

**HAVACILIK UYGULAMALARINA YÖNELİK YENİLİKÇİ YÜKSEK  
ENTROPİLİ SÜPERALAŞIMLARIN TASARIMI, ÜRETİMİ VE  
KARAKTERİZASYONU**

**Rifat YILMAZ**

**Doktora Tezi**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Erhan AYAS**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Haziran 2021**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 20DRP026 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## ÖZET

# HAVACILIK UYGULAMALARINA YÖNELİK YENİLİKÇİ YÜKSEK ENTROPİLİ SÜPERALAŞIMLARIN TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Rifat YILMAZ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2021

Danışman: Doç. Dr. Erhan AYAS

Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA), geleneksel alaşımlardan farklı olarak en az 5 elementin eşmolar oranda biraraya getirilmesi ile elde edilen, mühendislik tasarımları için faydalı özellikler sergileme potansiyeline sahip çok bileşenli alaşım sistemleridir. Yüksek sıcaklık mukavemeti sergileyen refrakter YEA'lar (RYEA) ise, düşük emisyonlu ve verimli havacılık motorlarının üretimi için süperalaşımlara alternatif bir malzeme olarak kullanım potansiyeli taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, detaylı bir literatür araştırması yapılmış ve bugüne kadar çalışılan RYEA'ların üretim koşulları, ikincil işlem parametreleri ve mekanik-metalurjik test sonuçlarını içeren bir veritabanı oluşturulmuştur. Veritabanında yapılan analizler sonucunda Mo, Nb, Ti, W, V ve Zr elementleri ile alaşım tasarımı yapılmasına karar verilmiştir. Termodinamik ve empirik hesaplamalar sonucunda NbTiWVZr ve MoNbTiWV eşmolar RYEA'lar ile  $Nb_{22.5}Ti_{22.5}W_{10}V_{22.5}Zr_{22.5}$  kompleks konsantre alaşımı (KKA) deneysel olarak üretilmiş ve ikincil işlemlerin etkisi de araştırılmıştır.

XRD analizlerinde üretilen numunelerin döküm halde hacim merkezli kübik, ısıtım işlem sonrası ise bazı kompleks fazlar içerdiği anlaşılmıştır. Alaşımların dentritik bir mikroyapıya sahip olduğu görülmüş, ısıtım işlem sonrası dentritler arası bölgelerde Zr segregasyonu saptanmıştır. NbTiWVZr ve  $Nb_{22.5}Ti_{22.5}W_{10}V_{22.5}Zr_{22.5}$  alaşımlarında 600°C sıcaklıklara kadar nikel süperalaşımlara göre daha iyi akma dayanımı (1000-1100 MPa) ölçülmüştür. Alaşımların 800°C sıcaklıkta ise oksitlenme hızının arttığı ve mukavemetlerinin CM247C ve CMSX-4'e göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Yüksek Entropili Alaşım, Süperalaşım, Vakum Ark Ergitme, Refrakter Yüksek Entropili Alaşım.

## ABSTRACT

### DESIGN, PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF NOVEL HIGH ENTROPY SUPERALLOYS FOR AVIATION APPLICATIONS

Rifat YILMAZ

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erhan AYAS

High Entropy Alloys (HEA) are obtained by mixing at least five elements with equimolar ratio unlike conventional alloys and they are multi component alloy systems exhibiting potential beneficial properties for engineering designs. Refractory HEAs (RHEA) become prominent among high temperature materials for production of low emission and efficient aero engines and their components as an alternative to superalloys.

In this study, literature survey were firstly carried out and production parameters, mechanical and metallurgical evaluation results of the RHEAs were gathered in database. After database analysis, Mo, Nb, Ti, W, V, and Zr elements were choosen for alloy design activities. After thermodynamic and empirical calculations two RHEAs namely NbTiWVZr and MoNbTiWV, and a complex concentrated alloy (CCA)  $Nb_{22,5}Ti_{22,5}W_{10}V_{22,5}Zr_{22,5}$  were determined to be manufactured in experiments and the effect of different heat treatments on the alloy properties were also investigated.

Body centered cubic microstructure were detected in as-cast samples, but after heat treatment process some complex compounds were found in heat treated samples by XRD analysis. Typical dentritic microstructure was seen in all alloys and Zr segregation was identified in heat treated samples. It was observed that the NbTiWVZr ve  $Nb_{22,5}Ti_{22,5}W_{10}V_{22,5}Zr_{22,5}$  alloys exhibited better yield strenght (1000-1100 MPa) up to 600°C compared to superalloys. Moreover the strenght of the alloys were much lower than CM247LC and CMSX-4 nickel based superalloys at 800°C, and oxidation rate was too high at this temperature.

**Keywords:** High Entropy Alloy, Superalloy, Vacuum Arc Melting, Refractory High Entropy Alloy.

## TEŞEKKÜR

Akademik hayatımda büyük bir önem verdiğim doktora çalışmamda, her türlü desteğini benden esirgemeyen, Covid-19 pandemisinin neden olduğu kısıtlamalar nedeniyle deneysel çalışmalar esnasında önüme çıkan maddi manevi her türlü zorluk karşısında pozitif yaklaşımıyla beni motive eden, yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Erhan AYAS’a çok teşekkür ederim.

16 Nisan 2021 günü elim bir hastalık nedeniyle aramızdan ayrılan merhum jüri üyesi Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK hocamı, verdiği desteklerden ve tavsiyelerden dolayı minnetle anıyor ve yad ediyorum.

Numune üretimi, SEM/EDS çekimleri ve XRD analizlerinde yardımcı olan Araş. Gör. Kübra GÜRCAN’a teşekkür ederim.

Numune üretimleri için ham malzeme ve ergitme cihazı yedek parça tedariklerinde desteğini esirgemeyen Tusaş Motor Sanayii A.Ş. (TEI) Teknoloji Programları Müdürü Güray AKBULUT’a,

Basma numunelerinin kesilmesinde, taşlanması ve oksidasyon testlerinde yardımcı olan TEI teknisyenleri Mehmet YÜKSEL, Göksel ÖREN, Mahmut Naci UĞUR ve Nusret Emre GÜNDÜZ’e,

Metalurjik inceleme ve basma testlerinde yardımcı olan TEI Malzeme ve Proses Geliştirme Laboratuvarı personeline,

Tecrübesiyle ihtiyaç duyduğum her konuda destek veren TEI Kıdemli Uzman Mühendisi Aydemir GÜNAYDIN’a çok teşekkür ederim.

Bana çocukluğumdan itibaren disiplinli çalışmayı, saygıyı ve sevgiyi prensip edinmeyi öğreten değerli anne ve babam ile tez çalışmaları esnasında bir sağlıkçı olarak pandemiyle mücadele ederken dahi benden desteğini esirgemeyen değerli eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Rifat YILMAZ

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Rifat YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| BAŞLIK SAYFASI .....                                                     | i    |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....                                               | ii   |
| ÖZET .....                                                               | iii  |
| ABSTRACT.....                                                            | iv   |
| TEŞEKKÜR .....                                                           | v    |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....                         | vi   |
| İÇİNDEKİLER.....                                                         | vii  |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                    | xi   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                    | xiii |
| GÖRSELLER DİZİNİ .....                                                   | xvii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                      | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1    |
| 2. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR VE MALZEME TEKNOLOJİSİ.....                     | 4    |
| 2.1. Gaz Türbinli Motorlar ve Çalışma Prensibi.....                      | 4    |
| 2.2. Türbin Kanatçıkları ve Çalışma Koşulları .....                      | 5    |
| 2.3. Geleneksel Türbin Kanatçık Alaşımları ve Üretim Teknolojileri ..... | 5    |
| 3. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR.....                                       | 9    |
| 3.1. Yüksek Entropili Alaşım Tanımlamaları .....                         | 10   |
| 3.1.1. Entropi bazlı tanım .....                                         | 10   |
| 3.1.2. Kompozisyon bazlı tanım .....                                     | 10   |
| 3.2. Yüksek Entropili Alaşım Sınıflandırmaları .....                     | 10   |
| 3.2.1. Genel sınıflandırma .....                                         | 10   |
| 3.2.2. Birinci nesil yüksek entropili alaşımlar .....                    | 11   |
| 3.2.2.1. YMK kristal yapılı birinci nesil YEA'lar.....                   | 11   |
| 3.2.2.2. HMK kristal yapılı birinci nesil YEA'lar.....                   | 11   |
| 3.2.2.3. HSP kristal yapılı birinci nesil YEA'lar .....                  | 12   |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3. İkinci nesil yüksek entropili alaşımlar (kompleks konsantre alaşımlar).....      | 12 |
| 3.2.3.1. Çökelti ile sertleştirilen ikinci nesil YEA'lar .....                          | 12 |
| 3.3. Yüksek Entropili Alaşım Tasarım Yöntemleri .....                                   | 13 |
| 3.3.1. Empirik yaklaşımlar .....                                                        | 13 |
| 3.3.1.1. Karışım entalpisi ve ortalama atom boyut farklılığı.....                       | 14 |
| 3.3.1.2. $\Omega$ kriteri.....                                                          | 15 |
| 3.3.1.3. Valans elektron konsantrasyonu.....                                            | 16 |
| 3.3.1.4. Atom başına ortalama gezici elektron sayısı.....                               | 17 |
| 3.3.1.5. $\Phi$ kriteri.....                                                            | 17 |
| 3.3.2. SISO kolerasyonu .....                                                           | 18 |
| 3.3.3. Termodinamik hesaplamalar .....                                                  | 19 |
| 3.4. Yüksek Entropili Alaşım Üretim Yöntemleri.....                                     | 21 |
| 3.4.1. Sıvı formda üretim yöntemleri .....                                              | 21 |
| 3.4.2. Katı formda üretim yöntemleri.....                                               | 22 |
| 3.4.3. Gaz formda üretim yöntemleri .....                                               | 23 |
| 3.5. Yüksek Sıcaklık Uygulamalarına Yönelik Yüksek Entropili Alaşımlar .....            | 24 |
| 3.5.1. 3d geçiş metali içeren YEA ve KKA'lar .....                                      | 24 |
| 3.5.2. Refrakter metal içeren YEA ve KKA'lar.....                                       | 28 |
| 4. ALAŞIM TASARIM ÇALIŞMALARI.....                                                      | 32 |
| 4.1. Veritabanı Analizi ve Çalışılacak Elementlerin Seçimi.....                         | 32 |
| 4.1.1. Element kullanım sıklıklarının belirlenmesi.....                                 | 33 |
| 4.1.2. Element maliyet analizi.....                                                     | 38 |
| 4.1.3. Literatür çıkarımları ve tasarım için element seçimi.....                        | 38 |
| 4.2. RYEA ve KKA Tasarımları .....                                                      | 40 |
| 4.2.1. Element eksiltme yöntemi ile MoNbTiWVZr RYEA ve türevlerinin hesaplamaları ..... | 40 |
| 4.2.1.1. Empirik hesaplamalar .....                                                     | 40 |
| 4.2.1.2. CALPHAD hesaplamaları.....                                                     | 42 |
| 4.2.2. NbTiWVZr RYEA ve kompozisyonel türevlerinin hesaplamaları.....                   | 44 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2.1. <i>Empirik hesaplamalar</i> .....                             | 44 |
| 4.2.2.2. <i>CALPHAD hesaplamaları</i> .....                            | 47 |
| 4.3. Sonuç .....                                                       | 49 |
| 5. MALZEME VE METOTLAR .....                                           | 50 |
| 5.1. Kullanılan Ham Malzemeler .....                                   | 50 |
| 5.2. Ergitme Öncesi Hazırlıklar .....                                  | 50 |
| 5.3. Numunelerin Ergitme İşlemleri .....                               | 52 |
| 5.4. Numunelere Uygulanan İkincil İşlemler .....                       | 53 |
| 5.5. Tez Kapsamında Üretilen Numuneler .....                           | 54 |
| 5.6. Karşılaştırma Amaçlı Kullanılan Nikel Bazlı Süperalaşımalar ..... | 54 |
| 5.7. Numune Hazırlama Yöntemleri.....                                  | 55 |
| 5.8. Oksidasyon testleri .....                                         | 59 |
| 5.9. RYEA ve KKA Numunelerin Karakterizasyonları .....                 | 60 |
| 5.9.1. Kimyasal kompozisyon analizleri .....                           | 60 |
| 5.9.2. Yoğunluk ölçümleri.....                                         | 61 |
| 5.9.3. Faz analizleri.....                                             | 61 |
| 5.9.4. Mikroyapı incelemeleri .....                                    | 63 |
| 5.9.5. Sertlik ölçümleri .....                                         | 64 |
| 5.9.6. Basma testleri.....                                             | 64 |
| 5.9.7. Oksidasyon testleri .....                                       | 65 |
| 6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....                                           | 66 |
| 6.1. Metalurjik incelemeler.....                                       | 66 |
| 6.1.1. Kimyasal kompozisyon .....                                      | 66 |
| 6.1.2. Yoğunluk .....                                                  | 68 |
| 6.1.3. Optik mikroyapılar .....                                        | 69 |
| 6.1.3.1. <i>Döküm sonrası optik mikroyapılar</i> .....                 | 69 |
| 6.1.3.2. <i>İkincil işlemler sonrası optik mikroyapılar</i> .....      | 74 |
| 6.1.4. SEM ve EDS incelemeleri .....                                   | 79 |
| 6.1.4.1. <i>Döküm sonrası SEM ve EDS sonuçları</i> .....               | 79 |
| 6.1.4.2. <i>Isıl işlem sonrası SEM ve EDS sonuçları</i> .....          | 84 |
| 6.1.5. Faz analizleri.....                                             | 86 |
| 6.1.5.1. <i>Döküm sonrası oluşan fazlar</i> .....                      | 86 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1.5.2. İkincil işlemler sonrası oluşan fazlar.....                 | 87  |
| 6.2. Mekanik incelemeler .....                                       | 91  |
| 6.2.1. Makrosertlik .....                                            | 91  |
| 6.2.2. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık mukavemetleri .....          | 92  |
| 6.2.2.1. Tez kapsamında üretilen numunelerin basma test sonuçları    | 92  |
| 6.2.2.2. Nikel bazlı süperalaşım numunelerin basma test sonuçları .. | 97  |
| 6.2.2.3. Basma testi sonrası numune incelemeleri .....               | 99  |
| 6.2.2.4. Basma test sonuçlarının kıyaslamaları.....                  | 100 |
| 6.3. Oksidasyon Davranışı İncelemeleri .....                         | 102 |
| 7. GENEL SONUÇLAR.....                                               | 106 |
| KAYNAKÇA.....                                                        | 112 |
| EKLER                                                                |     |
| ÖZGEÇMİŞ                                                             |     |

## TABLÖLAR DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1.</b> EK-2 veritabanında yer alan tüm RYEA ve KKA'lar ile minimum akma dayanımı ve yüzde uzama değerlerini sağlayan RYEA ve KKA'lar için kullanılan refrakter element sıklıkları ve saptanan fazlar ile kristal yapılar ..... | 35 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Tez çalışması kapsamında tedarik edilen elementlerin ortalama tedarik birim maliyetleri.....                                                                                                                            | 38 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Element eksiltme yöntemi ile türetilen eşmolar RYEA'lara ait empirik hesaplama sonuçları .....                                                                                                                          | 41 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Element eksiltme yöntemi ile türetilen eşmolar RYEA'lara ait Thermocalc ile yapılan CALPHAD hesaplama sonuçları .....                                                                                                   | 42 |
| <b>Tablo 4.5.</b> NbTiWVZr RYEA'nın farklı kompozisyonlarına ait (KKA) empirik hesaplama sonuçları .....                                                                                                                                  | 45 |
| <b>Tablo 4.6.</b> NbTiWVZr RYEA'nın farklı kompozisyonlarına ait Thermocalc ile yapılan hesaplama sonuçları .....                                                                                                                         | 48 |
| <b>Tablo 5.1.</b> Alaşımların üretiminde kullanılan toz formundaki saf elementlerin alındığı firma, saflıkları ve boyutları (TLS:TLS Tecknik GmbH, CRM: China Rare Metal Material Co., Ltd) .....                                         | 50 |
| <b>Tablo 5.2.</b> Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin bilgileri .....                                                                                                                                                           | 54 |
| <b>Tablo 5.3.</b> RYEA ve KKA Numunelerin dağlamasında kullanılan dağlama solüsyonları ve dağlama metodu.....                                                                                                                             | 56 |
| <b>Tablo 6.1.</b> NbTiWVZr RYEA üzerinde yapılan O, N, H ve C, S elementel analiz sonuçları.....                                                                                                                                          | 66 |
| <b>Tablo 6.2.</b> NbTiWVZr, Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait XRF ölçüm sonuçları .....                                                             | 67 |
| <b>Tablo 6.3.</b> NbTiWVZr, Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait döküm ve ikincil işlemler sonrası yoğunluk ölçüm sonuçları .....                      | 69 |
| <b>Tablo 6.4.</b> NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait döküm sonrası EDS analiz sonuçları.....                                                                                                                                                 | 81 |
| <b>Tablo 6.5.</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> (KKA-1) alaşımına ait döküm sonrası EDS analiz sonuçları .....                                                               | 82 |

|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 6.6.</b> MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait döküm sonrası EDS analiz sonuçları.....                                                                                                                                | 83 |
| <b>Tablo 6.7.</b> 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanmış NbTiWVZr (RYEA-1_HT) alaşımına ait EDS analiz sonuçları.....                                                                                         | 85 |
| <b>Tablo 6.8.</b> 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanmış MoNbTiWVZr (RYEA-2_HT) alaşımına ait EDS analiz sonuçları .....                                                                                      | 86 |
| <b>Tablo 6.9.</b> NbTiWVZr, Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait döküm ve ikincil işlemler sonrası makrosertlik ölçüm sonuçları ..... | 91 |
| <b>Tablo 6.10.</b> Farklı tarihlerde üretilen NbTiWVZ alaşımına ait makrosertlik ve yoğunluk ölçüm sonuçları.....                                                                                                        | 91 |
| <b>Tablo 6.11.</b> Basma testi sonrası RYEA ve KKA numunelere ait ortalama akma dayanımı ile maksimum gerilme ve yüzde uzamalar.....                                                                                     | 92 |
| <b>Tablo 6.12.</b> Basma testi sonrası nikel bazlı süperalaşım numunelere ait ortalama akma dayanımı ile maksimum gerilme ve yüzde uzamalar .....                                                                        | 97 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Gaz türbinli motora ait modüller .....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 4  |
| Şekil 2.2. Türbin giriş sıcaklığının (T4) modern gaz türbin motorlarında yıllara göre değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                          | 6  |
| Şekil 2.3. Mar M 200 alaşımında polikristal, yönlendirilmiş katılaşma ve tek kristal döküm ile üretilen numunelerin sürünme dayanımı açısından karşılaştırması .....                                                                                                                                                                         | 8  |
| Şekil 3.1. $\delta$ ve $\Delta H_{\text{karışım}}$ 'a göre oluşan YEA kristal yapıları, sembollerin anlamları: içi tamamen boş işaretler tek fazlı YMK yapıyı, içi x ile ifade edilen işaretler tek fazlı HMK yapıyı, içinin yarısı dolu işaretler YMK+HMK yapıyı, içi dolu işaretler ise iki veya çok fazlı HMK yapıyı belirtmektedir ..... | 15 |
| Şekil 3.2. $\Omega$ - $\delta$ - $\Delta H_{\text{karışım}}$ parametrelerine göre YEA'lerde oluşan fazlar.....                                                                                                                                                                                                                               | 16 |
| Şekil 3.3. YEA'lerde VEK değerine göre saptanan kristal yapılar .....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 17 |
| Şekil 3.4. CALPHAD metodu ile alaşım tasarım akış şeması.....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 20 |
| Şekil 3.5. MoNbTaWTi ve MoNbTaWV RYEA'larına ait sıcaklığa bağlı oluşan fazlar ve molar oranlarının değişim grafiği .....                                                                                                                                                                                                                    | 21 |
| Şekil 3.6. YEA üretim yöntemleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 22 |
| Şekil 3.7. Mekanik alaşımlamada kullanılan öğütücüler: a) Bilyalı b) Atritör .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 23 |
| Şekil 3.8. Sıcaklığa bağlı 3d geçiş metal ailesi YEA ve KKA'ların çekme yönündeki (*Basma yönünde olanlar) akma dayanımlarının bazı geleneksel süperalaşımlar ile kıyaslaması .....                                                                                                                                                          | 26 |
| Şekil 3.9. $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$ 3d geçiş metali KKA'ya ait basma (*) ve çekme yönünde sıcaklığa bağlı akma mukavemeti değişimi .....                                                                                                                                                                                                         | 27 |
| Şekil 3.10. Sıcaklığa bağlı 3d geçiş metal ailesi YEA ve KKA'ların çekme yönündeki kopma uzamalarının bazı geleneksel süperalaşımlar ile kıyaslaması.....                                                                                                                                                                                    | 27 |
| Şekil 3.11. Sıcaklığa bağlı refrakter metal içeren YEA ve KKA'ların basma yönündeki akma dayanımlarının bazı süperalaşımların çekme yönündeki akma dayanımları ile kıyaslaması .....                                                                                                                                                         | 30 |

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.12.</b> Sıcaklığa bağlı Refrakter Metal Ailesi YEA/KKA'ların basma yönündeki yüzde uzamalarının bazı süperalaşımların çekme yönündeki kopma uzamaları ile kıyaslaması .....                     | 31 |
| <b>Şekil 4.1.</b> RYEA ve KKA'lar ile bazı nikel bazlı süperalaşımlara ait yaklaşık 1000°C sıcaklıktaki basma ve çekme yönündeki akma dayanımları ile yaklaşık 25°C oda sıcaklığındaki yüzde uzamalar..... | 34 |
| <b>Şekil 4.2.</b> NbTiWVZr eşmolar RYEA'ya ait Thermocalc'de elde edilen sıcaklığa bağlı faz değişim grafiği .....                                                                                         | 43 |
| <b>Şekil 4.3.</b> MoNbTiWV eşmolar RYEA'ya ait Thermocalc'de elde edilen sıcaklığa bağlı faz değişim grafiği .....                                                                                         | 44 |
| <b>Şekil 6.1.</b> NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı:10x).....                                                                                                       | 70 |
| <b>Şekil 6.2.</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> (KKA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı:10x).....                      | 70 |
| <b>Şekil 6.3.</b> MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı:10x).....                                                                                                       | 71 |
| <b>Şekil 6.4.</b> NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 200x).....                                                                                                     | 72 |
| <b>Şekil 6.5.</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> (KKA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 200x).....                    | 72 |
| <b>Şekil 6.6.</b> MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 200x).....                                                                                                     | 73 |
| <b>Şekil 6.7.</b> NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                                                                       | 74 |
| <b>Şekil 6.8.</b> NbTiWVZr (RYEA-1_HT) alaşımına ait 1400°C-24 saat ısıtıl işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                                              | 75 |
| <b>Şekil 6.9.</b> NbTiWVZr (RYEA-1_HT-2) alaşımına ait 1200°C-12 saat ısıtıl işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                                            | 75 |
| <b>Şekil 6.10.</b> NbTiWVZr (RYEA-1_HT-3) alaşımına ait 1200°C-24 saat ısıtıl işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                                           | 76 |
| <b>Şekil 6.11.</b> NbTiWVZr (RYEA-1_HIP) alaşımına ait 1200°C-4 saat-100 MPa sıcak izostatik presleme işlemi sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                  | 76 |

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.12</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> (KKA-1) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x) .....                       | 77 |
| <b>Şekil 6.13.</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> (KKA-1_HT) alaşımına ait 1400°C-24 saat ısıtıl işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x) . | 78 |
| <b>Şekil 6.14.</b> MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                                                                                        | 78 |
| <b>Şekil 6.15.</b> MoNbTiWV (RYEA-2_HT) alaşımına ait 1400°C-24 saat ısıtıl işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x).....                                                                               | 79 |
| <b>Şekil 6.16.</b> NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait döküm sonrası SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x).....                                                                                                         | 80 |
| <b>Şekil 6.17.</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> (KKA-1) alaşımına ait döküm sonrası SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x) .....                       | 82 |
| <b>Şekil 6.18.</b> MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x).....                                                                                                       | 83 |
| <b>Şekil 6.19.</b> 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanmış NbTiWVZr (RYEA-1_HT) alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x) .....                                                                 | 84 |
| <b>Şekil 6.20.</b> 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanmış MoNbTiWV (RYEA-2_HT) alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x) .....                                                                 | 85 |
| <b>Şekil 6.21.</b> NbTiWVZr, Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait döküm sonrası XRD grafikleri.....                                       | 87 |
| <b>Şekil 6.22.</b> NbTiWVZr alaşımının döküm ve ikincil işlem sonrası XRD grafikleri.....                                                                                                                                    | 88 |
| <b>Şekil 6.23.</b> Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> alaşımının döküm ve ikincil işlem sonrası XRD grafikleri .....                                                 | 90 |
| <b>Şekil 6.24.</b> MoNbTiWV alaşımının döküm ve ikincil işlem sonrası XRD grafikleri.....                                                                                                                                    | 90 |
| <b>Şekil 6.25.</b> Oda sıcaklığında RYEA ve KKA numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....                                                                                                                | 94 |
| <b>Şekil 6.26.</b> 600°C sıcaklıkta RYEA ve KKA numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....                                                                                                                | 94 |

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 6.27.</b> 800°C sıcaklıkta RYEA ve KKA numunelere ait gerilme-birim şekil<br>değiştirme grafikleri.....                                                                         | 95  |
| <b>Şekil 6.28.</b> Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numunelerin benzer<br>kompozisyona sahip bazı alaşımlar ile sıcaklığa bağlı akma<br>mukavemeti kıyaslaması.....                   | 96  |
| <b>Şekil 6.29.</b> Oda sıcaklığında nikel süperalaşım numunelere ait gerilme-birim şekil<br>değiştirme grafikleri.....                                                                   | 98  |
| <b>Şekil 6.30.</b> 600°C sıcaklıkta nikel süperalaşım numunelere ait gerilme-birim şekil<br>değiştirme grafikleri.....                                                                   | 99  |
| <b>Şekil 6.31.</b> 800°C sıcaklıkta nikel süperalaşım numunelere ait gerilme-birim şekil<br>değiştirme grafikleri.....                                                                   | 99  |
| <b>Şekil 6.32.</b> Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numuneler ile nikel<br>süperalaşımların oda, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda ortalama basma<br>akma dayanımlarının kıyaslaması.....  | 101 |
| <b>Şekil 6.33.</b> Tez kapsamında üretilen numuneler ile nikel süperalaşımların oda<br>sıcaklığı ve 600°C’de ortalama yüzde uzamalarının kıyaslaması.....                                | 102 |
| <b>Şekil 6.34.</b> 800°C sıcaklıkta 6 saatlik çevrimler ile gerçekleştirilen oksidasyon<br>testlerinde tüm numunelerdeki spesifik ağırlık değişim sonuçları ...                          | 103 |
| <b>Şekil 6.35.</b> 800°C sıcaklıkta 6 saatlik çevrimler ile gerçekleştirilen oksidasyon<br>testlerinde nikel bazlı süperalaşım numunelerdeki spesifik ağırlık<br>değişim sonuçları ..... | 103 |

## GÖRSELLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Görsel 2.1.</b> Dövme yöntemi ile üretilmiş türbin kanatçıkları.....                                                                                       | 6  |
| <b>Görsel 5.1.</b> Toz hammalzemelerin tartıldığı hassas terazi (solda) tartılan tozlara<br>ait görüntü (sağda) .....                                         | 50 |
| <b>Görsel 5.2.</b> Toz preslemede kullanılan kalıp parçaları ve agat havan içinde<br>presleme öncesi karıştırılmış tozlar .....                               | 51 |
| <b>Görsel 5.3.</b> Tek eksenli pres (solda), preslenmiş pelet (sağda) .....                                                                                   | 51 |
| <b>Görsel 5.4.</b> Numune üretimlerinde kullanılan vakum ark ergitme cihazı .....                                                                             | 52 |
| <b>Görsel 5.5.</b> RYEA/KKA pelet/numune ve oksijen-alıcı: ergitme öncesi (solda),<br>ergitme sonrası (sağda) .....                                           | 53 |
| <b>Görsel 5.6.</b> Numunelerin homojenizasyon ısıtma işlemlerinin yapıldığı tüp fırın.....                                                                    | 53 |
| <b>Görsel 5.7.</b> Karşılaştırma amaçlı Tübitak MAM'dan tedarik edilen yönlendirilmiş<br>katılaşma (üstte) ve tek kristal (altta) döküm çekme çubukları ..... | 55 |
| <b>Görsel 5.8.</b> Buton numune alt-üst yüzey zımparalaması (solda), zımpara sonrası<br>numune üst yüzeyi (sağda).....                                        | 55 |
| <b>Görsel 5.9.</b> Mikroyapı incelemelerinde buton numunelerin bakalite alınma şekli                                                                          | 56 |
| <b>Görsel 5.10.</b> SEM incelemeleri öncesinde bakalite alınan numunelerin kaplandığı<br>altın kaplama cihazı .....                                           | 57 |
| <b>Görsel 5.11.</b> Basma test numunelerinin kesiminde kullanılan tel erozyon (solda)<br>ve lazer mikrojet (sağda) tezgahları .....                           | 57 |
| <b>Görsel 5.12.</b> Buton numuneden kesilen basma test numuneleri (üstte), kesim<br>sonrası buton numune (altta).....                                         | 58 |
| <b>Görsel 5.13.</b> Basma numunelerinin taşlanması için kullanılan satıh taşlama tezgahı<br>(solda) ve taşlanmış numune ölçüleri (sağda).....                 | 58 |
| <b>Görsel 5.14.</b> Oksidasyon testi öncesi numunelerin yüzey iyileştirmeleri için<br>kullanılan tezgah .....                                                 | 59 |
| <b>Görsel 5.15.</b> Yüzey iyileştirme öncesi ve sonrası 5 gramlık buton numune<br>görüntüleri.....                                                            | 59 |
| <b>Görsel 5.16.</b> Oksidasyon testleri için kullanılan ısıtma işlem fırını.....                                                                              | 60 |
| <b>Görsel 5.17.</b> Numunelerin kimyasal kompozisyon analizlerinde kullanılan XRF<br>cihazı .....                                                             | 60 |
| <b>Görsel 5.18.</b> Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçümünde kullanılan hassas terazi .                                                                        | 61 |

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Görsel 5.19.</b> XRD analizlerinde kullanılan cihazı .....                                                                                                                        | 62  |
| <b>Görsel 5.20.</b> Makrosertlik ölçüm cihazı (solda) ve sertlik ölçümü sonrası buton numune ve yüzeyindeki sertlik izleri (sağda) .....                                             | 64  |
| <b>Görsel 5.21.</b> Basma testlerinde kullanılan cihaz (üstte) ve basma düzeneği (altta). ....                                                                                       | 65  |
| <b>Görsel 6.1.</b> Basma testi sonrası numune görüntüleri: RYEA-1 oda sıcaklığı testi sonrası (solda), RYEA-1 600°C testi sonrası (ortada), RYEA-2 800°C testi sonrası (sağda) ..... | 100 |
| <b>Görsel 6.2.</b> 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyon testi öncesi numunelerin görüntüsü.....                                                                              | 104 |
| <b>Görsel 6.3.</b> 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyon testlerinde her çevrim sonrası numune görüntüleri.....                                                               | 105 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                  |                                                            |
|------------------|------------------------------------------------------------|
| $\alpha$         | : Alfa-Zr fazı                                             |
| $\gamma$         | : Gama Fazı                                                |
| $\gamma'$        | : Gama Üssü Fazı-Ni <sub>3</sub> (Al,Ti)                   |
| $\Omega$         | : YEA katı çözelti oluşumu tahmininde kullanılan parametre |
| $\delta$         | : Ortalama Atomik Boyut Farklılığı                         |
| $\Phi$           | : YEA faz sayısı tahmininde kullanılan parametre           |
| $\chi$           | : Elektronegativite                                        |
| $\rho$           | : Yoğunluk                                                 |
| B2               | : Düzenli Hacim Merkezli Kübik Yapı                        |
| CALPHAD          | : Calculation of Phase Diagrams                            |
| CRM              | : China Rare Metal                                         |
| ÇBEA             | : Çok Bazlı Element Alaşımı                                |
| GE               | : General Elektrik                                         |
| E                | : Elastik Modül                                            |
| EDS              | : Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi                  |
| G                | : Gibbs Serbest Enerjisi                                   |
| H                | : Entalpi                                                  |
| HCl              | : Hidroklorik Asit                                         |
| HF               | : Hidrofilorik Asit                                        |
| HIP              | : Sıcak izostatik Presleme                                 |
| HMK              | : Hacim Merkezli Kübik                                     |
| HNO <sub>3</sub> | : Nitrik Asit                                              |
| HRC              | : Rockwell Sertliği                                        |
| HSP              | : Hegzagonal Sıkı Paket                                    |
| H <sub>2</sub> O | : Su                                                       |
| ing.             | : İngilizce                                                |
| KKA              | : Kompeks Konsantre Alaşım                                 |
| L1 <sub>2</sub>  | : Düzenli Yüzey Merkezli Kübik Yapı                        |
| MA               | : Mekanik Alaşımlama                                       |
| MS               | : Magnetron Sıçratma                                       |

|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| PHACOMP | : Faz Hesaplama                     |
| PVD     | : Fiziksel Buhar Biriktirme         |
| r       | : Atomik Yarıçap                    |
| RYEA    | : Refrakter Yüksek Entropili Alaşım |
| S       | : Entropi                           |
| SEM     | : Taramalı Elektron Mikroskobu      |
| SISO    | : Giren Yapı Çıkan Yapı             |
| SPS     | : Spark Plazma Sinterleme           |
| T       | : Sıcaklık                          |
| TEI     | : Tusaş Motor Sanayii A.Ş.          |
| TLS     | : TLS Teknik GmbH                   |
| TRIP    | : Dönüşüm Kaynaklı Plastisite       |
| T4      | : Türbin Gaz Giriş Sıcaklığı        |
| XRD     | : X-Işını Kırınımı                  |
| XRF     | : X-Işını Floresans Spektroskopisi  |
| VEK     | : Valans Elektron Konsantrasyonu    |
| VAE     | : Vakum Ark Ergitme                 |
| VIM     | : Vakum İndüksiyon Ergitme          |
| VAR     | : Vakum Ark Yeniden Ergitme         |
| YEA     | : Yüksek Entropili Alaşım           |
| YMK     | : Yüzey Merkezli Kübik              |

## 1. GİRİŞ

Günümüzde insan hayatını kolaylaştıran hemen hemen bütün mühendislik tasarımlarının üretiminde metal ve alaşımları kullanılmaktadır. İnsanlık, ilk çağlardan bu yana metalik malzemeleri daha mukavemetli bir hale getirebilmek için farklı metaller ile alaşımlayarak kullanmaya çalışmıştır. Bu doğrultuda geçmişten bugüne kadar gelinen süreçte, geleneksel olarak adlandırılan baz alaşımlar ağırlıkça en az % 50 alüminyum, demir, nikel, kobalt ve titanyum gibi (baz) metaller içermektedir. Bu alaşımlar diğer minör metal elementlerin ilavesi ile baz elementten oluşan matris içerisinde katı eriyik veya çökelti oluşumu gibi mekanizmalar ile mukavemetlenmektedir. Fakat gelişen teknoloji ile birlikte, geleneksel alaşımların dayanım sınırları giderek zorlanmakta ve bu nedenle bilim insanları her geçen gün daha mukavemetli ve uzun ömürlü alaşımlar tasarlamak ve üretmek için çaba sarf etmektedir. Özellikle bu çabanın havacılık endüstrisindeki ağır servis koşullarına yönelik malzeme geliştirme konusunda daha belirgin ortaya çıktığı görülmektedir.

Havacılık tarihindeki ilk uçuş deneyimini 1903 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde başarı ile gerçekleştiren Wright kardeşler, uçaklarında bir pervaneyi tahrik eden alüminyum alaşımdan yapılmış pistonlu motor kullanmışlardır. Fakat pistonlu motorların güç verdiği pervaneli uçak motorlarında, saatte 400 mil ve üzerindeki hızlarda pervane veriminin düşmesi ve yüksek irtifalarda düşük hava basıncı nedeniyle pistonlu motor gücünün azalması gibi problemler ile karşılaşmıştır. Bu nedenle, bilim insanları uçaklar için yeni motorlar geliştirmeye çalışmıştır. Bu kapsamda daha yüksek hız ve irtifalara çıkabilmek için 1937 yılında İngiltere'de Frank Whittle, Almanya'da ise Dr. Von Ohain tarafından bağımsız olarak ilk gaz türbin motor prototipleri üretilmiştir [1, 2]. Günümüzde sivil ve askeri birçok hava platformuna güç veren turbojet, turbofan, turboprop ve turboşaft motorları keşfedildiği o tarihten bugüne gelişerek gelen modern gaz türbin motorlarının türevleridir.

Havacılıkta kullanılan gaz türbin motorlarının kompresör, yanma odası ve türbin modülündeki parçaların malzeme seçiminde sıcaklık en önemli kriter olsada, sıcaklığın yanı sıra maruz kalınan yük, ömür beklentisi, titreşimli çalışma, oksidasyon dayanımı, hafiflik ve üretilebilirlik gibi kriterler de göz önünde tutulmaktadır [3]. Bir gaz türbinli motorun en ağır çalışma koşulları yanma odası ve türbin kademelerinde meydana gelmekte, bu nedenle buradaki parçaların imalatında yüksek sıcaklık mukavemeti

gösteren demir, nikel ve kobalt bazlı süperalaşımlar kullanılmaktadır [4]. Türbin giriş sıcaklığı (T4), motorun verimini ve yakıt tüketimini doğrudan etkilemekte olup modern askeri motorlarda bu sıcaklık 1482°C sıcaklıklara kadar ulaşmıştır [3]. Uygulanan soğutma ve kaplama teknolojileri ile bu seviyedeki bir T4 sıcaklığına dayanabilecek türbin kanatçığı metal sıcaklığı ise 1300°C'ye sınırlandırılmaktadır. Bu sıcaklık tek kristal dökümle üretilen nikel bazlı süperalaşımların mikroyapılarındaki  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ ) çökelti fazının çözünme sınırıdır (1320°C) [5]. Ayrıca 1200-1300°C sıcaklıkta çalışan bir türbin kanatçığı, çok yüksek dönme hızlarında kanatçık kök bölgesinde 180 MPa'lık bir yüke maruz kalabilmektedir [5]. Dolayısı ile sürünme ve yorulma dayanımı gibi kriterler göz önüne alındığında bir türbin kanatçığından beklenen ömür minimum 10.000 uçuş saati olarak belirlenmektedir [5]. Tüm bu bilgiler, araştırmacıları motor üretici firmaların beklentilerini karşılamak üzere geleneksel nikel bazlı süperalaşımlara alternatif, daha yüksek T4 sıcaklığında çalışabilecek, daha uzun ömürlü alaşımları geliştirmeye motive etmektedir.

İlk olarak 2004 yılında birbirinden bağımsız olarak İngiltere ve Tayvan'da ortaya çıkan iki farklı çalışma, geleneksel baz alaşım anlayışının dışında elementlerin yaklaşık eşit molar oranlarda karıştırılması suretiyle yeni bir alaşım grubunun ortaya çıkmasına yol açmıştır [6, 7]. “Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA)” olarak adlandırılan bu alaşımlar geçen 17 yıllık süreçte sundukları ilgi çekici özellikler ile her yıl gidererek artan sayıda araştırmacının çalışma konusu olmuştur. 2010'lu yıllardan sonra ise YEA araştırmalarında ilave olarak refrakter metal içeren yüksek entropili alaşımlar (RYEA) ve eşmolar olmayan kompleks konsantre alaşımlar (KKA) da çalışılmaya başlanmıştır. Burada RYEA ve KKA'lar, sundukları yüksek sıcaklık mukavemetleri ile nikel bazlı süperalaşımlara alternatif olabilecek bir malzeme adayı olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, RYEA'lar üzerine detaylı bir literatür taraması yapılmış; farklı kompozisyona sahip RYEA'ların üretim koşulları ile mekanik ve metalurjik özellikleri belirlenerek bir veritabanı haline getirilmiştir. Veritabanında yapılan analizler sonucunda mevcut süperalaşımlara göre yüksek sıcaklıklarda nispeten daha fazla mukavemet ve oda sıcaklığında benzer süneklik gösteren RYEA'lardaki elementler ve kullanım sıklıkları belirlenmiştir. Belirlenen elementlerin tedarik maliyetleri ve üretilecek alaşıma olumlu ve olumsuz etkileri göz önüne alınarak Mo, Nb, Ti, W, V ve Zr elementleri ile alaşım tasarımı yapılmasına karar verilmiştir. Buna göre hesaplamalı malzeme bilimi yazılımı

ThermoCalc ve empirik hesaplamalar; eşmolar MoNbTiWVZr altılı RYEA alaşımı ve bunun “element eksiltme” yöntemi ile oluşturulan beşli eşmolar kombinasyonlarına (MoNbTiVZr, MoTiWVZr, NbTiWVZr, MoNbTiWV, MoNbTiWZr, MoNbWVZr) uygulanmıştır. Hesaplamalar neticesinde oluşabilecek faz yapıları belirlenmiş ve Laves fazı içermeyen, katı çözelti oluşum kriterlerini sağlayan NbTiWVZr ve MoNbTiWV eşmolar RYEA’ların ve kompozisyonel varyantlarının çalışılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda NbTiWVZr eşmolar RYEA’nın her bir elementin molar oranları sırasıyla % 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50 olarak değiştirilerek toplam 25 farklı kompozisyona sahip KKA’lar için de empirik ve termodinamik hesaplamaları ilave olarak yapılmıştır. Buna göre Nb<sub>22.5</sub>Ti<sub>22.5</sub>W<sub>10</sub>V<sub>22.5</sub>Zr<sub>22.5</sub> KKA’nın da çalışılması planlanmıştır.

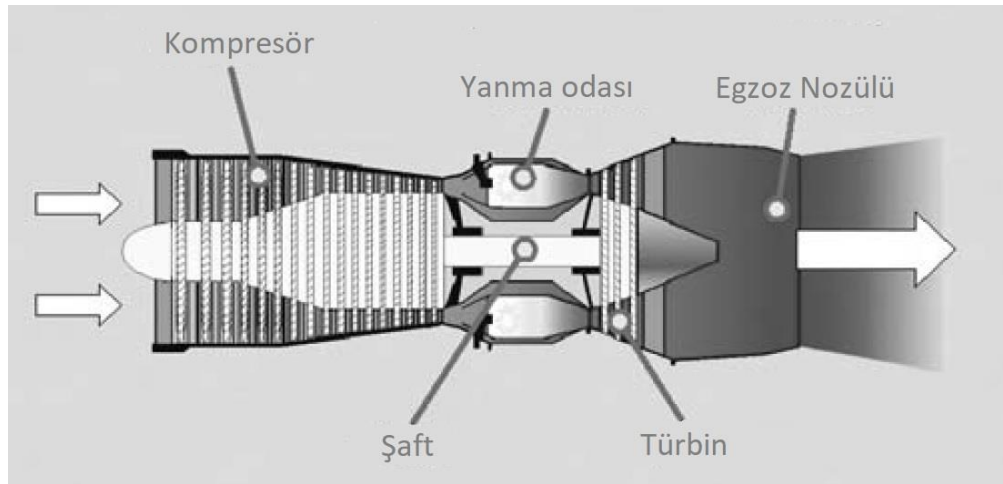
DeneySEL çalışmalarda numunelerin üretimi için saf elementel tozlar tercih edilmiş, hassas terazide tartılan tozlar agat havanda karıştırılarak 5 gramlık peletler halinde preslenmiştir. Vakum Ark Ergitme (VAE) cihazı ile Ti oksijen alıcı kullanılarak numuneler en az 5 tekrarla, çevrilerek ergitilmiştir. Tez kapsamında NbTiWVZr, Nb<sub>22.5</sub>Ti<sub>22.5</sub>W<sub>10</sub>V<sub>22.5</sub>Zr<sub>22.5</sub> ve MoNbTiWV RYEA ve KKA üretimleri gerçekleştirilmiş olup numuneler döküm halinde ve ikincil işlemler sonrası incelemeye tabi tutulmuştur. NbTiWVZr RYEA ile iki farklı ısıt işlemleri ve sıcak izostatik presleme denemesi yapılmıştır. Her üç alaşımın da homojenizasyon ısıt işlemleri 1400°C sıcaklıkta 24 saat boyunca argon atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Arşimet prensibi ile yoğunlukları ve X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) ile kimyasal kompozisyonları ölçülmüş, X-Işını Difraksiyon (XRD) analizi ile kristal yapıları belirlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu vasıtasıyla yapılmış, dendritik segregasyonlar Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisinde (EDS) nokta analizleri ile tespit edilmiştir. Mekanik testler kapsamında numunelerin oda sıcaklığı makro sertlikleri ile oda sıcaklığı, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda basma mukavemetleri ölçülmüştür. Basma testleri aynı zamanda havacılık motoru sıcak bölge parçalarının imalatında kullanılan Inconel 718, CM247LC ve CMSX-4 nikel bazlı süperalaşımlar üzerinde de gerçekleştirilerek bu çalışmada üretilen alaşımlar ile kıyaslanmıştır. Son olarak döküm sonrası RYEA, KKA ve nikel süperalaşım numunelere oksidasyon testleri yapılarak ağırlık değişimleri incelenmiştir.

## 2. GAZ TÜRBLİ MOTORLAR VE MALZEME TEKNOLOJİSİ

Havacılık motorlarında yüksek sıcaklık malzemelerine olan ilk ihtiyaç, egzoz gazı ile tahrik olan turboşarj veya diğer adı ile süperşarj ünitelerinin türbin çarklarının üretimi nedeniyle ortaya çıkmıştır. İlk zamanlar turboşarj türbin çarkı malzemesi olarak basit karbonlu çelikler kullanılsa da korozyon ve yüksek sıcaklık dayanımı için çeliklere Cr, Ni ve Co ilaveleri yapılmış ve 1910-1915’li yıllarda östenitik tip paslanmaz çelikler geliştirilerek daha dayanıklı türbin çarkları imal edilebilmiştir [8]. 1930’lu yılların sonlarında gaz türbinli motorlarında ortaya çıkması ile yüksek sıcaklık mukavemeti gösteren alaşımlara olan ihtiyaç daha da artmıştır. Paslanmaz çeliklere Ni ilavesi ile östenit ( $\gamma$ ) fazının yüksek sıcaklık mukavemeti ve sürünme özelliklerinde avantaj sağladığı anlaşıncı 1940’lı yıllarda ilk süperalaşımlar geliştirilmiştir. Dolayısıyla ilk gaz türbinli motorların sıcak bölge parçaları östenitik paslanmaz çelik ve demir bazlı süperalaşımlardan üretilmiştir. 1950’lere gelindiğinde ise Ni katkısının artması nedeniyle türbin kanatçıkları nikel bazlı süperalaşımlardan imal edilmeye başlanmıştır [9].

### 2.1. Gaz Türbinli Motorlar ve Çalışma Prensibi

Gaz türbinli motorlar temel olarak kompresör, yanma odası ve türbin olmak üzere üç ana modülden meydana gelmektedir. Bu motorlarda radyal veya eksenel kompresör vasıtası ile sıkıştırılan havanın basıncı artırılır ve yanma odasında yakıt ile birlikte yanma sonucunda yüksek sıcaklıkta bir kimyasal enerji oluşur. Türbin kademesinde ise yanma gazları ile ortaya çıkan bu kimyasal enerji mekanik enerjiye dönüştürülerek Brayton termodinamik çevrimi tamamlanır [3]. Şekil 2.1’de gaz türbinli bir turbojet motora ait kesit üzerinden modüller gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1. Gaz türbinli motora ait modüller [4]

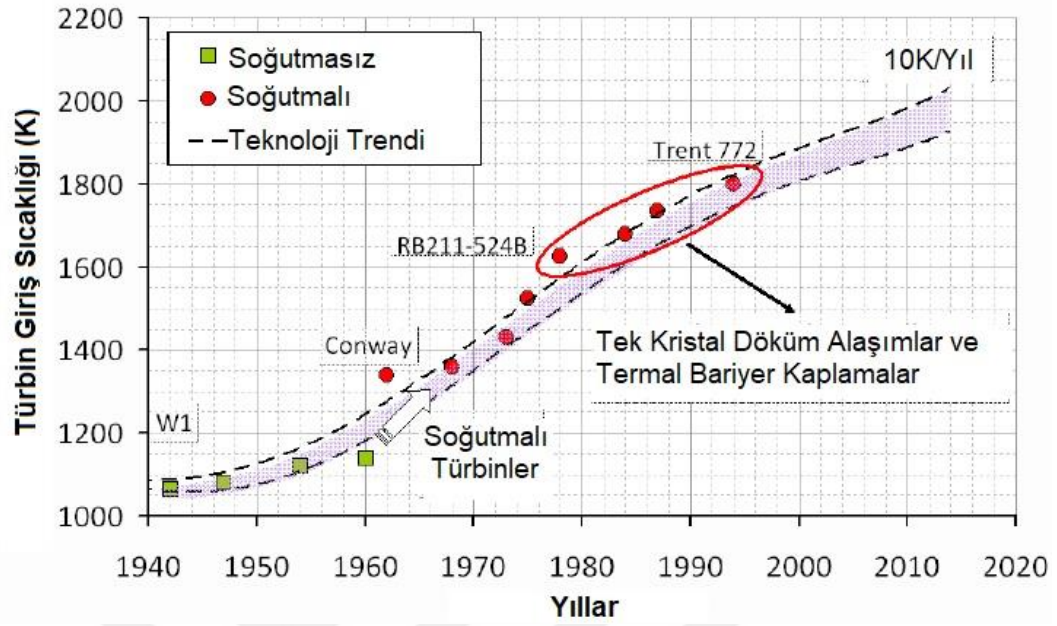
## 2.2. Türbin Kanatçıkları ve Çalışma Koşulları

Gaz türbinli havacılık motorlarında yüksek sıcaklık ( $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ) ve yüklere maruz kalan en kritik parçalar, türbin modülünün birinci kademesini oluşturan rotor ve stator kanatçıklarıdır. Burada özellikle rotor kanatçıkları, merkezkaç kuvvetleri nedeniyle yüksek sıcaklık çekme dayanımı ve sürünme direnci sergilemek zorundadır. Türbin rotor ve stator kanatçıkları sadece yüksek sıcaklık ve yüklere değil aynı zamanda motorun çalışma çevrimi nedeniyle ani sıcaklık değişimlerine de (termal şok) maruz kalmaktadır. Ayrıca yanma gazlarının ihtiva ettiği oksitleyici ve sülfürleyici bileşikler, oksidasyon ve korozyona neden olmaktadır. Ek olarak gaz türbinli uçak motorlarının çöl ortamında çalışması sonucu, kompresör tarafından emilen kum taneleri kanatçıklar üzerinden erozyon ile malzeme kaybına neden olabilmektedir [2]. Rotor kanatçıkları yüksek dönme hızlarında ise titreşimler nedeniyle doğal frekans çakışmalarına da maruz kaldığında yüksek çevrimli yorulma hasarıyla karşı karşıya kalabilmektedir. Hatta sürünme ve termal yorulma çatlakları zamanla kanatçığin doğal frekans değerini değiştirmekte ve bu da yüksek çevrimli yorulma hasarlarına neden olabilmektedir [2]. Türbin kanatçıklarının hasarı havacılık motorlarında hiç istenmeyen bir durumdur. Çünkü kanatçıktan kopan parça, diğer türbin kademelerinde yer alan rotor ve statorlara büyük zararlar verebilmekte ve motorun havada durmasına neden olabilmektedir.

## 2.3. Geleneksel Türbin Kanatçık Alaşımları ve Üretim Teknolojileri

Türbin rotor kanatçıklarının maruz kaldığı sıcaklık değeri, 1940'lı yıllardan bu yana gaz türbinli uçak motorlarındaki gelişmeye paralel olarak artmıştır. Türbin gaz giriş sıcaklığındaki ( $T_4$ ) artışın yıllara bağlı olarak değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir [10]. İlk türbin rotor kanatçıkları 1940'lı yıllara kadar kapalı kalıpta sıcak dövme yöntemi kullanılarak östenitik paslanmaz çeliklerden (Rex 75) üretilmiştir. Fakat dövme türbin kanatçıklarının sürünme dayanımı giderek artan  $T_4$  sıcaklığını karşılayamaz duruma gelmiştir. Bu nedenle ilk dövme nikel bazlı süperalaşımlar olan Nimonic 75, 80 ve 80A'nın Mo, Al ve Ti oranları artırılarak Nimonic 500, Udimet 500 ve Nimonic 118 gibi sürünme dayanımı 2-3 kat artırılmış alaşımlar geliştirilmiştir. Görsel 2.1'de dövme yöntemi ile üretilmiş türbin kanatçıkları verilmiştir [2].

Türbin kanatçıklarında kompozisyon değiştirilerek yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra; kompresör kademesinden alınan havanın rotor ve stator kanatçıının iç kanallarından geçirilerek metali soğutma teknolojisi de kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Türbin giriş sıcaklığının ( $T_4$ ) modern gaz türbin motorlarında yıllara göre değişimi [10]



Görsel 2.1. Dövme yöntemi ile üretilmiş türbin kanatçıkları [2]

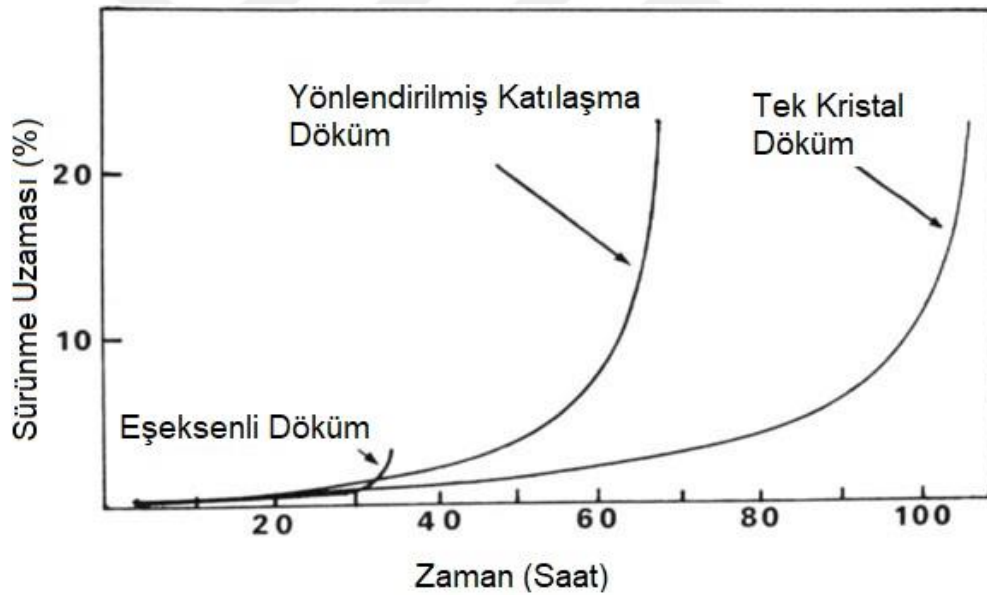
Türbin kanatçıkları soğutmanın daha etkin yapılabilmesi için kanatçığın iç yüzeylerine çeşitli pim (ing. pin) ve fin (ing. fin) geometrilerinin ilave edilmesiyle geometrik karmaşıklık artmıştır. Bu nedenle 1950'lerden bu yana soğutma kanallı türbin rotor ve stator kanatçıkları dövme yerine vakum hassas döküm yöntemi ile üretilmektedir [2].

Türbin kanatçıklarında kullanılan nikel bazlı süperalaşımlar ilk zamanlarda polikristal olarak dökülmüşlerdir. İlk yaygın kullanılan döküm alaşımlardan birisi de Inconel 713C'dir. Bu yüksek karbon oranına sahip nikel bazlı süperalaşım, aşırı karbür çökeltilerine sahip olması nedeniyle oda sıcaklığında gevrek bir karaktere sahiptir. 1960'lı yıllara doğru döküm nikel bazlı süperalaşımlarda sürünme dayanımının iyileştirilmesi için Al ve Ti oranı ( $\gamma/\gamma'$  faz oranını artırmak için) artırılmış fakat uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalan IN100 alaşımında sürünme özelliklerini kötü etkileyen  $\sigma$  fazının oluştuğu anlaşılmıştır. Dolayısı ile araştırmacılar bu fazdan kaçınmak amacı ile ilk defa alaşım tasarımında faz hesaplama metoduna (ing. PHACOMP) başvurmuşlardır. GE 1965'li yıllarda PHACOMP yöntemiyle Astralloy ve Udimet 700 kompozisyonlarından yola çıkarak Rene 77 ve Rene 80 gibi nikel bazlı döküm süperalaşımlarını geliştirmiştir [2].

Türbin kanatçığı döküm alaşımlarında sürünme dayanımı için Ti ve Al oranını artırmanın yanı sıra bir diğer benimsenen metod ise Mo ve Ta gibi refrakter element oranının artırılmasıdır. Bu kapsamda Martin Metal grubunun geliştirdiği W ve Ta oranı yüksek bir diğer döküm süperalaşım Mar M 200'dür. 1969 yılında Martin Metals, dökümle üretilen bu süperalaşıma Hf ilavesi yaparak Mar M 004 ve Mar M 007'yi geliştirmiş ve sürünme direncini önemli ölçüde artırmıştır. Bir diğer sürünme direnci artırma metodu ise süperalaşımlara ağırlıkça % 0.1-0.16 oranında B ilave etmek olmuştur. Böylece mikroporoziteler azaltılarak Mar M 200 alaşımı geliştirilmiş ve alaşımın 760 °C sıcaklıklardaki kopma süreleri ve süneklik miktarı da artırılmıştır [2]. Günümüzde korozyon dayanımları daha da iyileştirilmiş diğer güncel polikristal döküm ile üretilen alaşımlar MAR M 246, Rene 125, Inconel 939 ve 738LC'dir [11].

