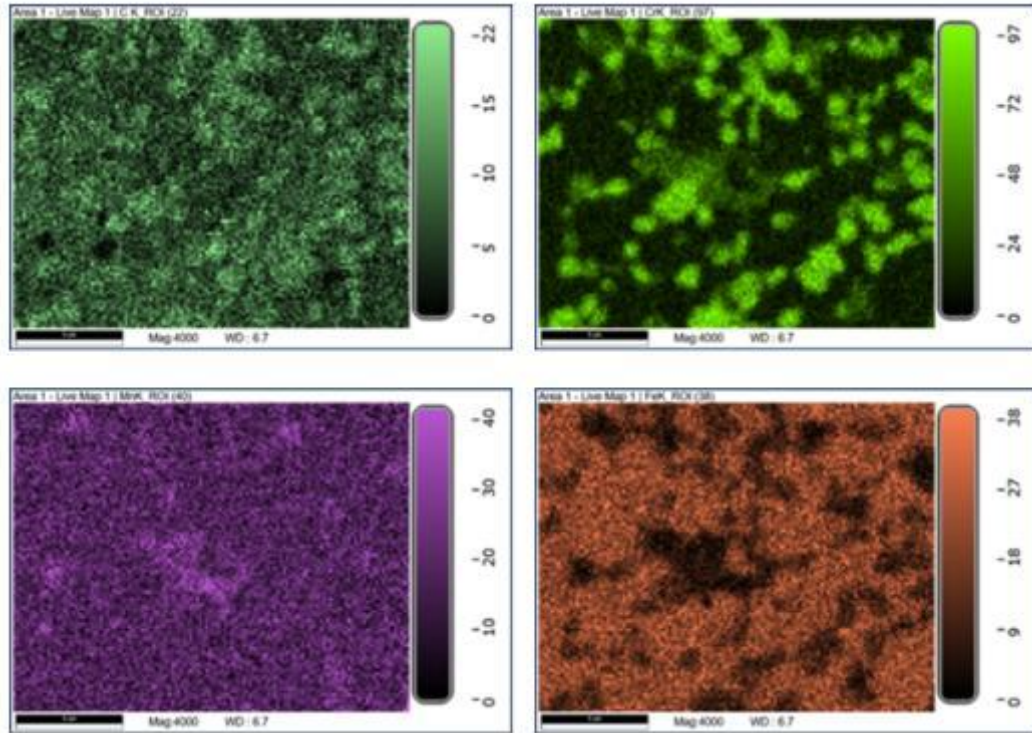
Element	Weight %	Atomic %
C K	40.33	75.62
Cr K	11.00	4.76
Mn K	21.84	8.95
Fe K	19.45	7.84
Co K	4.07	1.55
Ni K	3.31	1.27



Şekil 4.45 Karbon katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping



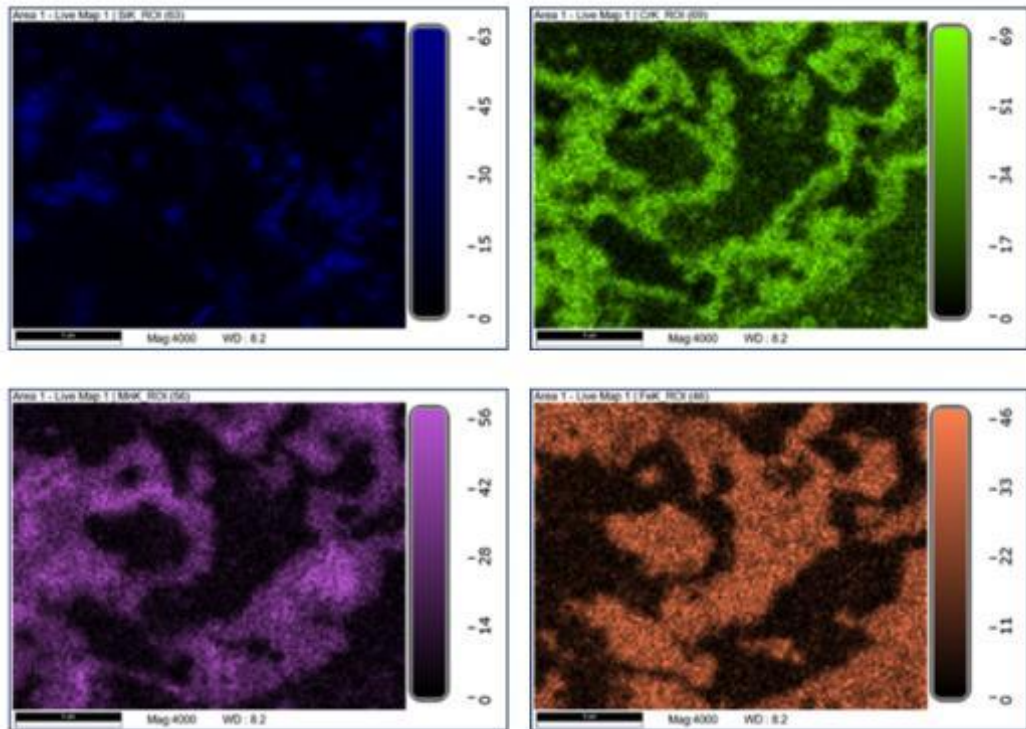
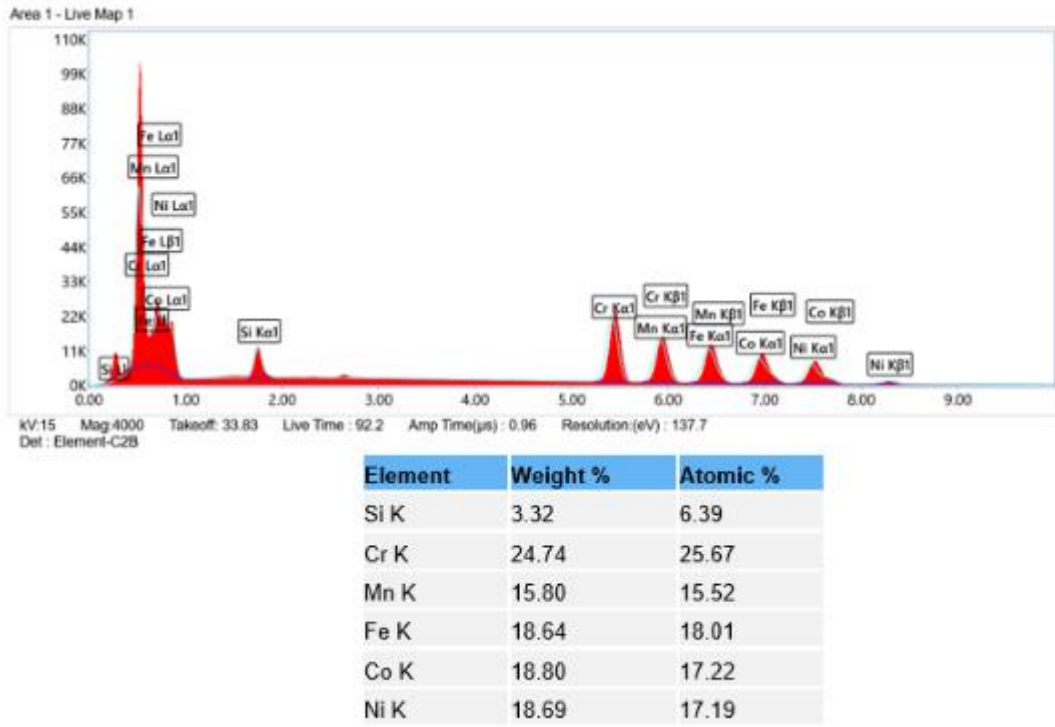
Element	Weight %	Atomic %
C K	18.62	51.51
Cr K	20.65	13.19
Mn K	12.63	7.64
Fe K	16.17	9.62
Co K	16.07	9.06
Ni K	15.87	8.98



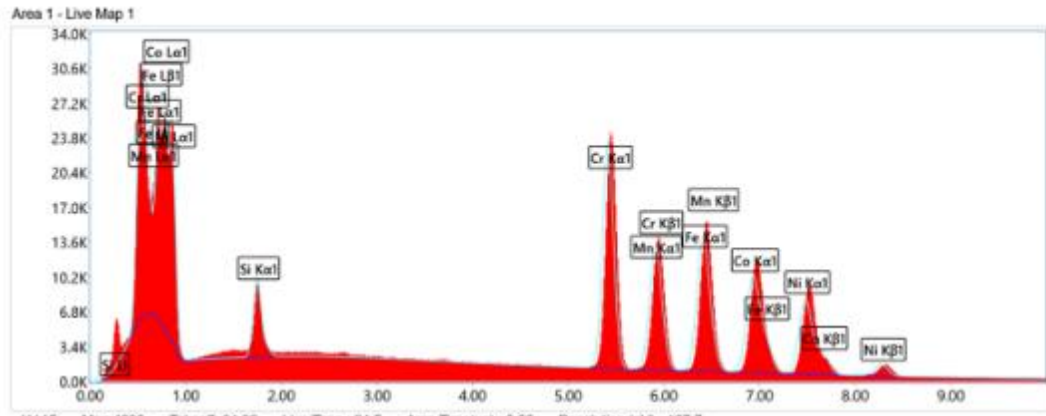
Şekil 4.46 Karbon katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping

Yüksek entropili alaşım (YEA) sistemlerinde, alaşımı oluşturan temel elementler ile takviye amacıyla ilave edilen fazların mikro yapısal düzeydeki dağılım karakteristiklerini belirlemek amacıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tabanlı

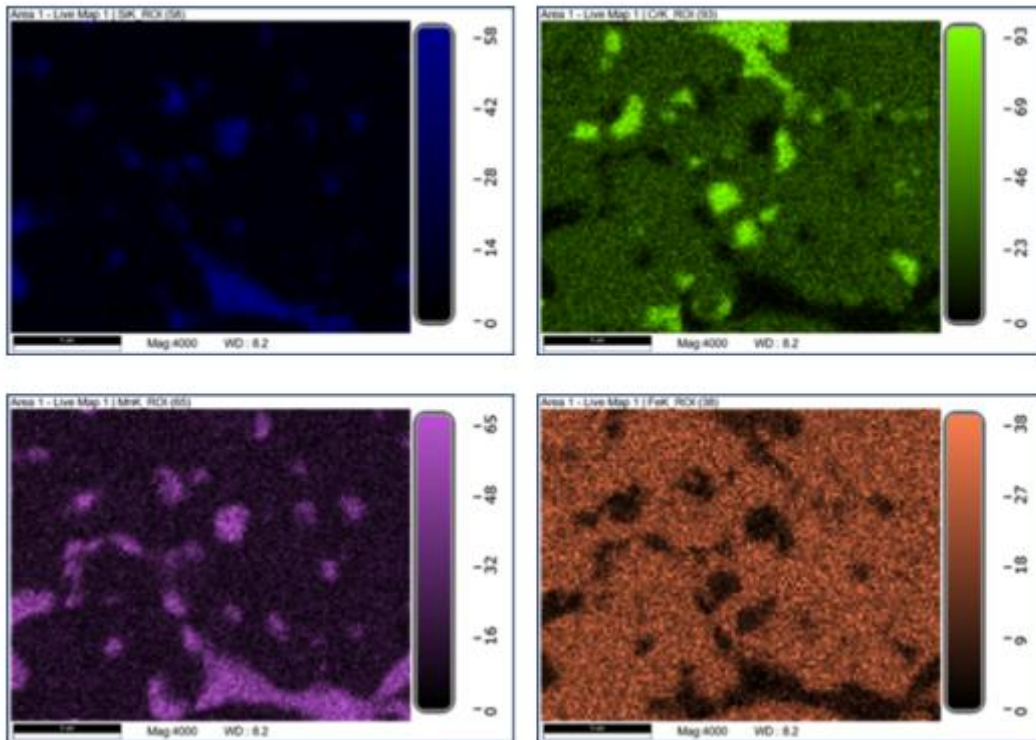
elemental haritalama yöntemleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) analiz teknikleri birlikte kullanılmıştır. Bu analizler kapsamında elde edilen veriler, Şekil 4.41 ile 4.46 arasında detaylı biçimde sunulmuştur. Yürütülen incelemelerde, YEA sisteminin temel bileşenlerini Krom (Cr), Mangan (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) gibi geçiş metalleri oluşturmakta olup, bu yapı içerisine takviye fazları olarak C elementleri belirli oranlarda eklenmiştir. Sunulan SEM tabanlı elementel dağılım haritaları dikkatle incelendiğinde, takviye amacıyla eklenen C elementlerinin alaşım matrisi içerisinde oldukça düzgün ve homojen bir dağılım sergilediği açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu durum, parçacıkların YEA matrisine entegre olma biçiminin, üretim sürecinde uygulanan sinterleme koşulları, katkı oranları ve difüzyon mekanizmalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Elementlerin mikroyapı boyunca eşit bir biçimde dağılması, özellikle çok fazlı ve kompleks yapıya sahip alaşımlarda oldukça arzu edilen bir özelliktir. Çünkü bu homojen dağılım durumu, sadece mikroskobik yapısal dengeyi değil; aynı zamanda malzemenin makroskobik özelliklerini de olumlu yönde etkilemektedir. Nitekim elementlerin düzensiz veya lokal yoğunluk farklılıkları gösteren biçimde dağılması durumunda, gerilim yığılmaları, faz ayrışmaları veya kırılğan bölgeler gibi istenmeyen yapısal kusurların ortaya çıkması muhtemeldir. Buna karşın, elde edilen SEM ve EDS analiz sonuçları, katkı elementlerinin alaşım matrisiyle yüksek uyum gösterdiğini ve bu durumun YEA sisteminin fiziksel, kimyasal ve mekanik performans parametrelerine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır.



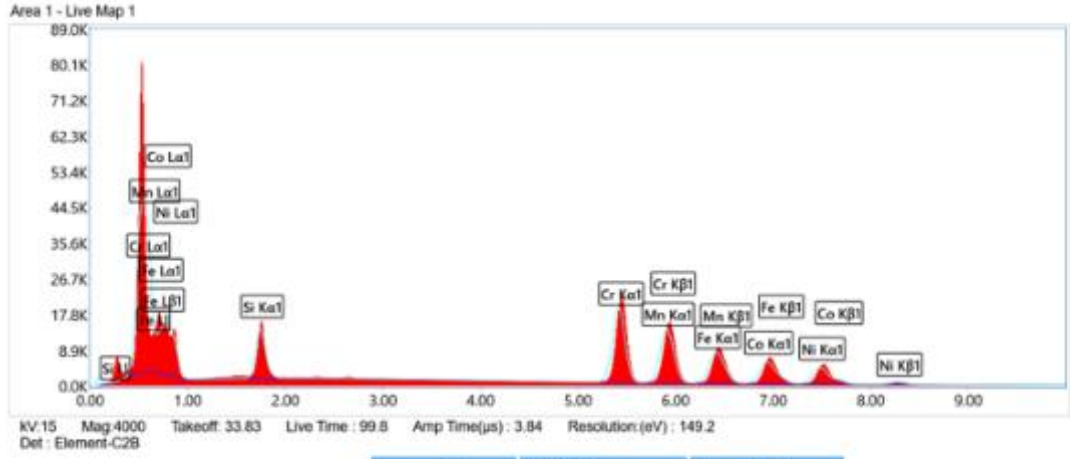
Şekil 4.47 Silisyum katkılı %2,5 ve 1000°C EDX ve mapping



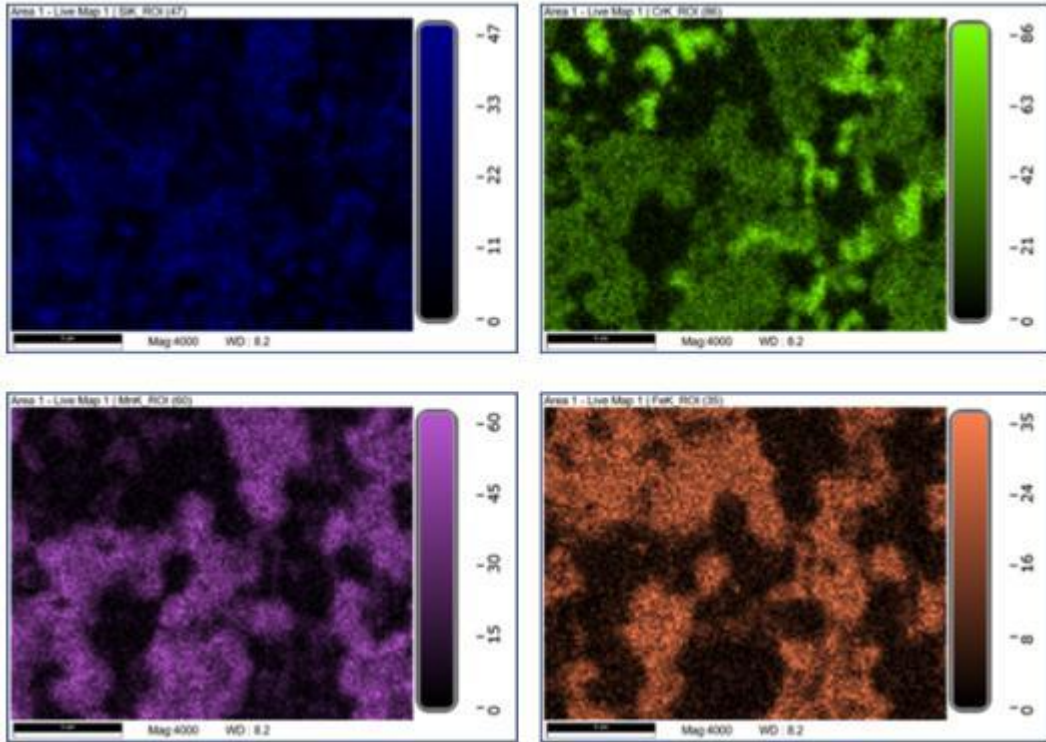
Element	Weight %	Atomic %
Si K	2.40	4.67
Cr K	23.04	24.22
Mn K	11.93	11.86
Fe K	21.30	20.85
Co K	20.76	19.25
Ni K	20.57	19.15



