

Yüksek Entropili Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni Esaslı Ötektik Alaşımlarının Tasarlanması,  
Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Akın Özcan

**DOKTORA TEZİ**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2020

Design, Production and Characterization of High Entropy Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni Based  
Eutectic Alloys

Akın Özcan

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Metallurgy and Materials Engineering

November 2020



Yüksek Entropili Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni Esaslı Ötektik Alaşımlarının Tasarlanması,  
Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Akın Özcan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Malzeme Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Hakan Gaşan

Bu Tez TÜBİTAK tarafından 216M063 no'lu ve ESOĞÜ Bap 201615A231 no'lu projeler çerçevesinde desteklenmiştir.

Kasım 2020

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Hakan Gaşan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yüksek Entropili Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni Esaslı Ötektik Alaşımlarının Tasarlanması, Üretilmesi ve Karakterizasyonu” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 25/11/2020

Akın Özcan

İmza

## ÖZET

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık uygulamaları için üstün mekanik özelliklere sahip ötektik yüksek entropili alaşımların tasarım, üretim ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni ve Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemlerinde, ThermoCalc programı ve TCHEA2 veritabanı kullanılarak sistematik bir tarama gerçekleştirilmiş ve bu sistemlerde bulunan ötektik alaşımların kompozisyonları belirlenmiştir. Belirlenen ötektik alaşımlar içerisinde yapılarında sünek YMK ile birlikte sert B2 veya Lave fazlarını barındıran ve aynı zamanda üretim sırasında istenmeyen fazların oluşma ihtimali düşük olan  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ,  $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{92}Al_8$ ,  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ve  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  alaşımları belirlenerek vakum ark ergitme ve döküm yöntemi ile üretilmişlerdir. Üretilen alaşımların yapı-özellik ilişkilerinin ortaya çıkarılması amacıyla da yapısal ve mekanik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ,  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ve  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  ötektik alaşımlarının yapısında sadece YMK ve B2 fazlarını,  $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{92}Al_8$  alaşımının ise YMK ve Lave fazlarını barındırdığı tespit edilmiştir. Mekanik karakterizasyon çalışmaları sonucu  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ,  $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{92}Al_8$ ,  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ve  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  ötektik alaşımlarının oda sıcaklığındaki akma mukavemetleri ve süneklikleri sırasıyla; 668 MPa - %32,5; 1179 MPa - %12,9; 606 MPa - %60 ve 554 MPa - %42,1 olarak tespit edilmiştir.

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla;  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında katılaşma hızının, ısıl işlemin, deformasyonun ve B elementi ile mikroalaşımlamanın etkisi,  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  alaşımında Mo ve V elementleri ile alaşımlamanın etkisi araştırılmıştır. En yüksek mukavemet artışı,  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında 300 ppm B ilavesi ile elde edilmiştir.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$  ppm alaşımında akma mukavemeti ve süneklik değerleri, sırasıyla 902 MPa - %31,0 olarak tespit edilmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen yüksek sıcaklık basma deneyleri sonucunda  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$  ppm alaşımının 750 °C'ye kadar mekanik özelliklerini koruduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ötektik Yüksek Entropili Alaşımlar, Alaşım Tasarımı

## SUMMARY

In this study, design, production and characterization studies of eutectic high entropy alloys with superior mechanical properties for high temperature applications were carried out. A systematic search was performed on Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni and Al-Co-Cr-Fe-Ni systems using the ThermoCalc program and the TCHEA2 database, and the compositions of eutectic alloys in these systems were determined. Among the determined eutectic alloys;  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8}$ ,  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{92}\text{Al}_8$ ,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  and  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{83}\text{Al}_{17}$  compositions, which contain ductile FCC and hard B2 or Lave phases and at the same time have low probability of occurrence of undesirable phases during production, were selected and produced by vacuum arc melting and casting method. Structural and mechanical characterization studies were carried out in order to reveal the structure-property relationships of the produced alloys.

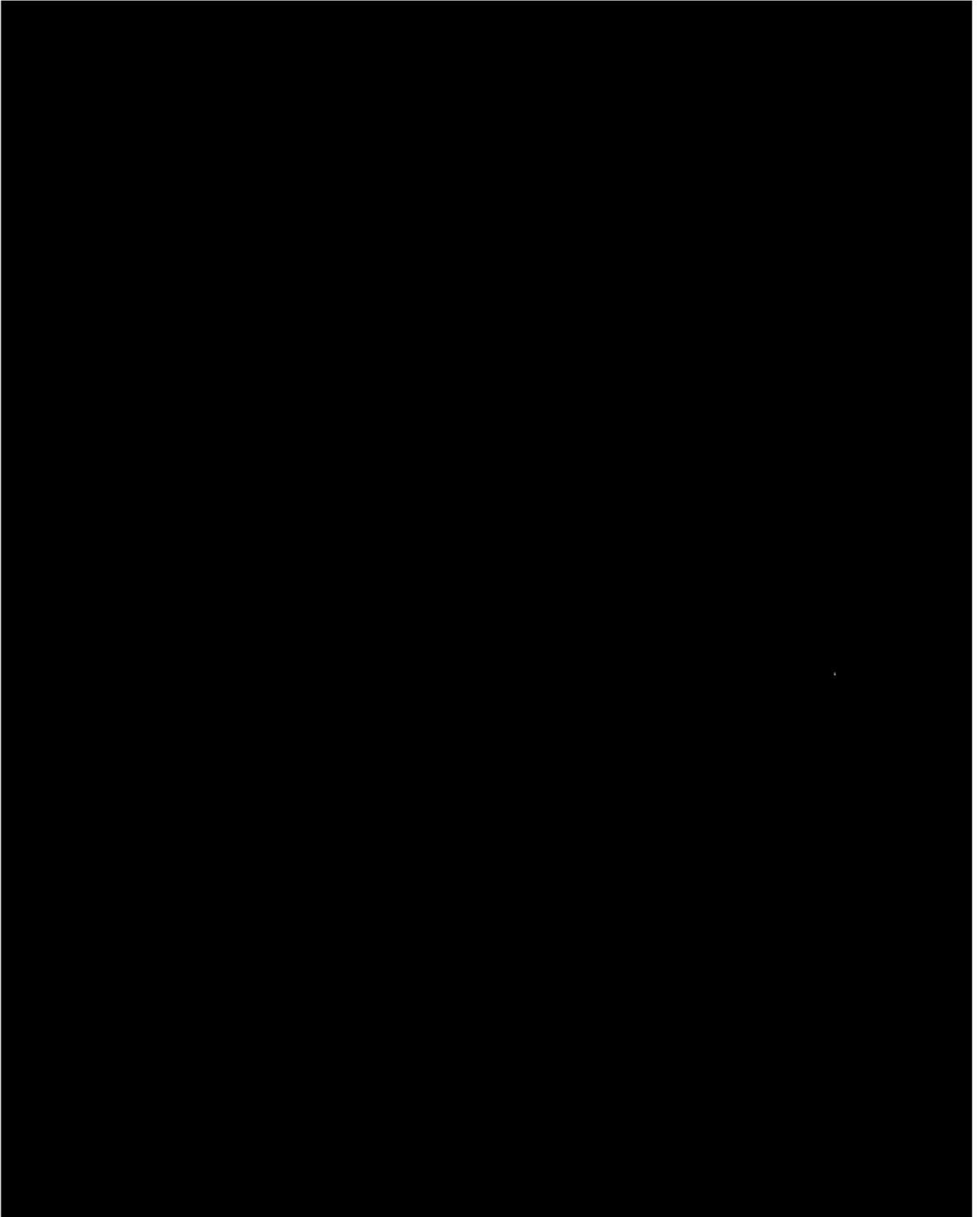
It was determined that the produced  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8}$ ,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  and  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{83}\text{Al}_{17}$  eutectic alloys contain only FCC and B2 phases, while the  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{92}\text{Al}_8$  alloy contains FCC and Lave phases. As a result of the mechanical characterization studies room temperature yield strength and ductility of  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8}$ ,  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{92}\text{Al}_8$ ,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  and  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{83}\text{Al}_{17}$  eutectic alloys were determined as 668 MPa - 32.5%; 1179 MPa - 12.9%; 606 MPa -> 60% and 554 MPa - 42.1% respectively.

In order to improve the mechanical properties; the effect of solidification rate, heat treatment, deformation and microalloying with element B in alloy  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8}$ , and the effect of alloying with Mo and V elements in alloy  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  were investigated. The maximum strength increase was obtained with the addition of 300 ppm B in  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8}$  eutectic alloy. The yield strength and ductility values for the  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8} + 300\text{ppm B}$  alloy were determined as 902 MPa - 31.0%, respectively.

As a result of the high temperature compression tests performed to determine the high temperature mechanical properties, it has been determined that the mechanical properties of the alloy  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82.2}\text{Al}_{17.8} + 300\text{ppm B}$  were not affected up to 750 °C.

**Keywords:** Eutectic High Entropy Alloys, Alloy Design

## TEŞEKKÜR



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xviii
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR</b> .....	3
2.1. Yüksek Entropili Alaşımın Tarihsel Gelişimi .....	3
2.2. Yüksek Entropili Alaşımın Tanımlanması .....	4
2.2.1. Kompozisyon temelli tanımlama .....	4
2.2.2. Entropi temelli tanımlama .....	5
2.3. Dört Temel Etki .....	6
2.3.1. Yüksek entropi etkisi .....	6
2.3.2. Yavaş difüzyon etkisi .....	7
2.3.3. Aşırı latis distorsiyonu .....	8
2.3.4. Kokteyl Etkisi .....	9
2.4. Alaşım Tasarımı .....	10
2.4.1. Ampirik yaklaşımlar .....	10
2.4.2. Atomistik yaklaşımlar .....	12
2.4.3. Calphad .....	12
<b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	14
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	18
4.1. Alaşım Tasarımı .....	18

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.1. Alaşım paletinin belirlenmesi.....	18
4.1.2. Bileşim kombinasyonlarının belirlenmesi ve makro dosyalarının oluşturulması .....	19
4.1.3. Denge diyagramlarının oluşturulması ve katılma simülasyonları.....	19
4.2. Alaşımların Üretilmesi .....	20
4.3. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları .....	21
4.4. Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları .....	22
4.5. Mekanik Özellikleri Geliştirme Çalışmaları .....	22
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>24</b>
5.1. Termodinamik Hesaplamalar .....	24
5.1.1. Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni sistemi termodinamik hesaplamaları .....	24
5.1.3. Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sistemi termodinamik hesaplamaları .....	37
5.1.2. Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemi termodinamik hesaplamaları .....	39
5.2. Ötektik Alaşımların Üretilmesi ve Yapısal Karakterizasyonu.....	43
5.2.1. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ ötektik alaşımının üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu.....	43
5.2.2. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{100-x}Al_x$ , $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{10}Nb_{10}Ni_{30})_{100-x}Al_x$ ve $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{100-x}Al_x$ ötektik alaşımlarının üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu.....	52
5.2.3. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{100-x}Al_x$ ve $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{100-x}Al_x$ ötektik alaşımlarının üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu.....	54
5.3. Ötektik Alaşımların Mekanik Karakterizasyonu .....	57
5.3.1. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ ötektik alaşımının mekanik karakterizasyonu .....	57
5.3.2. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ ve $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$ ötektik alaşımının mekanik karakterizasyonu .....	59

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

5.3.3. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{100-x}Al_x$ , $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{10}Nb_{10}Ni_{30})_{100-x}Al_x$ ve $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{100-x}Al_x$ ötektik alaşımlarının mekanik karakterizasyonu .....	60
5.4. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ve $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ Alaşımlarına Uygulanan Mukavemet Artırma Çalışmaları .....	61
5.4.1. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında soğutma hızının etkisi.....	61
5.4.2. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında deformasyonun etkisi.....	63
5.4.3 $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında Bor ilavesinin etkisi.....	66
5.4.4. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında ısıl işlemin etkisi.....	67
5.4.5. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ alaşımına Mo, Nb ve V ilavesinin etkisi .....	74
5.5. Yüksek Sıcaklık Basma Deneyleri.....	81
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>85</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>90</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>97</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bileşen sayısına göre konfigürasyonel entropi değişimi. ....	6
2.2. Artan bileşen sayısı alaşımlarda karşılaşılan fazların oranı. Katı çözeltiler (SS), intermetalik (IM) ve katı çözeltiler ve intermetalik (SS + IM) (Senkov, 2015).....	7
2.3. HMK yapıdaki geleneksel ve yüksek entropili alaşımlarda latis distorsiyonu (Murty, 2014). ....	9
2.4. $Al_xCoCrCuFeNi$ alaşımının faz yapısının ve sertliğinin Al içeriğine bağlı değişimi (Tsai ve Yeh, 2014).....	10
2.5. Farklı fazlara sahip döküm HEA'ların $\Delta H_{mix}-\delta$ grafiği kırmızı: tek fazlı katı çözeltiler, kırmızı ve mavi: çok fazlı, mavi: amorf (Ye vd., 2016). ....	11
3.1. Farklı katılma hızlarında üretilen ötektik $Al_{15}Fe_{30}Mn_{35}Ni_{20}$ alaşımına ait mikroyapı görüntüleri (Liao ve Baker, 2011).....	15
3.2. $AlCoCrFeNi_{2.1}$ ÖYEA'ına ait mikroyapı görüntüsü (Lu vd., 2014). ....	15
3.3. $CoFeNiVMo_{0,6}$ ve $CoFeNi_{1,4}VMo$ bileşimindeki ÖYEA'ların mikroyapı görüntüleri (Jiang vd., 2015).....	16
3.4. $Co_2Mo_{0,8}Ni_2VW_{0,8}$ bileşimindeki ÖYEA'ların mikroyapı görüntüsü (Hui vd., 2016). .....	16
4.1. Vakum ark ergitme ocağı ve su soğutmalı bakır pota. ....	20
4.2. Döküm ile üretilen silindirik ve dikdörtgen kesitli numuneler.....	21
5.1. $(Co_{15}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	24
5.2. $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{15}Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	25
5.3. $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{35})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	25
5.4. $(Co_{25}Cr_{20}Fe_{15}Mo_5Ni_{35})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	26
5.5. $(Co_{30}Cr_{15}Fe_{10}Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	26
5.6. $(Co_{35}Cr_{10}Fe_{10}Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	27
5.7. $(Co_{35}Cr_{15}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	27
5.8. $(Co_{35}Cr_{15}Fe_{10}Mo_5Ni_{35})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	28
5.9. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	28
5.10. $(Co_{40}Cr_{15}Fe_5Mo_5Ni_{35})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	29
5.11. $(Co_{20}Cr_{30}Fe_{35}Mo_{10}Ni_5)_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı.....	30

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.12. $(Co_{15}Cr_{25}Fe_{35}Mo_{10}Ni_{15})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	30
5.13. $(Co_{10}Cr_{30}Fe_{30}Mo_{10}Ni_{20})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	31
5.14. $(Co_{15}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{40})_{84,89}Al_{15,11}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	33
5.15. $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{15}Mo_5Ni_{40})_{84,61}Al_{15,39}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	33
5.16. $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{35})_{85,33}Al_{14,67}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	33
5.17. $(Co_{25}Cr_{20}Fe_{15}Mo_5Ni_{35})_{85,02}Al_{14,98}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	34
5.18. $(Co_{30}Cr_{15}Fe_{10}Mo_5Ni_{40})_{83,72}Al_{16,28}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	34
5.19. $(Co_{35}Cr_{10}Fe_{10}Mo_5Ni_{40})_{83,24}Al_{16,76}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	34
5.20. $(Co_{35}Cr_{15}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{83,01}Al_{16,99}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	35
5.21. $(Co_{35}Cr_{15}Fe_{10}Mo_5Ni_{35})_{84,09}Al_{15,91}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	35
5.22. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,43}Al_{17,57}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	35
5.23. $(Co_{40}Cr_{15}Fe_5Mo_5Ni_{35})_{83,35}Al_{16,65}$ ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılma diyagramları. ....	36
5.24. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	37
5.25. $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{10}Nb_{10}Ni_{30})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	38
5.26. $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	38
5.27. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{96}Al_4$ alaşımına ait denge durumu ve denge dışı katılma diyagramları. ....	38
5.28. $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{10}Nb_{10}Ni_{30})_{96,7}Al_{3,7}$ alaşımına ait denge durumu ve denge dışı katılma diyagramları. ....	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.29. $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{93,6}Al_{6,4}$ alaşımına ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.....	39
5.30. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	41
5.31. $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{100-x}Al_x$ sistemine ait denge diyagramı. ....	42
5.32. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83,87}Al_{16,13}$ bileşimine ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.....	42
5.33. $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{85,16}Al_{14,84}$ bileşimine ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.....	42
5.34. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{84}Al_{16}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.....	44
5.35. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,43}Al_{17,57}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri. ....	44
5.36. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82}Al_{18}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.....	44
5.37. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{84}Al_{16}$ alaşımına ait SEM görüntüleri. ....	45
5.38. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,43}Al_{17,57}$ alaşımına ait SEM görüntüleri.....	45
5.39. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82}Al_{18}$ alaşımına ait SEM görüntüleri. ....	45
5.40. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,25}Al_{17,75}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri. ....	46
5.41. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.....	46
5.42. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,15}Al_{17,85}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri. ....	47
5.43. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,25}Al_{17,75}$ alaşımına ait SEM görüntüleri.....	47
5.44. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait SEM görüntüleri. ....	47
5.45. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,15}Al_{17,85}$ alaşımına ait SEM görüntüleri.....	47
5.46. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında analiz alınan bölge SEM görüntüsü ve EDS analiz spektrumu. ....	48
5.47. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında analiz alınan B2 ve YMK fazları SEM görüntüsü ve bu fazlara ait EDS analiz spektrumu.....	49
5.48. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait EDS çizgi analizi. ....	49
5.49. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait elemental haritalama sonuçları. ....	50
5.50. Molce %16, %17,57 ve %18 Al içeren alaşımlara ait XRD diyagramları. ....	50
5.51. Molce %17,75, %17,8 ve %17,85 Al içeren alaşımlara ait XRD diyagramları. ....	51
5.52. Rietveld Analizini yansıtan örnek ekran görüntüsü. ....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.53. (Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>30</sub> Nb <sub>10</sub> Ni <sub>10</sub> ) <sub>92</sub> Al <sub>8</sub> alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-5000x, b-10000x).....	52
5.54. (Co <sub>20</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>10</sub> Nb <sub>10</sub> Ni <sub>30</sub> ) <sub>96,7</sub> Al <sub>3,7</sub> alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-5000x, b-10000x).....	53
5.55. (Co <sub>10</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>20</sub> Nb <sub>10</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>93,6</sub> Al <sub>6,4</sub> alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-5000x, b-10000x).....	53
5.56. (Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>30</sub> Nb <sub>10</sub> Ni <sub>10</sub> ) <sub>92</sub> Al <sub>8</sub> alaşımında analiz alınan Lave ve YMK fazları SEM görüntüsü ve bu fazlara ait EDS analiz spektrumu.....	53
5.57. (Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>30</sub> Nb <sub>10</sub> Ni <sub>10</sub> ) <sub>92</sub> Al <sub>8</sub> alaşımına ait XRD diyagramı.....	54
5.58. (Co <sub>25</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83,87</sub> Al <sub>16,13</sub> bileşimine ait alaşımın 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.....	55
5.59. (Co <sub>40</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>25</sub> ) <sub>85,16</sub> Al <sub>14,84</sub> bileşimine ait alaşımın 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.....	55
5.60. (Co <sub>25</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83</sub> Al <sub>17</sub> bileşimine ait alaşımın 200x ve 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.....	56
5.61. (Co <sub>40</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>25</sub> ) <sub>83</sub> Al <sub>17</sub> bileşimine ait alaşımın 200x ve 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.....	56
5.62. (Co <sub>25</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83</sub> Al <sub>17</sub> ve (Co <sub>40</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>25</sub> ) <sub>83</sub> Al <sub>17</sub> alaşımlarına ait XRD diyagramları.....	57
5.63. Üretilen alaşımlara ait Gerilme-Birim değiştirme grafiği.....	58
5.64. (Co <sub>25</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83</sub> Al <sub>17</sub> ve (Co <sub>40</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>25</sub> ) <sub>83</sub> Al <sub>17</sub> alaşımlarına ait Gerilme-Birim değiştirme grafiği.....	59
5.65. (Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>30</sub> Nb <sub>10</sub> Ni <sub>10</sub> ) <sub>92</sub> Al <sub>8</sub> alaşımına ait Gerilme-Birim değiştirme grafiği.....	60
5.66. Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>5</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>82,2</sub> Al <sub>17,8</sub> alaşımına ait 500x büyütmede optik mikroyapı görüntüleri (a-5 mm b-8 mm).....	61
5.67. Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>5</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>82,2</sub> Al <sub>17,8</sub> alaşımına ait 5000x büyütmede SEM mikroyapı görüntüleri (a-5 mm b-8 mm).....	62
5.68. 5 mm çapında üretilen (Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>5</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>82,2</sub> Al <sub>17,8</sub> alaşımında analiz alınan bölge SEM görüntüsü ve EDS analiz spektrumu.....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.69. 5 ve 8 mm çapında üretilen $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait Gerilme-Birim değiştirme grafiği. ....	63
5.70. %15 deforme edilmiş $Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-500x b-1000x). ....	64
5.71. %15 deforme edilmiş $Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüleri (a-5000x b-10000x). ....	64
5.72. Döküm, %15 deforme edilen $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği. ....	65
5.73. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$ ppm B alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-500x b-1000x). ....	66
5.74. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ve $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$ ppm B alaşımlarına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği. ....	67
5.75. 600 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri. ..	67
5.76. 800 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri. .	68
5.77. 1000 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri.68	
5.78. 1200 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri.68	
5.79. 800 °C’de 4, 8 ve 12 saat süre ile ısıl işlem uygulanan numunelere ait 10000x SEM görüntüleri.....	69
5.80. 800 °C’de 4, 8 ve 12 saat süre ile ısıl işlem uygulanan numunelere ait 50000x SEM görüntüleri.....	69
5.81. 800 °C’de ısıl işlem sonucu oluşan $\sigma$ fazına ait EDS analiz sonuçları. ....	69
5.82. 600°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.....	70
5.83. 800°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.....	70
5.84. 800°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait dar aralık XRD diyagramları. ...	71
5.85. 1000°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.....	71
5.86. 1200 °C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.....	72
5.87. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{95-x}Al_x+V_5$ sistemine ait denge diyagramı. ....	74
5.88. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{95-x}Al_x+Nb_1$ sistemine ait denge diyagramı. ....	74
5.89. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{100-x}Al_x+Mo_1$ sistemine ait denge diyagramı. ....	75

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.90. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ bileşimine ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.....	75
5.91. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımına ait 500x ve 1000x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.....	76
5.92. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımına ait 5000x büyütmedeki SEM mikroyapı görüntüsü.....	76
5.93. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımına ait genel EDS analizi.....	76
5.94. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımında analiz alınan B2 ve YMK fazları SEM görüntüsü ve bu fazlara ait EDS analiz spektrumu.....	77
5.95. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımına ait EDS çizgi analizi.....	78
5.96. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımına ait EDS haritalama analizi.....	78
5.97. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ ve $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ alaşımlarına ait XRD diyagramları.....	79
5.98. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}+Mo_1$ alaşımına ait XRD diyagramı.....	79
5.99. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}Mo_1$ alaşımına ait 5000x ve 20000x büyütmedeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	80
5.100. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ , $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ ve $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}+Mo_1$ alaşımına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.....	80
5.101. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.....	82
5.102. 800 °C’de 12 saat ısıl işlem uygulanan $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.....	83
5.103. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300ppm B$ alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.....	84
6.1. Üretilen yüksek entropili alaşımlar ve Inconel 635 süper alaşımının akma mukavemetinin sıcaklık ile değişimi.....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. ÖYEA'lar ve barındırdıkları faz grupları (Jiang vd., 2018).....	17
5.1. Ötektik bileşimlere ait $\Delta H_{kar}$ , $\Delta S_{kar}$ , $\delta r$ , $VEY$ ve $\Delta\chi$ değerleri.....	32
5.2. ÖYEA'larda bulunan fazların katılma sırasında oluşum sıcaklıkları (°C).....	36
5.3. Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde belirlenen ötektik bileşimler.....	40
5.4. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ sistemine ait ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü alaşımların bileşimleri.....	43
5.5. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait EDS analizi sonuçları.....	48
5.6. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımı yapısında bulunan B2 ve YMK fazlarına ait EDS analizi sonuçları.....	49
5.7. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait Rietveld Analizi sonuçları.....	51
5.8. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{92}Al_8$ alaşımında bulunan Lave ve YMK fazlarına ait EDS analizi sonuçları.....	54
5.9. Üretilen alaşımlara ait basma deneyi sonuçları.....	58
5.10. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ ve $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$ alaşımlarına ait basma deneyi ve mikrosertlik sonuçları.....	59
5.11. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{92}Al_8$ alaşımına ait basma deneyi ve mikrosertlik sonuçları.....	60
5.12. 5 mm çapında üretilen $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait EDS analizi sonuçları.....	62
5.13. 5 ve 8 mm çapında üretilen $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait basma deneyi ve mikrosertlik sonuçları.....	63
5.14. Döküm, %15 deforme edilen ve deformasyon sonrası 800 °C'de 1 saat temperlenen $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait basma deneyi sonuçları.....	65
5.15. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ve $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$ ppm B alaşımlarına ait basma deneyi sonuçları.....	67
5.16. 800 °C'de ısıl işlem sonucu oluşan $\sigma$ fazına ait EDS analiz sonuçları.....	69
5.17. Rietveld analizi ile hesaplanan faz miktarları.....	72
5.18. ThermoCalc ile hesaplanan denge durumu faz miktarları.....	73
5.19. Isıl işlem uygulanmış numunelere ait sertlik değerleri.....	73
5.20. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımına ait EDS analizi sonuçları.....	77

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.21. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ alaşımı yapısında bulunan B2 ve YMK fazlarına ait EDS analizi sonuçları.....	77
5.22. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ , $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$ ve $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}+Mo_1$ alaşımına ait basma deneyi sonuçları. ....	81
5.23. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları. ....	82
5.24. 800 °C’de 12 saat ısıl işlem uygulanan $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları. ....	83
5.25. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300ppm B$ alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları. ....	84
6.1. Deneysel çalışmalar ile elde edilen mekanik özellikler.....	87



## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

İnsanlığın tarihi, tarih öncesi dönemlerden beri kullandığı alet edevat ve bunları yaptıkları malzemeler ile şekillenmiştir. Kullanılan malzemelerin önemi o kadar fazladır ki çağların adlandırılmasında o dönem keşfedilen ve alet yapımında kullanılan malzeme adları seçilmiştir. İnsanlar ilk olarak taş, ahşap, kemik ve deri gibi doğada hazır halde buldukları malzemeleri şekillendirerek kullanırken (MÖ 500000-5500), ilerleyen süreçte doğada nabit halde bulabildikleri altın ve bakır ergiterek şekillendirmeyi öğrenmişlerdir (MÖ 5500-3500). Cevherlerden metal elde edilmesinin öğrenilmesiyle beraber ilk alaşım olan bronz geliştirilmiş ve bronzun keşfini Anadolu, Mezopotamya ve Mısır'da büyük merkezi devletlerin kurulması ve genel anlamıyla uygarlık tarihinin başlaması izlemiştir (MÖ 3500-1200). Demir ve çeliğin üretilmesi ise 20. yüzyıla kadar geçen insanlık tarihini şekillendirmiştir. Sanayi devrimini takip eden geçtiğimiz yüzyıl insanlık açısından her alanda büyük devrimlerin yaşandığı bir dönem olmuştur. Bu tarihe kadar çok kısıtlı bir malzeme çeşitliliği ile gelebilen uygarlık, demir çağında demir at arabalarıyla ilk büyük krallıkları yıkarken, geçtiğimiz yüzyılda geliştirdiği alaşımli çelikler, hafif metaller, süper alaşımlar, polimerler, teknik seramikler ve kompozit malzemeler sayesinde yeni dünyaların keşfi için ilk adımlarını atmayı başarmıştır.

Teknolojinin gelişmesi ile daha üstün özellikli malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle alaşım geliştirme çalışmaları her zamankinden daha önemli bir hale gelmiştir. 21. yüzyılın ilk yıllarına kadar temel bir elementin etrafında şekillenen alaşım geliştirme süreçleri, Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA) tanımı ile birlikte tamamen farklı bir aşamaya taşınmıştır. Çok geniş bir kompozisyon evreninin ufuklarını açan ve aynı zamanda beklenmedik mikroyapısal ve mekanik özellikler sunan YEA'lar, metalurji alanında son on beş yılda akademik çalışmalarda kendine önemli bir yer edinmiştir.

İlk zamanlarda eşmolar bileşimlerdeki tek fazlı alaşımlar üzerine yoğunlaşan çalışmalar, kompozisyon evreninin büyük bir kısmını reddettiği ve çok fazlı yapılar ile elde edilebilecek üstün mekanik özellikler nedeniyle daha geniş bir çerçeveye kavuşmuştur.

Genel kompozit malzeme geliştirme stratejisi ile sert ve sünek fazların bir arada kullanılarak mekanik özelliklerin optimizasyonu çalışmaları ilk olarak süper alaşımlara benzer şekilde çökelti fazlarının oluşturulması ile elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak YEA'ların üstün mikroyapısal ve mekanik özelliklerini sağlayan kompleks bileşimleri, üretim aşamasında segregasyon gibi problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu sorunların çözümü olarak, segregasyonun önleildiği, yüksek sıcaklıklarda sürünme direncinin yüksek olduğu ve dökülebilirliği kolay olan Ötektik Yüksek Entropili Alaşımlar (ÖYEA) oldukça umut vadetmektedir.

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılacak ötektik yüksek entropili alaşımların tasarımı, üretimi ve karakterizasyonunu konu alan bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümü genel bir giriş mahiyetinde olup, ikinci bölümde yüksek entropili alaşımların tarihi, yüksek entropili alaşımlara dair yapılan ilk tanımlamalara ve alaşım tasarımına yer verilmiştir. Üçüncü bölüm literatürde bulunan ve ötektik yüksek entropili alaşımları konu edinen çalışmaların özetinden oluşmaktadır. Dördüncü bölümde tasarım ve deneysel çalışmalara ait detaylar ve beşinci bölümde de bu çalışmalar sonucu elde edilen veriler bulunmaktadır. Altıncı bölümde tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Tezin sonunda ise çalışma sürecinde yararlanılan kaynaklar verilmiştir.

## 2. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR

### 2.1. Yüksek Entropili Alaşımların Tarihsel Gelişimi

Yüksek entropili alaşım tanımı literatürde ilk olarak 2004 yılında yapılmış olsa da (Yeh, 2004) aynı konseptte yapılan kayıtlı ilk çalışma Franz Karl Archard tarafından 1788 yılında yapılmıştır. Archard, demir, bakır, gümüş, kobalt, platin, kalay, arsenik, antimon, kurşun, çinko ve bizmut elementlerinin eş ağırlıklarda kullanıldığı 900 alaşım hazırlamış ve sonuç olarak oluşturulan alaşımların beklenmedik özellikler sergilediğini belirtmiştir (Murty, 2014). Yüksek entropili alaşımlar konusunda çalışmalara 1980 ve 1990'larda başlayan ve birbirinden bağımsız araştırmalar yürüten iki ayrı grup bulunmaktadır. Bu grupların başında Birleşik Krallıktan Brain Cantor ve Tayvan'dan Jien-Wie Yeh yer almaktadır.

Cantor ekibinde kayıtlı ilk çalışma lisans öğrencisi Alain Vincent'in 1981 yılında yayınladığı lisans tezidir. Vincent çalışmasında yirmi elementi farklı kombinasyonlar ve farklı sayılarda eşmolar olarak birleştirerek alaşımlar üretmiştir. Ürettiği alaşımlar içerisinde günümüzde Cantor alaşımı olarak bilinen  $Co_{20}Cr_{20}Fe_{20}Mn_{20}Ni_{20}$  alaşımının sadece YMK fazından oluştuğunu tespit etmiştir. 1998 yılında Oxford üniversitesinde yine Cantor tarafından yönetilen bir başka lisans tezinde Peter Knight, daha geniş bir element paleti kullanarak benzer bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ancak bu iki çalışmanın sonuçları herhangi bir yerde yayınlanmamıştır. 2002 yılında Isaac Chang Oxford'da bir önceki çalışmalarını tekrarlamış ve elde ettiği sonuçları yine aynı yıl "Rapidly Quenched Metals" konferansında sunmuş ve 2004 yılında "Materials Science and Engineering A" dergisinde, "Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys" başlığı ile yayınlanmıştır (Murty, 2014).

Çok bileşenli alaşımlar ile ilgili çalışmalarına 1995 yılında başlayan Yeh, yüksek karışım entropisinin oluşacak faz sayısını azaltacağı konseptinden yola çıkmıştır. 1996 yılında yüksek lisans öğrencisi K. Huang ile 59 element kullanarak, 5-9 bileşenli 40 eşmolar alaşım üretmiş, mikroyapı ve sertliklerini incelemiştir. Üretilen alaşımlar ile elde edilen yüksek sertlik değerlerinin sebebi olarak aşırı latis distorsiyonunu göstermişlerdir. Bunu izleyen süreçte ince film kaplamalar, termal spray kaplamalar ve bulk malzemeler alanında

çok sayıda çalışma başlatmışlardır. İlk yayınlarını “Advanced Engineering Materials” dergisinde “Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating” ve “Nanostructured high-entropy alloys with multi-principal elements – novel alloy design concepts and outcomes” başlıkları ile yayınlamışlardır. Bu yayınları takip eden on yılda Yeh ve ekibi 84 yüksek lisans çalışması, 11 doktora çalışması tamamlamış ve bu çalışmalardan 111 adet makale yayınlamışlardır (Murty, 2014).

2004 yılında alaşım tasarımı alanında yepyeni bir ufuk açan bu çalışmalar sonrasında çok bileşenli alaşımlar/yüksek entropili alaşımlar bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bu ilginin ilk sebebi, yüz yıllardır temel bir element etrafında kurulan alaşım tasarımının getirmiş olduğu sınırların ortadan kalkmasıdır. İkinci sebep olarak da, geliştirilen ilk alaşımların döküm hallerinde yüksek mukavemet, yüksek süneklik, yüksek korozyon direnci gibi üstün özellikler sergilemesi gösterilebilir.

## **2.2. Yüksek Entropili Alaşımların Tanımlanması**

Yüksek entropili alaşım çalışmalarını başlatan ilk çalışmalardan biri olan Cantor’un çalışmasında entropiden bahsedilmemiştir. Ya da yaptığı çalışmanın motivasyonu tek fazlı düzensiz katı çözeltili bir yapı elde etmek değildir. Yeh’in çalışmalarında ise ana motivasyon yüksek konfigürasyonel etkisi ile tek fazlı düzensiz katı çözeltili yapılar elde etmektir. Cantor’un çok bileşenli alaşımlar sisteminde herhangi bir tanım veya sınırlama bulunmazken, Yeh’in yüksek entropili alaşımlar sistemi için birçok tanım ve sınır getirilmiş, ancak getirilen bu sınırlar, sonrasında kafa karışıklıklarına ve tartışmalara da sebep olmuştur (Miracle, 2016).

### **2.2.1. Kompozisyon temelli tanımlama**

YEA'lar için yapılan ilk tanım "eşmolar oranlarda beş veya daha fazla elementten oluşan alaşımlar" olarak yapılmıştır (Yeh, 2004). Eşmolar konsantrasyon kullanımı yüksek entropili alaşım tasarımının sağladığı çok geniş kompozisyon evrenini büyük oranda sınırlamaktadır. Bu nedenle aynı makalede şu cümleye de yer verilmiştir; "her bir elementin konsantrasyonu %5 ile %35 arasında olan alaşımlar". Kompozisyon ile ilgili bir diğer

tanımlama ise ‐alaşımın ana bileşenler yanında alaşım özelliklerinin geliştirilmesi için minör ilave elementler de içerebileceği” şeklinde yapılmıştır (Yeh, 2006).

### 2.2.2. Entropi temelli tanımlama

Yüksek entropi tanımı, çok bileşenli sistemler ile alaşımın karışım entropisinin yükseltilmesi ve buna bağlı olarak Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonuna dayanır. Gibbs serbest enerjisinin düşüşü sayesinde, intermetalikler gibi düzenli fazların oluşumunun engelleneceği ve basit katı çözeltili fazlarının oluşacağı öngörülür (Yao, 2014).

$$\Delta G_{kar} = \Delta H_{kar} - T\Delta S_{kar} \quad 2.1$$

Yüksek entropi tanımı yapılırken kastedilen alaşımın konfigürasyonel entropileridir. Bu tanım ile alaşımın üç gruba ayrılır; düşük entropili ( $S^{SS, ideal} < 0,69R$ ), orta entropili ( $0,69R < S^{SS, ideal} < 1,61R$ ) ve yüksek entropili ( $1,61R < S^{SS, ideal}$ ) alaşımın (Yeh, 2004).

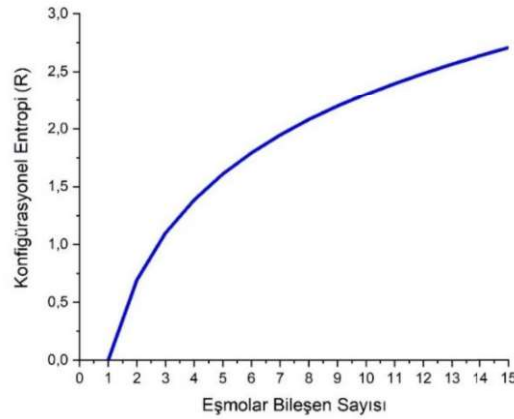
Boltzmann eşitliği, konfigürasyonel entropiyi Boltzmann sabiti (k) ve atomların bir yapıda düzenlenebileceği kombinasyonların sayısının bir fonksiyonu (w) olarak ifade eder.

$$\Delta S_{kar} = k \ln w \quad 2.2$$

N bileşenli bir alaşımın konfigürasyonel entropi değişimi Boltzmann denkleminde gaz sabitine ( $R=8,314 J/Kmol$ ) bağlı olarak Denklem 2.3’e göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta S_{kar} = R \ln N \quad 2.3$$

Bileşen sayısına göre konfigürasyonel entropi değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Bileşen sayısına göre konfigürasyonel entropi değişimi.