Türbin kanatçık döküm teknolojisinde alaşım gelişiminin yanı sıra en önemli dönüm noktalarından biri de Pratt Whitney firması tarafından ilk kez uygulanmış yönlendirilmiş katılaşma ve tek kristal döküm yöntemi ile türbin kanatçığı üretimidir. Yönlendirilmiş katılaşma ile taneler sürünmenin zor olduğu kristal doğrultularında  $\langle 100 \rangle$  daha az tane sınırı ile kolonsal olarak büyütülmektedir. Tek kristal dökümde ise bir tane seçici kullanılarak tane sınırı olmadan  $\langle 100 \rangle$  kristal doğrultusunda katılaşma ile kanatçıkların dökümü yapılabilmektedir. Günümüzde yönlendirilmiş katılaşma ile döküme uygun alaşımlara örnek olarak Mar M 247, CM247LC gibi süperalaşımlar verilebilir. Tek kristal döküme uygun süperalaşımlarda tane sınırı olmadığından C ve B

gibi tane sınırı mukavemetlendirici karbür ve borür çökeltisi oluşturan katkıları yoktur. Bunun yerine yüksek sıcaklıkta karşılıklı difüzyon ile atomların hareket kabiliyetini sınırlayan Ir, Re, Ru, Pt, W, Rh ve Mo elementleri tek kristal süperalaşımlara ilave edilerek sürünme ömürleri iyileştirilmektedir. 1. nesil tek kristal süperalaşımlarda (Örn CMSX-2, PWA 1480, Rene N4 vb.) Re ve Ru gibi elementler yoktur. 2. nesil alaşımlar (Örn. CMSX-4, PWA 1484, Rene N5 vb.) ise % 3 Re içerirken, 3. nesil olanlar ise (Örn. CMSX-10, Rene N6, TMS-75 gibi) % 6 Re içermektedir. Fakat artan Re oranı, tek kristal süperalaşımlarda  $\sigma$  ve  $\mu$  gibi topolojik sıkı paket fazların oluşmasına da neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda Ru elementi ilavesi ile 4. (Örn. PWA 1497, TMS186A vb.) ve 5. nesil (Örn. TMS 162, TMS 196 vb.) tek kristal döküm süperalaşımları da geliştirilmiştir [4]. Şekil 2.3'te polikristal, yönlendirilmiş katılaşma ve tek kristal döküm ile üretilmiş Mar M 200 numunelerin sürünme dayanımı açısından karşılaştırması verilmiştir [2].



**Şekil 2.3.** Mar M 200 alaşımında polikristal, yönlendirilmiş katılaşma ve tek kristal döküm ile üretilen numunelerin sürünme dayanımı açısından karşılaştırması [2]

### 3. YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMLAR

YEA'lar 2004 yılında birbirinden bağımsız olarak İngiltere ve Tayvan'da yürütülen iki farklı çalışma ile ortaya çıkmış olup elementlerin eşit molar oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir. İngiltere Cambridge Üniversitesi'nden Prof. Cantor'ın çalışmasında 16 ve 20 farklı element karıştırılarak karışım entropisini yükseltmek üzerine deneyler yapılmıştır [6]. Çalışmada üretilen her iki YEA'nda polikristal ve çok gevrek bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Fakat bu deneylerde kullanılan Cr, Co, Fe, Mn ve Ni elementlerinin YMK yapıda düzensiz katı çözelti oluşturduğu Cantor'un dikkatini çekmiştir. Tayvan'da yapılan diğer çalışmada da, Yeh ve diğerleri 9 farklı kompozisyona sahip YEA'ları ark ergitme ile üretmiş, numunelere tavlama ısı işlemi uygulamış ve onları karakterize etmiştir. Araştırmacılar ayrıca  $\text{CuCoNiCrAl}_x\text{Fe}$  alaşımında Al oranını değiştirerek sertliğe olan etkisini de incelemişlerdir. Bu ikinci çalışma sonucunda eş molar alaşımlardaki karışım entropisinin konfigürasyonel entropiye eşit olduğu kabulü ile en az 5 elementten oluşan veya atomik olarak % 5-35 aralığında element içeren alaşımlar YEA olarak tanımlanmıştır [7]. Ayrıca Yeh ve diğerleri tarafından "Çok Bazlı Element Alaşımları (ÇBEA)" ve "Yüksek Entropili Alaşımlar" kavramları ilk defa 2004 yılında ortaya atılmıştır [7].

İlk defa 2004 yılında ortaya çıkan YEA/ÇBEA çalışmaları özellikle eşmolar veya eşmolar yakın miktarda element kullanımı ile faz diyagramlarının merkezini araştırmayı hedef alan alaşım konseptini benimsemişlerdir. Fakat yapılan YEA çalışmaları göstermiştir ki bilim insanları 2010'dan bu yana araştırmalarını sadece düzensiz katı çözelti fazına sahip birinci nesil YEA'lar üzerinde değil aynı zamanda farklı molar oranlarda element içeren kompleks mikroyapıda ikincil çökelti fazlarına sahip ikinci nesil YEA'lar üzerine de yoğunlaştırmışlardır. İşte bu ikinci nesil YEA'lar 2015 yılında yazılan bir derleme makalesinde Miracle tarafından kompleks konsantre alaşımlar yani KKA olarak yeni bir terimle ifade edilmiş YEA literatürüne kazandırılmıştır [12].

Her ne kadar Cantor ve Yeh'in çalışması YEA'lar için bir başlangıç kabul edilse de Prof. Srinivasa Ranganathan da Hindistan Ulusal Bilimler Akademisinde ÇBEA'lar, metalik camlar, yarıkristalin ve nanoyapılı malzemeler üzerine yaptığı çalışmalar ile YEA'ların ortaya çıkmasında büyük katkı sağlamıştır. Profesör Yeh'i 2003 yılında ziyaret eden Prof. Ranganathan, "Alaşımlı zevkler: Çoklumentalite kokteyller" adlı makaleyi yazarak YEA literatürüne katkı sağlamıştır [13].

### 3.1. Yüksek Entropili Alaşım Tanımlamaları

YEA'lar literatürde temel olarak iki farklı şekilde tanımlanmıştır.

#### 3.1.1. Entropi bazlı tanım

Entropi tanımlamasına göre düzensiz katı çözeltiye sahip bir YEA'da karışım entropisi konfigürasyonel entropiye eşit olduğu varsayılırsa; konfigürasyonel entropi, gaz sabiti (R) ve element sayısı (n) cinsinden Denklem 3.1'deki gibi hesaplanabilir. Bu entropi tanımına göre  $\Delta S_{\text{konfigürasyonel}} > 1.61R$  olan alaşımlar yüksek entropili alaşımlardır [14].

$$\Delta S_{\text{karışım}} = \Delta S_{\text{konfigürasyonel}} = R \ln(n) \quad (3.1)$$

#### 3.1.2. Kompozisyon bazlı tanım

Kompozisyonel tanımlamaya göre ise en az 5 major element içeren ve bu major elementlerin her birinin atomik yüzdesi %5 ile %35 arasında olan alaşımlar YEA olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma uyan YEA'lar atomik olarak %5'in altında minör elementler de içerebilmektedir [14].

Her iki tanımlamada birçok YEA'ya uygulanabilir ve kapsıyor olmasına rağmen bazı durumlarda bir tanıma uyup diğerine uymayan YEA'lar da söz konusu olabilmektedir. Örneğin  $\text{Co}_{29,4}\text{Cr}_{29,4}\text{Cu}_{5,9}\text{Fe}_{5,9}\text{Ni}_{29,4}$  alaşımı kompozisyon bazlı tanıma göre YEA olmasına rağmen  $\Delta S_{\text{konfigürasyonel}} = 1,414R$ 'dir. Yine 25 elementli eşmolar bir alaşım entropi tanımına göre YEA iken, her bir elementten molar olarak % 4 bulunduğundan kompozisyon bazlı tanıma uymamaktadır. Bu nedenle her iki tanımdan en az birine uyan alaşımlar YEA veya ÇBEA olarak tanımlanmaktadır [14].

### 3.2. Yüksek Entropili Alaşım Sınıflandırmaları

#### 3.2.1. Genel sınıflandırma

YEA'lar genel olarak kristal yapı, faz tipi, elementlerin periyodik tabloda yer aldığı bölge ve elementlerin taşıdığı özelliklere (refrakter vb.) göre sınıflandırılabilir. Burada en genel kapsamlı sınıflandırma YEA'yı oluşturan elementlerin periyodik tablodaki bölgelerine ve taşıdıkları özelliklere göre olanıdır. Bu sınıflandırma ilk kez Miracle tarafından 2017 yılında öne sürülmüştür [15]. Miracle YEA'ları 7 farklı aile ile tanımlamaktadır. Bu aileler ve içerdiği elementler aşağıda verilmiştir.

- 3d geçiş metali içeren YEA'lar: Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, ve V

- Refrakter metal içeren YEA'lar: Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, W, V ve Zr (+Al)
- Hafif metal içeren YEA'lar: Al, Be, Li, Mg, Sc, Si, Sn, Ti ve Zn
- Lantanit (4f) geçiş metali içeren YEA'lar: Dy, Gd, Lu, Tb, Tm ve Y
- KKA pirinç ve bronzları: Al, Cu, Mn, Ni, Sn ve Zn
- Değerli metal içeren YEA'lar: Ag, Au, Co, Cr, Cu, Ni, Pd, Pt, Rh ve Ru
- Arayer bileşeni (B, C ve N) içeren YEA'lar.

Bu genel sınıflandırmanın dışında YEA'lar faz düzeni açısından düzenli katı çözümlü, düzensiz katı çözümlü ve intermetalik olarak; kristal yapı açısından ise basit düzensiz (hacim merkezli kübik-HMK, yüzey merkezli kübik-YMK, hegzagonal sıkı paket-HSP gibi), basit düzenli ( $L1_2$ , B2 gibi) ve kompleks (Sigma ve Laves gibi) olarak da sınıflandırılabilir.

### 3.2.2. Birinci nesil yüksek entropili alaşımlar

En az 5 elementten oluşan ilk YEA çalışmalarında, genellikle mikroyapıda ikincil bir faz çökmesi olmaksızın düzensiz tek bir katı çözümlüye sahip alaşımlar incelenmiştir. 2004 yılında YEA'lar yüksek entropi tanımını destekleyen tek fazlı katı çözümlü elde etme amacı ile doğduğu için birinci nesil YEA'larda bünyesinde sadece düzensiz katı çözümlü fazı içeren alaşımlar olarak sınıflandırılmıştır [16]. Birinci nesil YEA'lar HMK, YMK, HSP veya bunların karışımı düzensiz katı çözümlü fazlarını içermesine rağmen intermetalik çökelti fazları bu alaşımlarda bulunmamaktadır.

#### 3.2.2.1. YMK kristal yapılu birinci nesil YEA'lar

İlk olarak Cantor'ın lisans öğrencisinin (Alain Vincent) 1981'de çalıştığı ve 2004 yılındaki yayın sonrasında Cantor alaşımı olarak da bilinen  $Co_{20}Cr_{20}Fe_{20}Mn_{20}Ni_{20}$ , ilk YMK yapılu birinci nesil YEA'dır. YMK kristal yapıdaki bu alaşımın en önemli özelliği sünek ve nispeten mukavemetli bir yapıda olmasıdır. Bu nedenle YMK yapılu YEA'ların birçoğu genellikle 3d geçiş metal elementlerini içermektedir [15]. 3d geçiş metali grubunda yer alan Co, Cu, Mn ve Ni elementleri alaşımlarda YMK yapıyı stabilize etmektedir. YMK kristal yapılu YEA'larda yapılan deformasyon çalışmaları sonrasında mikroyapıda bazı ikincil faz çökelmelerine de rastlanmıştır.

#### 3.2.2.2. HMK kristal yapılu birinci nesil YEA'lar

HMK kristal yapılu YEA'ların büyük çoğunluğu 3d geçiş metali ve refrakter metallere oluşmaktadır. Bu YEA'lar genellikle Al, Cr ve Fe elementlerini içermekle

birlikte Si ve Ti gibi HMK kristal yapıyı stabilize eden elementler de bulundurmaktadırlar. AlCoCrFeNi HMK kristal yapıya tek fazlı katı çözeltiye sahip bir YEA'dır. Fakat literatürdeki tek fazlı HMK katı çözelti fazına sahip YEA sayısı YMK katı çözelti fazına sahip YEA'lara göre nispeten daha azdır. Genellikle YMK ve HMK kristal yapıya katı çözelti fazlarının bir arada olduğu YEA'lar süneklik ve mukavemet açısından optimum özellikler sergilemektedir. HMK kristal yapıya YEA'ların en temel özelliği oda sıcaklığında gevrek ve yüksek sıcaklıkta iyi bir mukavemet göstermeleridir. Bu nedenle HMK kristal yapıya RYEA'lar özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için nikel bazlı süperalaşımlara alternatif olma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca HMK kristal yapıya YEA'ların düşük sıcaklıklarda şekil alabilmeleri de oldukça zordur.[17].

### **3.2.2.3. HSP kristal yapıya birinci nesil YEA'lar**

2004 yılından bu yana yapılan çalışmalar incelendiğinde YEA'ların büyük kısmının YMK veya HMK kristal yapıda olduğu görülmekte olup çok azı tek fazlı HSP kristal yapıya sahiptir. HSP kristal yapıya YEA'ların ilk çalışmaları Feuerbacher ve arkadaşları tarafından HSP kristal yapıya nadir toprak elementlerinin biraraya getirilmesi ile elde edilmiştir. Bu araştırmacılar HSP kristal yapıya HoDyYGdTb bir YEA üretmişlerdir [18]. Bir diğer HSP kristal yapıya YEA'ya örnek ise GdHoLaTbY olup bu alaşımların YMK ve HMK kristal yapıya YEA'lar kadar yeterli mukavemet göstermediği belirtilmiştir.

### **3.2.3. İkinci nesil yüksek entropili alaşımlar (kompleks konsantre alaşımlar)**

YEA literatüründe 2010'lu yıllara gelindiğinde yüksek entropi etkisi ile sadece katı çözelti fazı içeren (çökelti oluşturmeyen) YEA üretilmeyeceği anlaşılmıştır. İşte ikinci nesil YEA'lar en az 4 ana element ile birlikte mikroyapıda birden fazla faz içeren kompleks alaşımlardır. İşte bu ikinci nesil YEA'lar için KKA deyiimi ilk defa 2016 yılında Miracle ve Senkov tarafından kullanılmıştır [15]. İkinci nesil YEA'lar dönüşüm kaynaklı plastisite destekli YEA'lar (ing. transformation-induced plasticity-assisted-TRIP), ötektik YEA'lar, çökelti ile sertleştirilebilen YEA'lar, nanokristalin YEA'lar ve arayer çökeltileri ile sertleştirilebilen YEA'lar olmak üzere 5 farklı alt sınıfta değerlendirilmektedir [16].

#### **3.2.3.1. Çökelti ile sertleştirilen ikinci nesil YEA'lar**

YEA'larda katı çözelti fazı ile çökelmeye meyilli intermetalik fazlar termodinamik olarak sürekli birbiri ile yarış içerisinde. YEA'larda katı çözelti fazı için yapılan yüksek entropi hesabı, ergime noktasına yakın sıcaklıklarda bu fazın Gibbs serbest

enerjisini daha negatif değerlere çekmektedir. Halbuki gerçekte malzeme oda sıcaklığı şartlarına soğutulduğunda entropinin Gibbs enerjisine etkisi de azalmaktadır. Bu nedenle katı çözelti oluşması beklenen bir YEA'da; düşük sıcaklıklarda ikinci bir faz oluşma ihtimali de önem kazanmaktadır [15]. Ayrıca mevcut YEA literatüründe, araştırmacılar makalelerinde tek fazlı katı çözelti elde etmeyi hedefledikleri için yapılan çalışmalarda çökelti oluşsa da yeterli inceleme yapılmadığı için ihmal edildiği anlaşılmaktadır.

Çökelti sertleşme mekanizması konvansiyonel tek baz elementli alaşımların mukavemetini artırmada çok önemlidir. Aynı etki YEA'lar içinde geçerli olup son zamanlarda yapılan yüksek sıcaklık YEA geliştirme çalışmalarında çökelti sertleşmesi mekanizmasına olanak sağlayan kompozisyonlar da detaylıca araştırılmaya başlanmıştır.

### **3.3. Yüksek Entropili Alaşım Tasarım Yöntemleri**

YEA'ların sonsuz sayıdaki kompozisyon evreninde bir ön eleme yapabilmek için mikroyapıda fazların, bileşiklerin ve katı çözeltilerin hangi kristal yapıda (HMK, YMK, B2, L1<sub>2</sub>, HSP gibi) oluşacakları empirik denklemler, termodinamik hesaplamalar ve atomistik yaklaşımlarla tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Malzeme bilimindeki termodinamik yaklaşımlar, modellemeler, veritabanları ve denklemler geleneksel tek baz elementli alaşımlar için geliştirildiğinden YEA'lar için direkt olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar YEA'lar için farklı yaklaşımlar geliştirmiş ve halen geliştirmeye devam etmektedir.

#### **3.3.1. Empirik yaklaşımlar**

YEA tasarımı için termodinamik ve fiziksel değişkenler kullanılarak araştırmacılar tarafından çeşitli empirik denklemler üretilmiştir. İlk YEA çalışmalarındaki amaç sadece tek fazlı katı çözelti oluşturmak olduğu için, öncelikle temel Hume-Rothery kuralları tek fazlı katı çözelti fazına sahip YEA'ları tasarlayabilmek için kullanılmıştır. Geleneksel alaşımlarda elementlerin birbiri içerisinde çözünme şartları Hume-Rothery kuralları ile belirlenebilir. Bu kurallar aşağıda verilmiştir.

- Katı çözeltilerde çözen ve çözünen atomlar arasındaki boyut farkı % 15'den az olması
- Çözen ve çözünen atomların kristal yapıları aynı olması
- Çözen ve çözünen atomların elektronegativite değerlerinin birbirine yakın olması

- Çözen ve çözünen atomların değerlikleri (valans elektron sayıları) aynı veya birbirine çok yakın olması

Yukarıda verilen şartlar sağlandığında, yeralan katı çözeltilerinde ikinci bir bileşik oluşturmada çözünme sağlanabilir. Fakat YEA'lar, geleneksel tek baz elementli alaşımlardan farklı olarak çok sayıda eşmolar element içerdiğinden bu kurallar araştırmacılar tarafından yeniden düzenlenmiştir [16].

### 3.3.1.1. Karışım entalpisi ve ortalama atom boyut farklılığı

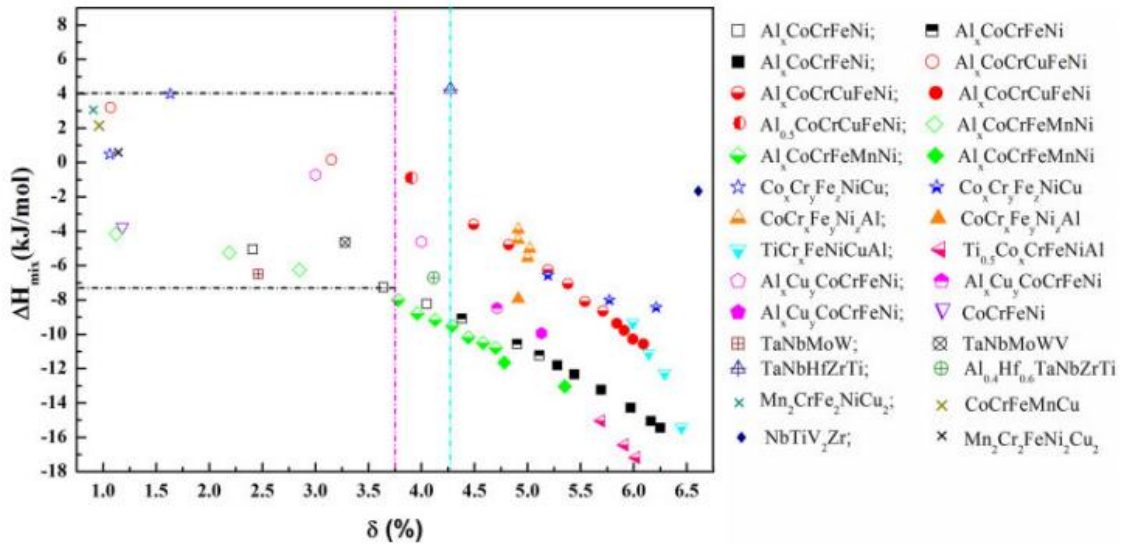
İlk empirik yaklaşımda karışım entalpisi ( $\Delta H_{\text{karışım}}$ ) ile ortalama atomik boyut farklılığı ( $\delta$ ) ilişkisine göre YEA'ların düzensiz katı çözelti, düzenli katı çözelti, intermetalik ve camsı faza sahip olup olmayacağı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Karışım entalpisi ve ortalama atomik boyut farklılığı sırasıyla Deklem 3.2 ve 3.3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{(\sum_{i=1}^n c_i r_i)}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$\Delta H_{\text{karışım}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n c_i c_j 4 \Delta H_{\text{karışım}}^{AB} \quad (3.3)$$

Deklem 3.2 ve 3.3'te  $c_i$ , i elementine ait atomik yüzde,  $r_i$  ise i elementine ait atomik yarıçaptır.  $\Delta H_{\text{karışım}}^{AB}$  ise i ve j bileşeninden oluşan ikili düzenli katı çözeltinin karışım entalpidir.  $c_i$  ve  $c_j$  i ve j elementlerine ait atomik yüzde oranlarıdır [14, 16].

Şekil 3.1'de  $\delta$  ve  $\Delta H_{\text{karışım}}$ 'a göre YEA'larda oluşan kristal yapılar verilmiştir. Genel olarak bakıldığında atomik boyut farklılığı arttıkça YEA'lar çok fazlı karmaşık mikroyapıya (ikincil katı çözelti+intermetalikler) sahip olmaktadır.  $\delta < 3.75\%$  olduğunda ise, YEA'lar genelde tek fazlı YMK veya HMK kristal yapıdan meydana gelmektedir. Karışım entalpisi açısından durum değerlendirilirse, 0 ile -8 kJ/mol aralığında YEA tek fazlı katı çözeltinin HMK veya YMK kristal yapıda olduğu görülmektedir [16]. Bu kuralın uygulandığı diğer kaynaklarda yer alan  $\delta$ - $\Delta H_{\text{karışım}}$  grafikleri incelendiğinde, yaklaşımın oluşan fazları ve kristal yapıları net bir şekilde tahmin edemediği de görülmektedir [14].



**Şekil 3.1.**  $\delta$  ve  $\Delta H_{\text{karışım}}$ 'a göre oluşan YEA kristal yapıları, sembollerin anlamları: içi tamamen boş işaretler tek fazlı YMK yapıyı, içi x ile ifade edilen işaretler tek fazlı HMK yapıyı, içinin yarısı dolu işaretler YMK+HMK yapıyı, içi dolu işaretler ise iki veya çok fazlı HMK yapıyı belirtmektedir [19]

### 3.3.1.2. $\Omega$ kriteri

YEA faz tahmininde kullanılan bir diğer empirik yaklaşım  $\Omega$  parametresi ile ortalama atomik boyut farklılığı ( $\delta$ ) arasındaki ilişkilendirmedir. Çünkü  $\delta$ - $\Delta H_{\text{karışım}}$  kolerasyonu katı çözelti fazının karışım entropisini ( $\Delta S_{\text{karışım}}$ ) hesaba katmamaktadır.  $\Omega$  parametresi ve karışım ergime noktası sırasıyla Denklem 3.4 ve 3.5'ten hesaplanabilir.

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{\text{karışım}}}{\Delta H_{\text{karışım}}} \quad (3.4)$$

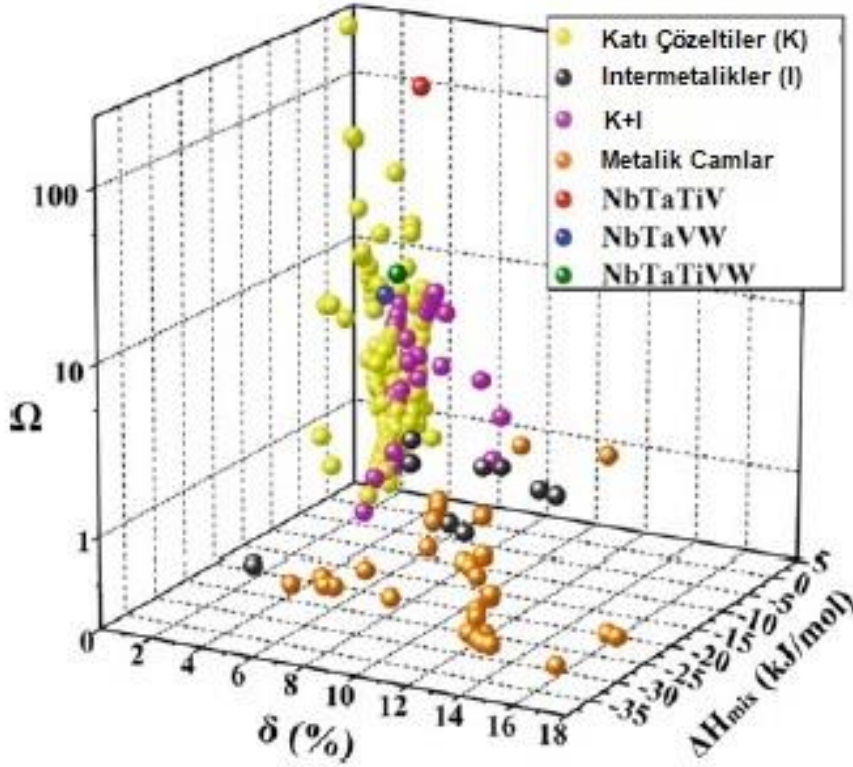
$$T_m = \sum_{i=1}^n c_i (T_m)_i \quad (3.5)$$

Bu denklemlerde  $c_i$  ve  $(T_m)_i$  sırasıyla i elementine ait kompozisyon oranı ve ergime sıcaklığıdır.  $\Delta S_{\text{karışım}}$  ise tek fazlı katı çözeltiye sahip YEA'lar için Denklem 3.6'daki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta S_{\text{karışım}} = \Delta S_{\text{konfigürasyonel}} = RT \ln n \quad (3.6)$$

$\Omega$  denklemi YEA'lar için yorumlanırsa,  $\Delta H_{\text{karışım}}$  katı çözelti oluşumuna karşı olan direnci,  $T_m \Delta S_{\text{karışım}}$  ise katı çözelti oluşumunu destekleyen itici kuvveti temsil etmektedir. Burada  $\Omega > 1.1$  olduğunda ve  $\delta < 6.6\%$  ise YEA tek fazlı katı çözeltiye sahiptir [14].  $\Omega < 1$  olduğu durumlarda ise YEA faz ayrışmasına uğrayabilmekte ve mikroyapıda

intermetalik faz çökelebilmektedir.  $\Omega$ - $\delta$ - $\Delta H_{\text{karışım}}$  parametrelerine göre YEA'larda oluşan faz çeşitleri grafiksel olarak Şekil 3.2'de verilmiştir [16].



Şekil 3.2.  $\Omega$ - $\delta$ - $\Delta H_{\text{karışım}}$  parametrelerine göre YEA'larda oluşan fazlar [16]

### 3.3.1.3. Valans elektron konsantrasyonu

YEA kristal yapı ve faz tahmininde kullanılan bir diğer empirik yaklaşım ise valans elektron konsantrasyonlarıdır. Burada iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bunlardan biri valans elektron konsantrasyonu (VEK), diğeri ise atom başına ortalama gezici elektron sayısı ( $e/a$ )'dır.

Hume-Ruthery kuralları gereği bir YEA'yı oluşturan atomların birbirleri arasındaki valans elektron sayıları arasındaki fark arttıkça, alaşım katı çözelti oluşturmak yerine intermetalik faz oluşturma eğilimi taşımaktadır. Bir YEA'da VEK değeri, Denklem 3.7 ile hesaplanabilir [16].

$$VEK = \sum_{i=1}^n c_i (VEK)_i \quad (3.7)$$



King,  $\phi$  ve  $\delta$  kombinasyonunu kullanarak 186 milyon YEA kompozisyonunu taramış ve 1900 yeni tek fazlı eşmolar YEA kompozisyonu bulmuştur.

Ye'nin öne sürdüğü kuramda ise  $\phi$  Denklem 3.9 ile hesaplanabilir.

$$\phi = \frac{S_c - S_H}{|S_E|} \quad (3.9)$$

Bu formülde  $S_c$  alaşımın ideal gaz durumundaki karışım entropisi,  $S_E$  alaşımın atomik düzen ve yarıçapları nedeniyle oluşan kalıntı karışım entropisidir. Bu iki entropi toplamı konfigürasyonel entropiyi oluşturmaktadır.  $S_H$  ise Denklem 3.10 ile hesaplanabilir.

$$S_H = \frac{|H_a|}{T_m} \quad (3.10)$$

Burada  $S_H$ ; entalpiden ( $|H_a|$ ) türetilmiş tamamlayıcı entropi,  $T_m$  ise ortalama ergime sıcaklığıdır. King'in yaptığı bu yaklaşım 50 YEA üzerinde denenmiş ve  $\phi < 20$  için YEA'ların çok fazlı,  $\phi > 20$  için ise YEA'ların tek fazlı yapıda olduğu belirlenmiştir [21].

Literatürde yer alan ve yukarıda özetlenen empirik yaklaşımlar YEA'larda oluşabilecek fazların ve kristal yapıların tahmininde ne yazık ki yeterli değildir. Dolayısıyla birçok empirik yaklaşım net bir tahminde bulunamadığı için daha gelişmiş tasarım araçlarına ihtiyaç bulunmaktadır.

### 3.3.2. SISO kolerasyonu

YEA faz kararlılık tahmininde kullanılan bir diğer yaklaşım "giren yapı çıkan yapıyı oluşturur (ing. Structure in-Structure out-SISO)" prensibine dayanmaktadır. Buna göre bir YEA'yı oluşturan elementlerin saf haldeki çoğunluk kristal yapısı neyse alaşımın sonuç kristal yapısının da o olması beklenmelidir. Senkov ve Miracle 2017 yılında literatürdeki 408 adet YEA üzerinde SISO kolerasyonu incelemesi yapmışlardır. Bunun için her bir YEA'yı oluşturan elementlerin ergime sıcaklıklarındaki kristal yapıları ile 408 adet YEA'nın SISO analizi sonrasında % 50'sinin HMK, %49'unun YMK ve % 1'inin HSP kristal yapıda olduğu anlaşılmıştır. Yapılan analizler deney sonuçları ile kıyaslandığında tahminlerin büyük oranda örtüştüğü görülmüştür [15].

### 3.3.3. Termodinamik hesaplamalar

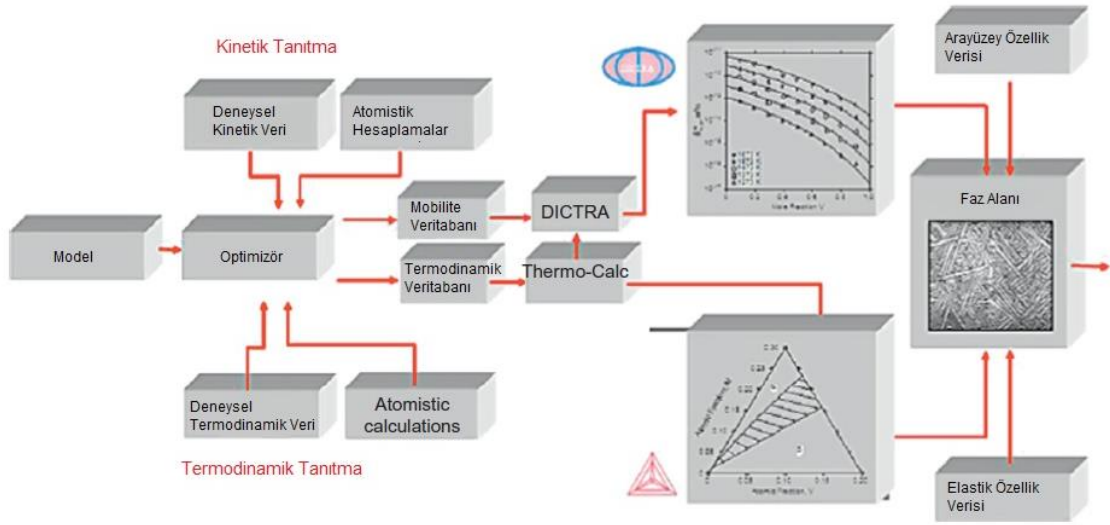
Bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile birlikte malzeme bilimi alanında hesaplamalı termodinamik yazılımlarının kullanımını da yaygınlaştırmıştır. Alaşım tasarımında kullanılan “Hesaplamalı Faz Diyagramları (ing. Calculation of Phase Diagrams-CALPHAD)” yaklaşımı, ThermoCalc, Pandat, FactSage vb. yazılımlar ve bu yazılımların veritabanları kullanılarak yeni alaşımların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

YEA’ların tasarımında da kullanılan CALPHAD yönteminde, fazların sıcaklık ve kompozisyonlara bağlı Gibbs serbest enerji fonksiyonları, güvenilir bir veritabanından veya yoğunluk fonksiyon teorisinden (DFT) elde edilen parametreler kullanılarak hesaplanmaktadır. CALPHAD yönteminde bir (i) saf elementinin ( $\phi$ ) hal durumunda Gibbs serbest enerjisi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Denklem 3.11 ile hesaplanabilir.

$${}^0G_i^\phi(T) = a + bT + cT\ln T + dT^2 + eT^3 + fT^{-1} + gT^7 + hT^{-9} \quad (3.11)$$

Buradaki a-h katsayıları veritabanından veya DFT’den gelmektedir. Ayrıca elementte manyetik sıralanma da varsa bu denklemin en sağına manyetik serbest enerji terimi de ( ${}^{\text{manyetik}}G_m^\phi(T)$ ) eklenmektedir. İşte Denklem 3.11 baz alınarak yapılan hesaplamalar ile yeni alaşımlar için faz diyagramları çizilebilmekte ve bu sayede fazların solidüs, likidüs, solvüs eğrileri ile oluşabilecek faz çeşitleri, kristal yapıları ve kararlılıkları belirlenebilmektedir. CALPHAD yöntemi YEA tasarımında doğrudan kullanılan bir araçtır. Şekil 3.4’te CALPHAD metodu ile alaşım tasarımının akış şeması verilmiştir [23].

CALPHAD metodunu kullanan tüm yazılımların veritabanları tek elementli konvansiyonel baz alaşımların termodinamik verilerini içermektedir. Ayrıca konvansiyonel alaşım gruplarının veritabanlarında genellikle ikili ve üçlü element etkileşimleri yer almakta, dörtlü ve beşli etkileşimler bulunmamaktadır. Bu nedenle konvansiyonel baz alaşımların ikili ve üçlü faz diyagramlarından yola çıkılarak YEA’lar için yeni veritabanları (TCHEA, PanHEA gibi) geliştirilmiştir. Bu veritabanları termodinamik ve kinetik (mobilité) olmak üzere ikiye ayrılmış olup yazılım şirketleri tarafından her yıl güncellenmektedir.



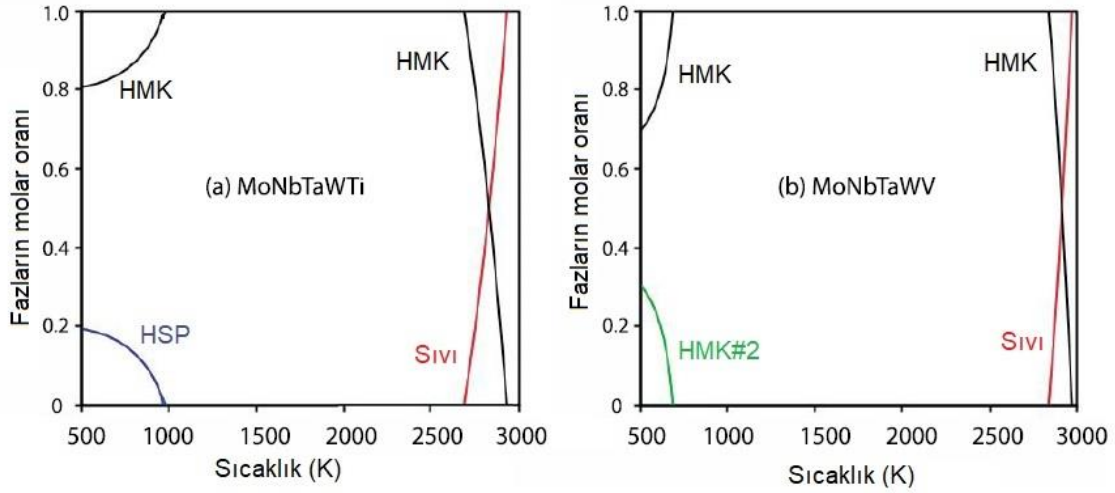
**Şekil 3.4.** CALPHAD metodu ile alaşım tasarım akış şeması [23]

YEA’larda kullanılan veritabanlarında değerlendirilen ikili ( $f_{AB}$ ) ve üçlü ( $f_{AT}$ ) sistem sayısı ne kadar fazla ise sonucun doğruluğu da o kadar yüksek olmaktadır. Örneğin bir veritabanında A-B, A-C, A-D, B-C ve B-D ikili diyagramlarının ve A-B-C ve A-B-D üçlü diyagramlarının bulunduğu varsayılırsa; bir ABCD alaşımında  $\binom{4}{2} = 6$  farklı ikili sistem ve  $\binom{4}{3} = 4$  farklı üçlü sistem mevcuttur. Fakat eldeki veritabanında 5 adet ikili, 2 adet de üçlü sisteme ait bilgiler mevcut olduğundan ABCD alaşımı için değerlendirilen ikili ve üçlü sistem oranı  $f_{AB}=5/6$  ve  $f_{AT}=2/4$ ’dür [15]. Literatürde solidüs sıcaklığına yakın durumda;  $f_{AB}$  değerinin bire eşit olması durumunda bu yaklaşım ile deneysel sonuçların büyük oranda tutarlı olduğu, dolayısı ile  $f_{AB}$  değerinin en az 0,6’dan büyük halinde modellemenin iyi bir güvenilirlik sağlayacağı belirtilmektedir.

Miracle ve Senkov, 3 ile 6 adet element içeren 130 bin civarında eşmolar YEA için uyguladıkları CALPHAD sonuçlarını literatürdeki 408 adet deneysel çalışma sonucu ile karşılaştırmıştır. Buna göre  $f_{AB}=1$  olduğunda en fazla tahmin edilen fazlar HMK,  $M_5Si_3$ , FCC, B2 ve Laves (C15) ve  $f_{AB}$ =herhangi bir değer olduğunda HMK, HSP,  $M_5Si_3$ , B2 ve YMK fazlarıdır. HSP kristal yapılı faz CALPHAD hesaplamalarında nadiren ortaya çıkarken silisit fazları her Si içeren alaşımda görülebilmektedir [15].

YEA’larda CALPHAD metodu ile modelleme örnekleri incelendiğinde, metodun genellikle sıcaklığa bağlı faz değişimlerine, izoplet faz diyagramlarının çizilmesi, denge dışı katılaşma sonrası faz oluşumu kontrolü ve oluşması beklenen farklı kristal yapılı fazların kimyasal kompozisyonlarının tespiti için kullanıldığı anlaşılmaktadır [24, 25,

26]. Mishra ve diğerlerinin TCHEA3 veritabanını kullanarak ThermoCalc yazılımı ile eşmolar MoNbTaWTi ve MoNbTaWV RYEA'larına ait sıcaklığa bağlı fazların değişim grafiği Şekil 3.5'te verilmiştir [26].



Şekil 3.5. MoNbTaWTi ve MoNbTaWV RYEA'larına ait sıcaklığa bağlı oluşan fazlar ve molar oranlarının değişim grafiği [26]

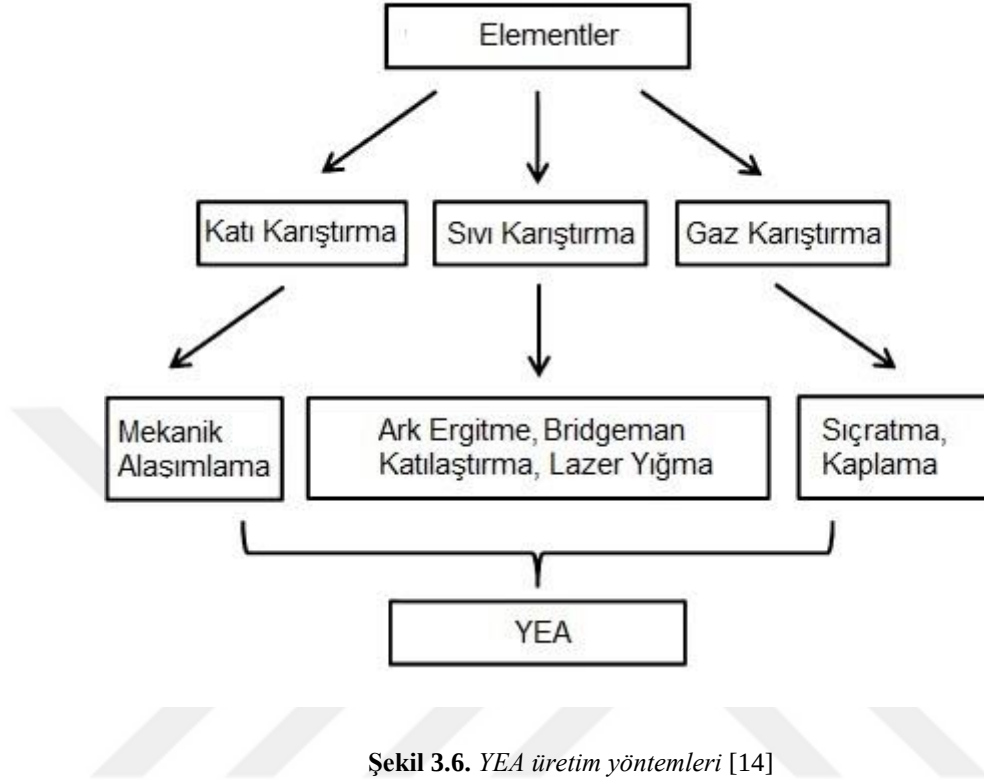
### 3.4. Yüksek Entropili Alaşım Üretim Yöntemleri

YEA'ları oluşturan elementlerin alaşımlandırılması sıvı, katı ve gaz formunda olmak üzere üç farklı şekilde yapılmaktadır. Şekil 3.6'da YEA üretim yöntemleri verilmiştir [14].

#### 3.4.1. Sıvı formda üretim yöntemleri

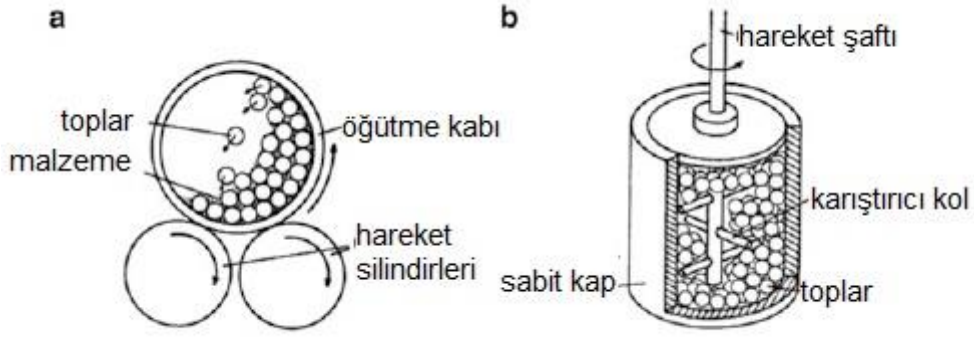
YEA'ların üretiminde kullanılan en yaygın yöntem elementleri vakum veya koruyucu gaz altında ark veya indüksiyon ile ergitmedir. VAE'de su soğutmalı bakır bir pota ile W alaşım elektrot arasında oluşturulan ark ile elementler tamamen ergitilebilmektedir. Ergitme asal gaz atmosferi altında gerçekleştirildiğinden alaşımda kirlilik riski en aza indirilmektedir. Ark ergitmede kimyasal homojenite için numunelerin tekrarlı olarak ergitilmesi gerekmektedir. Ark ergitme sonucu elde edilebilecek numuneler büyük çoğunlukla buton şeklindedir. Bu yöntemin dezavantajı su soğutmalı bakır pota nedeniyle üretilen numunenin çok hızlı bir katılaşmaya maruz kalmasıdır. Bu nedenle numunenin potaya temas eden kısımları ile iç kısımları arasında dentrit morfolojileri, büyüklükleri ve dağılımları açısından farklılıklar olmakta, döküm boşluğu ve elementel segregasyonlara da rastlanabilmektedir [16, 14, 23]. Ark ergitme yönteminin en büyük avantajı yüksek ergime noktasına sahip refrakter YEA'ların da bu yöntemle

üretilebilmesidir. Literatürde kullanılan VAE cihazlarının 20-500 gr numune üretebilme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.



### 3.4.2. Katı formda üretim yöntemleri

YEA'ların bir diğer üretim yöntemi elementlerin katı halde mekanik olarak alaşımlandırılmasıdır. Bu yöntemde toz formundaki elementler istenilen oranda yüksek enerjili bilyalı veya atritör öğütme sistemine bilyalar ile birlikte konulur. Bilyaların birbiri ile çarpışmasının sonucu olarak element tozları mekanik olarak alaşımlanır ve proses sonunda yine toz formunda alaşımlanmış numune elde edilir. Şekil 3.7'de bilyalı ve atritör öğütme sistemleri verilmiştir [14]. Literatür incelendiğinde çalışmaların % 5-10'u numune üretimi için MA yöntemini kullandığı görülmektedir [23]. MA yöntemi ilk defa 2008 yılında Murty ve diğerleri tarafından AlFeTiCrZnCu eşmolar nano kristalin tek fazlı HMK kristal yapıdaki YEA üretimi için kullanılmıştır [27].



**Şekil 3.7.** Mekanik alaşımlamada kullanılan öğütücüler: a) Bilyalı b) Atritör [14]

Genellikle MA ile alaşımlandırılan tozların sinterleme gibi ikinci bir yoğunlaştırma prosesinden geçirilmesi gerekmektedir. Sinterleme yöntemi olarak sıcak izostatik presleme (HIP) veya spark plazma sinterleme (SPS) yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat HIP gibi uzun süreli yoğunlaştırma işlemleri nano kristalin yapıdaki mekanik alaşımlanmış tozlarda tane büyümesine neden olabilmektedir. Bu nedenle literatürde kullanılan yöntem sıklıkla SPS olup bu yöntem ile tozlar aniden ısıtılarak grafit bir kalıp içerisinde yüksek basınç ile yoğunlaştırma işlemi başarı ile yapılabilir [23]. Fakat SPS yöntemi sadece basit geometrilerde uygulanabilir olmaktadır. Ayrıca literatürde yer alan çalışmalarda SPS ile üretilmiş YEA'ların mikroyapısında dahi %1-2 boşluk olduğu görülmektedir.

### 3.4.3. Gaz formda üretim yöntemleri

YEA'ların genellikle kaplama olarak uygulanması gaz formda üretim ile mümkündür. Literatürde yer alan çalışmaların yaklaşık % 20'si YEA üretimi için kaplama yöntemlerini kullanmıştır [23]. Kullanılan en yaygın kaplama yöntemleri fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi olan magnetron sıçratma (MS), plazma kaplama ve moleküler demet epitaksi olarak öne çıkmaktadır [14].

Chang ve arkadaşları, 2008 yılında nitrojen gazı altında AlCrMoSiTi alaşımının yapı ve özelliklerine kaplama parametrelerinin etkisini MS yöntemi kullanarak incelemişlerdir [28]. MS yönteminde, kaplanacak alaşım (katot) plazma haline gelmiş (iyonlaştırılmış  $Ar^+$ ) gaz bombardımanına maruz bırakılır. Hedeften koparılan metal iyonları kaplanacak altlığın bulunduğu yüzeyde anot-katot arasındaki voltaj ve manyetik alan farkı vasıtasıyla birikmektedir.

Plazma kaplama yöntemi literatürde daha az kullanılmasına rağmen daha kalın kaplamalar (50-100  $\mu\text{m}$ ) yapma imkanı sunmaktadır. Araştırmacıların Nitrojen gazı YEA kaplamayı çalışmasının temel nedeni aşınmaya dirençli sert kaplamalar geliştirmektir.

### **3.5. Yüksek Sıcaklık Uygulamalarına Yönelik Yüksek Entropili Alaşımlar**

Yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyel olabilecek YEA'lar 3d geçiş metali ve refrakter metal içeren YEA ve KKA gruplarıdır. Literatürde bu iki grup alaşım için Amerikan Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarından Daniel Miracle ve Oleg Senkov ile Fransa Bordeaux Üniversitesi Yoğun Madde Kimyası Enstitüsünden Stéphane Gorsse mekanik-fiziksel özellikleri içeren sınırlı sayıda çalışmanın yer aldığı bir veritabanı oluşturmuşlardır [29].

Bu tez çalışmasında da, yüksek sıcaklık altında çalışan gaz türbin motor parçalarında kullanılabilecek 3d geçiş metali ve refrakter metal içeren YEA ve KKA'ların bilgileri güncel literatürden alınarak kapsamlı bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veritabanında ilgili alaşımın üretim yöntemi, uygulanan ikincil işlemler, sertlik sonucu, sıcaklığa bağlı akma-çekme dayanımları, XRD ile tespit edilen fazlar ve mekanik test koşulları gibi bilgiler bir tablo haline getirilerek Bölüm 4'deki alaşım tasarım çalışmalarında kullanılmıştır.

#### **3.5.1. 3d geçiş metali içeren YEA ve KKA'lar**

Yüksek sıcaklık özellikleri açısından literatürde ilk olarak 3d geçiş metali içeren YEA ve KKA grupları çalışılmış olup bu alaşımlar genellikle Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni ve Al-Co-Cr-Cu-Fe-Mn-Ni grubu elementlerinden oluşmaktadırlar. Bu alaşım elementlerini içeren KKA'ların atası esas olarak nikel bazlı süperalaşımlardır. Literatür incelendiğinde bu grubun araştırmacıları genellikle Cantor alaşımından (CoCrFeMnNi) yola çıkarak bu alaşımın türevlerinin oda sıcaklığı mekanik özelliklerini incelemişlerdir [15]. Yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini raporlayan çalışmaların birçoğu ise Al katkılı Co-Cr-Fe-Mn-Ni'den oluşan YMK matris içerisinde çeşitli çökelti fazlarını (L1<sub>2</sub>, B2, BCC, Laves vb.) oluşturmuşlar ve bunların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 2010'lu yıllara kadar geliştirilen 3d geçiş metali içeren YEA ve KKA'lar süperalaşımlara benzer veya nispeten daha düşük yüksek sıcaklık mekanik özellikleri sergilemektedir. Söz konusu çalışmalarda üretilen alaşımlar nispeten daha sünek olduğundan genellikle minyatür numuneler üzerinde çekme yönündeki mekanik test sonuçları raporlanabilmiştir. Literatürde yüksek sıcaklık mekanik özellikleri test edilen bazı 3d geçiş metali içeren

YEA ve KKA'ların kompozisyon, test sıcaklığı, sertlik, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum şekil değişimi, elastik modül değerleri ve test yöntemleri (basma veya çekme) referansları ile birlikte EK-1'de veritabanı olarak verilmiştir [30-42].

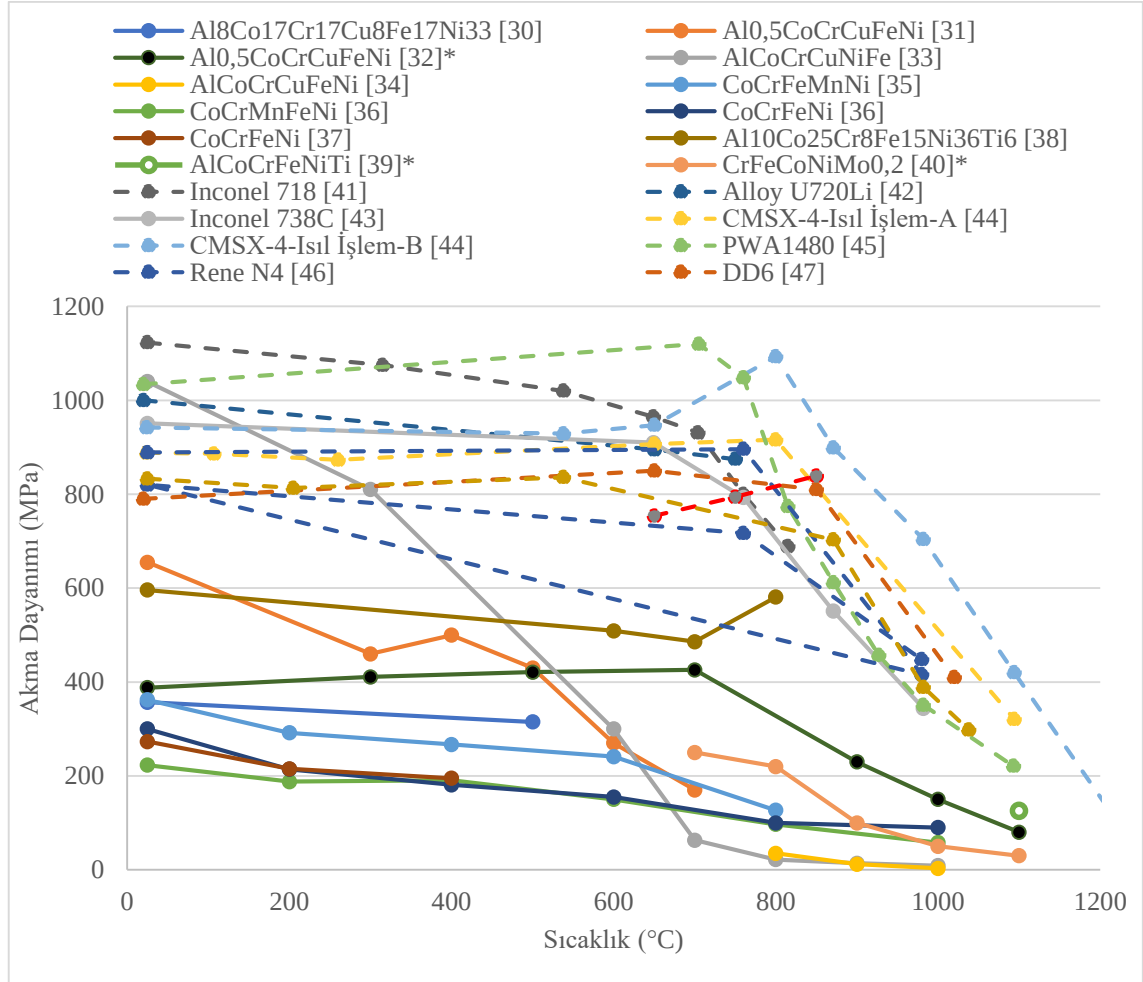
EK-1 veritabanı incelendiğinde, çalışılan 3d geçiş metali YEA ve KKA grupları için üretim yöntemi olarak genellikle VAE, nadiren de indüksiyon ergitme ve MA+SPS olarak göze çarpmaktadır. Tek fazlı 3d geçiş metali içeren YEA'ların kristal yapıları incelendiğinde büyük kısmının YMK yapıda olduğu fakat Cu içeren YEA'larda bakırca zengin çökelti fazlarının, Al içeren KKA ve YEA'larda ise Al miktarına bağlı olarak matrisin YMK, YMK+HMK veya HMK kristal yapıdan oluştuğu, süperalaşımlara benzer şekilde  $\gamma$  ve  $\gamma'$  fazları ile nadiren  $L_{12}$ , B2,  $\sigma$  ve Laves fazlarının tespit edildiği raporlanmıştır. Birçok araştırmacının ürettikleri alaşımlara 1200°C sıcaklıkta homojenizasyon veya çözeltiye alma ısı işlemi, 1000-1200°C sıcaklıklarda tavlama ve 1000°C altında ise sıcak şekil verme ikincil işlemlerini denediği görülmüştür. Bir kısım çalışmada ise soğuk şekil verme uygulandığı ve ardından tavlama yapıldığı da anlaşılmaktadır. Şekil 3.8'de literatür çalışmalarında elde edilen sıcaklığa bağlı akma dayanımları Nikel bazlı süperalaşımlarla kıyaslanmıştır.

Şekil 3.8 incelendiğinde 3d geçiş metali içeren KKA ve YEA alaşımların 1000°C sıcaklıklara kadar olan akma dayanımlarının hali hazırda havacılık motorlarında kullanılan Inconel 718, ve Alloy U720Li (Udimet 720Li), Inconel 738C, CMSX-4, PWA 1480, Rene N4, DD6, CM247LC ve Mar M247 gibi süperalaşımlara göre nispeten düşük olduğu açıkça görülmektedir [41-49]. Söz konusu YEA'larda süperalaşım özelliklerine en yakın olan alaşım AlCoCrCuNiFe'dir [33]. Fakat görüleceği üzere bu alaşımın da akma dayanımı 200°C sıcaklık seviyesinden sonra hızlı bir düşüş göstermektedir.

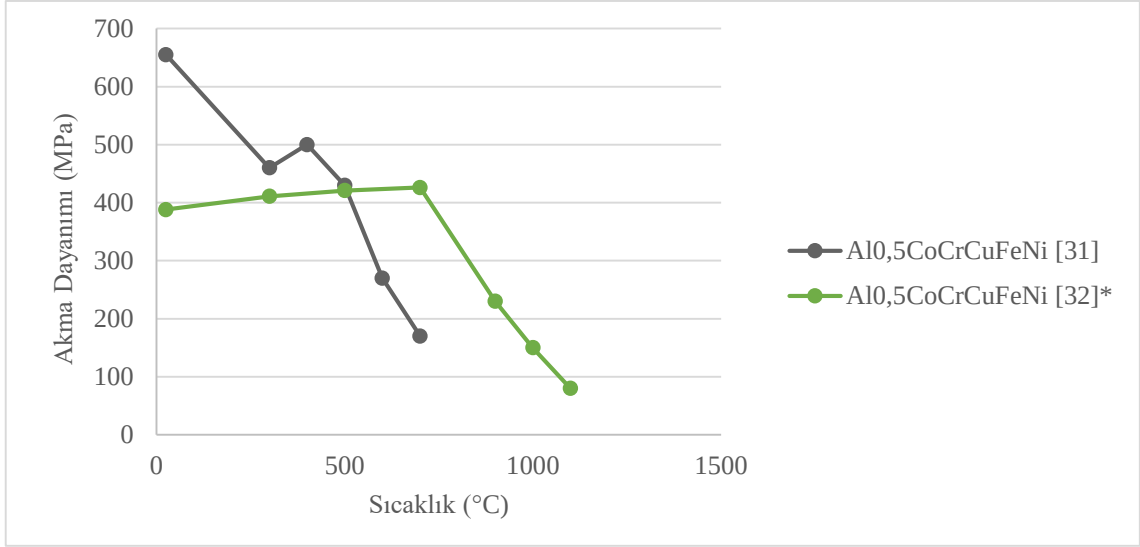
Literatürde göze çarpan bir diğer durum ise YEA'ların çekme ve basma yönündeki yüksek sıcaklık mekanik özelliklerinin farklı olmasıdır. Yapılan çalışmalarda genellikle basma yönündeki mekanik özellikler çekme yönündekilere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Fakat gerçek uygulamalarda malzemeye uygulanan gerilmeler çoğu zaman çekme yönündedir. Dolayısıyla aynı kompozisyona sahip Al<sub>0,5</sub>CoCrCuFeNi 3d geçiş metali içeren KKA'ya ait çekme ve basma yönünde elde edilmiş sıcaklığa bağlı akma dayanımı değişim grafiği Şekil 3.9'da verilmiştir [31, 32] Burada Al<sub>0,5</sub>CoCrCuFeNi 3d geçiş metali içeren KKA'ya ait basma yönündeki yüksek sıcaklık akma mukavemetinin çekme yönündekine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu tez

çalışmasında bu farklılık göz önüne alınarak nikel süperalaşımlar ile kıyaslamalar yapılacaktır.