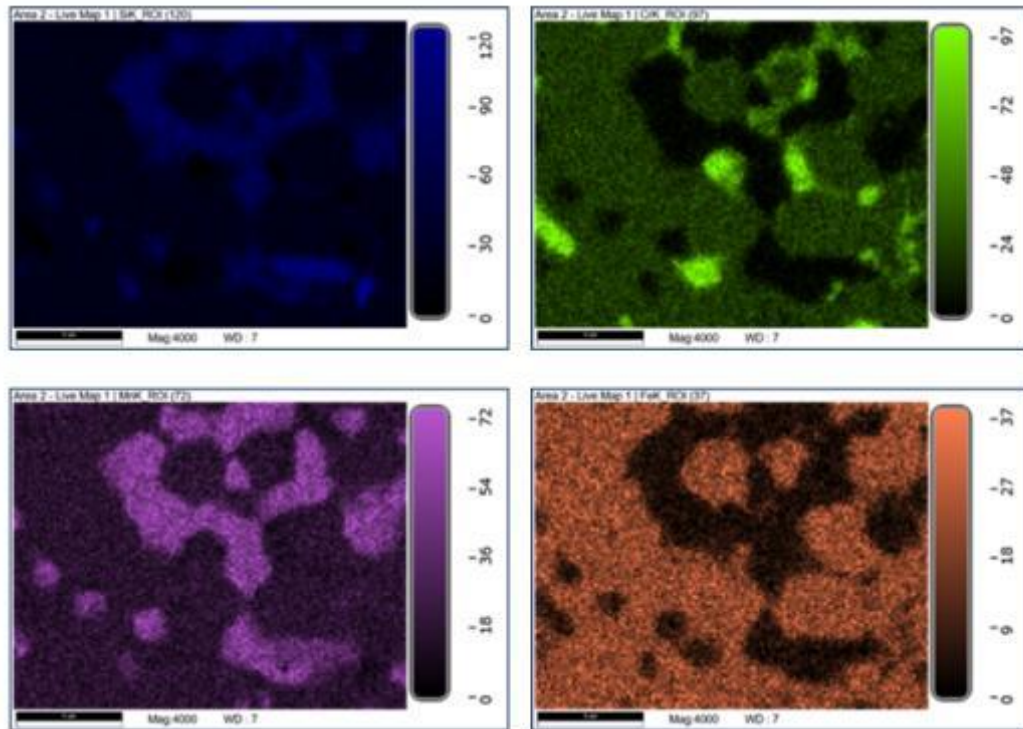
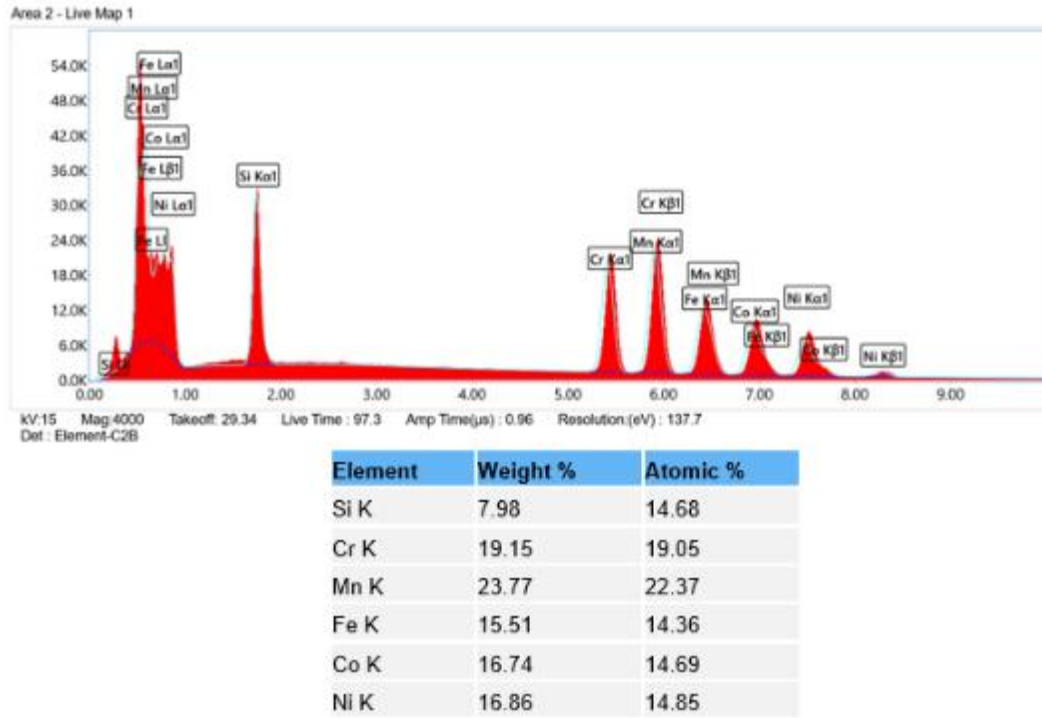
Şekil 4.48 Silisyum katkılı %2,5 ve 1200°C EDX ve mapping



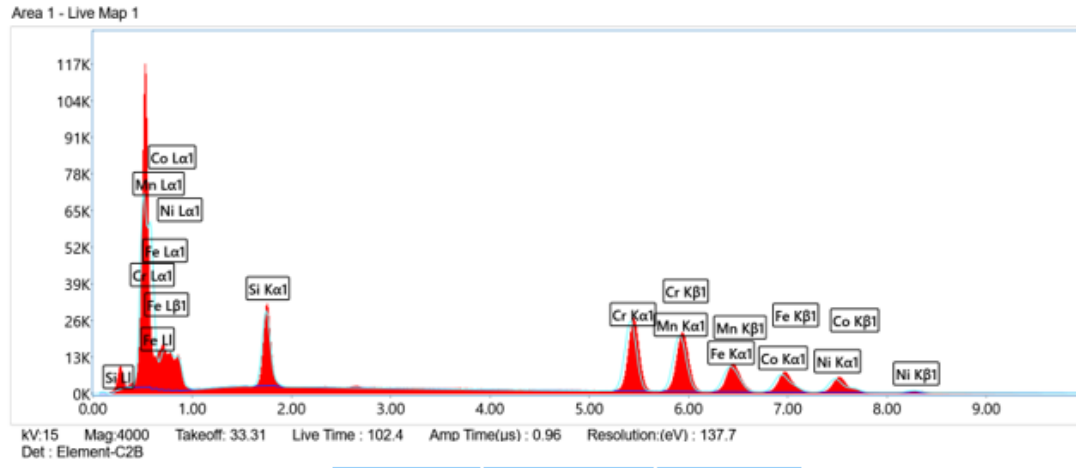
Element	Weight %	Atomic %
Si K	5.30	9.94
Cr K	27.43	27.78
Mn K	20.08	19.25
Fe K	15.80	14.90
Co K	16.08	14.38
Ni K	15.32	13.75



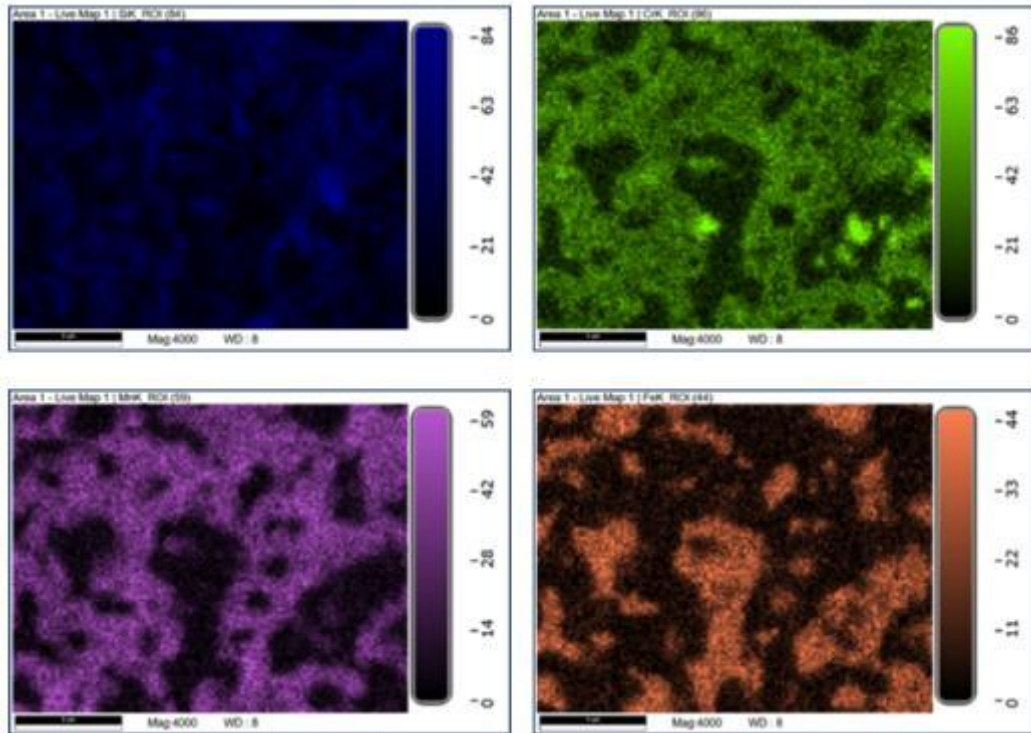
Şekil 4.49 Silisyum katkılı %5 ve 1000°C EDX ve mapping



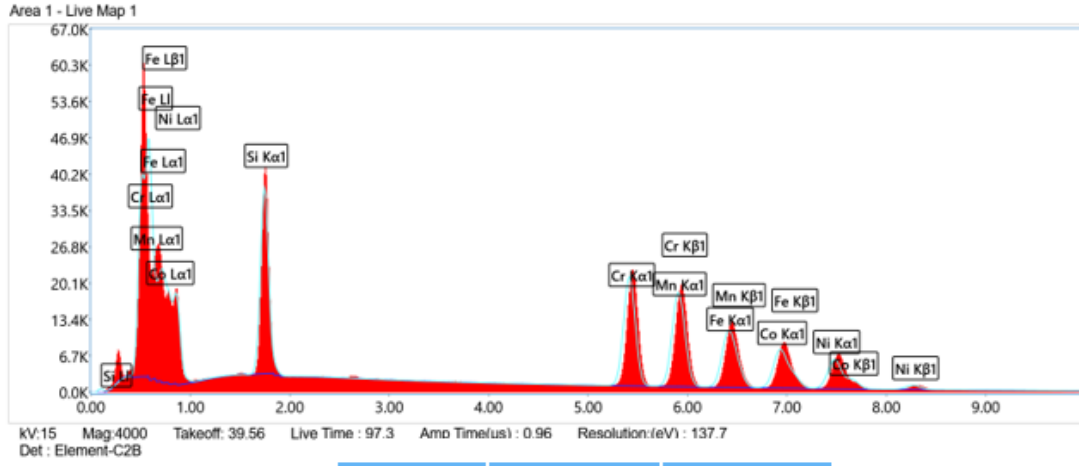
Şekil 4.50 Silisyum katkılı %5 ve 1200°C EDX ve mapping



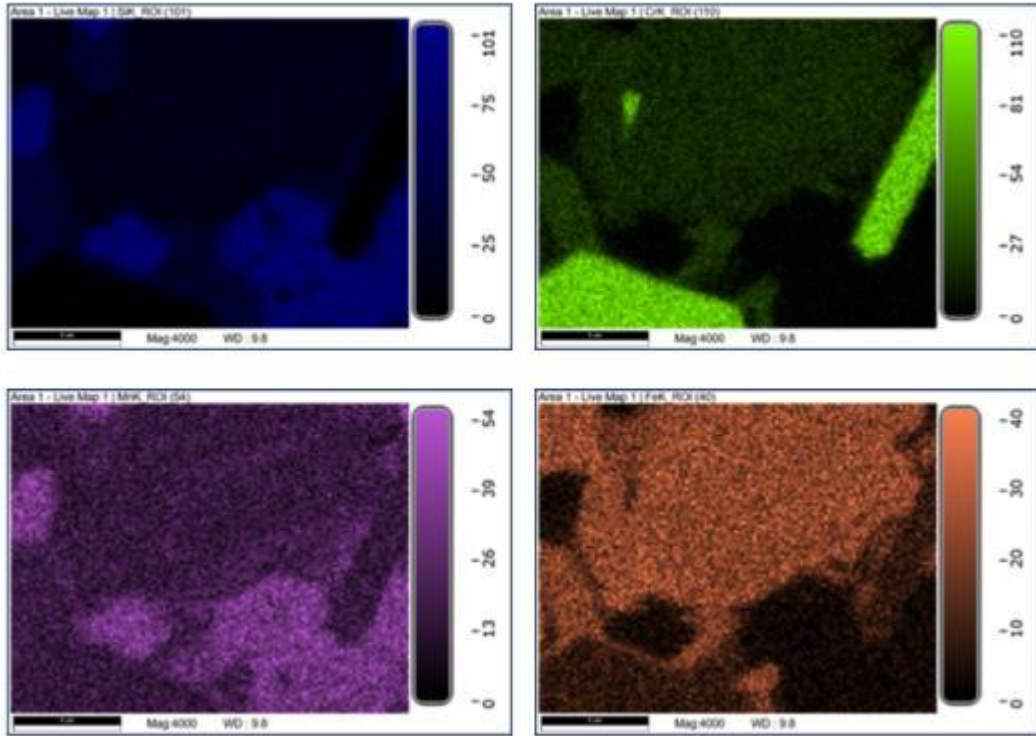
Element	Weight %	Atomic %
Si K	7.80	14.27
Cr K	27.51	27.18
Mn K	23.18	21.67
Fe K	13.42	12.34
Co K	14.36	12.52
Ni K	13.73	12.01



Şekil 4.51 Silisyum katkılı %7,5 ve 1000°C EDX ve mapping



Element	Weight %	Atomic %
Si K	10.05	18.11
Cr K	21.81	21.24
Mn K	20.23	18.64
Fe K	16.28	14.76
Co K	16.14	13.87
Ni K	15.50	13.37



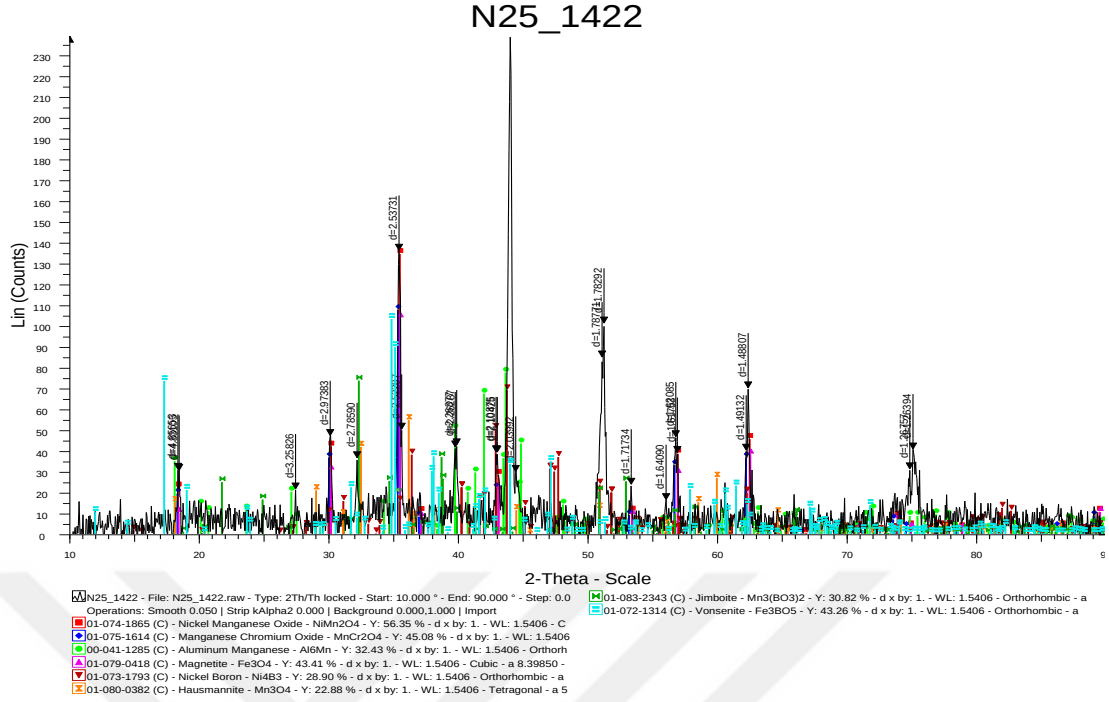
Şekil 4.52 Silisyum katkılı %7,5 ve 1200°C EDX ve mapping

Yüksek entropili alaşım (YEA) sistemlerinde, alaşımı oluşturan temel elementler ile takviye amacıyla ilave edilen fazların mikro yapısal düzeydeki dağılım karakteristiklerini belirlemek amacıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tabanlı

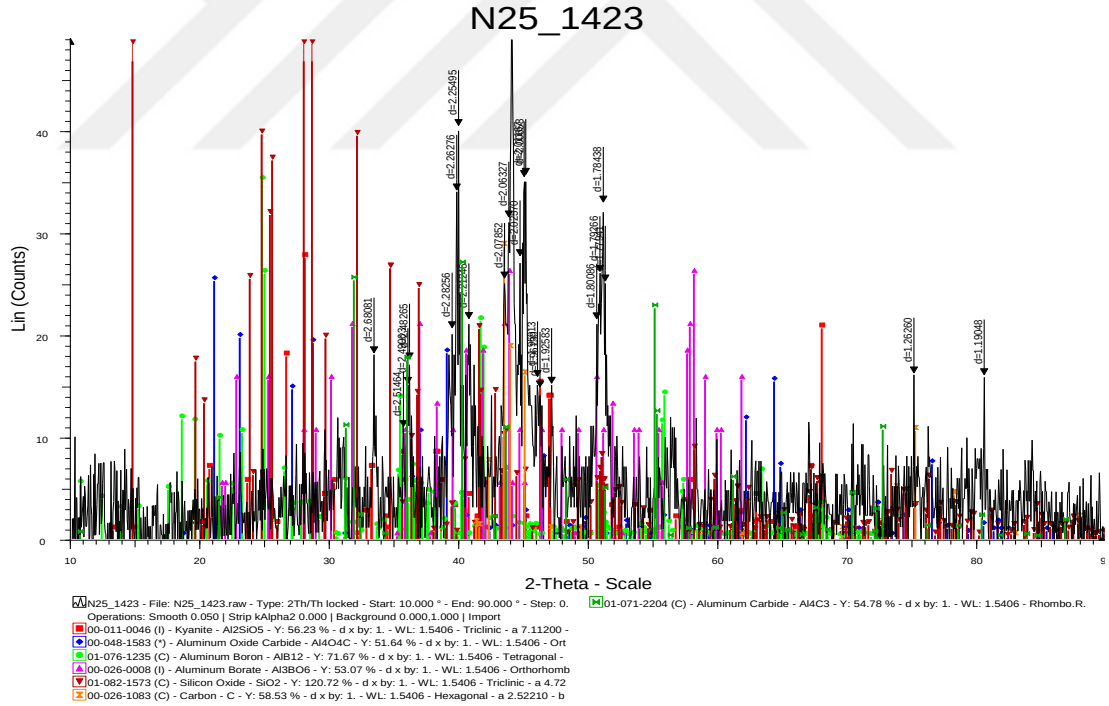
elemental haritalama yöntemleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) analiz teknikleri birlikte kullanılmıştır. Bu analizler kapsamında elde edilen veriler, Şekil 4.47 ile 4.52 arasında detaylı biçimde sunulmuştur. Yürütülen incelemelerde, YEA sisteminin temel bileşenlerini Krom (Cr), Mangan (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) gibi geçiş metalleri oluşturmakta olup, bu yapı içerisine takviye fazları olarak Si elementleri belirli oranlarda eklenmiştir. Sunulan SEM tabanlı elementel dağılım haritaları dikkatle incelendiğinde, takviye amacıyla eklenen Si elementlerinin alaşım matrisi içerisinde oldukça düzgün ve homojen bir dağılım sergilediği açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu durum, parçacıkların YEA matrisine entegre olma biçiminin, üretim sürecinde uygulanan sinterleme koşulları, katkı oranları ve difüzyon mekanizmalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Elementlerin mikroyapı boyunca eşit bir biçimde dağılması, özellikle çok fazlı ve kompleks yapıya sahip alaşımlarda oldukça arzu edilen bir özelliktir. Çünkü bu homojen dağılım durumu, sadece mikroskobik yapısal dengeyi değil; aynı zamanda malzemenin makroskobik özelliklerini de olumlu yönde etkilemektedir. Nitekim elementlerin düzensiz veya lokal yoğunluk farklılıkları gösteren biçimde dağılması durumunda, gerilim yığılmaları, faz ayrışmaları veya kırılğan bölgeler gibi istenmeyen yapısal kusurların ortaya çıkması muhtemeldir. Buna karşın, elde edilen SEM ve EDS analiz sonuçları, katkı elementlerinin alaşım matrisiyle yüksek uyum gösterdiğini ve bu durumun YEA sisteminin fiziksel, kimyasal ve mekanik performans parametrelerine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

4.3 XRD Görüntü Analiz Sonuçları

Numuneler, Kastamonu Üniversitesi MERLAB biriminde XRD görüntüleri alınmak üzere gönderildi. Alınan görüntü sonuçları aşağıya kaydedilmiştir.