Boltzmann eşitliği, alaşım bileşiminden ideal  $S^{\text{kar}}$  değerini tahmin etmek için basit bir yaklaşım sağlar, ancak atomların rastgele kafes pozisyonlarını işgal etmesini gerektirir. Bu durum metalik katı çözeltilerde nadiren görülmektedir (Miracle, 2016). Buna ilave olarak karışım entropisi; konfigürasyonel, titreşimsel, manyetik dipol ve elektronik rastgelelik olmak üzere dört temel bileşenden oluşmakta ancak yüksek sıcaklıklarda konfigürasyonel entropinin daha etkin olduğundan yola çıkarak hesaplamalarda yalnızca konfigürasyonel entropi kullanılmaktadır (Murty, 2014).

### 2.3. Dört Temel Etki

Yüksek entropili alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerini belirleyen pek çok faktör bulunmaktadır. Ancak bunlardan dört tanesi “temel etki” olarak adlandırılmaktadır (Yeh, 2013). Yüksek entropi etkisi, aşırı latis distorsiyonu, yavaş difüzyon etkisi ve kokteyl etkisi olarak adlandırılan bu etkiler gerçekleştirilen ilk çalışmalardan elde edilen veriler ışığında tanımlanmıştır.

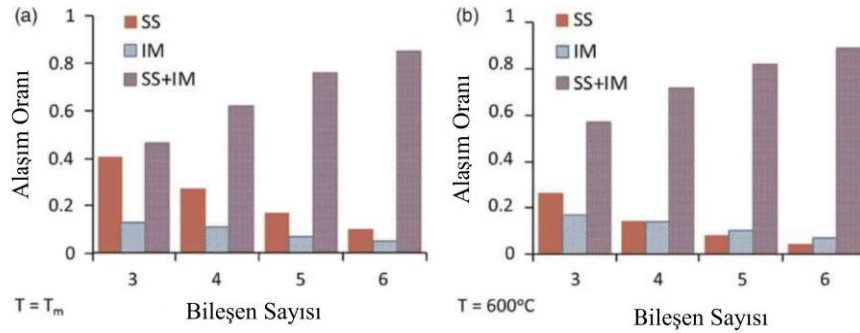
#### 2.3.1. Yüksek entropi etkisi

Yüksek entropi etkisi, YEA'ların tanımlanmasında en temel etkidir. Beş ve daha fazla elemente sahip, eşmolar veya eşmolarla yakın bileşimlerdeki alaşımlarda artan konfigürasyonel entropinin intermetalik bileşiklerin oluşumunu baskılayarak katı çözeltilerinin oluşumunu teşvik ettiği görüşüne dayanmaktadır (Miracle, 2016). Ancak son dönemlerde gerçekleştirilen birçok çalışmada yüksek entropili alaşımlardaki katı çözeltilerin



kararsızlıkları gösterilmiştir (Jones vd., 2014; Jones vd., 2015; Pickering vd., 2015). Örnek olarak; Otto, yayınlanan ilk çok bileşenli alaşım olan CoCrFeMnNi alaşımı ile gerçekleştirdiği çalışmalarda 800 °C'nin altında alaşımda Cr elementince zengin intermetalik  $\sigma$  fazının çökeldiğini ve elde edilen YMK fazının çok geniş bir sıcaklık aralığında kararsız olduğunu göstermiştir (Otto, 2016).

Ayrıca ilk çalışmalar, eşmolar bileşimlerde konfigürasyonel entropinin maksimuma ulaştığını ve alaşım elementlerinin sayısının artmasıyla arttığını, buna bağlı olarak da basit çözelti fazlarının oluştuğunu iddia etmişlerdir (Yeh, 2004). Ancak Senkov, alaşımı oluşturan element sayısının artışı ile intermetalik fazlara rastlanma ihtimalinin arttığını ortaya koymuştur (Senkov, 2015). Senkov'un çalışmasında elde ettiği sonuçlar Şekil 2.2'de verilmiştir ve bu sonuçlar, yukarıda belirtildiği gibi YEA tasarımı anlayışı ile çelişmektedir.



Şekil 2.2. Artan bileşen sayısı alaşımlarda karşılaşılan fazların oranı. Katı çözelti (SS), intermetalik (IM) ve katı çözelti ve intermetalik (SS + IM) (Senkov, 2015).

### 2.3.2. Yavaş difüzyon etkisi

YEA yapısında birbirinden farklı çok sayıda element bulunuyor olması nedeniyle difüzyonunda geleneksel alaşımlardan daha yavaş olacağı öngörülmüştür. Bu öngörü, YEA'larda oluşan nano boyutlardaki çökelti ve katılaşma sonrası oluşan mikroyapıların stabilitesi gibi ikincil gözlemlere dayanmaktadır (Tsai ve Yeh, 2014; Wei, 2006).

YEA'lardaki yavaş difüzyon etkisi iki sebebe dayandırılmaktadır. Bunlardan ilki kristal kafeslerde bulunan farklı atomların farklı potansiyel enerji seviyeleri yaratıyor olmasıdır. Düşük enerjili bir konuma geçen atomun "tuzağa düşmesi" ile hareketine devam

etme ihtimali azalmakta, yüksek enerji seviyeli bir konuma geçen atomun bir önceki konumuna dönme ihtimalini doğurmaktadır. Bu durumların ikisi de difüzyon sürecini yavaşlatmaktadır (Tsai ve Yeh, 2014).

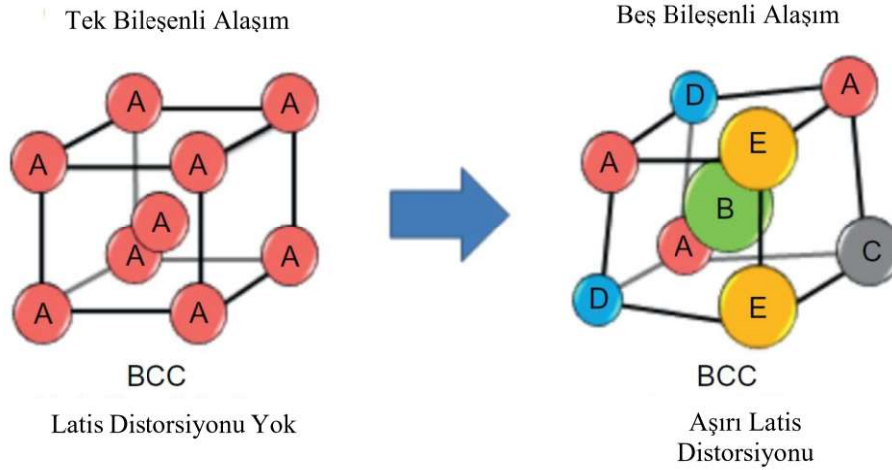
İkinci olarak, difüzyon sonucu görülecek faz dönüşümleri veya yeni fazların oluşumu için elementlerin eş zamanlı olarak kitlesel difüzyonu gerekmektedir. Ancak farklı elementlerin aynı matris içerisinde difüzyon kabiliyetleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu durum da difüzyon sonucu meydana gelen tane büyümesi, çökelti oluşumları gibi olayları yavaşlatmaktadır (Tsai ve Yeh, 2014).

### **2.3.3. Aşırı latis distorsiyonu**

YEA'lar kristal kafeslerinde atomik boyutları birbirinden farklı birçok element içermekte ve bu elementlerin hepsi kafes içerisinde birbiri yerine yerleşebilmektedir. Şekil 2.3, YEA'lardaki latis distorsiyonunu göstermektedir. Geleneksel bir alaşımlardaki kristal kafeste komşu olarak sadece bir tür atom bulunurken, YEA'larda komşu atomların farklı olmaları nedeniyle latis distorsiyonu daha şiddetlidir. Aşırı latis distorsiyonu etkisi YEA'larda sertlik, elektriksel özellikler, termal iletkenlik gibi bazı özelliklerin sebepleri arasında gösterilmektedir (Senkov vd., 2010; Kao vd., 2011).

Kristal kafeste bulunan farklı boyutlardaki elementler distorsiyona sebep olurken, farklı bağlanma enerjileri de bu distorsiyonu artırmaktadır (Tsai ve Yeh, 2013). Bu fenomen XRD kullanılarak tespit edilebilir. Pik şiddetlerinde meydana gelen azalma ve piklerin genişlemesi latis distorsiyonuna işaret edebilmektedir. Ancak, Pickering ve Jones yayınladıkları çalışmada, XRD piklerindeki bu değişimin kristalografik yönlenme, termal titreşim ve floresans etkisi nedeniyle de olabileceği belirtmişlerdir (Pickering, 2016). Bu nedenle, yüksek çözünürlüklü TEM (HR-TEM) veya çift dağıtım fonksiyonu (PDF) analizi gibi ileri karakterizasyon yöntemleri ile bu teorinin desteklenmesi gerekmektedir.





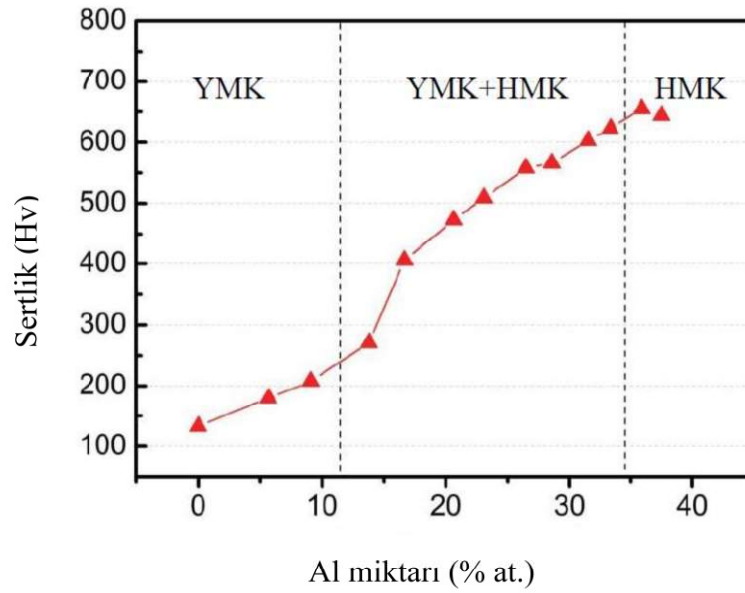
Şekil 2.3. HMK yapıdaki geleneksel ve yüksek entropili alaşımlarda latis distorsiyonu (Murty, 2014).

#### 2.3.4. Kokteyl Etkisi

Kokteyl etkisi ilk olarak Ranganathan tarafından metalik camlar ve süper plastik metallere için kullanılmış bir tanımdır. Bu tanımlama bir hipotez değildir ve bu nedenle herhangi bir kanıtta da ihtiyaç duymamaktadır. Yapılan bu tanımın ilk amacı elde edilen nihai sonucun parçaların toplamından daha büyük ve öngörülemez bir sinerjinin sonucu olduğunu vurgulamaktır (Miracle, 2016).

YEA'larda kokteyl etkisi, bir kompozit olarak düşünülebilecek yapının nihai özelliklerini belirlemede sadece kullanılan bileşenlerin özellikleri değil bu bileşenlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan özelliklerin de göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtir (Cheng vd., 2017).

Kokteyl etkisini açıklamak için kullanılan en yaygın örnek;  $Al_xCoCrCuFeNi$  alaşımında Al içeriğinin değişimi ile faz yapısında ve alaşım sertliğinde meydana gelen değişimdir. YMK yapıda ve düşük sertlikteki Al elementi miktarının artışı alaşımın YMK fazındaki yapısını önce YMK+HMK daha sonra HMK fazına dönüştürmekte ve buna bağlı olarak alaşımın sertliğini de artırmaktadır (Tsai ve Yeh, 2014). Şekil 2.4'te Al miktarına bağlı olarak meydana gelen değişimler görülmektedir.



Şekil 2.4.  $Al_xCoCrCuFeNi$  alaşımının faz yapısının ve sertliğinin Al içeriğine bağlı değişimi (Tsai ve Yeh, 2014).

## 2.4. Alaşım Tasarımı

YEA tasarımı anlayışının getirmiş olduğu geniş kompozisyon evreni, üretilebilecek alaşım kompozisyonlarının miktarını çok büyük ölçülerde artırırken, bu kompozisyonlar arasında istenilen özellikleri gösterecek olanların bulunmasını da büyük ölçüde zorlaştırmakta ve deneme yanılma yöntemi ile ilerlemeyi imkansız hale getirmektedir. Bu nedenle kullanılan kompozisyonlar ile elde edilecek fazların öngörülmesi için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunların bir kısmını ampirik yaklaşımlar oluştururken, termodinamik modellemeler ve atomistik yaklaşımlar da sıklıkla kullanılmaktadır.

### 2.4.1. Ampirik yaklaşımlar

Katı çözeltilerinin oluşumu için en çok başvurulan yöntem Hume-Rotary kurallarıdır. Bu kurallar, benzer atomik boyutlara, kristal yapıya, elektronegativiteye ve valans değerlerine sahip olan bileşenler bir araya geldiklerinde katı çözeltiler oluşturabileceklerini belirtir. Çok bileşenli sistemlerde katı çözeltiler oluşumunu tahmin edebilmek adına bu kurallar, kompozisyon ağırlıklı olarak düzenlenmişlerdir (Miracle, 2016). Bu kurallara ilave olarak karışım entalpisi ( $H^{kar}$ ), karışım entropisi ( $S^{kar}$ ) ve ergime sıcaklıklarının ( $T^m$ ) da dahil edildiği  $\Omega$  gibi yeni tanımlamalar geliştirilmiştir (157).

$$\delta r = \sqrt{\sum C_i (1 - r_i/\bar{r})^2} \quad 2.4$$

$$\delta x = \sqrt{\sum C_i (1 - x_i/\bar{x})^2} \quad 2.5$$

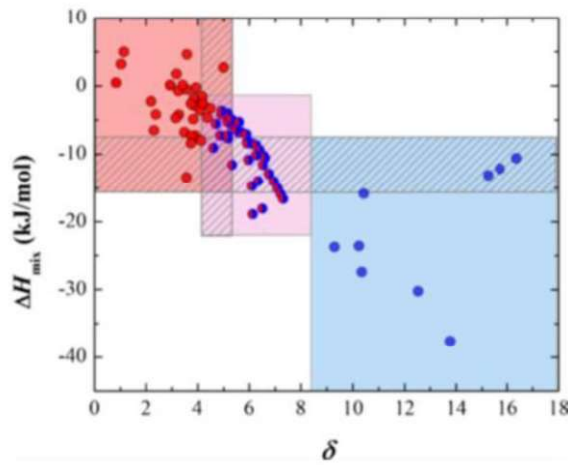
$$VEC = \sum C_i VEC_i \quad 2.6$$

$$\Delta H^{kar} = \sum_{i<j} 4\Delta H_{ij} c_i c_j \quad 2.7$$

$$\Omega = (\sum c_i T_i^m) (S^{kar}) / (H^{kar}) \quad 2.8$$

Yukarıda verilen denklemlerde;  $r_i$ ,  $x_i$ ,  $VEC_i$  ve  $T_i^m$  sırasıyla atomik yarıçap, elektronegativite, valans elektron konsantrasyonu ve ergime derecesi;  $c_i$  ve  $c_j$ ,  $i$  ve  $j$  bileşenlerinin molar oranı;  $\bar{r}$  ve  $\bar{x}$ , ortalama atomik yarıçap ve ortalama elektronegativite;  $\Delta H_{ij}$  değeri ise  $i$  ve  $j$  bileşenlerinin eşmolar oranlardaki karışım entalpisini tanımlamaktadır.

Bu parametrelerden en çok  $\delta r$  ve  $\Delta H_{ij}$  parametrelerine başvurulmaktadır. Şekil 2.5'te 90 adet YEA'nın döküm halinde içerdikleri fazların  $\Delta H_{mix}$ - $\delta$  grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre  $-15 \text{ kJ/mol} < \Delta H_{mix} < 5 \text{ kJ/mol}$  ve  $0 < \delta < 5$  değerleri sağlandığında tek fazlı katı çözeltilerin oluştuğu görülmektedir (Ye vd., 2016). Ancak alaşım sayıları ve ailelerinin sayısı artırıldığında faz bölgelerindeki geçişler daha az belirgin hale gelmeye başlamakta ve bu ampirik parametrelerin kullanılabilirlikleri azalmaktadır (Miracle, 2016).



Şekil 2.5. Farklı fazlara sahip döküm HEA'ların  $\Delta H_{mix}$ - $\delta$  grafiği kırmızı: tek fazlı katı çözelti, kırmızı ve mavi: çok fazlı, mavi: amorf (Ye vd., 2016).

### 2.4.2. Atomistik yaklaşımlar

Moleküler dinamik (MD) metodu analitik olarak sonuçlara ulaşılamayan problemlerin sayısal çözümlerini bulmayı ve kurulan teorilerin deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmasını amaçlar (31). Literatürde YEA'ların atomik yapılarını ve özelliklerini incelemek için az sayıda çalışma bulunmaktadır. AlCoCrCuFeNi alaşımında kristal büyümesi ve termal kararlılık gibi özelliklerin,  $Al_xCoCrFeNi$  ( $x=0-2$ ) alaşımında radyografik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılmıştır (Xie vd., 2013, Kao vd., 2008). Ancak MD simülasyonları, hem çok bileşenli sistemler için güvenilir sonuçlar vermemesi hem de uzun süren yüksek maliyetli çalışmalar olmaları nedeniyle çok başvurulan bir yöntem olmamıştır.

Yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT), değişen basınç koşulları altında katı maddelerin faz diyagramlarını tahmin etmede ve/veya hipotetik kristal yapıların stabilitesini değerlendirmede başarılı olarak yeni malzemelerin tasarımında yönlendirici olmuştur (Louie ve Cohen, 2006). CrCoFeNi alaşımında DFT hesaplamaları ile kafesteki atomik düzenlerin ve kristal yapının kararlılığı tahmin edilebilmektedir (Middleburgh vd., 2014). Bir diğer çalışmada HfNbTaTiZr alaşımında katılaşma sırasında birincil fazın oluşumu, elementlerin kısmi çift korelasyonu ve ikili bağ enerjileri ile açıklanabilmektedir (Gao ve Alman, 2013).

### 2.4.3. Calphad

CALPHAD yaklaşımı temel olarak, farklı yapıdaki fazlara ait serbest enerji değerlerini dikkate alarak sistemin kimyasal bileşimi üzerinden gerçekleştirilen termodinamik hesaplamalar ile belirli sıcaklık, basınç ve bileşimde sistemin toplam Gibbs enerjisini minimize ederek oluşabilecek en kararlı denge durumunu belirlemektir. Böylelikle belirli bir sıcaklık, basınç ya da bileşim için dengede oluşabilecek fazlar tespit edilebilmektedir.

CALPHAD yaklaşımı, geliştirilecek YEA sistemlerinin faz yapısı, bileşimi ve mikroyapısı hakkında bilgi edinilmesine olanak sağlayan bir diğer yöntemdir. YEA sistemine ait elementlerin mevcut ikili ve üçlü denge sistemlerinden elde edilen verilerin termodinamik ekstrapolasyonu sayesinde 4'lü, 5'li hatta daha yüksek denge sistemleri modellenabilmektedir (Zhang vd., 2014).

İkili denge diyagramlarından elde edilen verilerin ekstrapolasyonu ile üçlü; ikili ve üçlü denge diyagramlarından elde edilen verilerin ekstrapolasyonu ile dördü; sırasıyla çalışacak sisteme kadar ekstrapolasyon gerçekleştirilerek artık Gibbs serbest enerjisi değeri hesap edilebilir (Ganesan ve Varamban, 1997; Kattner, 1997). Ancak bu çalışmaların mutlaka deneysel çalışmalar ile desteklenmesi gerekmektedir ve tahmin edildiği üzere kuvvetli bir veri tabanına ihtiyaç duyulmaktadır.

Senkov ve ekibi literatürdeki mevcut çalışmalarda rapor edilen 30' dan fazla eşmolar yüksek entropi alaşımını inceleyerek aynı alaşımlardaki mevcut faz yapılarını CALPHAD yaklaşımı ile elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlardır (Senkov vd., 2015). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde rapor edilen bazı çalışmalardaki sonuçlar ile uyum gösterse de çoğu alaşım için aynı şeyden bahsetmek mümkün değildir. Ancak benzer çalışmalar ile Senkov ve ekibinin gerçekleştirdikleri çalışma göz önüne alındığında CALPHAD yaklaşımı ile YEA sistemleri için oluşturulan denge diyagramlarından önemli çıkarımlar yapmak mümkündür.

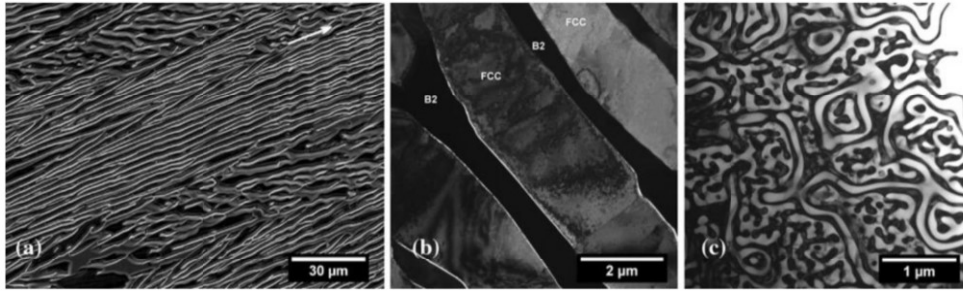
### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gerçekleştirilen ilk çalışmalar, YEA'ların yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabildiği ve yavaş difüzyon kinetiğine sahip olduğunu göstermiştir (Yeh vd., 2004; Tong vd., 2005) . Bu nedenle, YEA'lar yüksek sıcaklık uygulamaları için son derece ümit verici malzemeler olarak kabul edilmektedir. YEA'ların yüksek sıcaklık uygulamalarında kendilerine yer bulabilmeleri için mekanik özellik açısından aşılması gereken ciddi problemleri bulunmaktadır.

Üretilen tek fazlı YEA'larda, YMK fazından oluşan alaşımlar çok yüksek süneklik ve düşük mukavemet değerleri sergilerken; B2, Sigma ve Lave fazları gibi sert fazlardan oluşan alaşımlar çok yüksek mukavemet değerleri ve çok düşük süneklik sergilemektedirler. YEA'ların endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi için optimize edilmiş mekanik özelliklerin elde edilmesi gerekmektedir. Ötektik alaşımlar doğru tasarlandıklarında, sünek ve sert fazları istenilen oranlarda döküm hallerinde bünyelerinde barındırabilmektedir. Aynı zamanda ötektik alaşımların, YEA'ların üretiminde önemli bir sorun olan segragasyonu önlenmesi ve yüksek sürünme direnci özelliği sağlaması nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamaları için mekanik özellikleri optimize edilmiş alaşımlar üretebilmek için ötektik yüksek entropili alaşımların geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Ötektik yüksek entropili alaşımlar (ÖYEA) ile ilgili iç çalışma Liao ve Baker tarafından 2008 yılında geliştirilmiştir.  $Al_{15}Fe_{30}Mn_{35}Ni_{20}$  bileşiminde üretilen ötektik alaşımın, YMK ve B2 fazlarından oluştuğu, 740 MPa akma mukavemeti ve %8 süneklik gösterdiği tespit edilmiştir (Liao ve Baker, 2008). Aynı ekip 2011 yılında, katılaşma hızının  $Al_{15}Fe_{30}Mn_{35}Ni_{20}$  alaşımında lameller arası mesafe ve buna bağlı olarak mekanik özellikleri nasıl etkilediğini incelemiştir. Soğuma hızına bağlı olarak lameller arası mesafenin 50 ile 6000 nm arasında değiştiği ve lameller arası mesafe azaldıkça alaşım sertliğinin 210 HV'den 380 HV'ye çıktığını tespit etmişlerdir (Liao ve Baker, 2011). Şekil 3.1'de farklı katılaşma hızları ile üretilen alaşıma ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir.





Şekil 3.1. Farklı katılaşma hızlarında üretilen ötektik  $Al_{15}Fe_{30}Mn_{35}Ni_{20}$  alaşımına ait mikroyapı görüntüleri (Liao ve Baker, 2011).

ÖYEA'lar ile ilgili ilk çalışma 2008 yılında yapılmış olsa da dikkatleri ötektik alaşımlara çeken, Lu vd. tarafınan 2014 yılında yayınlanan çalışma olmuştur (Lu vd., 2014).  $AlCoCrFeNi_{2.1}$  bileşiminde üretilen alaşımın lamelli YMK/B2 yapısında olduğu tespit edilmiştir. Üretilen  $AlCoCrFeNi_{2.1}$  alaşımına ait mikroyapı görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir.

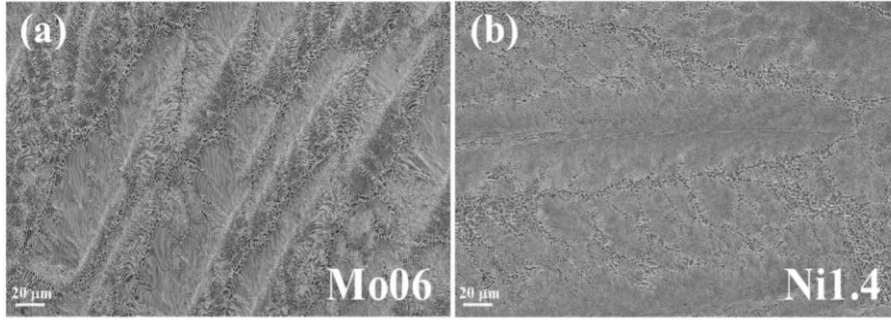


Şekil 3.2.  $AlCoCrFeNi_{2.1}$  ÖYEA'ına ait mikroyapı görüntüsü (Lu vd., 2014).

Lu'nun çalışmasını izleyen süreçte  $AlCoCrFeNi_{2.1}$  ÖYEA'ına dair faz stabilitesi, çökelme sertleşmesi, termomekanik işlem ve ısıl işlem gibi birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Gao vd., 2017; Xiong vd., 2020; Ding vd., 2017; Wani vd., 2017). Yapılan bütün çalışmalar ötektik ve ötektik yakını alaşımlara uygulanan işlemler ile ÖYEA'ların mekanik özelliklerinin istenilen doğrultuda optimize edilebileceğini göstermiştir.

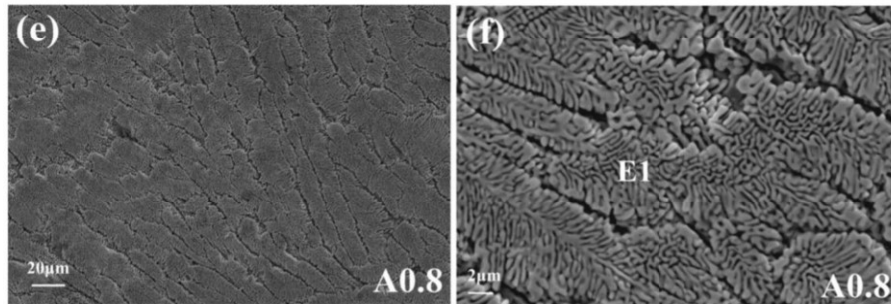
YMK/B2 ötektik alaşımlarını daha karmaşık intermetalik fazlar içeren ötektik alaşımlar izlemiştir. 2015 yılında Hui,  $CoFeNiVMo$  sisteminde  $CoFeNiVMo_{0.6}$  ve

CoFeNi<sub>1,4</sub>VMo bileşimlerinde YMK ve CoMo<sub>2</sub>Ni tipi intermetalik içeren iki adet ÖYEA tespit etmiştir. Üretilen ötektik alaşımların yaklaşık 2000 MPa akma mukavemeti gösterdiği ancak nerdeyse hiç süneklığe sahip olmadıkları görülmüştür (Jiang vd., 2015).



Şekil 3.3. CoFeNiVMo<sub>0,6</sub> ve CoFeNi<sub>1,4</sub>VMo bileşimindeki ÖYEA'ların mikroyapı görüntüleri (Jiang vd., 2015).

Benzer şekilde Hui, 2016 yılında Co<sub>2</sub>Mo<sub>0,8</sub>Ni<sub>2</sub>VW<sub>0,8</sub> bileşiminde YMK ve  $\mu$  fazlarından oluşan bir ÖYEA üzerine çalışma yayınlamıştır. Deniz yosunu morfolojisinde mikroyapı sergileyen ötektik alaşımların akma mukavemetinin 1431 MPa, süneliğinin ise %14,4 olduğu tespit edilmiştir (Hui vd., 2016). Co<sub>2</sub>Mo<sub>0,8</sub>Ni<sub>2</sub>VW<sub>0,8</sub> alaşımlarının sahip olduğu deniz yosunu morfolojisindeki mikroyapısı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Co<sub>2</sub>Mo<sub>0,8</sub>Ni<sub>2</sub>VW<sub>0,8</sub> bileşimindeki ÖYEA'ların mikroyapı görüntüsü (Hui vd., 2016).

Yukarıda bahsedilen ÖYEA'ların hepsi farklı bir çalışmanın parçası olarak tesadüfen tespit edilen ötektik yapıların izi sürülerek bulunmuş alaşımlardır. ÖYEA belirlenmesi için gerçekleştirilen ilk çalışma Feng vd. tarafından 2015 yılında gerçekleştirilmiştir. Feng, üzerine birçok çalışma yapılmış olan tek fazlı YMK CoCrFeNi alaşımına, Co, Cr, Fe ve Ni elementleri ile ikili faz diyagramlarında ötektik reaksiyon içeren Nb elementi ilave etmiştir.



Nb ile bütün elementlerin ötektik noktaları yaklaşık olarak atomca %14 civarındadır. CoCrFeNiNb sisteminde de ötektik nokta tam olarak atomca %14 Nb bileşiminde bulunmuştur. Çalışma sırasında üretilen ötektik ve ötektik yakını alaşımlar da 500 - 2000 MPa aralığında akma mukavemeti ve %10 – 40 aralığında süneklik elde edilmiştir (Feng vd., 2015).

Bir başka sistematik çalışma örneği Yiping ve ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirdikleri ilk çalışmayı, AlCrCuFeNi<sub>2,1</sub> alaşımında Al yerine Zr, Nb, Hf ve Ta koyarak gerçekleştirmişlerdir. Zr, Nb, Hf ve Ta elementlerinin Ni ile olan karışım entalpilerini Al ile olan karışım entalpisi ile oranlamışlar ve bu oranları Al yerine koydukları elementin miktarını ayarlamakta kullanmışlardır. Yaptıkları hesaba göre elementlerin kompozisyonunu Zr, Nb, Hf ve Ta için sırasıyla; 0,45, 0,73, 0,52 ve 0,76 olarak bulmuşlardır. Bu bileşimlere yakın oranlarda üretilen alaşımlar ile gerçek ötektik bileşimleri ise Zr, Nb, Hf ve Ta için sırasıyla; 0,6, 0,74, 0,55, 0,65 olarak bulmuşlardır (Yiping vd., 2017).

Aynı grubun daha geniş kapsamlı gerçekleştirdiği ikinci çalışmada ise literatürde bilinen 8 farklı ÖYEA üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu alaşımlar incelendiğinde, alaşımların karışım entalpisinin 0'a yakın olduğu bir faz grubu ve aşırı negatif olan bir faz grubundan oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yeni alaşımlar geliştirmek için de ikinci gruptaki elementlerin karışım entalpisine göre oranlanarak değiştirilebileceğini tespit etmişlerdir (Jiang vd., 2018). Jiang'ın çalışmasında kullandığı alaşımlar ve faz grupları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. ÖYEA'lar ve barındırdıkları faz grupları (Jiang vd., 2018).

ÖYEA	Faz 1	Faz 2	Grup 1	Grup 2
Al <sub>1,2</sub> CrCuFeNi <sub>2</sub>	(Fe,Cr)	(Al,Ni)	Fe,Cr,Cu	Al, Ni
AlCoCrCuFeNiMo <sub>0,4</sub>	(Fe,Cr)	(Al,Ni,Cu)	Fe,Co,Cr,Cu	Al, Ni
AlCrFeNi	(Fe,Cr)	(Al,Ni)	Fe,Cr	Al, Ni
AlCrFeNiMo <sub>0,2</sub>	(Fe,Cr)	(Al,Ni)	Fe,Cr,Mo	Al, Ni
NbScTiZr	(Sc,Zr)	(Ti,Nb)	Sc,Zr	Ti, Nb
Ni <sub>2</sub> FeCoV <sub>0,5</sub> Nb <sub>0,75</sub>	(Fe,Ni)	(Co,Nb)	Fe,Ni,Co,	Fe, Nb
CoCrFeNiMnPb	(Co,Cr,Fe,Ni)	(Mn,Pb)	Co,Cr,Fe,Ni	Mn, Pb
CoCrFeNiZr <sub>0,5</sub>	(Fe,Cr)	(Co,Ni,Zr)	Fe,Cr,Co	Ni, Zr

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Alaşım Tasarımı

Üretilmesi planlanan ötektik yüksek entropili alaşımların bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

#### 4.1.1. Alaşım paletinin belirlenmesi

Yüksek entropili alaşımlar ile gerçekleştirilen ilk çalışmaların büyük çoğunluğunda Co, Cr, Fe, Ni ve Cu elementleri kullanılmıştır. Bu elementlerin seçilmesinin başlıca sebebi Hume-Rotary kuralları çerçevesinde katı çözelti oluşturmak için uygun element olmalarından kaynaklanmaktadır (Cantor vd., 2004; Yeh vd., 2004; Miracle, 2016). Ancak Cu elementinin segregasyon nedeniyle istenmeyen ikincil fazların oluşumunu tetiklemesi nedeniyle, ilerleyen dönemde gerçekleştirilen çalışmalarda kullanımı büyük ölçüde azalmıştır (Takeshi, 2018; Liu vd., 2016). Al elementi yüksek entropili alaşımlarda genel olarak katı çözeltisi sertleşmesine bağlı olarak gerçekleşen mukavemet artışı ve alaşım yapısının YMK yapıdan HMK yapıya geçişini tetiklemesi nedeniyle seçilmiştir.

Yürütülen tez çalışmasında yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı ana alaşım paleti olarak Al-Co-Cr-Fe-Ni elementleri ve bunlara ilave olarak alaşımın yüksek sıcaklıklarda yapısal ve mekanik kararlılığını sağlamak amacıyla Mo ve Nb elementleri seçilmiştir. Belirlenen bu gruplara ilave olarak Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni ve Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sistemlerinden daha fazla ötektik bileşim içeren Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemi ile de tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde belirlenen ötektik alaşımlara düşük miktarlarda Mo, Nb ve V ilavesi yapılarak bu alaşımların mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca B elementi de arayer alaşım elementi olarak mekanik özelliklerin artırılması amacıyla ppm mertebelerinde ötektik alaşımlara katılmıştır.

#### 4.1.2. Bileşim kombinasyonlarının belirlenmesi ve makro dosyalarının oluşturulması

Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni ve Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sistemlerinde bulunan ötektik reaksiyonların belirlenmesi için denge diyagramları hesaplanacak kompozisyonlar,  $(Co_qCr_vFe_wMo_yNi_z)_{100-x}Al_x$  olacak şekilde  $5 < q,v,w,y,z < 40$  aralığında %5'lik artışlar ile,  $(Co_qCr_vFe_wNi_y)_{100-x}Al_x$  olacak şekilde  $5 < q,v,w,y < 40$  aralığında %5'lik artışlar ile,  $(Co_qCr_vFe_wNb_yNi_z)_{100-x}Al_x$  olacak şekilde  $5 < q,v,w,y,z < 40$  aralığında %10'luk artışlar ile oluşturulmuştur.

ThermoCalc 2017 programı konsol modunda yapılacak hesaplamalarda her bir kompozisyon için ayrı ayrı kod yazımının çok uzun zaman alacak olması nedeniyle hesaplamalara başlamadan önce bütün kompozisyonlar için Microsoft Excel ve Kutools programları kullanılarak makro dosyaları oluşturulmuş ve bu makro dosyaları çalıştırılarak denge diyagramları hesaplanmıştır.

#### 4.1.3. Denge diyagramlarının oluşturulması ve katılma simülasyonları

Termodinamik hesaplamalarda ThermoCalc 2017 programı ve bu programa ait TCHEA2 veritabanı kullanılmıştır. Bütün hesaplamalar konsol modunda oluşturulan makrolar ile gerçekleştirilmiştir. Denge diyagramlarının hesaplanmasında başlangıç koşulları; basınç 1 atm, sıcaklık 1000 K, sistem boyutu 1 mol ve Al miktarı 0,1 mol olacak şekilde ve denge diyagramlarında sıcaklık eksenini 1000-1600 °C, Al miktarı 0-0,25 aralığında olacak şekilde seçilmiştir.

Hedeflenen yüksek mukavemet ve süneklik değerlerinin elde edilebilmesi için ötektik yapının, sünek YMK fazı ile birlikte sert HMK, B2 veya  $\sigma$  fazlarından oluşması hedeflenmiştir. Oluşturulan denge diyagramlarından istenilen fazları içeren ötektik reaksiyonları barındıranlar belirlenmiş ve denge diyagramları üzerinden ötektik bileşimler tespit edilmiştir.

Belirlenen bütün ötektik bileşimler için denge ve denge dışı katılma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Denge durumu katılma simülasyonlarında belirlenen ötektik bileşimleri için 1000-1500 °C aralığında oluşabilecek fazlar ve miktarları hesaplanmıştır.

Alaşımların dökümünde metal kalıp kullanılması nedeniyle hızlı bir katılaşma gerçekleşmekte ve bu durum katılaşma sürecinde katıda difüzyona imkân tanımamaktadır. Bu tip katılaşmalarda, katılaşma sonucu oluşabilecek fazların belirlenmesinde sıvıda difüzyonun sınırsız, katıda ise sıfır olduğu Scheil simülasyonlarının daha gerçekçi sonuçlar vermesi nedeniyle üretilen alaşımların içerdiği fazların tür ve miktarlarının öngörülmesi için Scheil simülasyonları gerçekleştirilmiştir (Chandra ve Madangopal, 2015).