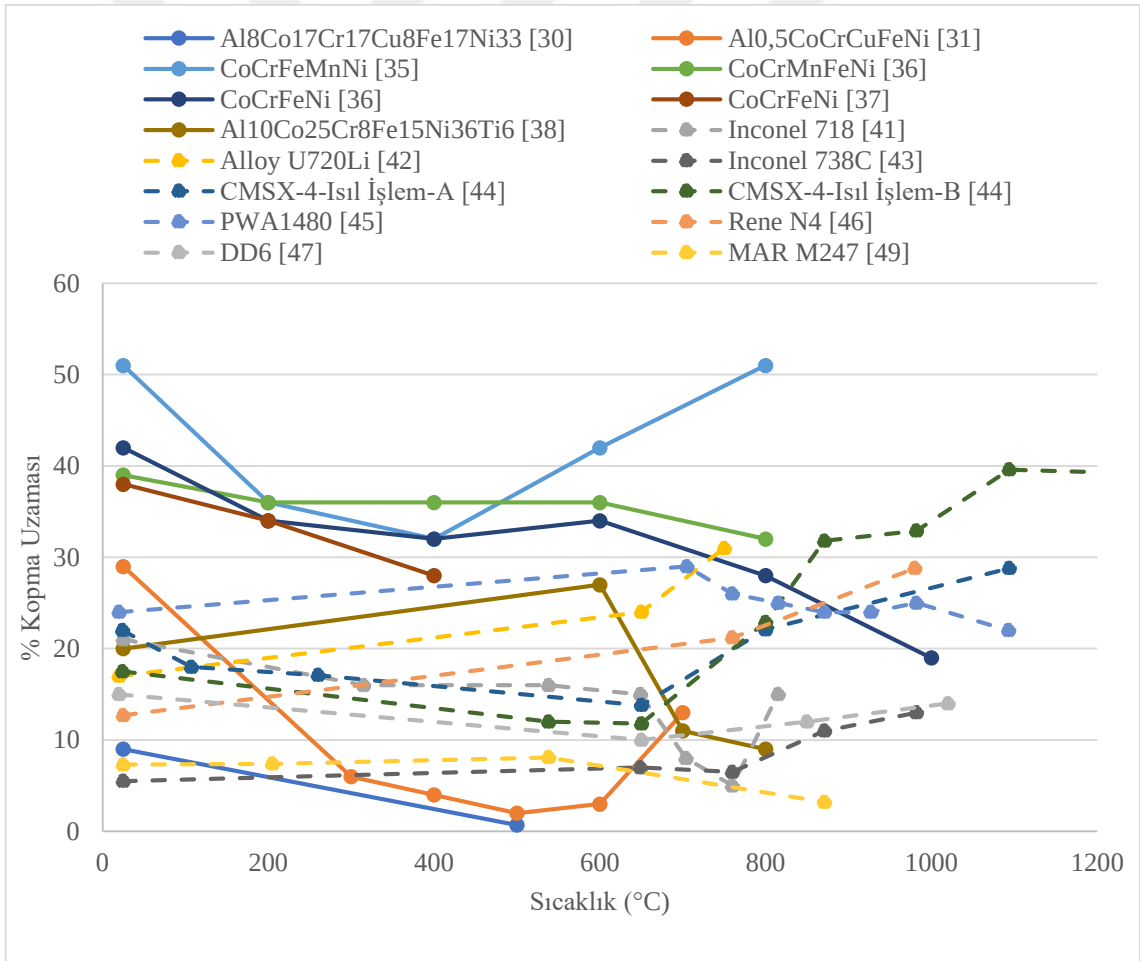
Şekil 3.10’da ise 3d geçiş metali içeren KKA ve YEA alaşımların süneklikleri incelendiğinde süperalaşımlara benzer ve nispeten daha yüksek süneklik gösterdikleri görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda süperplastik şekil değişimi elde edilen çalışmalarda mevcuttur [33-34].



Şekil 3.8. Sıcaklığa bağlı 3d geçiş metal ailesi YEA ve KKA'ların çekme yönündeki (\*Basma yönünde olanlar) akma dayanımlarının bazı geleneksel süperalaşımlar ile kıyaslaması [30-49]



**Şekil 3.9.**  $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$  3d geçiş metali KKA'ya ait basma (\*) ve çekme yönünde sıcaklığa bağlı akma mukavemeti değişimi [31, 32]



**Şekil 3.10.** Sıcaklığa bağlı 3d geçiş metal ailesi YEA ve KKA'ların çekme yönündeki kırma uzamalarının bazı geleneksel süperalaşım ile kıyaslaması [30-49]

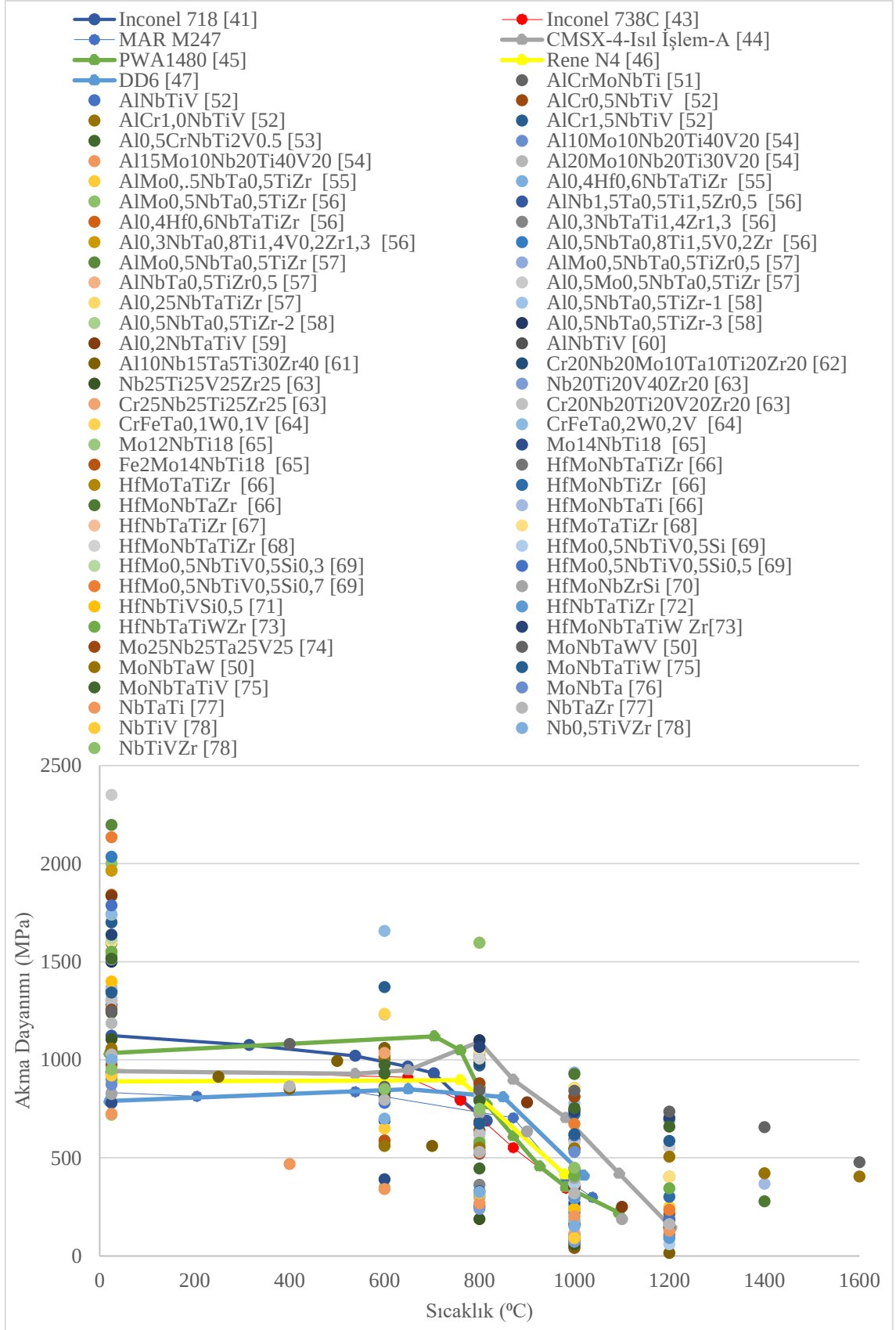
Özetle literatürde çok sayıda oda sıcaklığı mukavemetini test eden 3d geçiş metali içeren YEA çalışmaları mevcut olmasına rağmen tezin amacı yüksek sıcaklık mukavemeti gösteren bir YEA veya KKA geliştirmek olduğu için daha çok yüksek sıcaklık mekanik özellikleri ile öne çıkan RYEA ve refrakter element içeren KKA literatür çalışmalarına yoğunlaşmıştır.

### 3.5.2. Refrakter metal içeren YEA ve KKA'lar

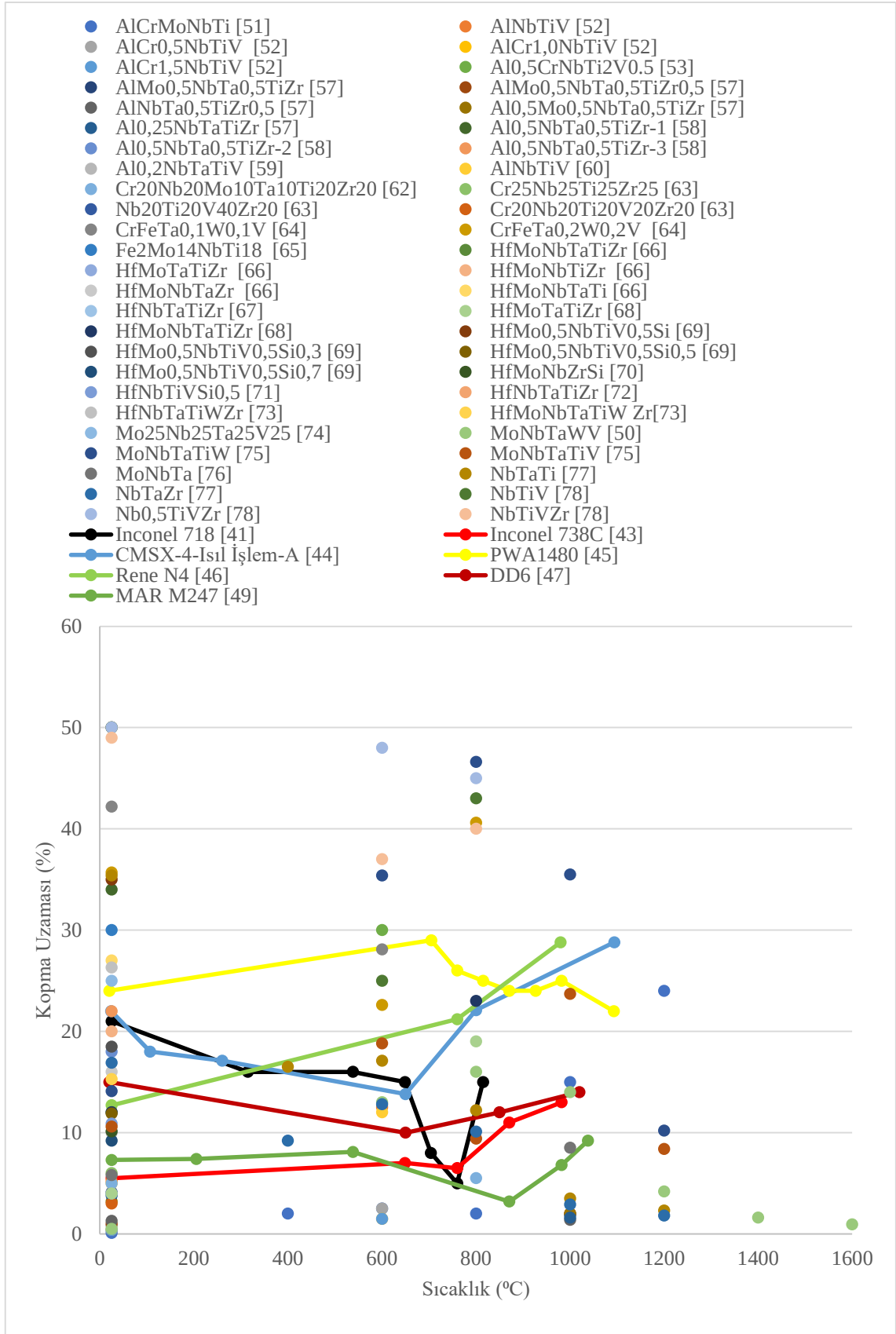
Yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle literatürde çalışılan diğer YEA grubu ise refrakter metal içeren YEA ve KKA'lar olup bu alaşımlar genellikle Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, W, V ve Zr (+Al) elementlerinden meydana gelmektedir. Bu alaşım elementlerini içeren KKA'lar ilk defa 2011 yılında Senkov ve diğerleri tarafından çalışılmaya başlanmıştır [50]. Yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini raporlayan çalışmaların birçoğu öncelikle eşmolar oranda Nb, Mo, Ta, W, V, Cr ve Zr'u alaşımlandırmak suretiyle basma yönündeki yüksek sıcaklık mekanik özelliklerinin incelenmesini içermektedir. Refrakter element içeren KKA grubunu çalışan araştırmacıların bir kısmı ise Al, Ti, Si ve C ilavesiyle kompleks mikroyapılı alaşım geliştirmişler ve yoğunluk azaltma çalışmaları da yapmışlardır. Literatürde yüksek sıcaklık mekanik özellikleri test edilen RYEA ve refrakter KKA'ların kompozisyon, test sıcaklığı, sertlik, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum şekil değişimi, elastik modül değerleri ile test yöntemleri (basma veya çekme) referansları ile birlikte EK-2 veritabanında verilmiştir [50-78].

EK-2'de detaylı olarak yer alan, yüksek sıcaklık basma mekanik özellikleri test edilen bazı refrakter KKA'lara ait akma mukavemetlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişim grafiği ve bazı nikel bazlı süperalaşımlar ile kıyaslanması Şekil 3.11'de verilmiştir [41-78]. Bu grafiğe göre refrakter KKA'ların bir kısmının sıcaklığa bağlı akma mukavemeti farklı renkteki noktalar ile gösterilmiştir. Burada bazı RYEA ve KKA'ların, Nikel bazlı süperalaşımlara kıyasla sıcaklığa bağlı olarak daha iyi akma mukavemeti gösterdiği anlaşılmaktadır. Öte yandan Al, Si ve Ti ilave edilen kompleks mikroyapıya sahip refrakter KKA'ların ( $\text{AlCrMoNbTi}$ ,  $\text{AlMo}_{0,5}\text{NbTa}_{0,5}\text{TiZr}$ ,  $\text{HfMo}_{0,5}\text{NbTiV}_{0,5}\text{Si}_{0,7}$ ) diğer KKA'lara göre daha yüksek basma mukavemeti gösterdikleri de anlaşılmıştır [51, 55, 69]. Fakat burada süperalaşım kıyaslamalarının çekme, RYEA ve KKA'ların ise-basma mukavemeti üzerinden yapıldığı unutulmamalıdır. 800°C sıcaklığın üzerindeki akma dayanımları kıyaslandığında ise Al içeren refrakter KKA'ların öne çıktığı görülmektedir.

Şekil 3.12’de bazı refrakter metal KKA’ların sıcaklığa bağlı olarak elde edilen basma yönündeki yüzde uzamaları ile nikel bazlı süperalaşımların çekme yönündeki yüzde uzamalarının kıyaslaması verilmiştir [50-78]. Özellikle 25°C sıcaklıkta birçok RYEA ve KKA, nikel bazlı süperalaşımlara göre nispeten daha az süneklik göstermektedir. Gevrek yapıdaki bu RYEA ve KKA’lara çekme yönünde bir test uygulandığı takdirde gevrek yapıları nedeniyle muhtemelen daha da düşük süneklik gösterecekleri anlaşılmaktadır. Havacılık motorları sürekli yüksek sıcaklıkta çalışmadığından kullanılacak türbin malzemelerinin, motor soğuk halden ısınana kadar herhangi bir darbe durumunda hasara uğramaması ve çatlakların kolay ilerlememesi için sünek bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Böylece ani parça hasarlarının motorun tamamının hasara uğratmasının (ing. catastrophic failure) önüne geçilebilmektedir. Bu yüzden havacılık motorlarında kullanıma aday bir refrakter KKA, aynı zamanda oda sıcaklığından 500°C sıcaklıklara kadar yeterli süneklikte olması da gerekmektedir.



**Şekil 3.11.** Sıcaklığa bağlı refrakter metal içeren YEA ve KKA'ların basma yönündeki akma dayanımlarının bazı süperalaşımların çekme yönündeki akma dayanımları ile kıyaslaması [41-78]



Şekil 3.12. Sıcaklığa bağlı Refrakter Metal Ailesi YEA/KKA'ların basma yönündeki yüzde uzamalarının bazı süperalaşımların çekme yönündeki kopma uzamaları ile kıyaslaması [41-78]

#### 4. ALAŞIM TASARIM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde deneysel çalışmalarda üretilecek RYEA ve KKA'ların; literatür verilerinin analizi, empirik hesaplamalar ve CALPHAD araçları yardımı ile nasıl tasarlandığının detayları verilmiştir. Literatür incelendiğinde YEA çalışmalarının büyük bir bölümü deneme-yanılma metodu ile deneysel olarak üretim ve karakterizasyon faaliyetlerini içerdiği görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada tasarım araçlarını kullanmadan önce bir başlangıç noktası oluşturmak adına, EK-2 veritabanında yer alan bilgiler analiz edilmiş ve alaşım tasarımında kullanılacak elementler belirlenmiştir. Bu kapsamda öncelikle literatürde yüksek sıcaklık mukavemeti raporlanan RYEA'lar nikel bazlı süperalaşımların sergilediği özellikler baz alınarak bir ön elemeyden geçirilmiştir. Buna göre oda sıcaklığında yeterli süneklik ve yüksek sıcaklıklarda nikel süperalaşımlara kıyasla nispeten daha yüksek akma dayanımı sağlayan bir kriterleme yapılarak seçilen alaşım gruplarında istatistiksel olarak en çok kullanılan elementler ve element sıklıkları belirlenmiştir. Ayrıca YEA'lar konusunda uzun yıllardır çalışan araştırma gruplarının derleme makalelerinde verdiği tavsiyeler ve elementlerin birim maliyetleri göz önüne alınarak, çalışılması planlanan 6 adet refrakter element belirlenmiştir. Bu elementlerin eşmolar kompozisyonu üzerinden öncelikle element eksiltme yöntemi uygulanarak diğer eşmolar beşli RYEA'lar belirlenmiş, bu kompozisyonlar ve varyasyonları için empirik ve CALPHAD hesaplamaları yapılmıştır.

##### 4.1. Veritabanı Analizi ve Çalışılacak Elementlerin Seçimi

Tezin ana hedefi havacılık motorlarında kullanılan nikel bazlı süperalaşımlara alternatif olabilecek bir alaşım tasarımı yapmaktır. Günümüz motorlarında 650°C sıcaklıklara kadar polikristal dövme ile üretilen Inconel 718 gibi alaşımlar, 650-850°C sıcaklıklarda CM247LC gibi yönlendirilmiş katılaşma döküm ile üretilen alaşımlar, 850-1100°C sıcaklıklarda ise tek kristal döküm ile üretilen CMSX-4 gibi alaşımlar kullanılmaktadır. Tek kristal türbin kanatçığı alaşımlarının en belirgin özellikleri, 1000-1100°C sıcaklıklarda en az 250-300 MPa akma dayanımı ve oda sıcaklığında ise en az % 3-5 kopma uzaması sergilemeleridir [41-49]. Bir malzemenin yüksek sıcaklık mukavemeti ve oda sıcaklığı sünekliği uçak motoru türbin modül parçalarına malzeme seçimi için aranan ilk kriterlerdir. Fakat bu özelliklerin yanı sıra; uzun süreler yüksek sıcaklıkta çalışan motor parçaları titreşimler nedeniyle yorulma hasarına, sıcaklık ve yükler nedeni ile de sürünme hasarına da uğramaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklık mukavemeti ile oda sıcaklığı süneklik şartını sağlayan bir alaşımda ikinci olarak beklenen

özellik yorulma ve sürünme dayanımının isterleri karşılamasıdır. Tez çalışmasındaki RYEA tasarımında kullanılacak elementlerin seçiminde yorulma ve sürünme özellikleri ile ilgili yeterli literatür verisi olmadığı için bu kriterler ikinci planda tutulmuştur. Özetle, RYEA tasarımında kullanılacak elementlerin belirlenmesi için EK-2 veritabanında yer alan RYEA ve KKA kompozisyonları aşağıdaki kriterler doğrultusunda ön elemeye tabi tutulmuştur.

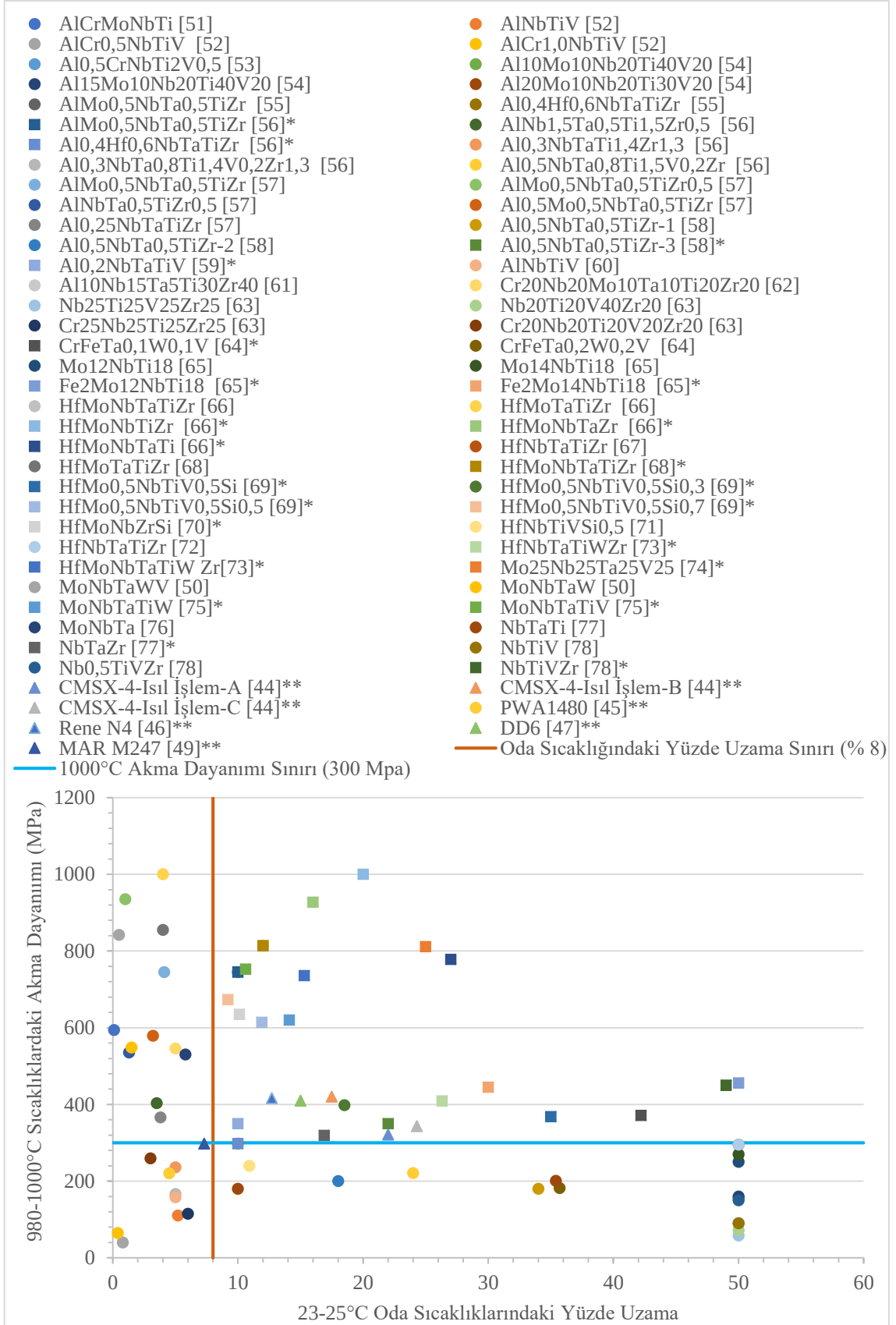
-1000°C sıcaklıkta basma yönünde akma mukavemeti en az 300 MPa

-Oda sıcaklığında basma yönünde yüzde uzama en az % 8

Havacılık motorlarında alaşım tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer gereklilik ise geliştirilen alaşımın oksidasyon ve korozyon dayanımıdır. RYEA’larda genellikle yüksek sıcaklık oksidasyon ve korozyon dayanımı düşük olduğu için mutlaka kaplama yöntemleri ile önlem alınması gerekmektedir. Fakat veritabanında yapılan analizlerde de oksidasyon ve korozyon dayanımı bir kriter olarak seçilmemiştir.

#### **4.1.1. Element kullanım sıklıklarının belirlenmesi**

EK-2’de verilen veritabanında 2010 yılından bu yana çalışılan 66 farklı kompozisyon/ikincil işlem uygulanmış RYEA ve KKA’lar ile nikel bazlı bazı süperalaşımların yaklaşık 1000°C sıcaklıktaki basma ve çekme yönünde akma dayanımları ile 20-25°C oda sıcaklığındaki yüzde uzamalarının yer aldığı grafik Şekil 4.1’de verilmiştir [44-78]. Grafik üzerindeki kırmızı dikey çizgi yüzde uzamanın minimum % 8 olduğu sınırı, mavi yatay çizgi ise yaklaşık 1000°C sıcaklıktaki minimum akma dayanımının 300 MPa olduğu sınırı göstermektedir. Burada kırmızı çizginin sağında, mavi çizginin üstünde kalan alan, bu tez çalışmasında geliştirilecek olan RYEA ve KKA tasarım gerekliliklerini sağlayan kompozisyonların bulunduğu alandır. Bu alan içerisinde yer alan ve kriterleri sağlayan 22 farklı kompozisyon veya ikincil işleme sahip RYEA ve KKA’lar (\*) ve (■) sembolleri ile gösterilmiş, nikel bazlı süperalaşımlar ise (\*\*) ve (▲) sembolleri ile belirtilmiştir. Bu grafikten elde edilen bilgiler ışığında bundan sonraki kısımda tasarım çalışmalarında kullanılacak elementler ve elementlerin ne sıklıkla kullanıldığı incelenmiştir.



**Şekil 4.1.** RYEA ve KKA'lar ile bazı nikel bazlı süperalaşımlara ait yaklaşık 1000°C sıcaklıktaki basma ve çekme yönündeki akma dayanımları ile yaklaşık 25°C oda sıcaklığındaki yüzde uzamalar [44-78]

29 adet RYEA ve KKA çalışmasında çalışılan toplam 66 farklı kompozisyon/ikincil işleme sahip RYEA ve KKA'lar Tablo 4.1'de verilmiştir. İlave olarak belirlenen minimum akma dayanımı ve yüzde uzama değerlerini sağlayan 22 adet RYEA/KKA için kullanılan refrakter elementler, kullanım sıklıkları ve elde edilen kristal yapılar yine Tablo 4.1'de verilmiştir [50-78].

**Tablo 4.1.** EK-2 veritabanında yer alan tüm RYEA ve KKA'lar ile minimum akma dayanımı ve yüzde uzama değerlerini sağlayan RYEA ve KKA'lar için kullanılan refrakter element sıklıkları ve saptanan fazlar ile kristal yapılar [50-78]

| Ref# | RYEA ve KKA'lar            | Al | Cr | Fe | Hf | Mo | Nb | Si | Ta | Ti | W | V | Zr | Saptanan Fazlar ve Kristal Yapılar                          |
|------|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|----|-------------------------------------------------------------|
| [51] | AlCrMoNbTi                 | 1  | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK (Döküm Halde),<br>HMK+ Laves (Isıl işlem Sonrası)       |
| [52] | AlNbTiV                    | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK (Döküm Halde),<br>HMK+ Nb2Al (Basma Testi Sonrası)      |
| [52] | AlCr0,5NbTiV               | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK (Döküm Halde),<br>HMK+ Nb2Al (Basma Testi Sonrası)      |
| [52] | AlCr1,0NbTiV               | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK + Hegzagonal (C14) Laves                                |
| [53] | Al0,5CrNbTi2V0,5           | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK (Döküm Halde),<br>HMK+ Laves (C14) (Isıl işlem Sonrası) |
| [54] | Al10Mo10Nb20Ti40V20        | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK                                                         |
| [54] | Al15Mo10Nb20Ti40V20        | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK                                                         |
| [54] | Al20Mo10Nb20Ti30V20        | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK                                                         |
| [55] | AlMo0,5NbTa0,5TiZr         | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK-1 + HMK-2                                               |
| [55] | Al0,4Hf0,6NbTaTiZr         | 1  |    |    | 1  |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK                                                         |
| [56] | AlMo0,5NbTa0,5TiZr*        | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK-1 + HMK-2                                               |
| [56] | AlNb1,5Ta0,5Ti1,5Zr0,5     | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK                                                         |
| [56] | Al0,4Hf0,6NbTaTiZr         | 1  |    |    | 1  |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK                                                         |
| [56] | Al0,3NbTaTi1,4Zr1,3        | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK-1 + HMK-2                                               |
| [56] | Al0,3NbTa0,8Ti1,4V0,2Zr1,3 | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   | 1 | 1  | HMK                                                         |
| [56] | Al0,5NbTa0,8Ti1,5V0,2Zr    | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   | 1 | 1  | HMK-1 + HMK-2                                               |
| [57] | AlMo0,5NbTa0,5TiZr         | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK+B2+HSP                                                  |
| [57] | AlMo0,5NbTa0,5TiZr0,5      | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | B2+HSP                                                      |
| [57] | AlNbTa0,5TiZr0,5           | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | B2                                                          |
| [57] | Al0,5Mo0,5NbTa0,5TiZr      | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | B2+HSP                                                      |
| [57] | Al0,25NbTaTiZr             | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK+B2                                                      |
| [58] | Al0,5NbTa0,5TiZr-1         | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK-1 + HMK-2                                               |
| [58] | Al0,5NbTa0,5TiZr-2         | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK+ HSP                                                    |
| [58] | Al0,5NbTa0,5TiZr-3*        | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   |   | 1  | HMK                                                         |
| [59] | Al0,2NbTaTiV*              | 1  |    |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  |   | 1 |    | HMK                                                         |
| [60] | AlNbTiV                    | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   | 1 |    | HMK                                                         |

**Tablo 4.1 (Devamı)** EK-2 veritabanında yer alan tüm RYEA ve KKA'lar ile minimum akma dayanımı ve yüzde uzama değerlerini sağlayan RYEA ve KKA'lar için kullanılan refrakter element sıklıkları ve saptanan fazlar ile kristal yapılar [50-78]

| Ref# | RYEA ve KKA'lar          | Al | Cr | Fe | Hf | Mo | Nb | Si | Ta | Ti | W | V | Zr | Saptanan Fazlar ve Kristal Yapılar               |
|------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|----|--------------------------------------------------|
| [61] | Al10Nb15Ta5Ti30Zr40      | 1  |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK+B2                                           |
| [62] | Cr20Mo10Nb20Ta10Ti20Zr20 |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    |   |   |    | HMK-1 + HMK-2 + YMK-Laves (C15)                  |
| [63] | Nb25Ti25V25Zr25          |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [63] | Nb20Ti20V40Zr20          |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK-1 + HMK-2 + HMK-3                            |
| [63] | Cr25Nb25Ti25Zr25         |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK + Laves                                      |
| [63] | Cr20Nb20Ti20V20Zr20      |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK + Laves                                      |
| [64] | CrFeTa0,1W0,1V*          |    | 1  |    |    |    |    |    |    |    |   |   |    | HMK                                              |
| [64] | CrFeTa0,2W0,2V           |    | 1  |    |    |    |    |    |    |    |   |   |    | HMK                                              |
| [65] | Mo12NbTi18               |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [65] | Mo14NbTi18               |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [65] | Fe2Mo12NbTi18*           |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [65] | Fe2Mo14NbTi18*           |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [66] | HfMoNbTaTiZr             |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [66] | HfMoTaTiZr               |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [66] | HfMoNbTiZr*              |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [66] | HfMoNbTaZr*              |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |   |   |    | HMK                                              |
| [66] | HfMoNbTaTi*              |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [67] | HfNbTaTiZr               |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [68] | HfMoTaTiZr               |    |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [68] | HfMoNbTaTiZr*            |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [69] | HfMo0,5NbTiV0,5Si*       |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [69] | HfMo0,5NbTiV0,5Si0,3*    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK+ M5Si3 Silisit                               |
| [69] | HfMo0,5NbTiV0,5Si0,5*    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK+ M5Si3 Silisit                               |
| [69] | HfMo0,5NbTiV0,5Si0,7*    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK+ M5Si3 Silisit                               |
| [70] | HfMoNbZrSi*              |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |   |   |    | HMK                                              |
| [71] | HfNbTiVSi0,5             |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK+ M5Si3 Silisit                               |
| [72] | HfNbTaTiZr               |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK                                              |
| [73] | HfNbTaTiWZr*             |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK-1 + HMK-2                                    |
| [73] | HfMoNbTaTiWZr*           |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK-1 + HMK-2                                    |
| [74] | Mo25Nb25Ta25V25*         |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |   |   |    | HMK                                              |
| [50] | MoNbTaWV                 |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |   |   |    | HMK (Döküm Halinde),<br>HMK (Isıl işlem Sonrası) |
| [50] | MoNbTaW                  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |   |   |    | HMK (Döküm Halinde),<br>HMK (Isıl işlem Sonrası) |
| [75] | MoNbTaTiW*               |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK (Döküm Halinde),<br>HMK (Isıl işlem Sonrası) |
| [75] | MoNbTaTiV*               |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |   |   |    | HMK (Döküm Halinde),<br>HMK (Isıl işlem Sonrası) |

**Tablo 4.1 (Devamı)** EK-2 veritabanında yer alan tüm RYEA ve KKA'lar ile minimum akma dayanımı ve yüzde uzama değerlerini sağlayan RYEA ve KKA'lar için kullanılan refrakter element sıklıkları ve saptanan fazlar ile kristal yapılar [50-78]

| Ref#                                                          | RYEA ve KKA'lar | Al        | Cr       | Fe       | Hf        | Mo        | Nb        | Si       | Ta        | Ti        | W        | V         | Zr        | Saptanan Fazlar ve Kristal Yapılar |
|---------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------------------------------|
| [76]                                                          | MoNbTa          |           |          |          |           | 1         | 1         |          |           |           |          |           |           | HMK                                |
| [77]                                                          | NbTaTi          |           |          |          |           |           | 1         |          |           | 1         |          |           |           | HMK                                |
| [77]                                                          | <b>NbTaZr*</b>  |           |          |          |           |           | 1         |          |           |           |          |           |           | HMK-1 + HMK-2 + HSP + YMK          |
| [78]                                                          | NbTiV           |           |          |          |           |           | 1         |          |           | 1         |          |           |           | HMK                                |
| [78]                                                          | Nb0.5TiVZr      |           |          |          |           |           | 1         |          |           | 1         |          |           |           | HMK                                |
| [78]                                                          | <b>NbTiVZr*</b> |           |          |          |           |           | 1         |          |           | 1         |          |           |           | HMK                                |
| <b>Tüm RYEA ve KKA'lardaki Toplam Kullanım Sayısı</b>         |                 | <b>27</b> | <b>9</b> | <b>4</b> | <b>19</b> | <b>33</b> | <b>62</b> | <b>6</b> | <b>39</b> | <b>56</b> | <b>6</b> | <b>27</b> | <b>35</b> |                                    |
| <b>Seçilen RYEA ve KKA'lardaki (*) Toplam Kullanım Sayısı</b> |                 | <b>3</b>  | <b>1</b> | <b>3</b> | <b>11</b> | <b>16</b> | <b>20</b> | <b>5</b> | <b>14</b> | <b>17</b> | <b>3</b> | <b>8</b>  | <b>10</b> |                                    |

Tablo 4.1'de koyu harflerle yazılan ve (\*) sembolü ile işaretli olan RYEA ve KKA'lar, yüzde uzamanın minimum % 8, yaklaşık 1000°C sıcaklıktaki akma dayanımının minimum 300 MPa olması şartını sağlayan alaşımları göstermektedir.

Tablo 4.1 incelendiğinde veritabanında yüksek sıcaklık özellikleri raporlanan 66 adet KKA ve RYEA'da en sık kullanılan elementten en seyrek kullanılan elemente olan sıralama Nb>Ti>Ta>Zr>Al>V>Hf>Cr>W=Si>Fe şeklindedir. Burada en çok kullanılan 4 refrakter element Nb, Ti, Ta ve Zr iken, en az kullanılan elementler ise Cr, W, Si ve Fe'dir. Öte yandan belirlenen minimum akma dayanımı (300 MPa) ve yüzde uzama (% 8) değerlerini sağlayan 22 adet RYEA ve KKA'da ise en sık kullanılan elementten en seyrek kullanılan elemente olan sıralama Nb>Ti>Mo>Ta>Hf>Zr>V>Si>W=Fe=Al>Cr şeklindedir. Burada ise en çok kullanılan 4 refrakter metal Nb, Ti, Mo ve Ta iken en az kullanılan elementler yine W, Al, Fe ve Cr'dur.

Veritabanındaki 66 adet RYEA ve KKA kompozisyonundan 44 tanesinin döküm halde iken tek fazlı düzenli B2 ve düzensiz HMK kristal yapı içerdiği görülmüştür. Geriye kalan 22 adet RYEA ve KKA ise birden fazla kristal yapıda katı çözelti veya çökelti fazlarını içermektedir. 6 adet RYEA ve KKA'da ise nikel bazlı süperalaşımlarda istenmeyen faz olarak bilinen kırılğan Laves fazının çeşitli formlarına (C14, C15) rastlanıldığı görülmektedir [51, 52, 53, 62, 63]. Si içeren 4 adet RYEA ve KKA'da ise M<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> Silisit fazı saptanmıştır [69, 70].

#### 4.1.2. Element maliyet analizi

Tasarlanacak RYEA için element seçiminde veritabanındaki kullanım sıklıklarının yanı sıra, havacılık motorlarında kullanım için nikel bazlı süperalaşımlara kıyasla rekabet edebilir bir fiyata sahip olması da göz önüne alınması gerekmektedir. Bu amaçla saf elementlerin birim maliyetleri de göz önüne alınmıştır. Tablo 4.2’de tez çalışmasında kullanılan elementlerin toz, pelet ve sac/folyo formunda alındığı durumda ortaya çıkan ortalama tedarik maliyetleri verilmiştir. Bu tabloya göre pahalıdan ucuza element maliyet sıralaması  $Hf > Ta > V > Nb = Ti > Zr > W > Mo > Al > Cr > Fe$  şeklindedir.

**Tablo 4.2.** Tez çalışması kapsamında tedarik edilen elementlerin ortalama tedarik birim maliyetleri

| Element | Ortalama Tedarik Maliyet (USD/kg) |
|---------|-----------------------------------|
| Al      | 100                               |
| Cr      | 90                                |
| Fe      | 85                                |
| Hf      | 4530                              |
| Mo      | 165                               |
| Nb      | 300                               |
| Ta      | 700                               |
| Ti      | 300                               |
| W       | 175                               |
| V       | 475                               |
| Zr      | 235                               |

#### 4.1.3. Literatür çıkarımları ve tasarım için element seçimi

EK-2 veritabanından elde edilen element kullanım sıklıkları, element tedarik maliyetleri ve literatür çalışmalarından elde edilen çıkarımlar doğrultusunda bu tez çalışmasında tasarlanacak olan RYEA ve KKA için seçilen elementler, seçilme nedenleri ile birlikte aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

**-Al ve Cr:** Literatürde Al ve Cr ile alaşımlandırmada genellikle kırılğan Laves fazı içeren iki fazlı bir mikroyapı elde edilmiş ve bu RYEA ve KKA’larda yeterli yüksek sıcaklık mukavemeti (nikel bazlı süperalaşımlara kıyasla) elde edilemediği görülmüştür. Dolayısı ile Al ve Cr elementleri alaşımlarda her ne kadar oksidasyon direncini artırsada, ilk aşamada alaşım tasarımı için seçilmemiştir.

**-C ve Si:** C ve Si elementleri ile alaşımlandırılan KKA'larda  $M_5Si_3$  silisit fazı ile MC tipi karbür çökelmelerinin olduğu iki fazlı bir mikroyapı elde edildiği anlaşılmıştır. Araştırmacılar bu fazların tane sınırlarına birikmesi neticesinde KKA'larda tane boyutu küçültücü ama gevrekliği artırıcı bir etki oluşturduğunu belirtmektedirler [69, 70]. Dolayısı ile bu elementlerin gevrekleşmeye yol açması ve yeterli yüksek sıcaklık mukavemeti (nikel bazlı süperalaşımlara kıyasla) sağlayamaması gibi nedenlerle alaşım tasarımında kullanılmamasına karar verilmiştir.

**-Ti, V ve Zr:** Ti elementi, RYEA ve KKA'ların tane sınırı kohezyonunu ve oksidasyon dayanımını artırmaktadır. V elementinin ise; Hf, Ta, Nb ve Zr elementleri ile birlikte Laves fazı oluşturduğu bazı çalışmalarda rapor edilmiştir. Burada Ti, V ve Zr elementleri ağır refrakter metallere göre nispeten daha düşük ergime noktası ve yoğunluğa sahip olduğu için RYEA çalışmalarında sıkça kullanılmıştır. Bu nedenle nikel bazlı süperalaşımlara göre benzer bir yoğunluk eldesi için V ve alaşım tasarımında sünekliği artırması beklenen HSP fazını tetikleyen elementler olarak Ti ve Zr'un alaşım tasarımında kullanılmasına karar verilmiştir.

**-Mo, Hf ve W:** W ile yapılan çalışma sayısı oldukça azdır. Mo ise belirlenen minimum akma dayanımı ve yüzde uzama değerlerini sağlayan RYE ve KKA'larda sıkça kullanılmaktadır ve tasarımda gerekli olduğu düşünülmüştür. W elementinin ergime noktasının yüksek olması ve literatürde W içeren RYEA ve KKA çalışma sayısının az olması, ilave olarak bu tez çalışmasıyla literatüre özgün bir katkı sağlaması düşüncesiyle alaşım tasarımında W elementinin olmasına karar verilmiştir. Hf elementi içeren RYEA'ların yüksek sıcaklık mekanik özellikleri dikkat çekicidir. Fakat Hf elementi çok pahalı ve nadir bulunan bir element olduğu için bu tez çalışmasındaki alaşım tasarımında çalışılacak elementler arasında yer almamıştır.

**-Nb ve Ta:** RYEA ve KKA'larda yüksek sıcaklık mukavemeti sağlayan ve en sık kullanılan elementin Nb olduğu görüldüğünden bu element alaşım tasarımı için seçilmiştir. Öte yandan RYEA'larda Ta miktarı düştükçe HMK yapının stabilize olduğu ve HSP yapının daha baskın hale geldiği görülmektedir [35]. Bu nedenle Ta elementinin fiyatının Nb elementine göre daha yüksek olması ve W gibi bir baskın HMK yapıyı kararlı kılan element zaten seçildiği için RYEA tasarımında Nb seçilmiş ama Ta kullanılmamasına karar verilmiştir.

Özetle veritabanı analizleri, literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler ve element birim maliyetleri gibi hususlar göz önüne alındığında aşağıda verilen elementler ile RYEA/KKA tasarımı yapılmasına karar verilmiştir.

- Oda sıcaklığında HMK kristal yapıya sahip Mo, Nb ve W ağır refrakter elementler
- 800-900°C HSP-HMK allotropik dönüşüm gerçekleştiren Ti ve Zr elementleri
- HMK kristal yapıdaki V hafif refrakter elementi

#### **4.2. RYEA ve KKA Tasarımları**

Mo, Nb, W, Ti, Zr ve V elementleri ile literatürde de sıkça kullanılan “element eksiltme” yöntemi ile oluşturulan beşli eşmolar kombinasyonları üzerinden empirik ve termodinamik hesaplamaların yapılmasına karar verilmiştir.

##### **4.2.1. Element eksiltme yöntemi ile MoNbTiWVZr RYEA ve türevlerinin hesaplamaları**

Belirlenen elementlerden oluşan eşmolar MoNbTiWVZr altılı RYEA alaşımı ile bunun “element eksiltme” yöntemi ile oluşturulan beşli eşmolar RYEA kombinasyonlarını (MoNbTiVZr, MoTiWVZr, NbTiWVZr, MoNbTiWV, MoNbTiWZr, MoNbWVZr) üzerinde empirik ve CALPHAD hesaplamaları yapılmıştır.

##### **4.2.1.1. Empirik hesaplamalar**

Empirik hesaplamalar için elementlerin saf haldeki atomik ağırlığı, ergime sıcaklığı, yoğunluğu, atomik yarıçapı, valans elektron sayısı, elektronegativitesi, elastik modülü ve saf durumdaki kristal yapı gibi bilgileri literatürden alınmıştır [79, 80]. Ayrıca Miedema hesaplama aracı ile bu elementlerin ikili kombinasyonlarının karışım entalpileri ( $\Delta H_{\text{karışım}}$ ) hesaplanmıştır [81]. Bu verilerden yola çıkılarak Bölüm 3.3.1’de verilen denklemler vasıtası ile 7 adet eşmolar RYEA’ya ait karışım ergime sıcaklığı, yoğunluğu, entalpisi, entropisi, ortalama atom yarıçapı, atomik boyut farkı parametresi ( $\delta$ ), elektronegativite farkı ( $\chi$ ),  $\Omega$  katsayısı, valans elektron konsantrasyonu (VEK) ve elastik modülü hesap edilmiştir. Excel kullanılarak gerçekleştirilmiş empirik hesaplamaların sonuçları Tablo 4.3’te verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Element eksiltme yöntemi ile türetilen eşmolar RYEA'lara ait empirik hesaplama sonuçları

| RYEA       | Eşmolar Oran (%) | $T_{\text{karışım}} (^{\circ}\text{C})$ | $\rho_{\text{karışım}} (\text{g/cm}^3)$ | $\Delta H_{\text{karışım}} (\text{kJ/mol})$ | $\Delta S_{\text{karışım}} (\text{J/K.mol})$ | $r_{\text{ort}}$ |
|------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| MoNbTiWVZr | 16,7             | 2320,8                                  | 9,19                                    | -3,56                                       | 14,90                                        | 142,1            |
| MoNbTiVZr  | 20               | 2097,4                                  | 7,14                                    | -2,51                                       | 13,38                                        | 142,8            |
| MoTiWVZr   | 20               | 2285,8                                  | 9,29                                    | -4,88                                       | 13,38                                        | 141,6            |
| NbTiWVZr   | 20               | 2256,0                                  | 8,96                                    | -3,87                                       | 13,38                                        | 143,0            |
| MoNbTiWV   | 20               | 2409,0                                  | 9,71                                    | -3,95                                       | 13,38                                        | 138,4            |
| MoNbTiWZr  | 20               | 2401,4                                  | 9,81                                    | -5,02                                       | 13,38                                        | 144,0            |
| MoNbWVZr   | 20               | 2447,4                                  | 10,10                                   | -4,87                                       | 13,38                                        | 141,2            |

| RYEA       | $\delta$ (%) | $\chi_{\text{ort}}$ | $\Delta\chi$ | $\Omega$ | VEK | $E_{\text{karışım}}$ |
|------------|--------------|---------------------|--------------|----------|-----|----------------------|
| MoNbTiWVZr | 6,31         | 1,773               | 0,36         | 9,69     | 5,0 | 218,4                |
| MoNbTiVZr  | 6,66         | 1,652               | 0,27         | 11,17    | 4,8 | 179,4                |
| MoTiWVZr   | 6,91         | 1,804               | 0,39         | 6,25     | 5,0 | 240,6                |
| NbTiWVZr   | 6,56         | 1,692               | 0,35         | 7,79     | 5,2 | 159                  |
| MoNbTiWV   | 3,64         | 1,858               | 0,34         | 8,15     | 5,2 | 248                  |
| MoNbTiWZr  | 5,73         | 1,798               | 0,39         | 6,40     | 5,0 | 205,8                |
| MoNbWVZr   | 6,86         | 1,816               | 0,38         | 6,71     | 5,2 | 238,4                |

7 farklı alaşım kombinasyonunun sırasıyla karışım entalpi ( $\Delta H_{\text{karışım}}$ ) ve entropileri ( $\Delta S_{\text{karışım}}$ ) incelendiğinde, tek fazlı katı çözeltiliye sahip bir RYEA eldesi için, tüm RYEA'ların da  $-15 \text{ kJ/mol} < \Delta H_{\text{karışım}} < 5 \text{ kJ/mol}$  ve  $\Delta S_{\text{karışım}} > 1.5R$  şartını sağladığı görülmektedir [82]. Öte yandan MoNbTiVZr, MoTiWVZr ve MoNbWVZr eşmolar RYEA'larda atomik boyut farklılığı parametresi ( $\delta$ ) % 6,6'nın üzerinde olduğu için tek fazlı bir mikroyapıya sahip olamayacakları anlaşılmaktadır [82].  $\Omega$  kriterine göre tüm alaşımların hesaplanan değeri  $\Omega > 1$  olduğu için tek fazlı katı çözelti oluşturmaları beklenmektedir. Valans elektron konsantrasyonu açısından VEK  $< 6,87$  kriterinin tüm alaşımlar tarafından sağlanması nedeniyle bütün alaşımların HMK kristal yapıda olması beklenmektedir [82]. Elektronegativite farklılık kriterine göre yine benzer şekilde tüm alaşımlarda  $\Delta\chi < \% 6$  olduğundan alaşımların tek fazlı yapıya sahip olacağı anlaşılmıştır. Alaşımların karışım ergime sıcaklıkları tümünde  $2000^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindedir. Yoğunluk

olarak değerlendirildiğinde ise MoNbTiVZr ve NbTiWVZr RYEA'ların nikel süperalaşımlara kıyasla benzer yoğunluklara (7,14 ve 8,96 g/cm<sup>3</sup>) sahip olduğu görülmektedir.

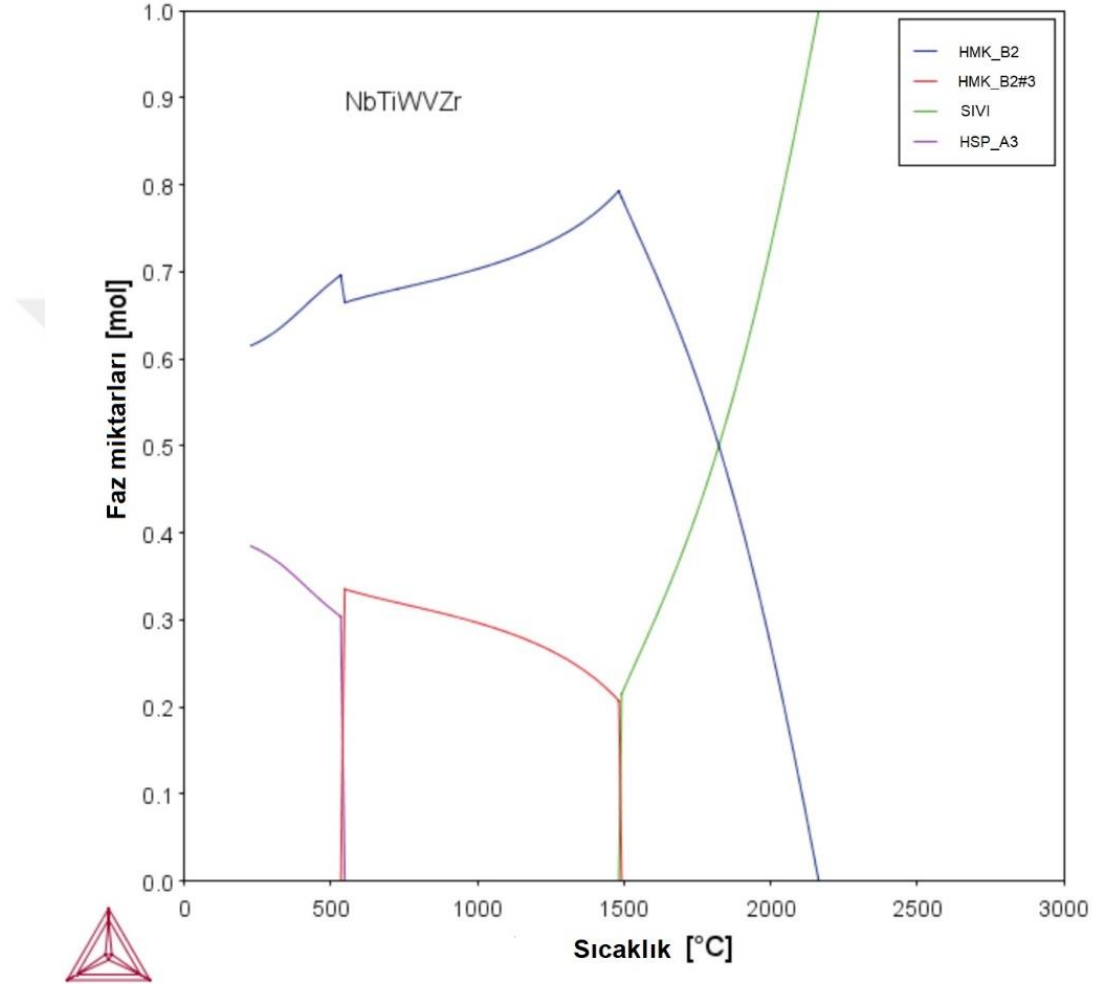
#### 4.2.1.2. CALPHAD hesaplamaları

Alaşımların Thermocalc yazılımı ile TCHEA-4 veritabanı kullanılarak denge durumunda sıcaklığa bağlı oluşabilecek fazlar ve faz miktarları ile katılaşmanın ve sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklıklar ( $T_{\text{solidüs}}$  ve  $T_{\text{likidüs}}$ ) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir. Tablo 4.4 incelendiğinde eşmolar NbTiWVZr ve MoNbTiWV RYEA'lar dışındaki diğer RYEA kompozisyonlarında, mikroyapıda C14 ve C15 kristal yapısındaki Laves fazlarının (tabloda kırmızı renk ile yazılmıştır) oluşabileceği görülmüştür. Empirik hesaplamalarda MoNbTiVZr, MoTiWVZr ve MoNbWVZr eşmolar RYEA'larda da benzer şekilde atomik boyut farklılığı parametresi tek fazlı bir mikroyapı elde edilemeyeceği görülmektedir. Sonuç olarak hem CALPHAD hesaplamalarında Laves fazı içermeyen, hem de empirik denklemlerde tek fazlı bir mikroyapıya sahip iki adet eşmolar RYEA yapısı olduğu tespit edilmiştir. Bu alaşımlar NbTiWVZr ve MoNbTiWV RYEA'ları olup tabloda yeşil renk ile gösterilmiştir.