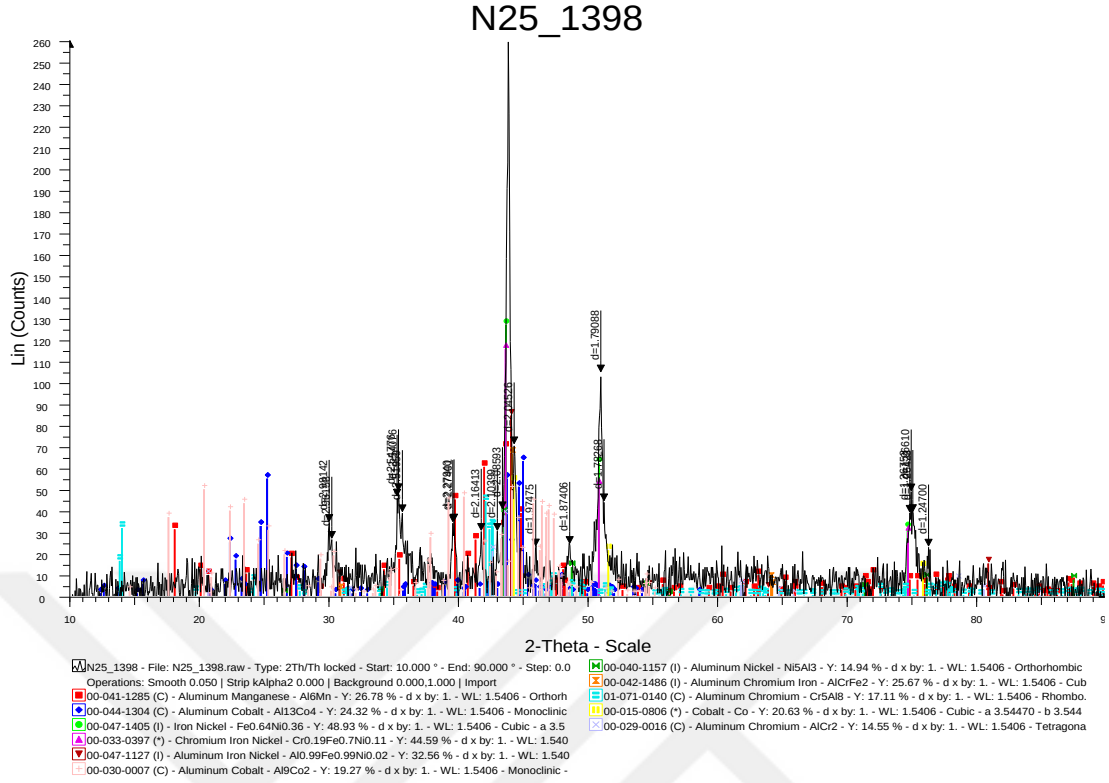
Şekil 4.53 Ana bileşen (Cantor) 1000°C XRD grafiği



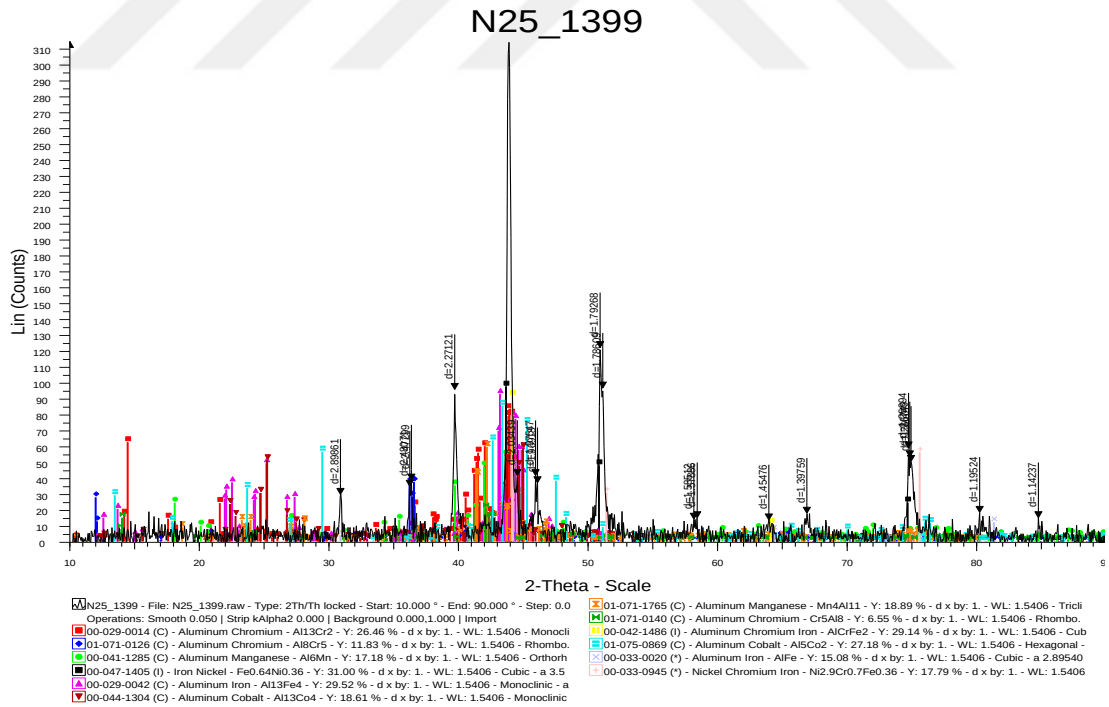
Şekil 4.54 Ana bileşen (Cantor) 1200°C XRD grafiği

Üretimi gerçekleştirilen yüksek entropili alaşım (YEA) esaslı kompozit numunelerin faz analizlerini gerçekleştirmek ve mikro yapıdaki kristal yapının karakterizasyonunu detaylı bir biçimde ortaya koymak amacıyla X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction, XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen veriler Şekil 4.54 ve Şekil

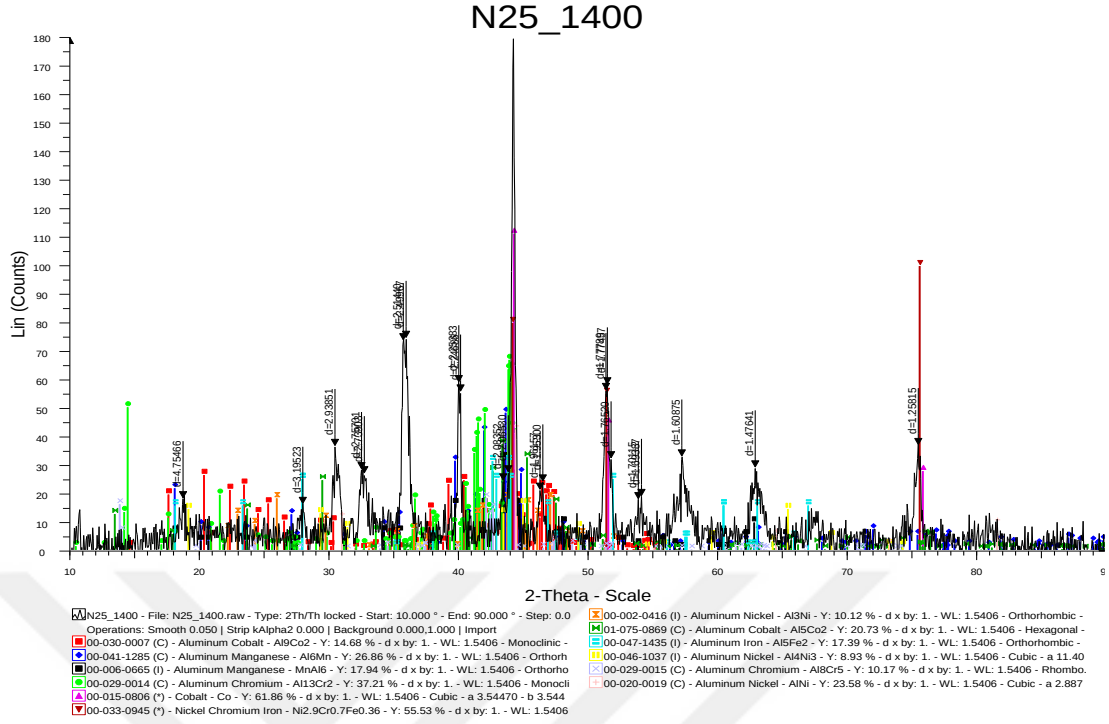
4.55'te sunulmuştur. Her bir YEA numunesi için gerçekleştirilen bu analizler, hem matris yapısında takviye fazlarına bağlanmayı kolaylaştıracak yeni faz oluşumlarının meydana gelip gelmediğini, hem de ilave edilen takviye parçacıklarının alaşım bünyesine dahil olup olmadığını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. İlgili XRD kırınım desenleri dikkatli biçimde incelendiğinde, kompozit yapılar içerisinde hem yüzey merkezli kübik (YMK) hem de hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapılarına sahip katı çözeltilerin olduğu açıkça tespit edilmiştir. Bu kristal fazların varlığı, üretim süreci sırasında bir araya getirilen alaşım elementleri arasında oluşan kompleks etkileşimlerin ve çoklu elementli sistemin neden olduğu termodinamik denge durumlarının bir sonucudur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen sinterleme işlemi, atomlar arası difüzyonu artırarak farklı fazların oluşmasına zemin hazırlamıştır. Bu nedenle, gözlemlenen YMK ve HMK fazlarının, hem matris hem de takviye fazlarının kimyasal uyumu açısından önemli bilgiler sunduğu değerlendirilmektedir. XRD analiz sonuçları aynı zamanda, ilave edilen Alüminyum, Bor, Karbon ve Silisyum gibi takviye elementlerinin HEA matrisi ile etkileşerek yeni fazlar oluşturabildiğini ve bu takviye fazlarının, katı çözeltili şeklinde alaşım yapısı içerisine entegre olabildiğini göstermektedir. Takviye oranının artırılmasıyla birlikte, XRD desenlerinde bu takviye elementlerine karşılık gelen kırınım piklerinde yoğunluk artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı miktarının doğrudan doğruya kristal yapı üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve takviye fazlarının alaşım sistemi içerisinde etkin şekilde yer aldığını doğrulamaktadır. Ayrıca, literatürde gerçekleştirilen benzer içerikli çalışmalarda da, farklı oranlarda takviye elementi içeren HEA sistemlerine ait XRD analizlerinde benzer fazlara ve kırınım piklerine rastlandığı bildirilmiştir. Bu paralellik, elde edilen bulguların literatürle uyumlu olduğunu göstermekte ve deneysel bulguların güvenilirliğini desteklemektedir. Sonuç olarak, yapılan XRD analizleri, hem mikroyapısal bütünlük açısından hem de kristal faz oluşumlarının değerlendirilmesi yönünden kritik bilgiler sunmakta; üretim sürecinin ve takviye miktarlarının optimize edilmesinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.



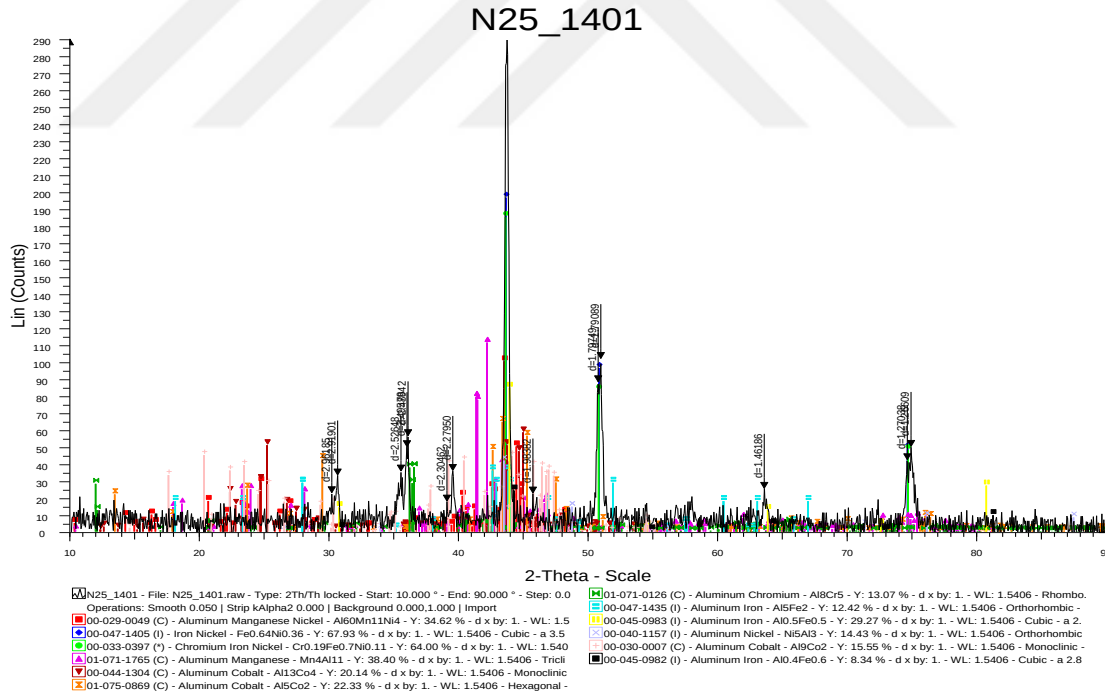
Şekil 4.55 Alüminyum katkısı /%2,5/1000°C XRD grafiği



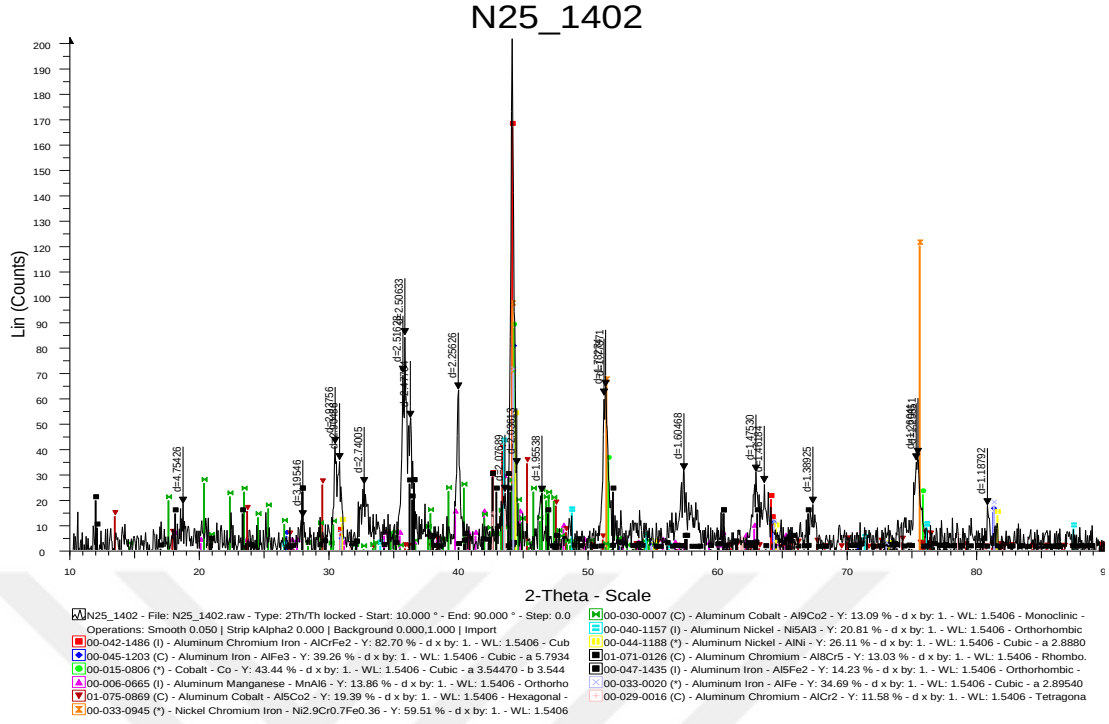
Şekil 4.56 Alüminyum katkısı /%2,5/1200°C XRD grafiği