#### 4.2. Alaşımların Üretilmesi

Belirlenen alaşımlar yüksek saflıktaki Al, Co, Cr, Fe, Mo, Nb, Ni ve V (Alfa Aesar, >%99,95) elementleri kullanılarak hazırlanmıştır. 0,0001 gr hassasiyetli terazi ile tartılan şarj malzemeleri, argon atmosferi altında ve su soğutmalı bakır potada, homojenliğin sağlanması için üçer kez ergitilmiş ve üçüncü ergitmenin sonunda döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Dökümlerde, silindirik numunelerin üretilmesi için 8 mm çapında 50 mm boyunda, kare kesitli numunelerin üretilmesi için 6x12x60 mm ölçülerde çelik kalıplar kullanılmıştır. Şekil 4.1’de ergitme ve döküm işlemlerinin gerçekleştirildiği vakum ark ergitme ocağı ve su soğutmalı bakır pota, Şekil 4.2’de ise üretilen silindirik ve dikdörtgen kesitli numuneler verilmiştir.



Şekil 4.1. Vakum ark ergitme ocağı ve su soğutmalı bakır pota.



Şekil 4.2. Döküm ile üretilen silindirik ve dikdörtgen kesitli numuneler.

### 4.3. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları

Metal kalıba dökülen silindirik çubuk formundaki alaşımlardan elmas disk kullanılarak hassas kesme yöntemi ile optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), Elektron dağılım spektrometresi (EDS) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) analizleri için numuneler çıkarılmıştır. Optik mikroskop ve SEM analizlerinde kullanılacak olan numuneler sıcak kalıplama yöntemi ile bakalit kalıp içerisine alınmış ve standart metalografik numune hazırlama prosedürü kullanılarak parlatılan numuneler %10 kral suyu-saf su çözeltisi ile dağlanmış.

Optik mikroskop görüntüleri Nikon Eclipse 150 marka optik mikroskop ve ClemexPro görüntü analiz sistemi kullanılarak, SEM görüntüleri ise FEI Nova NanoSEM marka cihaz kullanılarak alınmıştır.

XRD analizleri, Panalytical EMPYREAN marka cihazda  $2^\circ/\text{dk}$  tarama hızında, 30-100 derece aralığında yapılmıştır.

Alaşımlardaki fazların tür ve miktarların belirlenmesi için XRD ve Rietveld Analizleri gerçekleştirilmiştir. Fazların türlerinin belirlenmesinde, ICDD PDF-4+ 2018 veritabanına bağlı çalışan SLeve+2018 programı kullanılmıştır. Alaşımların tümü YMK ve B2 fazlarını içermektedir. Bu fazları temsil eden en uygun CIF (crystallographic information files) dosyaları, YMK (ICDD PDF No: 04-018-1300) ve B2 (ICDD PDF No: 04-004-6642) fazları için kaydedilmiştir. Rietveld Analizleri MAUD (Materials Analysis Using Diffraction) programı ile gerçekleştirilmiştir (Lutterotti, 2000). XRD cihazından

kaynaklanan değişkenlerin tespit edilmesi için ölçümlerden önce standart Si numune çekimi alınmış ve kalibrasyon dosyası oluşturulmuştur. Rietveld analizleri, uyumun iyiliği derecesini yansıtan (Goodness-of-Fit) Sigma değeri 1'e en yakın oluncaya kadar sürdürülmüştür.

#### 4.4. Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları

Üretilen alaşımların mekanik karakterizasyonu için döküm yöntemi ile üretilen silindirik çubuklardan 8 mm çapında ve 14 mm uzunluğunda, dikdörtgen kesitli dökümlerden tel erezyon kesme yöntemi ile kesilen 2 mm çapında ve 3 mm uzunluğunda basma numuneleri hazırlanmıştır.

Basma deneyleri, Shimadzu AG-IS 250 kN marka cihaz kullanılarak oda sıcaklığında ve 250-750 °C aralığındaki yüksek sıcaklıklarda  $10^{-3}\text{sn}^{-1}$  deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir.

Üretilen alaşımların mikrosertlik değerleri Future Tech FM800 marka cihaz ile 200 gr yükün 10 sn uygulanması ile yapılan 5 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.

#### 4.5. Mekanik Özellikleri Geliştirme Çalışmaları

Üretilen alaşımların istenilen mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla; alaşımların akma dayanımını artırabilmek için, mikro alaşımlama, soğuk - sıcak deformasyon, ısıtma işlemi ve farklı soğutma hızlarında döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Soğuk deformasyon, silindirik numuneler için %15 ve %20 oranında, plaka numunelerde ise %10 oranında uygulanmıştır. Sıcak deformasyon sadece plaka numunelere %20 oranında uygulanmıştır. Artan oranlardaki deformasyonlarda numunelerde çatlamalar meydana gelmiştir.

Isıtma işlemleri, oksidasyonun önlenmesi amacıyla 600, 800, 1000, 1200 °C sıcaklıkta ve 4, 8, 12 saat sürede, argon atmosferinde kuvars tüp içine alınan numuneler ile gerçekleştirilmiştir.

Alaşımlama alışmaları,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımı için Nb ilavesi ile ve  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  alaşımı içinse B ilavesi ile gerçekleştirilmiştir.



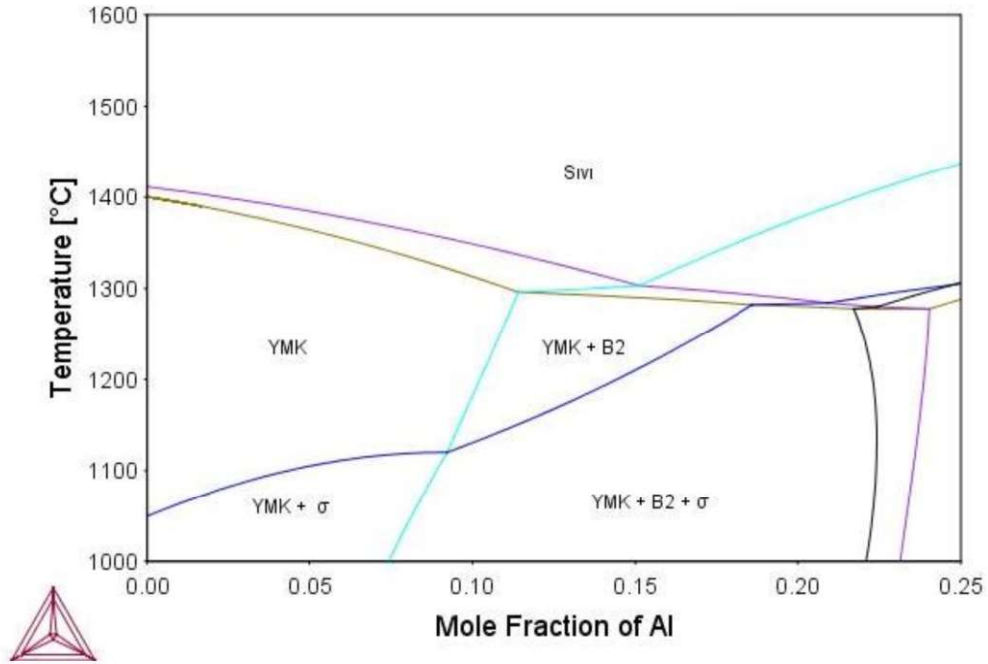
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Termodinamik Hesaplamalar

Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni ve Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemlerinde gerçekleştirilen modelleme çalışmalarına ait sonuçlar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

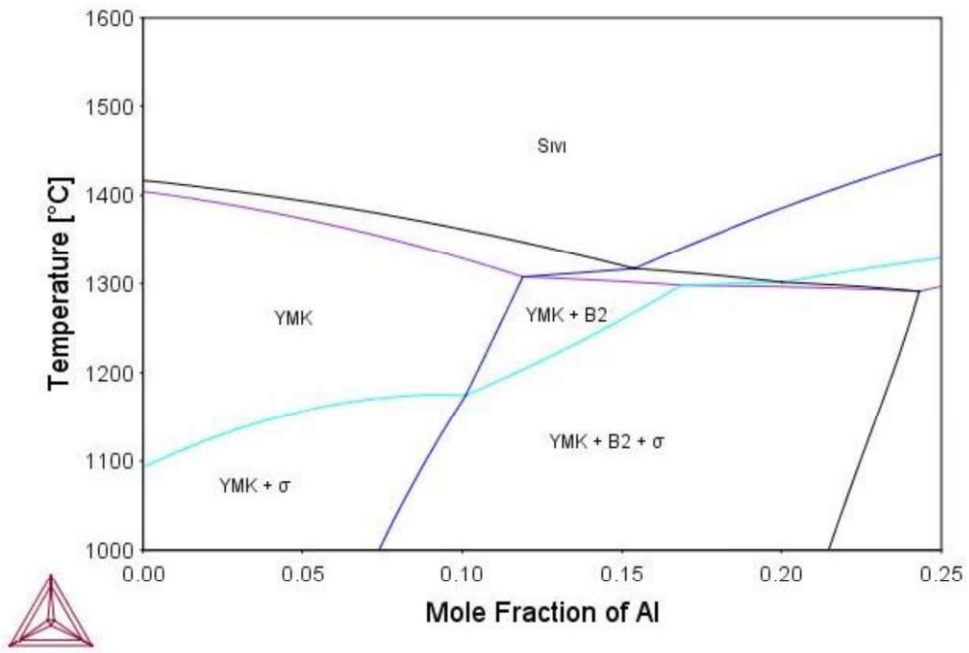
#### 5.1.1. Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni sistemi termodinamik hesaplamaları

Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni sisteminde ThermoCalc 2017 programı ve TCHEA2 veri tabanı kullanılarak hesaplanan ve YMK + B2 ötektik reaksiyonunu içerdiği belirlenen denge diyagramları Şekil 5.1-10'da verilmiştir.

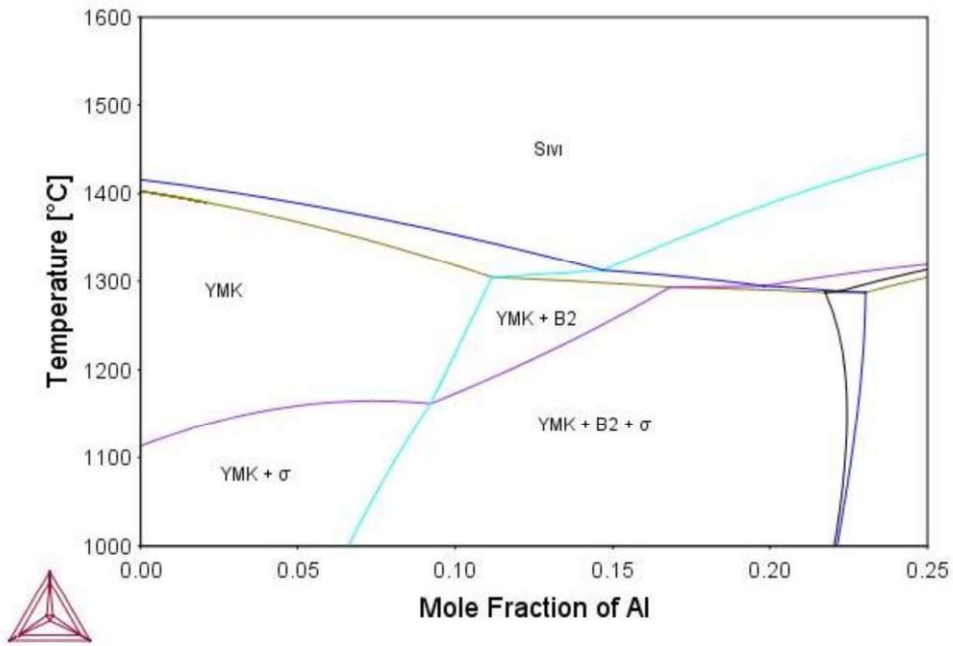


Şekil 5.1.  $(Co_{15}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$  sistemine ait denge diyagramı.

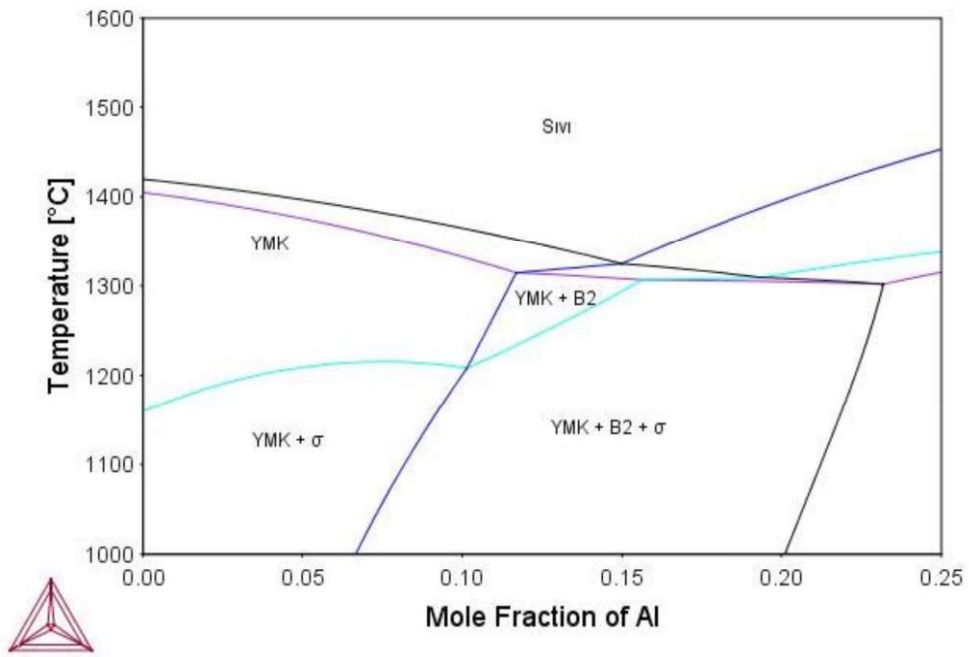




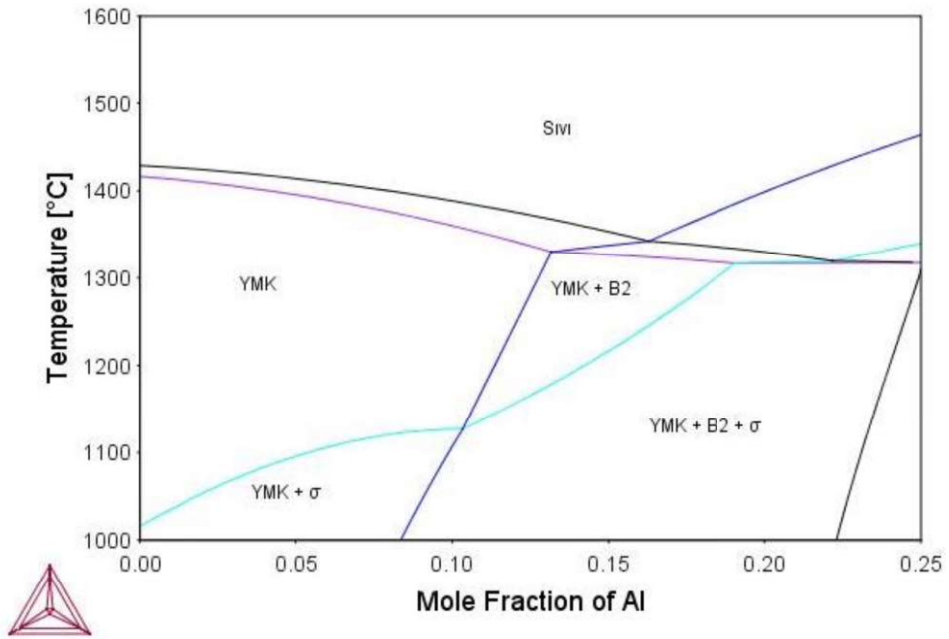
Şekil 5.2.  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



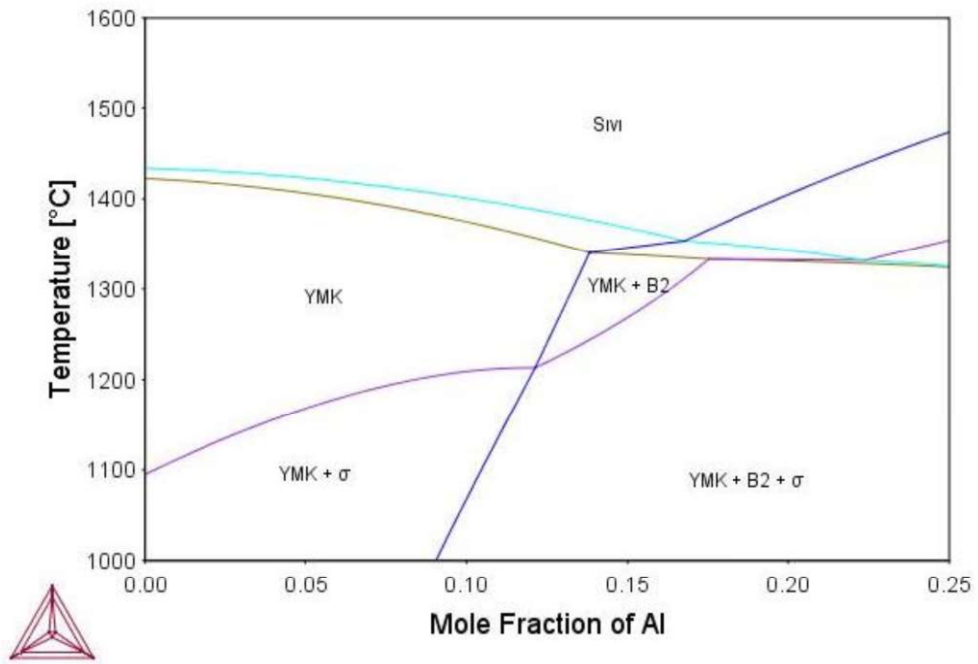
Şekil 5.3.  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



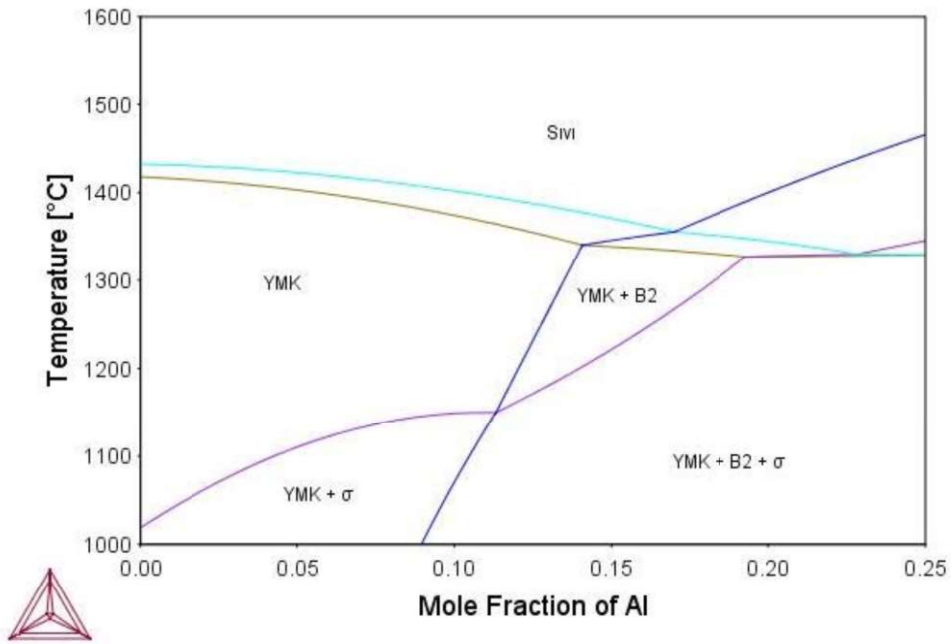
Şekil 5.4.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



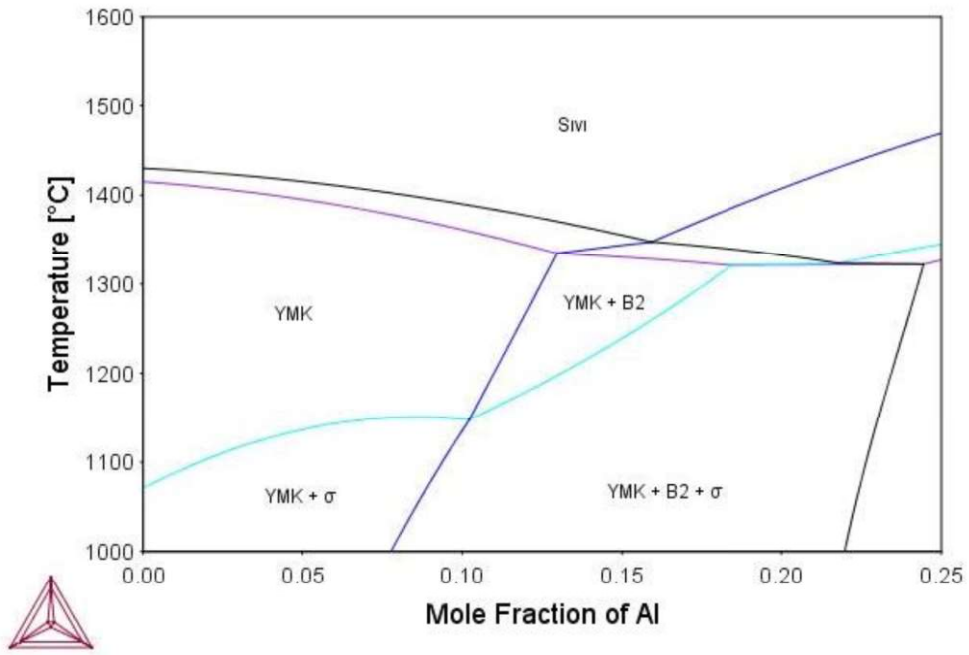
Şekil 5.5.  $(\text{Co}_{30}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



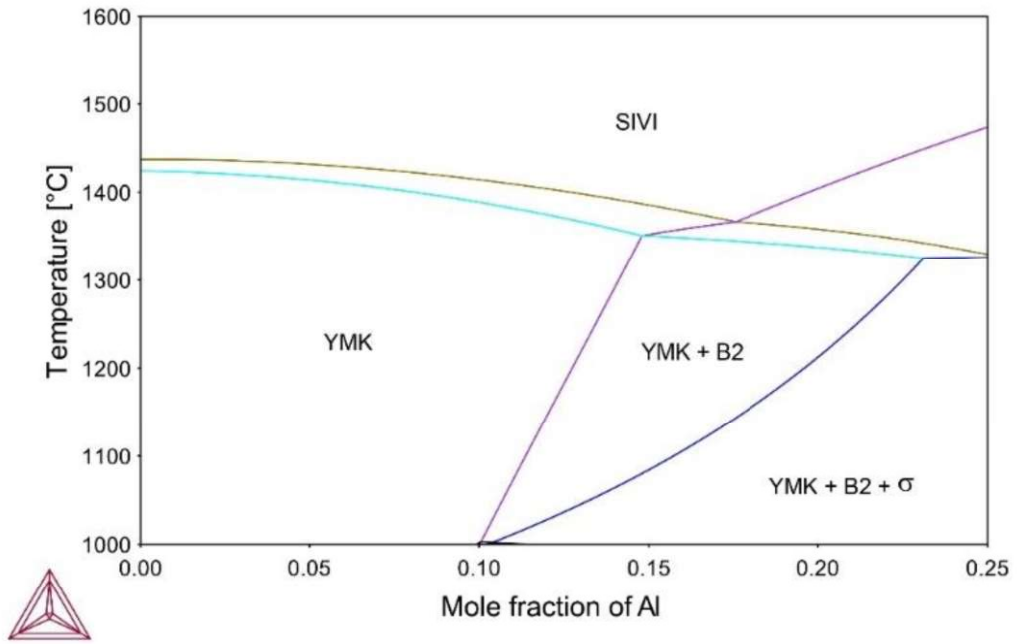
Şekil 5.6.  $(\text{Co}_{35}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



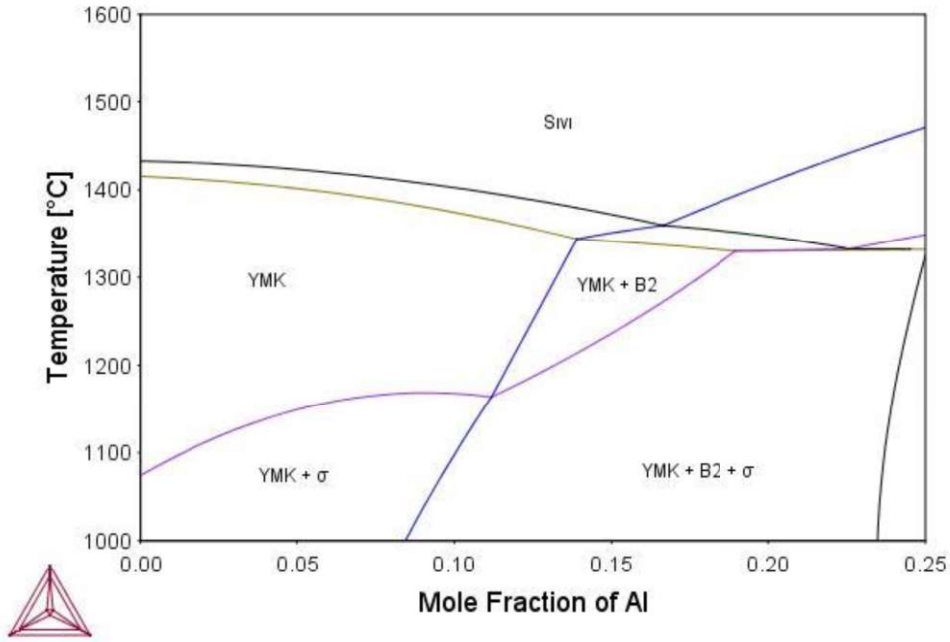
Şekil 5.7.  $(\text{Co}_{35}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



Şekil 5.8.  $(Co_{35}Cr_{15}Fe_{10}Mo_5Ni_{35})_{100-x}Al_x$  sistemine ait denge diyagramı.

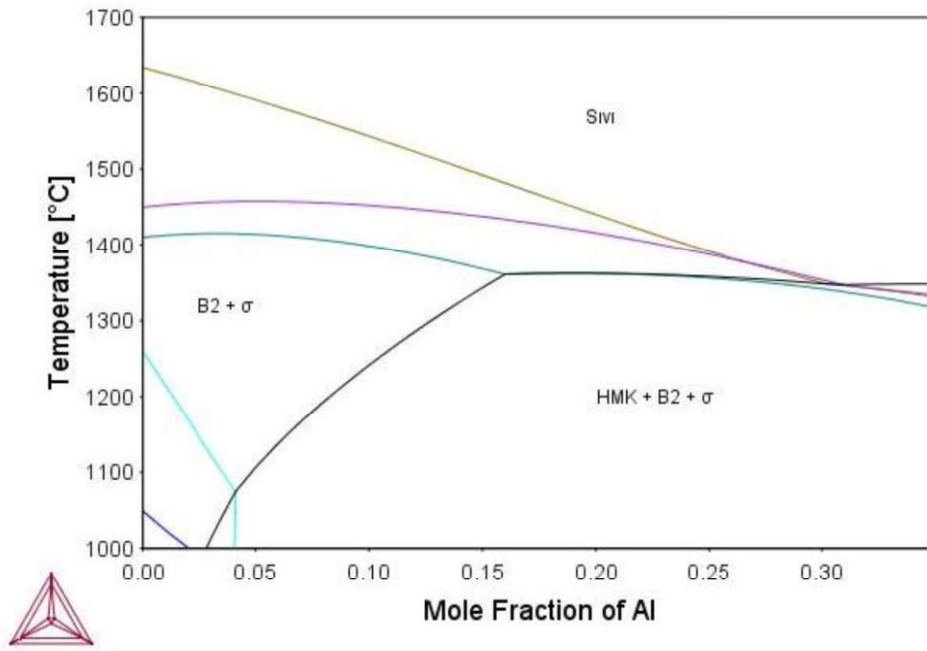


Şekil 5.9.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$  sistemine ait denge diyagramı.

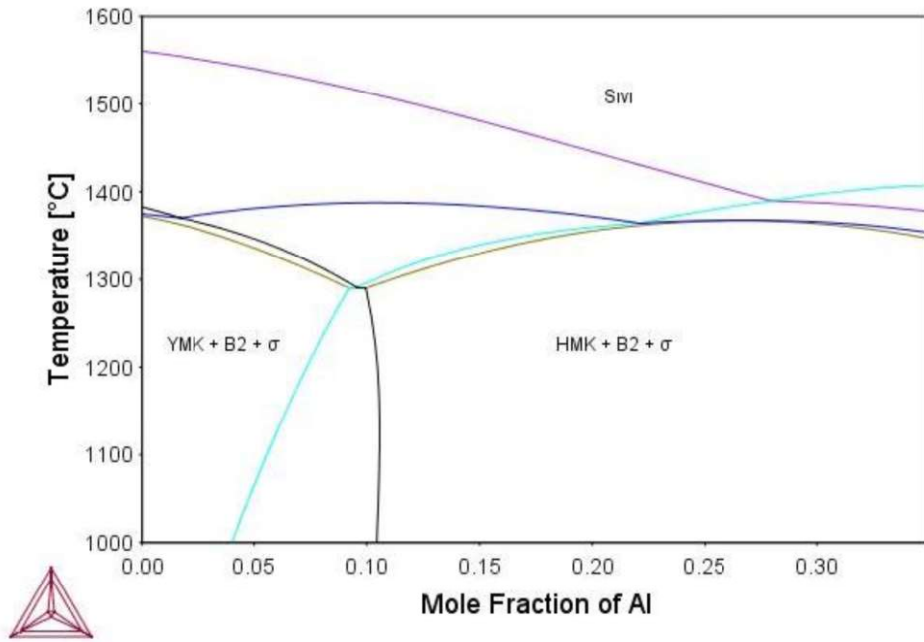


Şekil 5.10.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.

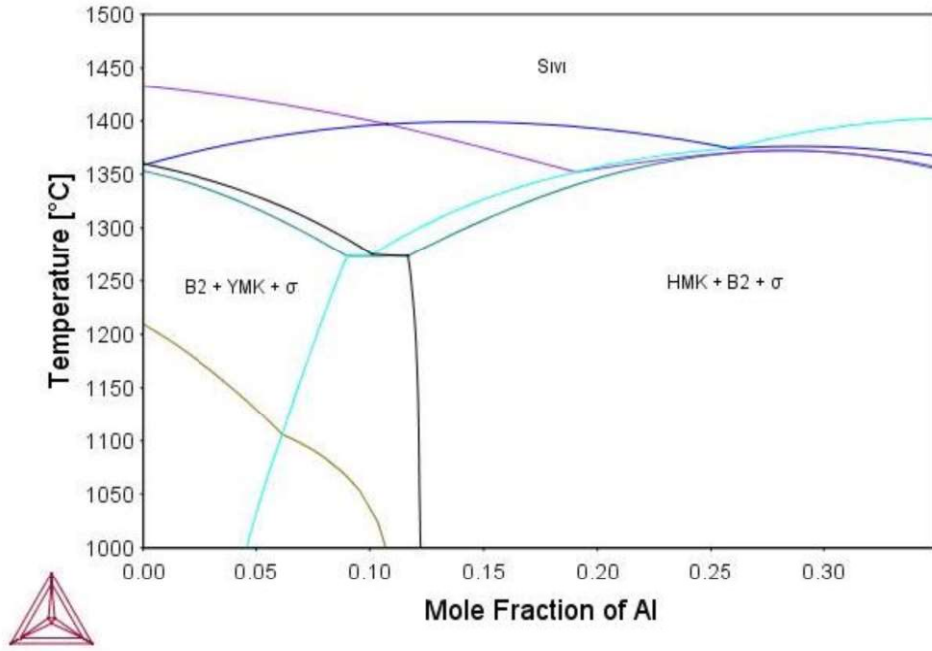
Şekil 5.1-10'da verilen denge diyagramlarından görüleceği üzere, istenen YMK + B2 fazlarına sahip ötektik yapısı yüksek Co ve Ni içeren çok dar bir bileşim aralığında elde edilebilmektedir. Bunun nedeni sistemdeki Co ve Ni elementlerinin YMK fazı oluşumunu teşvik etmesidir. Ayrıca Al, Cr ve Fe elementleri HMK fazı oluşumunu teşvik ederken, yüksek Fe, Cr ve Mo mevcudiyeti ise  $\sigma$  fazını kararlı hale getirmektedir. Elde edilen bu sonuçlar Hsu'nun Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni sisteminde gerçekleştirdiği sistematik çalışma sonuçları ile paralellik göstermektedir (Hsu vd., 2013). Şekil 5.11-13'ten görülebileceği üzere Co ve Ni elementlerinin düşük, Fe ve Cr elementlerinin yüksek olduğu denge diyagramları çok geniş aralıklarda sadece sert fazlardan oluşmaktadır.



Şekil 5.11.  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{30}\text{Fe}_{35}\text{Mo}_{10}\text{Ni}_5)_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



Şekil 5.12.  $(\text{Co}_{15}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{35}\text{Mo}_{10}\text{Ni}_{15})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



Şekil 5.13.  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{30}\text{Fe}_{30}\text{Mo}_{10}\text{Ni}_{20})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.

Literatürde, çoğunlukla deneme yanılma yöntemiyle üretilen yüksek entropili alaşımlarda meydana gelecek faz yapılarını kontrol etmek adına çeşitli istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yüksek entropili alaşım sistemlerindeki bileşenlerin meydana gelecek mevcut faz yapıları üzerindeki davranışları,  $\delta r$  (atomik çap farkı),  $\Delta H_{kar}$  (karışım entalpisi),  $\Delta S_{kar}^{konf}$  (karışım entropisi),  $VEY$  (valans elektron yoğunluğu) ve  $\Delta\chi$  (elektronegativite farkı) parametreleri kullanılarak incelenmektedir. Katı çözeltili oluşumu için,  $0 \leq \delta \leq 8,5$ ;  $-22 \leq \Delta H_{kar} \leq 7 \text{ kJmol}^{-1}$ ;  $11 \leq \Delta S_{kar} \leq 19,5 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $\Delta\chi \leq 1$  değerlerinin sağlanması gerektiği (Zhang, 2016; Ji, 2015), YMK + HMK yapısının oluşması için  $7,5 \leq VEY \leq 7,8$  değerlerinin sağlanması gerektiği belirtilmiştir (Tian, 2014).

Bu kapsamda belirlenen ötektik bileşimler için, aşağıda verilen denklemler ile hesaplanan  $\delta r$ ,  $\Delta H_{kar}$ ,  $\Delta S_{kar}^{konf}$ ,  $VEY$  ve  $\Delta\chi$  değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

$$\Delta S_{kar}^{konf} = -R \sum_i^N c_i \ln c_i \quad 5.1$$



$$\Delta H_{kar} = \sum_i^N c_i c_j \Omega_{ij} ; \Omega_{ij} = 4\Delta H_{AB}^{kar} \quad 5.2$$

$$\delta r = 100 \sqrt{\sum_i^N c_i (1 - r_i/r)^2} \quad 5.3$$

$$VEY = \sum_i^N c_i (VEC)_i \quad 5.4$$

$$\Delta \chi = \sqrt{\sum_i^N c_i (\chi_i - \bar{\chi})^2} \quad 5.5$$

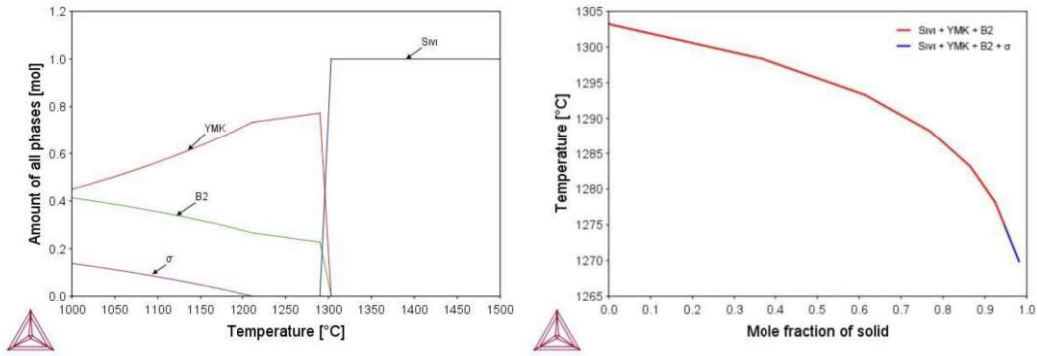
Çizelge 5.1. Ötektik bileşimlere ait  $\Delta H_{kar}$ ,  $\Delta S_{kar}$ ,  $\delta r$ ,  $VEY$  ve  $\Delta \chi$  değerleri.

Ötektik Bileşim	$\Delta S_{kar}$	$\Delta H_{kar}$	$\delta r$	$VEY$	$\Delta \chi$
(Co <sub>15</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>20</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>84,89</sub> Al <sub>15,11</sub>	13,726	-11,713	5,361	7,626	0,138
(Co <sub>20</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>15</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>84,61</sub> Al <sub>15,39</sub>	13,732	-12,100	5,375	7,654	0,139
(Co <sub>20</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>20</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>35</sub> ) <sub>85,33</sub> Al <sub>14,67</sub>	13,986	-11,431	5,301	7,608	0,137
(Co <sub>25</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>15</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>35</sub> ) <sub>85,02</sub> Al <sub>14,98</sub>	13,904	-11,835	5,319	7,634	0,138
(Co <sub>30</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>10</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83,72</sub> Al <sub>16,28</sub>	13,385	-12,503	5,454	7,772	0,137
(Co <sub>35</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>10</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83,24</sub> Al <sub>16,76</sub>	13,062	-12,395	5,502	7,869	0,134
(Co <sub>35</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>5</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>83,01</sub> Al <sub>16,99</sub>	12,886	-13,005	5,510	7,773	0,138
(Co <sub>35</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>10</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>35</sub> ) <sub>84,09</sub> Al <sub>15,91</sub>	13,427	-12,246	5,404	7,751	0,136
(Co <sub>40</sub> Cr <sub>10</sub> Fe <sub>5</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>40</sub> ) <sub>82,43</sub> Al <sub>17,57</sub>	12,519	-12,908	5,566	7,863	0,135
(Co <sub>40</sub> Cr <sub>15</sub> Fe <sub>5</sub> Mo <sub>5</sub> Ni <sub>35</sub> ) <sub>83,35</sub> Al <sub>16,65</sub>	12,878	-12,763	5,465	7,751	0,137

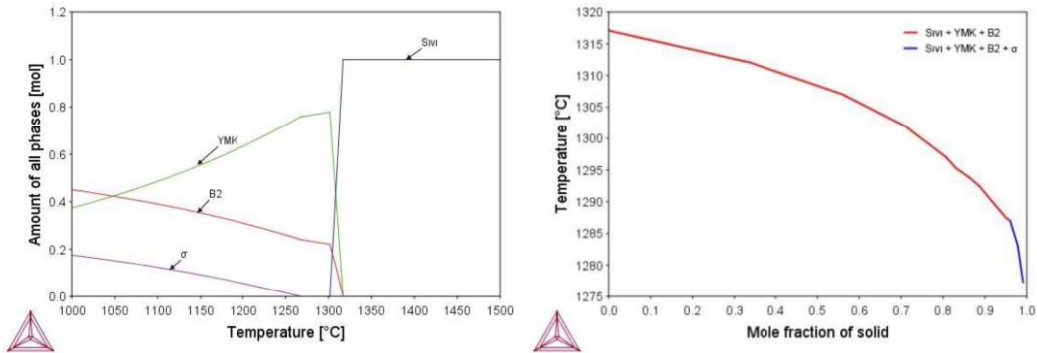
Belirlenen ötektik bileşimler için hesaplanan değerler Zhang'ın ve Tian'ın çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, alaşımlarda katı çözeltili faz yapısının ve YMK + HMK yapı kombinasyonunun oluşumunun mümkün olduğu görülmektedir.