**Tablo 4.4.** Element eksiltme yöntemi ile türetilen eşmolar RYEA'lara ait Thermocalc ile yapılan CALPHAD hesaplama sonuçları

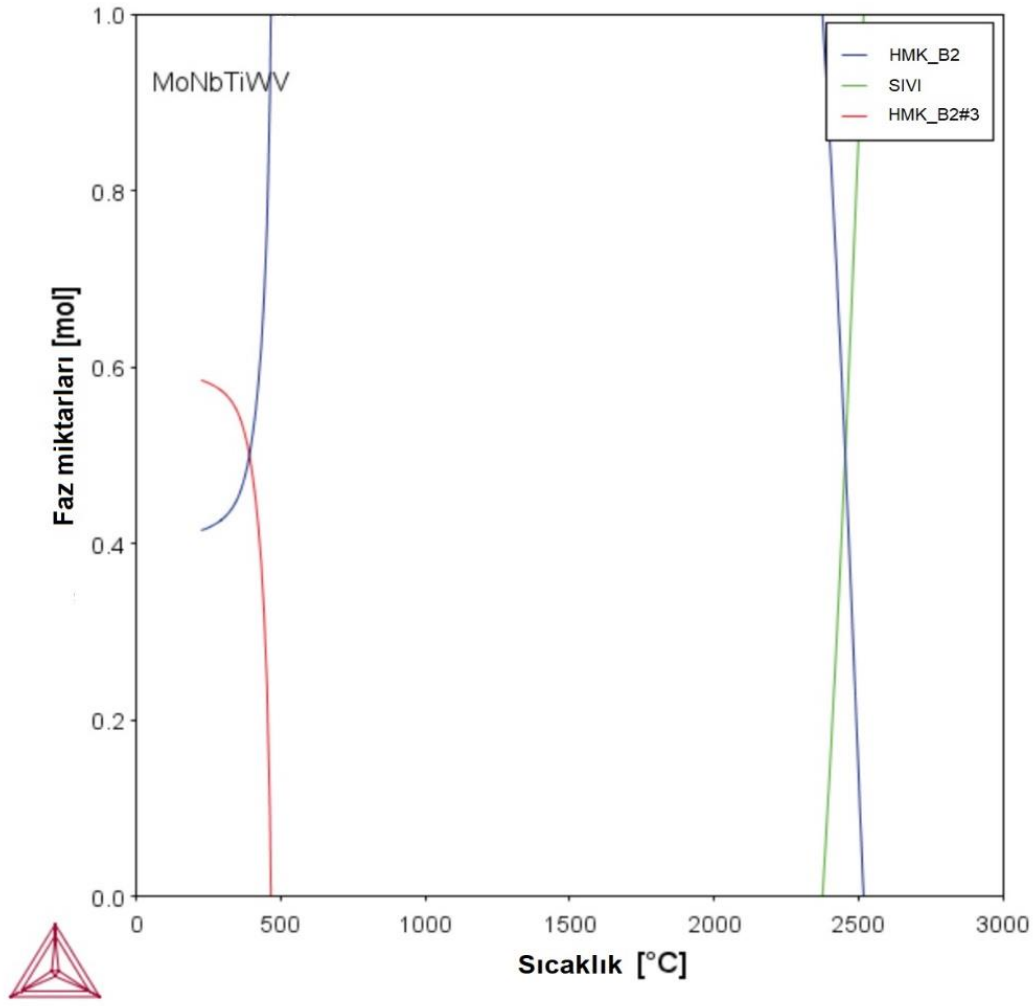
| RYEA       | Eşmolar Oran (%) | 500°C sıcaklık altında kararlı olan fazlar ve miktarları | T Solidus (C°) | T likidus (C°) |
|------------|------------------|----------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| MoNbTiWVZr | 16,7             | HMK_A2, Laves_C14 (%7), HMK_A2#3 (%30), HSP_A3 (%30)     | 1475,16        | 2263,61        |
| MoNbTiVZr  | 20               | HMK_B2, HSP_A3 (%26), Laves_C15 (% 40)                   | 1614,53        | 2119,77        |
| MoTiWVZr   | 20               | HMK_B2#2, HSP_A3 (%16), Laves_C15 (%58)                  | 1541,98        | 2311,98        |
| NbTiWVZr   | 20               | HMK_B2, HSP_A3 (%39)                                     | 1482,62        | 2164,33        |
| MoNbTiWV   | 20               | HMK_B2#3, HMK_B2 (%37), HSP_A3 (%19)                     | 2375,77        | 2518,28        |
| MoNbTiWZr  | 20               | Laves_C15, HMK_B2#2 (%35), HSP_A3 (%11)                  | 1609,25        | 2372,53        |
| MoNbWVZr   | 20               | Laves_C15, HMK_B2 (%37), HMK_B2#2 (%7)                   | 1496,29        | 2381,32        |

Thermocalc ile yapılan hesaplamalarda NbTiWVZr ve MoNbTiWV RYEA'nın katılma bitiş sıcaklıklarının sırasıyla 1482,62°C ve 2375,77°C olduğu görülmektedir. Bu RYEA'ların sıcaklığa bağlı faz değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.2'de ve Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. NbTiWVZr eşmolar RYEA'ya ait Thermocalc'de elde edilen sıcaklığa bağlı faz değişim grafiği

Bu tez çalışmasında ilk deneysel çalışmalar literatürde süreklilik sağladığı belirtilen HSP faz miktarının daha fazla olması öngörülen eşmolar NbTiWVZr RYEA ile yapılmasına karar verilmiştir. Bu RYEA kompozisyonu üzerinde her bir elementin molar oranı belli oranda değiştirilerek empirik ve CALPHAD hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Buna göre önce NbTiWVZr eşmolar RYEA, daha sonra NbTiWVZr KKA'lardan seçilecek bir alaşım ve son olarak MoNbTiWV RYEA üzerinde deneysel faaliyetlerin gerçekleştirilmesi planlanmıştır.



Şekil 4.3. MoNbTiWV eşmolar RYEA'ya ait Thermocalc'de elde edilen sıcaklığa bağlı faz değişim grafiği

#### 4.2.2. NbTiWVZr RYEA ve kompozisyonel türevlerinin hesaplamaları

NbTiWVZr RYEA'da her bir elementin molar oranları sırasıyla % 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50 olarak değiştirilerek (5 element ve 5 farklı molar oran toplam 25 kombinasyon) toplam 25 farklı RYEA kompozisyonu için empirik ve termodinamik hesaplamalar yapılmıştır.

##### 4.2.2.1. Empirik hesaplamalar

Yapılan empirik hesaplamalar Tablo 4.5'te verimiştir. Buna göre alaşımdaki element miktarlarının değişmesine bağlı olarak aşağıda verilen çıkarımlar yapılmıştır.

**-Nb:** Nb miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; karışım entalpisi, ergime sıcaklığı,  $\Omega$  faktörünün değeri ve valans elektron yoğunluğu artmakta, alaşımın karışım entropisi, yoğunluğu, elastik modülü, atomik boyut farklılığı ve elektronegativite farkı

azalmaktadır. Nb<sub>10</sub>(TiWVZr)<sub>90</sub> RYEA’da hesaplanan atomik boyut farklılığının % 6,6 üzerinde olması yapının birden fazla kristal yapıda faz içerebileceğini göstermektedir.

**Tablo 4.5.** NbTiWVZr RYEA’nın farklı kompozisyonlarına ait (KKA) empirik hesaplama sonuçları

| KKA ailesi             | KKA            | T <sub>karışım</sub> (°C) | ρ <sub>karışım</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) | ΔH <sub>karışım</sub> (kJ/mol) | ΔS <sub>karışım</sub> (J/K.mol) | r <sub>ort</sub> |
|------------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Nb <sub>x</sub> TiWVZr | Nb10(TiWVZr)90 | 2229,5                    | 9,01                                      | -4,52                          | 13,07                           | 143,00           |
|                        | Nb20(TiWVZr)80 | 2256,0                    | 8,96                                      | -3,87                          | 13,38                           | 143,00           |
|                        | Nb30(TiWVZr)70 | 2282,5                    | 8,91                                      | -3,25                          | 13,14                           | 143,00           |
|                        | Nb40(TiWVZr)60 | 2309,0                    | 8,87                                      | -2,68                          | 12,51                           | 143,00           |
|                        | Nb50(TiWVZr)50 | 2335,5                    | 8,82                                      | -2,14                          | 11,52                           | 143,00           |
| NbTi <sub>x</sub> WVZr | Ti10(NbWVZr)90 | 2496,5                    | 9,97                                      | -4,42                          | 13,07                           | 142,75           |
|                        | Ti20(NbWVZr)80 | 2256,0                    | 8,96                                      | -3,87                          | 13,38                           | 143,00           |
|                        | Ti30(NbWVZr)70 | 2181,5                    | 8,41                                      | -3,79                          | 13,14                           | 143,25           |
|                        | Ti40(NbWVZr)60 | 2107,0                    | 7,85                                      | -3,40                          | 12,51                           | 143,50           |
|                        | Ti50(NbWVZr)50 | 2032,5                    | 7,29                                      | -2,96                          | 11,52                           | 143,75           |
| NbTiW <sub>x</sub> VZr | W10(NbTiVZr)90 | 2111,8                    | 7,67                                      | -2,24                          | 13,07                           | 143,75           |
|                        | W20(NbTiVZr)80 | 2256,0                    | 8,96                                      | -3,87                          | 13,38                           | 143,00           |
|                        | W30(NbTiVZr)70 | 2400,3                    | 10,26                                     | -5,02                          | 13,14                           | 142,25           |
|                        | W40(NbTiVZr)60 | 2544,5                    | 11,55                                     | -5,71                          | 12,51                           | 141,50           |
|                        | W50(NbTiVZr)50 | 2688,8                    | 12,84                                     | -5,93                          | 11,52                           | 140,75           |
| NbTiWV <sub>x</sub> Zr | V10(NbWTiZr)90 | 2301,8                    | 9,34                                      | -4,10                          | 13,07                           | 144,50           |
|                        | V20(NbWTiZr)80 | 2256,0                    | 8,96                                      | -3,87                          | 13,38                           | 143,00           |
|                        | V30(NbWTiZr)70 | 2210,3                    | 8,59                                      | -3,58                          | 13,14                           | 141,50           |
|                        | V40(NbWTiZr)60 | 2164,5                    | 8,21                                      | -3,24                          | 12,51                           | 140,00           |
|                        | V50(NbWTiZr)50 | 2118,8                    | 7,84                                      | -2,84                          | 11,52                           | 138,50           |
| NbTiWVZr <sub>x</sub>  | Zr10(NbWTiV)90 | 2306,5                    | 9,27                                      | -3,91                          | 13,07                           | 141,00           |
|                        | Zr20(NbWTiV)80 | 2256,0                    | 8,96                                      | -3,87                          | 13,38                           | 143,00           |
|                        | Zr30(NbWTiV)70 | 2205,5                    | 8,65                                      | -3,73                          | 13,14                           | 145,00           |
|                        | Zr40(NbWTiV)60 | 2155,0                    | 8,35                                      | -3,50                          | 12,51                           | 147,00           |
|                        | Zr50(NbWTiV)50 | 2104,5                    | 8,04                                      | -3,16                          | 11,52                           | 149,00           |

**Tablo 4.5.** (Devamı) *NbTiWVZr* RYEA'nın farklı kompozisyonlarına ait (KKA) empirik hesaplama sonuçları

| KKA ailesi             | KKA            | $\delta$ (%) | $\chi_{ort}$ | $\Delta\chi$ | $\Omega$ | VEK | $E_{karışım}$ |
|------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------|-----|---------------|
| Nb <sub>x</sub> TiWVZr | Nb10(TiWVZr)90 | 6,96         | 1,704        | 0,37         | 6,45     | 4,8 | 207,2         |
|                        | Nb20(TiWVZr)80 | 6,56         | 1,692        | 0,35         | 7,80     | 4,8 | 195,8         |
|                        | Nb30(TiWVZr)70 | 6,14         | 1,681        | 0,33         | 9,21     | 4,8 | 184,5         |
|                        | Nb40(TiWVZr)60 | 5,68         | 1,669        | 0,31         | 10,77    | 4,9 | 173,1         |
|                        | Nb50(TiWVZr)50 | 5,19         | 1,658        | 0,28         | 12,56    | 4,9 | 161,8         |
| NbTi <sub>x</sub> WVZr | Ti10(NbWVZr)90 | 6,95         | 1,865        | 0,40         | 7,37     | 5,3 | 217,3         |
|                        | Ti20(NbWVZr)80 | 6,56         | 1,692        | 0,35         | 7,80     | 4,8 | 195,8         |
|                        | Ti30(NbWVZr)70 | 6,14         | 1,673        | 0,33         | 7,55     | 4,7 | 185,8         |
|                        | Ti40(NbWVZr)60 | 5,69         | 1,654        | 0,31         | 7,74     | 4,6 | 175,9         |
|                        | Ti50(NbWVZr)50 | 5,20         | 1,635        | 0,29         | 7,90     | 4,5 | 165,9         |
| NbTiW <sub>x</sub> VZr | W10(NbTiVZr)90 | 6,74         | 1,609        | 0,27         | 12,29    | 4,7 | 168,9         |
|                        | W20(NbTiVZr)80 | 6,56         | 1,692        | 0,35         | 7,80     | 4,8 | 195,8         |
|                        | W30(NbTiVZr)70 | 6,35         | 1,776        | 0,40         | 6,28     | 5,0 | 222,7         |
|                        | W40(NbTiVZr)60 | 6,03         | 1,859        | 0,42         | 5,57     | 5,1 | 249,6         |
|                        | W50(NbTiVZr)50 | 5,57         | 1,943        | 0,43         | 5,22     | 5,3 | 276,5         |
| NbTiWV <sub>x</sub> Zr | V10(NbWTiZr)90 | 6,14         | 1,700        | 0,37         | 7,34     | 4,8 | 185,4         |
|                        | V20(NbWTiZr)80 | 6,56         | 1,692        | 0,35         | 7,80     | 4,8 | 195,8         |
|                        | V30(NbWTiZr)70 | 6,81         | 1,684        | 0,33         | 8,10     | 4,8 | 206,2         |
|                        | V40(NbWTiZr)60 | 6,89         | 1,677        | 0,30         | 8,35     | 4,9 | 216,6         |
|                        | V50(NbWTiZr)50 | 6,80         | 1,669        | 0,28         | 8,58     | 4,9 | 227,0         |
| NbTiWVZr <sub>x</sub>  | Zr10(NbWTiV)90 | 5,63         | 1,737        | 0,35         | 7,71     | 4,9 | 211,8         |
|                        | Zr20(NbWTiV)80 | 6,56         | 1,692        | 0,35         | 7,80     | 4,8 | 195,8         |
|                        | Zr30(NbWTiV)70 | 7,07         | 1,647        | 0,35         | 7,76     | 4,7 | 179,8         |
|                        | Zr40(NbWTiV)60 | 7,26         | 1,602        | 0,34         | 7,70     | 4,6 | 163,9         |
|                        | Zr50(NbWTiV)50 | 7,20         | 1,556        | 0,33         | 7,67     | 4,5 | 147,9         |

**-Ti:** Ti miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; karışım entalpisi ve  $\Omega$  faktörünün değeri artmakta; valans elektron yoğunluğu, ergime sıcaklığı karışım entropisi, yoğunluğu, elastik modülü, atomik boyut farklılığı ve elektronegativite farkı azalmaktadır. Ti<sub>10</sub>(NbWVZr)<sub>90</sub> KKA'da hesaplanan atomik boyut farklılığı % 6,6 üzerinde olduğu için yapının birden fazla kristal yapıda faz içerebileceği düşünülmüştür.

**-W:** W miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; ergime sıcaklığı karışım yoğunluğu, elastik modülü, elektronegativite farkı ve valans elektron yoğunluğu artmakta, karışım entalpisi, entropisi,  $\Omega$  faktörünün değeri ve atomik boyut farklılığı azalmaktadır.  $W_{10}(\text{NbTiVZr})_{90}$  KKA'da hesaplanan atomik boyut farklılığı % 6,6 üzerinde olduğu için yapının birden fazla kristal yapıda faz içerebileceği sonucuna varılmıştır. Sheikh ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada YEA'ların sünekliğini VEK değerinin 4.6'dan düşük olması kriterine bağlamışlardır [83]. Bu nedenle 25 farklı kompozisyon arasında nispeten en düşük VEK değerlerinden biri  $W_{10}(\text{NbTiVZr})_{90}$  KKA'da 4,7 olarak elde edilmiştir.

**-V:** V miktarı molarce % 10'dan % 50'ye getirildiğinde; karışım entalpisi ve  $\Omega$  faktörünün değeri, valans elektron yoğunluğu, elastik modülü, atomik boyut farklılığı artmakta, karışım yoğunluğu, entropisi ergime sıcaklığı ve elektronegativite farkı azalmaktadır.  $V_{30}(\text{NbWTiZr})_{70}$ ,  $V_{40}(\text{NbWTiZr})_{60}$ ,  $V_{50}(\text{NbWTiZr})_{50}$  KKA'ların atomik boyut farklılığı % 6,6 üzerinde olduğu için alaşımların birden fazla kristal yapıda faz içerebileceği anlaşılmıştır.

**-Zr:** Zr miktarı molarce % 10'dan % 50'ye getirildiğinde; karışım entalpisi ve atomik boyut farklılığı artmakta, karışım yoğunluğu, entropisi, elastik modülü,  $\Omega$  faktörünün değeri, valans elektron yoğunluğu, ergime sıcaklığı ve elektronegativite farkı azalmaktadır.  $Zr_{30}(\text{NbWTiV})_{70}$ ,  $Zr_{40}(\text{NbWTiV})_{60}$ ,  $Zr_{50}(\text{NbWTiV})_{50}$  KKA'ların atomik boyut farklılığı % 6,6 üzerinde olduğu için alaşımların birden fazla kristal yapıda faz içermesi beklenmektedir.

#### **4.2.2.2. CALPHAD hesaplamaları**

Thermocalc yazılımı ile TCHEA-4 veritabanı kullanılarak denge durumunda sıcaklığa bağlı oluşabilecek fazlar ve miktarları ile katılaşma ve sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklıklar ( $T_{\text{solidüs}}$  ve  $T_{\text{likidüs}}$ ) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.6'da verilmiştir. Tablo 4.6 her bir element özelinde incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

**-Nb:** Nb miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; katılaşma ve sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklık artmakta ve katılaşma sıcaklık aralığı daralmaktadır. Ayrıca Nb molar oranı arttıkça HSP faz oranının azaldığı ve  $Ti_{10}(\text{NbWVZr})_{90}$  KKA'da

arzu edilmeyen C15 tip Laves fazı oluştuğu (kırmızı renk ile gösterilmiştir) görülmektedir.

**Ti:** Ti miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; katılaşmanın tamamlandığı sıcaklık artmakta, sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklık ve katılaşma sıcaklık aralığı azalmaktadır. Ayrıca Ti molar yüzdesi arttıkça HSP faz oranının arttığı görülmektedir. Bunun da sünekliği artıracağı düşünülmektedir.

**Tablo 4.6.** NbTiWVZr RYEA'nın farklı kompozisyonlarına ait Thermocalc ile yapılan hesaplama sonuçları

| KKA            | 500°C sıcaklık altında kararlı olan fazlar ve miktarları | T <sub>solidus</sub><br>(C°) | T <sub>likidus</sub><br>(C°) |
|----------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Nb10(TiWVZr)90 | HMK_B2, HSP_A3 (%41), Laves_C15 (%7)                     | 1459,34                      | 2175,81                      |
| Nb20(TiWVZr)80 | HMK_B2, HSP_A3 (%39)                                     | 1482,62                      | 2164,33                      |
| Nb30(TiWVZr)70 | HMK_B2, HSP_A3 (%34)                                     | 1487,98                      | 2168,58                      |
| Nb40(TiWVZr)60 | HMK_B2, HSP_A3 (%29)                                     | 1619,74                      | 2187,57                      |
| Nb50(TiWVZr)50 | HMK_B2, HSP_A3 (%24)                                     | 1756,07                      | 2219,31                      |
| Ti10(NbWVZr)90 | HMK_B2, HSP_A3 (%32)                                     | 1459,93                      | 2197,85                      |
| Ti20(NbWVZr)80 | HMK_B2, HSP_A3 (%39)                                     | 1482,62                      | 2164,33                      |
| Ti30(NbWVZr)70 | HMK_B2, HSP_A3 (%46)                                     | 1509,7                       | 2139,6                       |
| Ti40(NbWVZr)60 | HMK_B2, HSP_A3 (%53)                                     | 1597,46                      | 2119,46                      |
| Ti50(NbWVZr)50 | HMK_B2, HSP_A3 (%61)                                     | 1650,12                      | 2097,8                       |
| W10(NbTiVZr)90 | HMK_B2, HSP_A3 (%43)                                     | 1478,7                       | 1957,62                      |
| W20(NbTiVZr)80 | HMK_B2, HSP_A3 (%39)                                     | 1482,62                      | 2164,33                      |
| W30(NbTiVZr)70 | HMK_B2, HSP_A3 (%39), C15_Laves(%19)                     | 1489,65                      | 2347,03                      |
| W40(NbTiVZr)60 | HMK_B2, HSP_A3 (%9), C15_Laves(%40)                      | 1687,43                      | 2519,34                      |
| W50(NbTiVZr)50 | HMK_B2, C15_Laves(%37)                                   | 1938,12                      | 2683,74                      |
| V10(NbWTiZr)90 | HMK_B2, HSP_A3 (%42), C15_Laves(%5)                      | 1547,76                      | 2221,44                      |
| V20(NbWTiZr)80 | HMK_B2, HSP_A3 (%39)                                     | 1482,62                      | 2164,33                      |
| V30(NbWTiZr)70 | HMK_B2, HSP_A3 (%34)                                     | 1426,12                      | 2102,27                      |
| V40(NbWTiZr)60 | HMK_B2, HSP_A3 (%29)                                     | 1381,7                       | 2036,6                       |
| V50(NbWTiZr)50 | HMK_B2, HSP_A3 (%24)                                     | 1347,29                      | 1970,62                      |
| Zr10(NbWTiV)90 | HMK_B2, HSP_A3 (%30)                                     | 1596,88                      | 2265,57                      |
| Zr20(NbWTiV)80 | HMK_B2, HSP_A3 (%39)                                     | 1482,62                      | 2164,33                      |
| Zr30(NbWTiV)70 | HMK_B2, HSP_A3 (%46)                                     | 1477,37                      | 2066,56                      |
| Zr40(NbWTiV)60 | HMK_B2, HSP_A3 (%54)                                     | 1475,28                      | 1967,13                      |
| Zr50(NbWTiV)50 | HMK_B2, HSP_A3 (%62)                                     | 1476,95                      | 1859,53                      |

**-W:** W miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; ergime noktasının yükselmesi nedeniyle katılaşma ve sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklık ile katılaşma sıcaklık aralığı artmaktadır. Ayrıca W molar yüzdesi arttıkça HSP faz oranının azaldığı ve  $W_{30}(NbTiVZr)_{70}$ ,  $W_{40}(NbTiVZr)_{60}$ ,  $W_{50}(NbTiVZr)_{50}$  KKA'da arzu edilmeyen C15 tip Laves fazı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla W oranının artırılması gevrekliğin artması anlamına gelmektedir.

**-V:** V miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; katılaşmanın ve sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklık ve katılaşma sıcaklık aralığı azalmaktadır. Ayrıca V molar yüzdesi arttıkça HSP faz oranı azalmakta,  $V_{10}(NbWTiZr)_{90}$  RYEA'da ise gevreklik oluşturan C15 tip Laves fazı olduğu görülmektedir.

**-Zr:** Zr miktarı molarce % 10'dan % 50'ye artırıldığında; katılaşmanın ve sıvılaşmanın tamamlandığı sıcaklık ve katılaşma sıcaklık aralığı azalmaktadır. Ayrıca Zr molar yüzdesi arttıkça HSP faz oranı da artmaktadır, böylece Zr'un alaşımın sünekliğinin artmasını sağlayacağı düşünülmektedir.

#### 4.3. Sonuç

Yapılan empirik ve termodinamik hesaplamalar neticesinde Laves fazı içermeyen, tek fazlı katı çözelti oluşum kriterlerini sağlayan, HMK kristal yapının yanı sıra sünekliği artıran HSP kristal yapılı bir faz içermesi beklenen iki adet RYEA kompozisyonu tespit edilmiştir. Bunlar eşmolar  $NbTiWVZr$  ve  $MoNbTiWV$  RYEA'ları olup burada  $MoNbTiWV$  RYEA'ya göre sadece 2 adet ağır refrakter element içeren (W ve Nb)  $NbTiWVZr$  RYEA'nın bu tez çalışmasında çalışılacak ilk deneysel numune kompozisyonu olmasına karar verilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında ikinci çalışılacak alaşımın ise W molar oranının % 10 olduğu ve VEK değerinin 4,7'ye yakın olması nedeniyle süneklik kriterini de karşılaması beklenen  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  olmasına karar verilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında çalışılması planlanan üçüncü RYEA ise  $MoNbTiWV$  olarak planlanmış ve böylece tez kapsamındaki çalışılacak toplam üç adet yüksek entropili alaşım bu bölümde yapılan tasasım çalışmaları sonucunda belirlenmiştir.

## 5. MALZEME VE METOTLAR

### 5.1. Kullanılan Ham Malzemeler

RYEA ve KKA alaşımların üretimi için saf metal tozları kullanılmıştır. Bu tozların tedarik edildiği firma bilgisi, saflığı ve toz boyutu/morfolojisi ile ilgili bilgiler Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu tez çalışmasında toz ham malzeme kullanılmasının en önemli nedeni pelet halde yapılan üretim denemelerinde W peletlerin yeterli homojenlikte ergitilememesidir. Ergitme cihazının daha yüksek kapasiteli olması durumunda pelet ham malzemeler ile de numune üretimleri mümkündür.

**Tablo 5.1.** Alaşımların üretiminde kullanılan toz formundaki saf elementlerin alındığı firma, saflıkları ve boyutları (TLS: TLS Teknik GmbH, CRM: China Rare Metal Material Co., Ltd)

| Element         | Mo                    | Nb         | Ti                    | W                   | V          | Zr                    |
|-----------------|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------|-----------------------|
| Alındığı Firma  | TLS                   | CRM        | TLS                   | Högenas             | CRM        | TLS                   |
| Saflık Derecesi | 99,9                  | 99,90      | 99,80                 | 99,60               | 99,70      | 99,80                 |
| Toz Boyutu      | 100-200 $\mu\text{m}$ | <325 mesh  | 100-200 $\mu\text{m}$ | 45-90 $\mu\text{m}$ | <325 mesh  | 100-200 $\mu\text{m}$ |
| Toz Morfolojisi | Yuvarlak              | İnce Pudra | Yuvarlak              | Yuvarlak            | İnce Pudra | Yuvarlak              |

### 5.2. Ergitme Öncesi Hazırlıklar

Tozların direkt olarak ark ile ergitilmesi; sıçrama, saçılma gibi problemlere yol açtığı için VAE öncesi kompakt hale getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle 5'er gramlık toz karışımları için gerekli element miktarları % ağırlık cinsinden hesaplanarak Mettler marka AE 200 model hassas terazide tartılmıştır. Tartım yapılan terazi ve tartılan tozlar Görsel 5.1’de verilmiştir.

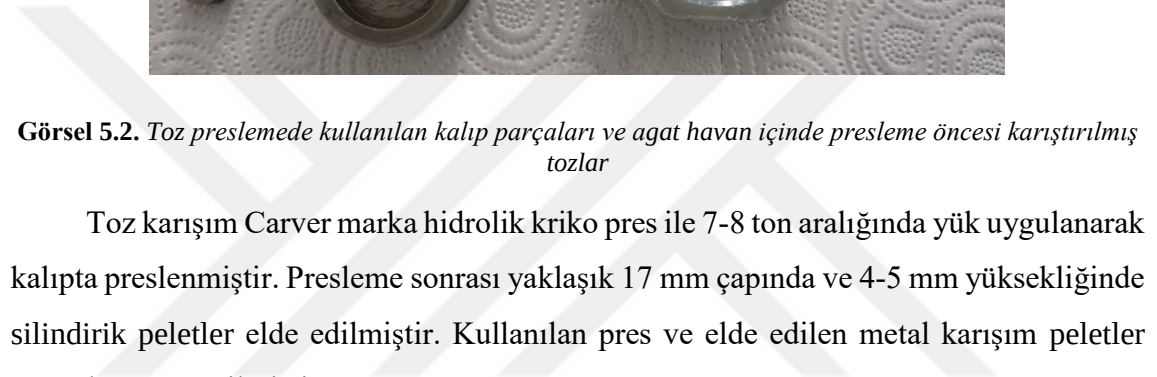


**Görsel 5.1.** Toz hammalzemelerin tartıldığı hassas terazi (solda) tartılan tozlara ait görüntü (sağda)



**Görsel 5.2.** *Toz preslemede kullanılan kalıp parçaları ve agat havan içinde presleme öncesi karıştırılmış tozlar*

Toz karışım Carver marka hidrolik kriko pres ile 7-8 ton aralığında yük uygulanarak kalıpta preslenmiştir. Presleme sonrası yaklaşık 17 mm çapında ve 4-5 mm yüksekliğinde silindirik peletler elde edilmiştir. Kullanılan pres ve elde edilen metal karışım peletler



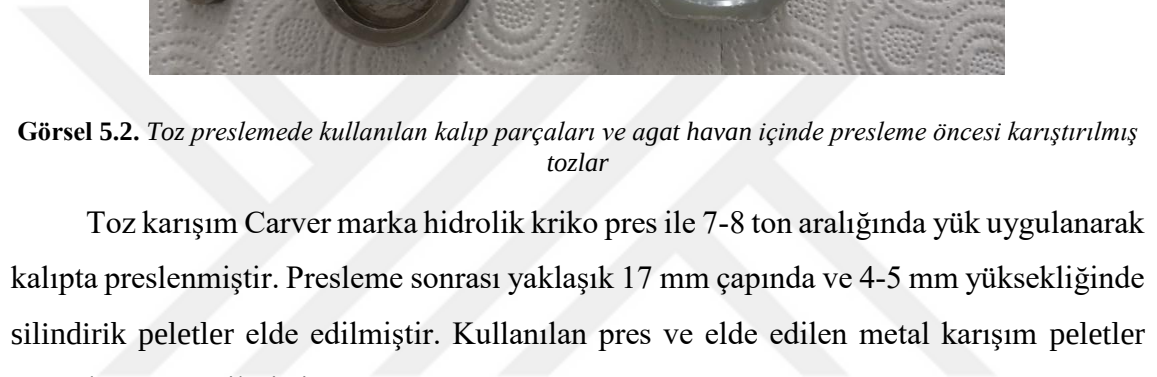
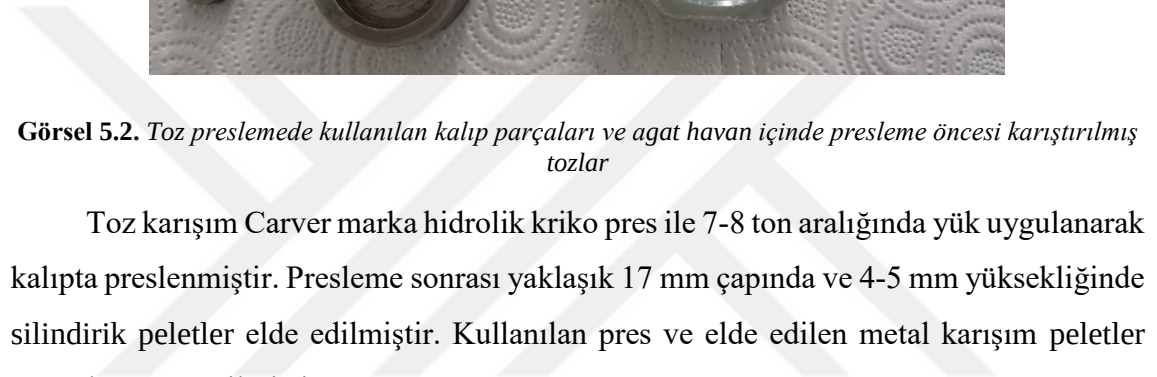
**Görsel 5.2.** *Toz preslemede kullanılan kalıp parçaları ve agat havan içinde presleme öncesi karıştırılmış tozlar*

Toz karışım Carver marka hidrolik kriko pres ile 7-8 ton aralığında yük uygulanarak kalıpta preslenmiştir. Presleme sonrası yaklaşık 17 mm çapında ve 4-5 mm yüksekliğinde silindirik peletler elde edilmiştir. Kullanılan pres ve elde edilen metal karışım peletler



**Görsel 5.2.** *Toz preslemede kullanılan kalıp parçaları ve agat havan içinde presleme öncesi karıştırılmış tozlar*

Toz karışım Carver marka hidrolik kriko pres ile 7-8 ton aralığında yük uygulanarak kalıpta preslenmiştir. Presleme sonrası yaklaşık 17 mm çapında ve 4-5 mm yüksekliğinde silindirik peletler elde edilmiştir. Kullanılan pres ve elde edilen metal karışım peletler



**Görsel 5.2.** *Toz preslemede kullanılan kalıp parçaları ve agat havan içinde presleme öncesi karıştırılmış tozlar*

Toz karışım Carver marka hidrolik kriko pres ile 7-8 ton aralığında yük uygulanarak kalıpta preslenmiştir. Presleme sonrası yaklaşık 17 mm çapında ve 4-5 mm yüksekliğinde silindirik peletler elde edilmiştir. Kullanılan pres ve elde edilen metal karışım peletler

### 5.3. Numunelerin Ergitme İşlemleri

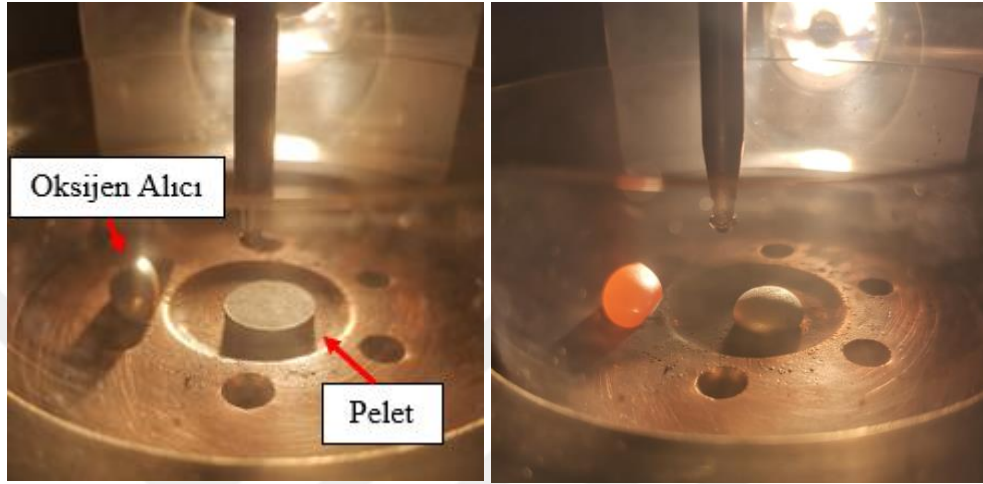
Peletlerin ergitme işlemi Edmund Bühler marka, MAM-1 model 20 gram ergitme kapasiteli VAE cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında üretilecek RYEA ve KKA'ların yüksek ergime noktalı elementler (W, Mo, Nb gibi) içermesi nedeniyle ergitmeler 5'er gramlık numuneler ile tekrarlı olarak yapılmıştır. Basma testleri için ihtiyaç duyulan 20 gramlık daha büyük numuneler ise 5'er gramlık 2 veya 4 adet numunenin ergitilerek birleştirilmesi ile üretilmiştir. Bu kapsamda üretilen numunelerin her biri en az 5 tekrar ile ergitilmiş olup her tekrardan sonra butonlar alt-üst çevrilerek homojen bir numune olması sağlanmıştır. Ergitme işlemlerinde kullanılan VAE Görsel 5.4'te verilmiştir.



**Görsel 5.4.** Numune üretimlerinde kullanılan vakum ark ergitme cihazı

Ergitme işlemi öncesinde RYEA ve KKA peletler ile Ti alaşım oksijen alıcı VAE cihazının bakır potasına yerleştirildikten sonra cihaz 3 kez -1 Pa vakuma alınmış, ergitme odasına her vakum sonrası argon beslenerek süpürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü süpürme işlemi sonrasında 4 Amper akım ile oksijen alıcı ergitmesi yapılmış, daha sonrada numune ergitmeleri başlatılmıştır. Her ergitmede zaman zaman 10 Amper tam güce çıkılmış, ortalama 8 Amperlik akımla her ergitme tekrarında en az 2 dakika boyunca numunelerin ergitme işlemleri 0,5 bar Argon basıncı altında devam ettirilmiştir. Ayrıca

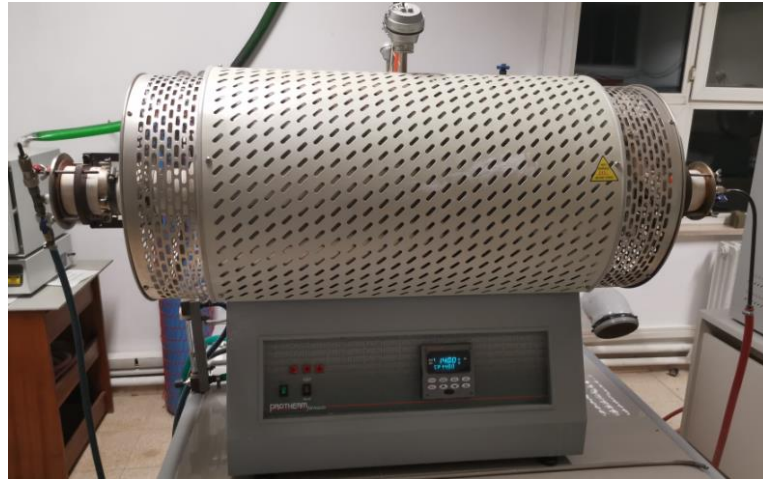
oksijen alıcı sadece ergitmenin başında değil ortalama 2 dakikalık ergitme esnasında en az 3 kez ergitilerek sıcak tutulmaya çalışılmış böylece numunenin ergitme odası içerisinde maruz kalabileceği oksijenin Ti alaşım tarafından çekilmesi sağlanmıştır. Görsel 5.5'te ergitme öncesi ve sonrasına ait numune ve oksijen alıcı görüntüleri verilmiştir.



**Görsel 5.5.** RYEA/KKA pelet/numune ve oksijen-alıcı: ergitme öncesi (solda), ergitme sonrası (sağda)

#### 5.4. Numunelere Uygulanan İkincil İşlemler

Üretilen RYEA ve KKA numunelere ikincil işlem olarak homojenizasyon ısıt işlemleri planlanmıştır. Homojenizasyon ısıt işlemi öncelikle eşmolar NbTiWVZr RYEA'da, 1200°C sıcaklıkta 12 ve 24 saat tüp fırında, daha sonra ise NbTiWVZr, Nb<sub>22.5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22.5</sub>V<sub>22.5</sub>Zr<sub>22.5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarının hepsine 1400°C sıcaklıkta 24 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemler Protherm marka tüp fırında Argon koruyucu atmosferi altında gerçekleştirilmiş olup kullanılan cihaz Görsel 5.6'da verilmiştir.



**Görsel 5.6.** Numunelerin homojenizasyon ısıt işlemlerinin yapıldığı tüp fırın

Bir diğer ikincil işlem denemesi olarak eşmolar NbTiWVZr RYEA numune üzerinde, 1200°C sıcaklık, 100 MPa basınç ve 4 saat süre ile sıcak izostatik presleme (HIP) gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Tübitak SAGE'ye deneme için numune gönderilmiştir. Bu denemedeki HIP parametrelerin kullanılma sebebi HIP işleminin katmanlı imalat için gönderilen numunelere göre proses edilmesinden dolayıdır.

### 5.5. Tez Kapsamında Üretilen Numuneler

Tez kapsamında döküm halde ve ikincil işlemler sonrası incelenmek üzere farklı miktarlarda ve tarihlerde RYEA ve KKA numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretilen numuneler, numune kodları, numunelere uygulanan ikincil işlemler ve numunelerin üretim amaçları Tablo 5.2'de verilmiştir.

### 5.6. Karşılaştırma Amaçlı Kullanılan Nikel Bazlı Süperalaşımlar

Tez çalışmasında üretilen RYEA ve KKA'ların mekanik özelliklerini havacılık motorları sıcak bölge parçalarının üretiminde kullanılan, dövme ile üretilen polikristal taneli Inconel 718, yönlendirilmiş katılaşma döküm ile üretilen CM247LC ve tek kristal döküm ile üretilen CMSX-4 ile karşılaştırmak amacı ile numune tedarikleri yapılmıştır. Tüm nikel süperalaşımlar çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıtıl işlemi ile sertleştirilmiştir. Inconel 718 çubuk malzeme ATI firmasından VIM+VAR ergitmeli olarak temin edilmiş TEI'de ısıtıl işlemleri yapılmıştır. CM247LC ve CMSX-4 çekme çubukların ise dökümü ve ısıtıl işlemleri Tübitak MAM'da gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma amaçlı Tübitak MAM'dan tedarik edilen tek kristal ve yönlendirilmiş katılaşma döküm çekme çubukları Görsel 5.7'de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin bilgileri

| Numune Kodu | Kompozisyon                                                                                | İkincil işlem               | Üretim amacı               |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| RYEA-1      | Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub>         | Yok                         | Döküm halinde inceleme     |
| RYEA-1_HT   | Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub>         | 1400°C-24 saat ısıtıl işlem | Isıl işlem etkisi inceleme |
| RYEA-1_HT-2 | Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub>         | 1200°C-12 saat ısıtıl işlem | Isıl işlem etkisi inceleme |
| RYEA-1_HT-3 | Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub>         | 1200°C-24 saat ısıtıl işlem | Isıl işlem etkisi inceleme |
| RYEA-1_HIP  | Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub>         | 1200°C-100 MPa-4 saat       | HIP etkisi inceleme        |
| KKA-1       | Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> | Yok                         | Döküm halinde inceleme     |
| KKA-1_HT    | Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> | 1400°C-24 saat ısıtıl işlem | Isıl işlem etkisi inceleme |
| RYEA-2      | Mo <sub>20</sub> Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub>         | Yok                         | Döküm halinde inceleme     |
| RYEA-2_HT   | Mo <sub>20</sub> Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub>         | 1400°C-24 saat ısıtıl işlem | Isıl işlem etkisi inceleme |



**Görsel 5.7.** Karşılaştırma amaçlı Tübitak MAM'dan tedarik edilen yönlendirilmiş katılaşma (üstte) ve tek kristal (altta) döküm çekme çubukları

### 5.7. Numune Hazırlama Yöntemleri

Tez çalışmasında üretilen buton şeklindeki 5 ve 20 gramlık numuneler üretim sonrası alt ve üst yüzeylerinden en az 1 mm malzeme kaldırmak suretiyle zımparalanmıştır. Zımpara esnasındaki buton numune ve zımparalanmış buton numune üst yüzey görüntüleri Görsel 5.8'de verilmiştir. Burada zımparalamanın amacı makrosertlik ve XRD ölçümleri için düz yüzey oluşturmaktır. Ölçümlerde yüzey pürüzlülüğünün etkisini en aza indirmek için 80, 180 ve 320 nolu zımparalar ile yüzeyden malzeme kaldırılmıştır.



**Görsel 5.8.** Buton numune alt-üst yüzey zımparalaması (solda), zımpara sonrası numune üst yüzeyi (sağda)

Mikroyapı incelemeleri için ise genellikle 5 gramlık numuneler Görsel 5.9’da gösterildiği üzere sıcak bakalite alınmış ve sırasıyla zımparalama-parlatma-dağlama aşamalarına ilerletilmiştir.



**Görsel 5.9.** Mikroyapı incelemelerinde bütün numunelerin bakalite alınma şekli

Numuneler sırasıyla 80, 120, 240, 320, 500, 800 ve 1000 grit nolu zımparalar ile zımparalanmış, sonrasında 3 µm elmas solüsyon ve kolloidal silika solüsyon kullanılarak çuha disk üzerinde 3'er dakika parlatılmıştır. Numunelerin mikro porozite kaynaklı çizilmeleri durumunda kolloidal silika ile parlatma işlemi 2 veya 3 kez tekrar edilmiştir. Numunelerin dağlanması için kullanılan solüsyonlar ve dağlama metodu Tablo 5.3'te verilmiştir.

SEM incelemeleri öncesinde bakalite alınan numunelere TEI’de bulunan AGAR marka altın kaplama cihazı ile 20 saniye boyunca altın kaplanmıştır. Kullanılan altın kaplama cihazı Görsel 5.11’de verilmiştir.

**Tablo 5.3.** RYEA ve KKA Numunelerin dağlamasında kullanılan dağlama solüsyonları ve dağlama metodu

| Dağlama Çözeltilisi | Dağlanana<br>RYEA/KKA                                                                                                                                                               | İçerik                                                                                              | Dağlama<br>Yöntemi |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Tip-1               | Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub> ve<br>Nb <sub>22,5</sub> W <sub>10</sub> Ti <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> Zr <sub>22,5</sub> | %1,5 Hdiroflorik asit (HF, %<br>50’lik) + % 4 ± 2 Nitrik Asit<br>(HNO <sub>3</sub> , % 70’lik) + Su | Swap (sürme)       |
| Tip-2               |                                                                                                                                                                                     | % 1,5 Amonyum Bifloride<br>(NH <sub>4</sub> HF <sub>2</sub> ) + Su                                  | Swap (sürme)       |
| ASTM 129            | Mo <sub>20</sub> Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> W <sub>20</sub> V <sub>20</sub>                                                                                                  | 30 ml HNO <sub>3</sub> , 5 ml HF, 60 ml<br>Laktik Asit                                              | Swap (sürme)       |

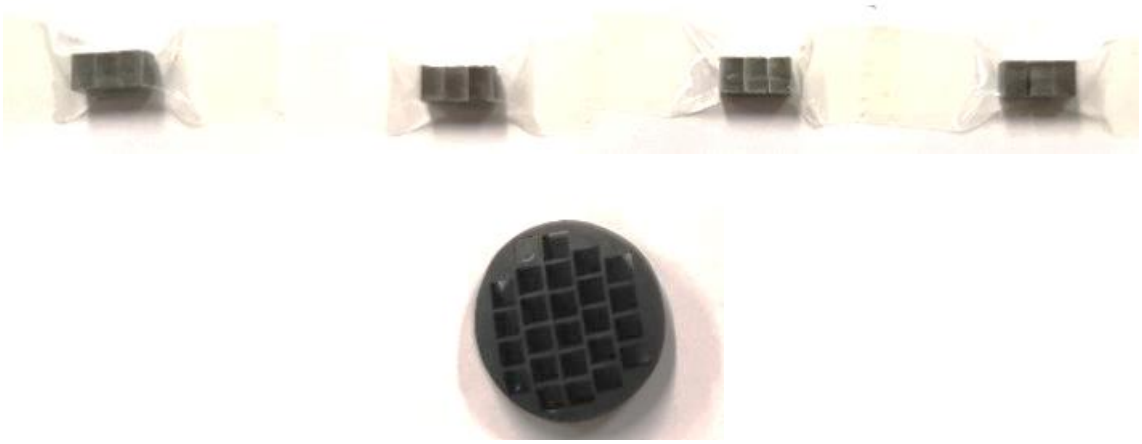


**Görsel 5.10.** SEM incelemeleri öncesinde bakalite alınan numunelerin kaplandığı altın kaplama cihazı

Basma testi için kullanılan  $3 \times 3 \times 4.5 \text{ mm}^3$  prizmatik numunelerin kesim işlemleri ise TEI’de bulunan GF+ marka CUT E 600 model tel erozyon ve Synova marka lazer mikrojet kesim tezgahları ile yapılmıştır. Basma test numuneleri 10 veya 20 gramlık numunelerden kesilerek çıkarılmıştır. Basma test numunelerinin kesimi için kullanılan ekipmanlar Görsel 5.11’de verilmiştir. Basma numunelerinin kesildiği butonun kesim sonrası görüntüsü ve kesilen basma numunelerinin görüntüleri Görsel 5.12’de verilmiştir.



**Görsel 5.11.** Basma test numunelerinin kesiminde kullanılan tel erozyon (solda) ve lazer mikrojet (sağda) tezgahları



**Görsel 5.12.** Buton numuneden kesilen basma test numuneleri (üstte), kesim sonrası buton numune (altta)

Kesilen numunelerin standarta uygun olarak basma testlerinin yapılabilmesi için alt ve üst yüzeylerin birbirine paralel olması gerekmektedir. TEİ’de bulunan satıh taşlama tezgahı ile numuneler 4.5 mm hassas ölçüye getirilmiş ve aynı zamanda yüzey paralellikleri ve düzlemsellikleri sağlanmıştır. Görsel 5.13’te taşlamada kullanılan tezgah ile taşlama sonrası istenen ölçüye getirilen basma test numuneleri verilmiştir.

Oksidasyon testleri için buton numunelere test öncesi yüzey iyileştirme operasyonu yapılmıştır. Yüzey iyileştirme için TEİ’de bulunan ve Görsel 5.14’te verilen yüzey iyileştirme tezgahı (ing. barrel finishing) kullanılmıştır. Yüzey iyileştirme öncesi ve sonrası buton numunelere ait görüntüler Görsel 5.15’te verilmiştir.



**Görsel 5.13.** Basma numunelerinin taşlanması için kullanılan satıh taşlama tezgahı (solda) ve taşlanmış numune ölçüleri (sağda)



**Görsel 5.14.** Oksidasyon testi öncesi numunelerin yüzey iyileştirmeleri için kullanılan tezgah



**Görsel 5.15.** Yüzey iyileştirme öncesi ve sonrası 5 gramlık buton numune görüntüleri

### 5.8. Oksidasyon testleri

Tez çalışmasında üretilen buton şeklindeki 5 gramlık RYEA ve KKA numuneler ile 13 mm çap, 5 ve 13 mm yüksekliğe sahip CMSX-4 ve CM247LC nikel bazlı süperalaşım numunelere 800°C sıcaklıkta izotermal oksidasyon testi uygulanmıştır. Oksidasyon testi TEI'deki Nabertherm marka HT1600 model kutu tip ısıtılma fırınında, atölye atmosferi altında 6 saatlik çevrimler ile gerçekleştirilmiştir. Her çevrim sonunda numunelerdeki ağırlık değişimi hassas terazi ile tartılarak ölçülmüştür. Spesifik ağırlık değişimi için buton numunelerin yüzey alanı TEI'deki bilgisayarlı tomografi cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Oksidasyon testlerinin gerçekleştirildiği fırın Görsel 5.16'da verilmiştir.



**Görsel 5.16.** Oksidasyon testleri için kullanılan ısı işlem fırını

## 5.9. RYEA ve KKA Numunelerin Karakterizasyonları

### 5.9.1. Kimyasal kompozisyon analizleri

Numunelerin kimyasal kompozisyonları TEİ’de bulunan ThermoScientific marka Niton XL3t model el tipi X-ışını floresans spektrometresi (XRF) cihazı ile ölçülmüştür. Her ölçüm standartsız olarak 10 saniye boyunca en az 2 tekrar ile buton numunelerin alt ve üst yüzeylerinden yapılmıştır. Kullanılan spektrometre Görsel 5.17’de verilmiştir. Ayrıca ilk üretilen NbTiWVZr numunelerdeki üretim kaynaklı oksijen, hidrojen, nitrojen, karbon ve sülfür gibi elementlerin tespiti Leco cihazları ile AKDAŞ Döküm firmasında yapılmıştır.



**Görsel 5.17.** Numunelerin kimyasal kompozisyon analizlerinde kullanılan XRF cihazı

### 5.9.2. Yoğunluk ölçümleri

Toz halindeki karışımın preslenmesi esnasında peletlerde hava sıkışması kaynaklı ve ergitme esnasında pozitif basınçlı Ar gazı kullanılması nedeniyle üretilen buton numunelerde mikro poroziteler oluşabilmektedir. Bu nedenle üretilen her bir numunenin TEI’de bulunan Mettler Toledo marka hassas terazi ile Arşimet prensibi kullanılarak sıvı etanol yardımıyla yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her numunenin yoğunluk ölçümü öncesinde etanolün yoğunluğu en az üç kez ölçülmüştür. Ölçülen sıvı yoğunluğu cihaza girilerek en az 3 tekrar ile her üretilen buton numunenin önce havada, sonra ise sıvıdaki ağırlıkları ölçülerek yoğunluklar cihaz yazılımı ile otomatik olarak hesaplanmıştır. Görsel 5.18’de yoğunluk ölçümlerinde kullanılan hassas terazi verilmiştir.

### 5.9.3. Faz analizleri

Numunelerin faz analizleri Rigaku marka Miniflex 600 model X-Işını Kırınım cihazı (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde X-ışını kaynağı olarak dalga boyu 1,54 Å olan Cu-K $\alpha$  kullanılmış olup taramalar 2 °/dakika tarama hızında 5-105° açılarda gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan XRD cihazı Görsel 5.19’da verilmiştir.



Görsel 5.18. Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçümünde kullanılan hassas terazi



**Görsel 5.19.** XRD analizlerinde kullanılan cihazı

Numunelerde piklerin ait olduğu faz ve kristal yapıların eşleştirmesi için pik endeksleme çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda sistemin kübik olduğu varsayımı ile kristal yapının belirleme işlemleri ve kafes sabiti hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır. Kübik sistemlerdeki düzlemler arası mesafe ( $d$ ), düzlemin Miller indisleri ( $h, k, l$ ) ve kafes sabiti ( $a$ ) cinsinden Denklem 5.1 ile hesaplanabilir.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (5.1)$$

Bragg yasası ise X-ışını dalga boyu ( $\lambda$ ), düzlemler arası mesafe ( $d$ ) ve kırınım açısı ( $\theta$ ) cinsinden Denklem 5.2 ile hesaplanabilir.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (5.2)$$

Denklem 5.2'deki düzlemler arası mesafe Denklem 5.1'deki yerine yazılarak tekrar düzenlenirse Denklem 5.3 ve Denklem 5.4 elde edilir.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} = \frac{4\sin^2 \theta}{\lambda^2} \quad (5.3)$$

$$\sin^2 \theta = \left( \frac{\lambda^2}{4a^2} \right) = (h^2 + k^2 + l^2) \quad (5.4)$$

Denklem 5.4'ten de görüleceği üzere dalga boyu ve kafes parametresi sabit değerler olduğundan  $\sin^2 \theta$  ile miller indisleri orantılıdır. Burada yüksek  $\theta$  açılarındaki kırınımın büyük miller indisli düzlemlerden olacağı söylenebilir. İki farklı düzlemden kırınıma uğrayan bir X-ışını için Denklem 5.5 kullanılabilir.

$$\frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_2} = \frac{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2}{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2} \quad (5.5)$$

Denklem 5.5'te h, k, l indisleri tam sayı olduğundan  $\sin^2 \theta$  oranları da bir tam sayıya eşit olmalıdır. Kübik sistemlerdeki  $h^2+k^2+l^2$  toplamı kübik yapılara göre aşağıdaki tam sayılara eşit olmalıdır:

-Basit Kübik Yapı:  $h^2+k^2+l^2 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, \dots$

-HMK Yapı:  $h^2+k^2+l^2 = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, \dots$

-YMK Yapı:  $h^2+k^2+l^2 = 3, 4, 8, 11, 12, 16, 19, 20, \dots$

Endeksleme için Denklem 5.5, tez kapsamında üretilen numunelerin XRD piklerine uygulanmıştır. Burada XRD piklerinin  $2\theta$  açısı konumları, Match yazılımı ile “peak search” komutu kullanılarak belirlenmiştir. Denklem 5.5'ten faydalanılarak, deneme yanılma yolu ile minimum açılı piklerin sinüs karesi her kırınım açısının sinüs karesine bölünmüş ve bir tam sayı elde edilene kadar minimum kırınım açısı değiştirilmiştir. Böylece RYEA ve KKA'ların HMK pikleri ve kırınımın gerçekleştiği kristal düzlemin miller indisleri bulunmuştur. Endeksleme ile tespit edilemeyen pikler ise XRD cihazı veritabanındaki tanımlı fazların pik bilgileri karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

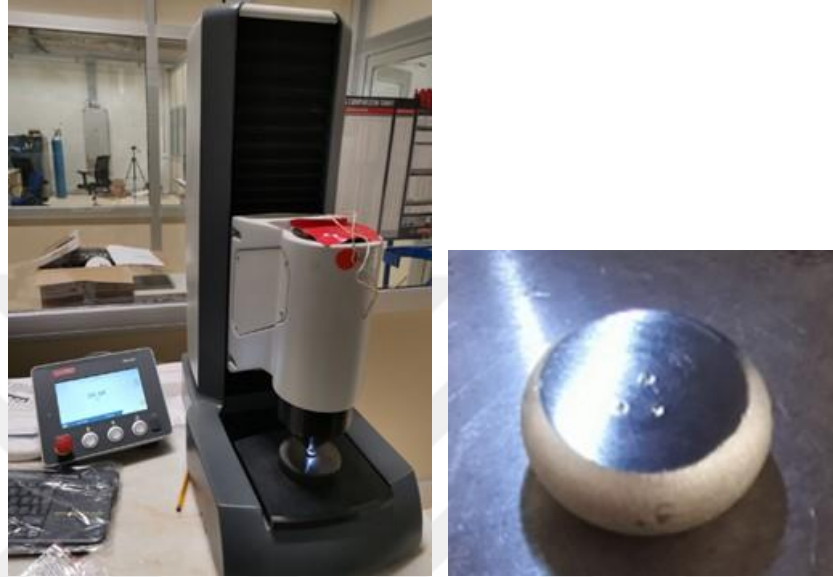
#### 5.9.4. Mikroyapı incelemeleri

Numunelerin mikroyapı incelemeleri için öncelikle TEI'de bulunan Nikon marka Eclipse MA 200 model ters optik mikroskop kullanılmıştır. İncelemeler dağlama öncesi ve sonrası 10x, 25x, 50x, 100x, 200x ve 500x büyütme oranlarında çekilen optik mikroyapı fotoğrafları ile yapılmıştır.

Daha yüksek büyütmedeki incelemeler ise Zeiss marka Supra 50 VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Bu mikroskop ile 20 kV hızlandırma voltajında 8,4 mm çalışma mesafesinde geri saçılan elektron dedektörü ile 5000x büyütme oranına kadar yeterli çözünürlükte fotoğraflar çekilebilmiştir. Numunelerin mikroyapısında gözlenen farklı kontrasttaki yapıların belirlenmesi ve elementel dağılımların tespit edilebilmesi için SEM'e entegre enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile nokta ve alan analizleri gerçekleştirilmiştir.

#### 5.9.5. Sertlik ölçümleri

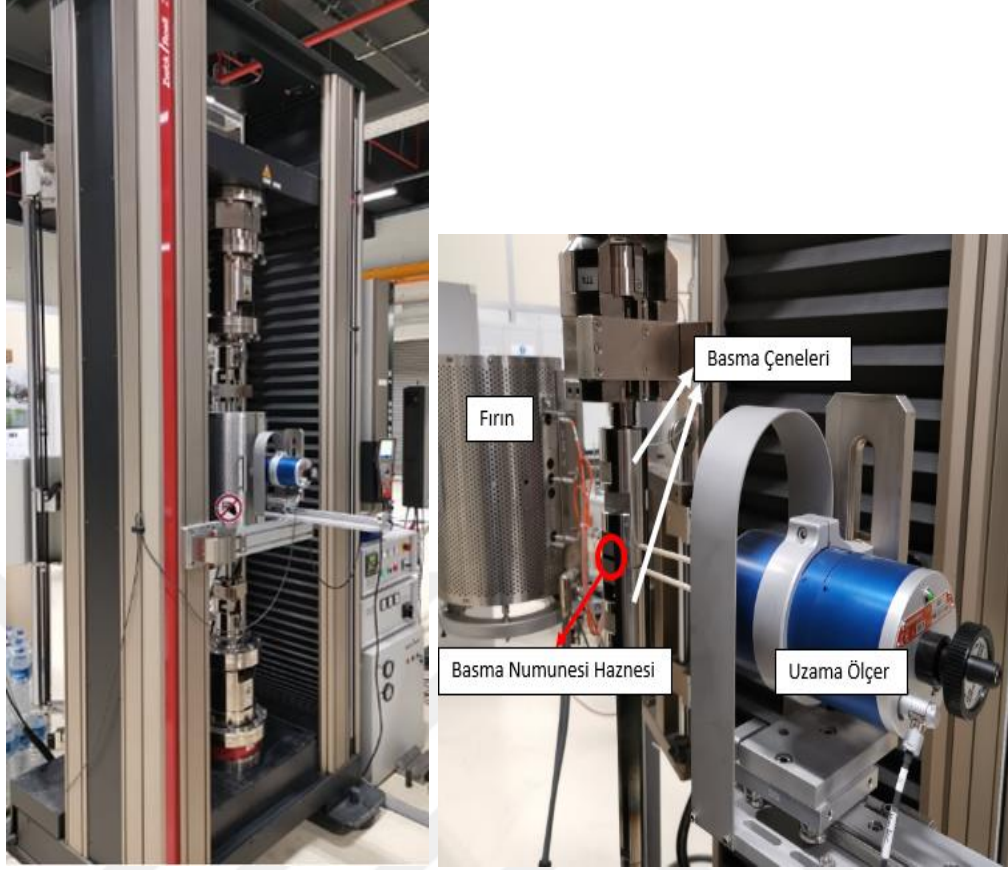
Numunelerin oda sıcaklığı makrosertlik ölçümleri, elmas koni şeklindeki Rockwell C ucu ile 10 kg ön yük ve sonrasında 100 kg yük uygulanarak TEI'deki Emcotest marka Durajet model cihazda yapılmıştır. Kullanılan cihaz ve sertlik ölçümü sonrası buton numune yüzeyindeki sertlik izlerin yer aldığı görüntü Görsel 5.20'de verilmiştir.