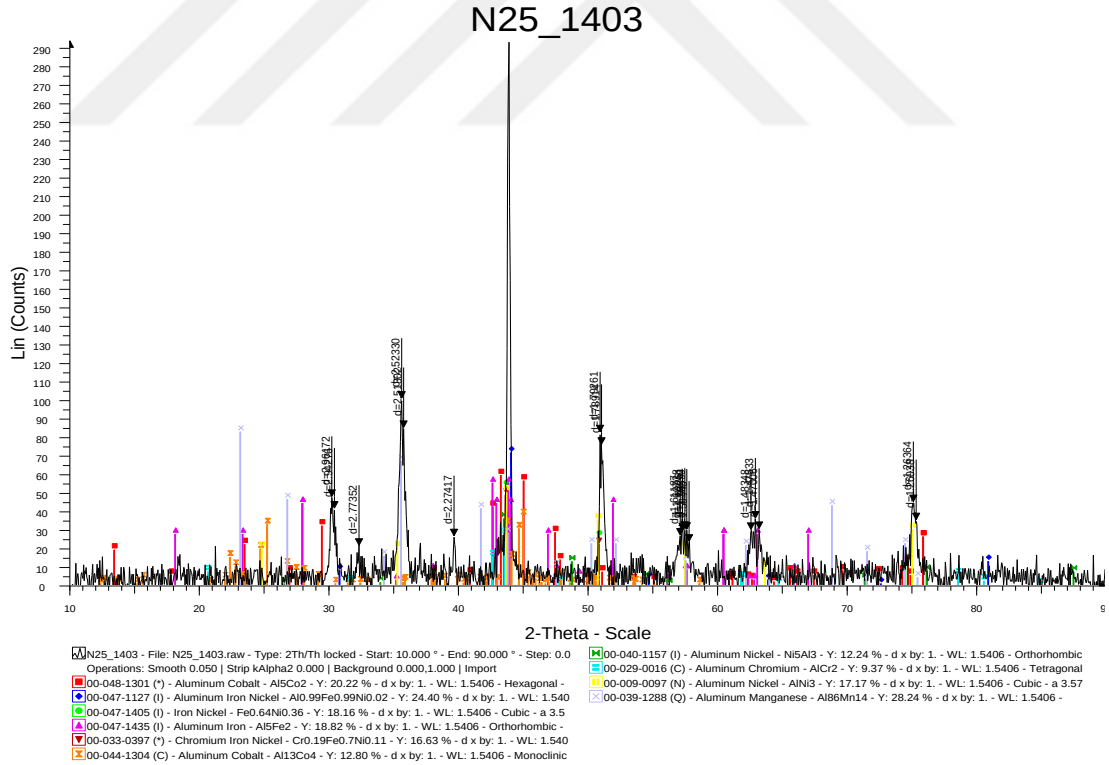
Şekil 4.57 Alüminyum katkısı %5/1000°C XRD grafiği



Şekil 4.58 Alüminyum katkısı %5/1200°C XRD grafiği

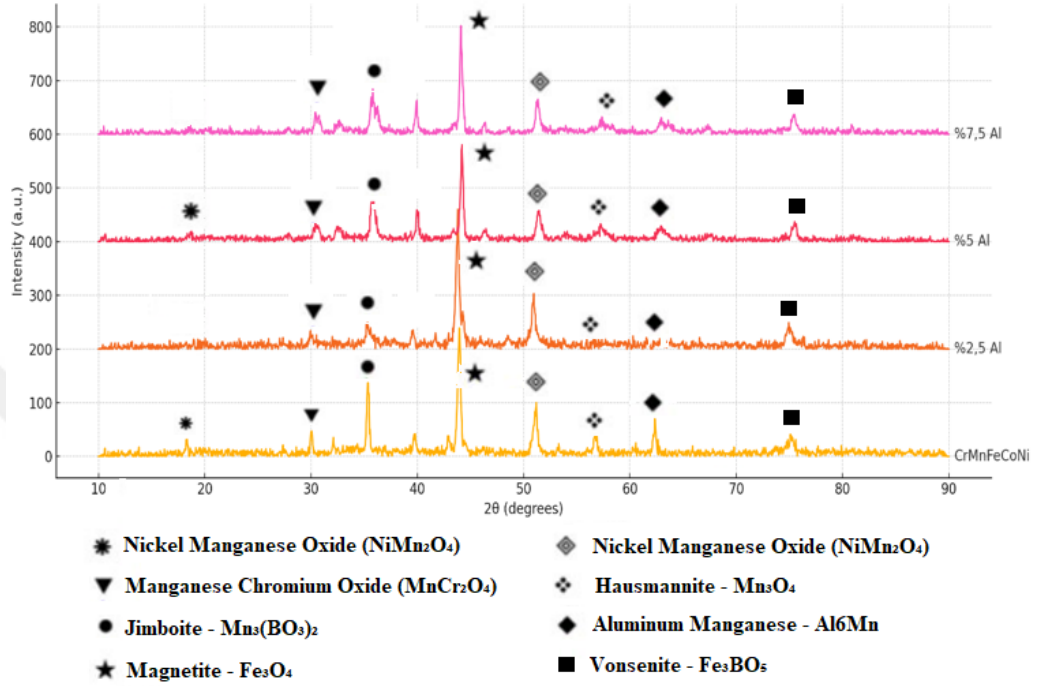


Şekil 4.59 Alüminyum katkısı /%7,5/1000°C XRD grafiği

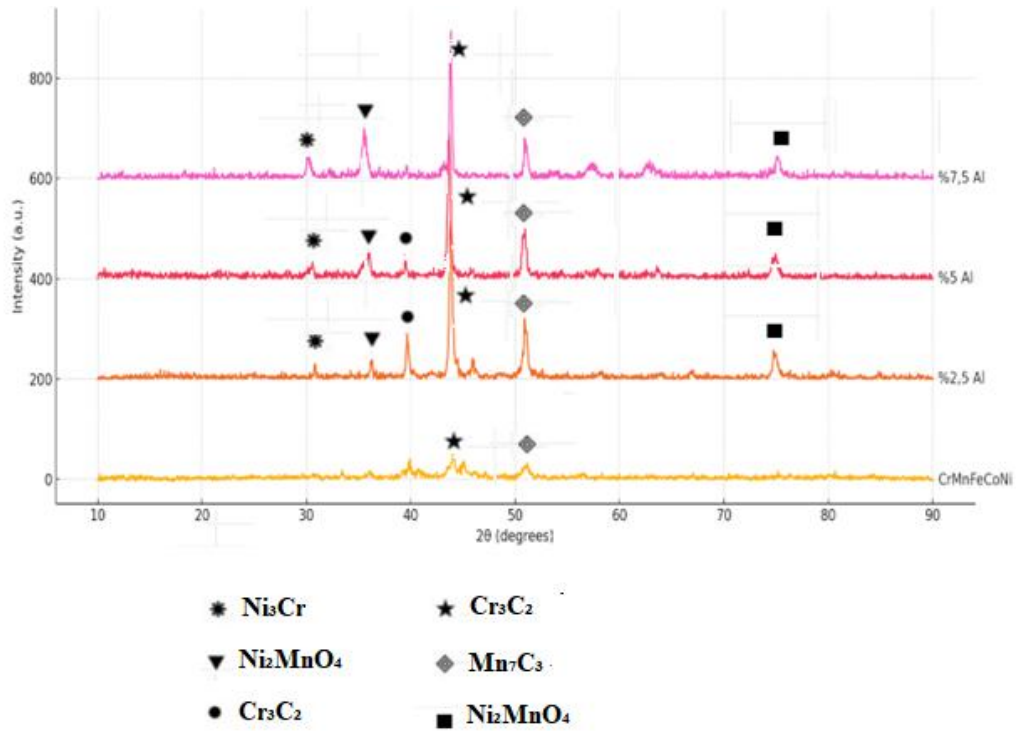


Şekil 4.60 Alüminyum katkısı /%7,5/1200°C XRD grafiği

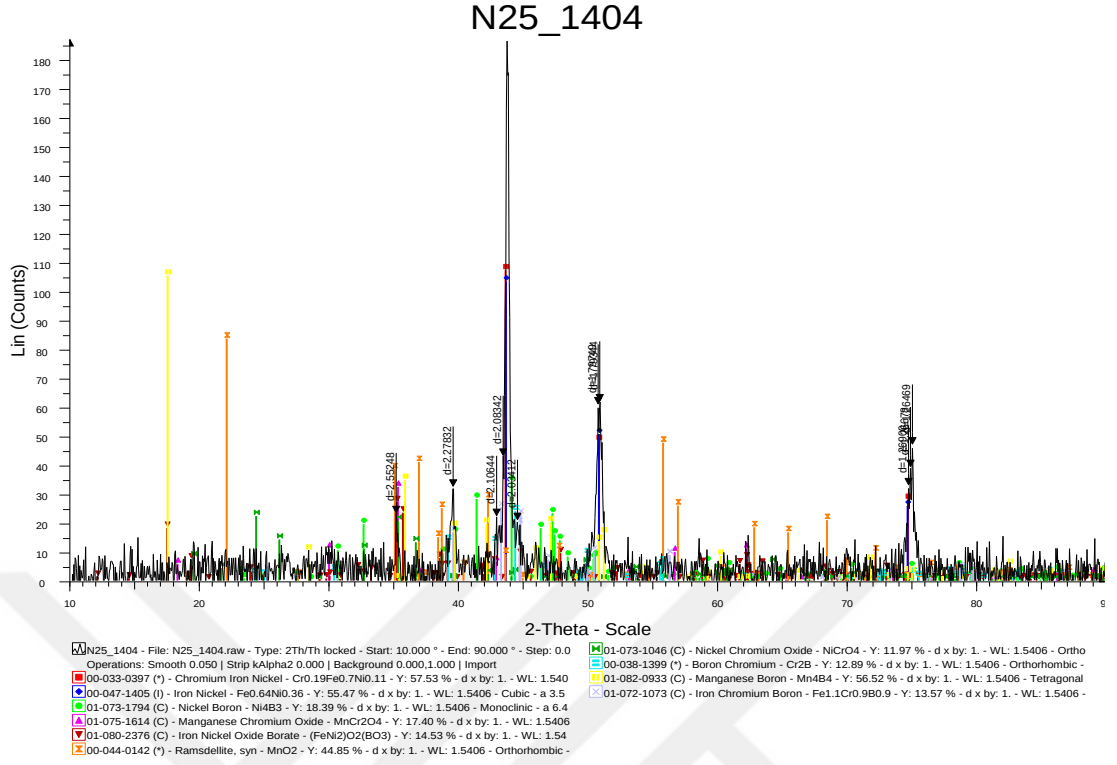
Ana Bileşene (Cantor alaşımı) Alüminyumun 1000°C ve 1200°C’de 3 farklı oranda katılmasıyla oluşan yapıların birarada aynı grafikte yorumlanabilmesi için oluşturulan grafikler aşağıda Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de verilmiştir.



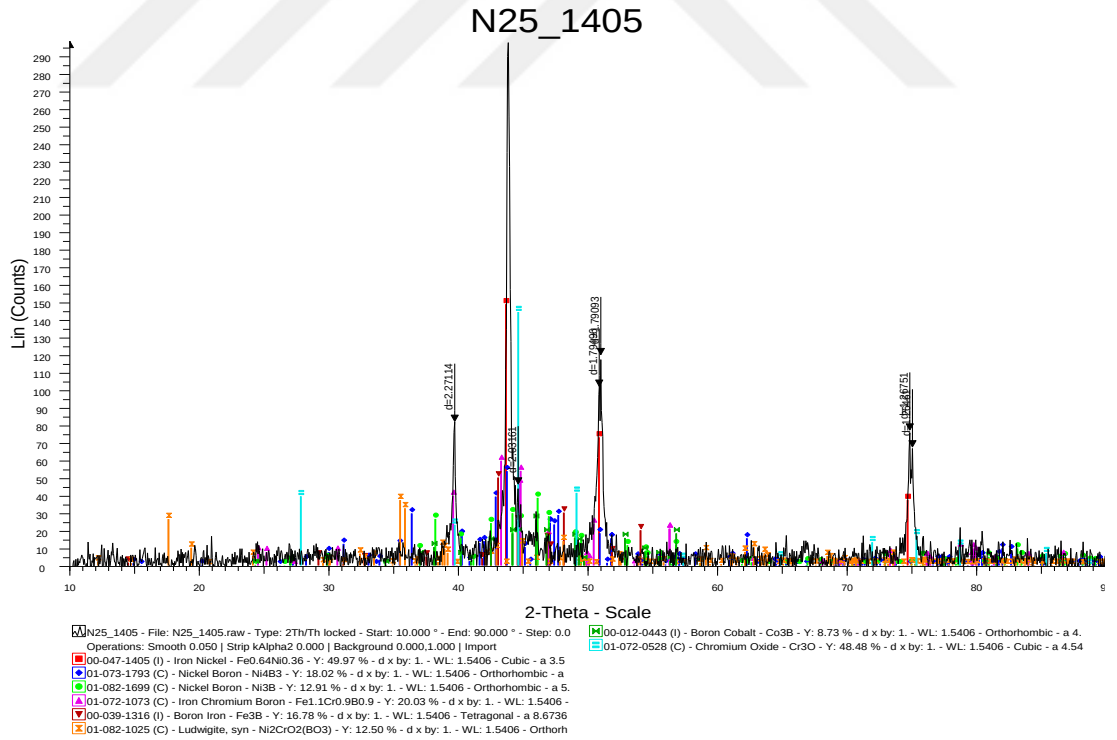
Şekil 4.61 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkılı Al elementinin kıyaslamalı grafiği



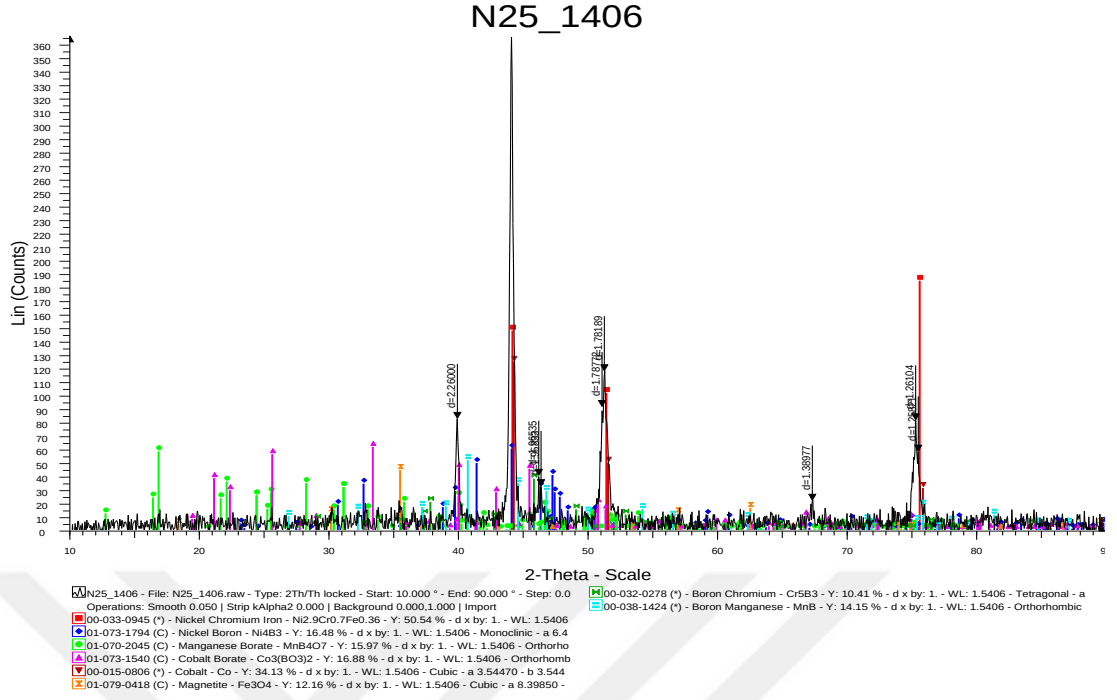
Şekil 4.62 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkılı Al elementinin kıyaslamalı grafiği



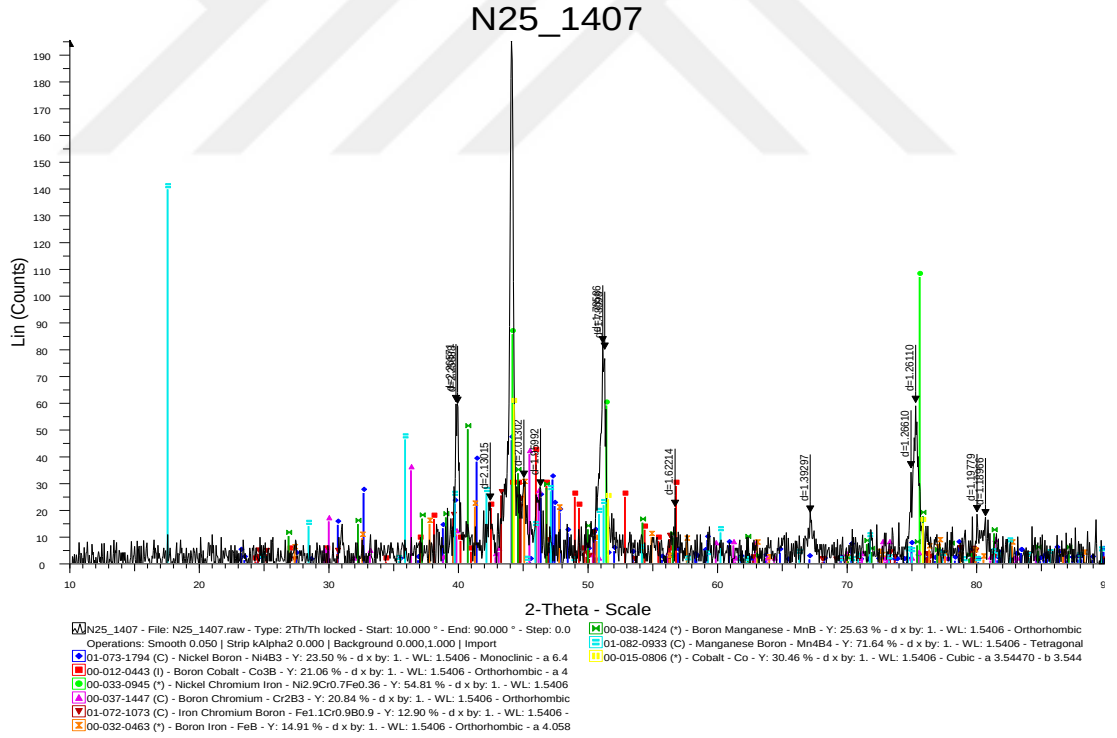
Şekil 4.63 Bor katkısı %2,5/1000°C XRD grafiği