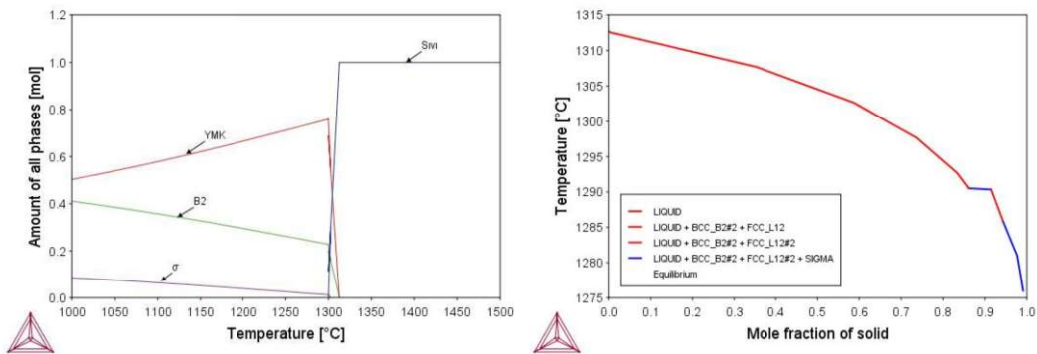
Elde edilen 10 adet ötektik bileşimin üretiminde katılaşma sonucu elde edilecek olan faz durumlarına dair bir öngörü oluşturabilmek adına gerçekleştirilen denge durumu katılaşma ve denge dışı katılaşma simülasyonları sonucu elde edilen diyagramlar Şekil 5.14-23'te ve fazların oluşum sıcaklıkları Çizelge 5.2'de verilmiştir.



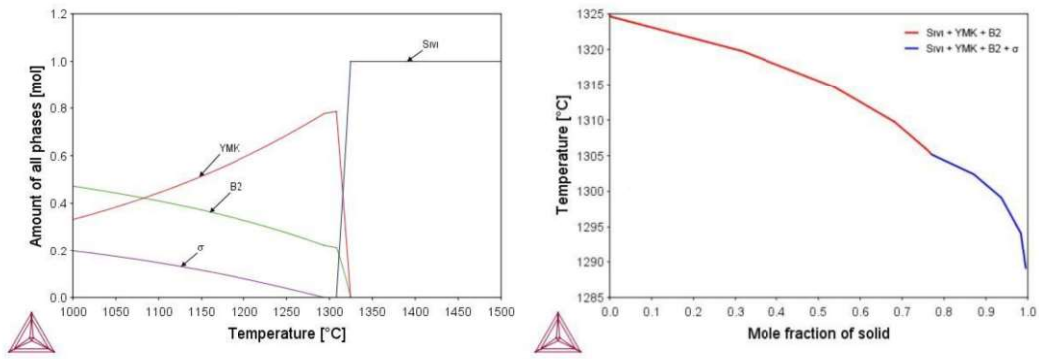
Şekil 5.14.  $(Co_{15}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{40})_{84,89}Al_{15,11}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.



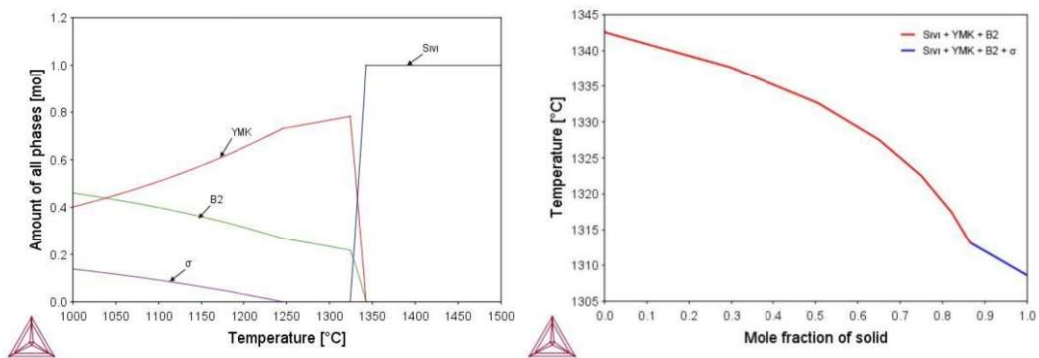
Şekil 5.15.  $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{15}Mo_5Ni_{40})_{84,61}Al_{15,39}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.



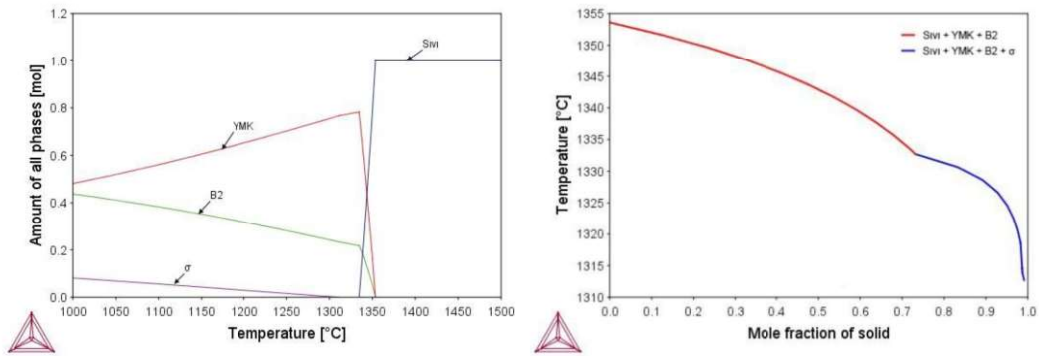
Şekil 5.16.  $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{20}Mo_5Ni_{35})_{85,33}Al_{14,67}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.



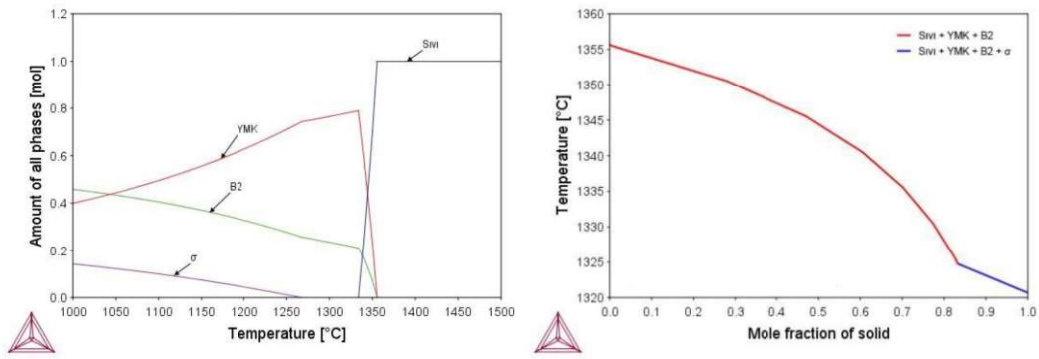
Şekil 5.17.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{85,02}\text{Al}_{14,98}$  ÖYEA'ya ait denge ve denge dışı katılma diyagramları.



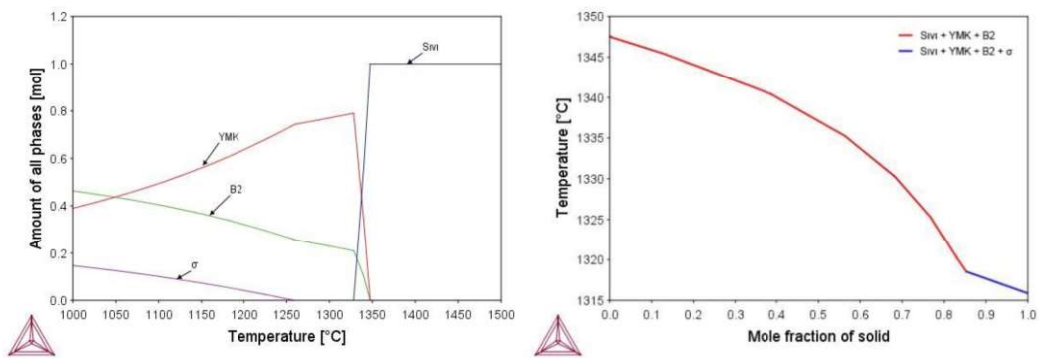
Şekil 5.18.  $(\text{Co}_{30}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{83,72}\text{Al}_{16,28}$  ÖYEA'ya ait denge ve denge dışı katılma diyagramları.



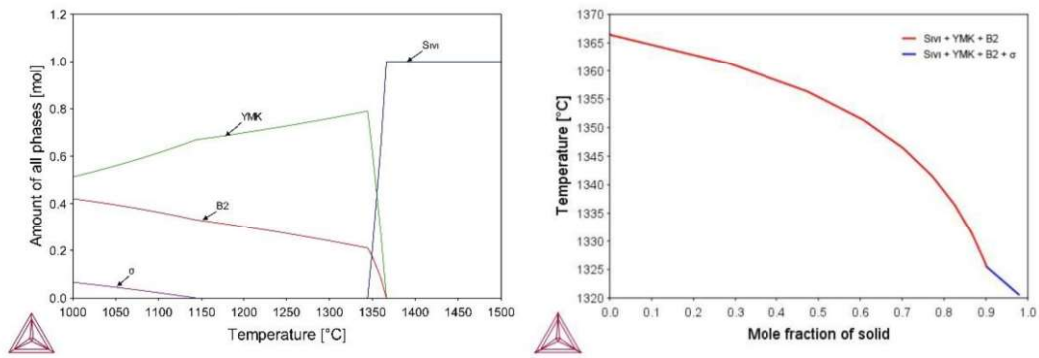
Şekil 5.19.  $(\text{Co}_{35}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{83,24}\text{Al}_{16,76}$  ÖYEA'ya ait denge ve denge dışı katılma diyagramları.



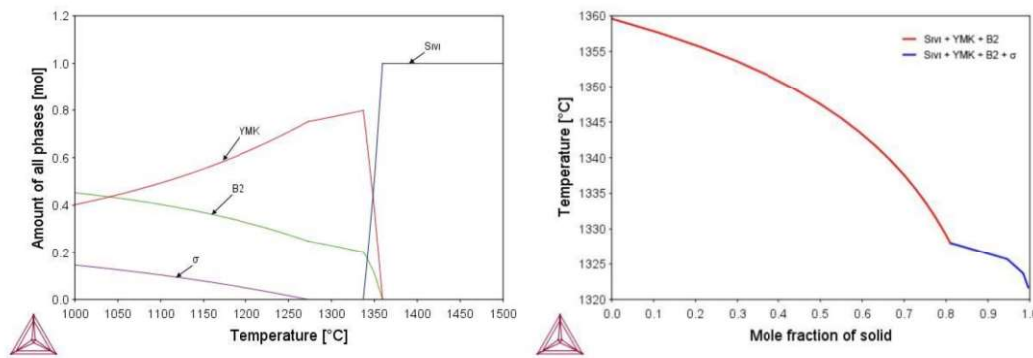
Şekil 5.20.  $(Co_{35}Cr_{15}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{83,01}Al_{16,99}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.



Şekil 5.21.  $(Co_{35}Cr_{15}Fe_{10}Mo_5Ni_{35})_{84,09}Al_{15,91}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.



Şekil 5.22.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,43}Al_{17,57}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.



Şekil 5.23.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{83,35}\text{Al}_{16,65}$  ÖYEA'a ait denge ve denge dışı katılaşma diyagramları.

Çizelge 5.2. ÖYEA'larda bulunan fazların katılaşma sırasında oluşum sıcaklıkları (°C).

Ötektik Bileşim	YMK		B2		$\sigma$	
	Denge	Scheil	Denge	Scheil	Denge	Scheil
$(\text{Co}_{15}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{84,89}\text{Al}_{15,11}$	1303,21	1303,16	1303,21	1303,16	1212,11	1274,88
$(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{84,61}\text{Al}_{15,39}$	1317,06	1317,16	1317,06	1317,16	1267,95	1295,25
$(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{85,33}\text{Al}_{14,67}$	1312,59	1312,69	1312,59	1312,69	1302,74	1290,35
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{85,02}\text{Al}_{14,98}$	1324,64	1324,75	1324,64	1324,75	1293,80	1305,06
$(\text{Co}_{30}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{83,72}\text{Al}_{16,28}$	1342,57	1342,66	1342,57	1342,66	1245,76	1313,13
$(\text{Co}_{35}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{83,24}\text{Al}_{16,76}$	1353,60	1353,69	1353,60	1359,69	1311,77	1332,63
$(\text{Co}_{35}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{83,01}\text{Al}_{16,99}$	1355,59	1355,68	1355,59	1355,68	1267,43	1324,59
$(\text{Co}_{35}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{10}\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{84,09}\text{Al}_{15,91}$	1347,51	1347,60	1347,51	1347,60	1259,45	1318,54
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,43}\text{Al}_{17,57}$	1366,43	1366,37	1366,43	1366,37	1143,69	1325,43
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{35})_{83,35}\text{Al}_{16,65}$	1359,59	1359,68	1359,59	1359,68	1272,57	1327,97

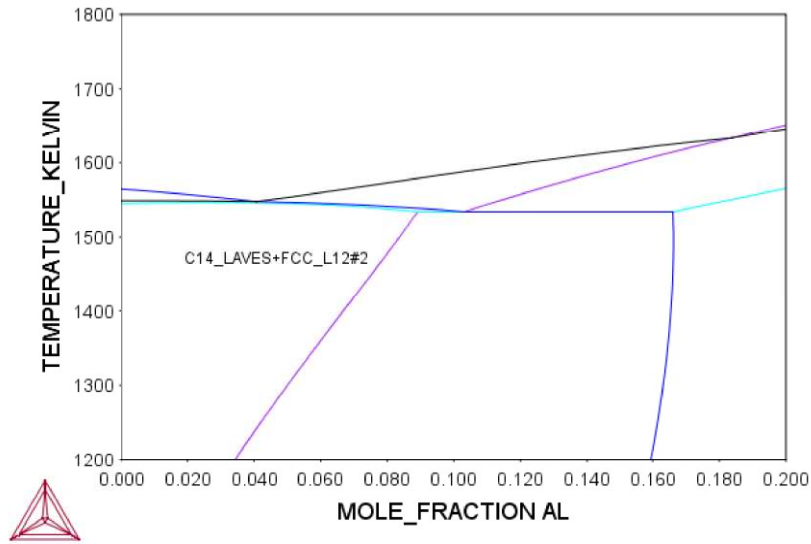
Gerçekleştirilen katılaşma simülasyonlarından, bütün bileşimlerde katılaşma sırasında  $\sigma$  fazının oluştuğu görülmektedir. Ancak bu durum tamamen alaşımın soğuma hızına bağlıdır. Literatürde, yüksek entropili alaşımlarının ergitme yöntemi ile üretildiği çalışmalar incelendiğinde, ergitme işleminin çoğunlukla su soğutmalı bakır pota içerisinde yapıldığı ve üretilen alaşımın bu pota içerisinde veya yine su soğutmalı bakır bir kalıp

içerisine vakum ile emilerek çok hızlı bir şekilde soğutulduğu görülmektedir. Bu durum hali hazırda düşük difüzyon yeteneği olan yüksek entropili alaşımlarda katılaşma sonrası ilk katılaştıran fazın veya fazların yapısını oluşturmasını sağlamaktadır (Miracle, 2016).

Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları sonucunda, ötektik yapı dışında üçüncü faz olarak  $\sigma$  fazı oluşum riskini minimize etmek adına likidüs sıcaklığı ve  $\sigma$  fazının oluşum sıcaklığı arasındaki fark göz önüne alınarak  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,43}\text{Al}_{17,57}$  bileşiminde ÖYEA'nın üretilmesine karar verilmiştir.

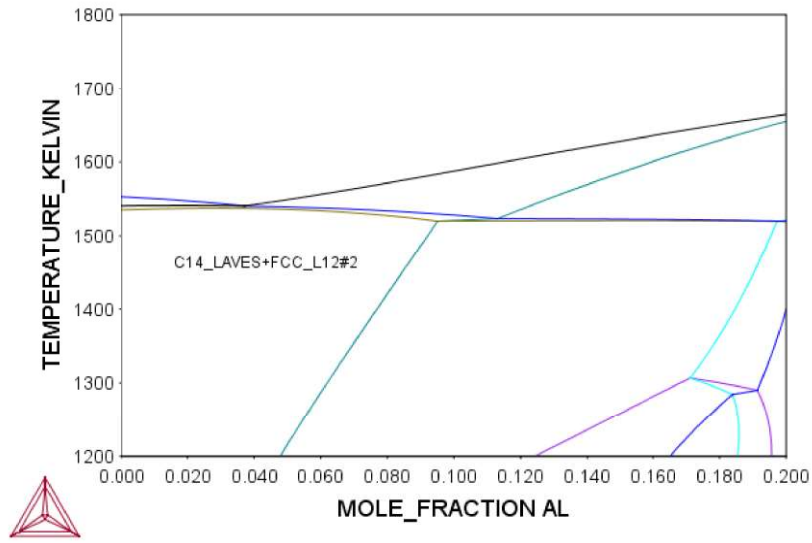
### 5.1.2. Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sistemi termodinamik hesaplamaları

Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni sistemine alternatif olabilecek ikinci bir sistem olarak yüksek oranda Nb içeren Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sisteminde hesaplanan denge diyagramlarında YMK + Lave fazlarını içeren 12 adet ötektik reaksiyon tespit edilmiştir. Bu ötektik alaşımlardan üretilmesine karar verilenlere ait denge diyagramları, denge durumu ve denge dışı katılaşma simülasyonu sonuçları Şekil 5.24-29'da verilmiştir.

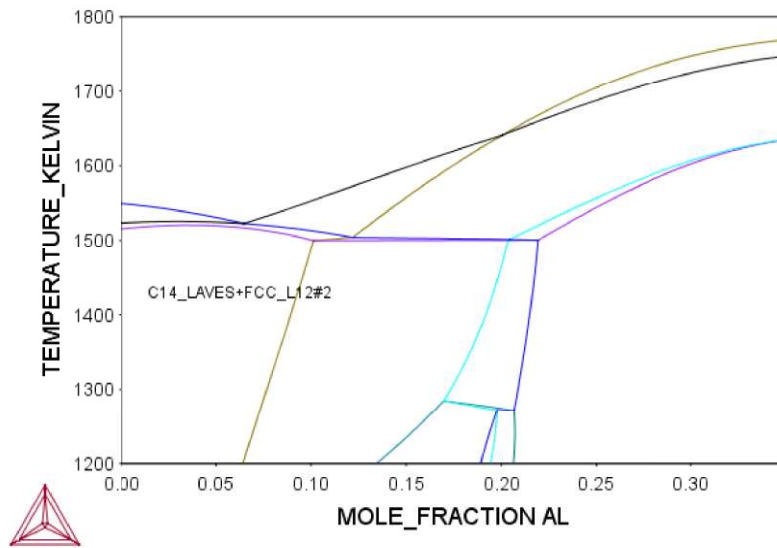


Şekil 5.24.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.

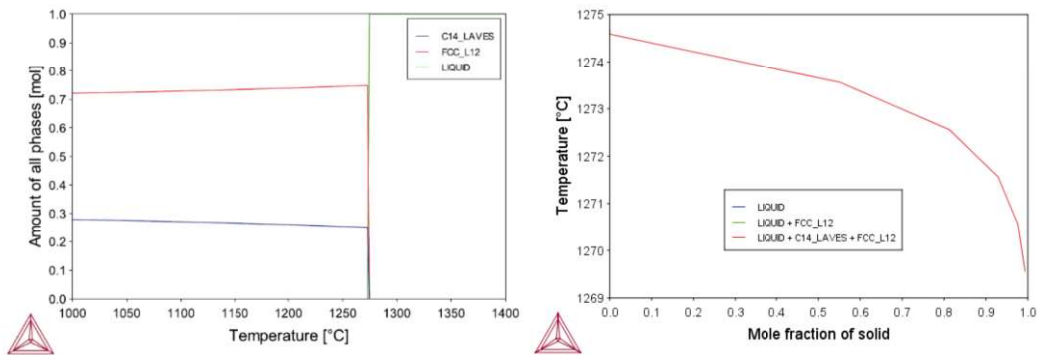




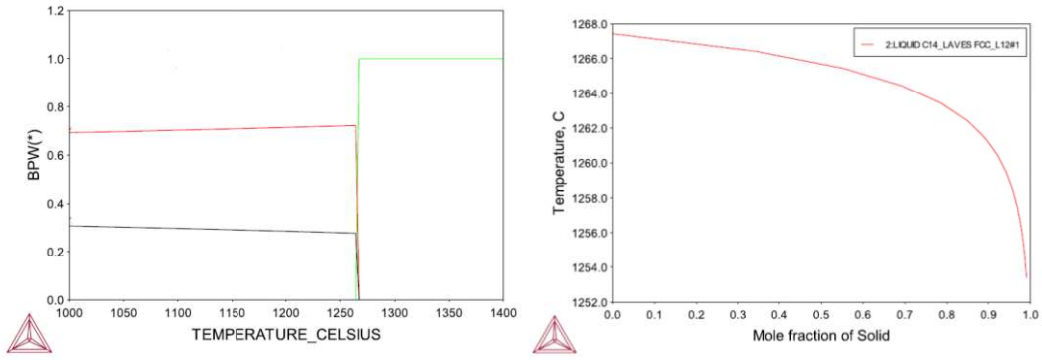
Şekil 5.25.  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{30})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



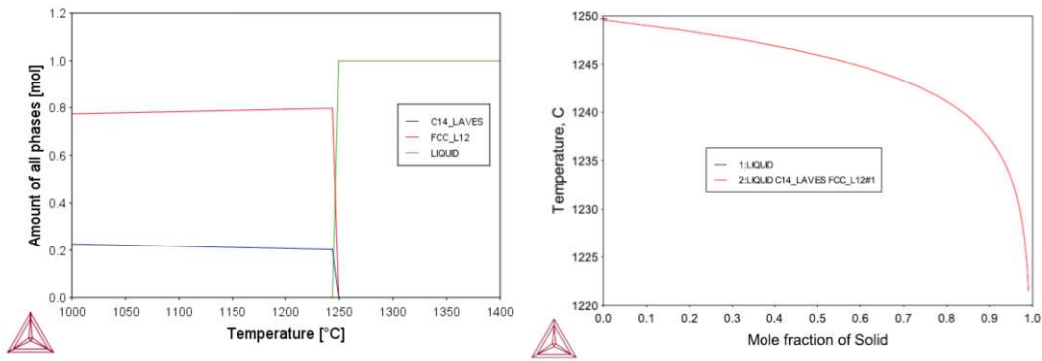
Şekil 5.26.  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



Şekil 5.27.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{96}\text{Al}_4$  alaşımına ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.



Şekil 5.28.  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{30})_{96,7}\text{Al}_{3,7}$  alaşımına ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.



Şekil 5.29.  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{93,6}\text{Al}_{6,4}$  alaşımına ait denge durumu ve denge dışı katılaşma diyagramları.

Elde edilen sonuçlar ötektik alaşımların sünek YMK ve sert Lave fazlarından oluştuğunu göstermektedir. Literatürde Nb içeren YEA'lar incelendiğinde, Nb elementinin kullanılan diğer elementler ile yüksek karışım entalpisine sahip olması nedeniyle intermetalik Lave fazı oluşumu sıklıkla görülmektedir (Martin vd., 2019; Liu vd., 2019).

### 5.1.3. Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemi termodinamik hesaplamaları

Yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özellikler sergileyen ötektik alaşımlar tasarlanması amacıyla, element havuzu olarak Al-Co-Cr-Fe-Ni ve yüksek sıcaklık dayanımı için Mo ve Nb elementleri seçilmiştir. Ancak gerçekleştirilen tasarım çalışmalarında Mo ve Nb ilavesinin sistem içerisinde bulunabilecek ötektik alaşımların sayısını büyük oranda kısıtladığı görülmüştür. Bu nedenle Mo ve Nb ilavesi olmadan Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde baz ötektikler araştırılarak, bulunan ötektiklere minör oranlarda refrakter element ilavesi yapılması suretiyle mekanik özelliklerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde oluşturulan denge diyagramlarında YMK + B2 fazlarını içeren 304 adet ötektik reaksiyon tespit edilmiştir. Bu alaşımların kompozisyonları belirlenerek;

$$\Delta S_{konf} = -R \sum_{i=1}^n X_i \ln X_i = R \ln n \quad 5.6$$

eşitliğinden yararlanarak hesaplanan konfigürasyonel entropi değerleri 1,5R'nin altında olan klasik yüksek entropi tanımına uymayan ötektik bileşimler elenmiştir. Geriye kalan 115 ötektik bileşim için döküm sonrası ve refrakter element ilavesi sonrası yapıda YMK ve B2 fazları dışında başka bir fazın oluşmasının önüne geçilmesi adına 1000 K değerine kadar herhangi bir faz dönüşümü olan bileşimler de elenerek 27 adet ötektik bileşim belirlenmiştir. Bu bileşimler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

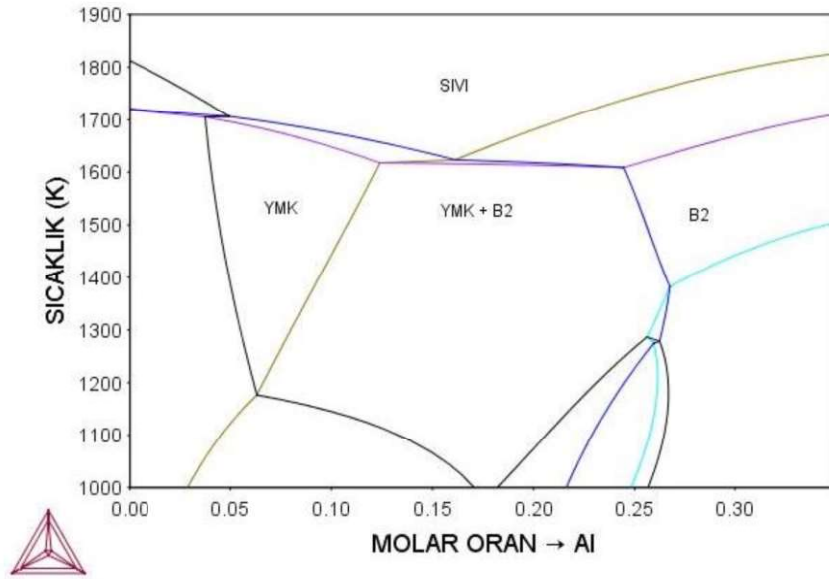
Çizelge 5.3. Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde belirlenen ötektik bileşimler.

Molar oran					$\Delta S_{mix}$
Al	Co	Cr	Fe	Ni	
0,14620	0,17076	0,08538	0,34152	0,25614	1,509
0,16590	0,16682	0,12512	0,16682	0,37535	1,523
0,13940	0,17212	0,12909	0,34424	0,21515	1,539
0,14080	0,21480	0,08592	0,34368	0,21480	1,515
0,17040	0,20740	0,12444	0,12444	0,37332	1,514
0,16130	0,20968	0,12581	0,16774	0,33548	1,549
0,14020	0,21495	0,12897	0,30093	0,21495	1,562
0,13550	0,25935	0,08645	0,34580	0,17290	1,503
0,16600	0,25020	0,12510	0,12510	0,33360	1,531
0,15680	0,25296	0,12648	0,16864	0,29512	1,560
0,14870	0,25539	0,12770	0,21283	0,25539	1,573
0,14180	0,25746	0,12873	0,25746	0,21455	1,570
0,13490	0,25953	0,12977	0,30279	0,17302	1,551
0,17100	0,29015	0,08290	0,29015	0,16580	1,524
0,16170	0,29341	0,12575	0,12575	0,29341	1,536
0,15250	0,29663	0,12713	0,16950	0,25425	1,559
0,14450	0,29943	0,12833	0,21388	0,21388	1,564
0,13730	0,30195	0,12941	0,25881	0,17254	1,552

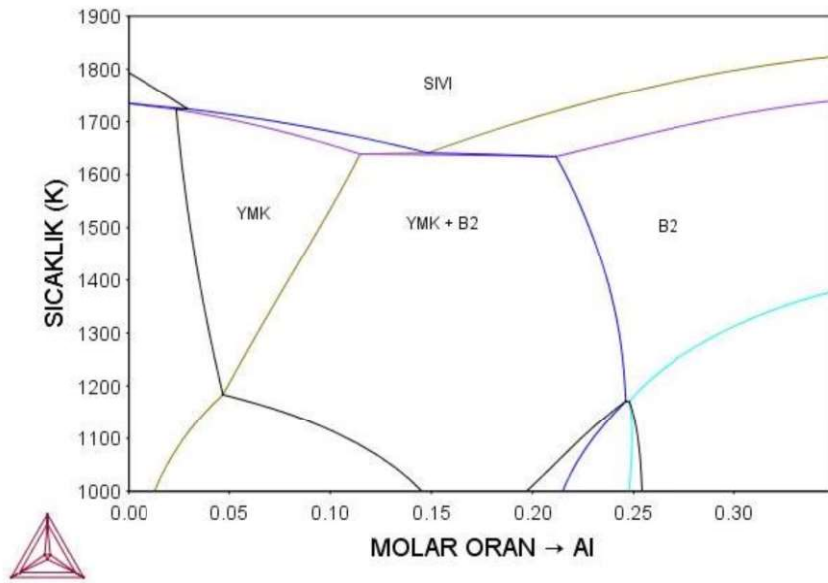


0,12930	0,30475	0,13061	0,30475	0,13061	1,520
0,12770	0,30531	0,17446	0,26169	0,13085	1,547
0,15810	0,33676	0,12629	0,12629	0,25257	1,528
0,14835	0,34064	0,12774	0,17032	0,21290	1,543
0,14547	0,34181	0,12818	0,21363	0,17091	1,542
0,13440	0,34624	0,12984	0,25968	0,12984	1,517
0,15240	0,38142	0,12714	0,12714	0,21190	1,508
0,14340	0,38547	0,12849	0,17132	0,17132	1,514
0,14500	0,38475	0,17100	0,12825	0,17100	1,515

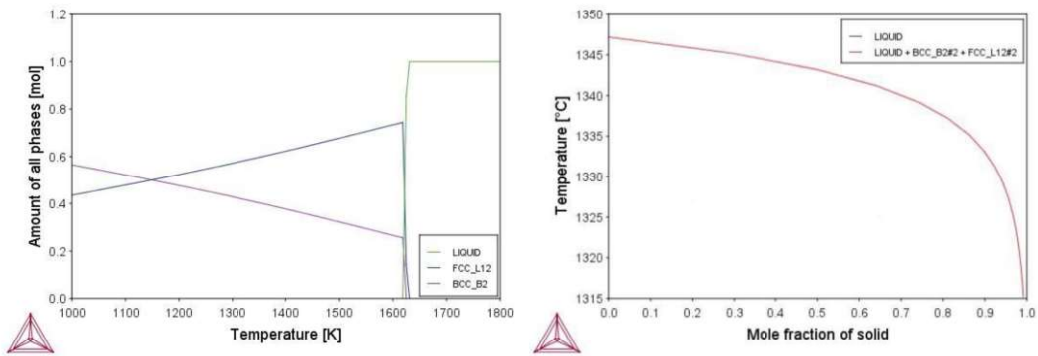
Belirlenen 27 adet ötektik bileşim içerisinde yüksek Co'lu ve yüksek Ni'li olmak üzere iki adet bileşim seçilmiştir. Seçilen iki alaşımın bulunduğu denge diyagramları ve ötektik bileşimlere ait denge durumu ve denge dışı katılma simülasyonları sonuçları Şekil 5.30-33'te verilmiştir.



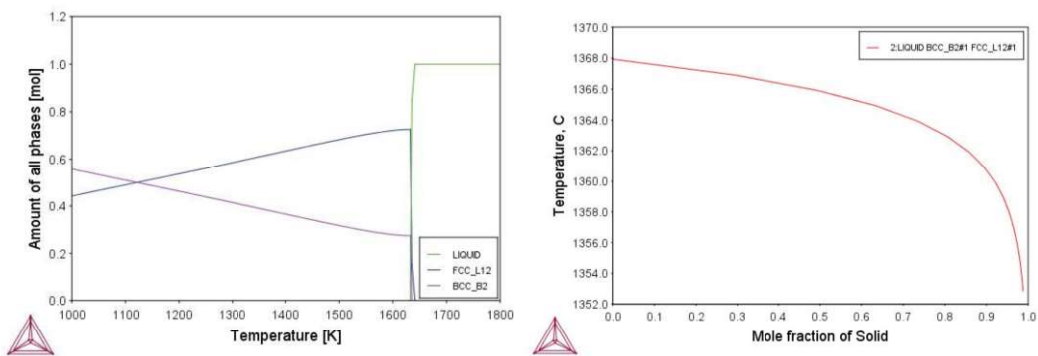
Şekil 5.30.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{100-x}Al_x$  sistemine ait denge diyagramı.



Şekil 5.31.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemine ait denge diyagramı.



Şekil 5.32.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83,87}\text{Al}_{16,13}$  bileşimine ait denge durumu ve denge dışı katılma diyagramları.



Şekil 5.33.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{85,16}\text{Al}_{14,84}$  bileşimine ait denge durumu ve denge dışı katılma diyagramları.

## 5.2. Ötektik Alaşımların Üretilmesi ve Yapısal Karakterizasyonu

Belirlenen ötektik alaşımların üretim ve yapısal karakterizasyon çalışmaları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

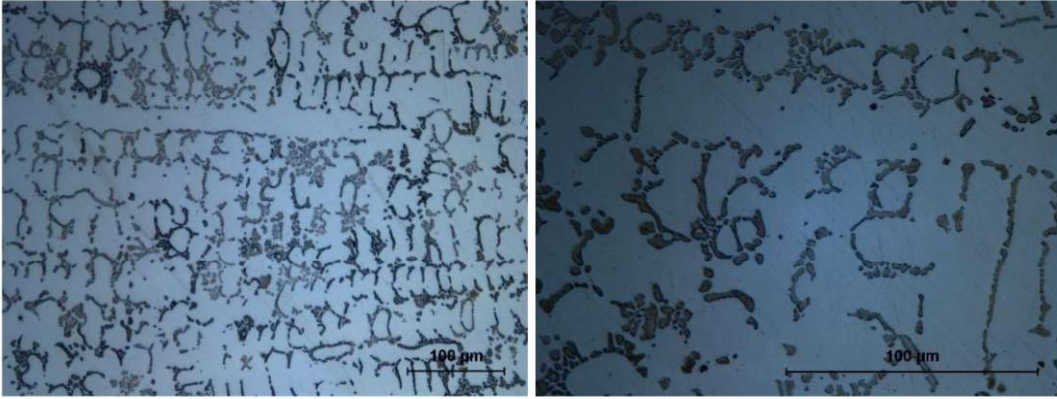
### 5.2.1. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$ ötektik alaşımının üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu

ThermoCalc programı kullanılarak yapılan hesaplamalarla elde edilen sonuçlar, sistemde bulunan elementlerin 2'li ve 3'lü faz diyagramlarına ait verilerin ekstrapolasyonu sonucu elde edilmektedir ve çok bileşenli sistemler için oluşturulan denge diyagramlarından elde edilen verilerin yüzde yüz doğru olması beklenmemelidir. Bu nedenle üretilecek olan ötektik bileşimin gerçek konumunu bulabilmek adına ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü bileşimde üç alaşımın üretilmesine karar verilmiştir. Bu alaşımlara ait bileşimler molar oran olarak Çizelge 5.4'te verilmiştir.

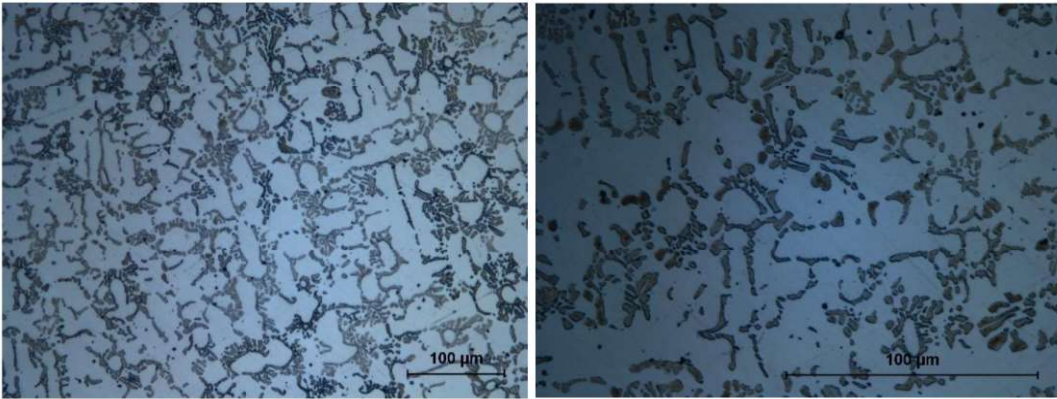
Çizelge 5.4.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$  sistemine ait ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü alaşımların bileşimleri.