**Görsel 5.20.** Makrosertlik ölçüm cihazı (solda) ve sertlik ölçümü sonrası buton numune ve yüzeyindeki sertlik izleri (sağda)

#### 5.9.6. Basma testleri

Numunelerin oda sıcaklığı, 600°C ve 800°C sıcaklıktaki basma testleri TEI'deki Zwick Roell marka, Z100 model çekme test cihazında açık atmosfer yüksek sıcaklık fırını kullanılarak yapılmıştır. Basma testleri için üretici firma tarafından tasarlanan ve çekme yönünde basma yapabilen bir aparat ile seramik uçlu uzama ölçer kullanılmıştır. Basma testleri 5 MPa ön yük sonrası sabit  $5 \times 10^{-3}$  dak<sup>-1</sup> sabit birim uzama hızı ile gerçekleştirilmiştir. Uzama ölçer test sonuna kadar kullanılmıştır. Kullanılan çekme cihazı ve basma test düzeneği Görsel 5.21'de verilmiştir.



**Görsel 5.21.** Basma testlerinde kullanılan cihaz (üstte) ve basma düzeneği (altta).

#### 5.9.7. Oksidasyon testleri

Oksidasyon testlerinde her bir çevrim sonrası oksidasyona uğrayan numunelerin ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Buna göre tez kapsamında üretilen RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelerin oksidasyon hızları hesaplanmış, nikel bazlı süperalaşımlar ile kıyaslanmıştır. Ayrıca oksidasyon sonucu numunelerde oluşan oksit fazlarının belirlenmesi için XRD analizleri de gerçekleştirilmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, NbTiWVZr, Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarının Bölüm 5.8’de tariflenen metalurjik, mekanik ve oksidasyon testlerinin sonuçları verilmiştir.

### 6.1. Metalurjik incelemeler

#### 6.1.1. Kimyasal kompozisyon

Çalışma kapsamında ilk üretilen eşmolar NbTiWVZr RYEA üzerinde üretim kaynaklı kirlenmelerin tespiti amacıyla yapılan O, N, H ve C, S elementel analiz sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir. Numune üretimlerinde özellikle oksijen-alıcı kullanılması sayesinde, eşmolar NbTiWVZr RYEA numunelerde oksijen seviyesi 62,2 ppm olarak belirlenmiştir. Ayrıca numunelerde N ve H kirliliği yoktur. C ve S analiz sonuçları incelendiğinde ise numunelerde 31,6 ppm seviyesinde karbon ölçülmüş olup herhangi bir karbon kirlenmesi olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu ölçümler ile ham malzemeden de O, N, H ve C, S kirliliği gelmediği anlaşılmaktadır.

**Tablo 6.1.** NbTiWVZr RYEA üzerinde yapılan O, N, H ve C, S elementel analiz sonuçları

| Element | Analiz Sonucu (%) |
|---------|-------------------|
| O       | 0,0622            |
| N       | 0,00206           |
| H       | 0,000963          |
| C       | 0,0316            |
| S       | 0,00425           |

Üretilen NbTiWVZr, Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait döküm sonrası XRF sonuçları, hedeflenen kompozisyon değeri ve hedeften sapma miktarı (standart sapmalar ile birlikte) Tablo 6.2’de verilmiştir. Burada yapılan her bir ölçüm, farklı tarihlerde üretilen RYEA ve KKA’ların XRF ölçüm sonuçlarını yansıtmakta olup, hedeflenen kompozisyonundan sapmalar da üretimler arasındaki kompozisyonel farkları göstermektedir. Alaşımlarda “diğer elementler” olarak XRF ile Fe, Ni, Hf ve Cr saptanmıştır. Bu elementlerin ham malzemeden gelme olasılığı da mevcut olup standartsız bir analiz olduğu için XRF cihazından kaynaklı okuma hatası da olabileceği düşünülmektedir.

XRF sonuçları incelendiğinde minör sapmalar ile her üç alaşım içinde hedeflenen kimyasal kompozisyona ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca farklı tarihlerde üretilen numuneler arasında kompozisyonel farkın % 1'in altında olduğu saptanmıştır. Bu da numunelerin tekrar edilebilir olarak üretildiğinin bir göstergesidir. Alaşımlarda hedef kompozisyonlardan en fazla sapma sırasıyla W, V, Zr ve Ti'da görülmüştür. Bunun nedeninin ise XRF ölçümü alınan buton numune alt ve üst yüzeyinde meydana gelen kimyasal segregasyonlar olduğu tahmin edilmektedir.

**Tablo 6.2.** *NbTiWVZr, Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait XRF ölçüm sonuçları*

| Alaşım                                                                                   | Elementler (% Ağ) |              |              |              |              |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>NbTiWVZr</b>                                                                          | <b>Nb</b>         | <b>Ti</b>    | <b>W</b>     | <b>V</b>     | <b>Zr</b>    | <b>Diğer</b> |
| <b>Hedeflenen Kompozisyon</b>                                                            | <b>19,90</b>      | <b>10,25</b> | <b>39,38</b> | <b>10,91</b> | <b>19,54</b> | <b>-</b>     |
| Ölçüm-1                                                                                  | 21,22             | 9,36         | 39,14        | 10,01        | 18,92        | 1,35         |
| Ölçüm-2                                                                                  | 21,54             | 10,34        | 38,56        | 8,86         | 19,54        | 1,16         |
| Ölçüm-3                                                                                  | 21,13             | 9,92         | 38,93        | 9,24         | 19,29        | 1,49         |
| Ölçüm Ortalama                                                                           | 21,30             | 9,87         | 38,88        | 9,37         | 19,25        | 1,33         |
| Ölçüm Standart Sapması                                                                   | 0,18              | 0,40         | 0,24         | 0,48         | 0,25         | 0,14         |
| Hedef Kompozisyonlardan Sapma                                                            | 1,39              | -0,38        | -0,51        | -1,54        | -0,29        | 1,33         |
| <b>Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub></b> | <b>Nb</b>         | <b>Ti</b>    | <b>W</b>     | <b>V</b>     | <b>Zr</b>    | <b>Diğer</b> |
| <b>Hedeflenen Kompozisyon</b>                                                            | <b>25,48</b>      | <b>13,13</b> | <b>22,41</b> | <b>13,97</b> | <b>25,02</b> | <b>-</b>     |
| Ölçüm-1                                                                                  | 27,05             | 12,49        | 19,18        | 12,82        | 27,8         | 0,66         |
| Ölçüm-2                                                                                  | 27,15             | 11,65        | 19,44        | 13,25        | 27,62        | 0,89         |
| Ölçüm-3                                                                                  | 25,88             | 12,66        | 19,04        | 11,82        | 29,37        | 1,23         |
| Ölçüm Ortalama                                                                           | 26,69             | 12,27        | 19,22        | 12,63        | 28,26        | 0,93         |
| Ölçüm Standart Sapması                                                                   | 0,58              | 0,44         | 0,17         | 0,60         | 0,79         | 0,23         |
| Hedef Kompozisyonlardan Sapma                                                            | 1,22              | -0,86        | -3,19        | -1,34        | 3,25         | 0,93         |
| <b>MoNbTiWV</b>                                                                          | <b>Mo</b>         | <b>Nb</b>    | <b>Ti</b>    | <b>W</b>     | <b>V</b>     | <b>Diğer</b> |
| <b>Hedeflenen Kompozisyon</b>                                                            | <b>20,35</b>      | <b>19,70</b> | <b>10,15</b> | <b>38,99</b> | <b>10,80</b> | <b>-</b>     |
| Ölçüm-1                                                                                  | 20,85             | 19,99        | 7,97         | 41,41        | 9,35         | 0,43         |
| Ölçüm-2                                                                                  | 21,08             | 20,11        | 8,22         | 41,27        | 8,90         | 0,42         |
| Ölçüm-3                                                                                  | 20,03             | 20,60        | 8,55         | 40,62        | 9,40         | 0,80         |
| Ölçüm Ortalama                                                                           | 20,65             | 20,23        | 8,25         | 41,10        | 9,22         | 0,55         |
| Ölçüm Standart Sapması                                                                   | 0,45              | 0,26         | 0,24         | 0,34         | 0,22         | 0,18         |
| Hedef Kompozisyonlardan Sapma                                                            | 0,30              | 0,53         | -1,91        | 2,11         | -1,59        | 0,55         |

### 6.1.2. Yoğunluk

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin döküm ve ikincil işlemler sonrası ölçülen yoğunlukları ve teorik yoğunluğa göre hesaplanmış rölatif yoğunluk değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde rölatif yoğunluk değerinin sırasıyla NbTiWVZr, Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarında küçükten büyüğe doğru arttığı görülmektedir. Burada en yüksek rölatif yoğunluk değerinin ergime noktası yüksek elementler içeren MoNbTiWV alaşımında elde edildiği dikkat çekicidir. Bunun nedeninin Mo, Nb ve W gibi birbirine benzer atomik yarıçapa sahip ağır refrakter elementlerin bulunmasından dolayı atomik boyut farklılığı değerinin düşük (3,67) ve istiflenme esnasında oluşan boşluk hatalarının daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımında, NbTiWVZr alaşımına göre W oranının azalmasına bağlı olarak diğer daha düşük ergime noktalı Ti, Zr ve V gibi elementlerin miktarının artması, daha iyi ıslatma sağlayarak % 1-2 daha fazla rölatif yoğunluk elde edilmesini sağlamıştır. Senkov ve diğerlerinin VAE ile üretilmiş MoNbTaW ve MoNbTaWV RYEA'lar üzerinde yaptıkları çalışmalarında da hacimsel miktarı % 5'in altında olarak tespit ettikleri boşluklarla karşılaştıklarını belirtmişler, bu yüzden yoğunlukların teorik yoğunluğun altında olduğunu aktarmışlardır [84]. İlave olarak Regenbergl ve diğerleri, VAE ile ürettiği MoNbVW RYEA için porozitenin önüne geçemediklerini de aktarmışlardır [85]. Bu tez çalışmasında üretilen alaşımlarda mikroporozitelerin bir diğer nedeni de ham malzemelerin toz halinde soğuk preslenmesi esnasında havanın toz partikülleri arasında sıkışması ve ergitme esnasında hapsolmesidir.

Öte yandan HIP sonrası NbTiWVZr eşmolar RYEA'daki rölatif yoğunluk değerinin beklenmedik bir şekilde HIP öncesine göre bir miktar azaldığı anlaşılmıştır. Buradaki azalmanın da sebebinin, alaşımın 1200°C sıcaklıkta 4 saat boyunca bünyesindeki kalıntı gerilmelerin serbest kalması nedeniyle meydana gelen hacimsel artış kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Benzer yorumu, tüm RYEA ve KKA alaşımların ısıt işlem öncesi ve sonrası rölatif yoğunluk değerleri incelendiğinde yapmak mümkündür.

Özet olarak numunelerin VAE ile üretim esnasında hızlı soğuma nedeniyle atomlar ideal kafes pozisyonlarına yerleşemediğinden kafeste bir kalıntı gerilme oluşmakta bunun da ısıt işlem sonrası hacimsel değişimle giderilerek rölatif yoğunlukta azalmaya neden olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.3.** *NbTiWVZr, Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait döküm ve ikincil işlemler sonrası yoğunluk ölçüm sonuçları*

| Numune Kodu     | Teo. Yoğ. g/cm <sup>3</sup> | Ölç. 1 g/cm <sup>3</sup> | Ölç. 2 g/cm <sup>3</sup> | Ölç. 3 g/cm <sup>3</sup> | Ölç. 4 g/cm <sup>3</sup> | Ölç. 5 g/cm <sup>3</sup> | Ort. g/cm <sup>3</sup> | Std. Sap. | Röl. Yoğ. (%) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-----------|---------------|
| RYEA-1          | 8,964                       | 8,705                    | 8,712                    | 8,704                    | 8,708                    | 8,713                    | 8,708                  | 0,004     | 97,149        |
| RYEA-1_HT       | 8,964                       | 8,696                    | 8,702                    | 8,699                    | 8,696                    | 8,697                    | 8,698                  | 0,002     | 97,033        |
| RYEA-1 (2)*     | 8,964                       | 8,619                    | 8,633                    | 8,623                    | 8,630                    | 8,631                    | 8,627                  | 0,005     | 96,243        |
| RYEA-1_ (2) HIP | 8,964                       | 8,614                    | 8,616                    | 8,612                    | 8,609                    | 8,606                    | 8,611                  | 0,004     | 96,066        |
| KKA-1           | 7,672                       | 7,543                    | 7,545                    | 7,545                    | 7,545                    | 7,548                    | 7,545                  | 0,002     | 98,347        |
| KKA-1_HT        | 7,672                       | 7,547                    | 7,539                    | 7,541                    | 7,540                    | 7,537                    | 7,541                  | 0,003     | 98,290        |
| RYEA-2          | 9,706                       | 9,695                    | 9,699                    | 9,691                    | 9,695                    | 9,699                    | 9,696                  | 0,003     | 99,895        |
| RYEA-2_HT       | 9,706                       | 9,682                    | 9,681                    | 9,675                    | 9,673                    | 9,662                    | 9,675                  | 0,007     | 99,676        |

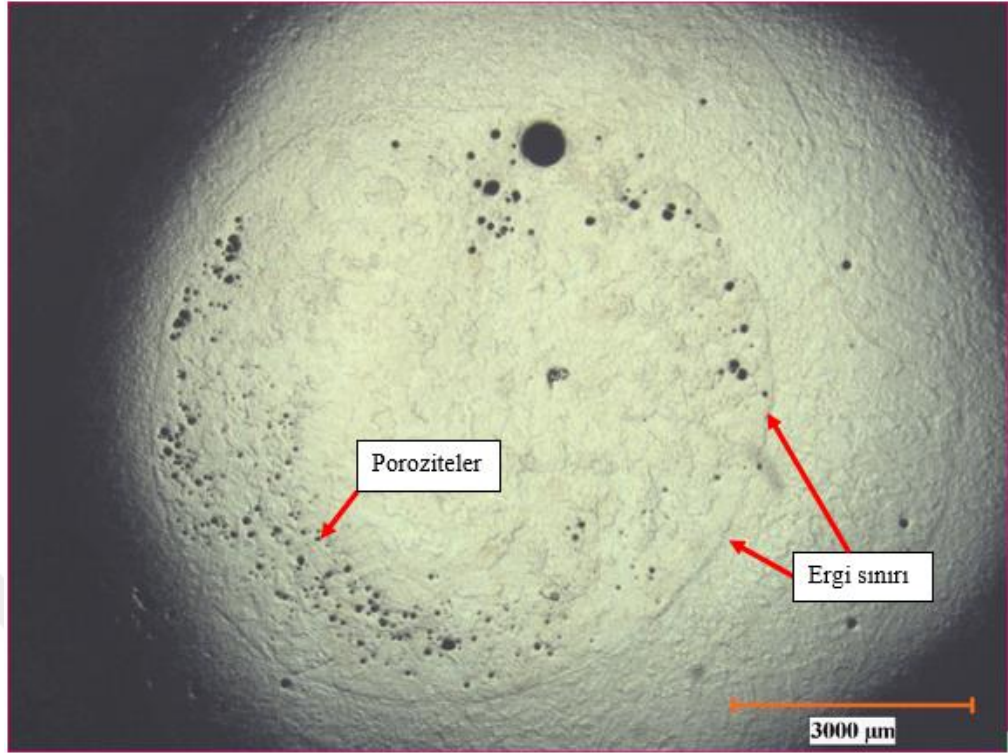
\*HIP öncesi

### 6.1.3. Optik mikroyapılar

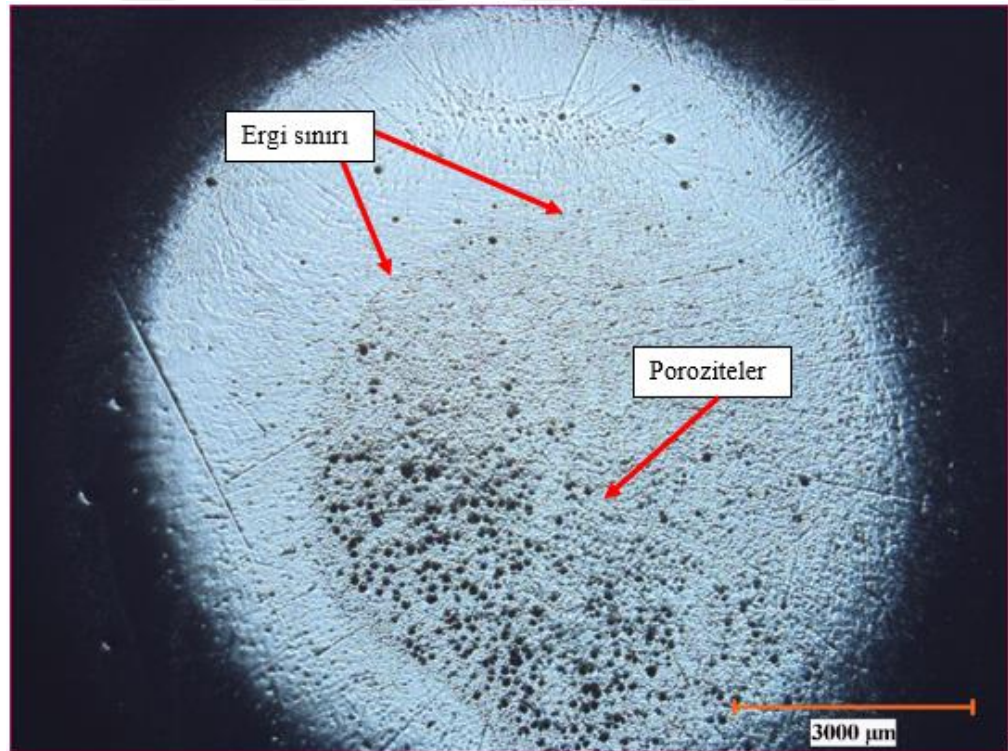
#### 6.1.3.1. Döküm sonrası optik mikroyapılar

RYEA ve KKA numunelerde iç porozitelerin görülmesi, varsa matriste çözünmeyen oksit ve nitrür gibi inklüzyonların tespiti için dağlama öncesi mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. 10x büyütmede RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelere ait optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3'te verilmiştir.

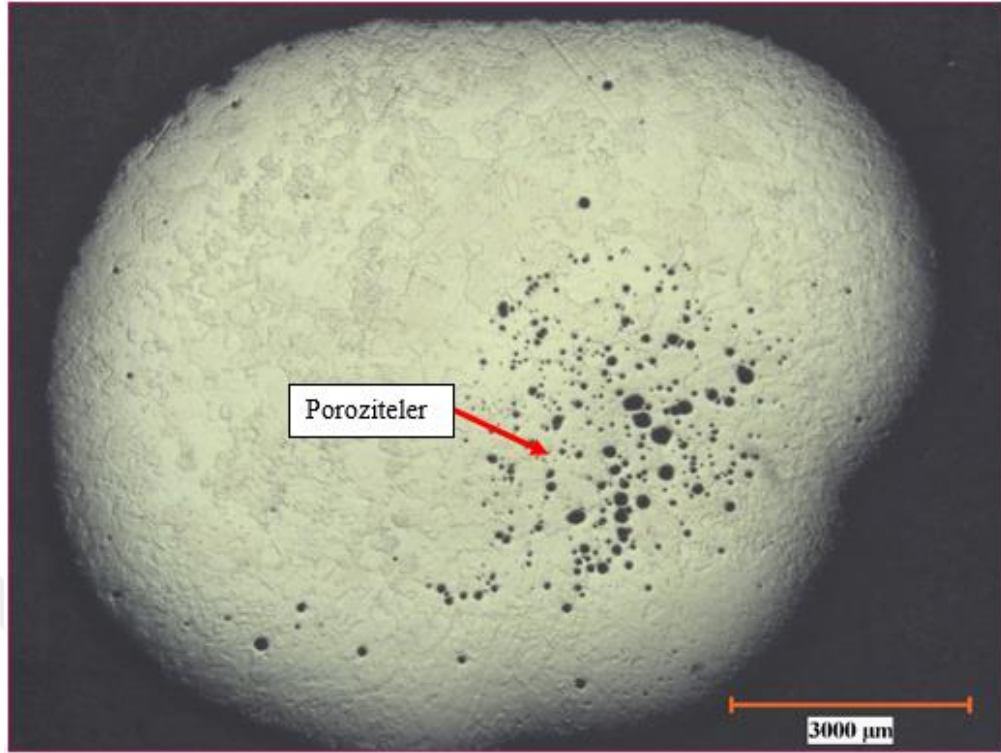
Optik mikroyapılar incelendiğinde RYEA-1 ve KKA-1 kodlu numunelerde parlatma sonrası mikroyapılarda ergitme tekrarları arasında oluşması beklenen ergi sınırı görülürken, RYEA-2'de bu sınır net olarak görülememiştir. VAE'de bakır pota ile temas eden bölgede her zaman sıvılaşmadan kalan bir bölge mevcut olup her ergitme tekrarında numunenin üst kısmı ergiyerek nispeten daha soğuk olan bakır pota tarafına doğru akmakta ve bu da bir ergi sınırı oluşumuna neden olmaktadır. Nagase ve diğerleri MoNbTaTiZr alaşımının VAE ile üretimi sonrası buton numune mikroyapısında benzer mikroporozite ve ergi sınırlarını gördüklerini belirtmişlerdir [86]. Öte yandan optik mikroyapılardaki mikroporozite görüntüleri, Arşimed prensibi hesaplanan yoğunluk ölçümlerinin neden daha düşük çıktığının da bir göstergesidir.



Şekil 6.1.  $NbTiWVZr$  (RYEA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı:10x)

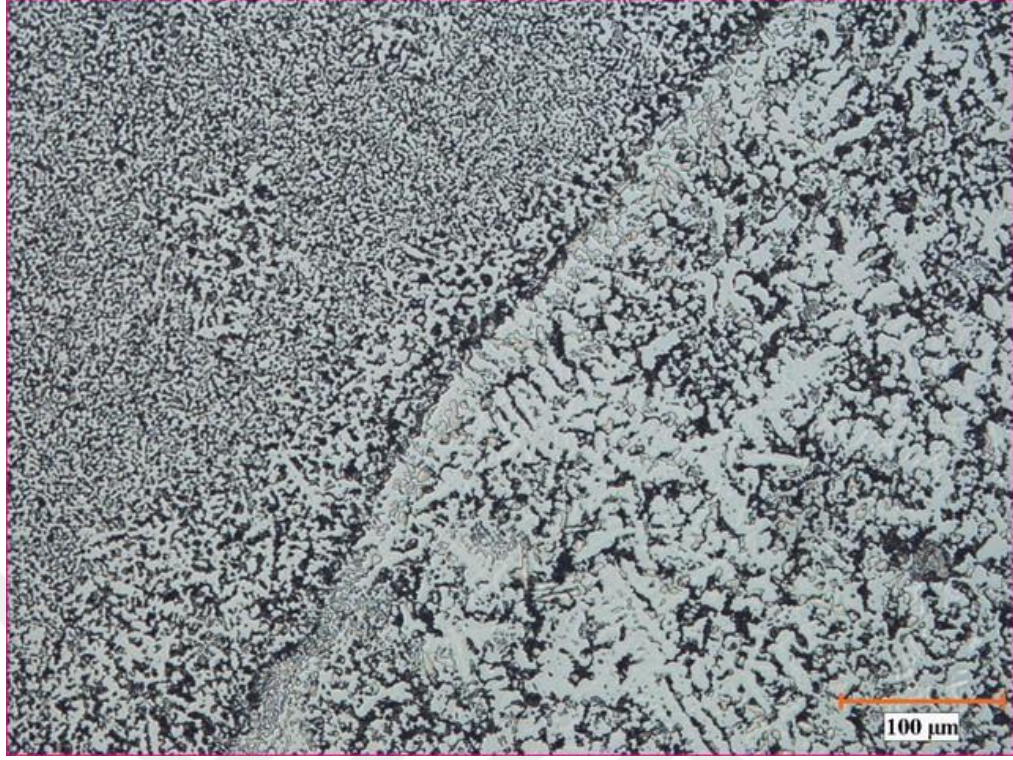


Şekil 6.2.  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  (KKA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı:10x)

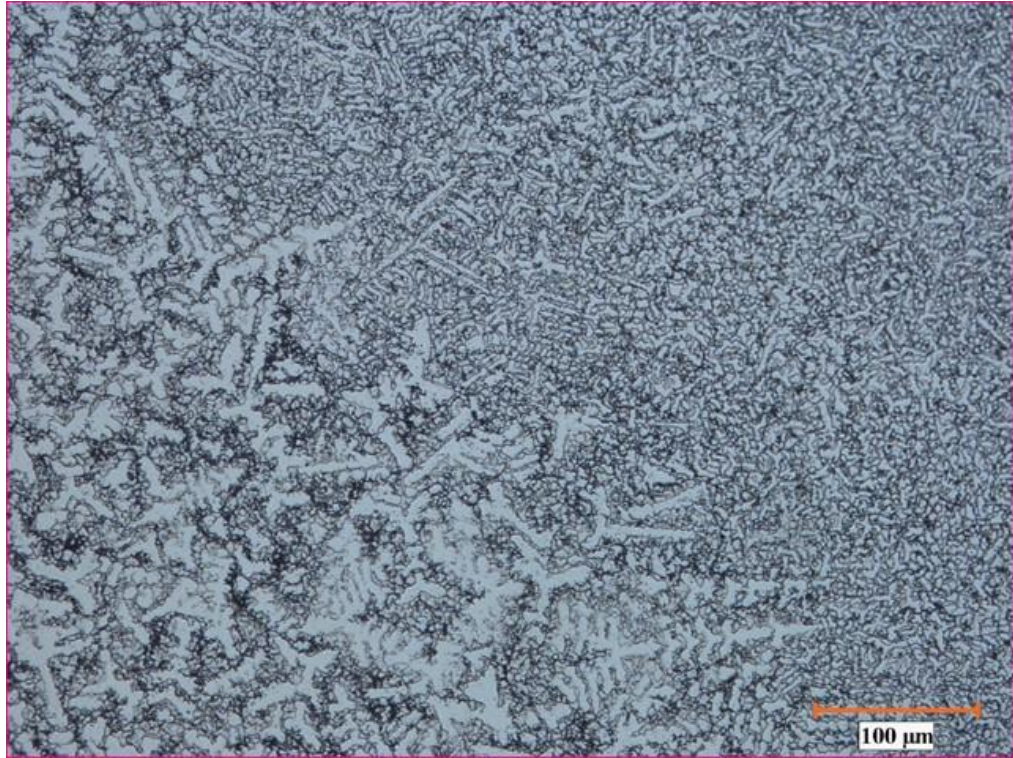


**Şekil 6.3.** MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 10x)

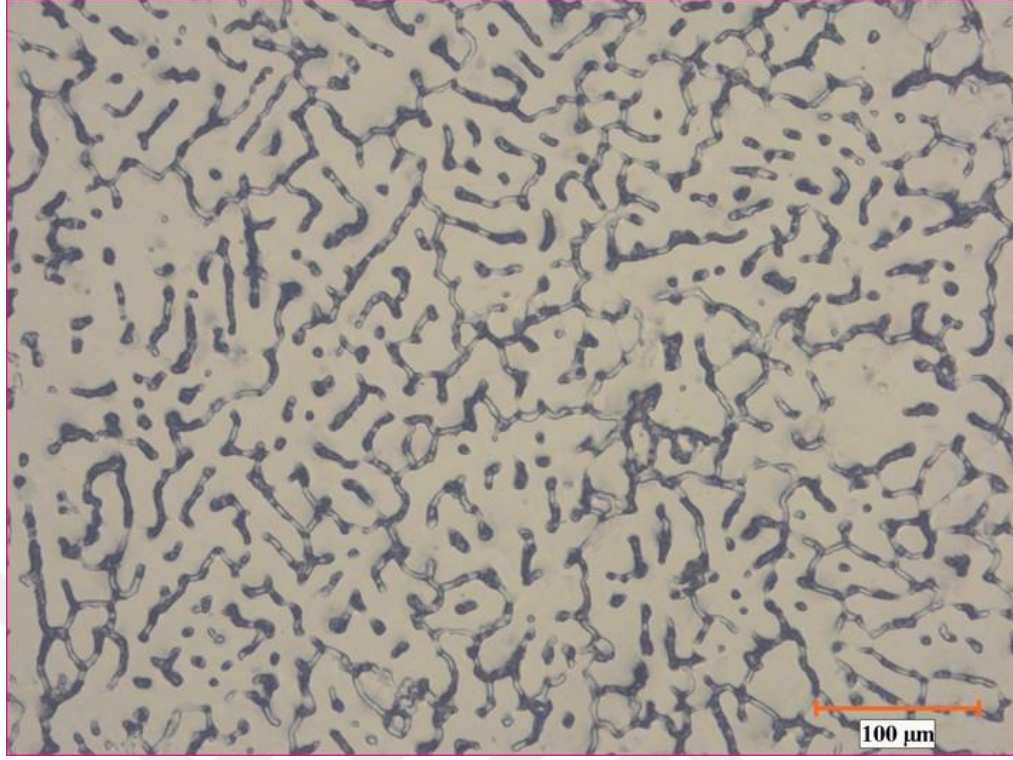
Optik mikroskop incelemeleri için Bölüm 5.7’de bilgileri verilen dağlayıcılar ile dağlanan; 200x büyütmede RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelere ait dağlama sonrası optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da verilmiştir. RYEA-1 ve KKA-1’in dentritik mikroyapıda olduğu açıkça görülmekte olup her iki alaşımda ergi sınırının ayırdığı iki farklı dentrit büyüklüğüne sahip bölgeler bulunduğu anlaşılmıştır. Burada buton numune merkezinde kalan dentritlerin daha kaba olduğu, buton dış kabuk bölgesinde yer alan dentritlerin ise daha ince yapıda olduğu görülmektedir. Bunun nedeni buton dış yüzeyi ark ile hemen sıvılaşıp soğurken, buton merkez kısmı sürekli sıcak kabuğun etkisi altında tavlanarak dentritlerin büyümesidir. Regenberg ve diğerlerinin ürettiği MoNbVW alaşımında, buton numunenin farklı yerlerinden alınan görüntülerde de farklı büyüklükte dentritlerin olduğu anlaşılmıştır [85].



Şekil 6.4. NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 200x)



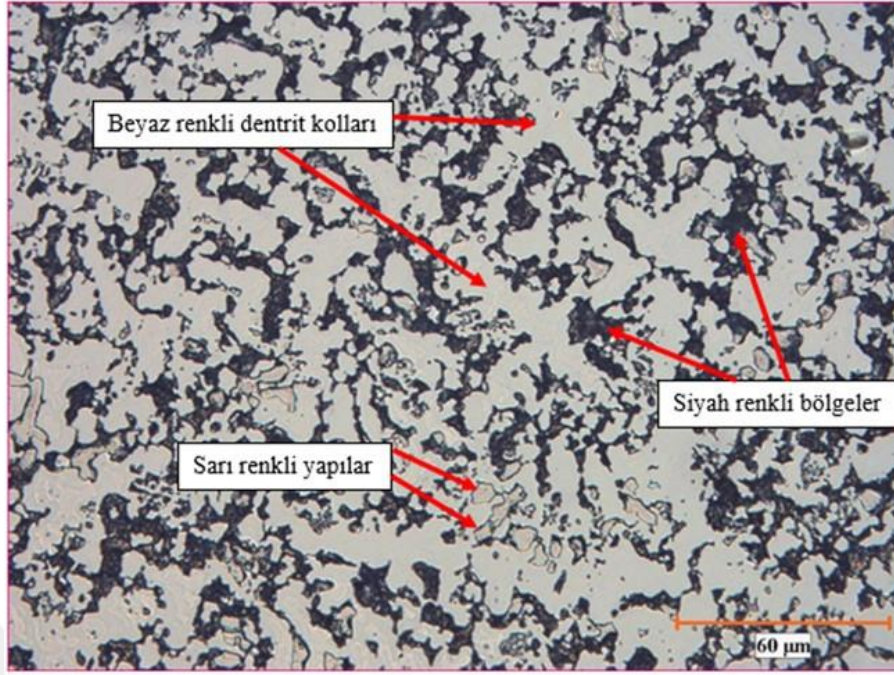
Şekil 6.5. Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> (KKA-1) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 200x)



**Şekil 6.6.** *MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 200x)*

Fakat RYEA-1 ve KKA-1’de açıkça görülen ergi sınırı, RYEA-2’de dağlama sonrası görülmemiştir. Bunun sebebi Mo, W ve Nb refrakter metallerinin Ti ve V ile ana dentrit yapısını oluşturması ve dentritler arası segregasyonun az olması nedeniyle dağlamanın yeterli ayırt etme şansı vermemesidir. RYEA-1 ve KKA-1 mikroyapılarına daha detaylı bakıldığında beyaz, açık sarı ve siyah olmak üzere üç farklı kontrastta renk bölgeleri olduğu görülmüştür. RYEA-2’de ise matris içerisine dağılmış durumda ana dentritler ile bu dentritleri çevreleyen gri-siyah dentritler arası faz yapıların bulunduğu dikkat çekmektedir. 500x büyütmedeki RYEA-1 kodlu numuneye ait optik mikroyapı fotoğrafı Şekil 6.7’de verilmiştir. Bu fotoğrafta beyaz olarak gözüken ana dentrit kolları ve dentritler arası bölgelerde yer alan sarı ve siyah renkli yapılar ok ile gösterilmiştir. Bu yapıların detaylı incelemesi SEM’de nokta EDS analizleri yapılarak anlaşılmıştır. Benzer renk yapısı ve değerlendirmeler KKA-1 alaşımı için de yapılabilir.

Döküm sonrası RYEA-1 ve KKA-1 kodlu numunelerde görülen dentritik mikroyapıların özellikle Ti, Nb, V ve Zr içeren literatür çalışmalarında elde edilen mikroyapılarla benzer olduğu söylenebilir [66, 85, 86]. Regenberg ve diğerlerinin ürettikleri MoNbTiWV numune mikroyapısı ise bu tez çalışmasındaki RYEA-2 kodlu numunenin optik mikroyapısından farklıdır [85].

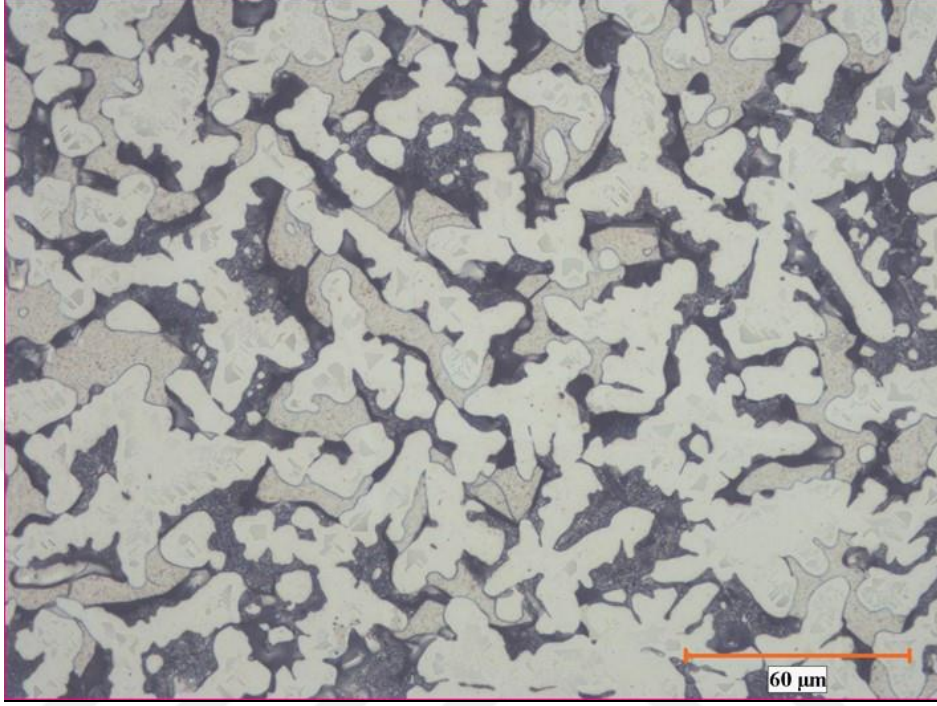


**Şekil 6.7.** NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)

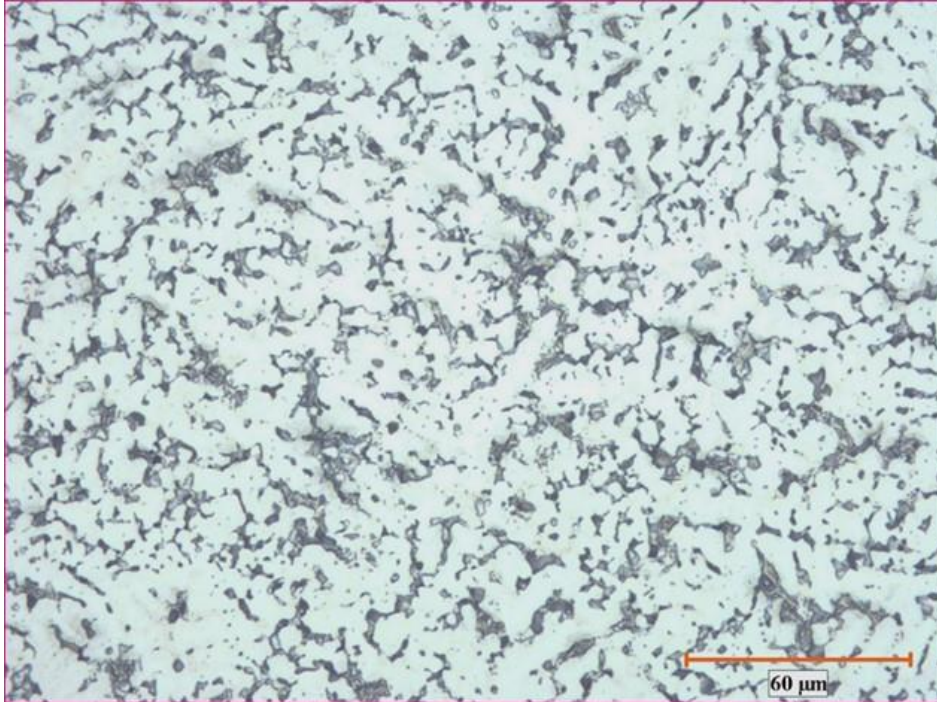
#### **6.1.3.2. İkincil işlemler sonrası optik mikroyapılar**

RYEA-1\_HT, RYEA-1\_HT-2, RYEA-1\_HT-3, RYEA-1\_HIP kodlu numunelere ait dağlama sonrası 500x büyütmede numune merkezinden alınan optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11’de verilmiştir. Isıl işlemin etkisi optik mikroyapı fotoğrafları üzerinden yorumlandığında, 1200°C sıcaklıkta 12 saat uygulanan ısıl işlem ve yine aynı sıcaklıkta 4 saat 100 MPa basınç altında gerçekleştirilen HIP prosesinin numunelerde ana dentrit kollarının büyüklüğünde ve görünüşünde herhangi bir değişime neden olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca 1200°C sıcaklıkta yapılan ısıl işlem ve HIP prosesi dentritler arası bölgede yer alan sarı ve siyah renk kontrastındaki yapılarda da belirgin bir değişim yaratmamıştır. Fakat 1200°C ve 1400°C sıcaklıkta 24 saat yapılan ısıl işlemlerde ise mikroyapıda değişimler olduğu görülmüştür. RYEA-1\_HT-2 kodlu numunede beyaz renkteki ana dentrit kolları üzerindeki ikincil kollar toparlanmaya ve ana dentrite doğru yaklaşmaya başlamış, bu etki 1400°C sıcaklıkta RYEA-1\_HT’de daha belirgin hale gelerek ikincil dentrit kolları hemen hemen yok olmuştur. Dolayısı ile 1400°C sıcaklıkta 24 saat yapılan ısıl işlem ile dentritler büyüme göstermiştir. Öte yandan dentritler arası bölgede döküm sonrası ayrıık halde bulunan sarı renkli fazın 1200°C sıcaklıkta 24 saat yapılan ısıl işlemde birleşmeye başladığı, 1400°C sıcaklıkta ise birleşmenin yanı sıra büyüdüğü de görülmektedir. Şekil 6.8’e bakıldığında

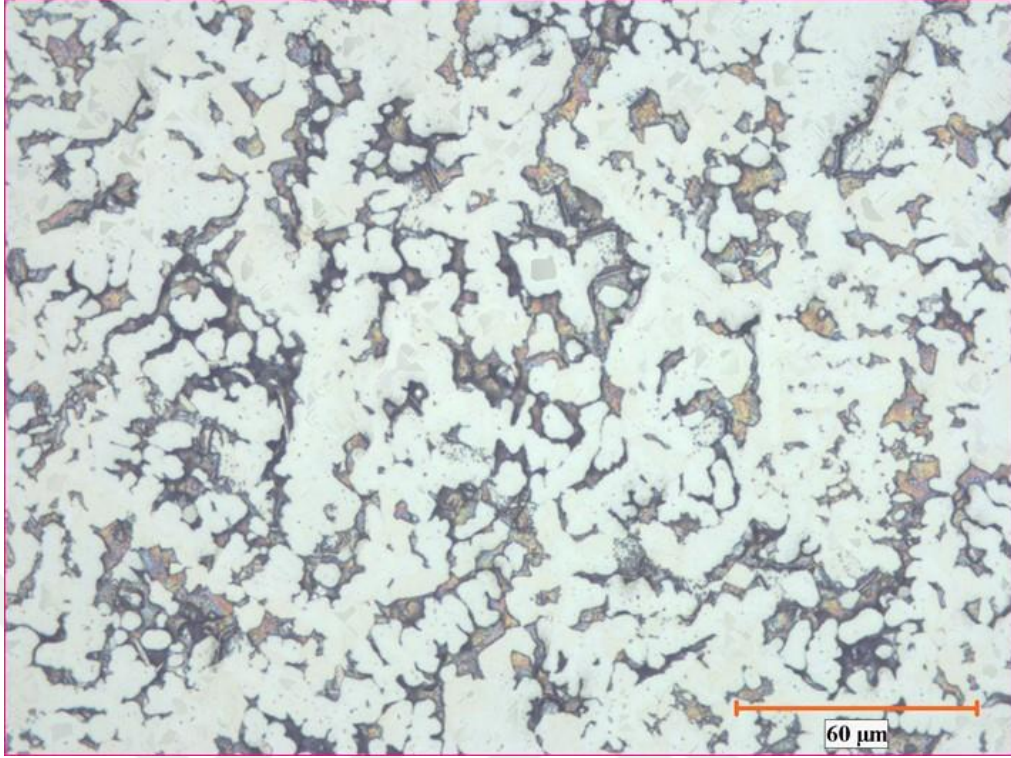
sarı renkli yapı ile siyah bölgelerin ana dentritlerin etrafını sarmaya başladığı görülmüştür. Siyah renkli dentritler arası bölgelerde benzer şekilde artan ısı işlem sıcaklığı ile büyüme göstermiş ve daha belirgin bir hale gelmiştir.



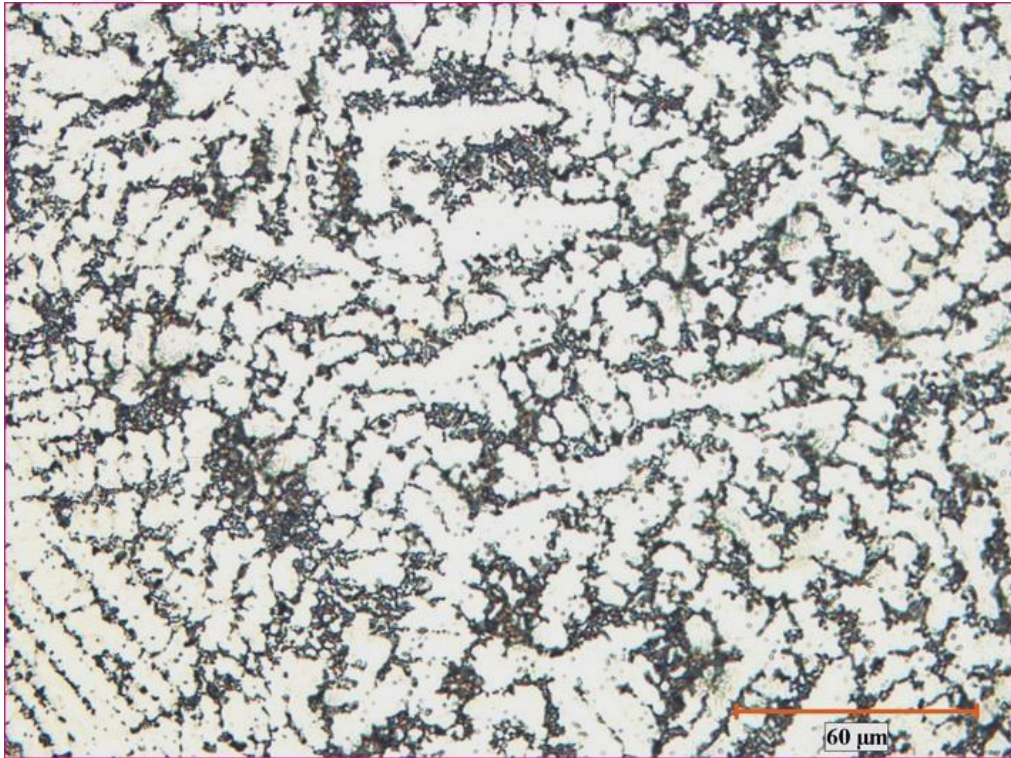
**Şekil 6.8.** NbTiWVZr (RYEA-1-HT) alaşımına ait 1400°C-24 saat ısı işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)



**Şekil 6.9.** NbTiWVZr (RYEA-1-HT-2) alaşımına ait 1200°C-12 saat ısı işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)

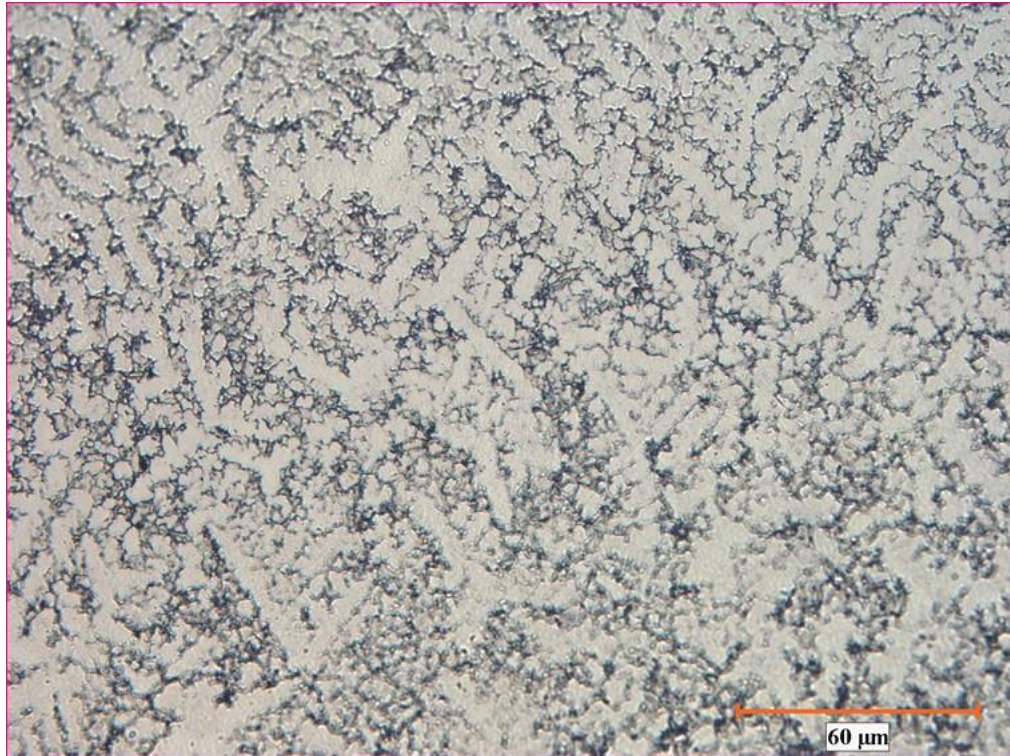


**Şekil 6.10.** NbTiWVZr (RYEA-1\_HT-3) alaşımına ait 1200°C-24 saat ısıt işlem sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)

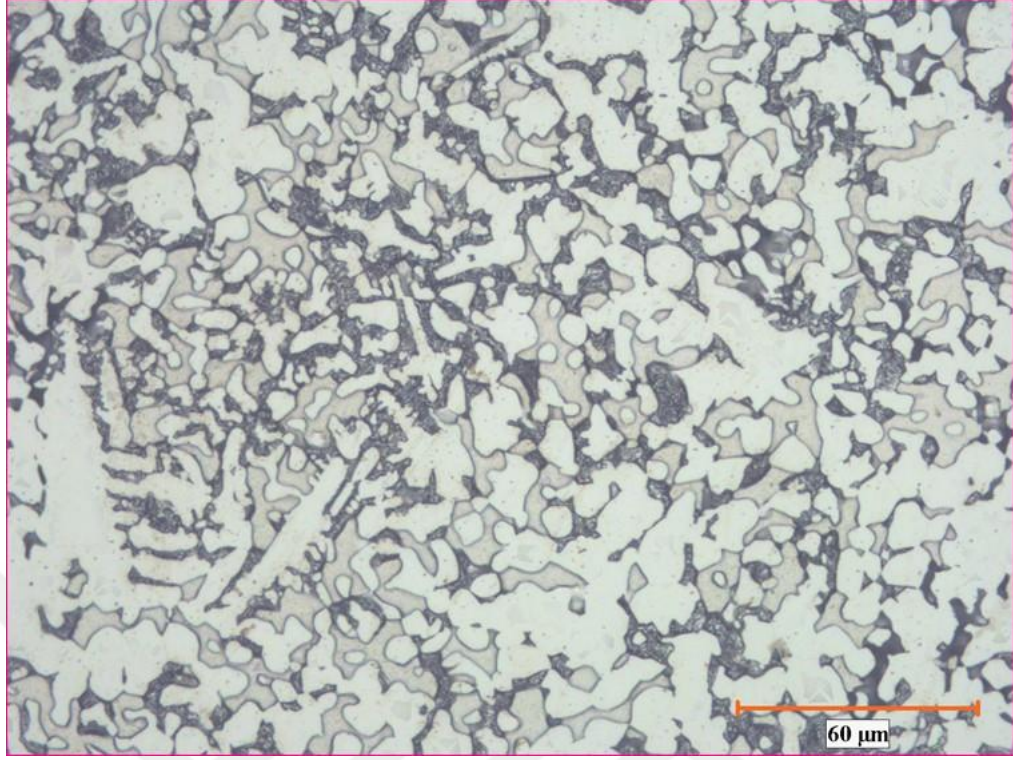


**Şekil 6.11.** NbTiWVZr (RYEA-1\_HIP) alaşımına ait 1200°C-4 saat-100 MPa sıcak izostatik presleme işlemi sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)

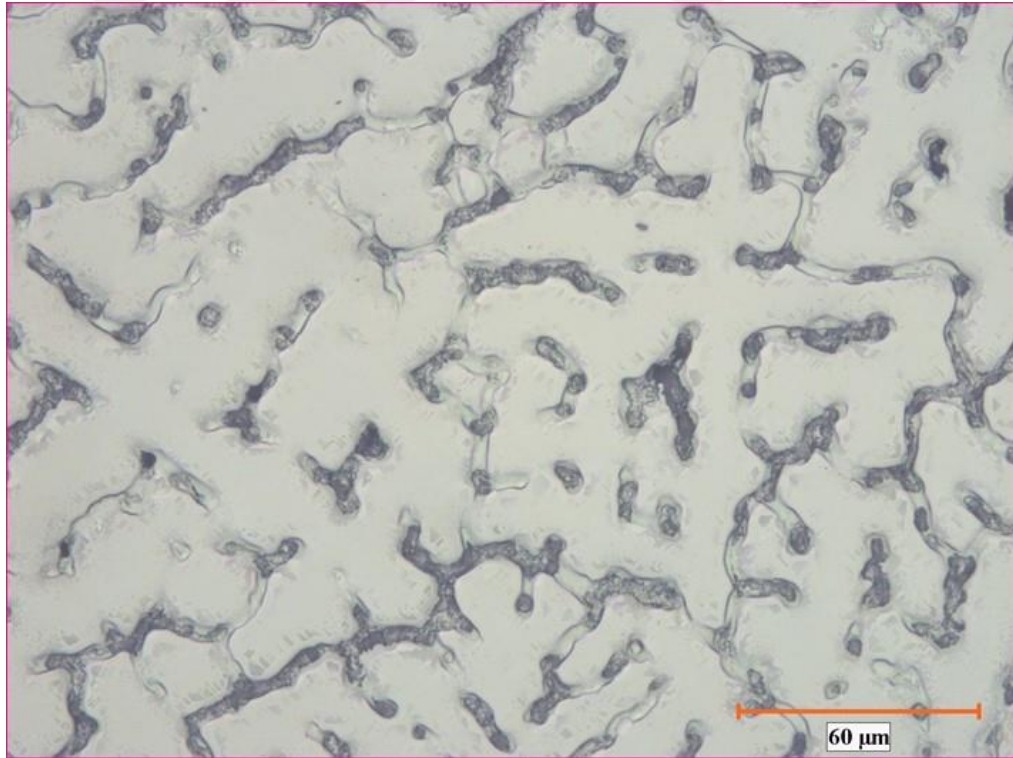
Isıl işlemin diğer numunelere olan etkisini anlamak için KKA-1, KKA-1\_HT, RYEA-2 ve RYEA-2\_HT kodlu numunelere ait 500x büyütmede çekilen optik mikroyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15'te verilmiştir. Burada KKA-1 kodlu numune üzerinde 1400°C sıcaklıkta 24 saat boyunca gerçekleştirilen ısıtıl işlemin, RYEA-1'dekine benzer şekilde ana dentrit kolları üzerindeki ikincil kollarının kaybolmasına, dentritlerin toparlanarak dallı yapısının bozulmasına ve dentritlerin büyümesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Döküm sonrası ayrık halde bulunan sarı renkli yapıların 1400°C sıcaklık ve 24 saat ısıtıl işlem sonrasında RYEA-1\_HT kodlu numuneye benzer şekilde bir araya gelerek dentritler arası bölgelerde ikinci bir faz olarak yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 6.14'te ise RYEA-2 kodlu numunenin mikroyapısında küçük gri noktalar halinde görülen yapıların 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem sonrası bir araya gelerek daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Böylece ısıtıl işlem sonrası dentritik mikroyapı daha belirgin hale gelmiştir. Isıl işlemin refrakter element içeriği yüksek RYEA-2 kodlu numune mikroyapısında dentrit morfolojilerinde az miktarda toparlanmaya neden olduğu söylenebilir.



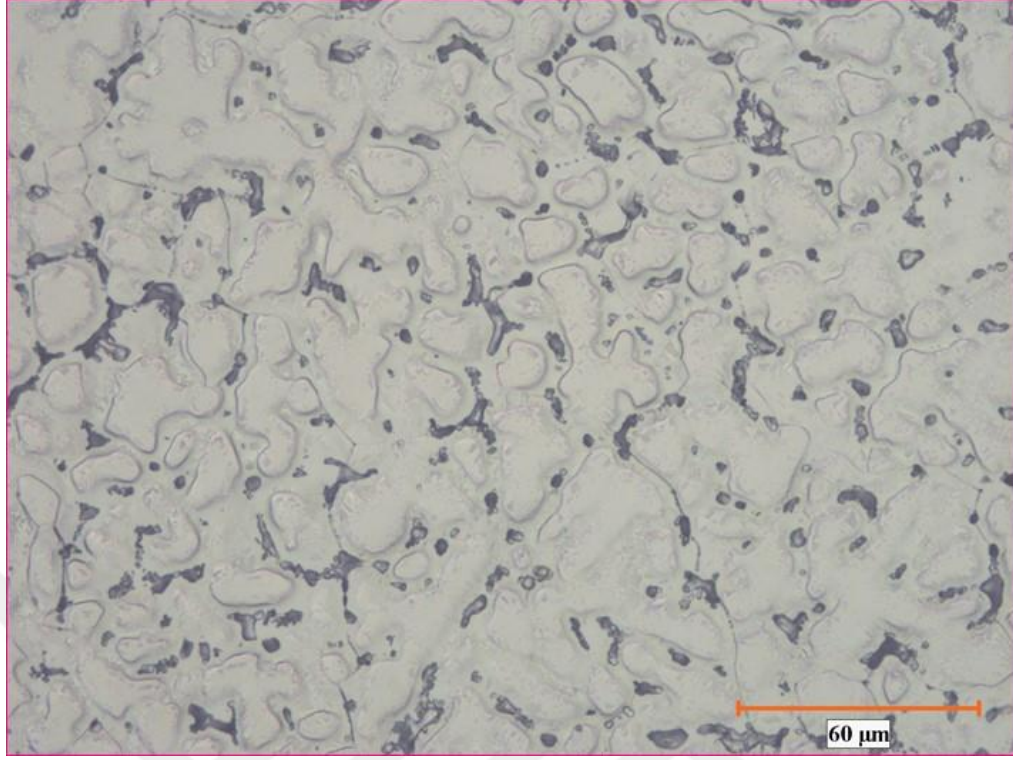
**Şekil 6.12**  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  (KKA-1) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)



**Şekil 6.13.**  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  (KKA-1\_HT) alaşımına ait 1400°C-24 saat ısıt işlemler sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)



**Şekil 6.14.** MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)



**Şekil 6.15.** *MoNbTiWV (RYEA-2\_HT) alaşımına ait 1400°C-24 saat ısıtma işlemi sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 500x)*

Isıl işlem uygulanan numunelerin optik mikroyapılarının hepsi birlikte değerlendirildiğinde artan sıcaklık ve ısıtma süresinin dendritlerde toparlanmaya ve büyümeye neden olduğu görülmüş, elementlerin segregasyonu nedeniyle ısıtma işlemi sonrası bazı kompleks çökelti fazlarının oluşabileceği anlaşılmıştır. Eshed ve arkadaşlarının çalışmasında da  $\text{CrNbTiVZr}$  ve  $\text{Cr}_{20}\text{Mo}_{10}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$  alaşımlarına 800, 1000, 1300 ve 1600°C sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlemi sonrası dendritlerin kabalaştığı ve Zr elementinin de segregasyona uğradığı belirtilmiştir [87]. Yine benzer şekilde Wu ve diğerleri  $\text{TiZrNbMo}_{0,3}\text{V}_{0,3}$  alaşımına 1000°C sıcaklıkta 72 saat süre ile tavlama ısıtma işlemi uygulamış ve alaşımın döküm halindeki dendritik mikroyapısı ısıtma işlemi sonrası kabalaşmıştır [88].