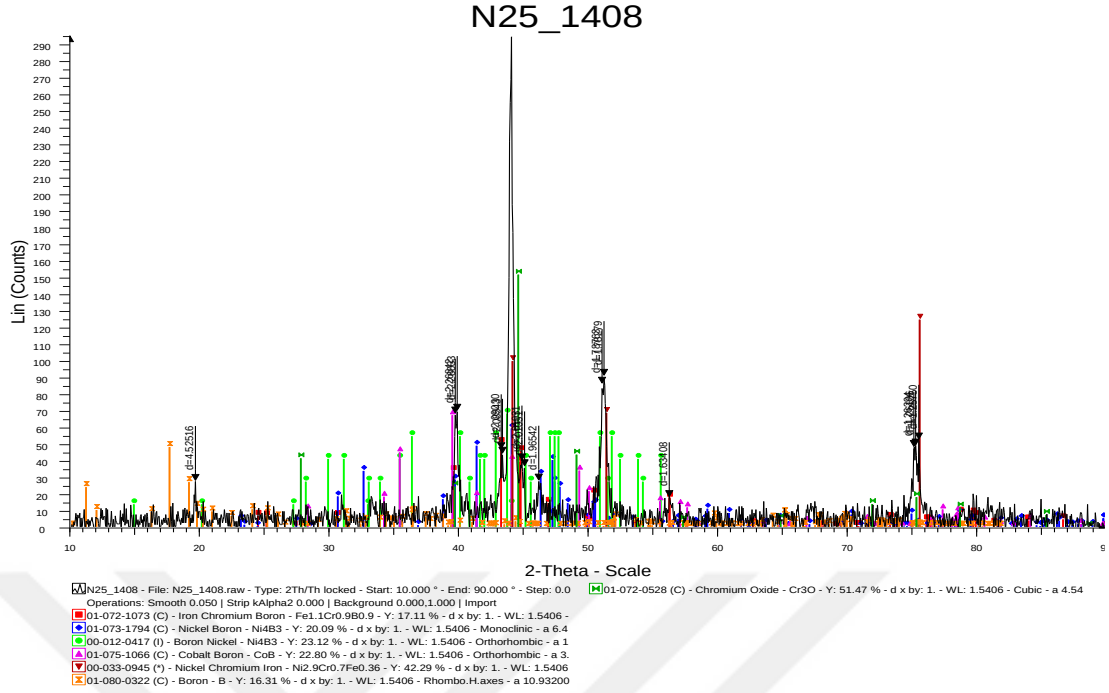
Şekil 4.64 Bor katkısı %2,5/1200°C XRD grafiği



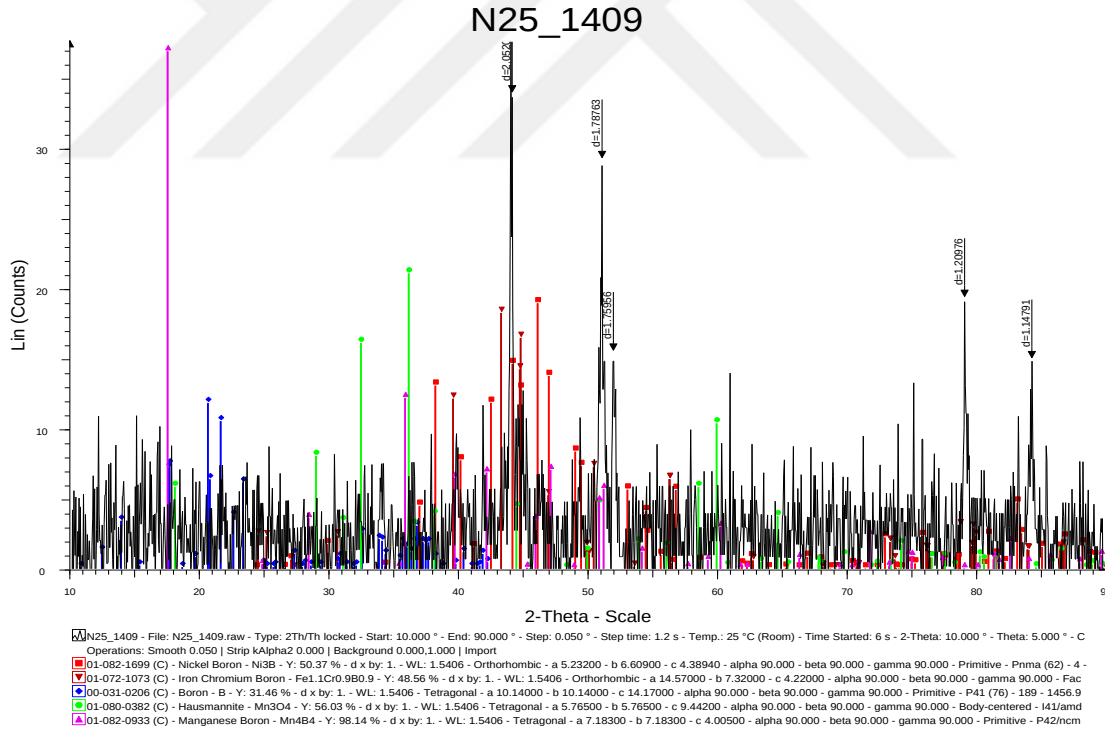
Şekil 4.65 Bor katkısı /%5/1000°C XRD grafiği



Şekil 4.66 Bor katkısı /%5/1200°C XRD grafiği

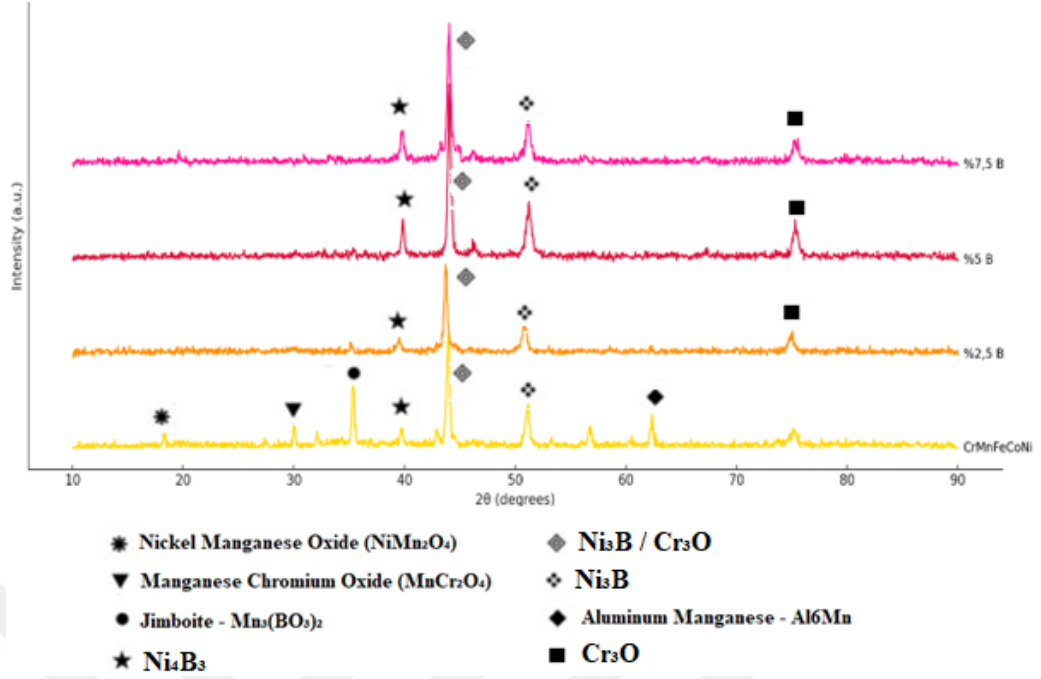


Şekil 4.67 Bor katkısı %7,5/1000°C XRD grafiği

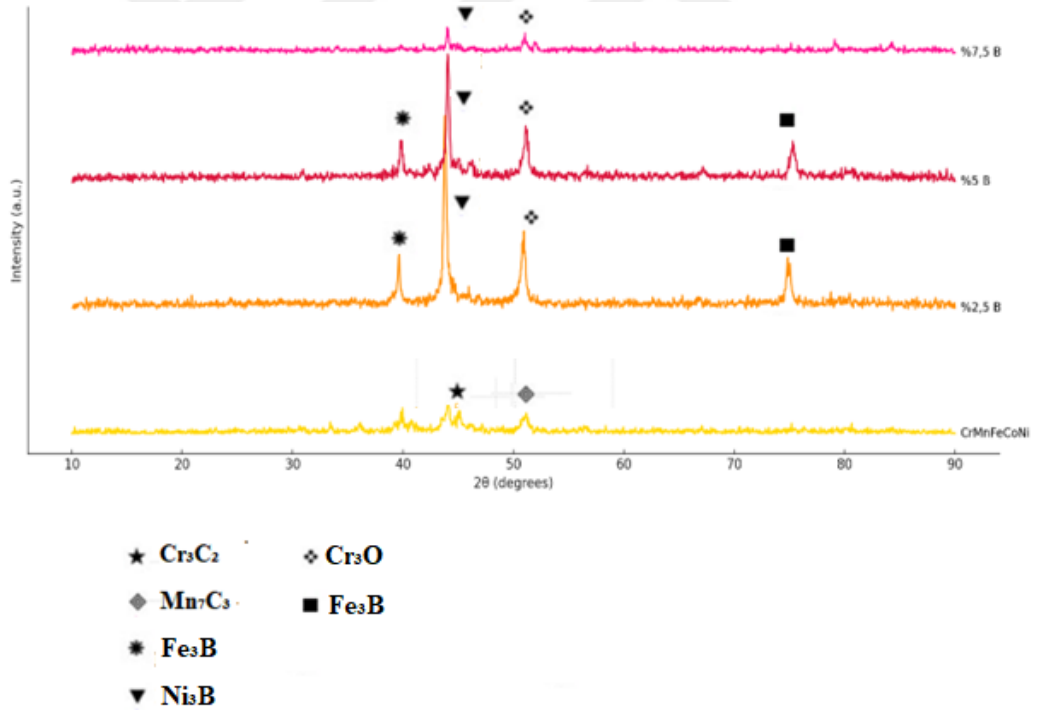


Şekil 4.68 Bor katkısı %7,5/1200°C XRD grafiği

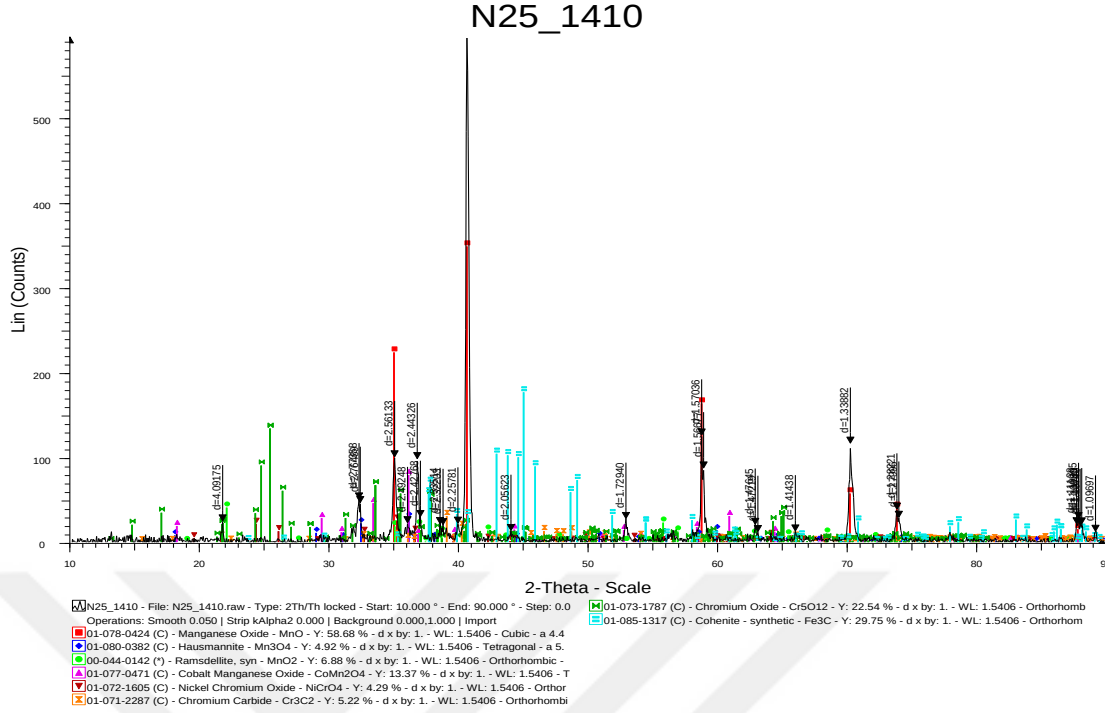
Ana Bileşene (Cantor alaşımı) Borun 1000°C ve 1200°C’de 3 farklı oranda katılmasıyla oluşan yapıların birarada aynı grafikte yorumlanabilmesi için oluşturulan grafikler aşağıda Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’de verilmiştir.



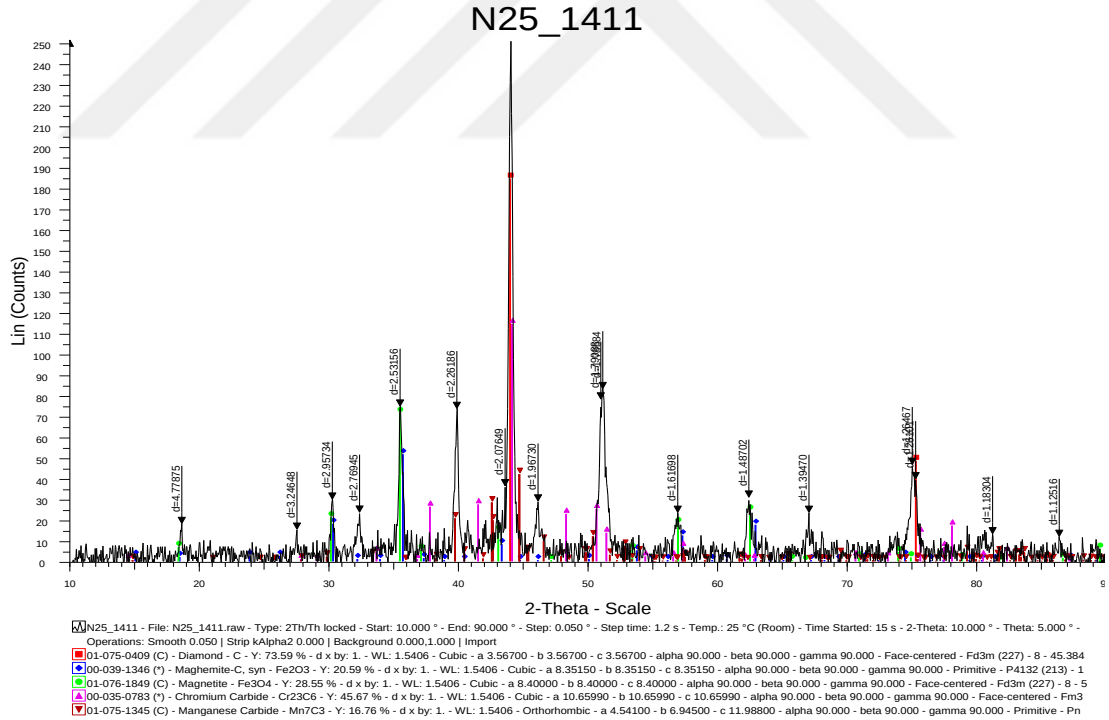
Şekil 4.69 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkılı Bor elementinin kıyaslamalı grafiği



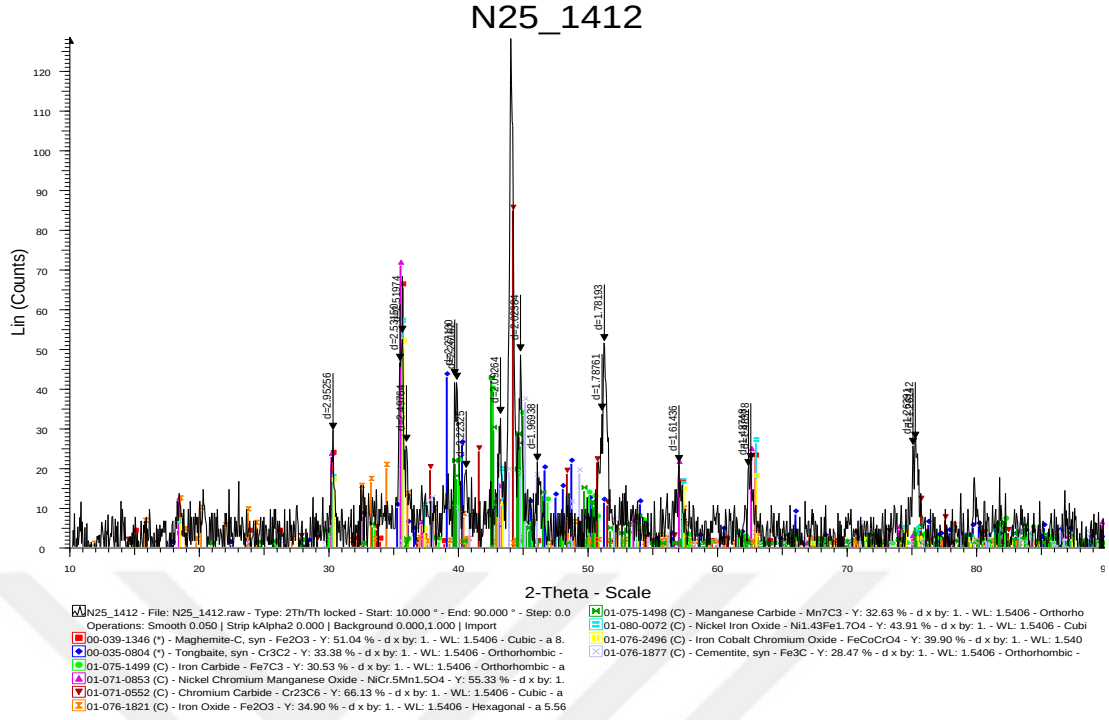
Şekil 4.70 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkılı Bor elementinin kıyaslamalı grafiği