	Al	Co	Cr	Fe	Mo	Ni
	(%at.)					
<b>Ötektik altı</b>	16,000	33,600	8,4000	4,2000	4,2000	33,600
<b>Ötektik</b>	17,570	32,972	8,2430	4,1215	4,1215	32,972
<b>Ötektik üstü</b>	18,000	32,800	8,2000	4,1000	4,1000	32,800

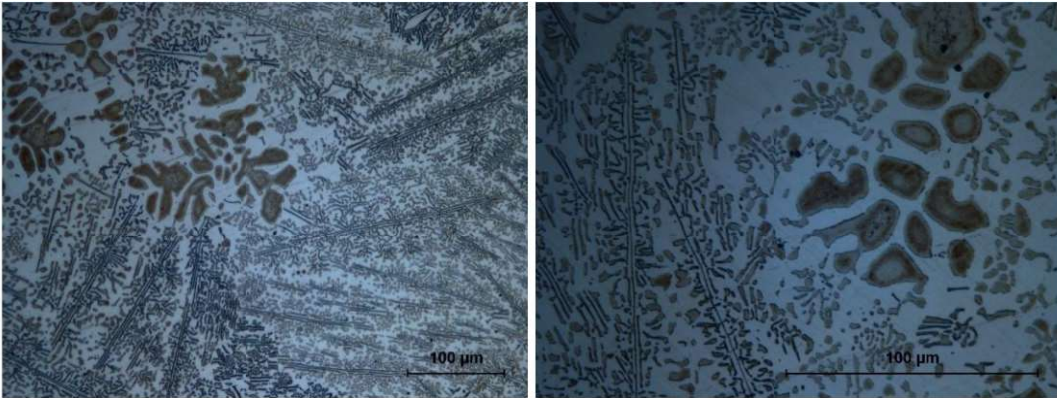
Şekil 5.34-36'da üretilen alaşımlara ait 200X ve 500X büyütmelelerdeki optik mikroyapı görüntüleri, Şekil 5.37-39'da ise geri saçılımlı elektron dedektörü (BSE) kullanılarak alınan 2000X ve 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.34.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{84}\text{Al}_{16}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.

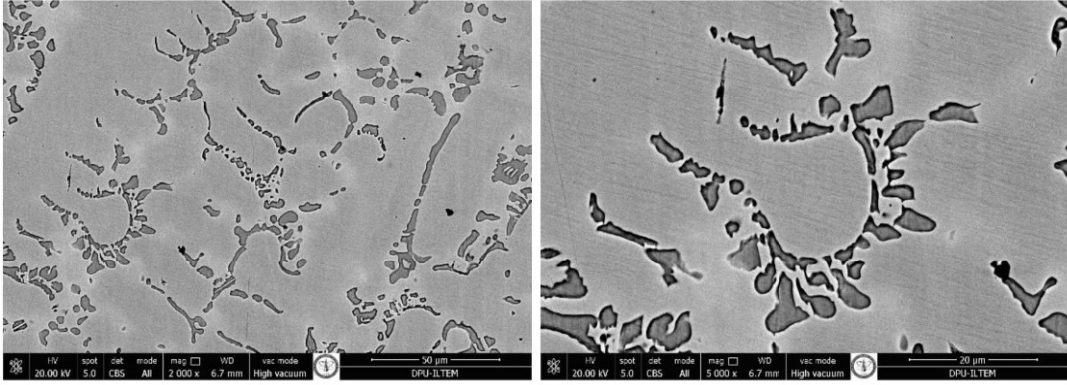


Şekil 5.35.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,43}\text{Al}_{17,57}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.

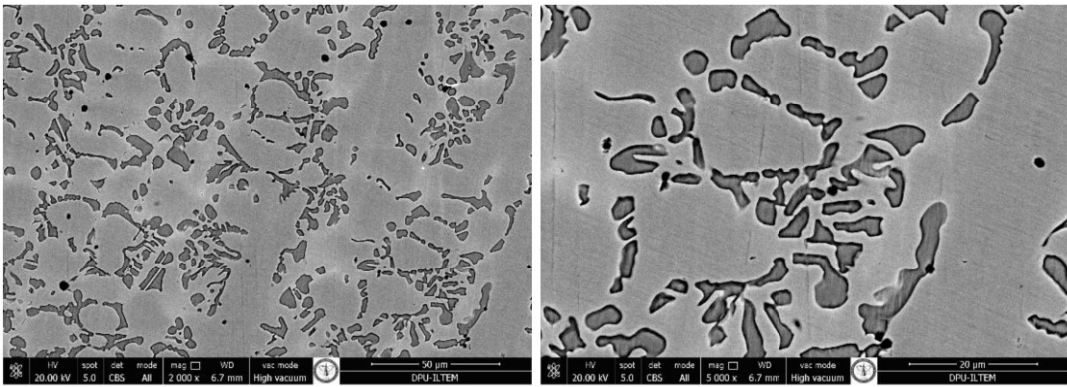


Şekil 5.36.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82}\text{Al}_{18}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.

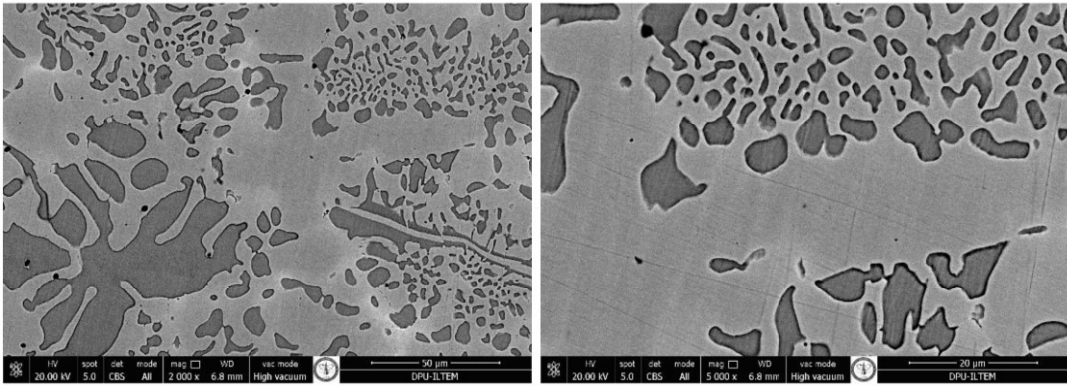




Şekil 5.37.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{84}\text{Al}_{16}$  alaşımına ait SEM görüntüleri.



Şekil 5.38.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,43}\text{Al}_{17,57}$  alaşımına ait SEM görüntüleri.



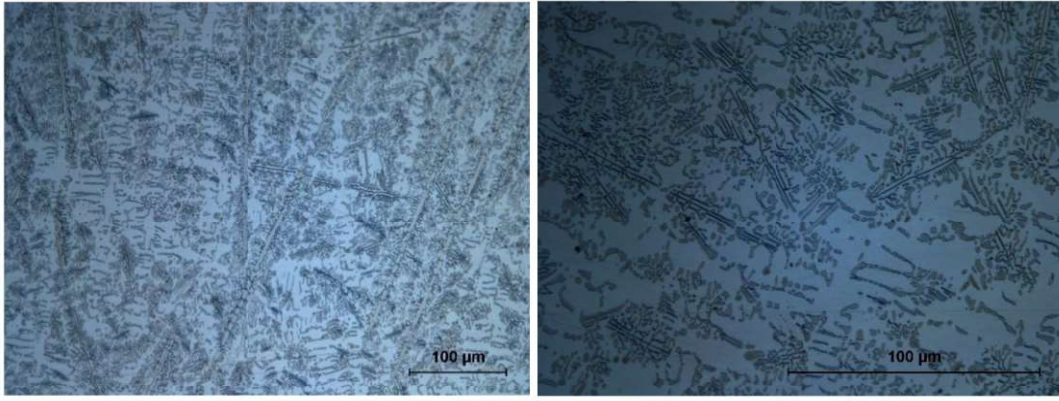
Şekil 5.39.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82}\text{Al}_{18}$  alaşımına ait SEM görüntüleri.

Şekil 5.34 ve 5.37’de verilen, ötektik altı olarak seçilmiş molce %16 Al içeren alaşımın mikroyapısından çok düşük oranda ötektik yapı içerdiği görülmektedir ve kullanılan dağılayıcının sadece yapıdaki B2 fazını dağıladığı dikkate alınarak bu alaşımın ötektik altı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.35 ve 5.38’de verilen görüntülerden ötektik alaşım olan molce %17,57 Al içeren alaşımın, %16 Al içeren alaşıma göre daha fazla ötektik yapı içerdiği ancak bu alaşımın da ötektik altı bir alaşım olduğu görülmektedir. Şekil 5.36

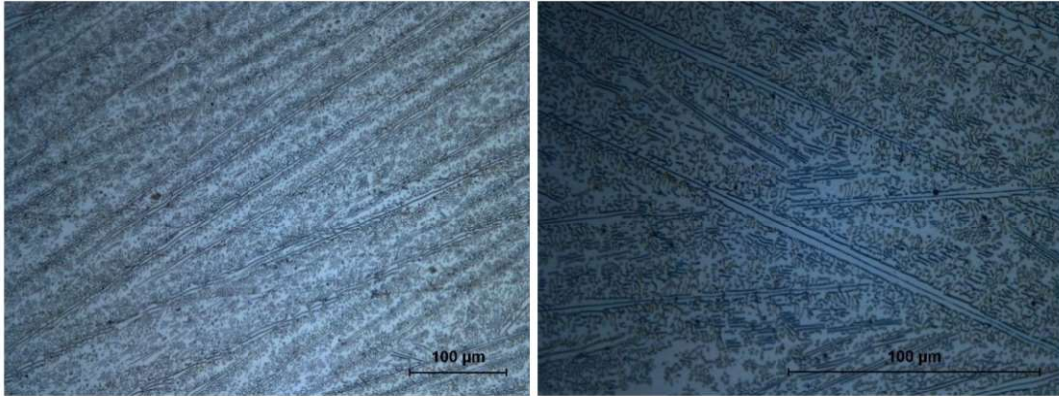
ve 5.39’da verilen görüntüden ötektik üstü olarak seçilen alaşımın ötektik bileşime en yakın alaşım olduğu ve ötektik öncesi B2 fazı barındırdığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen mikroyapı analizleri neticesinde  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{100-x}Al_x$  sistemindeki ötektik bileşimin molce %17,57 ve %18 Al içeriği arasında olduğu sonucuna varılmıştır.

Gerçek ötektik bileşimi tespit edebilmek için molce %17,75, %17,8 ve %17,85 Al içeren üç alaşım daha hazırlanmış ve mikroyapıları incelenmiştir. Bu alaşımlara ait optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.40-42’de, SEM görüntüleri Şekil 5.43-45’de verilmiştir.

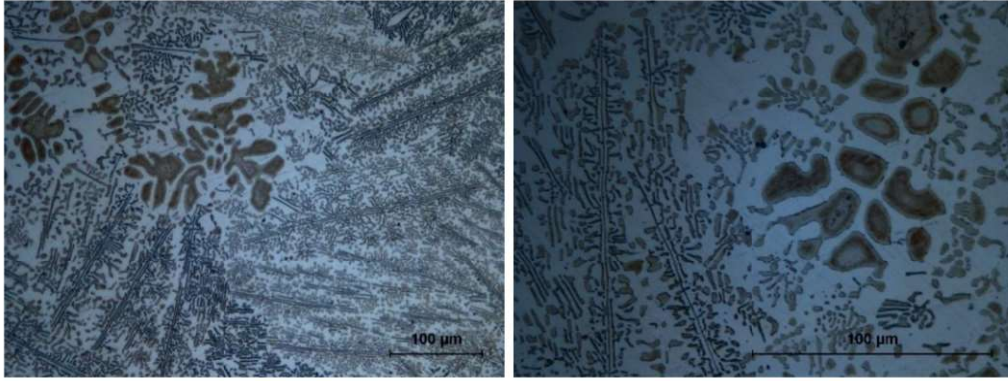


Şekil 5.40.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,25}Al_{17,75}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.

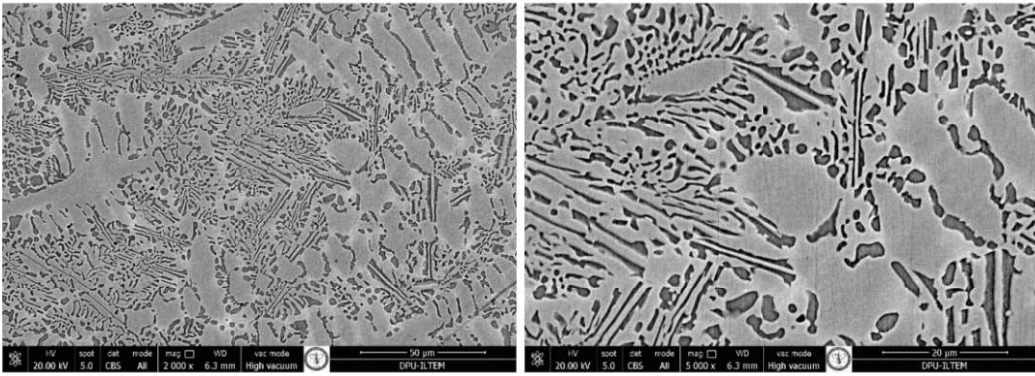


Şekil 5.41.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.

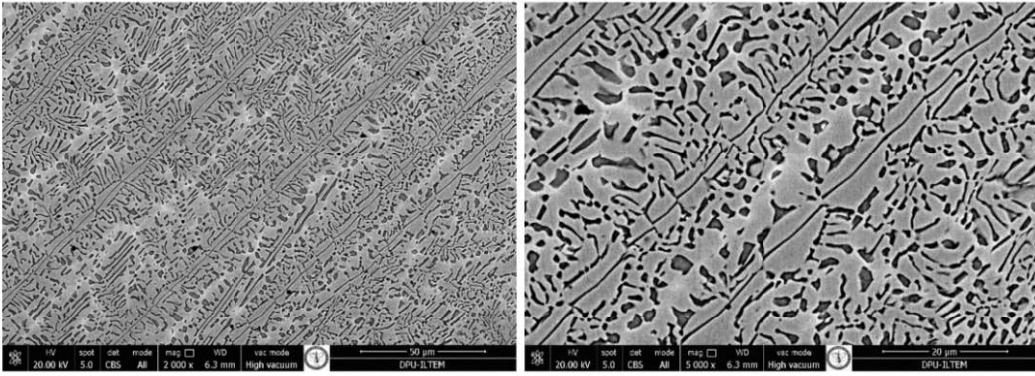




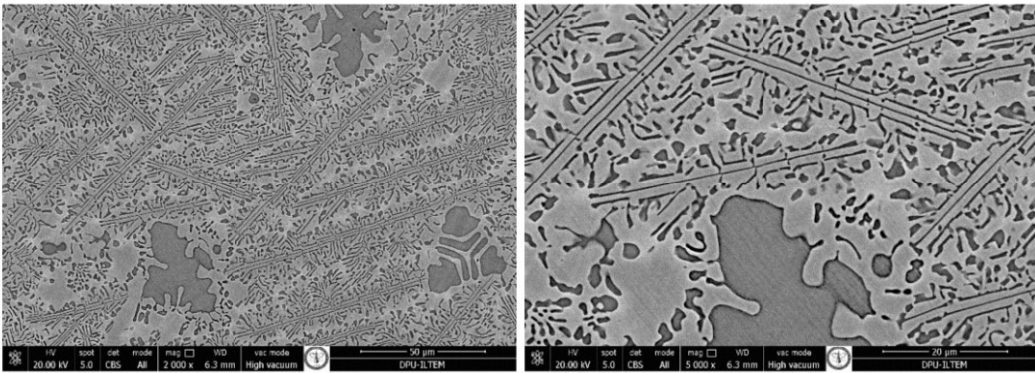
Şekil 5.42.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,15}\text{Al}_{17,85}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri.



Şekil 5.43.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,25}\text{Al}_{17,75}$  alaşımına ait SEM görüntüleri.



Şekil 5.44.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait SEM görüntüleri.

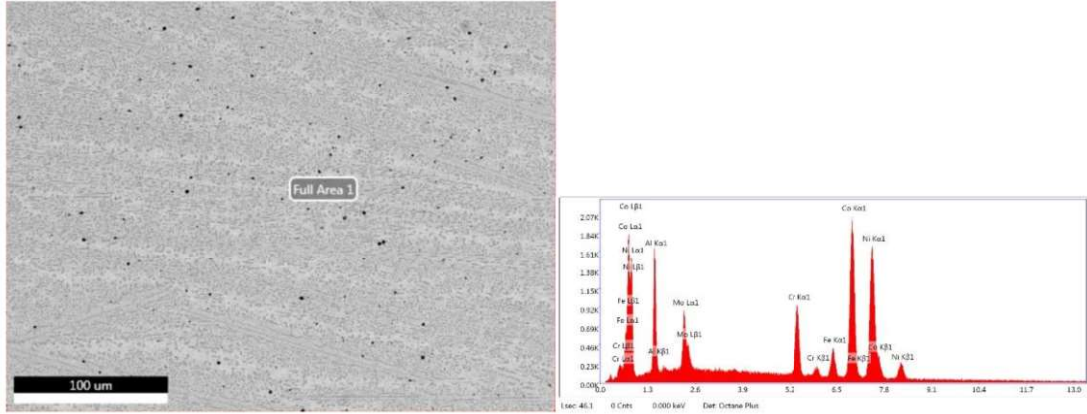


Şekil 5.45.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,15}\text{Al}_{17,85}$  alaşımına ait SEM görüntüleri.

Üretilen yeni alaşımlara ait mikroyapı görüntülerinden, molce %17,75 Al içeren alaşımın az miktarda ötektik öncesi YMK fazı, molce %17,85 Al içeren alaşımın az miktarda ötektik öncesi B2 fazı içerdiği ve molce %17,8 Al içeren alaşımın %100 ötektik yapı sergilediği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde,  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,43}\text{Al}_{17,57}$  sistemine ait ötektik bileşim %0,23'lük bir yanılma payıyla tespit edilmiş olup, gerçekleştirilen tasarım çalışmalarının büyük oranda başarılı ve güvenilir olduğu görülmüştür.

Üretilen ötektik  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımındaki, YMK ve B2 fazlarına ait geniş alan EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.46-47 ve Çizelge 5.5-6'da verilmiştir.

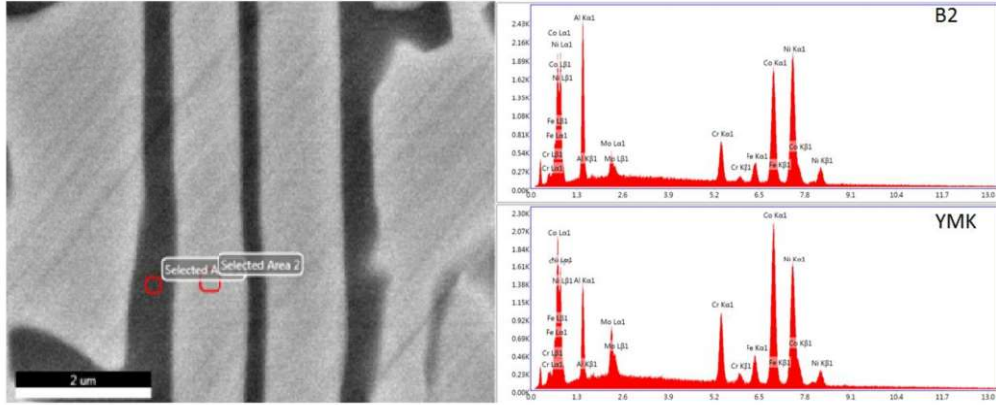


Şekil 5.46.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında analiz alınan bölge SEM görüntüsü ve EDS analiz spektrumu.

Çizelge 5.5.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait EDS analizi sonuçları.

	Al	Co	Cr	Fe	Mo	Ni
<b>Nominal</b>	17,8	32,88	8,22	4,11	4,11	32,88
<b>EDS</b>	16,98	33,37	9,14	4,67	3,18	32,65



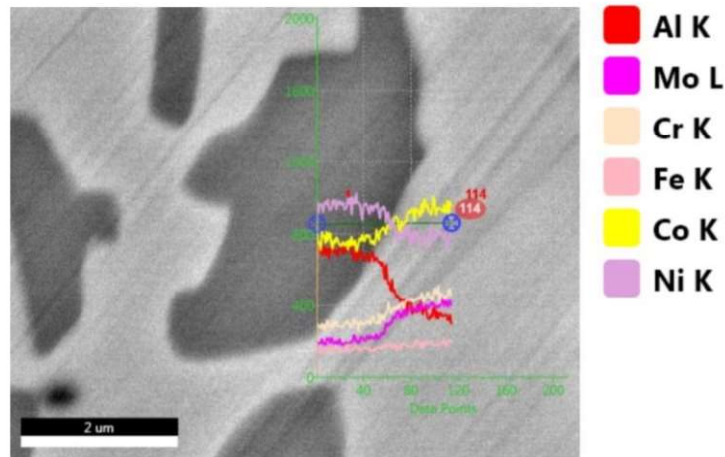


Şekil 5.47.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında analiz alınan B2 ve YMK fazları SEM görüntüsü ve bu fazlara ait EDS analiz spektrumu.

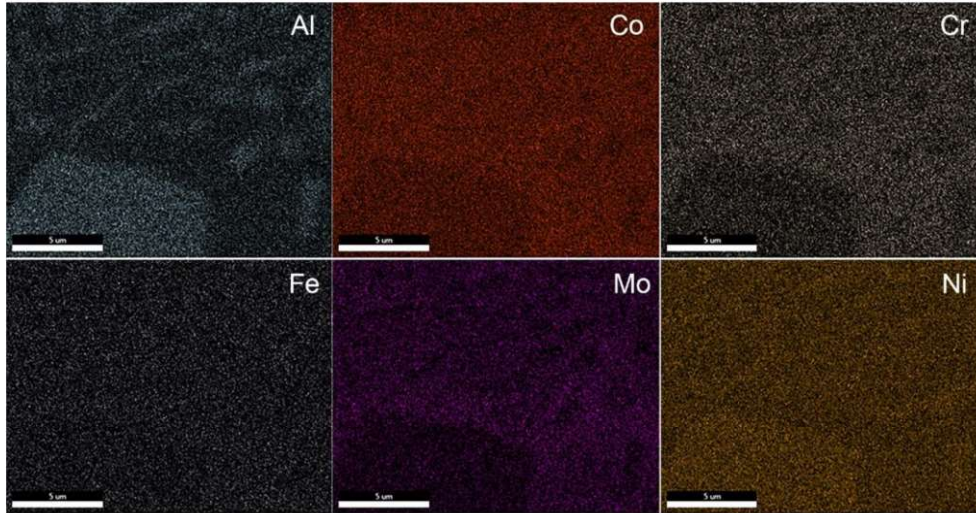
Çizelge 5.6.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımı yapısında bulunan B2 ve YMK fazlarına ait EDS analizi sonuçları.

		Al	Co	Cr	Fe	Mo	Ni
<b>B2</b>	<b>Scheil</b>	30,09	24,38	4,67	4,29	0,92	35,65
	<b>EDS</b>	24,87	27,4	6,01	3,85	1,43	36,45
<b>YMK</b>	<b>Scheil</b>	13,77	32,88	10,11	4,77	7,54	30,92
	<b>EDS</b>	14,35	35,93	9,64	5,01	2,9	32,17

Üretilen ötektik  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait çizgi EDS taraması ve EDS alan haritalandırması sırasıyla Şekil 5.48 ve 5.49’da verilmiştir.



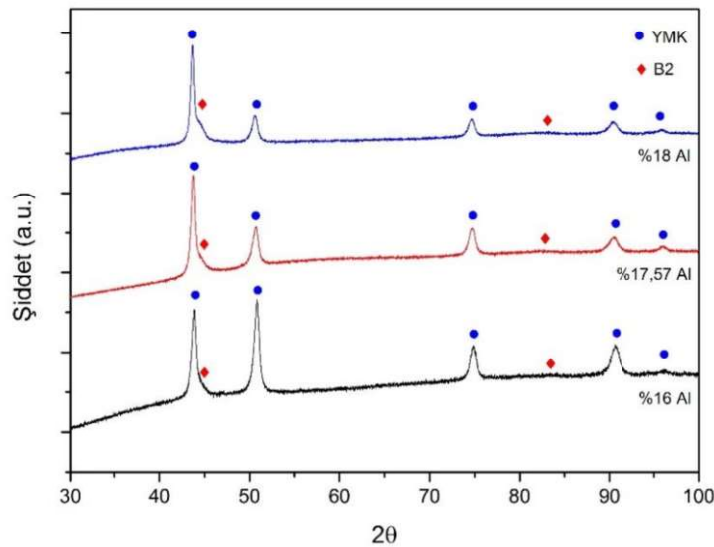
Şekil 5.48.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait EDS çizgi analizi.



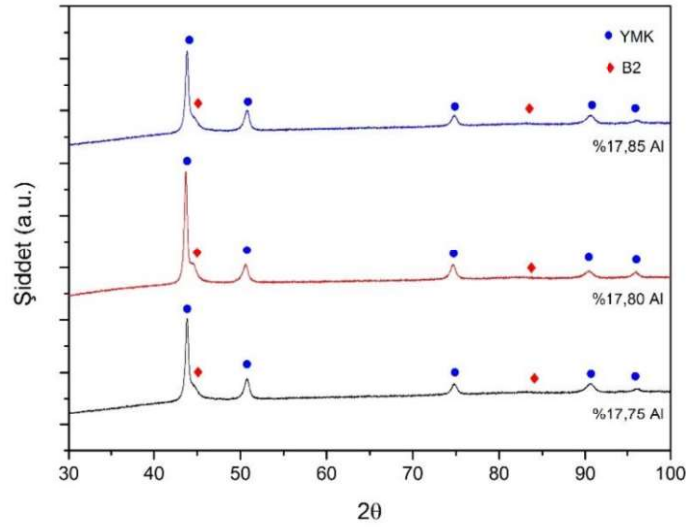
Şekil 5.49.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait elemental haritalama sonuçları.

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında gerçekleştirilen EDS analizlerinde alaşımın nominal bileşime yakın olarak üretildiği ve Scheil simülasyonu sonuçlarına yakın faz kompozisyonlarının elde edildiği, ayrıca Al ve Ni elementlerinin B2 fazında, Co, Cr ve Mo elementlerinin YMK fazında yoğunlaştıkları görülmektedir.

Şekil 5.50’de denge diyagramından ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü olarak belirlenen molce %16, %17,57 ve %18 Al içeren alaşımlara ait XRD diyagramları, Şekil 5.51’de molce %17,75, %17,8 ve %17,85 Al içeren alaşımlara ait XRD diyagramları verilmiştir. XRD diyagramlarından görüleceği üzere alaşımlar sadece YMK ve B2 fazından oluşmakta ve  $\sigma$  fazı içermemektedir.



Şekil 5.50. Molce %16, %17,57 ve %18 Al içeren alaşımlara ait XRD diyagramları.

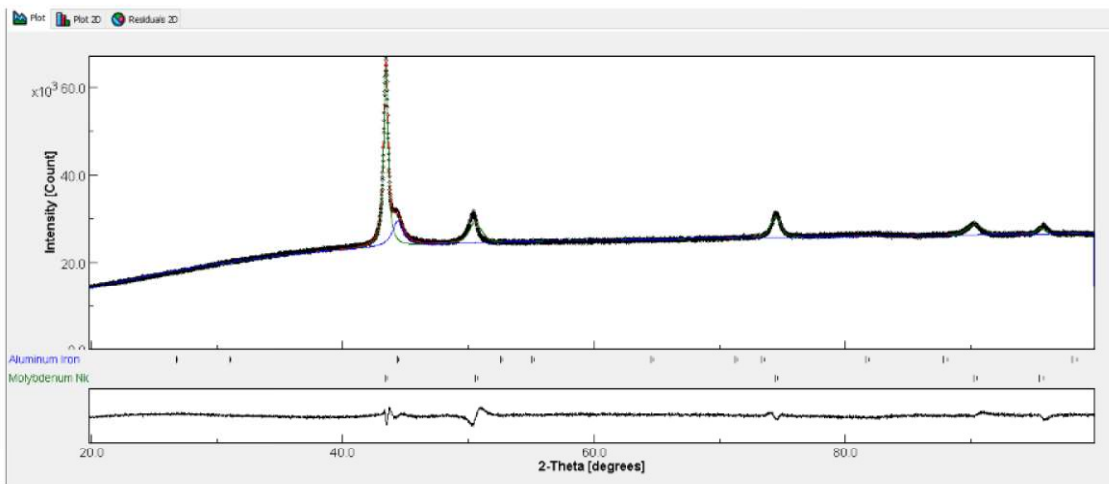


Şekil 5.51. Molce %17,75, %17,8 ve %17,85 Al içeren alaşımlara ait XRD diyagramları.

Rietveld analizleri neticesinde elde edilen fazların hacimsel oranları ve latis parametresi Çizelge 5.7’de verilmiştir. Yapılan analizleri yansıtan örnek ekran görüntüsü Şekil 5.52’de verilmiştir.

Çizelge 5.7.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait Rietveld Analizi sonuçları.

YMK (ICDD PDF No: 04-018-1300)		B2 (ICDD PDF No: 04-004-6642)	
Hacimsel oran %	Latis parametresi (Å)	Hacimsel oran %	Latis parametresi (Å)
73,4	a=3,6065	26,6	a=5,7709

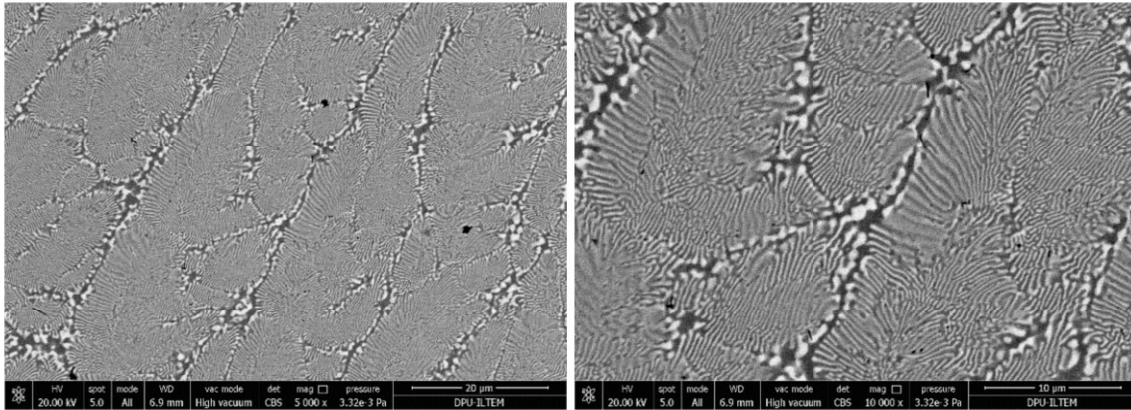


Şekil 5.52. Rietveld Analizini yansıtan örnek ekran görüntüsü.

Üretilen alaşımların içerdikleri fazlara ve bu fazların kompozisyonlarına dair yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar, benzer elementler kullanan çalışmalar ile karşılaştırıldığında elde edilen fazların ve bu fazlara ait kompozisyonların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir (Hsu vd., 2010; Hsu vd., 2011; Miracle, 2016).

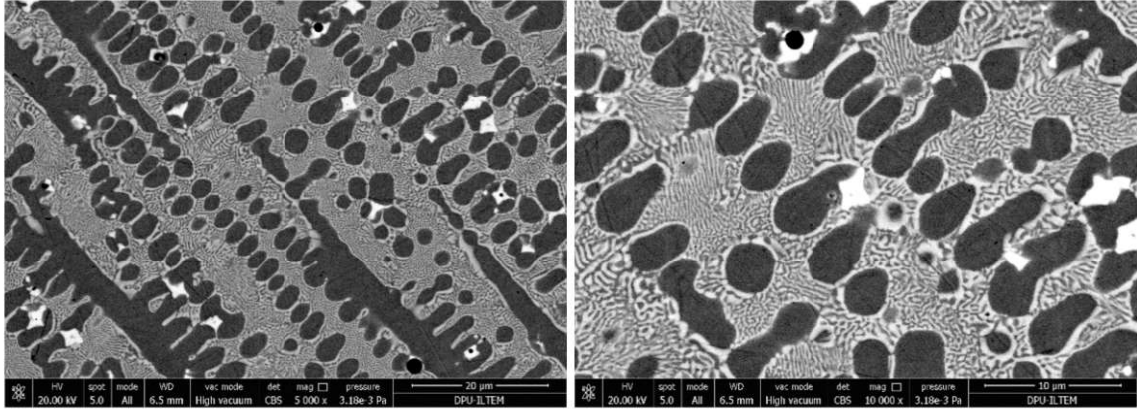
### 5.2.2. $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{100-x}\text{Al}_x$ , $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{30})_{100-x}\text{Al}_x$ ve $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$ ötektik alaşımlarının üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu

ThermoCalc hesaplamaları ile belirlenen kompozisyonlarda üretilen Nb içeren alaşımlara ait SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 5.53-55'te verilmiştir. Gerçekleştirilen ilk dökümlerde bütün alaşımların ötektik altı yapı sergilediği görülmüştür. Yüzde yüz ötektik kompozisyonu belirlemek için gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{30})_{100-x}\text{Al}_x$  ve  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  alaşımlarında yüzde yüz ötektik yapı elde edilememiştir.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımında ise yüzde yüz ötektik yapı elde edilebilmiştir.

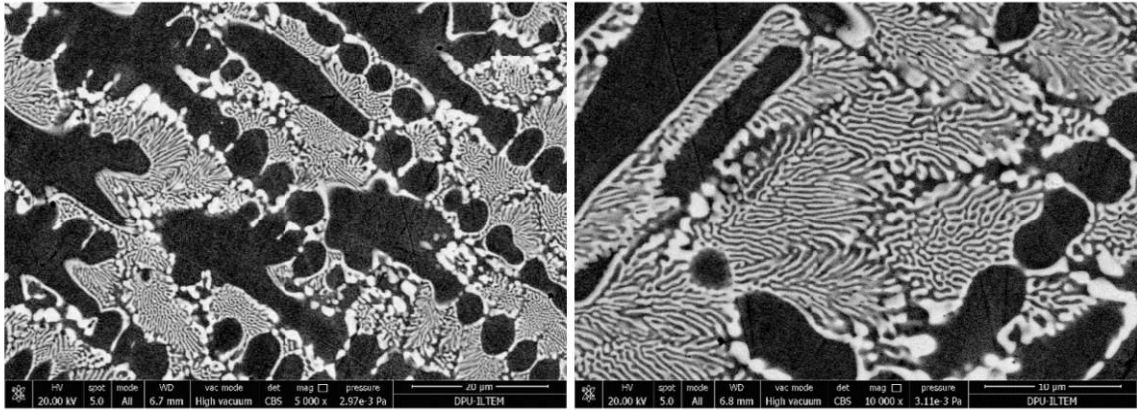


Şekil 5.53.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-5000x, b-10000x).



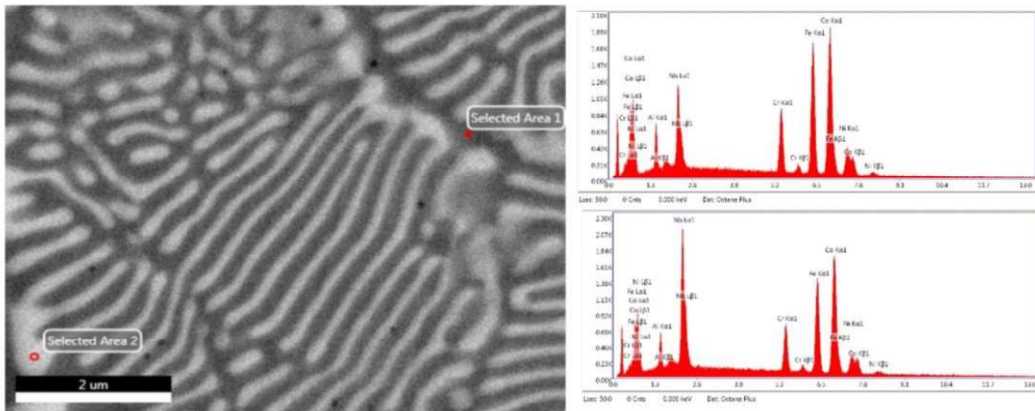


Şekil 5.54.  $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{30})_{96,7}\text{Al}_{3,7}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-5000x, b-10000x).



Şekil 5.55.  $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{93,6}\text{Al}_{6,4}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-5000x, b-10000x).

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımında YMK ve Lave fazları SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları sırasıyla Şekil 5.56 ve Çizelge 5.8'de verilmiştir.

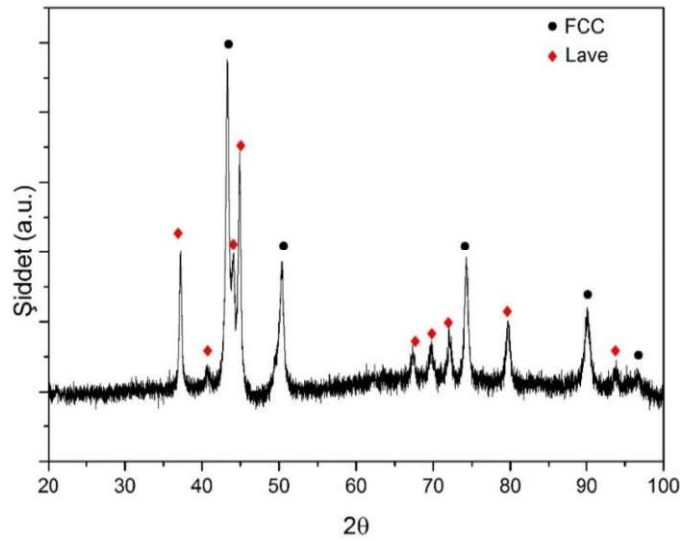


Şekil 5.56.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımında analiz alınan Lave ve YMK fazları SEM görüntüsü ve bu fazlara ait EDS analiz spektrumu.

Çizelge 5.8.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımında bulunan Lave ve YMK fazlarına ait EDS analizi sonuçları.

	Al	Co	Cr	Fe	Nb	Ni
<b>Lave</b>	6,81	38,25	9,69	25,92	12,29	7,04
<b>YMK</b>	7,44	39,37	9,64	28,82	6,13	8,39

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımına ait XRD analizi sonuçları Şekil 5.57’de verilmiştir. Analiz sonuçlarından alaşımın sadece YMK ve Lave fazlarından oluştuğu görülmektedir.