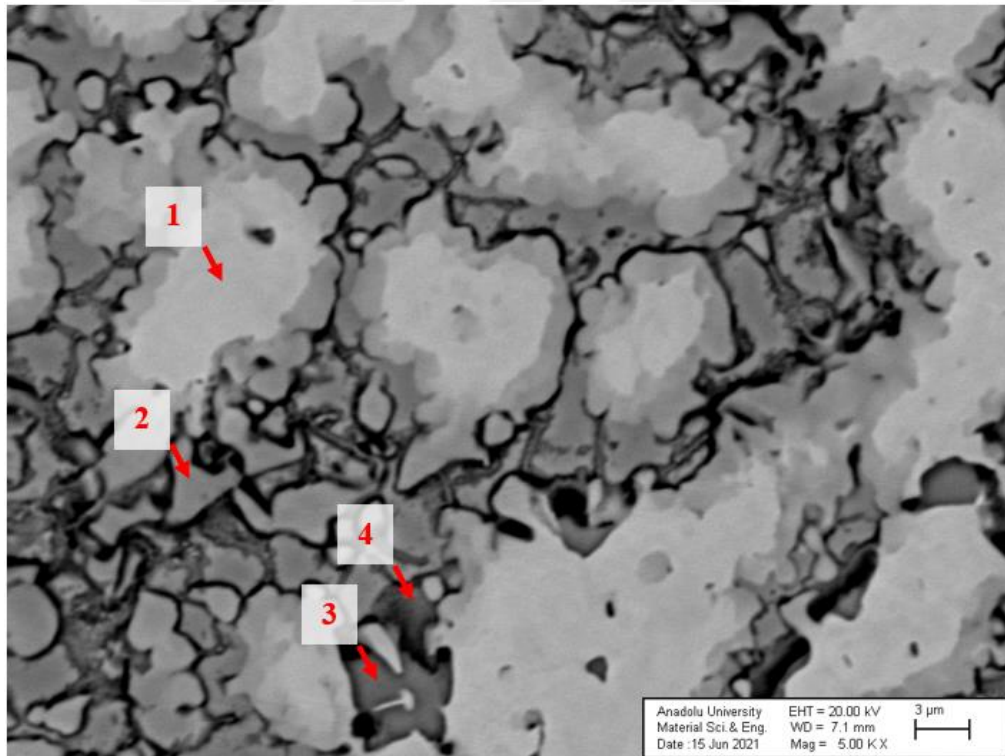
#### **6.1.4. SEM ve EDS incelemeleri**

##### **6.1.4.1. Döküm sonrası SEM ve EDS sonuçları**

Alaşımların mikroyapısını daha detaylı olarak incelemek için RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelerde 5000x büyütmede çekilen SEM mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18’de verilmiştir. Bu görüntüler buton numunelerin (kaba dendritlerin bulunduğu) merkez bölgelerinden çekilmiştir.

Şekil 6.16'daki RYEA-1'e ait SEM geri saçılan elektron görüntüsü incelendiğinde ana dentrit kollarının merkez kısımları kirli beyaz renkte, dış kabuk kısımları ise gri renkte bir kontrast vermektedir. Geri saçılan elektron görüntülerinde parlak/açık renkli görülen bölgeler genellikle atomik ağırlığı yüksek elementlerin bulunduğu bölgeleri işaret etmektedir (Nb ve W gibi). Farklı kontrasta sahip bölgelerdeki element dağılımlarını gösteren nokta EDS analiz sonuçları Tablo 6.4'te verilmiştir.

Nokta-1'den alınan EDS analiz sonucu ana dentrit merkezlerinin atomik olarak % 41,43 W ve % 18,67 Nb içerdiğini göstermektedir. Dolayısı ile ana dentritlerin Nb ve W'den oluştuğu söylenebilir. Dentritler arası bölgede ise optik incelemelerde sarı renk veren bölgeler SEM görüntülerinde koyu gri renkli kontrast (3 ve 4 nolu nokta) ile ortaya çıkmıştır. 3 nolu noktaya ait EDS analizinde Zr miktarının atomik yüzdesi % 59,69 olarak ölçülmüştür. Dolayısı ile optik mikroskopta sarı renk veren bölgelerin Zr'ca zengin Ti ve V içeren bir faz olduğu söylenebilir. 3 nolu noktada Nb tespit edilmemesi dikkat çekidir.



Şekil 6.16. NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait döküm sonrası SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x)

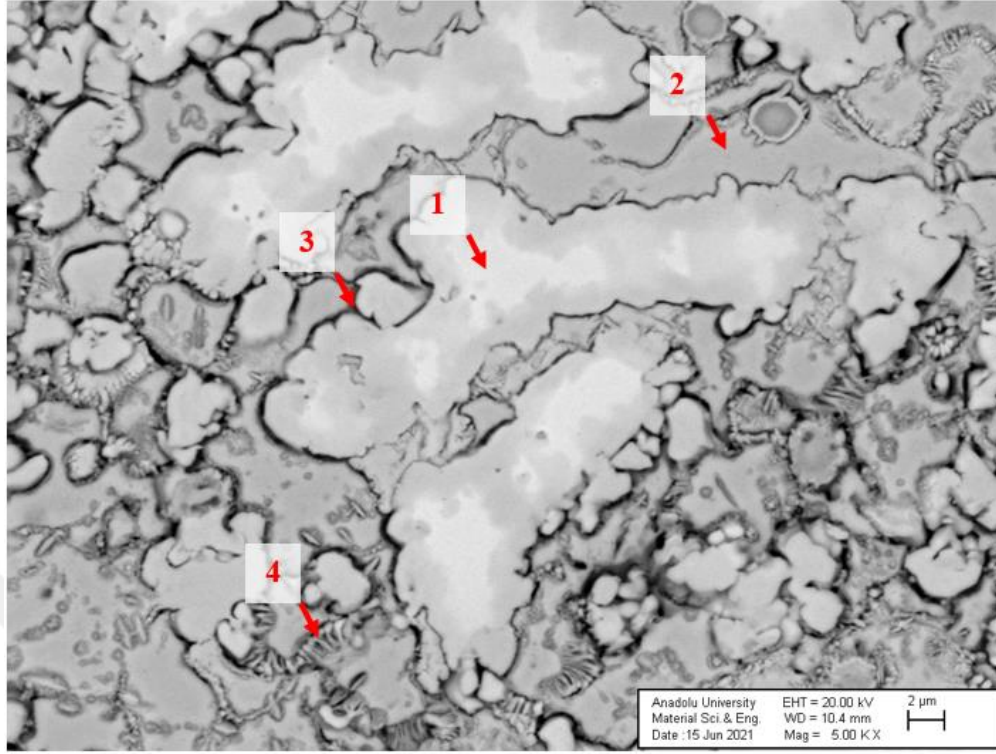
**Tablo 6.4.** NbTiWVZr (RYEA-1) alaşımına ait döküm sonrası EDS analiz sonuçları

| Numune | Analiz Noktası | Elementler, % at [% ağı] |         |         |         |         |        |
|--------|----------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|        |                | Nb                       | Ti      | W       | V       | Zr      | O      |
| RYEA-1 | 1              | 18,67                    | 10,59   | 41,43   | 14,01   | -       | 15,30  |
|        |                | [16,03]                  | [4,69]  | [70,42] | [6,60]  |         | [2,26] |
|        | 2              | 16,24                    | 25,69   | 7,45    | 50,62   | -       | -      |
|        |                | [22,56]                  | [18,40] | [20,49] | [38,55] |         |        |
|        | 3              | -                        | 24,42   | 4,51    | 11,37   | 59,69   | -      |
|        |                |                          | [14,58] | [10,33] | [7,22]  | [67,87] |        |
|        | 4              | 14,51                    | 19,31   | 3,67    | 13,01   | 22,46   |        |
|        |                | [22,13]                  | [15,18] | [11,06] | [10,88] | [33,63] |        |

Şekil 6.16’da görülen dentritler arası bölgede nispeten açık gri bir kontrast veren 2 nolu noktada ise V oranı atomik olarak % 50,62, Ti oranı ise atomik olarak % 25,69 olarak belirlenmiştir. 2 nolu bölgelerin optik mikroskopta saptanan siyah renkli kısımlar veya dentrit dış kabuk bölgeleri olduğu tahmin edilmektedir. 1 nolu noktada rastlanan oksijenin dağlama kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.17’deki KKA-1’e ait SEM geri saçılan elektron görüntüsü ve Tablo 6.5’teki EDS analizleri incelendiğinde RYEA-1’e benzer şekilde 1 nolu dentrit merkezinde ağırlıklı olarak W ve Nb ile birlikte Ti ve V bulunduğu anlaşılmıştır. Koyu gri renkli bölgelerden alınan 2 ve 4 nolu nokta EDS analizlerinde (optik mikroyapıda sarı renkli olarak görülen yapıların) Zr’ca zengin (atomik % ~31) Nb, Ti ve V ile az miktarda W’den oluştuğu görülmektedir. 3 nolu nokta ile dentritler arası siyah bölge üzerinden EDS analizi yapıldığında ise büyük oranda oksijen ile birlikte atomik olarak % 15-20 arası Nb, Ti, Zr ve V ile % 5,7 W içermektedir. Özellikle dentritleri birbirinden ayıran siyah sınırlarda (3 nolu nokta) EDS’de ölçülen yüksek oksijen miktarının dağlama kaynaklı olduğu söylenebilir.

RYEA-1 ve KKA-1 kompozisyon olarak birbirine yakın alaşımlar olduğundan SEM mikroyapıları da benzerdir. Ana dentritler çoğunlukla W ve Nb’dan oluşmaktadır. Dentrit kabuk bölgelerinde Nb yoğunlaşması gözükmemektedir. Genel olarak dentritler arası bölgede Ti, V ve Zr’un segregasyona uğradığı söylenebilir.

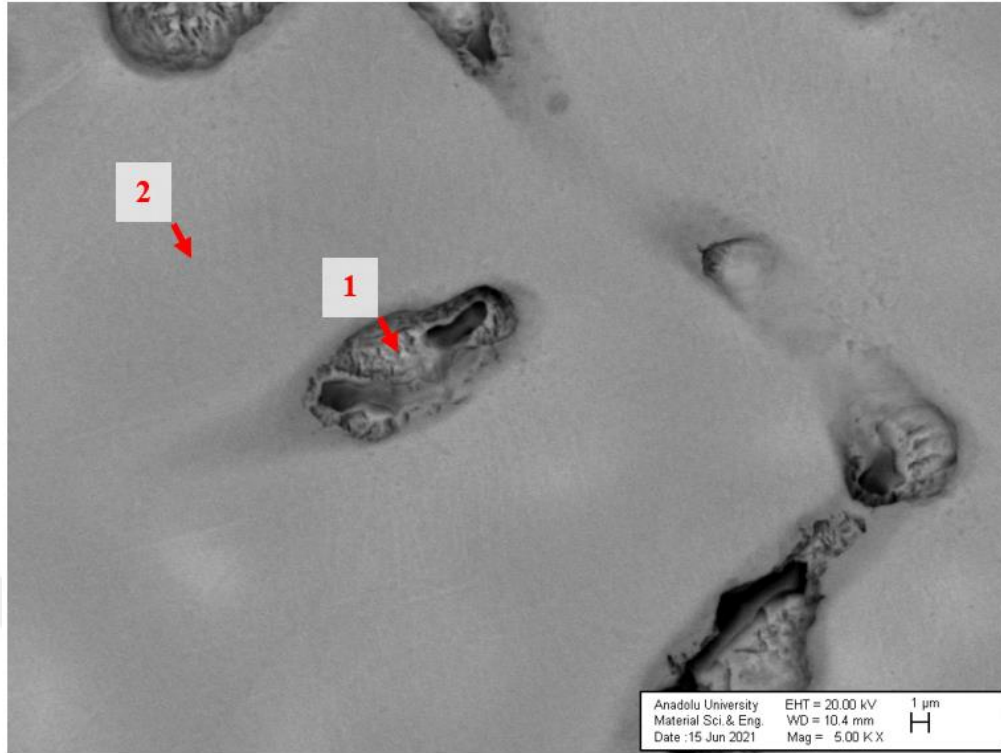


**Şekil 6.17.**  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  (KKA-1) alaşımına ait döküm sonrası SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x)

**Tablo 6.5.**  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  (KKA-1) alaşımına ait döküm sonrası EDS analiz sonuçları

| Numune | Analiz Noktası | Elementler, % at [% ağı] |         |         |         |         |        |
|--------|----------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|        |                | Nb                       | Ti      | W       | V       | Zr      | O      |
| KKA-1  | 1              | 26,43                    | 14,95   | 31,94   | 17,19   | -       | 9,48   |
|        |                | [24,38]                  | [7,11]  | [58,31] | [8,70]  | -       | [1,51] |
|        | 2              | 19,58                    | 22,80   | 5,14    | 15,66   | 30,34   | 6,47   |
|        |                | [24,18]                  | [14,51] | [12,57] | [10,60] | [36,78] | [1,37] |
|        | 3              | 16,57                    | 16,86   | 5,70    | 18,25   | 20,66   | 21,95  |
|        |                | [23,47]                  | [12,31] | [15,98] | [14,17] | [28,72] | [5,35] |
|        | 4              | 22,29                    | 22,72   | 4,14    | 23,02   | 31,83   | -      |
|        |                | [18,29]                  | [14,27] | [9,98]  | [15,38] | [38,08] | -      |

Şekil 6.18'deki RYEA-2'ye ait SEM geri saçılan elektron görüntüsü ve Tablo 6.6'daki EDS analizleri incelendiğinde Mo içeren RYEA-2 alaşımının RYEA-1 ve KKA-1'deki kadar kompleks bir element dağılımına sahip olmadığı anlaşılmıştır. 1 nolu EDS nokta analizinde Mo elementi saptanmamış olup atomik olarak % 37,62 V ile birlikte % 31,72 Ti, % 18,58 Nb ve % 12,08 W içerdiği tespit edilmiştir. 2 nolu nokta, matris fazını temsil etmekle birlikte yaklaşık eşmolar elementel dağılım içerdiği görülmüştür.



**Şekil 6.18.** MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait döküm sonrası optik mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x)

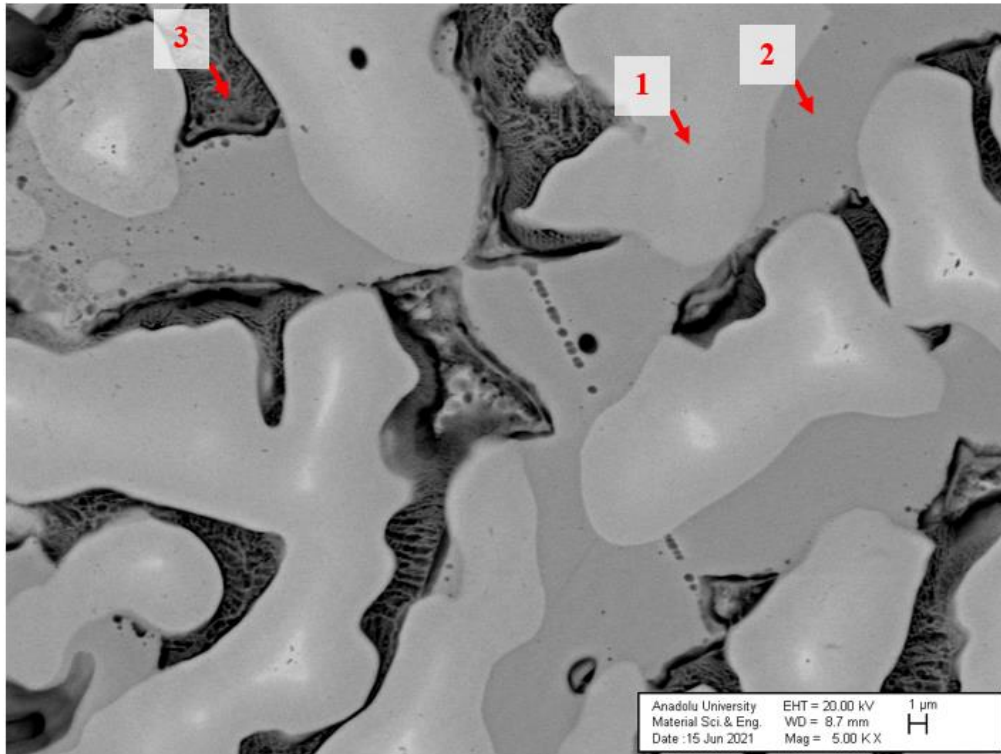
**Tablo 6.6.** MoNbTiWV (RYEA-2) alaşımına ait döküm sonrası EDS analiz sonuçları

| Numune | Analiz Noktası | Elementler, % at [% ağı] |         |         |         |         |   |
|--------|----------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---|
|        |                | Mo                       | Nb      | Ti      | W       | V       | O |
| RYEA-2 | 1              | -                        | 18,58   | 31,72   | 12,08   | 37,62   | - |
|        |                |                          | [23,38] | [20,58] | [30,08] | [25,96] |   |
|        | 2              | 22,79                    | 20,95   | 17,15   | 21,82   | 17,28   | - |
|        |                |                          | [22,20] | [19,77] | [8,34]  | [40,74] |   |

RYEA-2 alaşımının döküm halinde yüksek entropi tanımına uygun olacak şekilde iyi bir katı karışım oluşturabildiği görülmüştür. Numunede oksijene rastlanmamıştır. RYEA-2 alaşımının homojen bir elementel dağılıma sahip olmasının temel sebeplerinden biri Mo, W, Nb ve V gibi HMK kristal yapılı, benzer atomik yarıçapa sahip stabil elementlerden meydana gelmesidir. RYEA-1 ve KKA-1 alaşımlarında Zr ile birlikte Ti bulunması W ve Nb ana dentrit kollarından dışa itilerek dentritler arasında ikincil fazların oluşmasına neden olduğu açıktır.

#### 6.1.4.2. Isıl işlem sonrası SEM ve EDS sonuçları

Alaşımların mikroyapısını daha detaylı olarak incelemek için RYEA-1\_HT, KKA-1\_HT ve RYEA-2\_HT kodlu numunelerde 5000x büyütmede SEM mikroyapı görüntüleri çekilmiş ve nokta EDS analizleri yapılmıştır. Buna göre 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıl işlem uygulanan NbTiWVZr RYEA'ya ait SEM görüntüsü ve nokta EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 6.19 ve Tablo 6.7'de verilmiştir. Bu görüntüler buton numunelerin (kaba dentritlerin bulunduğu) merkez bölgelerinden çekilmiştir. Şekil 6.19 incelendiğinde üç farklı renkte yapı olduğu ve Şekil 6.8'de verilen optik mikroyapı görüntüsündeki beyaz renkli ana dentritlerin 1 nolu noktaya, sarı renkli fazın 2 nolu noktaya ve siyah renkli bölgelerin ise 3 nolu noktaya tekabül ettiği anlaşılmıştır. 1 nolu EDS analizinde Zr elementi dışında ana dentritlerin ısıl işlem sonrası homojenize olarak eşmolar yakını bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Öte yandan 2 nolu EDS analizi optik mikroyapı fotoğraflarında sarı renk veren yapının Zr'ca zengin bir faz olduğunu göstermektedir. Dallı bir görünüme sahip 3 nolu noktada ise Nb, Ti ve V'ca zengin bir fazın bulunma ihtimalinden söz edilebilir. SEM ve EDS analizleri sonucunda RYEA-1'de ısıl işlem sonrası üç farklı yapı oluştuğu anlaşılmıştır. 1 ve 2 nolu noktadan alınan analizlerdeki oksijenin ise dağlama kaynaklı olduğu söylenebilir.



Şekil 6.19. 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıl işlem uygulanmış NbTiWVZr (RYEA-1\_HT) alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x)

**Tablo 6.7.** 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem uygulanmış NbTiWVZr (RYEA-1\_HT) alaşımına ait EDS analiz sonuçları

| Numune    | Analiz Noktası | Elementler, % at [% ağı] |         |         |         |         |        |
|-----------|----------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|           |                | Nb                       | Ti      | W       | V       | Zr      | O      |
| RYEA-1_HT | 1              | 25,40                    | 17,89   | 23,32   | 24,61   | -       | 8,78   |
|           |                | [26,52]                  | [9,63]  | [48,19] | [14,09] | -       | [1,58] |
|           | 2              | -                        | 9,09    | 8,71    | 10,78   | 48,62   | 22,81  |
|           |                | -                        | [5,90]  | [21,67] | [7,44]  | [60,05] | [4,94] |
|           | 3              | 36,06                    | 36,98   | 4,64    | 22,33   | -       | -      |
|           |                | [47,11]                  | [24,91] | [11,99] | [15,99] | -       | -      |

1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem yapılan Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> KKA'ya ait optik ve SEM mikroyapısı ısıt işlemli NbTiWVZr RYEA'nın aynısı olduğundan SEM ve EDS analizleri burada ilave olarak verilmemiştir.

1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem yapılan MoNbTiWV RYEA'ya ait SEM görüntüsü ve nokta EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 6.20 ve Tablo 6.8'de verilmiştir.



**Şekil 6.20.** 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem uygulanmış MoNbTiWV (RYEA-2\_HT) alaşımına ait SEM mikroyapı görüntüsü (büyütme oranı: 5000x)

**Tablo 6.8.** 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanmış MoNbTiWVZr (RYEA-2\_HT) alaşımına ait EDS analiz sonuçları

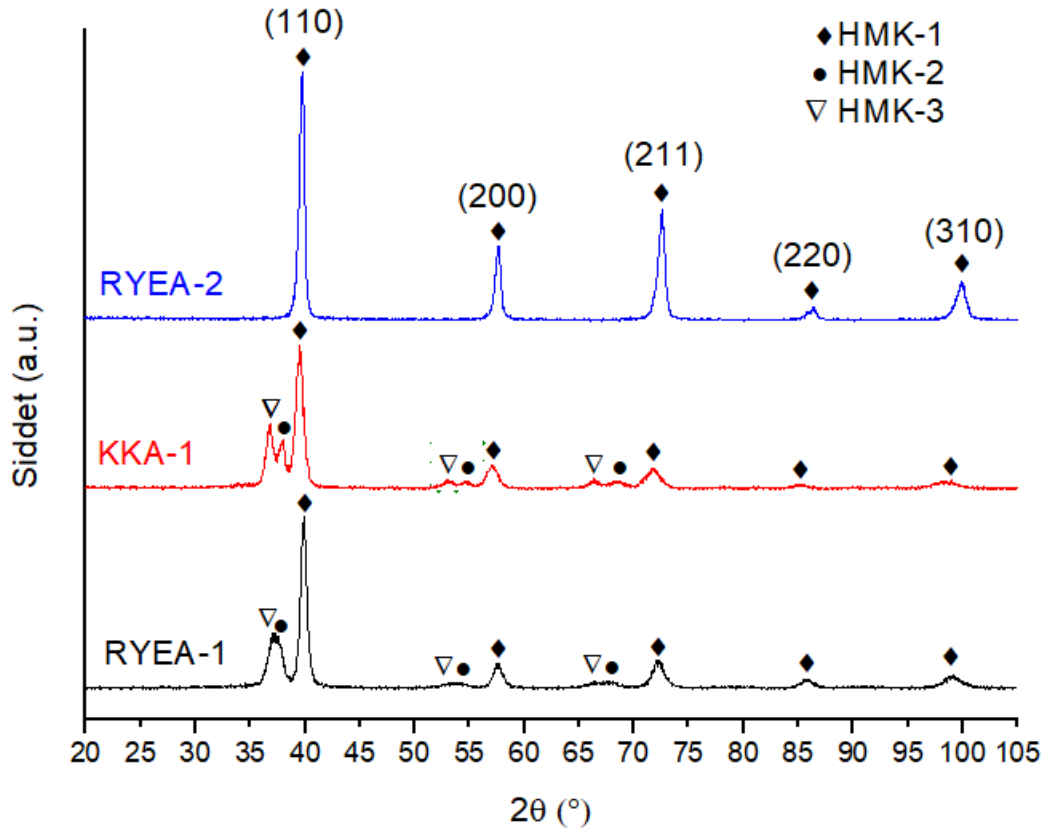
| Numune    | Analiz Noktası | Elementler, % at [% ağı] |         |         |         |         |   |
|-----------|----------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---|
|           |                | Mo                       | Nb      | Ti      | W       | V       | O |
| RYEA-2_HT | 1              | 19,34                    | 18,02   | 19,23   | 24,82   | 18,59   | - |
|           |                | [18,66]                  | [16,76] | [9,31]  | [45,68] | [9,59]  |   |
|           | 2              | 21,01                    | 23,45   | 21,28   | 11,40   | 22,86   | - |
|           |                | [23,78]                  | [25,71] | [12,03] | [24,74] | [13,74] |   |

Buna göre RYEA-2\_HT kodlu numunedeki 1 nolu noktada hemen hemen tüm elementlerin eşmolar oranda olduğu 2 nolu noktaya ise W'nin molarce yarıya düştüğü ve Nb-V oranının arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile döküm halinde bir miktar segregasyon barındıran RYEA-2'nin ısıtıl işlem sonrasında daha homojen bir mikroyapıya sahip olduğu söylenebilir.

#### 6.1.5. Faz analizleri

##### 6.1.5.1. Döküm sonrası oluşan fazlar

Üretilen RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelere ait XRD diyagramı Şekil 6.21'de verilmiştir. XRD piklerinin konumları Match programında belirlendikten sonra Denklem 5.5 kullanılarak endeksleme hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Buna göre üç alaşımda da ana yapının HMK kristal yapısında olduğu, major piklerin ise sırasıyla (110), (200), (211), (220) ve (310) miller indisli düzlemlere ait olduğu tespit edilmiştir. HSP faz oluşumunu tetikleyen (Ti, Zr) elementlerinin bulunduğu RYEA-1 ve KKA-1'de, HMK katı çözeltili fazının birden fazla farklı varyantının (HMK-2 ve HMK-3) olduğu da görülmüştür. Özellikle RYEA-2 kodlu alaşımda HMK pik şiddetlerinin diğer iki alaşıma göre daha yüksek olduğu da göze çarpmaktadır. Özetle döküm sonrası RYEA ve KKA alaşımlarda HMK fazlar dışındaki herhangi bir eşlenmemiş pik bulunmamaktadır.



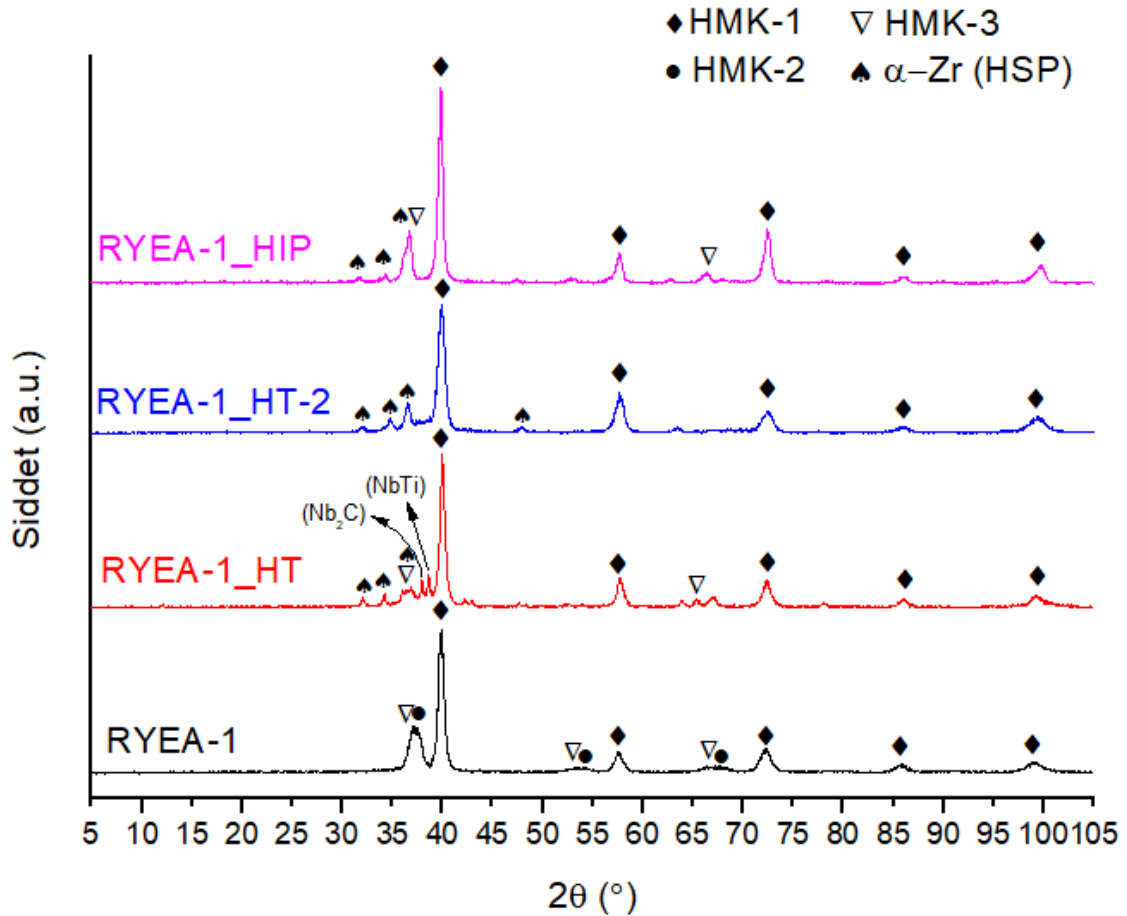
Şekil 6.21.  $NbTiWVZr$ ,  $Nb_{22.5}W_{10}Ti_{22.5}V_{22.5}Zr_{22.5}$  ve  $MoNbTiWV$  alaşımlarına ait döküm sonrası XRD grafikleri

Jia ve diğerleri, RYEA-1 ve KKA-1 alaşımına benzer olan  $NbTiVZr$  orta entropi alaşımını ark ergitme ile üretmiş, 1200°C sıcaklıkta 1 saat ısıl işlem, su verme ve 500°C sıcaklıkta 30 dakika yaşlandırma uygulamış olup XRD analizinde HMK kristal yapı piklerini elde etmiştir [78]. Senkov ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise bu tez çalışmasındaki kompozisyonlara benzeyen  $NbTiZrV$  ve  $MoNbTiZrV$  alaşımları ark ergitme ile üretilmiş ve HIP sonrası 1400°C sıcaklıkta 6 saat tavlama uygulanarak  $NbTiZrV$ 'da üç farklı HMK kristal yapısı (HMK-1, HMK-2, HMK-3),  $MoNbTiZrV$ 'da ise iki farklı HMK kristal yapısı (HMK-1, HMK-2) ve Laves fazı pikleri tespit edilmiştir [92]. Regenberg ve diğerleri ise bu tez çalışmasındaki  $MoNbTiWV$  alaşımını ark ergitme ile üretmişler ve döküm halde HMK Kristal yapı elde etmişlerdir [85]. Bu tez çalışmasında da döküm halinde alaşımlara yapılan XRD analizlerinde literatür çalışmaları ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

#### 6.1.5.2. İkincil işlemler sonrası oluşan fazlar

RYEA-1, RYEA-1\_HT, RYEA-1\_HT-2 ve RYEA-1\_HIP kodlu numunelere ait döküm ve ikincil işlemler sonrası elde edilen XRD diyagramı Şekil 6.22'de verilmiştir.

XRD pikleri incelendiğinde tüm ikincil işlemlerde ana yapıyı oluşturan HMK-1 piklerinin korunduğu görülmektedir. Isıl işlem ve HIP uygulanan NbTiWVZr eşmolar RYEA’larda, döküm sonrası yapıda bulunan HMK-2 fazı piklerine rastlanmamıştır. Ayrıca döküm sonrası uygulanan tüm ikincil işlemlerde zayıf pik şiddetlerinde Zr elementince zengin HSP yapıda  $\alpha$ -Zr fazı pikleri görülmüştür. Senkov ve arkadaşları da, NbTaZr alaşımına ait HIP sonrası XRD incelemelerinde minör ve zayıf piklere sahip HSP yapıdaki  $\alpha$ -Zr fazını saptadıklarını bildirmişlerdir [77]. HMK-3 fazına ait piklerin; 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılma işlemi uygulanan RYEA-1\_HT ve 1200°C sıcaklıkta 100 MPa basınç altında 4 saat HIP uygulanmış RYEA-1\_HIP kodlu numunelerde azalarak korunduğu, 1200°C sıcaklıkta 12 saat ısıtılma işlemi uygulanan RYEA-1\_HT-2 kodlu numunede ise kaybolduğu görülmüştür. RYEA-1\_HT kodlu numunenin XRD analizinde 37,9 ve 38,6° 2 $\theta$  açılarında saptanan minör piklerin ise Nb<sub>2</sub>C ve NbTi fazlarına ait olduğu tespit edilmiştir.

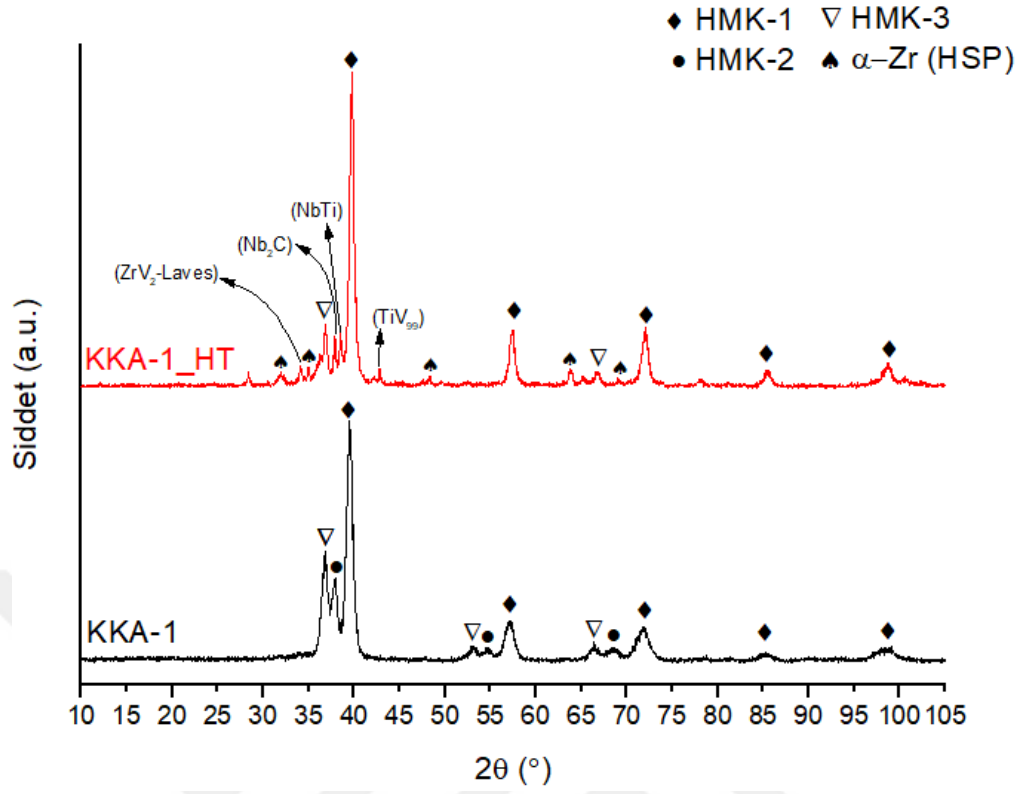


Şekil 6.22. NbTiWVZr alaşımının döküm ve ikincil işlem sonrası XRD grafikleri

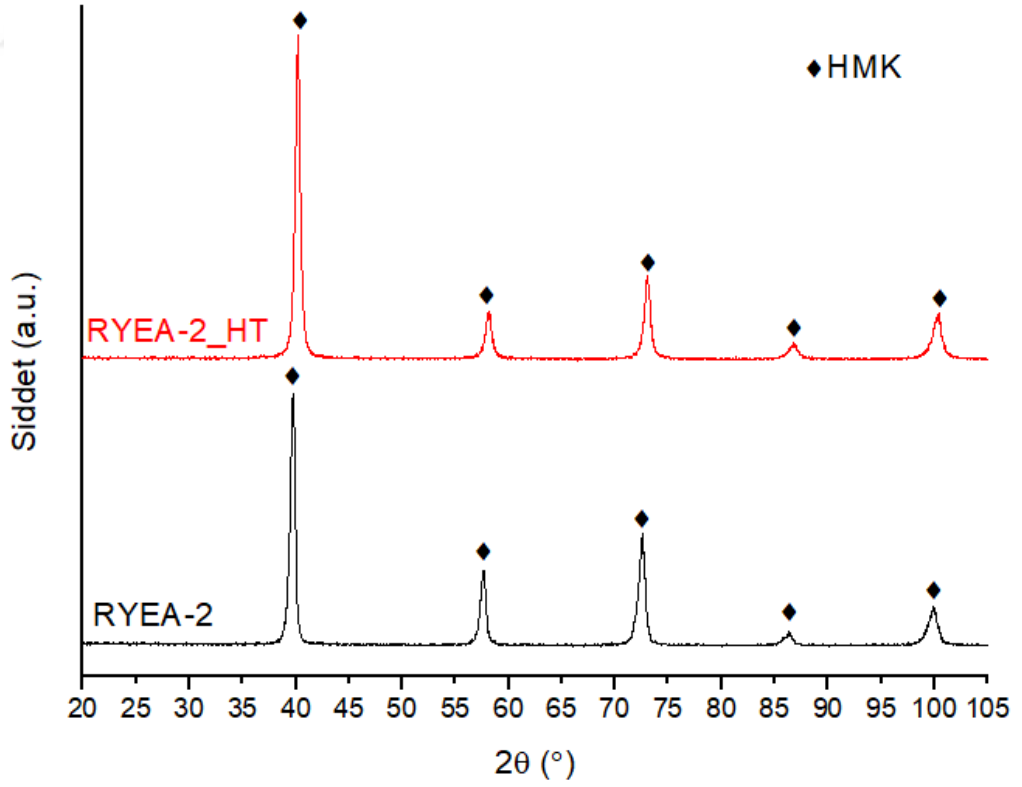
Literatürdeki çalışmalarda bu fazlara ait pikler ile ilgili bir herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Sadece Senkov ve ekibinin gerçekleştirdiği bir çalışmada MoNbTiZrV alaşımında Laves fazı piklerine rastlandığı raporlanmıştır [92]. Burada Nb<sub>2</sub>C pikinin muhtemel ham malzemeden gelebilecek safsızlıklardan kaynaklamış olabileceği düşünülmektedir. NbTi bileşiğinin ise Nb-Ti ikili sistemi incelendiğinde oluşma ihtimali bulunmaktadır. Chan ve arkadaşlarının yaptığı beta Ti-Nb alaşım nitrürleme çalışmasında da 38,7° 2θ açısında Nb<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> (110) en şiddetli pikini tespit etmişlerdir [93].

KKA-1 ve KKA-1\_HT kodlu numunelere ait döküm ve ikincil işlemler sonrası elde edilen XRD diyagramı Şekil 6.23'te verilmiştir. XRD pikleri incelendiğinde ısıtıl işlem sonrası ana yapıyı oluşturan HMK-1 piklerinin korunduğu görülmektedir. 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanan Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> KKA'da, döküm sonrası yapıda bulunan HMK-2 fazı piklerine rastlanmamıştır. Ayrıca ısıtıl işlem sonrası zayıf pik şiddetlerinde Zr elementince zengin HSP yapıda α-Zr fazı görülmüştür. HMK-3 fazının piklerinin ise ısıtıl işlem sonrasında şiddeti azalarak büyük kısmı korunmuştur. RYEA-1\_HT kodlu numuneye benzer şekilde XRD analizinde 37,8 ve 38,5° 2θ açılarında saptanan minör piklerin ise Nb<sub>2</sub>C ve NbTi fazlarına ait olduğu anlaşılmıştır. RYEA-1\_HT alaşımına ilave olarak KKA-1\_HT alaşımında 31,9° ve 42,1° açılarda sırasıyla ZrV<sub>2</sub> C15 Laves ve (TiV<sub>99</sub>)<sub>0,02</sub> bileşik fazlarının pikleri eşleştirilmiştir. Senkov'un yaptığı çalışmada da HIP ve ısıtıl işlemler sonrası MoNbTiZrV alaşımında Laves fazı piklerine rastlandığı raporlanmıştır [92]. Benzer şekilde King ve diğerleri de NbTiZrV sisteminde 1200°C sıcaklıkta 100 saat tavlama ile 700°C sıcaklıkta 100 saat yaşlandırma sonrası XRD analizlerinde α-Zr HSP ve ZrV<sub>2</sub> C15 Laves fazı pikleri tespit etmişlerdir. Arşatırmacılar döküm halde bu tez çalışmasına benzer şekilde sadece HMK piklerini elde etmişlerdir [94]. Burada W oranının azalmasına bağlı olarak KKA-1 alaşımında ısıtıl işlem sonrası kompleks fazların oluştuğu söylenebilir. Benzer şekilde Nb<sub>2</sub>C pikinin ise ısıtıl işlem esnasında ham maddelerden gelen kirlilik nedeni ile oluşabileceği tahmin edilmektedir.

RYEA-2 ve RYEA-2\_HT kodlu numunelere ait döküm ve ikincil işlemler sonrası elde edilen XRD diyagramı Şekil 6.24'de verilmiştir. Üretilen diğer numunelerin aksine 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanan MoNbTiWV KKA'da döküm sonrasına göre elde edilen XRD piklerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. XRD pikleri incelendiğinde ısıtıl işlem sonrası ana yapıyı oluşturan HMK piklerinin korunduğu görülmektedir.



Şekil 6.23.  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  alaşımının döküm ve ikincil işlem sonrası XRD grafikleri



Şekil 6.24.  $MoNbTiWV$  alaşımının döküm ve ikincil işlem sonrası XRD grafikleri

## 6.2. Mekanik incelemeler

### 6.2.1. Makrosertlik

Tez kapsamında üretilen numunelere ait ölçülen makrosertlikler Tablo 6.9’da verilmiştir. Makrosertlik sonuçlarına göre döküm ve ısıtıl işlem sonrası en yüksek makro sertlik değeri RYEA-1’de en düşük ise RYEA-2’de elde edilmiştir. 1400°C sıcaklıkta 24 saat boyunca yapılan ısıtıl işlem, numunelerin sertliğinde belirgin bir artış veya azalışa neden olmamıştır. KKA-1’de ısıtıl işlem sonrası makrosertlik ortalamasının döküm sonrasına göre yaklaşık 1 HRC düşüş göstermesinin ölçüm standart sapmasının yüksek olması nedeniyle olup ısıtıl işlem kaynaklı olmadığı düşünülmektedir. Makrosertlik sonuçlarına göre RYEA-1 ve KKA-1 alaşımlarının akma mukavemetinin RYEA-2 alaşımından daha yüksek olacağı söylenebilir.

Ayrıca RYEA-1’in farklı üretim tarihlerinde üretilmiş numunelerinde ölçülen makro sertlik değerleri ile Arşimet prensibi ile ölçülen ortalama yoğunluk değerleri Tablo 6.10’da verilmiştir. Bu tablo numunelerin barındırdığı mikroporozite miktarı azaldıkça numunelerin makro sertliğinin artış gösterdiğini göstermektedir, bu da açıkcası metal alaşımları için beklenen bir durumdur.

**Tablo 6.9.** *NbTiWVZr, Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarına ait döküm ve ikincil işlemler sonrası makrosertlik ölçüm sonuçları*

| Numune Kodu | Ölçüm 1<br>HRC | Ölçüm 2<br>HRC | Ölçüm 3<br>HRC | Ortalama<br>HRC | Std. Sap. |
|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|
| RYEA-1      | 56,98          | 57,57          | 57,95          | 57,50           | 0,399     |
| RYEA-1_HT   | 57,8           | 56,82          | 58,31          | 57,64           | 0,618     |
| KKA-1       | 52,85          | 52,83          | 53,51          | 53,06           | 0,316     |
| KKA-1_HT    | 50,45          | 51,37          | 54,89          | 52,24           | 1,913     |
| RYEA-2      | 52,26          | 51,2           | 51,85          | 51,77           | 0,436     |
| RYEA-2_HT   | 48,99          | 51,86          | 52,59          | 51,15           | 1,554     |

**Tablo 6.10.** *Farklı tarihlerde üretilen NbTiWVZ alaşımına ait makrosertlik ve yoğunluk ölçüm sonuçları*

| Numune Kodu | Ölçüm 1<br>HRC | Ölçüm 2<br>HRC | Ölçüm 3<br>HRC | Ortalama<br>HRC | Ortalama<br>Yoğ.<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Std. Sap. |
|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------------------------------|-----------|
| RYEA-1      | 56,98          | 57,57          | 57,95          | 57,5            | 8,827                                    | 0,399     |
| RYEA-1 (2)  | 54,56          | 56,73          | 55,88          | 55,72           | 8,627                                    | 0,893     |
| RYEA-1 (3)  | 53,45          | 53,08          | 53,35          | 53,29           | 8,539                                    | 0,156     |

## 6.2.2. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık mukavemetleri

### 6.2.2.1. Tez kapsamında üretilen numunelerin basma test sonuçları

Tez kapsamında üretilen RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelere ait döküm ve ısıtım işlemleri sonrası oda, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda uygulanan basma testleri sonucunda elde edilen ortalama akma dayanımı, maksimum dayanım (ing. peak stress) ve yüzde uzamalar Tablo 6.11’de verilmiştir. Tabloda verilen dayanım ve uzama değerleri en az iki farklı testin ortalamasını göstermektedir. Basma testleri kullanılan basma plakalarının maksimum gerilme değerine kadar devam ettirilmiştir. Dolayısı ile bazı sünek numunelerin ortalama yüzde uzamaları, son tespit edilen uzamadan daha fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 6.11 incelendiğinde ısıtım işlem uygulanmayan RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelerde oda sıcaklığında en yüksek ortalama akma dayanımı RYEA-1’de 1919 MPa, en düşük ise RYEA-2’de 1426 MPa olarak elde edilmiştir. W oranının molarce % 10 azaltıldığı KKA-1’de ise 1886 MPa ortalama akma dayanımı ölçülmüştür. Benzer şekilde oda sıcaklığında ısıtım işlem uygulanan numunelerde ise en yüksek ortalama akma dayanımı yine RYEA-1\_HT kodlu numunede 2171 MPa, en düşük ise RYEA-2\_HT kodlu numunede 1567 MPa olarak kaydedilmiştir. RYEA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelerde 1400°C sıcaklıkta 24 saat boyunca uygulanan ısıtım işlem sonrası oda sıcaklığı akma dayanımları artmışken KKA-1 kodlu numuneninki ise azalmıştır.

**Tablo 6.11.** Basma testi sonrası RYEA ve KKA numunelere ait ortalama akma dayanımı ile maksimum gerilme ve yüzde uzamalar

| Numune        | RYEA-1           |                    |           | KKA-1            |                    |           | RYEA-2           |                    |           |
|---------------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|-----------|
| Sıcaklık (°C) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) |
| Oda Sıc.      | 1919             | 2200               | 8,99      | 1886             | 2441               | 13,54     | 1426             | 1629               | 12,56     |
| 600           | 1096             | 3385               | >68,47    | 1062             | 3447               | >70,23    | 732              | 987                | 19,82     |
| 800           | 471              | 1131               | >62,25    | 286              | 2314               | >74,12    | 545              | 936                | 10,63     |

| Numune        | RYEA-1_HT        |                    |           | KKA-1_HT         |                    |           | RYEA-2_HT        |                    |           |
|---------------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|-----------|
| Sıcaklık (°C) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) |
| Oda Sıc.      | 2171             | 2383               | 11,49     | 1640             | 2042               | 15,87     | 1567             | 1857               | 16,05     |
| 600           | 1018             | 1479               | 26,88     | 1001             | 3375               | >71,78    | 787              | 1253               | 29,32     |
| 800           | 402              | 2564               | >77,04    | 647              | 788                | 13,62     | 685              | 1028               | 20,07     |

Ortalama yüzde uzamalara bakıldığında ise oda sıcaklığında KKA-1 kodlu numune, ısıtıl işlem sonrası ise KKKA-1\_HT ve RYEA-1\_HT kodlu numune en fazla sünekliğe sahiptir. Tüm numuneler oda sıcaklığında sınırlı bir şekil değişimi göstermiş ve yüzde uzamalar yaklaşık % 9-16 arasında değişmiştir. Oda sıcaklığında nispeten gevrek yapıda olduğu görülen alaşımların oda sıcaklığı maksimum pik dayanımlarının da akma dayanımlarından ancak bir miktar fazla olduğu (sınırlı şekil değişimi nedeniyle) görülmüştür.

600°C sıcaklıktaki ortalama akma dayanımları incelendiğinde RYEA-1 ve KKA-1 kodlu numuneler benzer dayanımlar sergilerken RYEA-2 kodlu alaşım ise 732 MPa değerinde nispeten düşük bir akma mukavemeti göstermiştir. Aynı durum ısıtıl işlem uygulanan numunelerde de benzer olup ısıtıl işlemin 600°C test sıcaklığında akma dayanımları oda sıcaklığına göre yaklaşık 600-1000 MPa aralığında daha düşük ölçülmüştür.

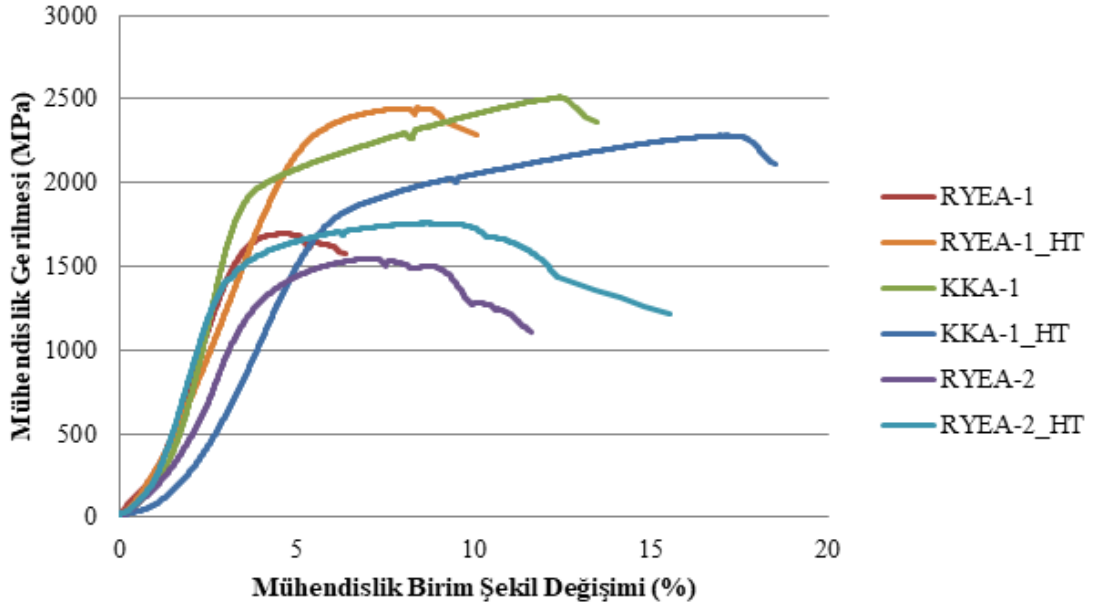
600°C sıcaklıktaki ortalama yüzde uzamalar incelendiğinde RYEA-1 ve KKA-1'in ısıtıl işlemsiz durumda iyi bir süneklik sergilediği anlaşılmaktadır. Fakat ısıtıl işlemsiz durumda iyi bir yüzde uzama (>68,47) gösteren RYEA-1 kodlu numune, ısıtıl işlem sonrası 600°C test sıcaklığında nispeten az (26,88) bir uzamaya sahip olmuştur. Ayrıca KKA-1 ise döküm ve ısıtıl işlem sonrası iyi bir süneklik gösterirken RYEA-2 kodlu alaşımın ise yüzde uzama değeri ısıtıl işlem sonrası %10 artmıştır.

Son olarak numunelerin 800°C sıcaklıktaki ortalama akma dayanımları incelendiğinde ısıtıl işlemsiz numunelerde en yüksek akma dayanımı RYEA-2 kodlu numunede 545 MPa, en düşük akma dayanımı ise KKA-1 kodlu numunede 286 MPa olarak elde edilmiştir. ısıtıl işlem sonrası 800°C basma testlerinde en yüksek ortalama akma dayanımı RYEA-2\_HT kodlu numunede 685 MPa, en düşük ortalama akma dayanımı ise RYEA-1\_HT kodlu numunede 402 MPa olarak saptanmıştır.

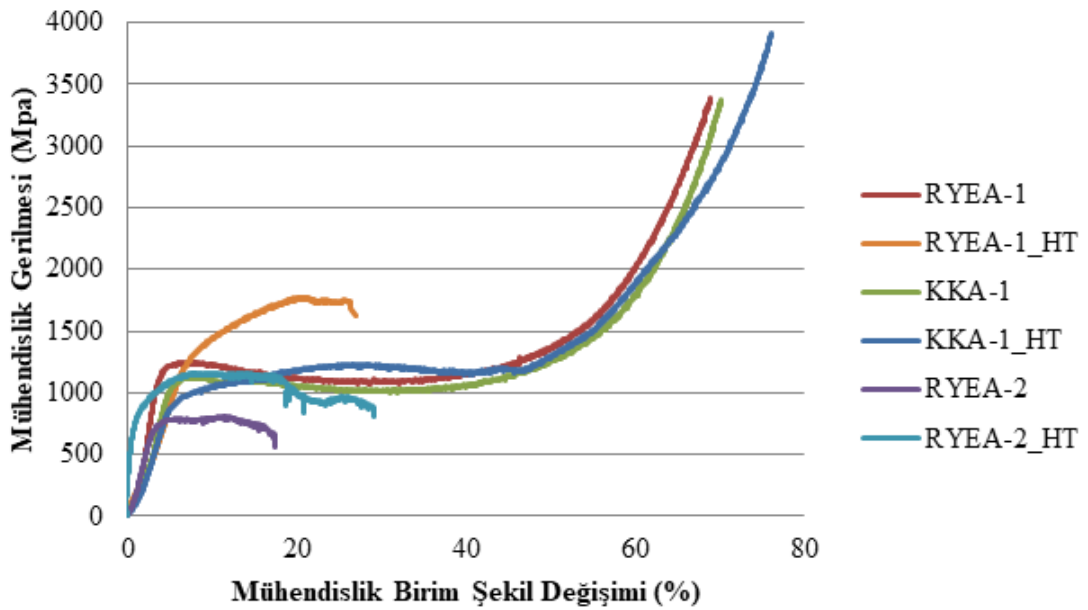
Isıtıl işlemsiz durumda 800°C test sıcaklığında, RYEA-1 ve KKA-1 kodlu numuneler yüksek süneklik sergilerken RYEA-2'de ise % 10,63'lük bir sınırlı uzama ölçülmüştür. 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem sonunda KKA-1 kodlu numunede muhtemelen XRD ile tespit edilen bazı ikincil kompleks faz oluşumu nedeniyle gevrekleşme meydana geldiği bu nedenle de yüzde uzamanın 13,62'ye düştüğü görülmüştür. Bunun bir sonucu olarak, KKA-1 kodlu alaşım ısıtıl işlemsiz duruma göre

neredeyse 2 kat daha yüksek (286 → 647 MPa) akma direncine sahip olmuştur. RYEA-2 kodlu alaşımın ise yüzde uzama değeri ısıtıl işlem sonrasında %10 artmıştır.

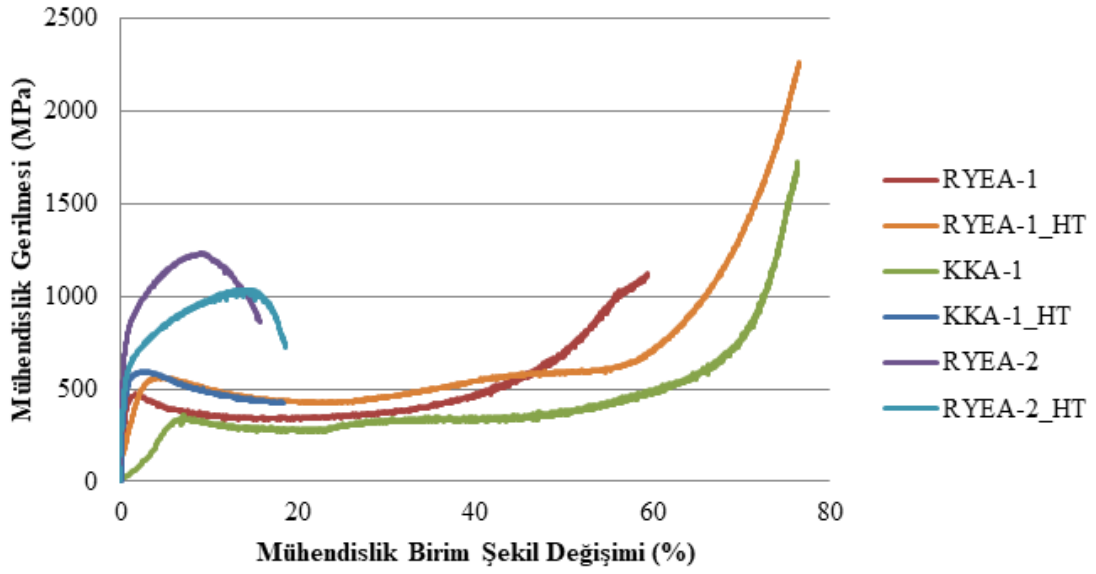
Oda sıcaklığı, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda numunelere uygulanan basma testlerinden sadece birer tanesine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 6.25, Şekil 6.26, Şekil 6.27’de verilmiştir.