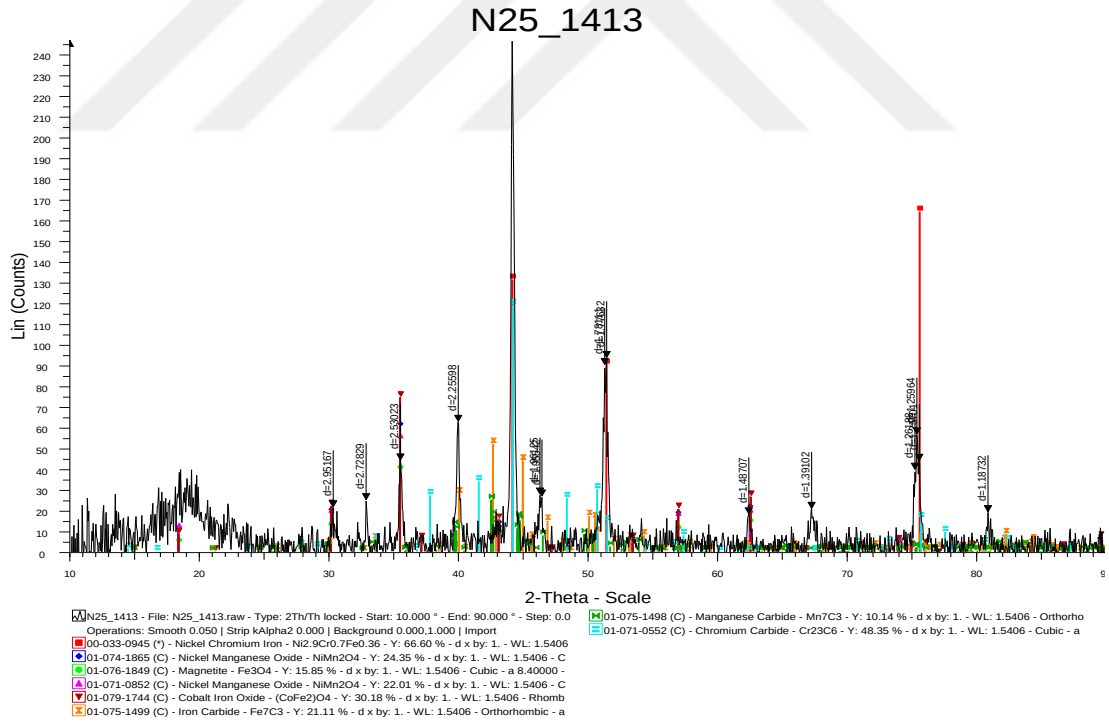
Şekil 4.71 Karbon katkısı %2,5/1000°C XRD grafiği



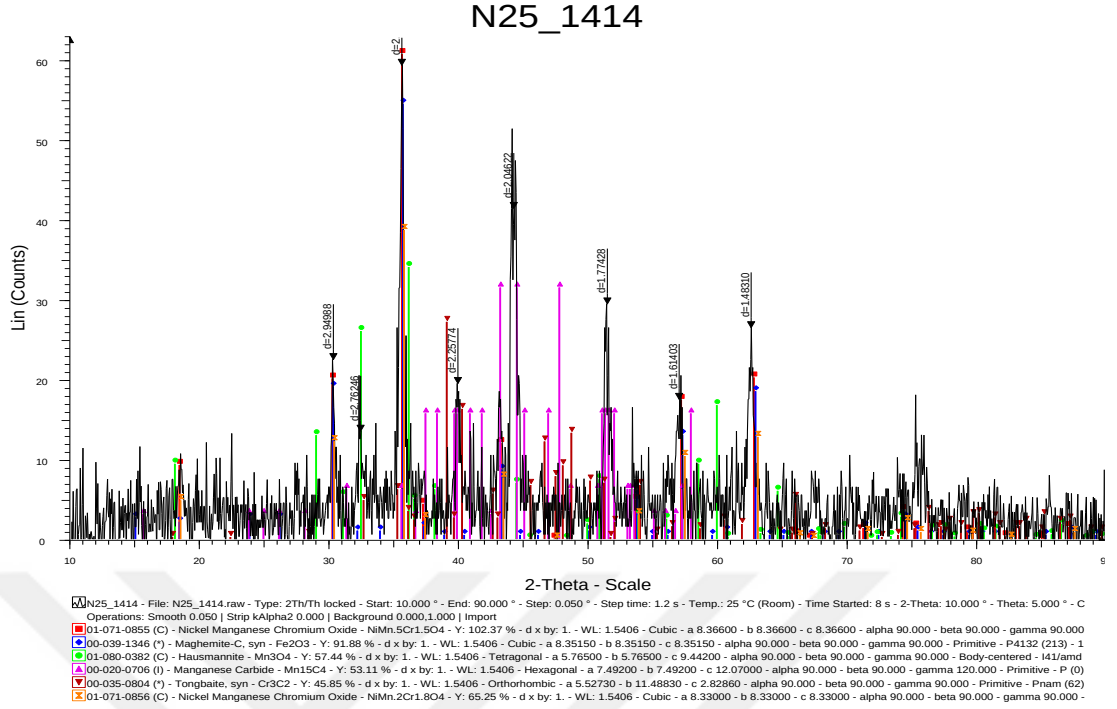
Şekil 4.72 Karbon katkısı %2,5/1200°C XRD grafiği



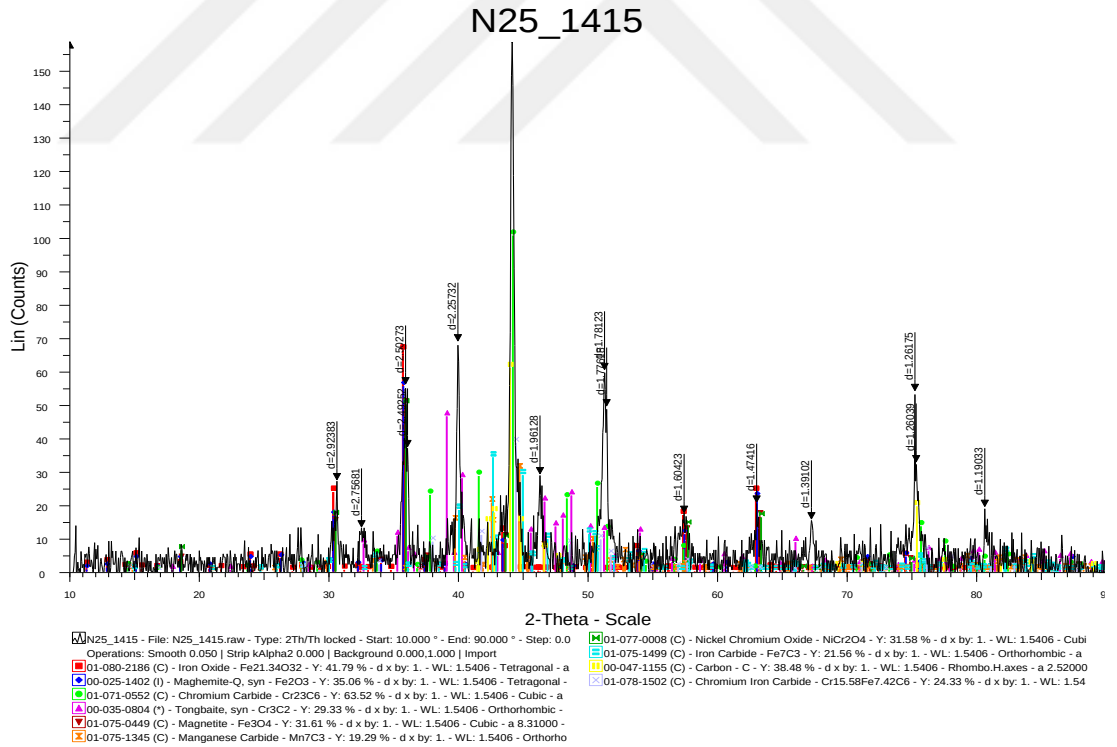
Şekil 4.73 Karbon katkısı /%5/1000°C XRD grafiği



Şekil 4.74 Karbon katkısı /%5/1200°C XRD grafiği

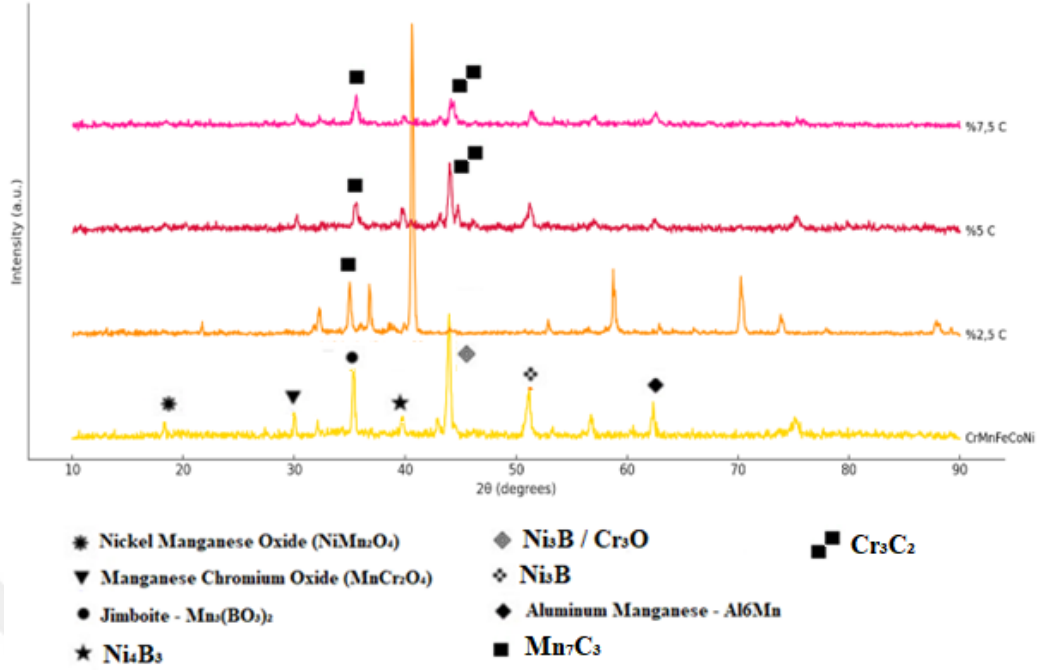


Şekil 4.75 Karbon katkısı /%7,5/1000°C XRD grafiği

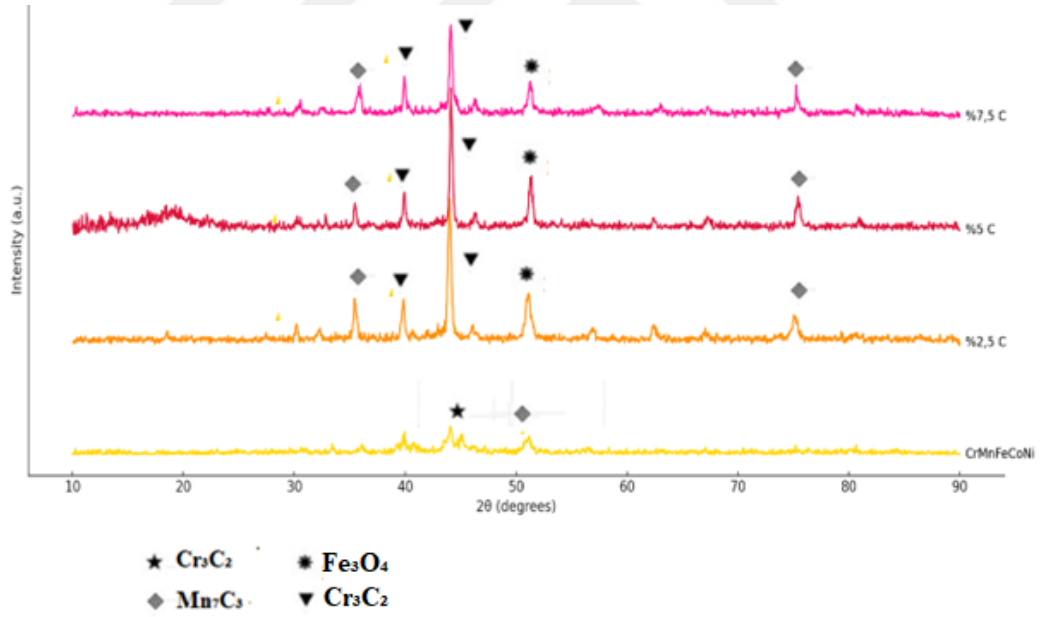


Şekil 4.76 Karbon katkısı /%7,5/1200°C XRD grafiği

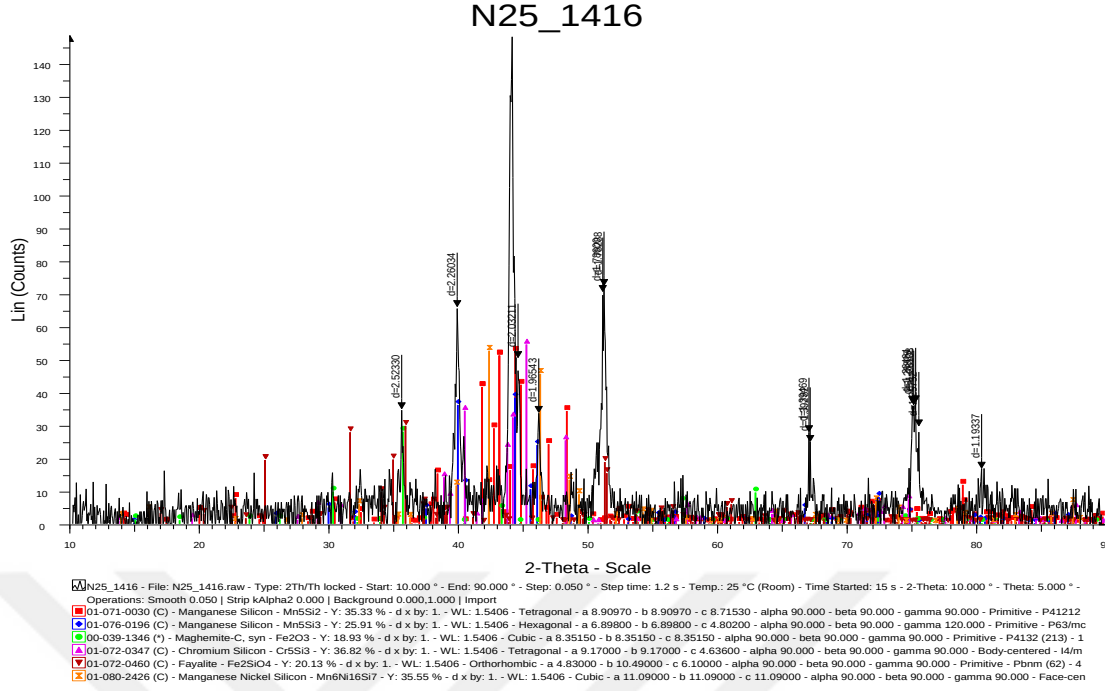
Ana Bileşene (Cantor alaşımı) karbonun 1000°C ve 1200°C’de 3 farklı oranda katılmasıyla oluşan yapıların bir arada aynı grafikte yorumlanabilmesi için oluşturulan grafikler aşağıda Şekil 4.77 ve Şekil 4.78’de verilmiştir.