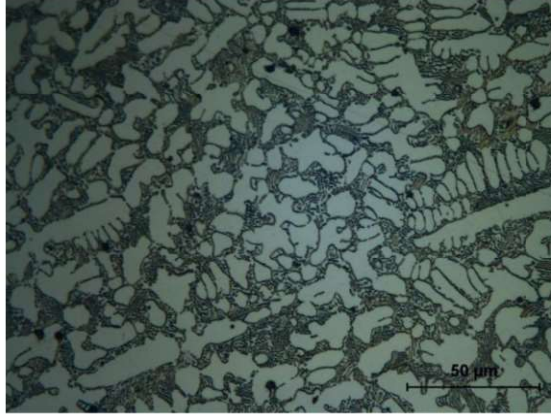
Şekil 5.57.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımına ait XRD diyagramı.

Elde edilen sonuçlar, Nb içeren Co-Cr-Fe-Ni ve Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemlerinde ötektik alaşımlar üzerine gerçekleştirilen çalışmalar ile paralellik göstermektedir (Feng vd., 2015; Ma vd., 2012).  $\text{CoCrFeNiNb}_{0,65}$  ötektik alaşımındaki YMK-Lave ötektik yapısı ile  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımında elde edilen YMK-Lave fazı ötektik yapısı, lameller arası mesafenin ve ötektik morfolojisinin büyük oranda benzer olduğu tespit edilmiştir.

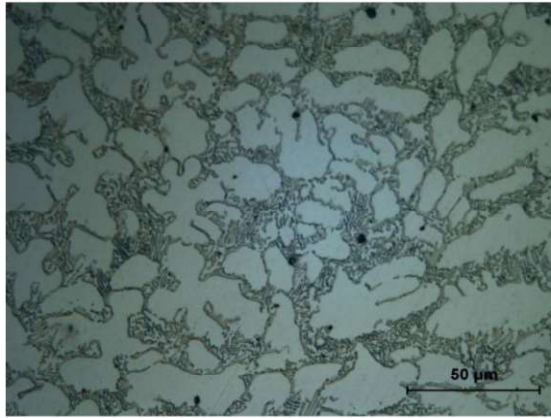
### 5.2.3. $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$ ve $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{100-x}\text{Al}_x$ ötektik alaşımlarının üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu

Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde bulunan ötektik bileşimler arasından yüksek Co’lu ve yüksek Ni’li olarak seçilen iki bileşim ThermoCalc programıyla belirlenen bileşimlerde

üretelmiştir. Şekil 5.58-59'te optik mikroyapı görüntüleri verilen alaşımların, ötektik yapı içermekle birlikte ötektik altı kompozisyonda olduğu görülmüştür.



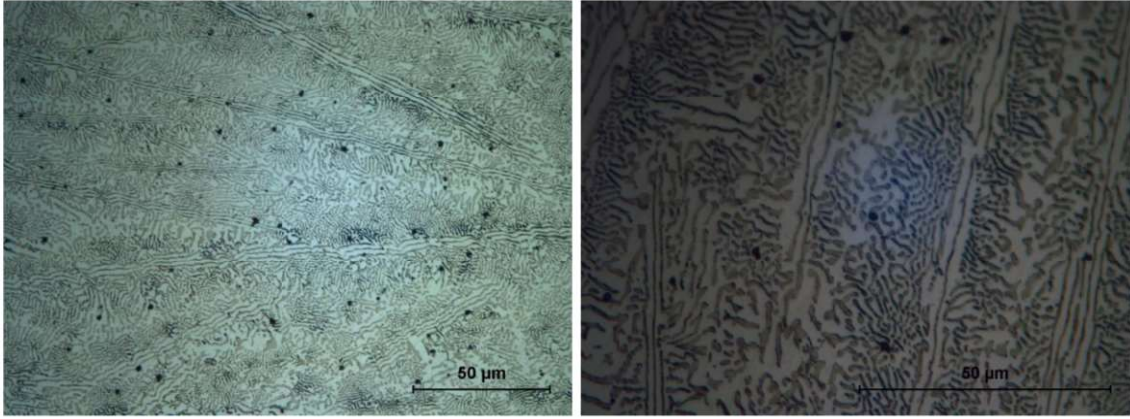
Şekil 5.58.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83,87}Al_{16,13}$  bileşimine ait alaşımların 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.



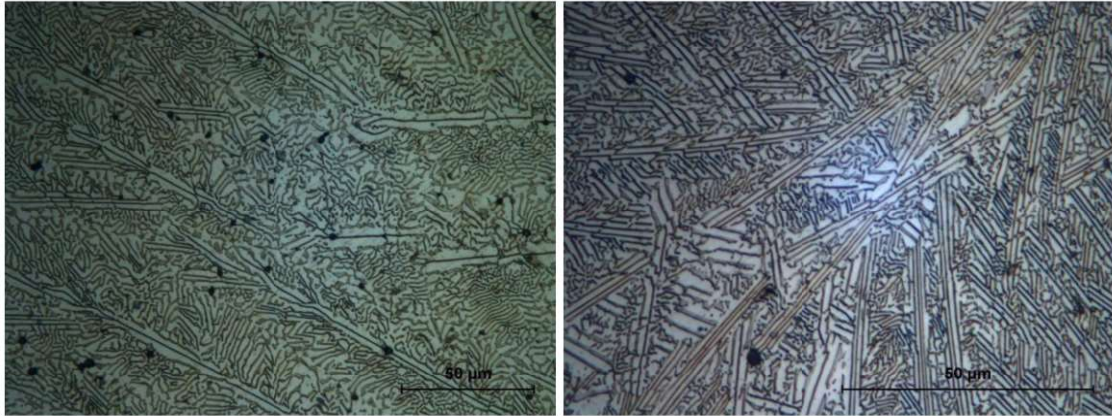
Şekil 5.59.  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{85,16}Al_{14,84}$  bileşimine ait alaşımların 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.

Alaşımların kompozisyonlarında Al miktarını artırarak gerçekleştirilen sonraki dökümlerde yüzde yüz ötektik kompozisyonlar tespit edilmiştir. Şekil 5.60-61'de üretilen ötektik alaşımların optik mikroyapı görüntüleri verilmiştir.





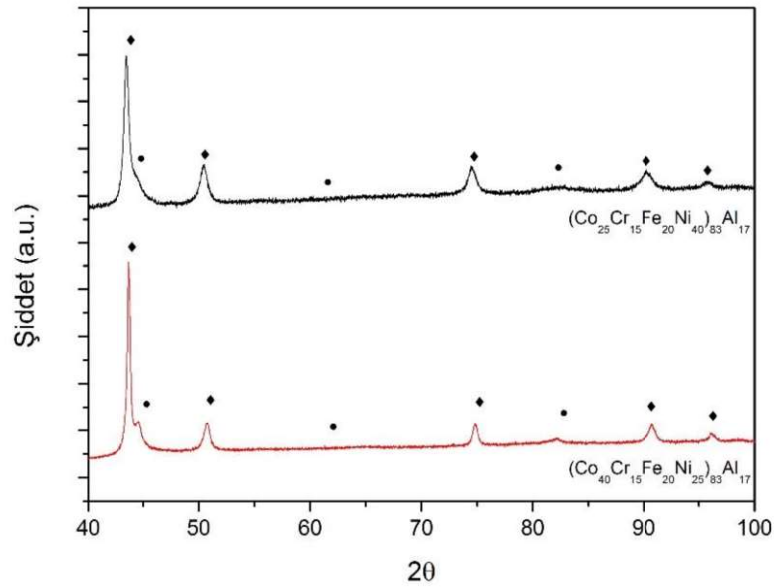
Şekil 5.60.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  bileşimine ait alaşımın 200x ve 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.61.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{83}\text{Al}_{17}$  bileşimine ait alaşımın 200x ve 500x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.

$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  ve  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımlarına ait XRD analiz sonuçları Şekil 5.62'de verilmiştir. XRD diyagramlarından görüleceği üzere alaşımlar sadece YMK ve B2 fazlarını içermektedir.





Şekil 5.62.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  ve  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımlarına ait XRD diyagramları.

### 5.3. Ötektik Alaşımların Mekanik Karakterizasyonu

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$ ,  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{100-x}\text{Al}_x$ ,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$  ve  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{25})_{100-x}\text{Al}_x$  sistemlerinde üretilen alaşımların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen mekanik karakterizasyon çalışmalarına ait sonuçlar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

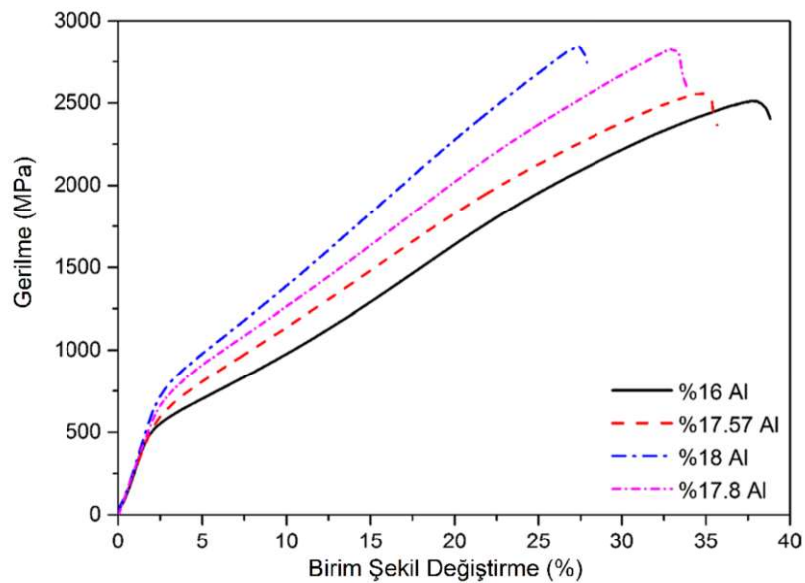
#### 5.3.1. $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$ ötektik alaşımının mekanik karakterizasyonu

Modelleme çalışmaları sonucu belirlenen, ötektik öncesi (%16 Al), ötektik (%17,57 Al) ve ötektik üstü (%18 Al) alaşımlar ile mikroyapı analizleri sonrası üretilen %100 ötektik (%17,8 Al) alaşıma ait basma deneyi ve mikrosertlik ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.63 ve Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Basma deneyi sonuçlarına göre, en yüksek akma dayanımı %100 ötektik  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında, en yüksek basma mukavemeti ve birim şekil değiştirme ise ötektik üstü  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82}\text{Al}_{18}$  alaşımında gözlemlenmiştir.

Mikrosertlik ölçümlerine göre en düşük sertlik değeri 277,8 HV olarak %16 Al içeren ötektik altı  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{84}\text{Al}_{16}$  alaşımında elde edilirken en yüksek sertlik değeri

ise 372 HV olarak %100 ötektik  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında elde edilmiştir. Ötektik altı alaşımların sertlikleri, daha fazla sünek YMK fazı içerdikleri için düşükken, diğer alaşımlara göre daha fazla sert B2 fazı içeren ötektik üstü  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82}\text{Al}_{18}$  alaşımının sertliği ötektik ve ötektiğe yakın alaşımlardan düşük çıkmıştır. Bu durumun ötektik alaşımın çok daha dar bir katılaşma aralığına bağlı olarak oluşan daha ince taneli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.63. Üretilen alaşımlara ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.9. Üretilen alaşımlara ait basma deneyi sonuçları.

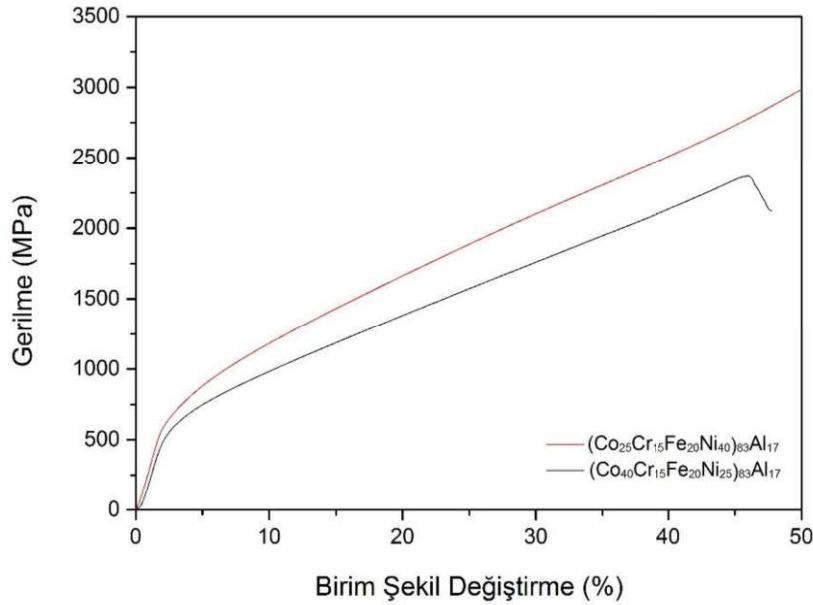
Alaşım	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e	HV <sub>200</sub>
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{84}\text{Al}_{16}$	499	2514	38,8	277,8
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,43}\text{Al}_{17,57}$	575	2255	35,4	310,9
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82}\text{Al}_{18}$	729	2844	27,7	332,1
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$	668	2813	33,5	372,0

Basma deneyleri sonrası elde edilen veriler incelendiğinde ötektik yapı içerisindeki sert fazın artması ile mukavemet değerleri artarken, süneklik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar, ötektik ve ötektiğe yakın alaşımların mekanik karakterizasyonunu içeren çalışmalar ile benzerlik göstermektedir (Jin vd., 2018; Lu vd., 2016; Feng vd., 2015).

### 5.3.2. $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ ve $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$ ötektik alaşımının mekanik karakterizasyonu

Yüzde yüz ötektik kompozisyonda üretilmiş olan  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ve  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  alaşımları ile gerçekleştirilen basma deneyi ve mikrosertlik ölçümleri sonuçları sırasıyla Şekil 5.64'te ve Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Basma deneyi sonuçlarından, yüksek Ni içerikli olan  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  alaşımının  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  alaşımına göre daha yüksek akma ve basma mukavemeti ve aynı zamanda daha yüksek şekil değiştirme yeteneği gösterdiği tespit edilmiştir. Yaklaşık olarak aynı sertlik değerlerine sahip olan iki alaşım arasındaki bu farkın mikroyapı incelemelerine göre  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  alaşımının daha ince taneli ve daha küresel B2 tanelerine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.64.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ve  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  alaşımlarına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

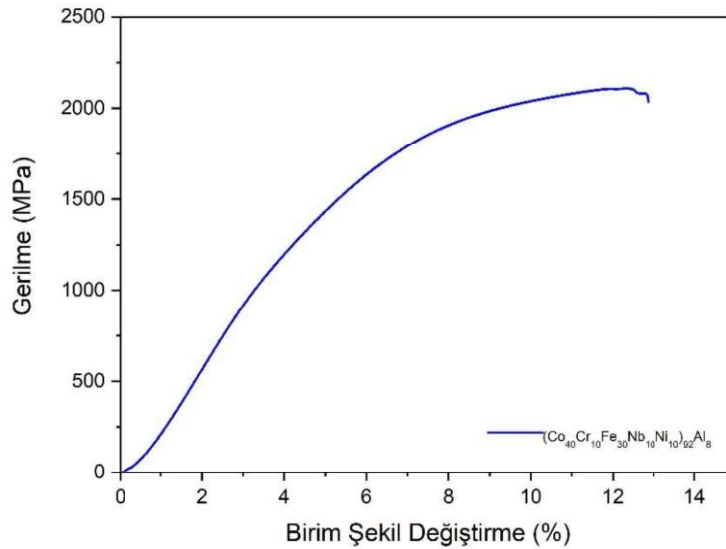
Çizelge 5.10.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ve  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  alaşımlarına ait basma deneyi ve mikrosertlik sonuçları.

Alaşım	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e	HV <sub>200</sub>
$(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$	606	>3000	>60	305,4
$(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$	554	2827	42,1	310,8

### 5.3.3. $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{100-x}\text{Al}_x$ , $(\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{30})_{100-x}\text{Al}_x$ ve $(\text{Co}_{10}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{40})_{100-x}\text{Al}_x$ ötektik alaşımlarının mekanik karakterizasyonu

Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sisteminde yüzde yüz ötektik yapıda üretilebilen tek alaşım olan  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımına ait basma deneyi ve mikrosertlik ölçümü sonuçları sırasıyla Şekil 5.65 ve Çizelge 5.11’de verilmiştir.

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımının yüksek sertlikte olup yüksek akma mukavemeti sergilediği ancak alaşımın içerdiği yüksek miktardaki Lave fazı nedeniyle sünekliğinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Ma’nın AlCoCrFeNb<sub>0,5</sub>Ni ötektik alaşımında elde ettiği sonuçlar ile benzerlik göstermektedir (Ma vd., 2012). Nb içeren sistemlerde bulunan Lave fazının varlığı sertlik ve mukavemet değerlerini yükseltirken alaşımların sünekliğini büyük ölçüde düşürmektedir.



Şekil 5.65.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.11.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{92}\text{Al}_8$  alaşımına ait basma deneyi ve mikrosertlik sonuçları.

Alaşım	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e	Hv <sub>200</sub>
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{10})_{100-x}\text{Al}_x$	1179	2110	12,9	567,3



#### 5.4. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ ve $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$ Alaşımlarına Uygulanan Mukavemet Artırma Çalışmaları

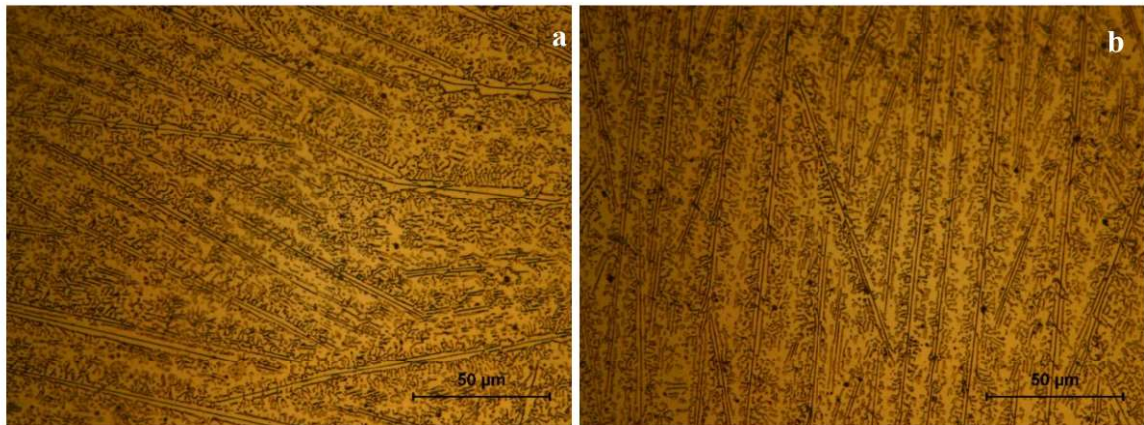
Üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  ve  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ötektik alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla; termomekanik işlem, ısıtma işlemi, mikro/makro alaşımlama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen işlemler ve bu işlemler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda başlıklar halinde sıralanmıştır.

##### 5.4.1. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımında soğuma hızının etkisi

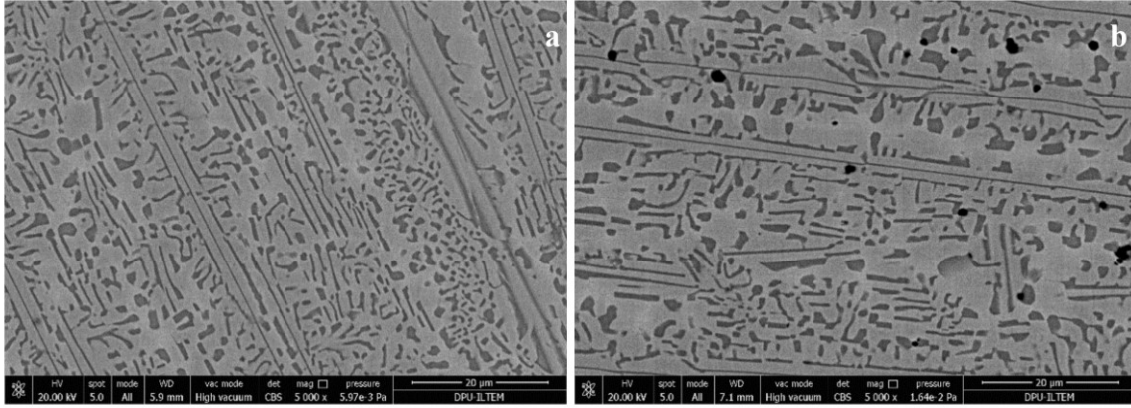
$(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımı, lameller arası mesafenin azaltılması ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla daha hızlı bir soğumanın elde edilebilmesi için 5 mm çapında silindirik numuneler şeklinde üretilmiştir.

Üretilen 5 mm çapındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilen mikroyapı analizlerinde lameller arası mesafelerde az miktarda bir azalma meydana gelmiş olsa da genel olarak mikroyapıda belirgin bir farkın meydana gelmediği görülmüştür.

5 mm çapında üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri ve SEM görüntüleri 8 mm çapta üretilen alaşıma ait sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.66-67’de verilmiştir.

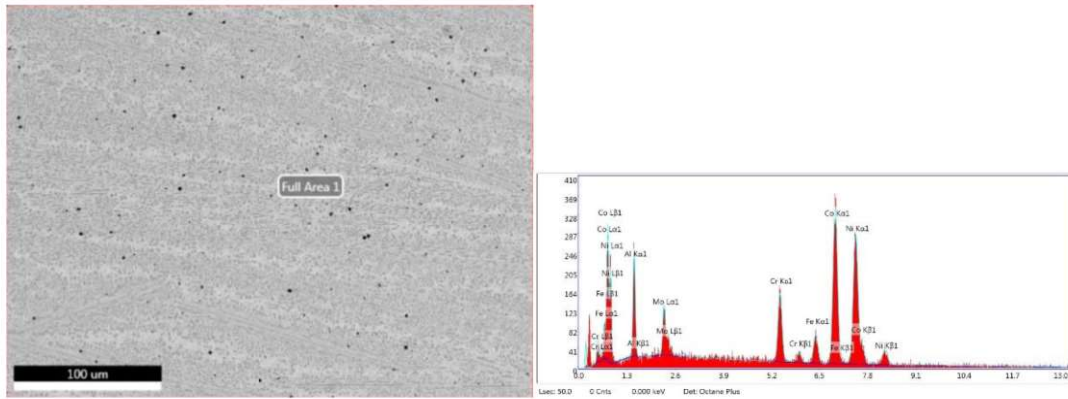


Şekil 5.66.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait 500x büyütmede optik mikroyapı görüntüleri (a-5 mm b-8 mm).



Şekil 5.67.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait 5000x büyütmede SEM mikroyapı görüntüleri (a-5 mm b-8 mm).

Şekil 5.68 ve Çizelge 5.12’de 5 mm çapında üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait geniş alan EDS analiz sonuçları sırasıyla verilmiştir.



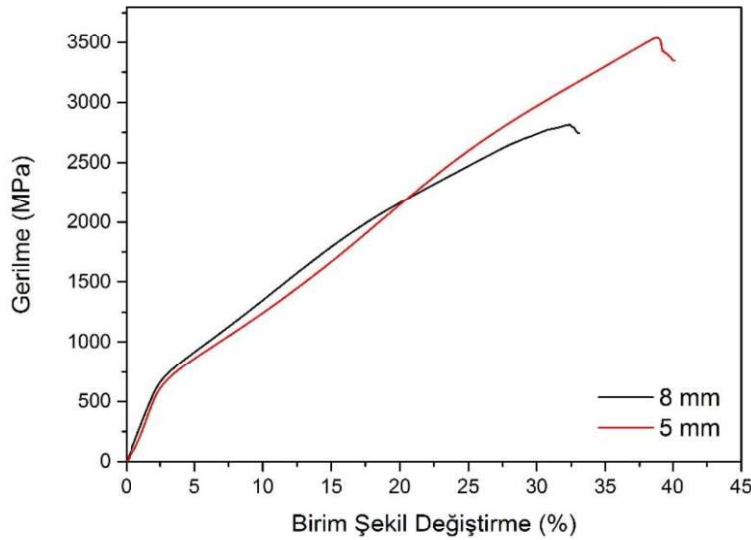
Şekil 5.68. 5 mm çapında üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında analiz alınan bölge SEM görüntüsü ve EDS analiz spektrumu.

Çizelge 5.12. 5 mm çapında üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait EDS analizi sonuçları.

	Al	Co	Cr	Fe	Mo	Ni
<b>Nominal</b>	17,8	32,88	8,22	4,11	4,11	32,88
<b>EDS</b>	16,66	33,79	9,25	5,01	3,04	32,02

5 mm çapında üretilen alaşıma ait basma deneyi ve mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 5.69’da ve Çizelge 5.13’te, 8 mm çapında üretilen alaşıma ait sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Gerçekleştirilen mekanik testler sonucu, 5 mm çapında üretilen alaşımın, akma dayanımında küçük bir düşüş meydana gelirken, sünekliliğinin %33'ten %40'a yükseldiği görülmüştür. Ding vd. katılama hızı üzerine yaptıkları çalışmada, 3 mm ve 5 mm çaplarında numuneler üretmişler ve elde ettikleri alaşımlarda lameller arası mesafeyi yarıyarı azaltmışlardır. Buna bağlı olarak alaşımın sünekliliğini %15'den %20'ye çıkarırken akma mukavemetini de %15 artırmışlardır (Ding vd., 2018). Üretilen alaşımların mikroyapıları göz önüne alındığında döküm işleminin 8 mm'den 5 mm çapına düşürülmesinin lameller arası mesafenin azaltılması için beklenen etkiyi yaratmadığı ortadadır. Buna bağlı olarak da istenilen artış elde edilememiştir.



Şekil 5.69. 5 ve 8 mm çapında üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait Gerilme-Birim şekil değişirme grafiği.

Çizelge 5.13. 5 ve 8 mm çapında üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımına ait basma deneyi ve mikrosertlik sonuçları.

	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e	HV <sub>200</sub>
<b>8 mm</b>	668	2814	33,5	359,6
<b>5 mm</b>	627	3539	40,1	356,7

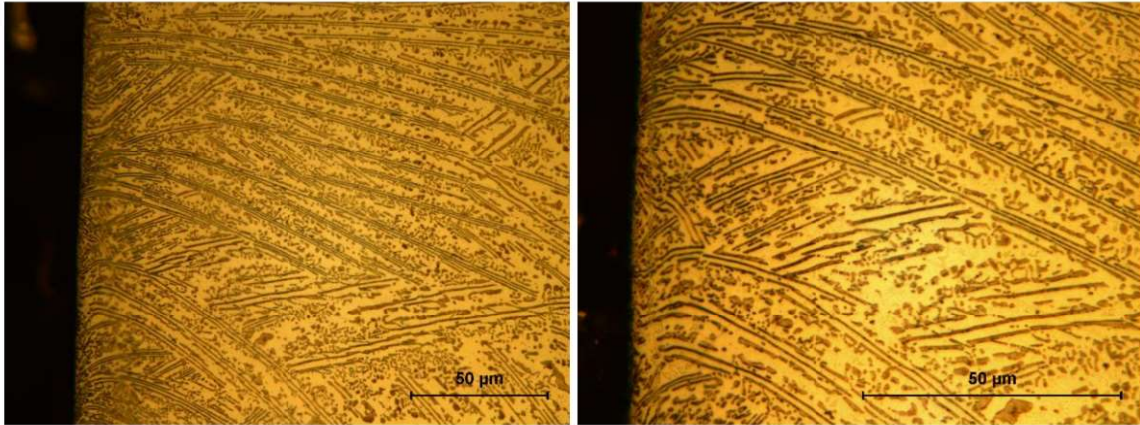
#### 5.4.2. $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ alaşımına deformasyonun etkisi

$(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında deformasyonun mekanik özellikler üzerindeki etkisini tespit etmek için levha olarak üretilen alaşımlara oda sıcaklığında ve

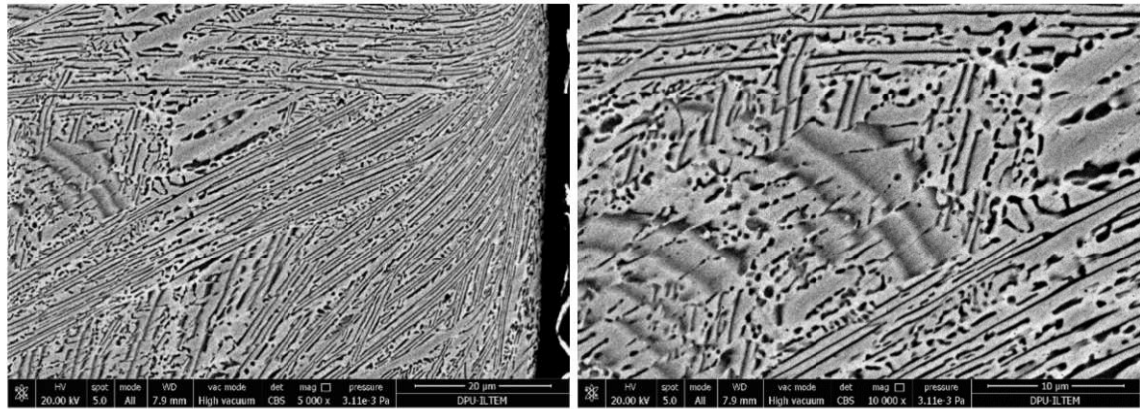


yüksek sıcaklıklarda haddeleme işlemleri uygulanmıştır. 900 – 1100 °C aralığında farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen yüksek sıcaklık haddeleme işlemleri ile numunelerde çok sayıda çatlak meydana geldiği belirlenmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen haddeleme işlemlerinde ise malzemenin çatlaklar oluşmadan %15 deforme edilebildiği tespit edilmiştir.

Şekil 5.70’de %15 deforme edilen  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri ve Şekil 5.71’de SEM mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



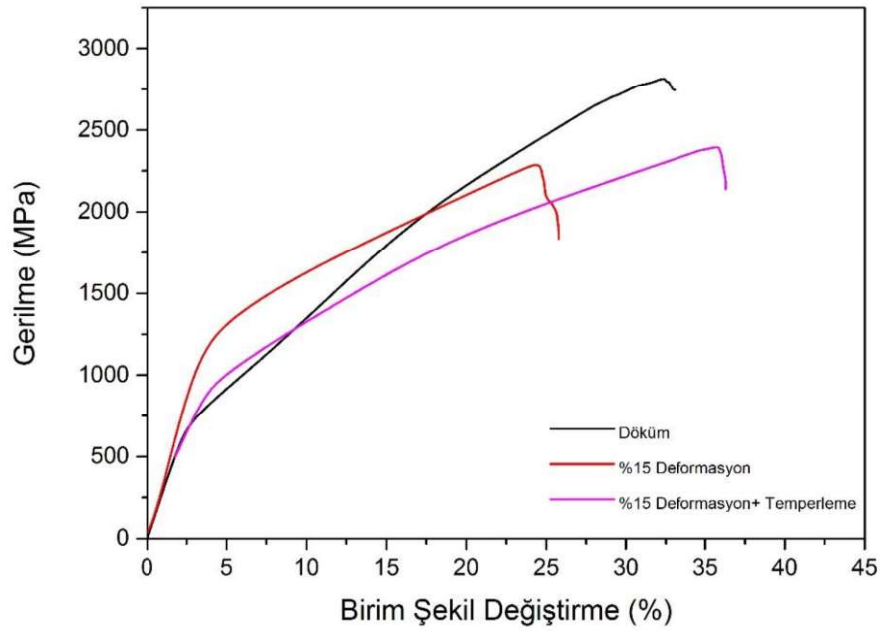
Şekil 5.70. %15 deforme edilmiş  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-500x b-1000x).



Şekil 5.71. %15 deforme edilmiş  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüleri (a-5000x b-10000x).

%15 deforme edilen ve deformasyon sonrası sünekliğin artırılması için 800 °C’de 1 saat temperlenen  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına uygulanan basma testleri sonucu elde edilen Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği ve sonuçlar Şekil 5.72 ve Çizelge 5.14’te sırasıyla verilmiştir.





Şekil 5.72. Döküm, %15 deforme edilen  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.14. Döküm, %15 deforme edilen ve deformasyon sonrası 800 °C'de 1 saat temperlenen  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait basma deneyi sonuçları.

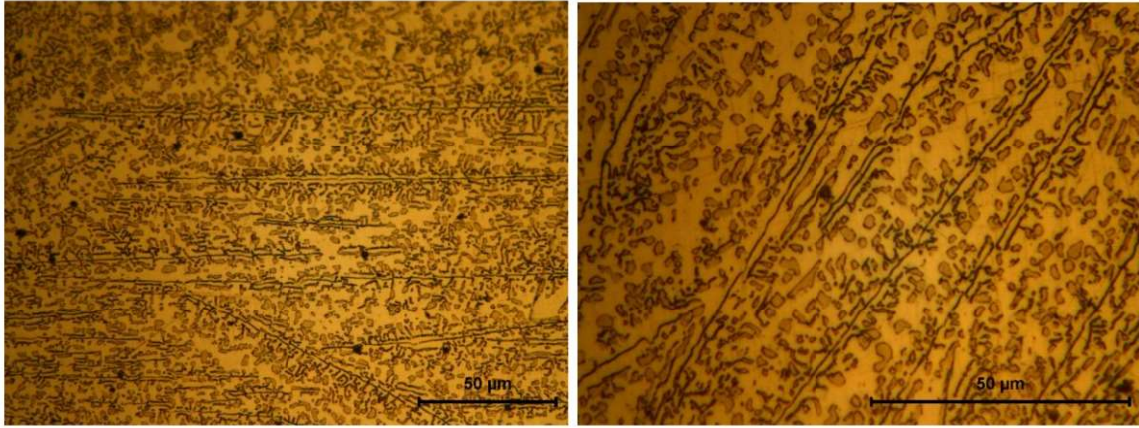
	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$	668	2821	32.5
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+15$ def .	1059	2296	25.8
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+%15$ def.+T	901	2398	36.3

Basma deneyi sonuçlarına göre deformasyon ile alaşımın akma mukavemetinde önemli bir artış meydana gelirken alaşımın sünekliliği de düşmüştür. Deformasyon sonrası uygulanan temperleme işlemi ile alaşımın akma mukavemetinde önemli bir değişikliğe sebep olmadan sünekliliğini geri kazanması sağlanmıştır. Bu sonuçların, Ji'nin 2020 yılında  $\text{Al}_{0,9}\text{CoCrNi}_{2,1}$  alaşımı ile %65 soğuk deformasyon ve arkasından 1000 °C'de temperleme yaparak gerçekleştirdiği çalışma ile benzer olduğu görülmüştür.

### 5.4.3 $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$ alaşımında Bor ilavesinin etkisi

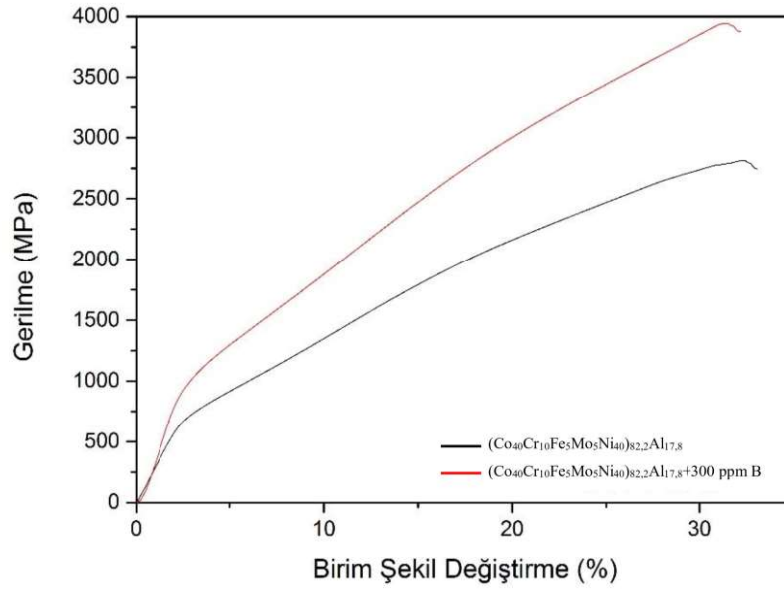
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında mukavemetin artırılması için ötektik yapıda bulunan yumuşak fazın mukavemetini artırmak amacıyla alaşım 300 ppm B katkılı olarak üretilmiştir.

Bor katkılı olarak üretilen alaşıma ait optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.73'te verilmiştir. Bor ilavesi ile birlikte alaşım mikroyapısında ötektik yapının yanında bol miktarda küresel formda ötektik öncesi B2 fazı oluştuğu ve herhangi bir borür fazının oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 5.73.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+300$  ppm B alaşımına ait optik mikroyapı görüntüleri (a-500x b-1000x).

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+300$  ppm B alaşımının basma deneyi sonuçları Şekil 5.74'te ve Çizelge 5.15'te verilmiştir. Basma deneyi sonuçlarına göre 300 ppm civarındaki bor ilavesinin, alaşımın sünekliğinde çok az bir düşüğe sebep olurken akma dayanımını önemli oranda artırdığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, Yin vd. 2020 yılında yayınlanan ve  $\text{Fe}_{35}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Mo}_{15}$  ötektik alaşımında B ilavesinin etkisini konu alan çalışmaları ile paralellik göstermektedir. Yin'in çalışmasında da B ilavesi ile alaşım ötektik noktadan uzaklaşmış ve küresel ötektik öncesi fazlar oluşmuştur. Aynı zamanda alaşıma eklenen B elementinin oluşan ilk fazda yoğunlaştığı ve bu fazı mukavemetlendirdiği tespit edilmiştir (Yin vd., 2020).  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında ötektik öncesi fazın B2 fazını oluşturduğu düşünülürse, B elementinin B2 fazında arayer elementi olarak mukavemetlendirici etki sağladığı düşünülebilir.