Şekil 6.25. Oda sıcaklığında RYEA ve KKA numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri



Şekil 6.26. 600°C sıcaklıkta RYEA ve KKA numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

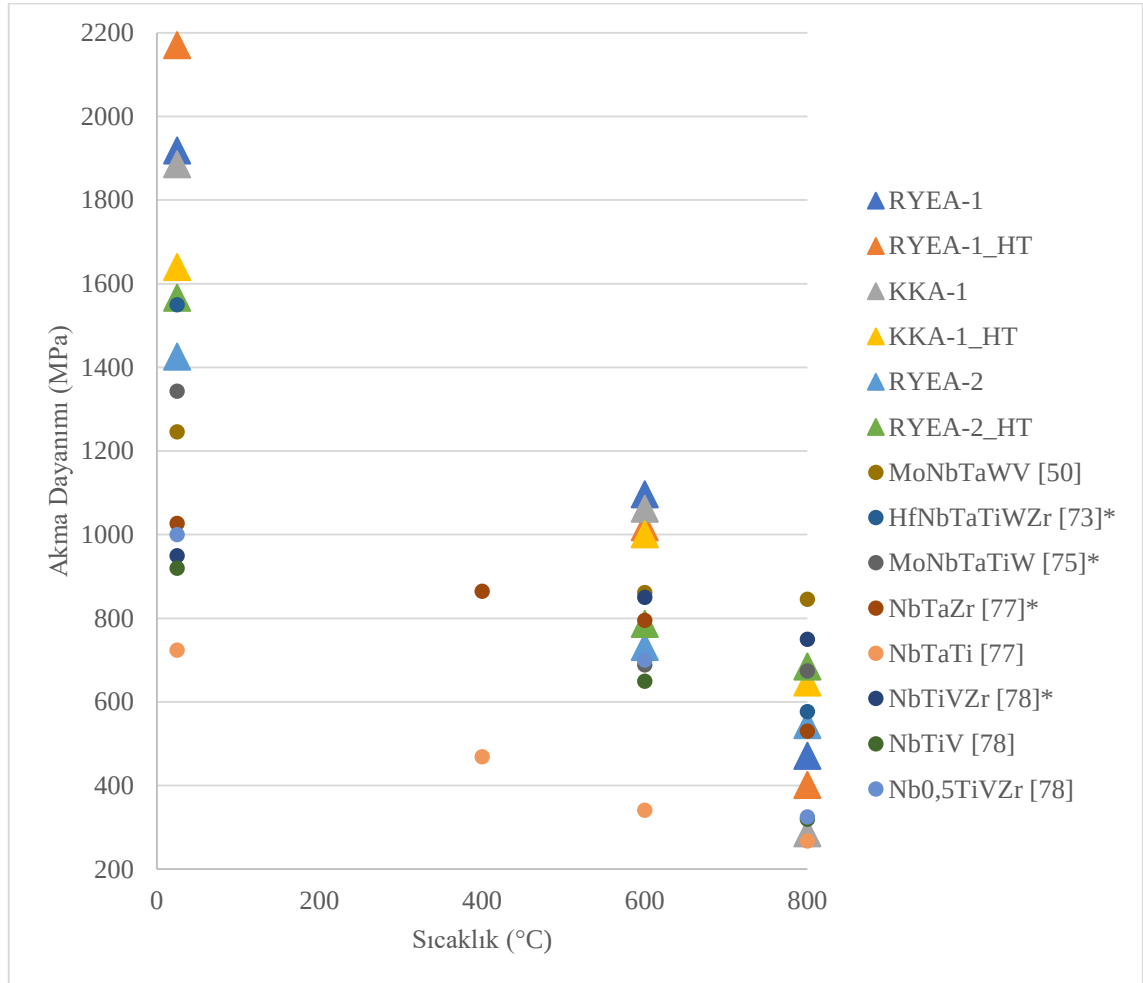


Şekil 6.27. 800°C sıcaklıkta RYEA ve KKA numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Grafikler incelendiğinde gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin tez kapsamında üretilen alaşımların hem test sıcaklığı hem de ısıl işlem faktöründen nasıl etkilendiğini görsel olarak daha iyi açıklamaktadır. Gevrek malzemelerin eğri altında kalan alanları küçük iken sünek karakterli alaşımlarda (örn. KKA-1 gibi) bu alanların daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Eğrilerin artan sıcaklıkla daha sünek bir karakter gösterdikleri de anlaşılmaktadır.

Bölüm 4'te verilen alaşım tasarım çalışmalarında 1000°C sıcaklıkta minimum akma mukavemeti 300 MPa, minimum yüzde uzama ise % 8 olarak hedeflenmiştir. Burada çekme cihazında kullanılan fırının atmosfere açık olması nedeniyle 1000°C sıcaklıkta test yapılamadığından hedeflenen değerlere ulaşip ulaşamayacağı noktasında ancak bir tahmin yürütülebilir. Burada 800°C sıcaklıkta RYEA-1, RYE-1\_HT ve KKA-1 kodlu alaşımların sırasıyla akma dayanımları 471, 286 ve 402 MPa olarak ölçüldüğünden bu alaşımların 1000°C akma dayanımlarının yeterli olamayacağı söylenebilir. Fakat RYEA-2, KKA-1\_HT ve RYEA-2\_HT kodlu alaşımların 800°C sıcaklıktaki akma dayanımları sırasıyla 545, 647 ve 687 MPa olarak ölçüldüğünden 1000°C testinde tezde hedeflenen minimum akma dayanımı kriterini karşılayacağı öngörülmektedir. Bu üç alaşımın 800°C sıcaklıktaki yüzde uzamaları ise % 10-20 aralığında ölçüldüğünden benzer bir öngörü 1000°C sıcaklıktaki yüzde uzama kriterinin sağlanması için de yapılabilir.

Bu tez çalışmasında üretilen alaşımların akma mukavemetlerinin EK-2 veritabanında yer alan benzer kompozisyona sahip alaşımlarla kıyaslaması ise Şekil 6.28’de verilmiştir [50, 73, 75, 77, 78]. Şekil 6.28’de karşılaştırma amacıyla verilen alaşımlarda (\*) işaretli olanlar Bölüm 4 alaşım tasarım çalışmalarında 1000°C sıcaklıktaki akma gerilmesi ve yüzde uzama kriterlerini sağlayanlardır. Tez kapsamında üretilen alaşımlar grafikte (▲) işareti ile belirtilmiştir.



**Şekil 6.28.** Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numunelerin benzer kompozisyona sahip bazı alaşımlar ile sıcaklığa bağlı akma mukavemeti kıyaslaması [50, 73, 75, 77, 78]

Burada çalışma kapsamında üretilen RYEA ve KKA’ların oda sıcaklığı akma mukavemetlerinin literatürde benzer kompozisyona sahip alaşımlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. 600°C sıcaklıkta ise RYEA-1 ve KKA-1 kodlu alaşımların akma dayanımı literatürdeki alaşımlara göre daha iyi durumdadır. 800°C sıcaklıkta ise MoNbTaWV, MoNbTaTiW ve NbTiVZr alaşımlarının tez numunelerine göre 200-300 MPa daha yüksek akma dayanımı sergilediği görülmektedir [50, 75, 78]. Öte yandan

800°C test sıcaklığında, KKA-1\_HT ve RYEA-2\_HT kodlu numuneler, HfNbTaTiWZr, NbTaZr, Nb<sub>0,5</sub>TiVZr, NbTiV ve NbTaTi alaşımlarına göre nispeten daha iyi akma dayanımına sahiptirler [73, 77, 78]. Bu bilgiler ışığında tez kapsamında üretilen alaşımların literatür çalışmalarına paralel özellikler gösterdiği söylenebilir. Literatür çalışmaları ayrıca tez alaşımlarında Mo ve Ta katkısı olmadan, 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda nikel süperalaşımlara göre yeterli mukavemetin elde edilemeyeceğini de işaret etmektedir.

#### 6.2.2.2. Nikel bazlı süperalaşım numunelerin basma test sonuçları

Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numunelerle karşılaştırma yapabilmek için Inconel 718, CM247LC ve CMSX-4 nikel bazlı süperalaşımlara ait oda sıcaklığı, 600°C ve 800°C’de uygulanan basma testleri sonucunda elde edilen akma dayanımı, maksimum dayanım (ing. peak stress) ve yüzde uzamalar Tablo 6.12’de verilmiştir.

**Tablo 6.12.** Basma testi sonrası nikel bazlı süperalaşım numunelere ait ortalama akma dayanımı ile maksimum gerilme ve yüzde uzamalar

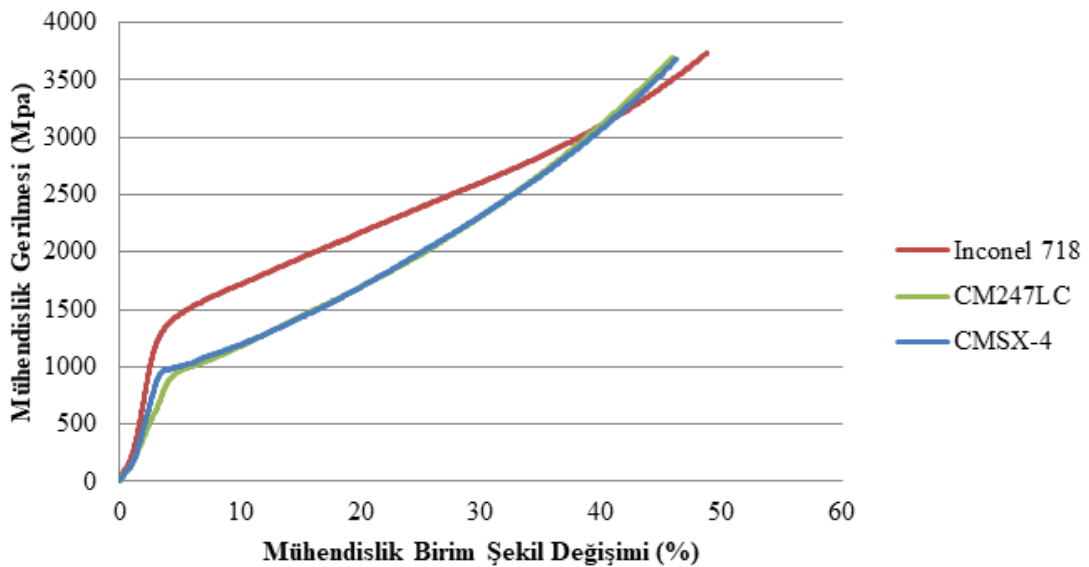
| Numune        | Inconel 718      |                    |           | CM247LC          |                    |           | CMSX-4           |                    |           |
|---------------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|-----------|
| Sıcaklık (°C) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) | Akma Daya. (MPa) | Maks Gerilme (MPa) | Uzama (%) |
| Oda Sıc.      | 1247             | 3730               | >49,17    | 892              | 3742               | >46,30    | 930              | 3764               | >46,29    |
| 600           | 1181             | 3523               | >53,57    | 911              | 3256               | >48,48    | 985              | 3729               | >54,61    |
| 800           | 642              | 2146               | >68,38    | 1064             | 2776               | >61,92    | 1098             | 2510               | >56,61    |

Tablo 6.12 incelendiğinde, her üç alaşımında bütün test sıcaklıklarında sünek özellik gösterdiği görülmektedir. Her üç alaşım kendi içerisinde karşılaştırıldığında oda sıcaklığında en yüksek ortalama akma dayanımı Inconel 718 alaşımında 1247 MPa, en düşük ise CM247LC alaşımında 892 MPa olarak kaydedilmiştir. 600°C sıcaklıkta ise en yüksek ortalama akma dayanımı Inconel 718 alaşımında 1181 MPa, en düşük ise CM247LC’de 911 MPa olarak ölçülmüştür. 800°C sıcaklıkta ise en yüksek ortalama akma dayanımı CMSX-4 alaşımında 1098 MPa, en düşük ise Inconel 718 alaşımında 642 MPa olarak ölçülmüştür. Normal olarak Inconel 718 alaşımının maksimum kullanım sıcaklığı üretici kataloglarında 649°C olarak belirtilse de gerçekte 800°C sıcaklıklara kadar statik parçalarda kullanılabilir [41]. Görüldüğü üzere artan sıcaklıkla aktifleşen çapraz kayma gibi yüksek sıcaklık mukavemetlenme mekanizmaları sayesinde

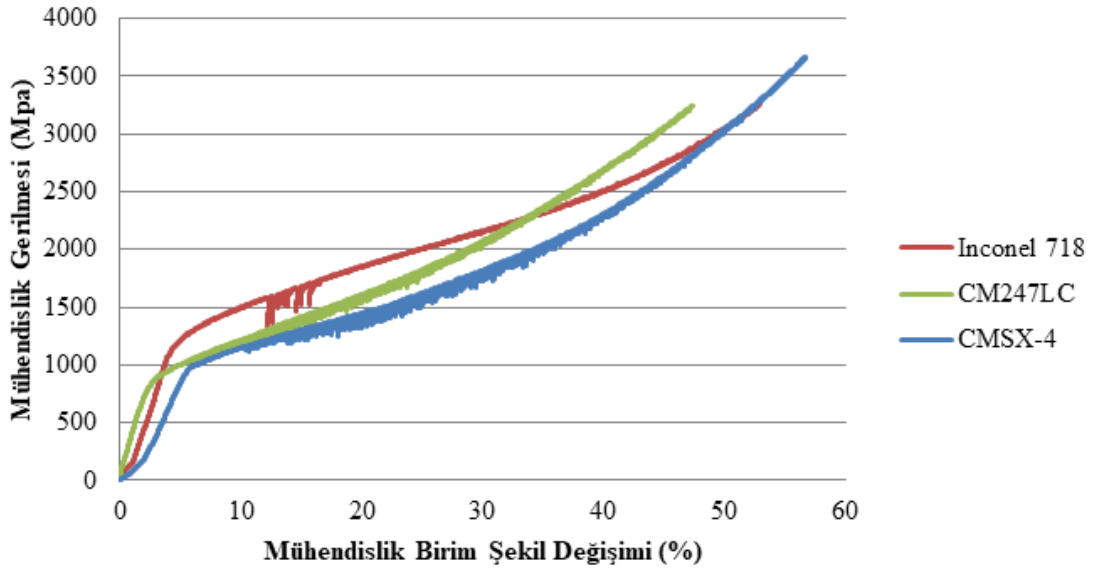
döküm kalite CM247LC ve CMSX-4 nikel süperalaşımlar 800°C ve üzeri sıcaklıklarda dahi yaklaşık 1000 MPa akma dayanımı sergileyebilmişlerdir [4].

Öte yandan Şekil 4.1’de verilen ve literatürden alınmış bazı nikel bazlı süperalaşımların çekme yönündeki akma dayanımları ile tez kapsamında yapılan basma testlerinde elde edilen ortalama akma dayanımları kıyaslandığında yaklaşık 200 MPa’a varan farklar görülebilmektedir. Örneğin Inconel 718 alaşımının 649°C sıcaklıkta çekme yönündeki akma dayanımı 965 MPa iken 600°C sıcaklıkta basma yönünde bu değer 1181 MPa’dır. Benzer kıyaslama CMSX-4 için yapıldığında aksin alaşımın 800°C sıcaklıktaki çekme yönündeki akma dayanımı 1093 MPa iken, 800°C sıcaklıkta basma testlerinde ortalama akma dayanımı 1098 MPa’dır. Burada tek kristal alaşımdaki basma ve çekme yönündeki akma dayanımlarında fark olmamasının sebebi ise alaşımın tane içermemesi olarak tahmin edilmektedir.

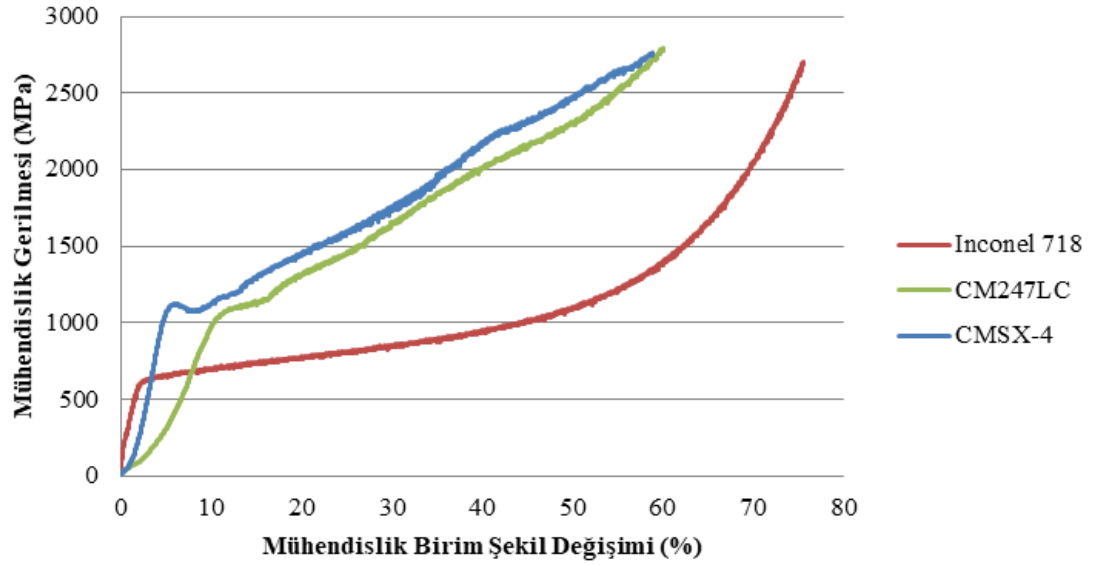
Oda sıcaklığı, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda nikel bazlı süperalaşım numunelere uygulanan testlerden sadece birer tanesine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 6.29, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’de verilmiştir. Eğriler incelendiğinde tipik sünek malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme davranışına sahip olduğu görülmektedir. 600°C ve 800°C sıcaklıkta eğrilerde meydana gelen gürültüler sabit deformasyon hızı sağlamak için cihazın gerilmeyi hassas kontrol etmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.29. Oda sıcaklığında nikel süperalaşım numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri



Şekil 6.30. 600°C sıcaklıkta nikel süperalaşım numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

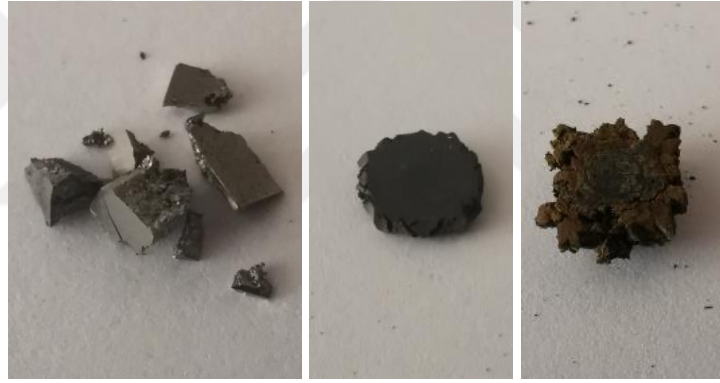


Şekil 6.31. 800°C sıcaklıkta nikel süperalaşım numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

#### 6.2.2.3. Basma testi sonrası numune incelemeleri

Basma testi sonrası deforme olan numunelere ait tüm görüntüler EK-3'te verilmiştir. EK-3 incelendiğinde sünek özellik gösteren numunelerin deforme olduğu ve ezilerek varilleştiği gözlenmiştir. Özellikle nikel bazlı süperalaşım numunelerde tüm test sıcaklıklarında sünek bir şekil değişimi olduğu anlaşılmaktadır. Tez kapsamında üretilen numunelerin sadece bir kısmının (RYEA-1, KKA-1 ve KKA-1\_HT) 600°C'de ve bir kısmının da (RYEA-1, KKA-1 ve RYEA-1\_HT) 800°C sıcaklıklarda sünek şekilde ezildiği görülmüştür. Ayrıca 800°C sıcaklıkta yapılan testlerde numunelerde oksidasyon

izlerine de rastlanmıştır. Görsel 6.1’de nispeten gevrek, sünek ve oksitlenme belirtisi saptanan numunelere ait basma testi sonrası örnek görüntüler verilmiştir. Gevrek kırılma sonrası numunelerin birden fazla parçaya ayrıldığı ve kırılma yüzeylerinde deformasyon olmadan klivaj tip kırılmanın meydana geldiği görülmektedir. Çalışmada üretilen tüm yüksek entropili alaşımlardaki kırılma oda sıcaklığında nispeten gevrek davranış sergilemiştir. 600°C sıcaklıkta HMK kristal yapıdaki kayma düzlemlerinin aktifleşmesi ile sünek alaşımlar pankek şeklinde ezilebilmiştir. Fakat burada ezilennumunelerde aşırı deformasyona bağlı varilleşme çatlakları da oluştuğu tespit edilmiştir. 800°C sıcaklıkta ise alaşımlarda oksitlenmeler başlamıştır. Bu yüzden tez imkanları dahilinde yüksek sıcaklık basma testleri maksimum sıcaklığı 800°C’de sınırlandırılmıştır. 800°C basma testlerinde oksidasyondan en çok etkilenen numune RYEA-2 alaşımı olmuştur ve bu çıkarım test sonrası Görsel 6.1’de de görüldüğü üzere numune üzerindeki ufalanabilen renkli yapıların varlığı ile yapılabilmektedir.

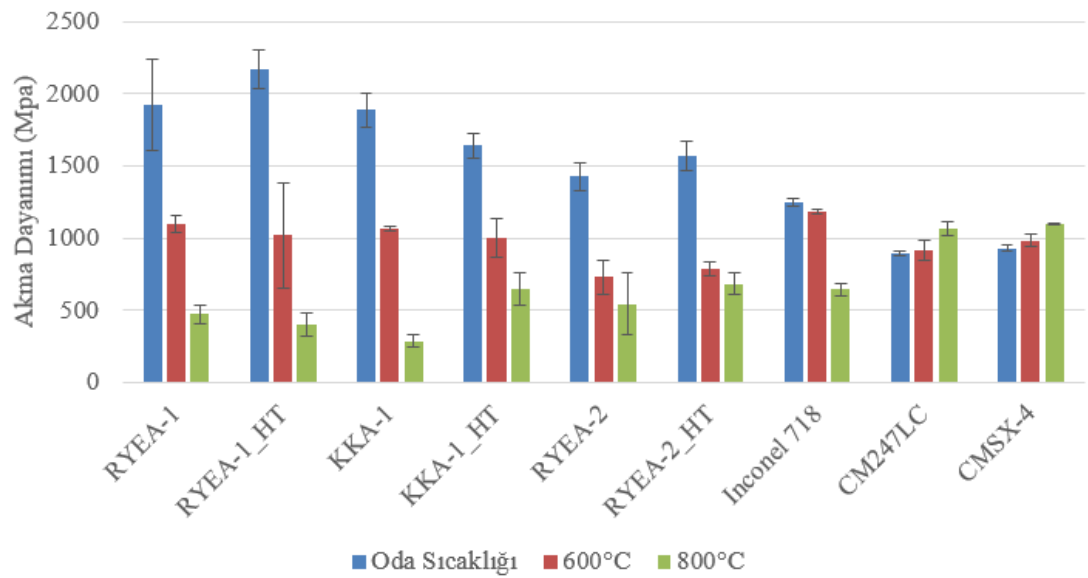


**Görsel 6.1.** Basma testi sonrası numune görüntüleri: RYEA-1 oda sıcaklığı testi sonrası (solda), RYEA-1 600°C testi sonrası (ortada), RYEA-2 800°C testi sonrası (sağda)

#### **6.2.2.4. Basma test sonuçlarının kıyaslamaları**

Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numunelerin oda, 600°C ve 800°C sıcaklıklardaki ortalama akma dayanımlarının nikel bazlı süperalaşımlar ile kıyaslaması, standart sapmalar ile birlikte Şekil 6.32’de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere oda sıcaklığında tüm RYEA ve KKA numunelerin ortalama akma dayanımı nikel bazlı süperalaşımlara göre daha yüksektir. Burada refrakter metal içeren alaşımların HMK kristal yapıya sahip olması, deformasyonu oda sıcaklığında zorlaştırmaktadır. Nikel bazlı süperalaşımlar ise YMK kristal yapıya sahip olduğundan aktif kayma düzlemi sayısı çok daha fazla olduğundan oda sıcaklığında nispeten kolayca şekil alabilmektedir. 600°C sıcaklıktaki ortalama akma dayanımları kıyaslandığında ise Inconel 718 alaşımı tüm

RYEA ve KKA'lardan daha yüksek dayanıma (1180 MPa) sahiptir. 600°C sıcaklıkta RYEA-1, RYEA-1\_HT, KKA-1 ve KKA-1 kodlu numunelerde ortalama akma dayanımı 1000-1100 MPa arasında ölçülmüş olup bu dayanım değeri CM247LC ve CMSX-4'e göre 100-200 MPa daha iyidir. RYEA-2 ve RYEA-2\_HT kodlu alaşımlar ise ~750 MPa akma dayanımına sahip olup 600°C'de CM247LC ve CMSX-4 alaşımlarına göre ~200 Mpa daha az gerilmeye dayanabilecekleri söylenebilir. 800°C sıcaklıkta ise tez kapsamında üretilen alaşımların büyük kısmı özellikle CM247LC ve CMSX-4'e göre daha düşük akma direnci göstermiştir. 800°C sıcaklıkta KKA-1\_HT ve Inconel 718 benzer akma dayanımı (640-650 MPa) göstermiş olup RYEA-2\_HT kodlu numunenin akma dayanımı ise Inconel 718'e göre nispeten daha iyi olmuştur. Burada RYEA ve KKA numunelerin HMK kristal yapıda olmaları nedeniyle sıcaklık artışı nedeniyle mukavemet düşüşleri YMK yapıli nikel süperalaşımlara göre nispeten daha hızlıdır.

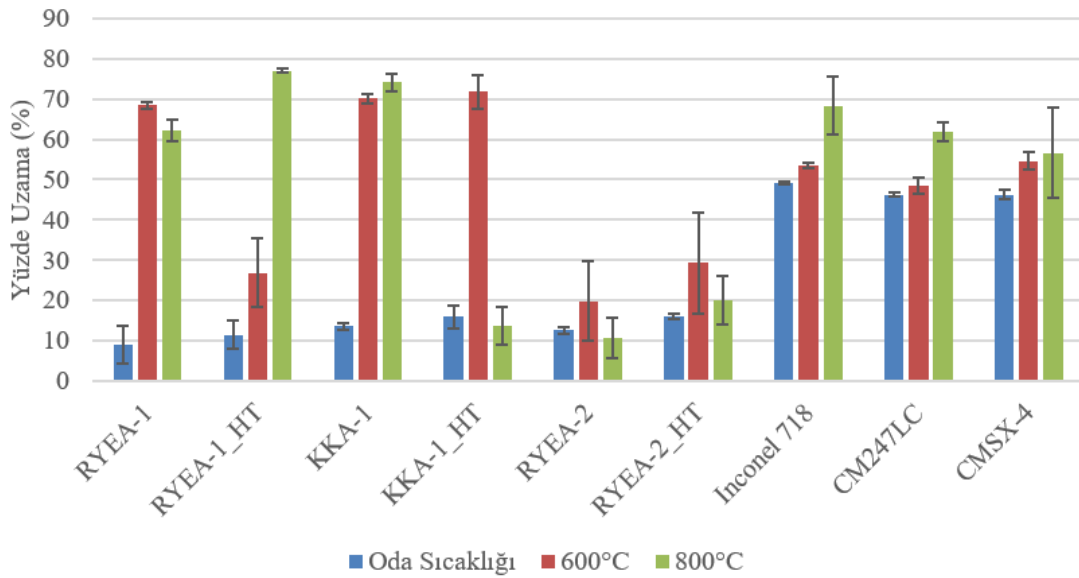


**Şekil 6.32.** Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numuneler ile nikel süperalaşımların oda, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda ortalama basma akma dayanımlarının kıyaslaması

Tez kapsamında üretilen RYEA ve KKA numunelerin oda sıcaklığı ve 600°C sıcaklıktaki ortalama yüzde uzamalarının standart sapmaları ile birlikte Nikel bazlı süperalaşımlar ile kıyaslaması Şekil 6.33'de verilmiştir. Burada oda sıcaklığında tüm RYEA ve KKA numunelerin nikel bazlı süperalaşımlara göre ortalama olarak yaklaşık % 13 civarında sınırlı süneklik gösterdiği anlaşılmaktadır. 600°C sıcaklıkta RYEA-1, KKA-1 ve KKA-1\_HT kodlu alaşımlar ise nikel bazlı süperalaşımlara benzer şekilde iyi bir süneklik göstermiştir. 800°C sıcaklıkta ise RYEA-1, RYEA-1\_HT ve KKA-1 kodlu

alaşımlar ise nikel bazlı süperalaşımlara benzer şekilde test cihazının maksimum gerilme sınırına kadar iyi bir süneklik göstermiştir.

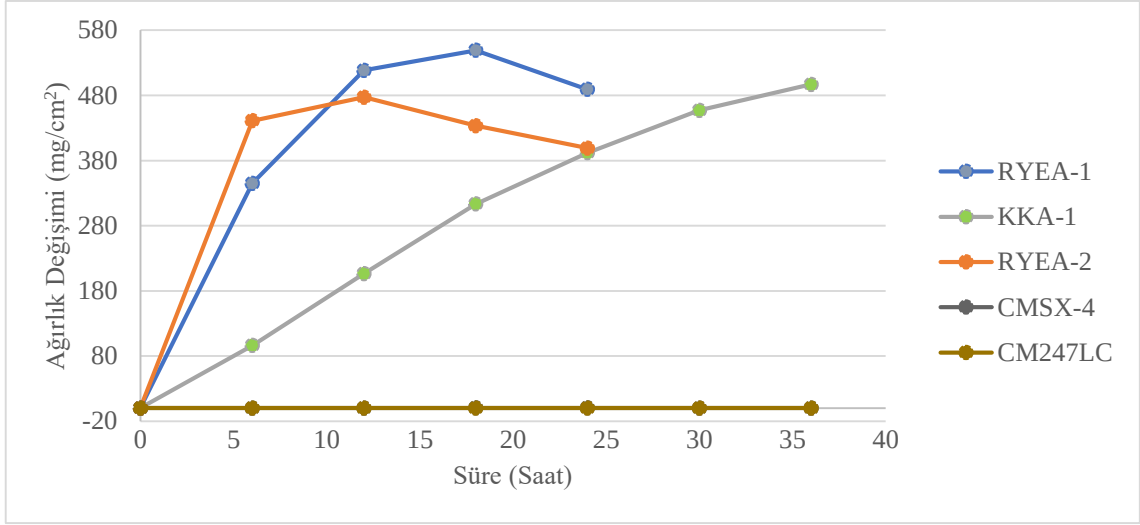
Tüm bu bilgiler ışığında 600°C sıcaklığa kadar iyi bir süneklik ve mukavemet sergileyen RYEA-1, RYEA-1\_HT, KKA-1 ve KKA-1\_HT kodlu alaşımların nikel süperalaşımların yerine kullanılabileceği görülmektedir. 800°C sıcaklıkta ise bu dört numunenin oksidasyon tedbirlerinin alınması kaydı ile Inconel 718 alaşımının yerine kullanılması mümkündür. Fakat bu alaşımların oda sıcaklığındaki sünekliklerinin de bir miktar daha iyileştirilmesi gerektiği düşünülmektedir. 800°C ve üzerinde bu tez çalışmasında üretilen alaşımların CM247LC ve CMSX-4 nikel süperalaşımlarının yerine kullanılması mümkün değildir.



**Şekil 6.33.** Tez kapsamında üretilen numuneler ile nikel süperalaşımların oda sıcaklığı ve 600°C’de ortalama yüzde uzamalarının kıyaslaması

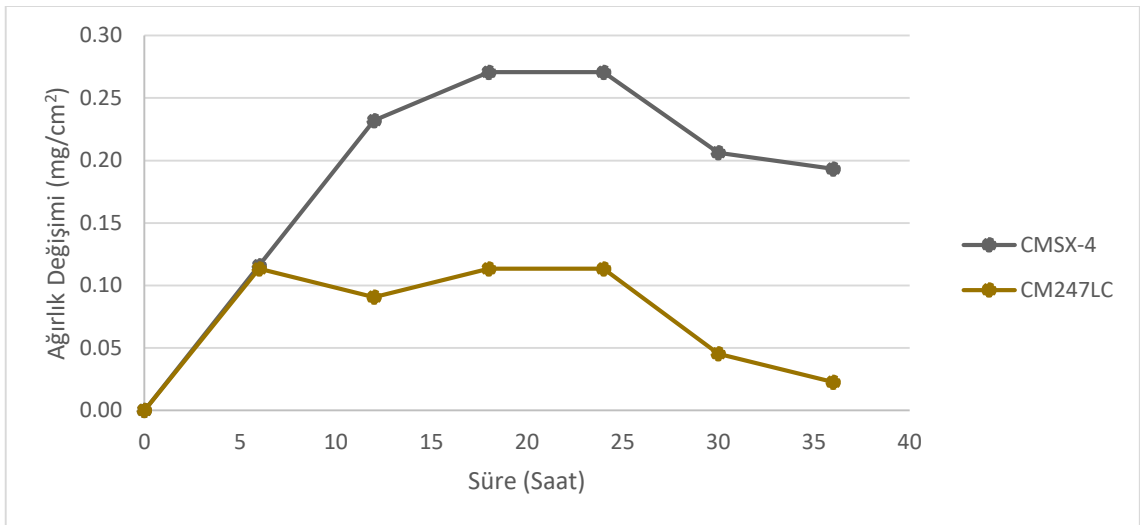
### 6.3. Oksidasyon Davranışı İncelemeleri

Oksidasyon testleri gerçekleştirilen numunelerdeki 800°C sıcaklıklarda 6 saatlik çevrimlere bağlı olarak spesifik ağırlık değişimi Şekil 6.34’te verilmiştir.



**Şekil 6.34.** 800°C sıcaklıkta 6 saatlik çevrimler ile gerçekleştirilen oksidasyon testlerinde tüm numunelerdeki spesifik ağırlık değişim sonuçları

Şekil 6.34 incelendiğinde en yüksek oksitlenme direncini KKA-1 kodlu numune gösterirken en düşük direncini ise hızlıca oksitlenen RYEA-1 sergilemiştir. Karşılaştırma amacıyla aynı koşullar altında oksidasyon testine tabi tutulan CM247LC ve CMSX-4 nikel bazlı süperalaşımların ise bu çalışmada üretilen alaşımlara göre çok daha iyi oksidasyon direncine sahip olduğu görülmektedir. Toplam 36 saatlik oksidasyon testleri sonunda RYEA ve KKA'ların tümü tamamen oksitlenmiş olup nikel bazlı süperalaşımlarda herhangi bir kayda değer spesifik ağırlık değişimi ise gözlenmemiştir. Şekil 6.35'de sadece nikel bazlı süperalaşımlara ait spesifik ağırlık değişimleri yer almaktadır.



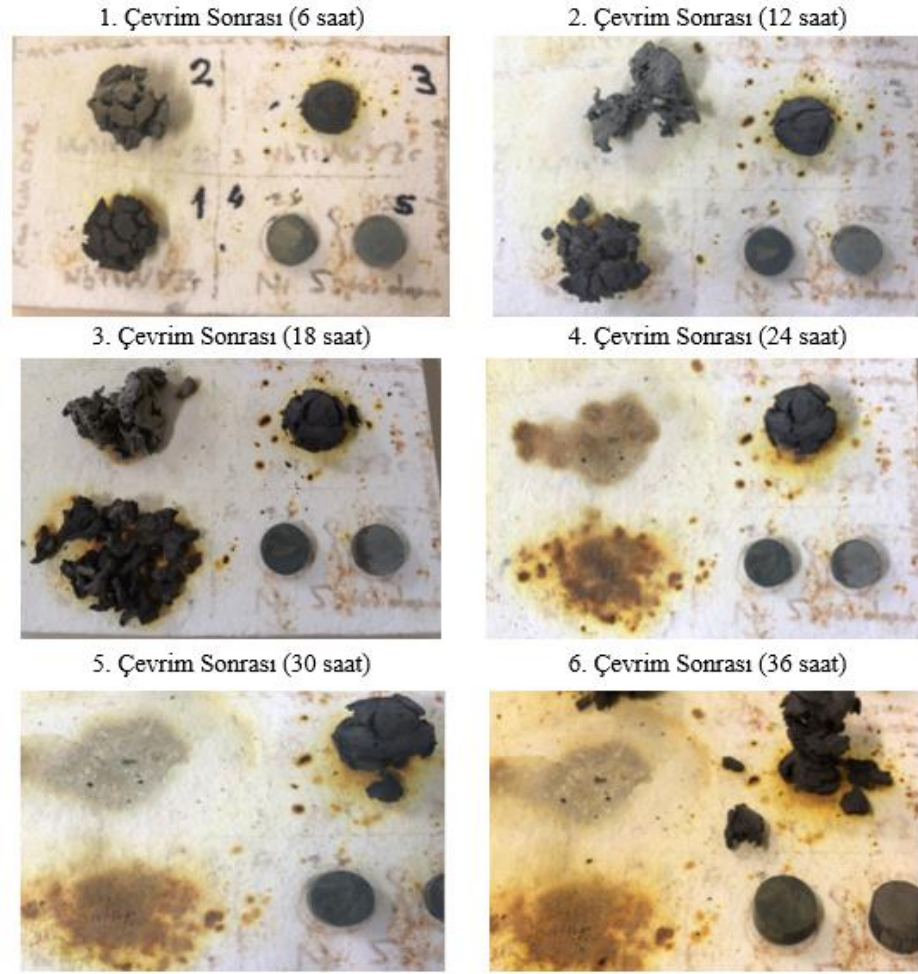
**Şekil 6.35.** 800°C sıcaklıkta 6 saatlik çevrimler ile gerçekleştirilen oksidasyon testlerinde nikel bazlı süperalaşım numunelerdeki spesifik ağırlık değişim sonuçları

Nikel bazlı süperalaşımların oksidasyon direncinin içerdiği Al, Cr ve Ni elementleri sayesinde refrakter element içeren yüksek entropi alaşımlara göre daha yüksek olduğu açıktır. CM247LC alaşımının oksitlenme hızı CMSX-4'e göre nispeten daha düşüktür. 4. çevrim sonrası numune yüzeylerinde oluşan oksitlerin döküldüğü ve bu nedenle spesifik ağırlık değişiminin negatife döndüğü anlaşılmaktadır. 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyon testinde fırına girmeden önce numunelerin görüntüsü Görsel 6.2'de verilmiştir. Kaplamalı numuneler alümina alttaşın üst yarısında bulunmakta ve renkleri mat olarak gözükmemektedir.



**Görsel 6.2.** 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyon testi öncesi numunelerin görüntüsü

Her oksidasyon çevrimi sonrası numunelerin görünüşleri ise Görsel 6.3'te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 6 saatlik ilk çevrim sonunda 1 ve 2 no ile gösterilen kaplamasız RYEA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelerin hızlıca oksitlenerek kabardığı görülmektedir. 12 saatlik 2. çevrim sonunda RYEA-1 ve RYEA-2 kodlu numunelerin daha da oksitlendiği anlaşılmıştır. Ayrıca 2. çevrim sonunda KKA-1 kodlu numune de oksitlenmelerin belirginleştiği anlaşılmaktadır. 18 saatlik 3. çevrim sonunda ise KKA-1 kodlu numune ile nikel süperalaşımların dışındaki numunelerin tamamen oksitlendiği anlaşılmıştır. Bu nedenle diğer çevrime geçmeden önce tamamen oksitlenen RYEA-1 ve RYEA-2 kodlu numuneler alümina alttaşdan alınmıştır. 24 saatlik 4. çevrim ve 30 saatlik 5. çevrimler sonunda ise KKA-1 kodlu numune de oksitlenmenin giderek arttığı saptanmıştır. Nihayet 36 saatlik 6. çevrim sonucunda KKA-1 kodlu numunenin de tamamen oksitlendiği görülmüş ve bu oksidasyon testi tamamlanmıştır.



**Görsel 6.3.** 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyon testlerinde her çevrim sonrası numune görüntüleri

Görsel 6.3'ten de anlaşılacağı üzere nikel bazlı süperalaşım numunelerde 800°C sıcaklıkta yapılan oksidasyon testinde 36 saatlik çevrim sonunda gözle görünür herhangi bir oksitlenme olmamıştır, sadece yüksek sıcaklık maruziyetine bağlı olarak renk değişimi gözlenmiştir.

## 7. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında havacılık motorlarında yüksek sıcaklık türbin parçalarının imalatında kullanılabilecek refrakter yüksek entropili alaşım ve kompleks konsantre alaşımlar tasarlanmış, üretilmiş ve karakterize edilmiştir.

Bu kapsamda öncelikle detaylı bir literatür taraması yapılarak yüksek sıcaklık mekanik özellikleri raporlanan refrakter metal yüksek entropili alaşım çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen kimyasal kompozisyon, imalat yöntemi, kristal yapı, sertlik, akma ve çekme dayanımı, yüzde uzama bilgileri bir veritabanında toplanmıştır. Bu veritabanı havacılık motor malzemelerinden beklenen gereklilikler doğrultusunda bir filtreden geçilmiş ve oda sıcaklığında minimum % 8 uzama, 1000°C sıcaklıkta ise minimum 300 MPa akma dayanımı sağlayan alaşım kompozisyonları belirlenmiştir. Daha sonra bu kompozisyonlarda kullanılan elementler ve sıklıkları belirlenerek, element birim maliyetleri ve literatür tavsiyeleri doğrultusunda tasarım yapılacak altı adet element (Mo, Nb, W, Ti, V, Zr) seçilmiştir. Bu altı adet elementten oluşan MoNbTiWVZr alaşım ile bu alaşımın element eksiltme yöntemi ile elde edilen beşli kombinasyonlarında empirik ve termodinamik hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre bu alaşımlar arasında kompleks faz içermeyen ve tek fazlı katı çözelti için empirik kriterleri sağlayan NbTiWVZr ve MoNbTiWV RYEA'ların deneysel olarak çalışılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmanın yanı sıra NbTiWVZr alaşımında her bir elementin molar oranı % 10, % 20, % 30, % 40, % 50 olarak değiştirilmiş ve 25 farklı kompozisyon için empirik ve termodinamik hesaplamalar da yapılmış ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımının da deneysel üretimine karar verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda numune üretimleri saf elementel tozlar 5 gramlık karışımlar halinde preslenerek pelet haline getirilmiş ve vakum ark ergitme ile en az 5 tekrar ile çevrilerek ergitilmiştir. Isıl işlem etkisini anlamak için numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Ayrıca NbTiWVZr alaşımına HIP işleminin etkisi araştırılmıştır. İlave olarak numunelere normalde nikel bazlı süperalaşımlarda kullanılan kimyasal buhar emdirme ile Al difüzyon kaplama denemesi de yapılmıştır. Numunelerin kimyasal kompozisyonları, makrosertlikleri, yoğunlukları ölçülmüş, mikroyapılarına optik mikroskop ve SEM ile bakılmıştır. Dentritik segregasyonlar EDS analizleri ile belirlenmiştir. Numunelerin döküm ve ısıl işlem sonrası XRD ile faz analizleri

yapılmıştır. Numunelere oda sıcaklığı, 600°C ve 800°C sıcaklıkta basma testleri uygulanmış ve son olarak 800°C sıcaklıkta oksidasyon testleri gerçekleştirilmiştir.

Kimyasal kompozisyon incelemelerinde ilk üretilen NbTiWVZr RYEA numunelerde yapılan C, S, O, N, H analizlerinde herhangi bir kirlilik seviyesinde element tespit edilmemiş özellikle üretim yönteminden bir oksit gelmediği anlaşılmıştır. Üretilen 3 farklı kompozisyonundaki numunelere uygulanan XRF analizlerinde ise hedeflenen kompozisyonlara ulaşıldığı ve homojen bir ergitme yapıldığı anlaşılmıştır. Farklı tarihlerde üretilen numunelerde de minimum kimyasal kompozisyon farkları ile tekrarlı olarak numuneler üretilebilmiştir. Ayrıca yapılan tekrarlı ergitmelerde herhangi bir element kaybı da yaşanmamıştır.

Numunelerin porozite oranını tespit etmek için hassas terazi ile Arşimed prensibine göre yapılan yoğunluk ölçümlerinde, NbTiWVZr , Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarında döküm sonrası sırasıyla 8,7 g/cm<sup>3</sup>, 7,5 g/cm<sup>3</sup> ve 9,6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerleri ölçülmüştür. Alaşımların teorik yoğunluktan yola çıkarak hesaplanan rölatif yoğunluk sıralaması ise MoNbTiWV> NbTiWVZr> Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> şeklindedir. Gerçekleştirilen bütün ısıt işlemler ve HIP denemeleri sonrasında alaşımların rölatif yoğunluklarının az miktarda azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni ise döküm halinde hızlı soğuma kaynaklı ideal pozisyonlarına yerleşemeyen atomların kafesi girmesi ve ısıt işlem sonunda bu gerilmenin giderilmesine bağlı hacimsel artış nedeniyle yoğunlukta bir miktar azalma meydana gelmesidir.

Optik mikroskop incelemelerinde bütün numunelerde döküm ve ikincil işlemler sonrası mikroporozitelerin olduğu görülmüştür. Ayrıca ark ile ergitmenin doğası gereği NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> buton numunelerde iki ergitme tekrarı arasında ergi sınırı oluştuğu saptanmış ve butonların merkezlerinde nispeten kaba dentritler, dış yüzeyinde ise hızlı soğuma kaynaklı daha ince dentritlerin olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık daha yüksek ergime sıcaklığına sahip MoNbTiWV alaşımında net olarak görülememiştir. Dağlama sonrası optik mikroyapılarda tüm numunelerin döküm sonrası dentritik bir mikroyapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> buton numunelerde benzer bir mikroyapı elde edilmiştir. Bu mikroyapıda beyaz renkte ana dentritler ve dentritler arasına dağılmış sarı ve siyah bölgeler yer almaktadır. MoNbTiWV alaşımında ise kirli beyaz renkte ana dentritler arasına dağılmış gri ve siyah bölgeler bulunduğu görülmüştür. NbTiWVZr alaşımında

1200°C-4 saat-100 MPa şartlarda HIP'in ve 1200°C sıcaklıkta 12 saat uygulanan ısıtıl işlemin mikroyapıda majör bir değişim oluşturmamıştır. 1200°C sıcaklıkta 24 saat uygulanan ısıtıl işleminde NbTiWVZr dentritler arasındaki bölgeler toparlanma eğilimine girmiş, ana dentritlerde bir miktar kabalaşma olmuştur. 1400 °C sıcaklıkta 24 saat uygulanan ısıtıl işleminde ise ana dentritler üzerindeki ikincil dentrit kolları tamamen yok olmuş, dentritler arası bölgelerdeki sarı ve siyah renkli fazların birleşerek büyüdüğü analiz edilmiştir. Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımına uygulanan 1400 °C sıcaklıkta 24 saatlik ısıtıl işlem NbTiWVZr alaşımına benzer etki göstermiştir. Yine aynı sıcaklık ve sürede ısıtıl işlem sonrası MoNbTiWV alaşımında ana dentritler toparlanmış ve kabalaşmış, dentritler arası sınırlarda da siyah renkli bölgeler birleşmiştir.

SEM incelemeleri ve EDS nokta analizleri sonucunda döküm sonrası NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımlarda ana dentrit kollarının merkezinde W ve Nb, ana dentritlerin kabuk kısımlarına ise W, Nb ve bir miktar V ve Ti bulunduğu tespit edilmiştir. Dentritler arası bölgede ise çoğunlukla Zr ve Ti elementleri yer almaktadır. Döküm sonrası MoNbTiWV alaşımında ise siyah sınırlar ile ayrılan ana dentrit merkezleri W, Mo ve Nb ağır refrakter elementlerinden meydana gelmektedir. Ana dentritlerini birbirinden ayıran siyah-gri sınırlarda ise çoğunlukla Mo elementine rastlanmamıştır. 1400°C sıcaklıkta 24 saat boyunca yapılan ısıtıl işlem neticesinde NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımlarda ana dentritlerin ağırlıklı W ve Nb, dentritler arası bölgelerin ise Ti, Zr ve V elementlerinden oluşan birden fazla fazlı bir yapıya büründüğü anlaşılmıştır. ısıtıl işlem sonrası MoNbTiWV alaşımında ana dentritler ile dentritler arası bölge arasında element difüzyonu olmuş, ve yaklaşık eşmolar oranda element dağılımı gözlenmiştir. Dentritler arası bölgede de Mo elementine rastlanmıştır.

XRD analizleri, döküm sonrası tüm numunelerin HMK kristal yapıda olduğunu göstermiştir. Burada döküm sonrası alaşımların XRD pikleri endeksleme metodu kullanılarak HMK ve varyantlarının kristal yansıma düzlemleri ile pik konumları eşleştirilmiştir. Buna göre tez kapsamında üretilen NbTiWVZr , Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> ve MoNbTiWV alaşımlarında döküm sonrası tek fazlı düzensiz HMK kristal yapı elde edilmiştir. NbTiWVZr alaşımında HIP, 1200°C sıcaklıkta 24 saat ve 1400°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlemleri sonrası HMK kristal yapıların yanı sıra ilave olarak HSP kristal yapıda zayıf  $\alpha$ -Zr, Nb<sub>2</sub>C ve NbTi fazlarının piklerine rastlanmıştır. Burada ısıtıl işlem ile dentritler arası elementel segregasyonların artması ile yeni fazlara ait piklerin görüldüğü

anlaşılmıştır.  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  alaşımına uygulanan  $1400^{\circ}C$  sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem sonrası XRD piklerinde HMK kristal yapıdaki piklerin yanısıra yine  $\alpha$ -Zr,  $Nb_2C$ , NbTi,  $ZrV_2$  C15 Laves ve  $(TiV_{99})_{0,02}$  bileşik fazlarına ait zayıf pikler elde edilmiştir. Fakat  $1400^{\circ}C$  sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem MoNbTiWV alaşımında HMK kristal yapı pikleri dışında herhangi bir ikincil pike rastlanmamıştır. Burada ısıtıl işlem sonrası NbTiWVZr ve  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  alaşımlarda birden fazla faz içeren kompleks bir mikroyapı elde edildiği görülmektedir. Bu çıkarımları; optik, SEM ve EDS incelemeleri de doğrulamaktadır.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen makrosertlik incelemelerinde NbTiWVZr,  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  ve MoNbTiWV alaşımlarında döküm sonrası ortalama makrosertlikler 57,5 HRC, 53,03 HRC ve 51,77 HRC olarak ölçülmüştür.  $1400^{\circ}C$  sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem sonunda makrosertliklerde herhangi bir değişim olmamıştır. Ayrıca farklı tarihlerde üretilen NbTiWVZr alaşımının makrosertlik ve yoğunluk sonuçları ilişkilendirildiğinde artan yoğunlukla birlikte makrosertlik değerinde yaklaşık 4 HRC artış yaşanmış ve burada üretilen alaşımlardan maksimum mekanik özellik beklemek için maksimum yoğunluğa yaklaşılmaması gerektiği anlaşılmıştır.

Basma test sonuçlarına göre oda sıcaklığında tez kapsamında üretilen tüm numunelerin yaklaşık % 13 civarında sınırlı bir yüzde uzama gösterdiği, 1426-2171 Mpa aralığında akma dayanımı sergiledikleri anlaşılmıştır. Oda sıcaklığında basma testi yapılan Inconel 718, CM247LC ve CMSX-4 nikel bazlı süperalaşımların ise sünekliği yüksek olup akma dayanımları ise 930 ile 1246 MPa aralığında ölçülmüştür.  $600^{\circ}C$  sıcaklıkta yapılan basma testlerinde ise NbTiWVZr,  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  ve  $1400^{\circ}C$  sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanan  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  alaşımlar iyi bir süneklik sergilemişlerdir.  $600^{\circ}C$  sıcaklıktaki akma dayanımları incelendiğinde ise en yüksek akma dayanımı NbTiWVZr ve  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  alaşımlarının döküm ve ısıtıl işlemli hallerinde yaklaşık 1000-1100 MPa aralığında ölçülmüştür. Bu akma dayanımı nikel süperalaşımlarla benzer olduğu anlaşılmıştır.  $800^{\circ}C$  sıcaklıkta ise RYEA ve KKA'lar arasında en yüksek akma dayanımı ise 24 saat ısıtıl işlem uygulanan MoNbTiWV alaşımında 786 MPa ölçülmüştür.  $800^{\circ}C$  sıcaklıkta ısıtıl işlemli  $Nb_{22,5}W_{10}Ti_{22,5}V_{22,5}Zr_{22,5}$  ve MoNbTiWV alaşımları Inconel 718'e göre nispeten iyi akma mukavemetine sahip olabilmışlerdir. Fakat  $800^{\circ}C$  sıcaklıkta tüm RYEA ve KKA'ların CM247LC ve CMSX-4 nikel süperalaşımlara kıyasla çok daha düşük akma dayanımına sahip olduğu sonucuna

varılmıştır. Dolayısıyla basma test sonuçlarına göre 600°C sıcaklığa kadar tez kapsamında üretilen NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımlarının döküm ve ısıt işlemleri hallerinin nikel süperalaşımların yerine kullanılabileceği görülmektedir. 800°C sıcaklıkta ise bu dört numunenin oksidasyon tedbirlerinin alınması kaydı ile Inconel 718 alaşımının yerine kullanılması da mümkündür. 800°C sıcaklık üzerinde söz konusu RYEA ve KKA'ların, nikel süperalaşımlara kıyasla akma mukavemetlerinin hızla düşmesi neticesinde ve oksitlenme gibi problemler nedeniyle CM247LC ve CMSX-4 nikel süperalaşımlarının yerine kullanılması mümkün olmadığı kanaatine varılmıştır. Ayrıca basma test sonuçları ile makrosertlik sonuçları birbiri ile tutarlıdır.

Son olarak çalışmada üretilen yüksek entropili alaşımların 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyon testlerinde en yüksek oksitlenme direnci gösteren alaşımın KKA-1 kodlu Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımı olduğu saptanmıştır. Fakat tez kapsamında üretilen alaşımların nikel bazlı süperalaşımlara göre oksidasyon dayanımları, ne yazık ki kıyaslanamayacak kadar kötü durumdadır. Bu nedenle 600°C sıcaklıklara kadar mukavemet açısından kullanım potansiyeli sergileyen NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımlarının oksidasyon tedbirlerinin alınarak kullanılması elzemdir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde tasarlanan ve ilk deneysel çalışmaları gerçekleştiren NbTiWVZr eşmolar yüksek entropili alaşımın 600-700°C sıcaklığa kadar havacılık motor parçalarının imalatında kullanım potansiyeli taşıdığı söylenebilir. Burada tez çalışmasının devamında aşağıdaki çalışmaların yapılması halinde alaşımın özelliklerinin daha da iyileşeceği ve uçak motorlarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

- NbTiWVZr farklı kompozisyonel varyasyonları ile optimum özelliklerin yakalanması sağlanabilir.

- NbTiWVZr alaşımının ark ergitme sonrası mikroporozitelerinin giderilmesi için sıcak dövme ve daha yüksek basınç ve sıcaklıklarda HIP prosesi uygulanabilir.

- XRD analizlerinde NbTiWVZr ve Nb<sub>22,5</sub>W<sub>10</sub>Ti<sub>22,5</sub>V<sub>22,5</sub>Zr<sub>22,5</sub> alaşımlarının HMK-1, HMK-2 ve HMK-3 kristal yapıları ayrıntılı TEM incelemesi yapılarak element içeriği tam olarak belirlenebilir.

- NbTiWVZr alaşımının oksidasyon dayanımını artırmak için kaplama yöntemleri tercih edilebilir.

- Daha yüksek güçte ergitme cihazı kullanılarak minyatür çekme numunesi çıkarılabilecek alaşımlar hazırlanarak daha güvenli malzeme verisi çıkarılabilir.



## KAYNAKÇA

- [1] El-Sayed, A. F. (2008). *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines* (1st Edition). Boca Raton: CRC Press.
- [2] Gill, B. J. (1982). The development of gas turbine materials. G. W. Meetham (Editor). *International Journal of Fatigue*, 4 (2), 112.
- [3] Mattingly, J.D. (2006). *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [4] Reed, R. C. (2006). *The Superalloys fundamentals and applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [6] Cantor, B., Chang, I.T.H., Knight, P., Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering A*, 375–377, 213–218.
- [7] Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299-303.
- [8] Sims, C. T. (1984). A History of Superalloy Metallurgy for Superalloy Metallurgists. *Superalloys 1984*, TMS. 399–419.
- [9] Kracke, A. (2010). Superalloys, the most successful alloy system of modern times - Past, present and future. *Superalloys*, 1, 13–50.
- [10] Injeti, G. (2012). Advances in Gas Turbine Technology. E. Benini (Editör) In *Advances in Gas Turbine Technology* (1-28).
- [11] Prasad, N. E., & H., Russell. J. W. (2017). *Aerospace Materials and Material Technology Vol. 1*, Singapore: Springer Singapore.
- [12] Miracle, D. B. (2015). Critical Assessment: Critical Assessment 14: High entropy alloys and their development as structural materials. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 31(10), 1142–1147.
- [13] Ranganathan, S. (2003). Alloyed pleasures: Multimetalllic cocktails. *Current Science*, 85(10), 1404–1406.
- [14] Gao, M. C., Liaw, P. K., Yeh, J. W., Zhang, Y. (2016). High-entropy alloys: Fundamentals and applications. In *High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications*. Switzerland: Springer International Publishing.
- [15] Miracle, D. B., Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511.
- [16] Zhang, Y. (2019). *High Entropy Materials A Brief Introduction* (1st Edition). Singapore: Springer Singapore.
- [17] Senkov, O. N., Miracle, D. Chaput, K., Couzinie, J. (2018). Development and exploration of refractory high entropy alloys- A review. *Journal of Materials Research*, 33 (19), 3092-3128.