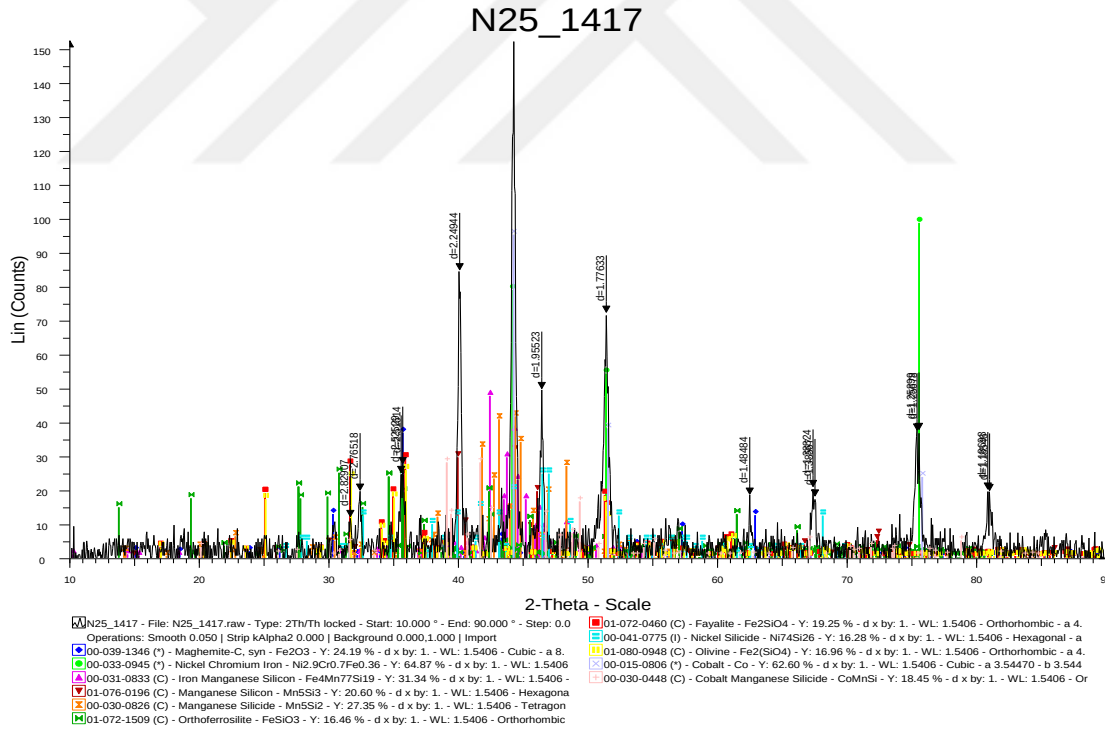
Şekil 4.77 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkı karbon elementinin kıyaslamalı grafiği



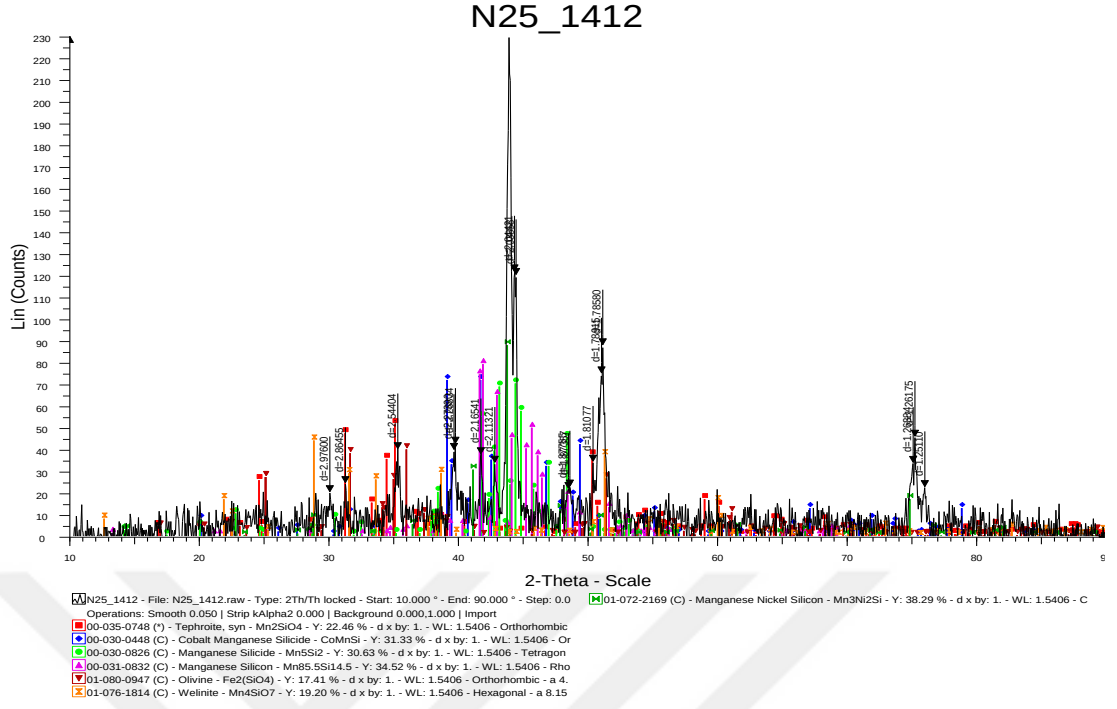
Şekil 4.78 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkı karbon elementinin kıyaslamalı grafiği



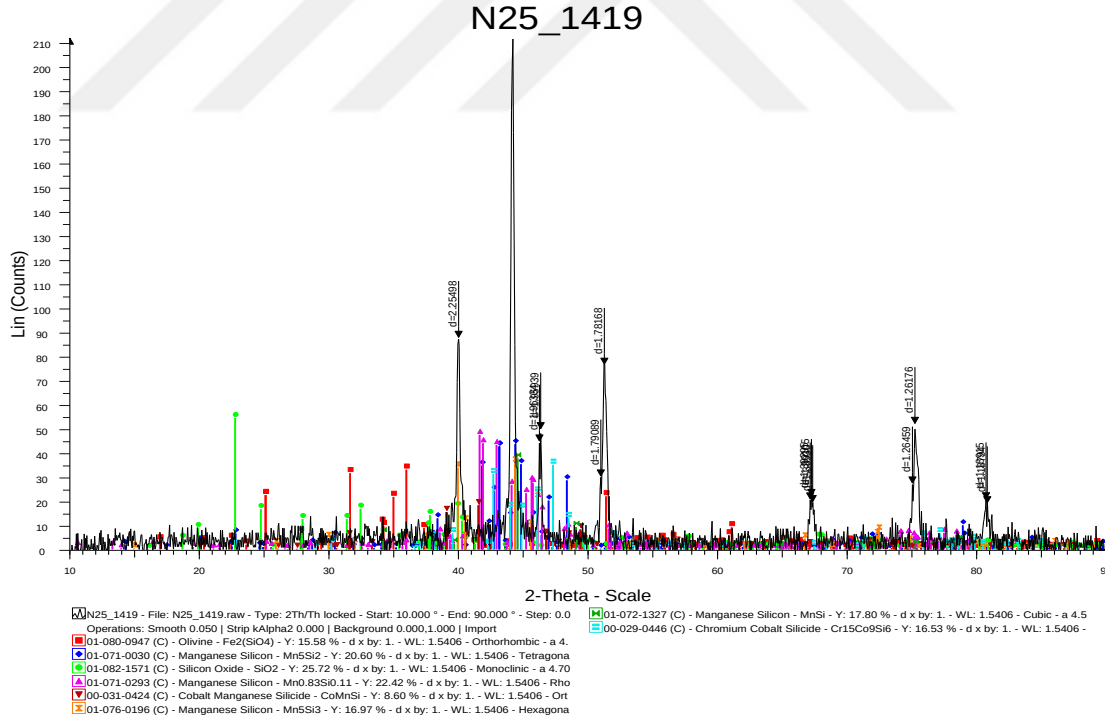
Şekil 4.79 Silisyum katkısı /%2,5/1000°C XRD grafiği



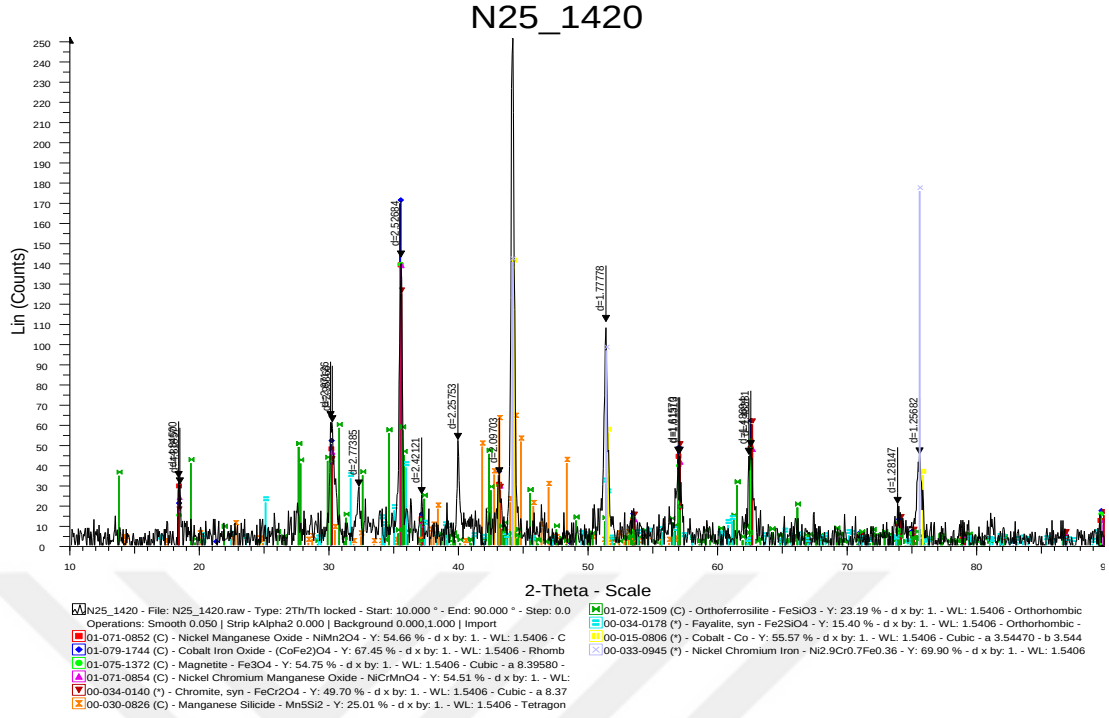
Şekil 4.80 Silisyum katkısı /%2,5/1200°C XRD grafiği



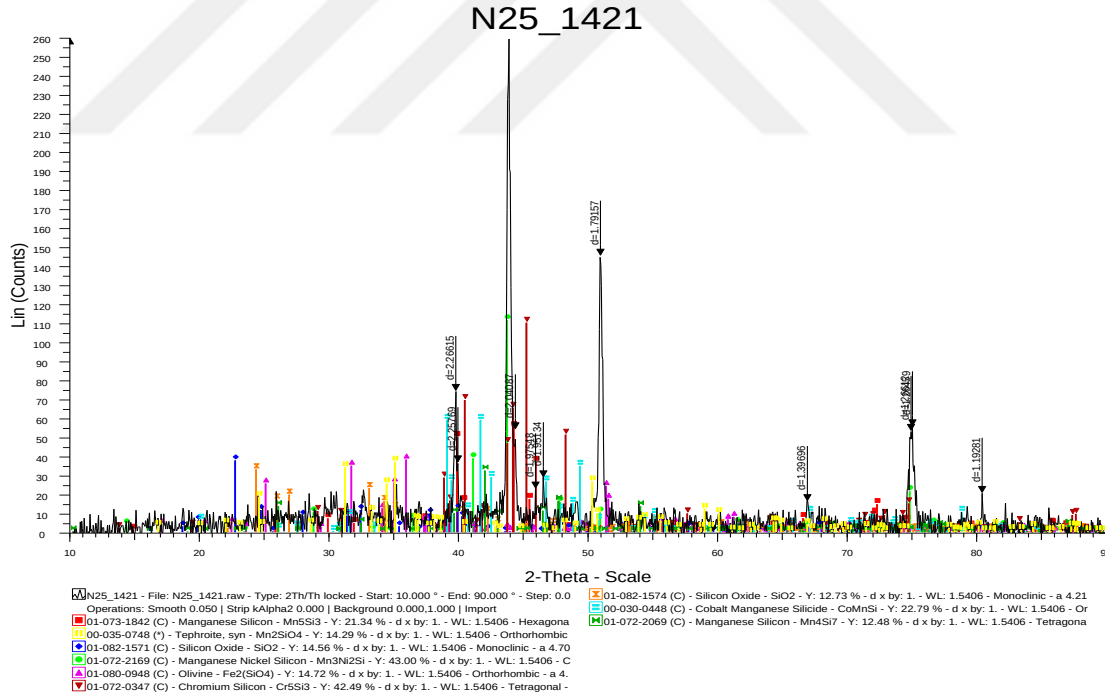
Şekil 4.81 Silisyum katkısı %5/1000°C XRD grafiği (Not: kodlamada 1412 yazılmış. Doğrusu 1418 olacak)



Şekil 4.82 Silisyum katkısı %5/1200°C XRD grafiği

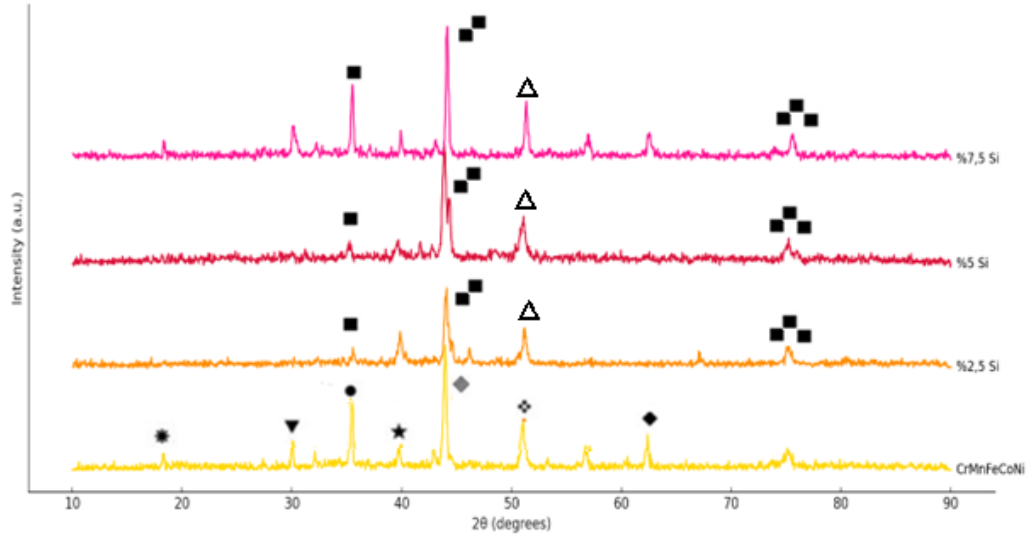


Şekil 4.83 Silisyum katkısı %7,5/1000°C XRD grafiği



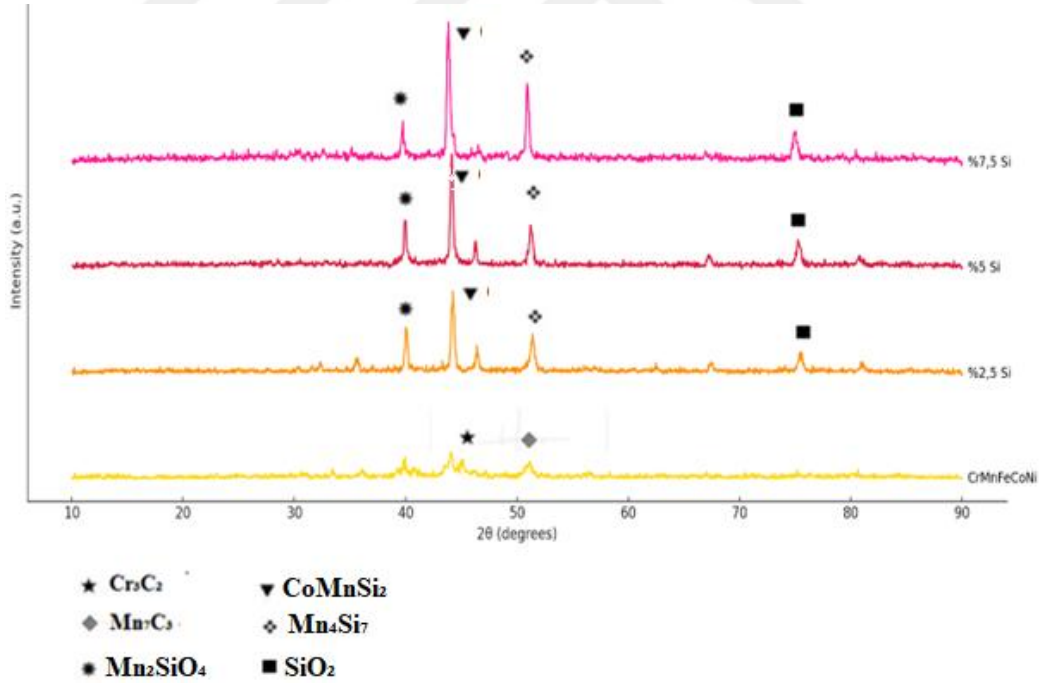
Şekil 4.84 Silisyum katkısı %7,5/1200°C XRD grafiği

Ana Bileşene (Cantor alaşımı) silisyumun 1000°C ve 1200°C’de 3 farklı oranda katılmasıyla oluşan yapıların bir arada aynı grafikte yorumlanabilmesi için oluşturulan grafikler aşağıda Şekil 4.85 ve Şekil 4.86’da verilmiştir.



- ★ Nickel Manganese Oxide (NiMn_2O_4)
- ◆ $\text{Ni}_3\text{B} / \text{Cr}_3\text{O}$
- Fe_2SiO_4
- ▼ Manganese Chromium Oxide (MnCr_2O_4)
- ◇ Ni_3B
- Δ Ni_7Si_6
- Jimboite - $\text{Mn}_2(\text{BO}_3)_2$
- ◆ Aluminum Manganese - Al_6Mn
- Fe_2SiO_4
- ★ Ni_4B_3
- Fe_2O_3

Şekil 4.85 Cantor alaşımına eklenen 1000°C’de katkı silisyum elementinin kıyaslamalı grafiği



Şekil 4.86 Cantor alaşımına eklenen 1200°C’de katkı silisyum elementinin kıyaslamalı grafiği

Üretimi gerçekleştirilen yüksek entropili alaşım (YEA) esaslı kompozit numunelerin faz analizlerini gerçekleştirmek ve mikro yapıdaki kristal yapının karakterizasyonunu detaylı bir biçimde ortaya koymak amacıyla X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction, XRD)

analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen veriler Şekil 4.53 ile Şekil 4.86 arasında sunulmuştur. Her bir YEA numunesi için gerçekleştirilen bu analizler, hem matris yapısında takviye fazlarına bağlanmayı kolaylaştıracak yeni faz oluşumlarının meydana gelip gelmediğini, hem de ilave edilen takviye parçacıklarının alaşım bünyesine dahil olup olmadığını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. İlgili XRD kırınım desenleri dikkatli biçimde incelendiğinde, kompozit yapılar içerisinde hem yüzey merkezli kübik (YMK) hem de hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapılarına sahip katı çözeltilerin olduğu açıkça tespit edilmiştir. Bu kristal fazların varlığı, üretim süreci sırasında bir araya getirilen alaşım elementleri arasında oluşan kompleks etkileşimlerin ve çoklu elementli sistemin neden olduğu termodinamik denge durumlarının bir sonucudur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen sinterleme işlemi, atomlar arası difüzyonu artırarak farklı fazların oluşmasına zemin hazırlamıştır. Bu nedenle, gözlemlenen YMK ve HMK fazlarının, hem matris hem de takviye fazlarının kimyasal uyumu açısından önemli bilgiler sunduğu değerlendirilmektedir. XRD analiz sonuçları aynı zamanda, ilave edilen Alüminyum, Bor, Karbon ve Silisyum gibi takviye elementlerinin YEA matrisi ile etkileşerek yeni fazlar oluşturabildiğini ve bu takviye fazlarının, katı çözelti şeklinde alaşım yapısı içerisine entegre olabildiğini göstermektedir. Takviye oranının artırılmasıyla birlikte, XRD desenlerinde bu takviye elementlerine karşılık gelen kırınım piklerinde yoğunluk artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı miktarının doğrudan doğruya kristal yapı üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve takviye fazlarının alaşım sistemi içerisinde etkin şekilde yer aldığını doğrulamaktadır. Ayrıca, literatürde gerçekleştirilen benzer içerikli çalışmalarda da, farklı oranlarda takviye elementi içeren YEA sistemlerine ait XRD analizlerinde benzer fazlara ve kırınım piklerine rastlandığı bildirilmiştir. Bu paralellik, elde edilen bulguların literatürle uyumlu olduğunu göstermekte ve deneysel bulguların güvenilirliğini desteklemektedir. Sonuç olarak, yapılan XRD analizleri, hem mikroyapısal bütünlük açısından hem de kristal faz oluşumlarının değerlendirilmesi yönünden kritik bilgiler sunmakta; üretim sürecinin ve takviye miktarlarının optimize edilmesinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

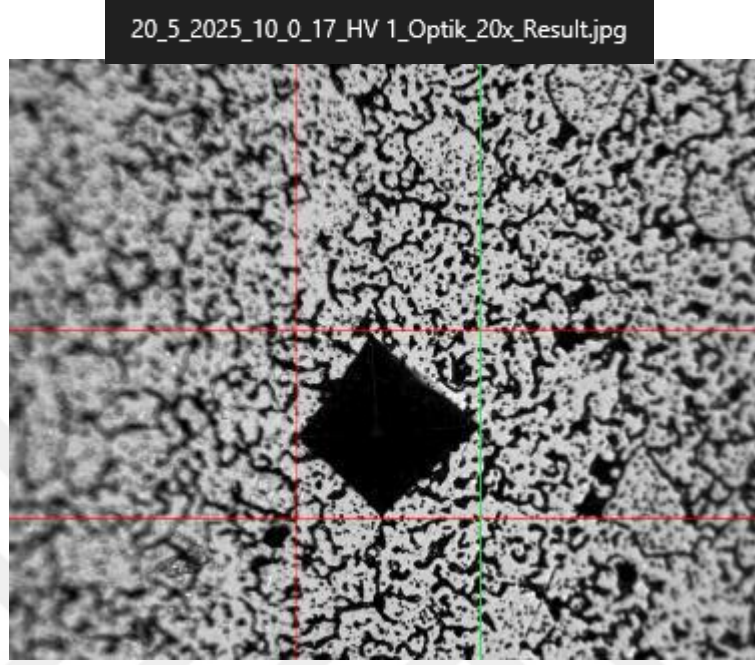
4.4 Mikrosertlik Analiz Sonuçları

Numunelerin sertlikleri Çankırı Karatekin Üniversitesi ÇANKAM birimindeki vickers mikrosertlik cihazı ile ölçülmüştür. Her numuneden 5'er iz alınmış ve bunların ortalaması kullanılmıştır. Yük olarak denemeler sonucu 10 kg'da karar kılınmıştır.