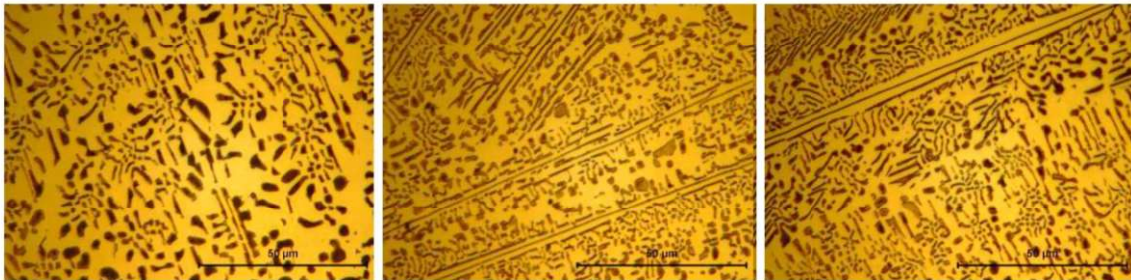
Şekil 5.74.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  ve  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+300$  ppm B alaşımlarına ait Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.15.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  ve  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+300$  ppm B alaşımlarına ait basma deneyi sonuçları.

Alaşım	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e	Hv <sub>200</sub>
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$	668	2821	32.5	372.0
$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+300$ ppm B	902	3943	31.0	406.7

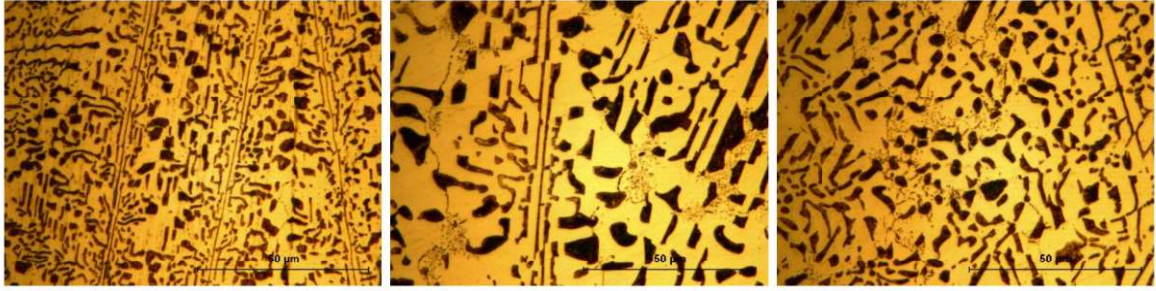
#### 5.4.4. $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$ alaşımında ısıt işlemin etkisi

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına uygulanan ısıt işlemler sonrası elde edilen optik mikroyapı görüntüleri Şekil 5.75-78’de verilmiştir.

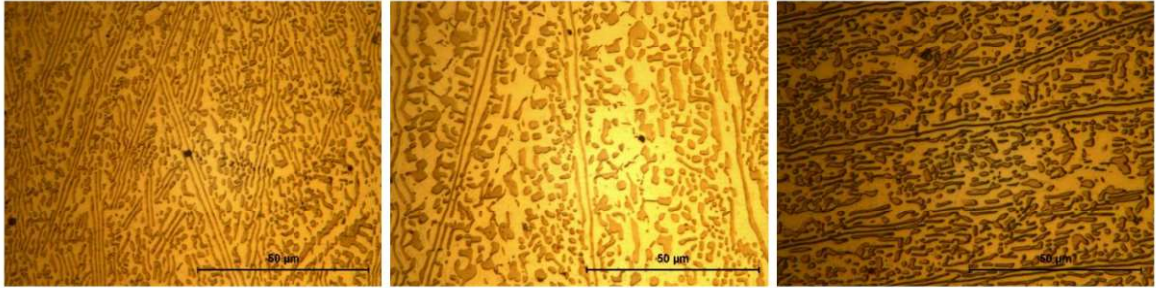


Şekil 5.75. 600 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri.

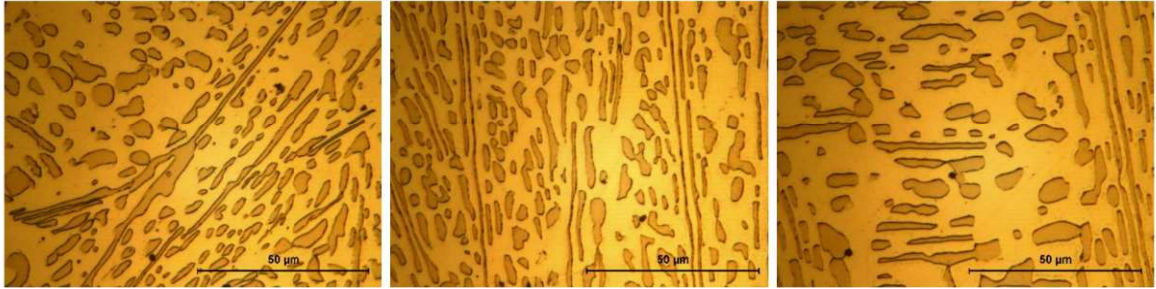




Şekil 5.76. 800 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri.



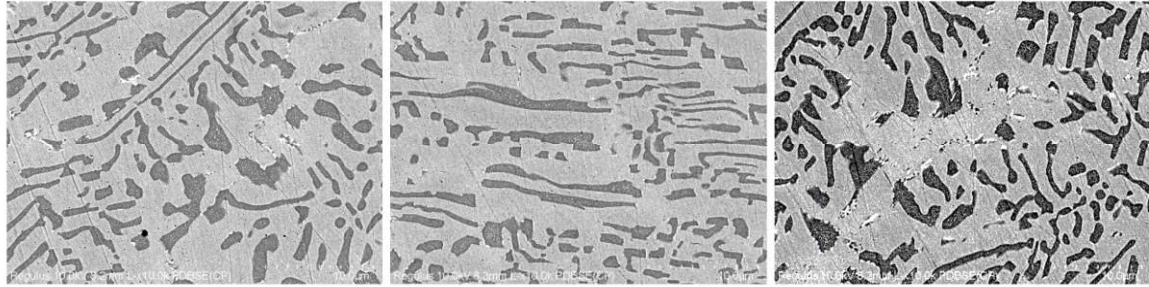
Şekil 5.77. 1000 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri.



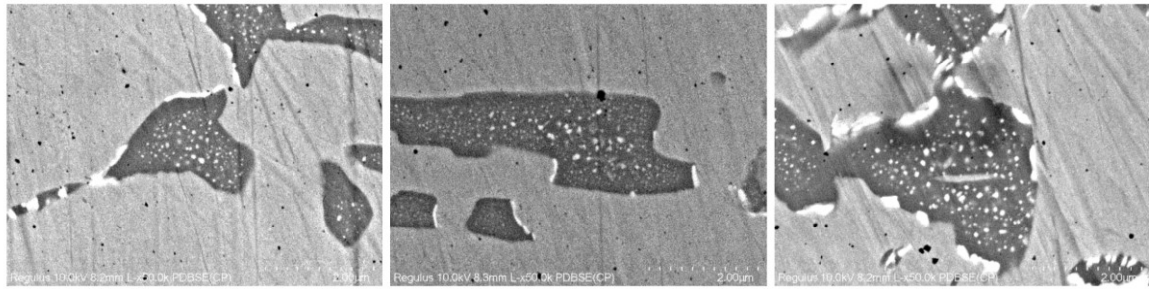
Şekil 5.78. 1200 °C’de 4, 8 ve 12 saat temperlenen numuneye ait optik mikroyapı görüntüleri.

Optik mikroyapı görüntülerinden 600 °C’de gerçekleştirilen ısıl işlemler sonrasında mikroyapıda herhangi bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir. Düşük difüzyon yeteneğine sahip olan yüksek entropili alaşımlar için düşük sıcaklıklarda, görece kısa olan sürelerde gerçekleştirilen ısıl işlemler ile yapıda bir değişikliğin meydana gelmesi beklenmemektedir. 800 °C’de gerçekleştirilen ısıl işlemler sonrasında YMK tane sınırları ve B2 fazı içerisinde çökelti fazının oluştuğu ve artan süre ile birlikte bu çökeltilerin miktarının arttığı görülmektedir. 1000 °C’de gerçekleştirilen ısıl işlemler sonrasında yapıda herhangi bir çökelti fazı tespit edilemezken B2 fazının küreleşme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. 1200 °C’de gerçekleştirilen ısıl işlemler sonucunda ise yapıda artan süre ile birlikte aşırı tane büyümesi gözlemlenmiştir.

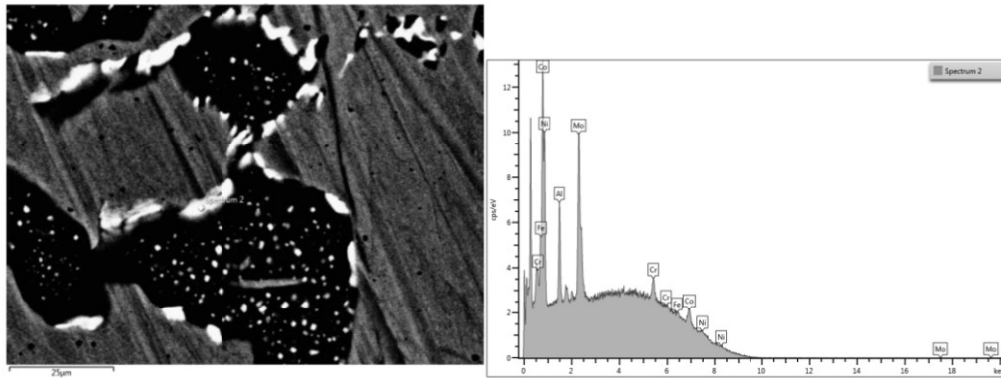
800 °C’de 4, 8 ve 12 saat süre ile ısıl işlem uygulanan numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 5.79-80’de verilmiştir. Artan süre ile birlikte B2 fazı içerisindeki ve YMK fazı tane sınırlarındaki  $\sigma$  fazı çökeltilerinin arttığı görülmektedir. Şekil 5.81’de ve Çizelge 5.16’da  $\sigma$  fazı çökeltilerine ait EDS analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.79. 800 °C’de 4, 8 ve 12 saat süre ile ısıl işlem uygulanan numunelere ait 10000x SEM görüntüleri.



Şekil 5.80. 800 °C’de 4, 8 ve 12 saat süre ile ısıl işlem uygulanan numunelere ait 50000x SEM görüntüleri.



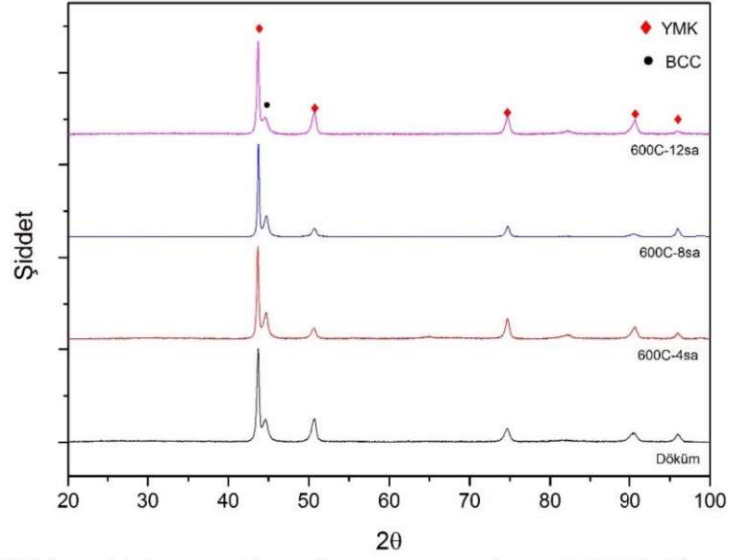
Şekil 5.81. 800 °C’de ısıl işlem sonucu oluşan  $\sigma$  fazına ait EDS analiz sonuçları.

Çizelge 5.16. 800 °C’de ısıl işlem sonucu oluşan  $\sigma$  fazına ait EDS analiz sonuçları.

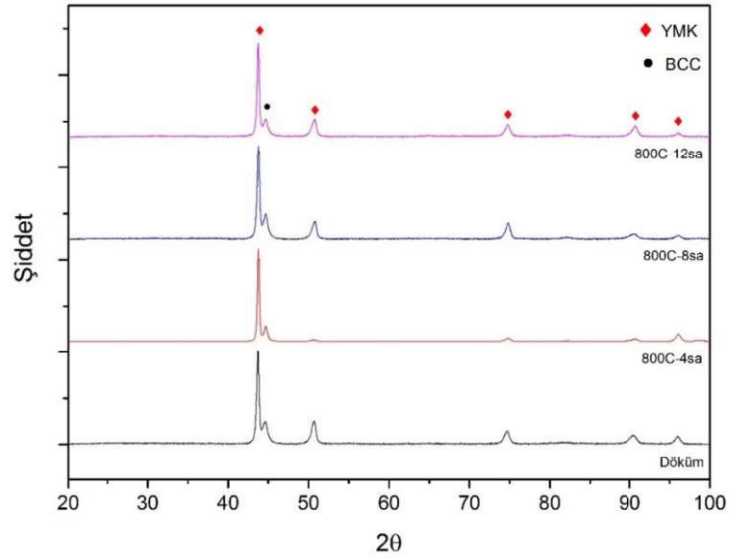
	Al	Co	Cr	Fe	Mo	Ni
<b>EDS</b>	11,41	37,64	12,59	3,94	18,81	15,60



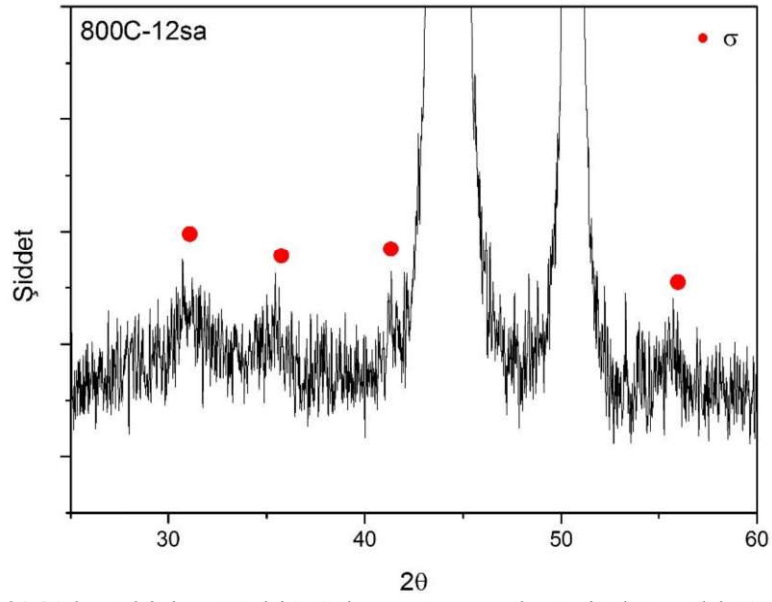
Isıl işlem uygulanan numunelere ait XRD diyagramları Şekil 5.82-86'da verilmiştir. XRD diyagramlarından 600, 1000 ve 1200 °C'de gerçekleştirilen ısıl işlemler sonucu alaşımın faz yapısında bir değişim meydana gelmediği, 800 °C'de gerçekleştirilen ısıl işlem sonucundaysa yapıda az miktarda  $\sigma$  fazının oluştuğu görülmektedir.



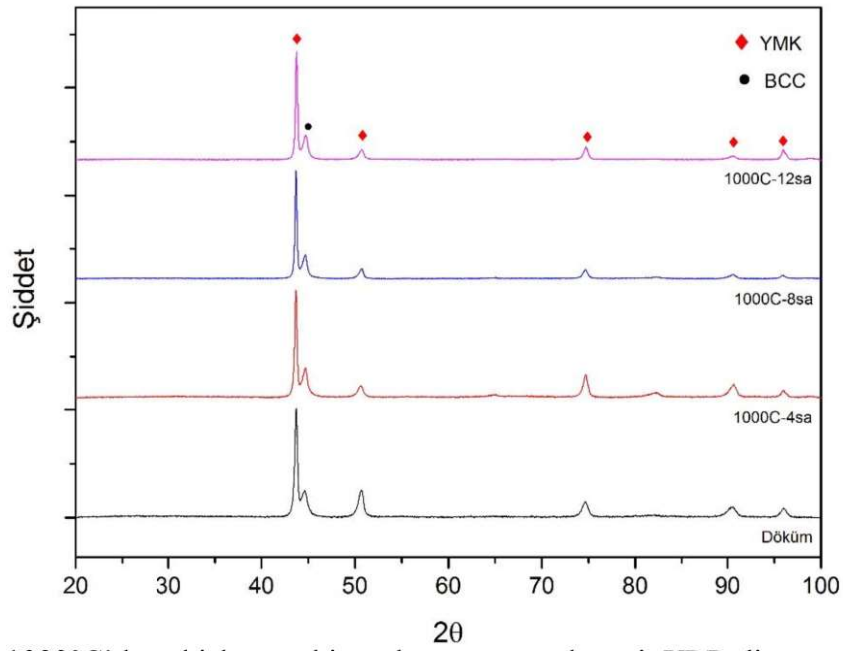
Şekil 5.82. 600°C'de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.



Şekil 5.83. 800°C'de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.

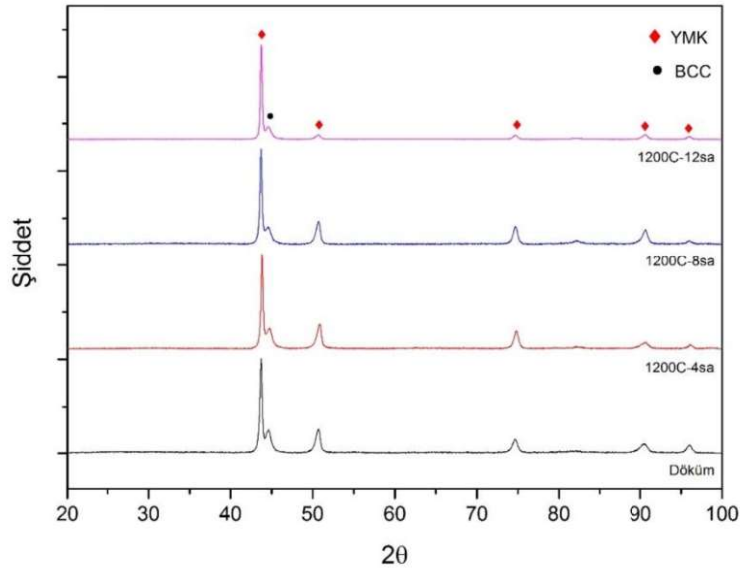


Şekil 5.84. 800°C’de ısıtılma tabi tutulmuş numunelere ait dar aralık XRD diyagramları.



Şekil 5.85. 1000°C’de ısıtılma tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.





Şekil 5.86. 1200 °C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD diyagramları.

Elde edilen XRD diyagramları kullanılarak MAUD programı vasıtasıyla ısıl işlem koşulları ile fazların miktarlarındaki değişimlerin belirlenmesi amacıyla Rietveld analizleri gerçekleştirilmiştir. Rietveld analizleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge 5.17’de ve ThermoCalc programı ile hesaplanan denge durumu faz miktarları Çizelge 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.17. Rietveld analizi ile hesaplanan faz miktarları.

	<b>YMK</b>	<b>B2</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Döküm	75,52	24,48	-
600°C-4saat	74,81	25,19	-
600°C-4saat	76,12	23,88	-
600°C-4saat	73,38	26,62	-
800°C-4saat	76,51	22,91	0,58
800°C-8saat	71,67	27,19	1,14
800°C-12saat	76,45	22,01	1,54
1000°C-4saat	66,92	33,08	-
1000°C-8saat	69,04	30,96	-
1000°C-12saat	65,93	34,07	-
1200°C-4saat	73,55	26,45	-
1200°C-8saat	73,75	26,25	-
1200°C-12saat	74,05	25,95	-

Çizelge 5.18. ThermoCalc ile hesaplanan denge durumu faz miktarları.

	<b>YMK</b>	<b>B2</b>	<b>Sigma</b>
600°C	58,29	26,29	15,42
800°C	58,23	30,42	11,35
1000°C	54,90	38,98	6,12
1200°C	73,26	26,74	-

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 12 saatlik ısıtma işlemlerinin denge durumuna ulaşmak için yeterli olmadığı görülmüştür.

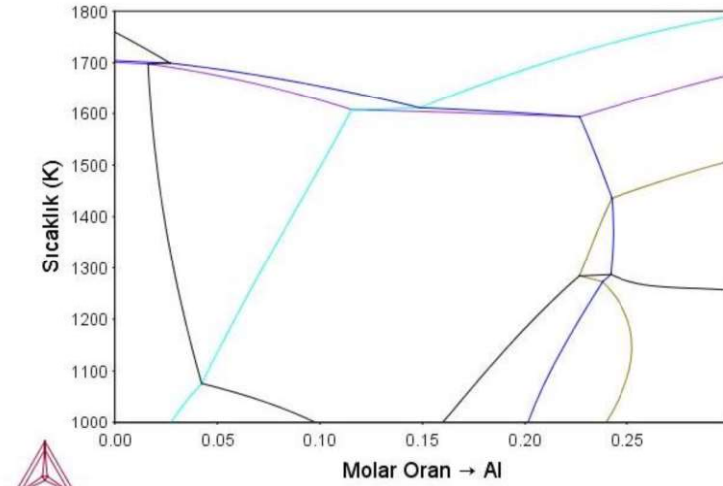
Isıl işlem uygulanan numunelere ait sertlik değerleri Çizelge 5.19’da verilmiştir. Isıl işlemler sonrasında B2 faz miktarında bir miktar artış gözlemlense de sertlik değerlerinde bu artışın etkisi gözlemlenememiştir. 1200 °C’de ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerlerinde ise tane büyümesine bağlı olarak bir miktar düşüş gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.19. Isıl işlem uygulanmış numunelere ait sertlik değerleri.

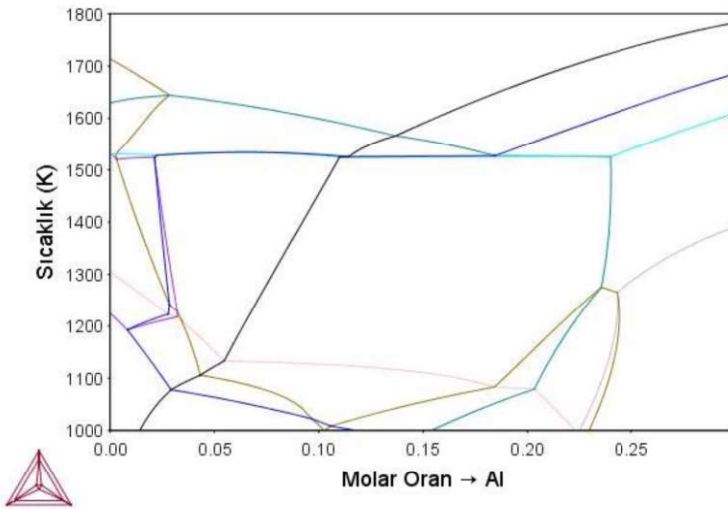
	<b>HV<sub>200</sub></b>
Döküm	334,83
600°C-4saat	328,47
600°C-8saat	320,72
600°C-12saat	321,68
800°C-4saat	339,03
800°C-8saat	343,33
800°C-12saat	345,42
1000°C-4saat	336,91
1000°C-8saat	329,17
1000°C-12saat	328,61
1200°C-4saat	307,33
1200°C-8saat	301,88
1200°C-12saat	312,92

#### 5.4.5. $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$ alaşımına Mo, Nb ve V ilavesinin etkisi

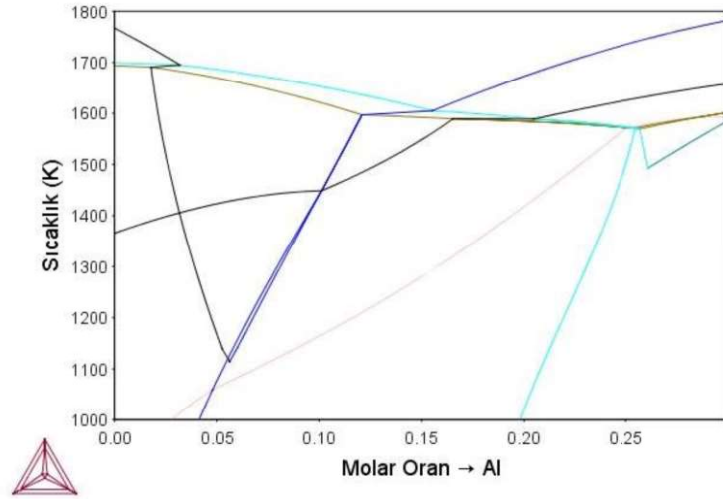
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımının oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla Mo, Nb ve V ile alaşımlanabilirliği ThermoCalc programı kullanılarak araştırılmıştır.



Şekil 5.87.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{95-x}\text{Al}_x+\text{V}_5$  sistemine ait denge diyagramı.

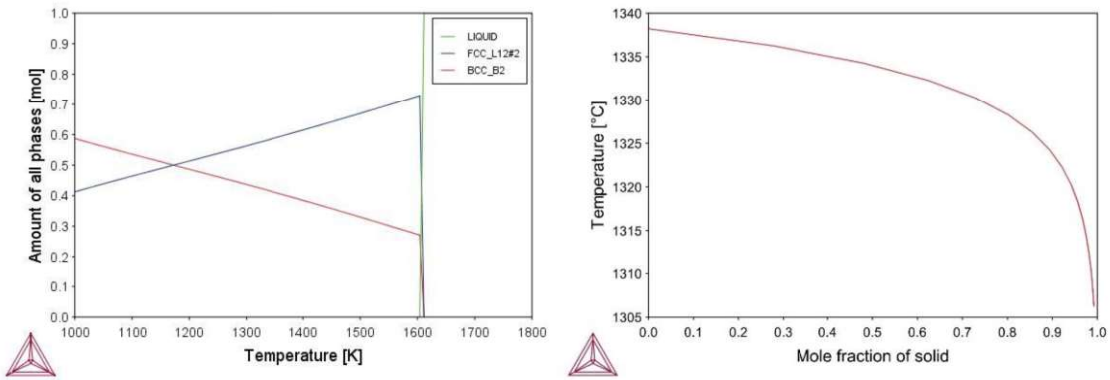


Şekil 5.88.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{95-x}\text{Al}_x+\text{Nb}_1$  sistemine ait denge diyagramı.



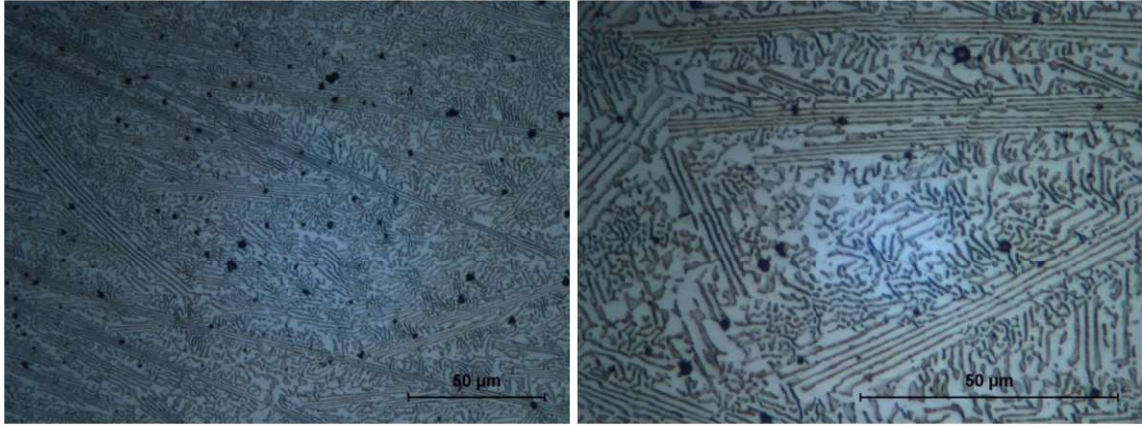
Şekil 5.89.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{100-x}Al_x+Mo_1$  sistemine ait denge diyagramı.

Oluşturulan denge diyagramlarından, molce %1 Mo ve Nb ilavesi ile elde edilen ötektik bileşimlerin istenilen faz yapısını göstermediği görülmüştür. %5 V ilavesi ile denge diyagramının çok fazla değişmediği, ötektik kompozisyonun Al içeriğinin bir miktar düştüğü ve bu alaşımın üretilebileceği görülmüştür. Şekil 5.90'da  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{95-x}Al_x+V_5$  alaşımına ait denge ve denge dışı durumlarda hesaplanan katılma simülasyonu sonuçları verilmiştir.

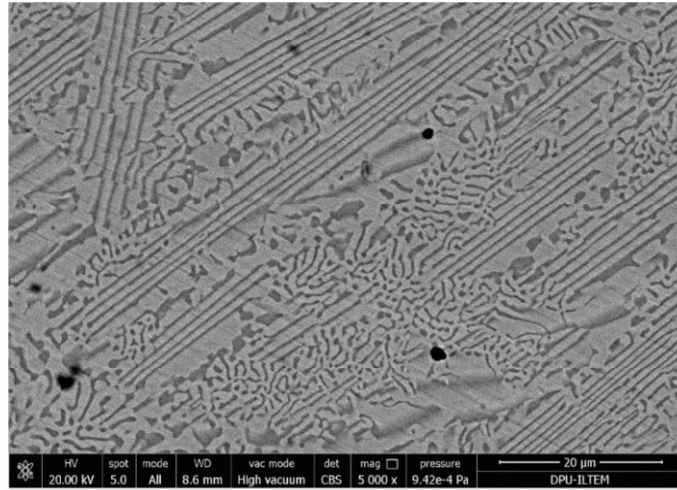


Şekil 5.90.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$  bileşimine ait denge durumu ve denge dışı katılma diyagramları.

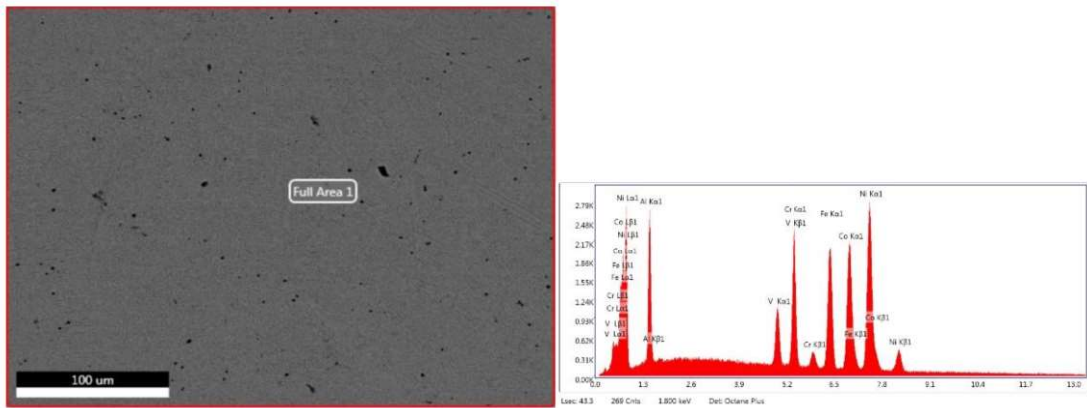
V ilavesi ile üretilen yüzde yüz ötektik  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}+V_5$  alaşımına ait optik ve SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 5.91-92'de YMK ve B2 fazlarına ait geniş alan EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.93-96 ve Çizelge 5.20-21'de verilmiştir.



Şekil 5.91.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89.33}Al_{15.67}+V_5$  alaşımına ait 500x ve 1000x büyütmedeki optik mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.92.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89.33}Al_{15.67}+V_5$  alaşımına ait 5000x büyütmedeki SEM mikroyapı görüntüsü.

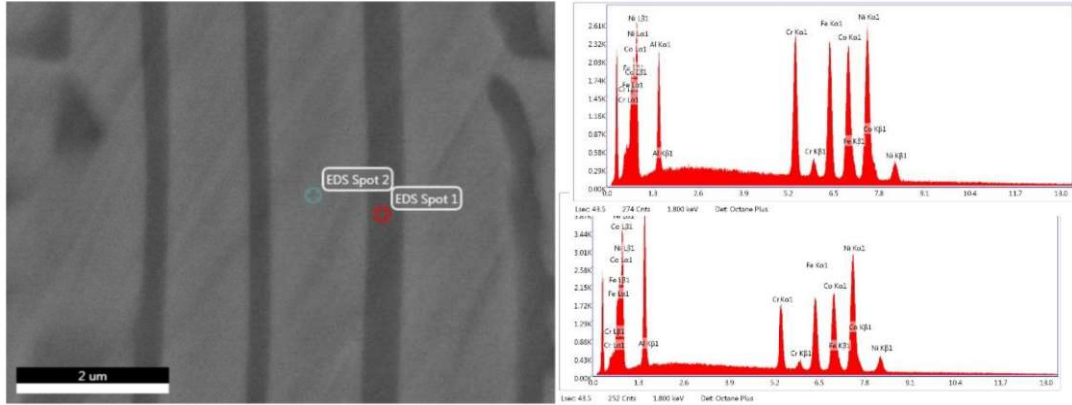


Şekil 5.93.  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89.33}Al_{15.67}+V_5$  alaşımına ait genel EDS analizi.



Çizelge 5.20.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  alaşımına ait EDS analizi sonuçları.

	Al	Co	Cr	Fe	Ni	V
<b>Nominal</b>	15,67	19,83	11,9	15,87	31,73	5,00
<b>EDS</b>	15,23	19,52	12,78	16,54	30,46	5,48

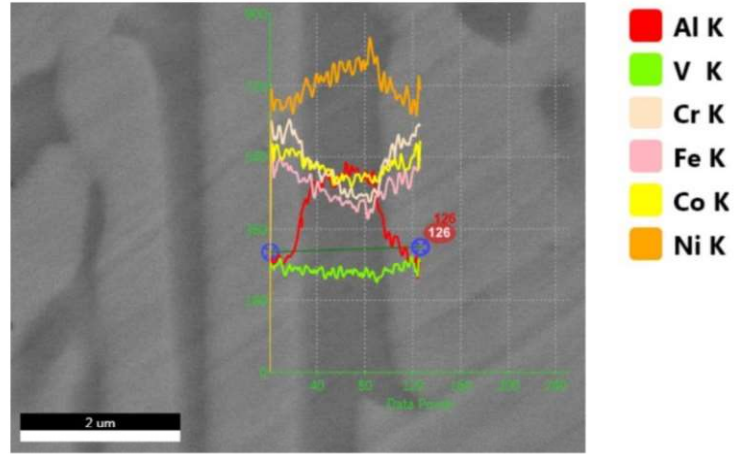


Şekil 5.94.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  alaşımında analiz alınan B2 ve YMK fazları SEM görüntüsü ve bu fazlara ait EDS analiz spektrumu.

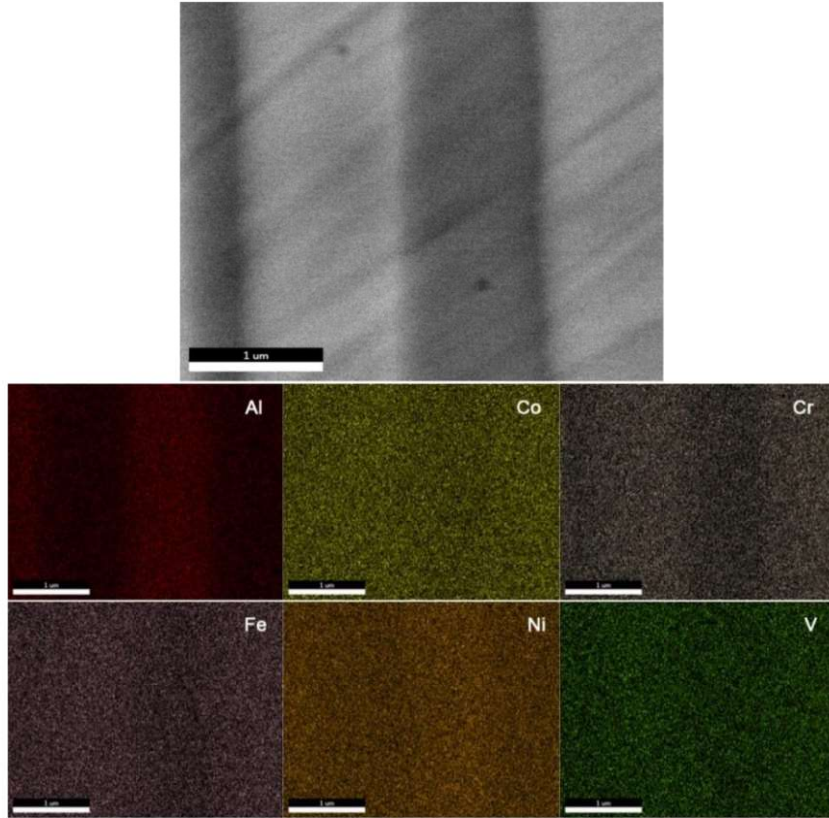
Çizelge 5.21.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  alaşımı yapısında bulunan B2 ve YMK fazlarına ait EDS analizi sonuçları.

		Al	Co	Cr	Fe	Ni	V
<b>B2</b>	<b>Scheil</b>	21,67	13,44	10,98	15,45	30,92	7,52
	<b>EDS</b>	19,38	17,42	10,73	13,95	33,21	5,34
<b>YMK</b>	<b>Scheil</b>	10,53	18,21	15,51	18,26	30,79	4,29
	<b>EDS</b>	12,17	19,93	14,36	18,06	29,66	5,81



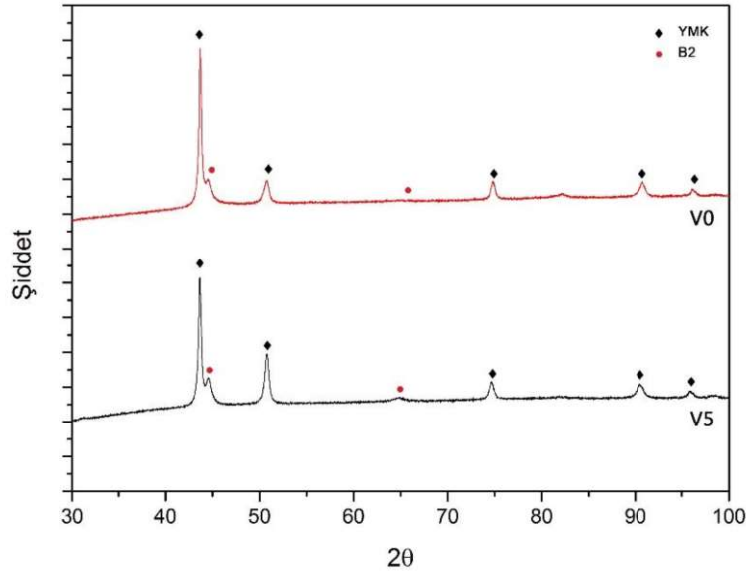


Şekil 5.95.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  alaşımına ait EDS çizgi analizi.



Şekil 5.96.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  alaşımına ait EDS haritalama analizi.

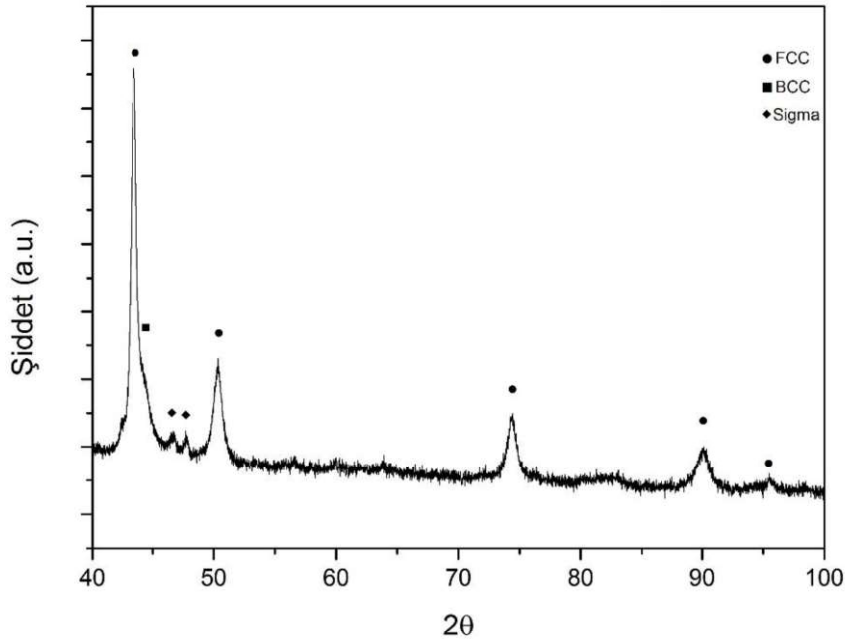
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  alaşımının XRD analizi sonuçları  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımının sonuçlarıyla birlikte Şekil 5.97'de verilmiştir. XRD diyagramından V ilavesi ile alaşımda yeni bir fazın oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 5.97.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  ve  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımlarına ait XRD diyagramları.

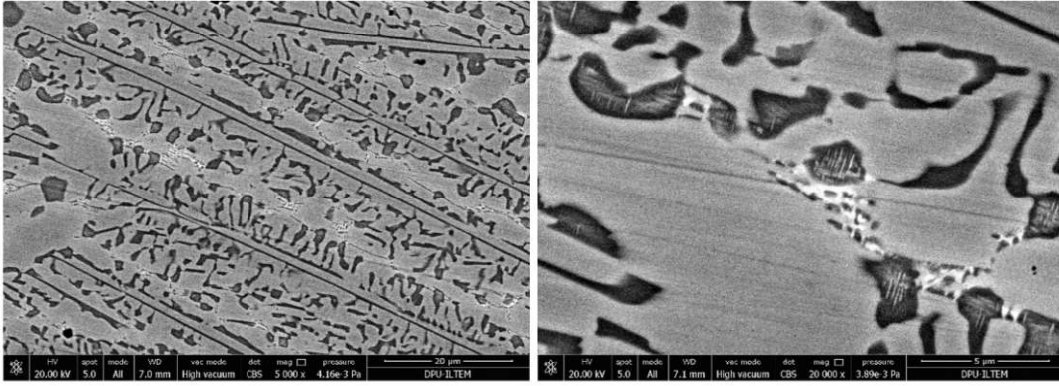
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$  alaşımına Mo ilavesinin etkilerini görmek amacıyla  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}+\text{Mo}_1$  alaşımı da üretilmiş ve yapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Üretilen alaşıma ait Şekil 5.98’de verilen XRD diyagramından alaşımın yapısının YMK, B2 ve  $\sigma$  fazlarından oluştuğu görülmektedir.



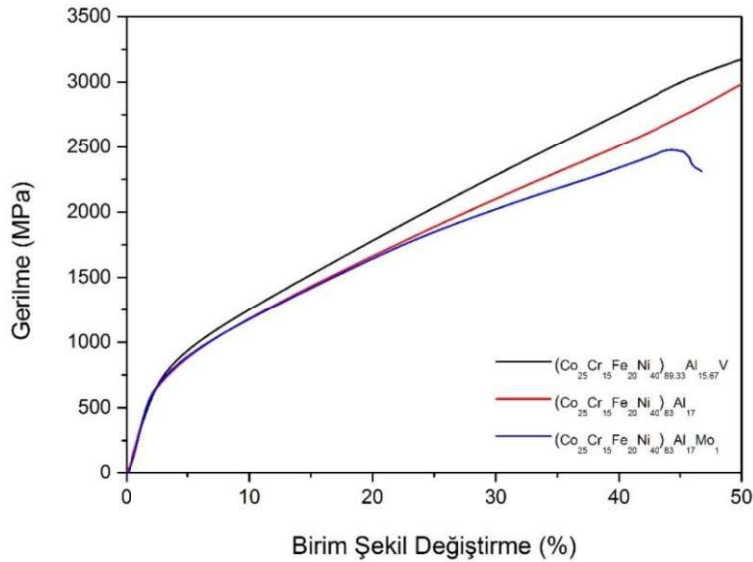
Şekil 5.98.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}+\text{Mo}_1$  alaşımına ait XRD diyagramı.

Şekil 5.99'da  $\sigma$  fazı içeren  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}+\text{Mo}_1$  alaşımına ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinden  $\sigma$  fazının YMK fazı tane sınırlarında ve B2 içerisinde iğnesel formda çökeldiği görülmektedir.



Şekil 5.99.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}\text{Mo}_1$  alaşımına ait 5000x ve 20000x büyütmedeki SEM mikroyapı görüntüleri.

Mo ve V ilaveli olarak üretilen  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}$  alaşımına ait basma deneyleri sonuçları Şekil 5.100 ve Çizelge 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.100.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$ ,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89,33}\text{Al}_{15,67}+\text{V}_5$  ve  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}+\text{Mo}_1$  alaşımına ait Gerilme-Birim şekil değişirme grafiği.

Çizelge 5.22.  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$ ,  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89.33}\text{Al}_{15.67}+\text{V}_5$  ve  $(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}+\text{Mo}_1$  alaşımına ait basma deneyi sonuçları.

	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{maks}$ (MPa)	%e	Hv <sub>200</sub>
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}$	606	>3000	>60	305,4
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{89.33}\text{Al}_{15.67}\text{V}_5$	697	>3000	>60	358.4
$(\text{Co}_{25}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{40})_{83}\text{Al}_{17}\text{Mo}_1$	626	2364	47,5	327,6

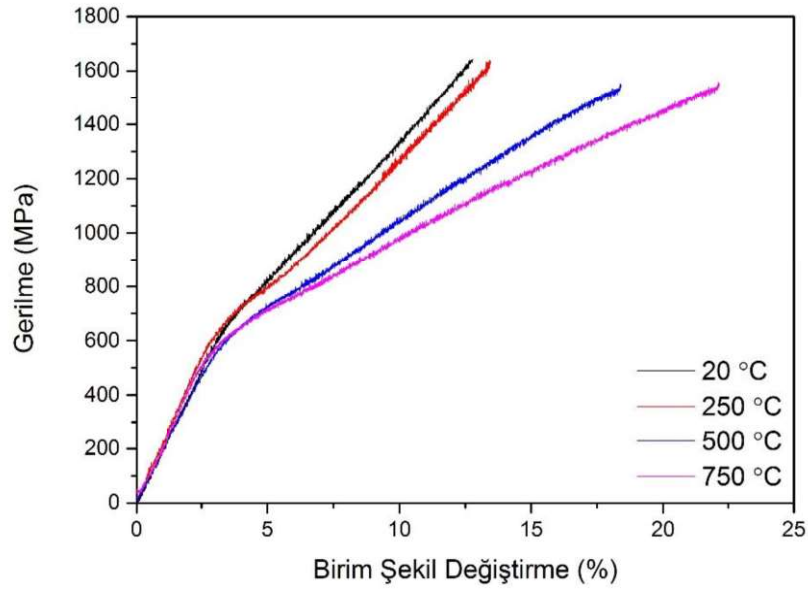
Şekil 5.100'de verilen basma deneyi sonuçları, Mo ilavesi ile YMK fazı içerisinde süreksizlik yaratan gevrek  $\sigma$  fazının, alaşımın akma mukavemetini çok fazla etkilemeden sünekliliğini büyük oranda düşürdüğü tespit edilmiştir. V ilavesinin ise sünekliliği etkilemeden akma dayanımını 606 MPa'dan 697 MPa'a çıkardığı görülmüştür.

### 5.5. Yüksek Sıcaklık Basma Deneyleri

Yüksek sıcaklık basma deneyleri, tez çalışmaları süresince gerçekleştirilen çalışmalar sonucu en yüksek akma dayanımının elde edildiği numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık basma testlerinde kullanılan seramik aparatların maksimum 5000 N kapasiteli olmaları nedeniyle testler numuneler kırılmadan erişilebilen maksimum yükte sonlandırılmıştır. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık testlerinin kıyaslanabilmesi için oda sıcaklığındaki testler de seramik aparatlar ile tekrarlanmış ve yüksek sıcaklık test sonuçları bu deneylerin sonuçları ile birlikte verilmiştir.

Şekil 5.101 ve Tablo 5.23'te  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları verilmiştir.

$(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında gerçekleştirilen yüksek sıcaklık basma deneyleri sonrasında 750 °C'de akma mukavemetinin 684 MPa'dan 563 MPa'a düştüğü görülmektedir. Wang vd. 2013 yılında,  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  sisteminde gerçekleştirdikleri çalışma incelendiğinde; YMK ve B2 fazı içeren alaşımlarda, sıcaklığın artışı ile yapısında YMK fazının fazla olduğu alaşımların sertliğinde fazla bir düşüş meydana gelmezken yapısında B2 fazı fazla olan alaşımların sertliğinin daha fazla düştüğü belirtilmiştir. Bu bilgi ışığında sıcaklığın artışıyla birlikte  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında B2 fazının mukavemetinin düşüşüne bağlı olarak mukavemet değerleri düşmüştür.



Şekil 5.101.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi Gerilme-Birim şekil değişirme grafiği.

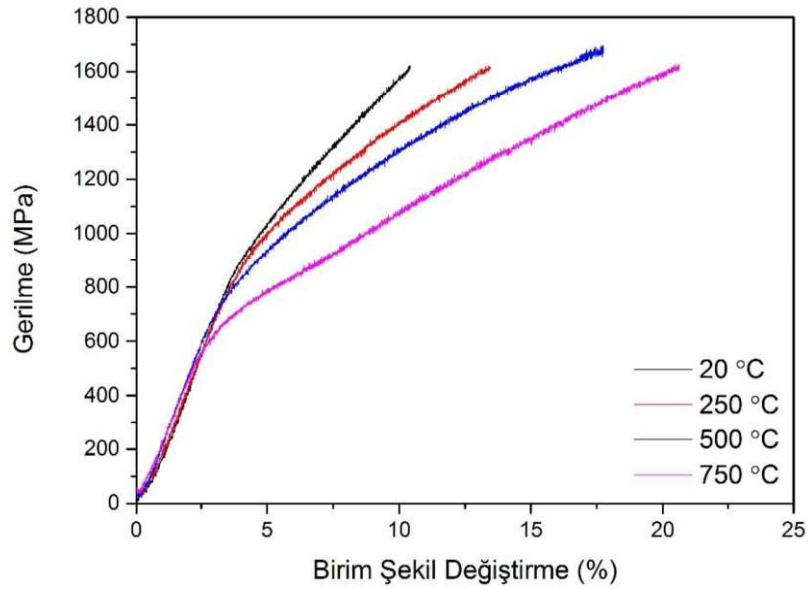
Çizelge 5.23.  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları.

Sıcaklık	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	%e
20 °C	684	1600	12,74
250 °C	634	1600	13,40
500 °C	604	1600	18,38
750 °C	563	1600	22,16

Şekil 5.102 ve Çizelge 5.24'te 800 °C'de 12 saat ısıl işlem uygulanan  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları verilmiştir.

800 °C'de 12 saat ısıl işlem uygulanan  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımı yapısında  $\sigma$  fazı oluşumuna bağlı gerçekleşen mukavemet artışının, sıcaklığın artışı ile birlikte etkisini büyük oranda kaybettiği görülmüştür.





Şekil 5.102. 800 °C’de 12 saat ısıl işlem uygulanan  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi Gerilme-Birim şekil değişirme grafiği.

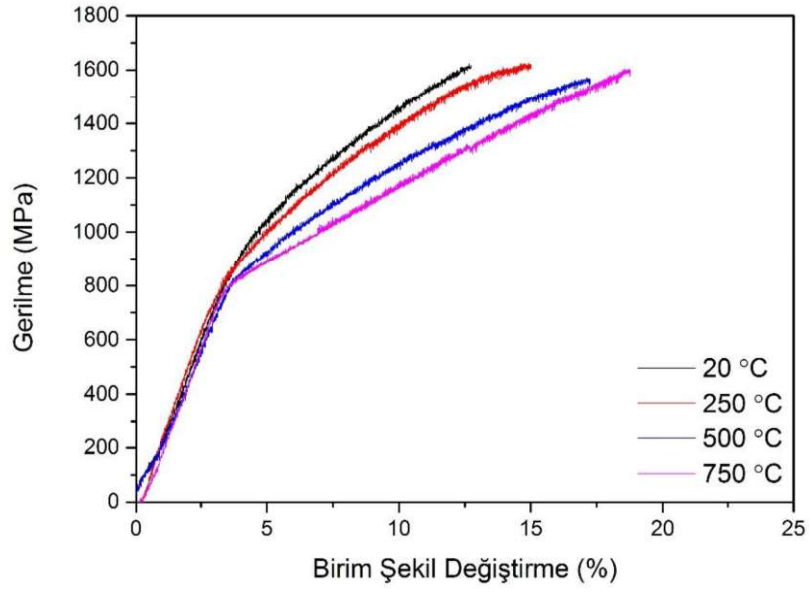
Çizelge 5.24. 800 °C’de 12 saat ısıl işlem uygulanan  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları.

Sıcaklık	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	%e
20 °C	902	1600	12,71
250 °C	837	1600	15,02
500 °C	754	1600	17,25
750 °C	602	1600	18,76

Şekil 5.103 ve Çizelge 5.25’te  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}+300$  ppm B alaşımına ait oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları verilmiştir.

B elementi katkıli olarak üretilen  $(\text{Co}_{40}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_5\text{Mo}_5\text{Ni}_{40})_{82,2}\text{Al}_{17,8}$  alaşımında yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen basma deneylerinde sıcaklığın artışı ile birlikte mukavemet değerlerinde ciddi bir düşüş gözlemlenmemiştir. Bu durum sıcaklık artışı ile mukavemetini kaybeden B2 fazının arayer katı çözelti sertlemesi ve tane sınırlarına disperse olan B ilavesi sayesinde yüksek sıcaklıklarda da korumasına bağlanmıştır.





Şekil 5.103.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300ppm$  B alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi Gerilme-Birim şekil değişirme grafiği.

Çizelge 5.25.  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300ppm$  B alaşımına ait yüksek sıcaklık basma deneyi sonuçları.

Sıcaklık	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	%e
20 °C	897	1600	10,39
250 °C	826	1600	13,33
500 °C	824	1600	17,60
750 °C	818	1600	20,58

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada temel olarak Al-Co-Cr-Fe-Mo/Nb-Ni sisteminde yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir yüksek akma mukavemetine ve süneklığe sahip ötektik yüksek entropili alaşımların geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen modelleme çalışmaları ile belirlenen alaşımlar üretilerek yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir.

Üretilen alaşımların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla; katılma hızı, ısıtma işlemi, alaşımlama ve termomekanik işlemler uygulanarak bu yöntemlerin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- Gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında literatürle de uyumlu olarak, Cr ve Fe elementleri miktarındaki artışın yapıda sert HMK ve B2 fazlarının, Co ve Ni elementleri miktarındaki artışın sünek YMK fazının, Mo elementi miktarındaki artışın  $\sigma$  fazının ve Nb elementi miktarındaki artışın Lave fazının oluşumunu teşvik ettiği görülmüştür.

- Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni sisteminde, taranan aralık içerisinde YMK + HMK/B2 ötektik reaksiyonunu içeren 10 adet denge diyagramı bulunmuştur. Bulunan ötektik kompozisyonlar içerisinde  $\sigma$  fazı oluşum sıcaklığı en düşük olan  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,43}Al_{17,57}$  alaşımı seçilmiştir.

- Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları ile belirlenen %17,57 Al içeriğinin ötektik altı bölgede kaldığı, yüzde yüz ötektik noktanın 17,8 Al içeriğinde bulunduğu tespit edilmiştir.

- Üretilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  ötektik alaşımının sertliği 372,0 HV, akma dayanımı 668 MPa, basma dayanımı 2813 MPa ve şekil değişimi %33,5 olarak bulunmuştur.

- Al-Co-Cr-Fe-Ni sisteminde, taranan aralık içerisinde YMK + HMK/B2 ötektik reaksiyonunu içeren 304 adet denge diyagramı bulunmuştur. Konfigürasyonel entropi

değerleri 1,5R'nin altında olan ve 1000 K değerine kadar herhangi bir faz dönüşümü olan bileşimler elenerek 27 adet ötektik bileşim belirlenmiştir. Belirlenen 27 adet ötektik bileşim içerisinde yüksek Co içerikli  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{85,16}Al_{14,84}$  ve yüksek Ni içerikli  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83,87}Al_{16,13}$  alaşımları seçilmiştir.

- Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları ile belirlenen %16,13 ve %14,84 Al içeriklerinin ötektik altı bölgede kaldığı, yüzde yüz ötektik noktanın her iki alaşım için de %17 Al içeriğinde bulunduğu tespit edilmiştir.

- Üretilen  $(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$  ötektik alaşımının sertliği 310,8 HV, akma dayanımı 554 MPa, basma dayanımı 2827 MPa ve şekil değişimi %42,1 olarak,  $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  ötektik alaşımının sertliği 305,4 HV, akma dayanımı 606 MPa, basma dayanımı <3000 MPa ve şekil değişimi <%60 olarak bulunmuştur.

- Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni sisteminde, taranan aralık içerisinde YMK + Lave ötektik reaksiyonunu içeren 12 adet denge diyagramı bulunmuştur. Bulunan ötektik alaşımlar arasında  $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{93,6}Al_{6,4}$ ,  $(Co_{20}Cr_{20}Fe_{10}Nb_{10}Ni_{30})_{96,7}Al_{3,7}$  ve  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{96}Al_4$  alaşımları seçilmiştir. Seçilen ötektik alaşımlardan sadece  $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{93,6}Al_{6,4}$  alaşımı yüzde yüz ötektik yapıda üretilebilmiş ve ötektik noktanın %8 Al içeriğinde olduğu tespit edilmiştir.

- Üretilen  $(Co_{10}Cr_{20}Fe_{20}Nb_{10}Ni_{40})_{93,6}Al_{6,4}$  ötektik alaşımının sertliği 567,3 HV, akma dayanımı 1179 MPa, basma dayanımı 2110 MPa ve şekil değişimi %12,9 olarak bulunmuştur. Yüksek akma mukavemeti gösteren alaşımın sünekliliğinin çok düşük kaldığı tespit edilmiştir.

Mekanik özellikleri iyileştirme çalışmalarında;

- $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında soğuma hızının mekanik özelliklere etkisi incelenmiş, ancak lameller arası mesafede beklenen azalma sağlanamamıştır. Hızlı soğutulan  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  ötektik alaşımının sertliği 356,7 HV, akma dayanımı 627 MPa, basma dayanımı 3539 MPa ve şekil değişimi %40,1 olarak bulunmuştur.

- $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında deformasyonun mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi için farklı oranlarda ve sıcaklıklarda deformasyon uygulanmıştır.

Soğuk deformasyon sonrası ötektik alaşımının sertliği 453,3 HV, akma dayanımı 922 MPa, basma dayanımı 2976 MPa ve şekil değişimi %31,4 olarak bulunmuştur. Sıcak deformasyon sırasında malzemenin çatlak oluşturma eğilimi gösterdiği tespit edilmiş ve sıcak deformasyon çalışmalarından başarılı bir sonuç elde edilememiştir.

- $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımında YMK fazında arayer katı çözelti sertleşmesinin etkisini görmek adına 300 ppm B ilavesi yapılmıştır. Bor ilave edilen ötektik alaşımının sertliği 406,6 HV, akma dayanımı 902 MPa, basma dayanımı 3943 MPa ve şekil değişimi %31,0 olarak bulunmuştur.

- $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımının yapısında B2 fazı miktarını artırmak ve yapı içerisinde  $\sigma$  fazı çökeltmek için gerçekleştirilen ısı işlemler sonucu, en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği 800 °C’de yapılan ısı işlemlerde B2 miktarının arttığı ve  $\sigma$  fazının oluştuğu tespit edilmiştir.

- $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  alaşımına latis distorsiyonunu artırmak suretiyle mekanik özellikleri geliştirmek için V ilave edilmiştir. V ilave edilen ötektik alaşımının sertliği 358,4 HV, akma dayanımı 697 MPa, basma dayanımı <3000 MPa ve şekil değişimi <%60 olarak bulunmuştur.

- $(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$  alaşımına yapılan Mo ilavesi sonucu alaşımının sertliği 327,6 HV, akma dayanımı 626 MPa, basma dayanımı 2364 MPa ve şekil değişimi %47,5 olarak bulunmuştur. Mo ilavesi ile akma mukavemetinde anlamlı bir artış sağlanamazken, YMK fazın tane sınırları ve B2 fazı içerisinde çökelen gevrek  $\sigma$  fazı nedeniyle alaşımın sünekliği düşmüştür.

Yüksek sıcaklık basma deneylerinde kullanılacak alaşımların belirlenmesi için gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları aşağıdaki tabloda toplu olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre gösterdikleri mekanik özellikler nedeniyle  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ , 800 °C’de ısı işlem uygulan  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  ve  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$  ppm B alaşımları seçilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalar ile elde edilen mekanik özellikler.

Alaşım	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	%e	Hv
$(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$	668	2821	32,5	372,0
$(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$ hızlı soğutma	627	3539	40,1	356,7
$(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+ \%15$ Soğ. Def.	901	2398	36,3	453,3
$(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}+300$ ppm B	902	3943	31,0	406,6
$(Co_{40}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{25})_{83}Al_{17}$	554	2827	42,1	310,8
$(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}$	606	>3000	>60	305,4
$(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{89,33}Al_{15,67}V_5$	697	>3000	>60	358,4
$(Co_{25}Cr_{15}Fe_{20}Ni_{40})_{83}Al_{17}Mo_1$	626	2364	47,5	327,6
$(Co_{40}Cr_{10}Fe_{30}Nb_{10}Ni_{10})_{92}Al_8$	1179	2110	12,9	567,3

- $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımını ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık basma deneylerinde alaşımın akma mukavemeti, 20 °C’de 684 MPa, 250 °C’de 634 MPa, 500 °C’de 604 MPa ve 750 °C’de 563 MPa olarak tespit edilmiştir. Sıcaklığın artışına bağlı olarak alaşımın deformasyon sertleşme oranında düşüş olmuş ve 750 °C’de akma mukavemetinde sadece %15,7 düşüş yaşanmıştır.

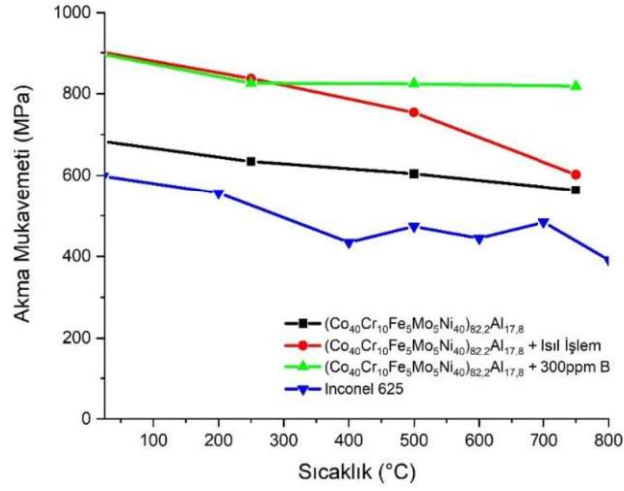
- 800 °C’de ısıll işlem uygulan  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımını ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık basma deneylerinde alaşımın akma mukavemeti, 20 °C’de 902 MPa, 250 °C’de 837 MPa, 500 °C’de 754 MPa ve 750 °C’de 602 MPa olarak tespit edilmiştir. Sıcaklığın 250 °C’ye çıkmasıyla alaşımın deformasyon sertleşme oranında bir miktar düşüş olmuş ancak yükselen sıcaklıklarda ciddi bir değişim gözlenmemiştir. 750 °C’de akma mukavemetinde %33,3 düşüş yaşanmıştır.

- 300 ppm B ilave edilen  $(Co_{40}Cr_{10}Fe_5Mo_5Ni_{40})_{82,2}Al_{17,8}$  alaşımını ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık basma deneylerinde alaşımın akma mukavemeti, 20 °C’de 897 MPa, 250 °C’de 826 MPa, 500 °C’de 824 MPa ve 750 °C’de 818 MPa olarak tespit edilmiştir. Sıcaklığın artışına bağlı olarak alaşımın deformasyon sertleşme oranında belirgin bir düşüş olmazken, 750 °C’de akma mukavemetinde sadece %8,8 düşüş yaşanmıştır.

Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen ötektik yüksek entropili alaşımlar ile gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları sonucu elde edilen sonuçlar incelendiğinde



(Co<sub>40</sub>Cr<sub>10</sub>Fe<sub>5</sub>Mo<sub>5</sub>Ni<sub>40</sub>)<sub>82,2</sub>Al<sub>17,8</sub> alaşımının çalışılan sıcaklıklar aralığında, havacılık sektöründe yoğun olarak kullanılan Inconel 625 süper alaşımından daha yüksek akma mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir.



şekil 6.1. Üretilen yüksek entropili alaşımlar ve Inconel 635 süper alaşımının akma mukavemetinin sıcaklık ile değişimi.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Basak, C.B., Krishnan, M., 2015, Applicability of Scheil-Gulliver solidification model in real alloy: A case study with Cu-9wt%Ni-6wt%Sn alloy, Philosophical Magazine Letters, s. 376-383.
- Cheng, C. Y., Yang, Y. C., Zhong, Y. Z., Chen, Y. Y., Hsu, T., vd., 2017, Physical Metallurgy of Concentrated Solid Solutions from Low Entropy to High Entropy Alloys, Current Opinion in Solid State and Materials Science, s. 299-311.
- Detrois, M., Antonov, S., Tin, S., 2019, Phase stability and thermodynamic database validation in a set of non-equiatomic Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni high-entropy alloys, Intermetallics, s. 103-112.
- Ding, P., Mao, A., Zhang, X., Jin, X., Wang, B., Liu, M., Gu, X., 2017, Preparation, characterization and properties of multicomponent AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> powder by gas atomization method. Journal of Alloys and Compounds, s. 609-614.
- Ding, Z., & He, Q., Wang, Q., Yang, Y., 2018, Superb strength and high plasticity in laves phase rich eutectic medium-entropy-alloy nanocomposites, International Journal of Plasticity, s. 57-72.
- Gao, M.C., Alman, D.E., 2013, Searching for next single-phase high-entropy alloy compositions, Entropy, s. 4504-4519.
- Gao, X., Lu, Y., Zhang, B., Liang, N., Wu, G., Sha, G., Liu, J., Zhao, Y., 2017, Microstructural origins of high strength and high ductility in an AlCoCrFeNi 2.1 eutectic high-entropy alloy. Acta Materialia, s. 59-66.
- Guo, S., 2015, Phase selection rules for cast high entropy alloys: an overview, Materials Science and Technology, s.1223-1230.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Haile, J. M., 1992, Molecular Dynamics Simulation, Elementary Methods, John Wiley & Sons, Inc., Kanada.
- He, F., Zhijun, W., Cheng, P., Wang, Q., Li, J., Dang, Y., Wang, J., Liu, C.T., 2015, Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNbx, Journal of Alloys and Compounds, s. 284-289.
- He, F., Zhijun, W., Cheng, P., Wang, Q., Li, J., Dang, Y., Wang, J. Liu, C.T., 2015, Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNbx. Journal of Alloys and Compounds, s. 284-289.
- Hsu, Y.C., Wang, W.R., Yeh, J.W., Chen, K.S., 2010, Microstructure and Mechanical Properties of New AlCoxCrFeMo0,5Ni High-Entropy Alloys, Advanced Engineering Materials, s. 44-49.
- Hsu, Y.C., Juan, C.C., Wang, W.R., Sheu, T.S., Chen, K.S., Yeh, J.W., 2011, On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCr<sub>x</sub>FeMo<sub>0.5</sub>Ni high-entropy alloys, Materials Science and Engineering A, s. 3581-3588.
- Hsu, C.Y., Juan, C.C., Chen, S.T., Sheu, T.S., Yeh, J.W., Lee, P.H., 2013, Phase diagrams of high-entropy alloy system Al-Co-Cr-Fe-Mo-Ni, JOM, s. 1829–1839.
- Jiang, H., Zhang, H., Huang, T., Lu, Y., Wang, T., Li, T., 2016, Microstructures and mechanical properties of Co<sub>2</sub>Mo<sub>x</sub>Ni<sub>2</sub>VW<sub>x</sub> eutectic high entropy alloys. Materials & Design, s. 539-546
- Jiang, L., Cao, Z.Q., Jie, J.C., Zhang, J.J., Lu, Y.P., Wang, T.M., Li, T.J., 2015, Effect of Mo and Ni elements on microstructure evolution and mechanical properties of the CoFeNi<sub>x</sub>VMoy high entropy alloys, Journal of Alloys and Compounds, s. 585-590.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Jiang, H., Han, K., Gao, X., Lu, Y., Cao, Z., Gao, M.C., Hawk, J.A., Li, T., 2018, A new strategy to design eutectic high-entropy alloys using simple mixture method, *Materials & Design*, s. 101-105.
- Jin, X., Zhou, Y., Zhang, L., Du, X., Li, B., 2018, A new pseudo binary strategy to design eutectic high entropy alloys using mixing enthalpy and valence electron concentration, *Materials & Design*, s. 49-55.
- Jin, X., Liang, Y., Bi, J., Li, B., 2020, Enhanced strength and ductility of Al<sub>0.9</sub>CoCrNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy by thermomechanical processing, *Materialia*.
- Jones, N.G., Frezza, A., Stone, H.J., 2014, Phase equilibria of an Al<sub>0.5</sub>CrFeCoNiCu High Entropy Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, s. 214-221.
- Jones, N.G, Izzo, R., Mignanelli, P.M., Christofidou, K.A., Stone H.J., 2016, Phase evolution in an Al<sub>0.5</sub>CrFeCoNiCu High Entropy Alloy. *Intermetallics*, s. 43-50.
- Jones, N., Aveson, J., Bhowmik, A., Conduit, B., Stone, H., 2014, On the entropic stabilisation of an Al<sub>0.5</sub>CrFeCoNiCu high entropy alloy, *Intermetallics*, s. 148-153.
- Jones, N.G., Christofidou, K., Stone, H.J., 2015, Rapid precipitation in an Al<sub>0.5</sub>CrFeCoNiCu high entropy alloy. *Materials Science and Technology*, s. 1171-1177.
- Kao, S.W., Yeh, J.W., Chin, T.S., 2008, Rapidly solidified structure of alloys with up to eight equal-molar elements—a simulation by molecular dynamics, *Journal of Physics: Condensed Matter*, s. 145214.
- Kao, Y.F., Chen, S.K., Chen, T.J., Chu, P.C., Yeh, J.W., Lin, S.J., 2011, Electrical, magnetic, and Hall properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high-entropy alloys. *Journal of alloys and compounds*, s. 1607-1614.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kattner, U.R., 1997, The thermodynamic modeling of multicomponent phase equilibria, *Journal of Metals*, s. 14–19.
- Liao, Y., Baker, I., 2008, Microstructure and mechanical properties of Fe<sub>30</sub>Ni<sub>20</sub>Mn<sub>35</sub>Al<sub>15</sub>, *Materials Characterization*, s. 1546–1549.
- Liao, Y., Baker, I., 2011, On the room-temperature deformation mechanisms of lamellarstructured Fe<sub>30</sub>Ni<sub>20</sub>Mn<sub>35</sub>Al<sub>15</sub>, *Materials Science and Engineering A*, s. 3998–4008.
- Liao, Y., Baker, I., 2011, Evolution of the microstructure and mechanical properties of eutectic Fe<sub>30</sub>Ni<sub>20</sub>Mn<sub>35</sub>Al<sub>15</sub>, *Journal of Materials Science*, s. 2009–2017.
- Liu, W.H., He, J.Y., Huang, H.L., Wang, H., Lu, Z.P., Liu, C.T., 2015, Effects of Nb additions on the microstructure and mechanical property of CoCrFeNi high-entropy alloys, *Intermetallics*, s. 1–8.
- Liu, N., Wu, P.H., Zhou, P.J., Peng, Z., Wang, X.J., Lu Y.P., 2016, Rapid solidification and liquid-phase separation of undercooled CoCrCuFexNi high-entropy alloys, *Intermetallics*, s. 44-52.
- Louive, S.G., Cohen, M.L., 2006, *Contemporary Concepts of Condensed Matter Science*, s. 75-82.
- Lu, Y., Jiang, H., Guo, S. Wang, T. Cao, Z., Lu, Y., 2017, A new strategy to design eutectic high-entropy alloys using mixing enthalpy. *Intermetallics*, s. 124-128.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Lu, Y., Gao, X., Jiang, L., Chen, Z., Wang, T., Jie, J.C., Kang, H., Zhang, Y., Guo, S., Ruan, H., Zhao, Y., Cao, Z., Lu, Y., 2016, Directly cast bulk eutectic and near-eutectic high entropy alloys with balanced strength and ductility in a wide temperature range, *Acta Materialia*, s. 143-150.
- Lutterotti, L., 2000, Maud: A Rietveld Analysis Program Designed for the Internet and Experiment Integration, *Acta Crystallographica Section A*.
- Ma, S.Z., 2012, Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy, *Materials Science and Engineering A*, s. 480-486.
- Middleburgh, S., King, D., Lumpkin, G., Cortie, M., Edwards, L., 2014, Segregation and migration of species in the CrCoFeNi high entropy alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, s. 179-182.
- Miracle, D.B., Senkov, O.N., 2017, A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts, *Acta Materialia*, 122
- Nagase, T., Todai, M., Nakano, T., 2020, Liquid Phase Separation in Ag-Co-Cr-Fe-Mn-Ni, Co Cr-Cu-Fe-Mn-Ni and Co-Cr-Cu-Fe-Mn-Ni-B High Entropy Alloys for Biomedical Application, *Crystals*, s. 1-20.
- Otto, F., Dlouhý, A., Pradeep, K.G., Kuběnová, M., Raabe, D., Eggeler, G., George, E.P., 2016, Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures. *Acta Materialia*, s. 40-52.
- Pickering, E., Jones, N., 2016, High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*, s. 183-202.
- Pickering, E., Stone, H., N. Jones, N., 2015, Fine-scale precipitation in the high-entropy alloy Al<sub>0.5</sub>CrFeCoNiCu. *Materials Science and Engineering: A*, s. 65-71.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Rajesh G., Vana V., A parabolic model to estimate ternary thermodynamic properties from the corresponding binary data, *Calphad*, s. 509-519.
- Senkov, O.N., Miller, J.D., Miracle, D.B., Woodward, C. 2015. Accelerated exploration of multi-principal element alloys with solid solution phases, *NATURE COMMUNICATIONS*.
- Senkov, O., Miller, J., Miracle, D., Woodward, C., 2015, Accelerated exploration of multi-principal element alloys with solid solution phases. *Nature communications*.
- Senkov, O., Wilks, G., Miracle, D., Chuang, C., Liaw G., 2010, Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, s. 1758-1765.
- Tong, C. J., 2005, Microstructure characterization of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements, *Metallurgical and Materials Transactions A*, s. 881–893.
- Tsai, M. H., Yeh, J. W., 2014, High-Entropy Alloys: A Critical Review, *Materials Research Letters*, s. 107-123.
- Tsai, K.Y., Tsai, M.H., Yeh, J.W., 2018, Sluggish diffusion in Co–Cr–Fe–Mn–Ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, s. 4887-4897.
- Wang, W., Wang, W., Yeh, J.W., 2014, Phases, microstructure and mechanical properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high-entropy alloys at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds* s. 143–152.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Wani, I., Bhattacharjee, T., Sheikh, S., Lu, Y., & Chatterjee, S., & Guo, S., Bhattacharjee, P. & Tsuji, N., 2017, Effect of severe cold-rolling and annealing on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi 2.1 eutectic high entropy alloy, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Xie, L., Brault, P., Thomann, A.L., Bauchire, J.M., 2013, AlCoCrCuFeNi high entropy alloy cluster growth and annealing on silicon: A classical molecular dynamics simulation study, Applied Surface Science, s. 810-816.
- Xiong, T., Zheng, S., Pang, J., Ma, X., 2020, High-strength and high-ductility AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy achieved via precipitation strengthening in a heterogeneous structure, Scripta Materialia, s. 336-340.
- Yeh, J. W., 2004, Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes, Advanced Engineering Materials, s. 299–303.
- Yeh, J. W., 2006, Recent progress in high entropy alloys. Annales de Chimie Science des Matériaux, s. 633-648.
- Yin, Y., Tan, Q., Wang, T., Kent, D., Mo, N., Bermingham, M., Li, H., Zhang, M., 2020, Eutectic modification of Fe-enriched high-entropy alloys through minor addition of boron, Journal of Materials Science, s. 14571–14587.
- Zhang, F., Zhang, C., Chen, S.L., Zhu, J., Cao, W.S., Kattner, U.R. 2014. An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations, CALPHAD, s. 1-10.

## ÖZGEÇMİŞ