Tablo 4.1 Üretilen numunelerin mikrosertlik analiz sonuçları

ALAŞIM	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ortalama
Ana Bileşen (1000°C)	201,0	178,2	196,0	192,3	210,0	195,5
Ana Bileşen (1200°)	196,0	158,0	221,0	187,0	195,0	191,4
Al %2,5 1000°C	106,0	96,5	100,2	89,0	92,0	96,7
Al %2,5 1200°C	101,0	109,0	112,0	82,9	87,2	98,42
Al %5 1000°C	78,8	86,2	80,0	68,6	75,5	77,8
Al %5 1200°C	76,3	78,3	79,7	64,8	66,8	73,18
Al %7,5 1000°C	346,0	251,0	212,0	314,0	113,0	247,2
Al %7,5 1200°C	356,0	295,0	223,0	305,2	213,0	278,4
B %2,5 1000°C	56,1	82,1	67,9	67,8	91,7	73,12
B %2,5 1200°C	277,0	271,0	260,0	266,0	272,0	269,2
B %5 1000°C	36,6	39,0	38,1	35,8	41,5	38,2
B %5 1200°C	414,0	302,0	387,0	283,0	276,0	332,4
B %7,5 1000°C	589,0	887,0	591,0	973,0	868,0	781,6
B %7,5 1200°C	1180,0	868,0	755,0	897,0	897,0	919,4
C %2,5 1000°C	163,0	146,0	161,0	109,0	144,0	144,6
C %2,5 1200°C	467,0	364,0	452,0	395,0	335,0	402,6
C %5 1000°C	256,0	321,0	421,0	298,3	300,3	319,3
C %5 1200°C	125,2	145,0	125,0	135,0	134,0	132,8
C %7,5 1000°C	142,0	152,6	128,3	150,0	156,0	145,8
C %7,5 1200°C	170,0	141,0	123,0	160,0	159,0	150,6
Si %2,5 1000°C	195,0	181,0	155,0	141,0	155,0	165,4
Si %2,5 1200°C	267,0	244,0	249,0	276,0	245,0	256,2
Si %5 1000°C	111,0	122,0	122,0	108,0	123,0	117,2
Si %5 1200°C	309,0	297,0	307,0	301,0	318,0	306,4
Si %7,5 1000°C	289,0	438,0	243,0	124,0	115,0	241,8
Si %7,5 1200°C	369,0	372,0	376,0	348,0	417,0	376,4

Mikrosertlik görüntüleri için tamamı değil bir numuneye ait ekran görüntüsü örnek olarak çalışmaya eklenmiştir.



Şekil 4.87 Bir numuneye ait mikrosertlik bilgisayar ekran görüntüsü

Yüksek entropili alaşımların (High Entropy Alloys, HEAs) mekanik özellikleri kapsamında gerçekleştirilen sertlik analizlerinin sonuçları, Tablo 4.1 ve Şekil 4.79'da detaylı biçimde sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, takviye içermeyen referans YEA numunesinin, tüm numuneler arasında en düşük sertlik değerini gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, yapıda sert faz içermeyen sistemlerin dislokasyon hareketlerine karşı daha az direnç gösterdiğini ve bu nedenle daha düşük mukavemet seviyelerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, yüksek entropili alaşımların sertliğinin, matris yapısına ilave edilen takviye fazlarıyla birlikte anlamlı şekilde arttığını açıkça ortaya koymuştur. Bu artışın temel nedeni olarak, mikroyapı içerisinde yer alan sert ve kararlı takviye parçacıklarının dislokasyon hareketlerini engellemesi gösterilmektedir. Takviye partikülleri, plastik deformasyon sırasında hareket eden dislokasyonların ilerlemesini sınırlandırarak, malzeme mukavemetinde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Özellikle parçacık boyutu, dağılımı ve matris ile olan bağlanma kalitesi, sertlik üzerindeki etkileri doğrudan belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Şekil 4.79'da sunulan grafikler, farklı takviye içeriklerine sahip YEA numuneleri arasında

anlamli sertlik farklarinin olustugunu ortaya koymaktadir. Elde edilen sonuclar, ozellikle Aluminyum, Bor, Karbon ve Silisyum gibi elementlerle takviye edilmiş numunelerde sertlik değerlerinin belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, katkı fazlarının yüksek sıcaklıkta sinterleme sürecinde matris ile uyumlu bir şekilde dağılması ve sert seramik benzeri fazların oluşmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, takviye içeriğinin artmasıyla birlikte oluşan dispersiyon sertleştirme etkisi (dispersion strengthening), mikroyapının homojenliğini artırarak yük transfer mekanizmalarını da iyileştirmiştir. Sert parçacıkların dislokasyonlara karşı fiziksel bir bariyer oluşturarak plastik deformasyonun önüne geçmesi, bu alaşımların mühendislik uygulamalarında tercih edilmesini sağlayan temel mekanizmalardan biridir. Dispersiyon güçlendirmesinin etkisiyle birlikte, parçacık boyutundaki küçülme ve düzgün dağılım, alaşımın mekanik performansını daha da üst seviyelere taşımaktadır.

Sonuç olarak, yapılan sertlik testlerinden elde edilen veriler, takviye fazlarının yüksek entropili alaşımların mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu ve bu etkilerin doğrudan sertlik değerlerine yansıdığını göstermektedir. Takviye içermeyen alaşım numunesi ile kıyaslandığında, takviye ilavesiyle geliştirilen tüm numunelerde sertlik artışı açık biçimde ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, optimum mekanik özelliklerin elde edilmesi için takviye fazı miktarının dikkatle seçilmesi ve mikroyapı-mekanik ilişkisinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, farklı oranlarda (%2,5-%5 ve %7,5) alaşım elementi katkısı içeren yüksek entropili alaşımının (YEA) mikroyapı, elementel dağılım ve mikrosertlik davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri, tüm numunelerde dendritik yapının belirgin olduğunu ve katkı oranına bağlı olarak dendritik kol uzunluklarında ve dağılımında farklılıklar oluştuğunu göstermiştir. Özellikle, katkı miktarı arttıkça interdendritik bölgelerin daha homojen hale geldiği ve yapı içindeki mikroskopik kontrastın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkıların mikroyapı homojenliğini artırdığına işaret etmektedir.

EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) analizleri, her numunede hedeflenen elementlerin başarılı bir şekilde matrise entegre edildiğini ve bileşenlerin mikroyapı boyunca homojen dağıldığını doğrulamıştır. Katkı miktarının artmasıyla birlikte bazı elementlerin segregasyon eğiliminde azalma olduğu ve alaşımın kimyasal stabilitesinin güçlendiği belirlenmiştir. Elementel haritalama sonuçları, katkıların mikroyapıda belirli bölgelerde yoğunlaşmadan, eşit dağılımla yer aldığını ortaya koymuştur.

Mikrosertlik testleri, katkı oranındaki artışın doğrudan alaşımın mekanik performansına yansıdığını göstermiştir. Özellikle katkılı numunelerde, borsuz referans numuneye kıyasla önemli düzeyde sertlik artışı kaydedilmiştir. Bu artış, katkıların kafes yapısında neden olduğu gerilmeler, çökelti oluşumları ve mikroyapısal sertleştirme mekanizmalarıyla açıklanabilir. Ayrıca, mikrosertlikteki artışın elementel homojenlikle korelasyon gösterdiği ve katkıların sadece yapısal değil aynı zamanda fonksiyonel iyileştirme sağladığı görülmüştür.

Sonuç olarak, katkı ilavesi yüksek entropili alaşımların mikroyapısal kararlılığını artırmakta ve mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Bu çalışma, katkılı YEA sistemlerinin özellikle ileri mühendislik uygulamaları için tasarım esnekliği ve performans optimizasyonu sağladığını göstermektedir. Bu haliyle YEA değişik sektörlerde üstün özellikleriyle tercih edilebilir alaşımlar olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ding, Q., Zhang, Y., Chen, X., Fu, X., Chen, D., Chen, S., Gu, L., Wei, F., Bei, H. Gao, Y., Wen, M., Li, J., Zhang, Z., & Zhu, T., Robert, O.R, Yu, Q. (2019). “Tuning element distribution, structure and properties by composition in high-entropy alloys”, *Nature*, vol:574, 2019,223
- Erdoğan, A., & Zeytin S. (2019). Yüksek entropili alaşımlar: prensipler ve alaşım tasarımı. ISSN:2564-6605 doi:10.28948/ngumuh.517876
- Fazakas, É., Zadorozhnyy, V., & Louzguine-Luzgin, D.V. (2015). Effect of iron content on the structure and mechanical properties of Al₂₅Ti₂₅Ni₂₅Cu₂₅ and (AlTi)_{60-x}Ni₂₀Cu₂₀Fe_x (x=15, 20) high entropy alloys. *Applied Surface Science* 358 (2015) 549-555
- George, E.P., Raabe, D., & Ritchie, R.O. (2019). High –entropy alloys. *Nature Reviews-Materials* , Volume 4 August 2019.
- Hemphilla, M.A., Yuanb, T., Wanga, G.Y., Yehc, J.W., Tsaic, C.W., Chuanga, A., & Liawa, P.K. (2012). Fatigue behavior of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloys. *Acta Materialia* 60 (2012) 5723-5734
- K.B. Zhang, Z.Y. Fu, J.Y. Zhang, W.M. Wang, H. Wang, Y.C. Wang, Q.J. Zhang, J. Shi (2009). “Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiTiAl_x high-entropy alloys” *Material Science and Engineering A* 508 (2009) 214-219
- Karaca, Y. (2019). Yüksek Entropili CrMnCoNiAl alaşımlarına Bor ilavesinin Etkisi. 2019 Nevşehir.
- Liu, L., Zhu, J.B., Li, L., Li, J.C., & Jiang, Q. (2013). Microstructure and tensile properties of FeMnNiCuCoSn_x high entropy alloys. *Material and design* 44 (2013) 223-227
- Ma, S.G., & Zhang, Y. (2012). Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Material Science and Engineering A* 532 (2012) 480-486
- Ming-Hung, T. (2013). Physical Properties of High Entropy Alloys. *Entropy* ISSN 1099-4300 www.mdpi.com/journal/entropy, Erişim Tarihi: 15.04.2023.
- Ming-Hung, T., & Jien-Wei Y. (2014). High-Entropy Alloys: A Critical Review. ISSN print) 2166-3831 (online) journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/tmrl20>
- Ming-Hung, T., Hao, Y., Guangming, C., Weizong, X., Weiwei, W.J., Ming-Hao C., Chien-Chang, J., An-Chou, Y., Su-Jien, L., Yuntian, Z. (2013). Significant hardening due to the formation of a sigma phase matrix in a high entropy alloy. *Intermetallics*, 2013, 81-86, Elsevier

- Otto, F. Yang, Y., Bei, H., & George, E.P. (2013). Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia* 61 (2013) 2628-2638
- Ozkan, D., & Karaoglanlı, A.C. (2021). High Entropy Alloys: Production, Properties and Utilization Areas. *ECJSE* ISSN:2148-3736 Vol:8 No:1,2021 (164-181)
- Özkan, D., & Karaoğlanoğlu, A.C. (2021). High Entropy Alloys: Production, Properties and Utilization Areas. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* vol:8 no:1, 2021 (164-181) doi: 10.31202/ecjse.800968
- Praveen, S., & Hyoun, S. K. (2020). High-entropy alloys with heterogeneous microstructure: Processing and mechanical properties. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100709>
- Ren, B., Liu, Z.X., Cai, B., Wang, M.X., & Shi, L. (2012). Aging behavior of a uCr₂Fe₂NiMn highentropy alloy. *Material and Design* 33(2012) 121-126
- Sathiyamoorthi, P., & Kim, H.S. (2020). High-entropy alloys with heterogeneous microstructure: Processing and mechanical properties. *Progress in Material Science*, 2020,0079-6425
- Senkov, O.N., Wilks, G.B., Scott, J.M., & Miracle, D.B. (2011). Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 2011, Elsevier 698-706
- Şarlar, K. (2019). Nadir Toprak Elementi İçermeyen Yüksek Entropili Alaşımın Manyetik ve Manyetokalorik Özelliklerinin İncelenmesi. 2019 Bursa.
- Tsai, M.H. (2013). Physical Properties of High Entropy Alloys. *Entropy* 2013, 15, 5338-5345; doi:10.3390/e15125338
- URL-1 (2013). [http://cdn.intechopen.com/pdfs/15091/InTech-Properties and applications of ceramic composites containing silicon carbide whiskers.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/15091/InTech-Properties_and_applications_of_ceramic_composites_containing_silicon_carbide_whiskers.pdf) (erişim tarihi: 20.09.2013)
- URL-2 (2024). <https://rockymountainlabs.com/techniques/scanning-electron-microscopy-sem-analysis/>, Erişim Tarihi: 11.01.2024.
- URL-3 (2024). www.researchgate.net, Erişim Tarihi: 19.01.2024.
- URL-4 (2024) <https://rockymountainlabs.com/techniques/energy-dispersive-x-ray-spectroscopy-eds/>, Erişim Tarihi: 3.05.2024.
- URL-5 (2024). https://universallab.org/blog/blog/the_basic_principles_and_applications_of_xrd/, Erişim Tarihi: 11.01.2024.
- URL-6 (2024). cdn.hitit.edu.tr, Erişim Tarihi: 18.01.2024.
- URL-7 (2024). <https://www.buehler.com/blog/knoop-hardness-testing/>, Erişim Tarihi: 4.02.2024

- Weiping, C., Zhiqiang F., Sicong, F., Huaqiang, X., & Dezhi, Z. (2013). Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a FeNiCrCo_{0.3}Al_{0.7} high entropy alloy. *Material and Design* 51 (2013) 854-860
- Woei-Ren, W., Wei-Lin, W., Shang-Chih, W., Yi-Chia, T., Chun-Hui, L., & Jien-Wei, Y. (2012). Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of Al_xCoCrFeNi hightentropy alloys. *Intermetallics* 26(2012) 44-51
- Yeh. J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., & Chang S.Y. (2004). Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials* ,2004, 6, No. 5 Doi: 10.1002/adem.200300567
- Yiping, L., Yong, D., Sheng, G., Li, J., Huijun, K., Tongmin, W., Bin, W., Zhijun, W., Jinchuan, J., Zhiqiang, C., Haihui, R., & Tingju, L. (2014). A Promising New Class of High-Temperature Alloys: Eutectic High-Entropy Alloys. *Scientific Reports*, 4:6200, doi:10.1038/srep06200,2014
- Yong, Z., Ting Ting, Z., Zhi, T., Michael C. G., Karin, A. D., Peter K., & Liaw, Z. P. L. (2013). Microstructures and properties of High-Entropy Alloys. *Progress in Materials Science* 61 (2014) 1-93 Elsevier
- Zezhou, L., Shiteng Z., Robert, O., & Ritchie, M. A. M. (2019). Mechanical properties of hightentropy alloys with emphasis on face –centered cubic alloys” progress in materials science 102, 296-345 Elsevier
- Zhang, W., Liaw, P.K. & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *mater.scichina.com* <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- Zhang, W., Liaw, P.K., Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 2018, doi:10.1007/s40843-017-9195-8
- Zhang, Y., Yang, X. & Liaw, P. K. (2012). Alloy Design and Properties Optimization of HighEntropy Alloys. *JOM*, Vol.64, No.7,2012 doi:10.1007/s11837-012-0366-5
- Zhang, Y., Yang, X., & Liaw, P. K. (2012). Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys. *JOM*, vol.64, no.7, 2012 doi:10.1007/s11837-012-0366-5
- Zhuang, Y.X., Liu, W.J., Chen, Z.Y., Xue, H.D., & He, J.C. (2012). Effect of elemental interaction on microstructure and mechanical properties of FeCoNiCuAl alloys. *Material Science and Engineering A* 556 (2012) 395-399
- Zuo, T.T., Li, R.B., Ren, X.J., & Zhang, Y. (2014). Effects of Al and Si addition on the structure and properties of CoFeNi equal atomic ratio alloy. *Journal of Magnetism and magnetic Materials* 371 (2014) 60-68