- [18] Feuerbacher, Michael, Heidelmann, M., Thomas, C. (2014). Hexagonal High-entropy Alloys. *Materials Research Letters*, 3(1), 1–6.
- [19] Jiang, L., Lu, Y. P., Jiang, H., Wang, T. M., Wei, B. N., Cao, Z. Q., Li, T. J. (2016). Formation rules of single phase solid solution in high entropy alloys. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32(6), 588–592.
- [20] Guo, S., Ng, C., Lu, J., Liu, C. T. (2011). Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys. *Journal of Applied Physics*, 109(10).
- [21] King, D. J. M., Middleburgh, S. C., McGregor, A. G., Cortie, M. B. (2016). Predicting the formation and stability of single phase high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 104, 172–179.
- [22] Ye, Y. F., Wang, Q., Lu, J., Liu, C. T., Yang, Y. (2015). Design of high entropy alloys: A single-parameter thermodynamic rule. *Scripta Materialia*, 104, 53–55.
- [23] Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S. (2014). *High Entropy Alloys* (1st Edition). India: Butterworth-Heinemann.
- [24] Chen, H.L., Mao, H., Chen, Q. (2018). Database development and Calphad calculations for high entropy alloys: Challenges, strategies, and tips. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 279-290.
- [25] Sanchez, J. M., Vicario, I., Albizuri, J., Guraya, T., Garcia, J. C. (2019). Phase prediction, microstructure and high hardness of novel light-weight high entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (1), 795-803.
- [26] Mishra, A., Priyadarshan, G., Clark, D., Lu, Y., Shi, R. (2019). Theoretical Investigations on Structural Stability and Elastic Properties of MoNbTaW-X (=Ti/V) High Entropy Alloys. *Journal of Materials Science Research and Reviews*, 4(2), 1-9.
- [27] Varalakshmi, S., Kamaraj, M., & Murty, B. S. (2008). Synthesis and characterization of nanocrystalline AlFeTiCrZnCu high entropy solid solution by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 460(1–2), 253–257.
- [28] Chang, H. W., Huang, P. K., Yeh, J. W., Davison, A., Tsau, C. H., Yang, C. C. (2008). Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(14), 3360–3366.
- [29] Gorsse, S., Nguyen, M.H., Senkov, O.N., Miracle, D.B. (2018). Database on the mechanical properties of high entropy alloys and complex concentrated alloys. *Data in Brief*, 21, 2664-2678.
- [30] Daoud, H. M., Manzoni, A. M., Wanderka, N., Glatzel, U. (2015). High-Temperature Tensile Strength of Al<sub>10</sub>Co<sub>25</sub>Cr<sub>8</sub>Fe<sub>15</sub>Ni<sub>36</sub>Ti<sub>6</sub> Compositionally Complex Alloy (High-Entropy Alloy). *Journal of Materials*, 67(10), 2271–2277.
- [31] Tsai, C. W., Tsai, M. H., Yeh, J. W., & Yang, C. C. (2010). Effect of temperature on mechanical properties of Al<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi wrought alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 490(1–2), 160–165.
- [32] Tong, C. J., Chen, M. R., Chen, S. K., Yeh, J. W., Shun, T. T., Lin, S. J., & Chang, S. Y. (2005). Mechanical performance of the Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi high-entropy alloy

- system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 36(5), 1263–1271.
- [33] Kuznetsov, A. V., Shaysultanov, D. G., Stepanov, N. D., Salishchev, G. A., Senkov, O. N. (2012). Tensile properties of an AlCrCuNiFeCo high-entropy alloy in as-cast and wrought conditions. *Materials Science and Engineering A*, 533, 107–118.
- [34] Shaysultanov, D.G., Stepanov, N.D., Kuznetsov, A.V., Salishchev, G. A., Senkov, O. N. (2013). Phase Composition and Superplastic Behavior of a Wrought AlCoCrCuFeNi High-Entropy Alloy. *Journal of Materials*, 65, 1815–1828.
- [35] Otto, F., Dlouhý, A., Somsen, C., Bei, H., Eggeler, G., George, E. P. (2013). The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 61(15), 5743–5755.
- [36] Gali, A., George, E. P. (2013). Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*, 39, 74–78.
- [37] Wu, Z., Bei, H., Pharr, G. M., & George, E. P. (2014). Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures. *Acta Materialia*, 81, 428–441.
- [38] Daoud, H. M., Manzoni, A., Völkl, R., Wanderka, N., & Glatzel, U. (2013). Microstructure and tensile behavior of Al<sub>8</sub>Co<sub>17</sub>Cr<sub>17</sub>Cu<sub>8</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>33</sub> (at.%) high-entropy alloy. *Jom*, 65(12), 1805–1814.
- [39] Hu, B. C., Chang, Y. J., Yeh, A. C., & Chen, Y. J. (2018). Evolution of high temperature yield strength of AlCoCrFeNiTi high entropy alloys. *Procedia Manufacturing*, 15, 364–371.
- [40] Wang, J., Liu, Y., Liu, B., Wang, Y., Cao, Y., Li, T., & Zhou, R. (2017). Flow behavior and microstructures of powder metallurgical CrFeCoNiMo<sub>0.2</sub> high entropy alloy during high temperature deformation. *Materials Science and Engineering A*, 689, 233–242.
- [41] http-1:  
[https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel\\_alloy\\_718.pdf](https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf)  
 (Erişim Tarihi: 20.12.2019).
- [42] Couturier, R., Burlet, H., Terzi, S., Dubiez, S., Guetaz, L., Raison, G. (2004). Process Development and Mechanical Properties of Alloy U720li For High Temperature Turbine Disks. *Superalloys*, 351-359.
- [43] http-2:  
[https://nickelinstitute.org/media/1709/in\\_738alloy\\_preliminarydata\\_497\\_.pdf](https://nickelinstitute.org/media/1709/in_738alloy_preliminarydata_497_.pdf)  
 (Erişim Tarihi: 20.12.2019).
- [44] Sengupta, A., Putatunda, S.K., Bartosiewicz, L., Hangas, J., Nailos, P. J., Peputapeck, M., Alberts, F. E. (1994). Tensile behavior of a new single-crystal nickel-based superalloy (CMSX-4) at room and elevated temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 3, 73–81.
- [45] Milligan, W.W., Antolovich, S.D. (1987). Yielding and deformation behavior of the single crystal superalloy PWA 1480. *Metallurgical Transactions A*, 18, 85–95.
- [46] Miner, R.V., Voigt, R.C., Gayda, J., Gabb, T.P. (1986). Orientation and temperature dependence of some mechanical properties of the single-crystal nickel-base

- superalloy René N4: Part I. Tensile behavior. *Metallurgical Transactions A*, 17, 491–496.
- [47] Xiong, X., Quan, D., Dai, P., Wang, Z., Zhang, Q., Yue, Z. (2015). Tensile behavior of nickel-base single-crystal superalloy DD6. *Materials Science and Engineering: A*, 636, 608-612.
  - [48] Harris, K., Erickson, G. L., Schwer, R. E. (1984). MAR M 247 Derivations - CM247LC DS Alloy and CMSX Single Crystal Alloys: Properties & Performance. *Superalloys*, 221-230.
  - [49] Kaufman, M. (1984). Properties of Cast Mar-M-247 for Turbine Blisk Applications, *Superalloys*, 43-52.
  - [50] Senkov, O.N., Wilks, G.B., Scott, J.M., Miracle, D.B. (2011). Mechanical properties of Nb<sub>25</sub>Mo<sub>25</sub>Ta<sub>25</sub>W<sub>25</sub> and V<sub>20</sub>Nb<sub>20</sub>Mo<sub>20</sub>Ta<sub>20</sub>W<sub>20</sub> refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 19 (5), 698-706.
  - [51] Chen, H., Kauffmann, A., Gorr, B., Schliephake, D., Seemüller, C., Wagner, J.N., Christ, H.-J., Heilmaier, M. (2016). Microstructure and mechanical properties at elevated temperatures of a new Al-containing refractory high-entropy alloy Nb-Mo-Cr-Ti-Al. *Journal of Alloys and Compounds*, 661, 206-215.
  - [52] Stepanov, N.D., Yurchenko, N.Y., Skibin, D.V., Tikhonovsky, M.A., Salishchev, G.A. (2015). Structure and mechanical properties of the AlCr<sub>x</sub>NbTiV (x = 0, 0.5, 1, 1.5) high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 652, 266-280.
  - [53] Stepanov, N.D., Yurchenko, N.Y., Panina, E.S., Tikhonovsky, M.A., Zharebtsov, S.V. (2017). Precipitation-strengthened refractory Al<sub>0.5</sub>CrNbTi<sub>2</sub>V<sub>0.5</sub> high entropy alloy. *Materials Letters*, 188, 162-164.
  - [54] Xu, Z.Q., Ma, Z.L., Wang, M., Chen, Y.W., Tan, Y.D., Cheng, X.W. (2019). Design of novel low-density refractory high entropy alloys for high-temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*, 755, 318-322.
  - [55] Senkov, O.N., Senkova, S.V., Woodward, C. (2014). Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 68, 214-228.
  - [56] Senkov, O.N., Woodward, C., Miracle, D.B. (2014). Microstructure and Properties of Aluminum-Containing Refractory High-Entropy Alloys. *Journal of Materials*, 66, 2030–2042.
  - [57] Senkov, O.N., Jensen, J.K., Pilchak, A.L., Miracle, D.B., Fraser, H.L. (2018). Compositional variation effects on the microstructure and properties of a refractory high-entropy superalloy AlMo<sub>0.5</sub>NbTa<sub>0.5</sub>TiZr. *Materials & Design*, 139, 498-511.
  - [58] Cao, Y., Zhang, W., Liu, B., Liu, Y., Du, M., Fu, A. (2021). Phase decomposition behavior and its effects on mechanical properties of TiNbTa<sub>0.5</sub>ZrAl<sub>0.5</sub> refractory high entropy alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 66, 10-20.
  - [59] Xiang, L., Guo, W., Liu, B., Fu, A., Li, J., Fang, Q., Liu, Y. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of TaNbVTiAl<sub>x</sub> Refractory High-Entropy Alloys. *Entropy*, 2020, 22, 282.

- [60] Stepanov, N.D., Shaysultanov, D.G., Salishchev, G.A., Tikhonovsky, M.A. (2015). Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy. *Materials Letters*, 142, 153-155.
- [61] Senkov, O.N., Couzinie, J.-P., Rao, S.I., Soni, V., Banerjee, R. (2020). Temperature dependent deformation behavior and strengthening mechanisms in a low density refractory high entropy alloy Al<sub>10</sub>Nb<sub>15</sub>Ta<sub>5</sub>Ti<sub>30</sub>Zr<sub>40</sub>. *Materialia*, 9, 100627.
- [62] Senkov, O.N., Woodward, C.F. (2011). Microstructure and properties of a refractory NbCrMo<sub>0.5</sub>Ta<sub>0.5</sub>TiZr alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 529, 311-320.
- [63] Senkov, O.N., Senkova, S.V., Miracle, D.B., Woodward, C. (2013). Mechanical properties of low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr–Nb–Ti–V–Zr system. *Materials Science and Engineering: A*, 565, 51-62.
- [64] Zhang, W., Liaw, P.K., Zhang, Y. (2018). A Novel Low-Activation VCrFeTa<sub>x</sub>W<sub>x</sub> (x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 1) High-Entropy Alloys with Excellent Heat-Softening Resistance. *Entropy*, 20, 951.
- [65] Senkov, O.N., Rao, S.I., Butler, T.M., Daboiku, T.I., Chaput, K.J. (2020). Effect of Fe additions on the microstructure and properties of Nb–Mo–Ti alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 89, 105221.
- [66] Tseng, K.-K., Juan, C.-C., Tso, S., Chen, H.-C., Tsai, C.-W., Yeh, J.-W. (2019). Effects of Mo, Nb, Ta, Ti, and Zr on Mechanical Properties of Equiatomic Hf–Mo–Nb–Ta–Ti–Zr Alloys. *Entropy*, 21, 15.
- [67] Senkov, O.N., Scott, J.M., Senkova, S.V., Miracle, D.B., Woodward, C.F. (2011). Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (20), 6043-6048.
- [68] Juan, C.-C., Tsai, M.-H., Tsai, C.-W., Lin, C.-M., Wang, W.-R., Yang, C.-C., Chen, S.-K., Lin, S.-J., Yeh, J.-W. (2015). Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 62, 76-83.
- [69] Liu, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Wang, N., Chen, X., Zhang, H., Li, Y. (2017). Microstructure and mechanical properties of refractory HfMo<sub>0.5</sub>NbTiV<sub>0.5</sub>Si<sub>x</sub> high-entropy composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 869-876.
- [70] Guo, N.N., Wang, L., Luo, L.S., Li, X.Z., Su, Y.Q., Guo, J.J., Fu, H.Z. (2015). Microstructure and mechanical properties of refractory MoNbHfZrTi high-entropy alloy. *Materials & Design*, 81, 87-94.
- [71] Zhang, Y., Liu, Y., Li, Y., Chen, X., Zhang, H. (2016). Microstructure and mechanical properties of a refractory HfNbTiVSi<sub>0.5</sub> high-entropy alloy composite. *Materials Letters*, 174, 82-85.
- [72] Wang, M., Ma, Z., Xu, Z., Cheng, X. (2019). Microstructures and mechanical properties of HfNbTaTiZrW and HfNbTaTiZrMoW refractory high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 803, 778-785.
- [73] Senkov, O.N., Scott, J.M., Senkova, S.V., Meisenkothen, F., Miracle, D. B., Woodward, C. F. (2012). Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy. *Journal of Materials Science*, 47, 4062–4074.

- [74] Wang, M., Ma, Z.L., Xu, Z.Q., Cheng, X.W. (2021). Designing VxNbMoTa refractory high-entropy alloys with improved properties for high-temperature applications, *Scripta Materialia*, 191, 131-136.
- [75] Han, Z.D., Chen, N., Zhao, S.F., Fan, L.W., Yang, G.N., Shao, Y., Yao, K.F. (2017). Effect of Ti additions on mechanical properties of NbMoTaW and VNbMoTaW refractory high entropy alloys, *Intermetallics*, 84, 153-157.
- [76] Li, Q., Zhang, H., Li, D., Chen, Z., Huang, S., Lu, Z., Yan, H. (2019). WxNbMoTa Refractory High-Entropy Alloys Fabricated by Laser Cladding Deposition. *Materials*, 12, 533.
- [77] Senkov, O.N., Gild, J., Butler, T.M. (2020). Microstructure, mechanical properties and oxidation behavior of NbTaTi and NbTaZr refractory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 158003.
- [78] Yuefei, J., Liangbo, Z., Peiyu, L., Xindi, M., Long, X., Shiwei, W., Yandong, J., Gang, W. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of Nb–Ti–V–Zr Refractory Medium-Entropy Alloys. *Frontiers in Materials*, 7, 172.
- [79] http-3: <https://www.rsc.org/periodic-table> (Erişim Tarihi: 21.03.2019).
- [80] http-4: <https://periodictable.com/Properties/A/Valence.al.html> (Erişim Tarihi: 21.03.2019).
- [81] http-5: <http://www.entall.imim.pl/calculator/> (Erişim Tarihi: 21.03.2019).
- [82] Li, R., Xie, L., Wang, W.Y., Liaw, P.K., Zhang, Y. (2020). High-Throughput Calculations for High-Entropy Alloys: A Brief Review. *Frontiers in Materials*, 7, 290.
- [83] Sheikh, S., Shafeie, S., Hu, Q., Ahlström, J. Persson, C., Veselý, J., Zýka, J., Klement, U., Guo, S. (2016). Alloy design for intrinsically ductile refractory high-entropy alloys. *Journal of Applied Physics*, 120, 164902.
- [84] Senkov, O.N., Wilks, G.B., Miracle, D.B., Chuang, C.B., Liaw, P.K. (2010). Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 18, 1758-1765.
- [85] Regenber, M., Hasemann, G., Wilke, M., Halle, T., Krüger, M. (2020). Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Refractory Mo-Nb-V-W-Ti High-Entropy Alloys. *Metals*, 10, 1530.
- [86] Nagase, T., Mizuuchi, K., Nakano, T. (2019). Solidification Microstructures of the Ingots Obtained by Arc Melting and Cold Crucible Levitation Melting in TiNbTaZr Medium-Entropy Alloy and TiNbTaZrX (X = V, Mo, W) High-Entropy Alloys. *Entropy*, 21, 483.
- [87] Eshed, E., Larianovsky, N., Kovalevsky, A., Popov Jr.V., Gorbachev, I., Popov, V., Katz-Demyanetz, A. (2018). Microstructural Evolution and Phase Formation in 2nd-Generation Refractory-Based High Entropy Alloys. *Materials*, 11, 175.
- [88] Wu, Y.D., Cai, Y.H., Chen, X.H., Wang, T., Si, J.J., Wang, L., Wang, Y.D., Hui, X.D. (2015). Phase composition and solid solution strengthening effect in TiZrNbMoV high-entropy alloys. *Materials & Design*, 83, 651-660.
- [89] Butler, T.M., Chaput, K.J., Dietrich, J.R., Senkov, O.N. (2017). High temperature oxidation behaviors of equimolar NbTiZrV and NbTiZrCr refractory complex concentrated alloys (RCCAs). *Journal of Alloys and Compounds*, 729, 1004-1019.

- [90] Müller, F., Gorr, B., Christ, H.-J., Müller, J., Butz, B., Chen, H., Kauffmann, A., Heilmaier, M. (2019). On the oxidation mechanism of refractory high entropy alloys. *Corrosion Science*, 159.
- [91] Müller, F., Gorr, B., Christ, H.-J., Müller, J., Butz, B., Chen, H., Kauffmann, A., Heilmaier, M. (2018). Effect of microalloying with silicon on high temperature oxidation resistance of novel refractory high-entropy alloy Ta-Mo-Cr-Ti-Al. *Materials at High Temperatures*, 35:1-3, 168-176.
- [92] Senkov, O.N., Rao, S., Chaput, K.J., Woodward, C. (2018). Compositional effect on microstructure and properties of NbTiZr-based complex concentrated alloys, *Acta Materialia*, 151, 201-215.
- [93] Chan, C.-W., Chang, X., Bozorgzadeh, M.A., Smith, G.C., Lee, S. (2020). A single parameter approach to enhance the microstructural and mechanical properties of beta Ti-Nb alloy via open-air fiber laser nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 383, 125269.
- [94] King, D.J.M., Cheung, S.T.Y., Humphry-Baker, S.A., Parkin, C., Couet, A., Cortie, M.B., Lumpkin, G.R., Middleburgh, S.C., Knowles, A.J. (2019). High temperature, low neutron cross-section high-entropy alloys in the Nb-Ti-V-Zr system. *Acta Materialia*, 166, 435-446.

## EKLER

### EK-1 Veritabanı (3d Geçiş Metali İçeren YEA ve KKA'lar)

| Alaşım ve mekanik test yönü                                                                                 | Üret. Yön. | Isıl/İkincil İşlem                             | Sapt. Fazlar                   | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------|
| Al <sub>8</sub> Co <sub>17</sub> Cr <sub>17</sub> Cu <sub>8</sub> Fe <sub>17</sub> Ni <sub>33</sub> (Çekme) | VIM        | -                                              | YMK+L12                        | 25             | 357             | 9      | https://doi.org/10.1007/s11837-013-0756-3     |
|                                                                                                             |            | 700°C-5sa                                      | YMK+L12                        | 25             | 365             | 0,1    |                                               |
|                                                                                                             |            | 1150°C-5sa                                     | +Cr'lu çök.                    | 25             | 215             | 39     |                                               |
|                                                                                                             |            | -                                              | YMK+L12                        | 500            | 315             | 0,7    |                                               |
|                                                                                                             |            | 700°C-5sa                                      | YMK+L12                        | 500            | 310             | <0,02  |                                               |
|                                                                                                             |            | 1150°C-5sa                                     | +Cr'lu çök.                    | 500            | 215             | 6      |                                               |
| Al <sub>0,5</sub> CoCrCuFeNi (Çekme)                                                                        | VAE        | 1000°C-6sa + WQ + % 80 Şekil verme + 900°C-5sa | YMK + Cu'ca Zengin YMK         | 25             | 655             | 29     | https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.088 |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 300            | 460             | 6      |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 400            | 500             | 4      |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 500            | 430             | 2      |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 600            | 270             | 3      |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 700            | 170             | 13     |                                               |
| Al <sub>0,5</sub> CoCrCuFeNi (Basma)                                                                        | VAE + VIM  | -                                              | YMK                            | 25             | 388             | -      | https://doi.org/10.1007/s11661-005-0218-9     |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 300            | 411             |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 500            | 421             |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 700            | 426             |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 900            | 230             |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 1000           | 150             |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 1100           | 80              |        |                                               |
| YMK + HMK                                                                                                   |            |                                                | 25                             | 948            |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 600                            | 561            |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 700                            | 307            |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 800                            | 172            |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 900                            | 98             |                 |        |                                               |
| HMK                                                                                                         |            |                                                | 1000                           | 47             |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 25                             | 1620           |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 500                            | 1120           |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 600                            | 805            |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 700                            | 567            |                 |        |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                | 800                            | 302            |                 |        |                                               |
| 900                                                                                                         |            |                                                | 214                            |                |                 |        |                                               |
| 1000                                                                                                        | 116        |                                                |                                |                |                 |        |                                               |
| 1100                                                                                                        | 79         |                                                |                                |                |                 |        |                                               |
| AlCrCuNiFeCo (Çekme)                                                                                        | IM + ESR   | 960°C-5sa                                      | HMK Matris + YMK1 + YMK2 + L12 | 25             | 790             | 0,2    | https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.045    |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 600            | 542             | 0,4    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 700            | 350             | 4,7    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 800            | 161             | 12,1   |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 900            | 88              | 30     |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 1000           | 37              | 77     |                                               |
|                                                                                                             | IM + ESR   | 960°C-5sa + 9500°C Sıcak Dövme                 | HMK-B2 + YMK1 + YMK2 + σ       | 25             | 1040            | 1      |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 300            | 810             | 0,4    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 600            | 300             | 1,3    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 700            | 63              | 63     |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 800            | 22              | 604    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 900            | 14              | 405    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                | 1000           | 9               | 864    |                                               |
|                                                                                                             |            |                                                |                                |                |                 |        |                                               |

| Alaşım ve mekanik test yönü                                                                                 | Üret. Yön.             | Isıl/İkincil İşlem                       | Sapt. Fazlar                      | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                     |    |                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AlCoCrCuFeNi (Çekme)                                                                                        | IM + ESR               | 960°C-5sa                                | Düzenli YMK + B2 + σ + Düzeni YMK | 800            | 35              | 160    | <a href="https://doi.org/10.1007/s11837-013-0754-5">https://doi.org/10.1007/s11837-013-0754-5</a>           |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 900            | 12              | 5085   |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 1000           | 3               | 1240   |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
| CoCrFeMnNi (Çekme)                                                                                          | VAE + Dök. + Soğ. Döv. | 1200°C-48sa + 800°C-1sa dövme son. tav.  | YMK                               | 25             | 362             | 51     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018</a>   |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 200            | 292             | 36     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 400            | 267             | 32     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 600            | 241             | 42     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 800            | 127             | 51     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | 1200°C-48sa + 1000°C-1sa dövme son. tav. | YMK                               | 25             | 197             | 60     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 200            | 146             | 44     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 400            | 117             | 46     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 600            | 98              | 40     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 800            | 92              | 26     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | 1200°C-48sa + 1200°C-1sa dövme son. tav. | YMK                               | 25             | 171             | 57     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 200            | 121             | 46     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 400            | 92              | 46     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 600            | 76              | 41     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 800            | 73              | 20     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
| CoCrMnFeNi (Çekme)                                                                                          | VAE + Dök.             | 1000°C-24sa + Sıcak Dövme                | YMK                               | 25             | 223             | 39     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018">https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018</a> |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 200            | 188             | 36     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 400            | 191             | 36     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 600            | 150             | 36     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 800            | 97              | 32     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 1000           | 58              | 30     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | CoCrFeNi (Çekme)                         | YMK                               | 25             | 300             | 42     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 200            | 214             | 34     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 400            | 181             | 32     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 600            | 155             | 34     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          | 800                               | 100            | 28              |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          | 1000                              | 90             | 19              |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          | CoCrFeNi (Çekme)                  | YMK            | 25              | 273    |                                                                                                             | 38 | <a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026</a> |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   |                | 200             | 215    |                                                                                                             | 34 |                                                                                                           |
| 400                                                                                                         |                        | 195                                      |                                   |                | 28              |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
| CoCrMnNi (Çekme)                                                                                            | YMK                    | 25                                       | 280                               | 43             |                 |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | 200                                      | 215                               | 36             |                 |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | 400                                      | 186                               | 28             |                 |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
| CoFeMnNi (Çekme)                                                                                            | YMK                    | 25                                       | 175                               | 41             |                 |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | 200                                      | 135                               | 36             |                 |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        | 400                                      | 116                               | 37             |                 |        |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
| Al <sub>10</sub> Co <sub>25</sub> Cr <sub>8</sub> Fe <sub>15</sub> Ni <sub>36</sub> Ti <sub>6</sub> (Çekme) | VIM + DS Dök.          | 1220°C-20sa + 900°C-5sa yaş.             | YMK + γ' Çök.                     | 25             | 568             | 12     | <a href="https://doi.org/10.1007/s11837-015-1484-7">https://doi.org/10.1007/s11837-015-1484-7</a>           |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 600            | 501             | 26     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 700            | 487             | 18     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 800            | 535             | 27     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |
|                                                                                                             |                        |                                          |                                   | 1000           | -               | 92     |                                                                                                             |    |                                                                                                           |

| Alaşım ve mekanik test yönü | ret. Yn.    | Isıl/İkincil İşlem                   | Sapt. Fazlar         | Test Sıc. (°C)                    | Akma Day. (MPa)               | % Uza.                               | Ref DOI                                                                                                 |
|-----------------------------|---------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |               | 1220°C-20sa + 900°C-50sa yaş.        | YMK + $\gamma'$ k. | 25<br>600<br>700<br>800           | 596<br>509<br>486<br>581      | 20<br>27<br>11<br>9                  |                                                                                                         |
| AlCoCrFeNiTi (Basma)        | VIM           | -<br>1150°C-6sa<br>1100°C, % 47 dv. | -<br>-<br>-          | 1100                              | 125<br>133<br>159             | ~70<br>~67<br>~70                    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.231">https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.231</a> |
| CrFeCoNiMo0,2 (Basma)       | Gaz At. + SPS | -                                    | YMK                  | 700<br>800<br>900<br>1000<br>1100 | 250<br>220<br>100<br>50<br>30 | >~70<br>>~70<br>>~70<br>>~70<br>>~70 | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.064">https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.064</a>     |

EK-2 Veritabanı (Refrakter Metal İçeren RYEA ve KKA'lar)

| Alaşım ve mekanik test yönü                                                          | Üret. Yön. | Isıl/İkincil İşlem | Sapt. Fazlar        | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                   |      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----|
| AlCrMoNbTi (Basma)                                                                   | VAE + Dök. | -                  | HMK                 | 25             |                 | 0,1    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.050">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.050</a> |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 400            | 1080            | 2      |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            | 1060            | 2,5    |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            | 860             | 2      |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1000           | 594             | 15     |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1200           | 105             | 24     |                                                                                                           |      |    |
| AlMoNbTi (Basma)                                                                     | VAE        | -                  | HMK                 | 600            | 520             | -      | <a href="https://doi.org/10.1007/s11661-017-4386-1">https://doi.org/10.1007/s11661-017-4386-1</a>         |      |    |
| 800                                                                                  |            |                    |                     | ~510           |                 |        |                                                                                                           |      |    |
| 1000                                                                                 |            |                    |                     | ~530           |                 |        |                                                                                                           |      |    |
| 1200                                                                                 |            |                    |                     | ~100           |                 |        |                                                                                                           |      |    |
| AlCrMoTi (Basma)                                                                     |            |                    | HMK                 | 400            | ~1100           |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            | ~1000           |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            | ~900            |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1000           | ~400            |        |                                                                                                           |      |    |
| AlCrMoNbTi (Basma)                                                                   |            |                    | HMK                 | 1200           | ~70             |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            | ~950            |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            | ~900            |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1000           | ~600            |        |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            | 1200               | ~85                 |                |                 |        |                                                                                                           |      |    |
| Al <sub>15</sub> Cr <sub>28,33</sub> Mo <sub>28,33</sub> Ti <sub>28,33</sub> (Basma) | VAE        | -                  | HMK-A2              | 25             | -               | ~2.5   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153805">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153805</a> |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 400            |                 | ~2.5   |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            |                 | ~3     |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            |                 | ~6     |                                                                                                           |      |    |
| Al <sub>3</sub> Cr <sub>32,33</sub> Mo <sub>32,33</sub> Ti <sub>32,33</sub> (Basma)  |            |                    |                     | 25             |                 | ~5     |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 400            |                 | ~14    |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            |                 | ~13    |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            |                 | ~20    |                                                                                                           |      |    |
| AlNbTiV (Basma)                                                                      | VAE        | 1200°C-24sa        | HMK                 | 25             | 1000            | 5,2    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.224">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.224</a> |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            | 780             | 12,5   |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            | 560             | > 50   |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1000           | 110             | > 50   |                                                                                                           |      |    |
| 25                                                                                   |            |                    |                     | 1300           | 0,8             |        |                                                                                                           |      |    |
| 600                                                                                  |            |                    |                     | 1005           | 2,5             |        |                                                                                                           |      |    |
| 800                                                                                  |            |                    |                     | 640            | > 50            |        |                                                                                                           |      |    |
| 1000                                                                                 |            |                    |                     | 40             | > 50            |        |                                                                                                           |      |    |
| AlCr0,5NbTiV (Basma)                                                                 |            |                    | HMK + C14 Laves     | 25             | 1550            | 0,4    |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            | 1015            | 1,5    |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            | 860             | > 50   |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1000           | 65              | > 50   |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 25             | 1700            | 0      |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 600            | 1370            | 0,8    |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 800            | 970             | > 50   |                                                                                                           |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | 1000           | 75              | > 50   |                                                                                                           |      |    |
| AlCr1,0NbTiV (Basma)                                                                 | VAE        | 1200°C-24sa        | HMK + HSP C14 Laves | 25             | 1240            | 50     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.030">https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.030</a>   |      |    |
|                                                                                      |            |                    |                     | HMK            | 25              | 1340   |                                                                                                           | 18,5 |    |
|                                                                                      |            |                    |                     |                | 600             | 930    |                                                                                                           | 30   |    |
|                                                                                      |            |                    |                     |                | 800             | 445    |                                                                                                           | > 50 |    |
|                                                                                      |            |                    |                     |                |                 |        |                                                                                                           | 1000 | 90 |

| Alaşım ve mekanik test yönü        | Üret. Yön.           | Isıl/İkincil İşlem                     | Sapt. Fazlar    | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                   |
|------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AlHfNbTi (Basma)                   | VAE                  | 1200°C-24sa                            | HMK-B2          | 25             | 880             | > 50   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105322">https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105322</a>   |
|                                    |                      |                                        |                 | 600            | 635             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      | 600°C-24sa                             | HMK-B2 + O-Fazı | 25             | 1250            | 16     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 600            | 920             | > 50   |                                                                                                           |
| HfNbTaTiZr (Basma)                 | VAE                  | -                                      | HMK             | 25             | 1073            | > 50   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.064">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.064</a> |
| Al0,3HfNbTaTiZr (Basma)            |                      |                                        |                 | 25             | 1188            | > 50   |                                                                                                           |
| Al0,5HfNbTaTiZr (Basma)            |                      |                                        |                 | 25             | 1302            | 46     |                                                                                                           |
| Al0,75HfNbTaTiZr (Basma)           |                      |                                        |                 | 25             | 1415            | 30     |                                                                                                           |
| Al1,0HfNbTaTiZr (Basma)            |                      |                                        | HMK-1 + HMK-2   | 25             | 1489            | 21     |                                                                                                           |
| Al10Hf15Nb7Ti48Zr20 (Basma)        | VAE + % 30 Soğ. Döv. | 800°C-0,5sa                            | β fazı          | 25             | ~500            | 35     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138147">https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138147</a>       |
|                                    |                      | 900°C-0,5sa                            | β fazı          | 25             | ~750            | 40     |                                                                                                           |
| Al10Mo10Nb20Ti40V20 (Çekme)        | VAE                  | -                                      | HMK             | 25             | 900             | 50     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.054">https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.054</a>       |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 520             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 155             | > 50   |                                                                                                           |
| Al15Mo10Nb20Ti40V20 (Çekme)        |                      |                                        |                 | 25             | 971             | 50     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 550             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 160             | > 50   |                                                                                                           |
| Al20Mo10Nb20Ti30V20 (Çekme)        |                      |                                        |                 | 25             | 1187            | 10     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 624             | ~30    |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 180             | > 50   |                                                                                                           |
| AlMo0,5NbTa0,5TiZr (Basma)         | VAE                  | 1400°C-200MPa - 2sa HIP + 1400°C-24sa  | HMK-1 + HMK-2   | 25             | 2000            | 10     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.029">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.029</a> |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 1597            | 11     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 745             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1200           | 250             | > 50   |                                                                                                           |
| Al0,4Hf0,6NbTaTiZr (Basma)         |                      | 1400°C-200MPa - 2sa HIP + 1200°C-24sa  | HMK             | 25             | 1841            | 10     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 796             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 298             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1200           | 89              | > 50   |                                                                                                           |
| AlMo0,5NbTa0,5TiZr (Basma)         | VAE                  | 1400°C-207 MPa - 2sa HIP + 1400°C-24sa | HMK-1 + HMK-2   | 25             | 2000            | 10     | <a href="https://doi.org/10.1007/s11837-014-1066-0">https://doi.org/10.1007/s11837-014-1066-0</a>         |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 1597            | 11     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 745             | > 50   |                                                                                                           |
| AlNb1,5Ta0,5Ti1,5Zr0,5 (Basma)     |                      |                                        | HMK             | 25             | 1280            | 3,5    |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 728             | > 12   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 403             | > 50   |                                                                                                           |
| Al0,4Hf0,6NbTaTiZr (Basma)         |                      |                                        | HMK             | 25             | 1841            | 10     |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 796             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 298             | > 50   |                                                                                                           |
| Al0,3NbTaTi1,4Zr1,3 (Basma)        |                      |                                        | HMK-1 + HMK-2   | 25             | 1965            | 5      |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 362             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 236             | > 50   |                                                                                                           |
| Al0,3NbTa0,8Ti1,4V0,2Zr1,3 (Basma) |                      |                                        | HMK             | 25             | 1965            | 5      |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 800            | 678             | > 50   |                                                                                                           |
|                                    |                      |                                        |                 | 1000           | 166             | > 50   |                                                                                                           |

| Alaşım ve mekanik test yönü      | Üret. Yön.                | Isıl/İkincil İşlem                    | Sapt. Fazlar               | Test Sic. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                 |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Al0,5NbTa0,8Ti1,5V0, 2Zr (Basma) |                           |                                       | HMK-1 + HMK-2              | 25             | 2035            | 4,5    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 796             | > 50   |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 220             | > 50   |                                                                                                         |
| Al0,25MoNbTiV (Basma)            | VAE                       | -                                     | HMK                        | 25             | 1250            | 12,91  | <a href="https://doi.org/10.3390/e16020870">https://doi.org/10.3390/e16020870</a>                       |
| Al0,5MoNbTiV (Basma)             |                           |                                       |                            | 25             | 1625            | 11,25  |                                                                                                         |
| Al0,75MoNbTiV (Basma)            |                           |                                       |                            | 25             | 1260            | 7,5    |                                                                                                         |
| Al1,0MoNbTiV (Basma)             |                           |                                       |                            | 25             | 1375            | 2,5    |                                                                                                         |
| Al1,5MoNbTiV (Basma)             |                           |                                       | HMK + HMK-B2               | 25             | 500             | 1,3    |                                                                                                         |
| AlMo0,5NbTa0,5TiZr (Basma)       | VAE                       | 1400°C-207 MPa - 2sa HIP + 1400°C-6sa | HMK + B2 + HSP             | 25             | 2197            | 4,1    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.033">https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.033</a> |
| 1000                             |                           |                                       |                            | 745            | 1,9             |        |                                                                                                         |
| AlMo0,5NbTa0,5TiZr0,5 (Basma)    |                           |                                       | HMK-B2 + HSP               | 25             | -               | 1      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 935             | 2      |                                                                                                         |
| AlNbTa0,5TiZr0,5 (Basma)         |                           |                                       | HMK-B2                     | 25             | 1352            | 1,3    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 535             | 1,4    |                                                                                                         |
| Al0,5Mo0,5NbTa0,5Ti Zr (Basma)   |                           |                                       | HMK-B2 + HSP               | 25             | 2350            | 3,2    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 579             | 2      |                                                                                                         |
| Al0,25NbTaTiZr (Basma)           | HMK + HMK-B2              | 25                                    | 1745                       | 3,8            |                 |        |                                                                                                         |
|                                  |                           | 1000                                  | 366                        | 1,6            |                 |        |                                                                                                         |
| AlNbTiV (Basma)                  | VAE                       | 1200°C-24sa                           | HMK-B2                     | 25             | 1000            | 6      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.019">https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.019</a>     |
|                                  |                           |                                       |                            | 600            | 780             | 14,3   |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 560             | > 50   |                                                                                                         |
| AlNbTiVZr0,1 (Basma)             |                           |                                       | HMK-B2 +Zr5Al3             | 25             | 1290            | 3,7    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 600            | 975             | 5,1    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 865             | > 50   |                                                                                                         |
| AlNbTiVZr0,25 1 (Basma)          |                           |                                       | HMK-B2 +Zr5Al3             | 25             | 1360            | 9,3    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 600            | 1065            | 6,5    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 855             | > 50   |                                                                                                         |
| AlNbTiVZr0,5 (Basma)             |                           |                                       | HMK-B2 +Zr5Al3 + C14 Laves | 25             | 1485            | > 50   |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 600            | 1135            | 7,5    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 675             | > 50   |                                                                                                         |
| AlNbTiVZr (Basma)                |                           |                                       | HMK-B2 +Zr5Al3 + C14 Laves | 25             | 1500            | 3      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 600            | 1155            | 1      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 550             | > 50   |                                                                                                         |
| AlNbTiVZr1,25 (Basma)            |                           |                                       | HMK-B2 +Zr5Al3 + C14 Laves | 25             | 1535            | 0,4    |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 600            | 1195            | 0      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 180             | > 50   |                                                                                                         |
| Al0,5NbTa0,5TiZr (Basma)         | Toz Soğ. Pres + Sic. Sin. | 800°C Sıcak Dövme                     | HMK-1 + HMK-2              | 25             | 1310            | 34     | <a href="http://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.038">http://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.038</a>       |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 300             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 180             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1200           | 140             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           | 1200°C Sıcak Dövme                    | HMK + HSP                  | 25             | 1740            | 18     |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 590             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 200             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1200           | 145             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           | 1500°C Sıcak Dövme                    | HMK                        | 25             | 1500            | 22     |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 800            | 1100            | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1000           | 350             | -      |                                                                                                         |
|                                  |                           |                                       |                            | 1200           | 150             | -      |                                                                                                         |

| Alaşım ve mekanik test yönü                                                                 | ret. Yn.       | Isıl/İkincil İşlem      | Sapt. Fazlar           | Test Sic. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|----------------|-----------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NbTaTiV (Basma)                                                                             | MA + SPS         | -                       | HMK                    | 25             | 1391            | 15     | <a href="https://doi.org/10.3390/e22030282">https://doi.org/10.3390/e22030282</a>                                 |
| Al <sub>0,2</sub> NbTaTiV (Basma)                                                           |                  |                         |                        | 25             | 1835            | 10     |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 900            | 783             | > 30   |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 1000           | 350             | > 30   |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 1100           | 250             | > 30   |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 1200           | 142             | > 30   |                                                                                                                   |
| Al <sub>0,4</sub> NbTaTiV (Basma)                                                           |                  |                         |                        | 25             | 1719            | 9      |                                                                                                                   |
| Al <sub>0,6</sub> NbTaTiV (Basma)                                                           |                  |                         |                        | 25             | 1697            | 5,5    |                                                                                                                   |
| Al <sub>0,8</sub> NbTaTiV (Basma)                                                           | 25               | 1606                    | 5                      |                |                 |        |                                                                                                                   |
| AlNbTaTiV (Basma)                                                                           | VAE              | -                       | HMK                    | 25             | 1450            | 2,5    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.043">https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.043</a>           |
| NbTiVTa (Basma)                                                                             |                  |                         |                        | 25             | 1092            | 48     |                                                                                                                   |
| Al <sub>0,2</sub> NbTaTiV (Basma)                                                           |                  |                         |                        | 25             | 1330            | > 50   |                                                                                                                   |
| Al <sub>0,5</sub> NbTaTiV (Basma)                                                           |                  |                         |                        | 25             | 1012            | > 50   |                                                                                                                   |
| AlNbTaTiV (Basma)                                                                           | VAE              | 1200°C-24sa             | HMK                    | 25             | 991             | > 50   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.162">https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.162</a>           |
| AlNbTiV (Basma)                                                                             |                  |                         |                        | 25             | 1020            | 5      |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 600            | 810             | 12     |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 800            | 685             | -      |                                                                                                                   |
| Al <sub>10</sub> Nb <sub>15</sub> Ta <sub>5</sub> Ti <sub>30</sub> Zr <sub>40</sub> (Basma) | VIM + Dk.       | -                       |                        | 25             | 1076            | -      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100627">https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100627</a>               |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 600            | 973             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 800            | 124             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 25             | 1049            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  | 1100°C-24sa, su verme   | HMK + HMK-B2           | 250            | 913             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 400            | 852             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 500            | 993             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 600            | 1059            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 700            | 561             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 800            | 251             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 1000           | 45,5            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 1200           | 15,6            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  | 1100°C-24sa, yavaş soğ. | HMK + HMK-B2 +Ω k.   | 25             | 1098            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 600            | 1149            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         |                        | 800            | 270             |        |                                                                                                                   |
| CoCrMoNb (Basma)                                                                            | VAE              | -                       | HMK + HSP Laves        | 25             | -               | 5,77   | <a href="https://doi.org/10.1007/s11665-017-2799-z">https://doi.org/10.1007/s11665-017-2799-z</a>                 |
| CoCrMoNbTi <sub>0,2</sub> (Basma)                                                           |                  |                         |                        | 25             | -               | 5,07   |                                                                                                                   |
| CoCrMoNbTi <sub>0,4</sub> (Basma)                                                           |                  |                         | HMK                    | 25             | -               | 4,62   |                                                                                                                   |
| CoCrMoNbTi <sub>0,5</sub> (Basma)                                                           |                  |                         | HMK + HSP Laves        | 25             | -               | 4,92   |                                                                                                                   |
| CoCrMoNbTi (Basma)                                                                          |                  |                         |                        | 25             | -               | 3,88   |                                                                                                                   |
| CrTaWVTi (Basma)                                                                            | Toz karış. + SPS | -                       | HMK                    | 25             | 2327            | -      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.054">https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.054</a> |
| CrTaWVTi <sub>0,04</sub> (Basma)                                                            |                  |                         |                        | 1200           | 979             |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         | HMK + TaV <sub>2</sub> | 25             | ~2000           |        |                                                                                                                   |
| HMK + TaV <sub>2</sub>                                                                      |                  |                         |                        | 1200           | ~750            |        |                                                                                                                   |
|                                                                                             |                  |                         | HMK + TaV <sub>2</sub> | 25             | 2034            |        |                                                                                                                   |
| HMK + TaV <sub>2</sub>                                                                      |                  |                         |                        | 1200           | 586             |        |                                                                                                                   |

| Alaşım ve mekanik test yönü                                                                                   | ret. Yn. | Isıl/İkincil İşlem                     | Sapt. Fazlar                              | Test Sic. (°C)            | Akma Day. (MPa)             | % Uza.                       | Ref DOI                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CrHfNbTaTi (Basma)                                                                                            | VAE        | -                                      | HMK-1 + HMK-2 + Laves-1                   | 25                        | 1258                        | 24,3                         | <a href="https://doi.org/10.1007/s12613-020-2214-x">https://doi.org/10.1007/s12613-020-2214-x</a>   |
| CrHfMoTaTi (Basma)                                                                                            |            |                                        | HMK-1 + HMK-2 + HMK-3 + Laves-1 + Laves-2 | 25                        | 1051                        | 7,8                          |                                                                                                     |
| Cr <sub>20</sub> Nb <sub>20</sub> Mo <sub>10</sub> Ta <sub>10</sub> Ti <sub>20</sub> Zr <sub>20</sub> (Basma) | VAE        | 1500°C-207 MPa - 3sa HIP               | HMK-1 + HMK-2 + YMK Laves-1               | 25<br>800<br>1000<br>1200 | 1595<br>983<br>546<br>170   | 5<br>5,5<br>> 50<br>> 50     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.033">https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.033</a> |
| Cr5(TiMoNbW)23,75 (Basma)                                                                                     | MA + SPS   | -                                      | HMK + Laves                               | 25                        | -                           | 3,4                          | <a href="https://doi.org/10.1007/s11665-020-04744-7">https://doi.org/10.1007/s11665-020-04744-7</a> |
| Cr10(TiMoNbW)22,5 (Basma)                                                                                     |            |                                        |                                           | 25                        | -                           | 3,6                          |                                                                                                     |
| Cr15(TiMoNbW)21,5 (Basma)                                                                                     |            |                                        |                                           | 25                        | -                           | 4,6                          |                                                                                                     |
| Cr20(TiMoNbW)20 (Basma)                                                                                       |            |                                        |                                           | 25                        | -                           | 5,1                          |                                                                                                     |
| CrMoTaVW (Basma)                                                                                              | MA + VAE   | 900°C-48sa                             | HMK-1 + HMK-2 + Laves + Bilinme.          | 25                        | -                           | 6,2                          | <a href="https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.008">https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.008</a>   |
| NbTiVZr (Basma)                                                                                               | VAE        | 1200°C-207 MPa - 2sa HIP + 1200°C-24sa | HMK                                       | 25<br>600<br>800<br>1000  | 1105<br>834<br>187<br>58    | 50<br>> 50<br>> 50<br>> 50   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.018">https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.018</a> |
| Nb <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> V <sub>40</sub> Zr <sub>20</sub> (Basma)                                    |            |                                        |                                           | 25<br>600<br>800<br>1000  | 918<br>571<br>240<br>72     | 50<br>> 50<br>> 50<br>> 50   |                                                                                                     |
| CrNbTiZr (Basma)                                                                                              |            |                                        | HMK + Laves                               | 25<br>600<br>800<br>1000  | 1260<br>1035<br>300<br>115  | 6<br>> 50<br>> 50<br>> 50    |                                                                                                     |
| CrNbTiVZr (Basma)                                                                                             |            |                                        |                                           | 25<br>600<br>800<br>1000  | 1298<br>1230<br>615<br>259  | 3<br>> 50<br>> 50<br>> 50    |                                                                                                     |
| CrFeTa0,1W0,1V (Basma)                                                                                        |            |                                        | HMK                                       | 25<br>600<br>800<br>1000  | 1341<br>1234<br>1019<br>371 | 42,2<br>28,1<br>> 50<br>> 50 |                                                                                                     |
| CrFeTa0,2W0,2V (Basma)                                                                                        |            |                                        |                                           | 25<br>600<br>800<br>1000  | 1742<br>1657<br>1033<br>182 | 35,7<br>22,6<br>40,6<br>> 50 |                                                                                                     |
| VCrFeTa0,3W0,3 (Basma)                                                                                        |            |                                        |                                           | 25                        | -                           | -                            |                                                                                                     |
| VCrFeTa0,4W0,4 (Basma)                                                                                        |            |                                        |                                           | 25                        | 1580                        | -                            |                                                                                                     |

| Alaşım ve mekanik test y6n6                                 | Üret. Yön. | Isıl/İkincil İşlem | Sapt. Fazlar                | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------|------------|--------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VCrFeTaW (Basma)                                            |            |                    | HMK-1 +<br>HMK-2 +<br>Laves | 25             | -               | -      |                                                                                                         |
| Mo <sub>12</sub> NbTi <sub>18</sub> (Basma)                 | VAE        | -                  | HMK                         | 25             | 719             | 50     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105221">https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105221</a> |
|                                                             |            |                    |                             | 600            | 350             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 311             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 250             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 161             | > 50   |                                                                                                         |
| Mo <sub>14</sub> NbTi <sub>18</sub> (Basma)                 |            |                    |                             | 25             | 780             | 50     |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 600            | 390             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 329             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 270             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 183             | > 50   |                                                                                                         |
| Fe <sub>2</sub> Mo <sub>12</sub> NbTi <sub>18</sub> (Basma) |            |                    |                             | 25             | 1090            | 50     |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 600            | 706             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 758             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 456             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 188             | > 50   |                                                                                                         |
| Fe <sub>2</sub> Mo <sub>14</sub> NbTi <sub>18</sub> (Basma) |            |                    |                             | 25             | 974             | 30     |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 600            | 589             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 522             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 445             | > 50   |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 213             | > 50   |                                                                                                         |
| HfMoNbTaTiZr (Basma)                                        | VAE        | -                  | HMK                         | 25             | 1512            | 12     | <a href="https://doi.org/10.3390/e21010015">https://doi.org/10.3390/e21010015</a>                       |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 1007            | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 814             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 556             | -      |                                                                                                         |
| HfMoTaTiZr (Basma)                                          |            |                    |                             | 25             | 1600            | 4      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 1045            | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 855             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 404             | -      |                                                                                                         |
| HfMoNbTiZr (Basma)                                          |            |                    |                             | 25             | 1351            | 20     |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 829             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 721             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 301             | -      |                                                                                                         |
| HfMoNbTaZr (Basma)                                          |            |                    |                             | 25             | 1524            | 16     |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 1005            | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 927             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 694             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1400           | 278             | -      |                                                                                                         |
| HfMoNbTaTi (Basma)                                          |            |                    |                             | 25             | 1369            | 27     |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 800            | 822             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1000           | 778             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1200           | 699             | -      |                                                                                                         |
|                                                             |            |                    |                             | 1400           | 367             | -      |                                                                                                         |
| HfNbTaTiZr (Basma)                                          | VAE        | -                  | HMK                         | 25             | 1015            | > 50   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.133">https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.133</a> |
| HfMo <sub>0,25</sub> NbTaTiZr (Basma)                       |            |                    |                             | 25             | 112             | > 50   |                                                                                                         |
| HfMo <sub>0,5</sub> NbTaTiZr (Basma)                        |            |                    |                             | 25             | 1317            | > 50   |                                                                                                         |
| HfMo <sub>0,75</sub> NbTaTiZr (Basma)                       |            |                    |                             | 25             | 1373            | > 50   |                                                                                                         |

| Alaşım ve mekanik test yönü   | ret. Yn.     | Isıl/İkincil İşlem       | Sapt. Fazlar                         | Test Sıc. (°C)                                 | Akma Day. (MPa)                                 | % Uza.                                                | Ref DOI                                                                                                     |
|-------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HfMoNbTaTiZr (Basma)          |                |                          |                                      | 25                                             | 1512                                            | 12                                                    |                                                                                                             |
| HfNbTaTiZr (Basma)            | VAE            | 1200°C-207 MPa - 2sa HIP | HMK                                  | 25<br>800<br>1000<br>1200                      | 929<br>535<br>295<br>92                         | 50<br>-<br>-<br>-                                     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.171">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.171</a>   |
| HfMoTaTiZr (Basma)            | VAE            | -                        | HMK                                  | 25<br>800<br>1000<br>1200                      | 1600<br>1045<br>855<br>404                      | 4<br>19<br>> 30<br>> 30                               | <a href="https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.03.013">https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.03.013</a> |
| HfMoNbTaTiZr (Basma)          |                |                          |                                      | 25<br>800<br>1000<br>1200                      | 1512<br>1007<br>814<br>556                      | 12<br>23<br>> 30<br>> 30                              |                                                                                                             |
| HfMo0,5NbTiV0,5Si (Basma)     |                |                          |                                      | 25<br>1000<br>1200                             | 1260<br>368<br>60                               | 35<br>> 35<br>> 35                                    |                                                                                                             |
| HfMo0,5NbTiV0,5Si0,3 (Basma)  |                |                          | HMK + M <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> | 25<br>1000<br>1200                             | 1617<br>398<br>166                              | 18,5<br>> 35<br>> 35                                  | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.014">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.014</a>   |
| HfMo0,5NbTiV0,5Si0,5 (Basma)  |                |                          |                                      | 25<br>1000<br>1200                             | 1787<br>614<br>188                              | 11,9<br>> 35<br>> 35                                  |                                                                                                             |
| HfMo0,5NbTiV0,5Si0,7 (Basma)  |                |                          |                                      | 25<br>1000<br>1200                             | 2134<br>673<br>235                              | 9,2<br>> 35<br>> 35                                   |                                                                                                             |
| HfMoNbZrSi (Basma)            | VAE            | 1100°C-10sa              | HMK                                  | 25<br>25<br>800<br>900<br>1000<br>1100<br>1200 | 1719<br>1575<br>825<br>728<br>635<br>397<br>187 | 10,12<br>9,08<br>> 60<br>> 60<br>> 60<br>> 60<br>> 60 | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.019">https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.019</a>     |
| Mo0,5NbHf0,5ZrTi (Basma)      | VAE            | -                        | HMK                                  | 25                                             | ~1120                                           | ~24                                                   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.091">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.091</a>   |
| Mo0,5NbHf0,5ZrTiSi0,1 (Basma) |                |                          |                                      | 25                                             | ~1360                                           | ~28                                                   |                                                                                                             |
| Mo0,5NbHf0,5ZrTiSi0,3 (Basma) |                |                          | HMK + M5Si                           | 25                                             | ~1400                                           | ~23                                                   |                                                                                                             |
| Mo0,5NbHf0,5ZrTiSi0,5 (Basma) |                |                          |                                      | 25                                             | ~1600                                           | ~22                                                   |                                                                                                             |
| Mo0,5NbHf0,5ZrTiSi0,7 (Basma) |                |                          |                                      | 25                                             | ~1610                                           | ~12                                                   |                                                                                                             |
| Mo0,5NbHf0,5ZrTiSi0,9 (Basma) |                |                          |                                      | 25                                             | ~1670                                           | ~9                                                    |                                                                                                             |
| HfNbTiVSi0,5 (Basma)          | Ind. Lev. Erg. | -                        | HMK + Silisit                        | 25<br>800<br>1000                              | 1399<br>875<br>240                              | 10,9<br>> 50<br>> 50                                  | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.092">https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.092</a>     |
| HfNbSi0,5TiVZr (Basma)        | Ind. Lev. Erg. | -                        | HMK + Silisit                        | 25<br>400<br>800                               | 1540<br>920<br>371                              | 16,8<br>> 50<br>> 50                                  | <a href="https://doi.org/10.4028/www.sci">https://doi.org/10.4028/www.sci</a>                               |

| Alaşım ve mekanik test y6n6 | Üret. Yön.      | Isıl/İkincil İşlem                                                                             | Sapt. Fazlar                            | Test Sic. (°C)                         | Akma Day. (MPa)                 | % Uza.                               | Ref DOI                                       |  |
|-----------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|--|
|                             |                 | 1100°C-4sa                                                                                     |                                         | 25<br>400<br>600<br>800                | 1483<br>1273/1187<br>597<br>102 | 9,5<br>14,5<br>> 50<br>> 50          | entific.net/MSF.849.76                        |  |
| HfNbTaZr (Basma)            | VAE             | -<br>1800°C-6sa<br>1800°C-12sa<br>1800°C-1 gün<br>1800°C-2 gün<br>1800°C-4 gün<br>1800°C-8 gün | HMK<br><br><br><br><br>HMK + HSP β fazı | 25<br>25<br>25<br>25<br>25<br>25<br>25 | 1315<br><br><br><br><br><br>    | ~35<br>~8<br><br>~6<br><br>~7<br>~13 | https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.018 |  |
| HfNbTaTiZr (Basma)          | VAE + Ind. Erg. | -                                                                                              | -                                       | 25                                     | 810                             | ~8-10                                | https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.017    |  |
| HfNbTiZrO (Basma)           | VAE + Soğ. Döv. | 1000°C-0,5sa                                                                                   | HMK                                     | 25                                     | ~600                            | ~23                                  | https://doi.org/10.3389/fmats.2020.589052     |  |
| HfNbTiZrO0,5 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~785                            | ~21                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO1,0 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~860                            | ~23                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO1,5 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~950                            | ~24                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO2,0 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~1040                           | ~24                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO (Basma)           |                 | 1000°C-0,5sa + 600°C-100sa yaş.                                                                |                                         | 25                                     | ~600                            | ~24                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO0,5 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~750                            | ~17                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO1,0 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~850                            | ~15                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO1,5 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~920                            | ~15                                  |                                               |  |
| HfNbTiZrO2,0 (Basma)        |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | ~1000                           | ~16                                  |                                               |  |
| HfNb0,5TiV0,5Zr (Basma)     | VAE             | -                                                                                              | HMK                                     | 25<br>800                              | 990<br>125                      | > 50<br>> 50                         | https://doi.org/10.3390/ma11020208            |  |
| HfNb2,0TiVZr2,0 (Basma)     |                 |                                                                                                |                                         | 25<br>800                              | 956<br>507                      | > 50<br>> 50                         |                                               |  |
| HfMo0,5Nb0,5TiZr (Basma)    |                 |                                                                                                |                                         | 25<br>800                              | 1195<br>595                     | > 50<br>> 50                         |                                               |  |
| HfNb0,5Ta0,5TiZr (Basma)    |                 |                                                                                                |                                         | 25<br>800                              | 738<br>193                      | > 50<br>> 50                         |                                               |  |
| HfNbTaTiZr (Basma)          |                 |                                                                                                |                                         | 25                                     | 1155                            | 12,3                                 |                                               |  |
| NbTaTiZr (Basma)            | VAE             | -                                                                                              | HMK-1 + HMK-2                           | 25                                     | 1144                            | 6,4                                  | https://doi.org/10.3390/e21020114             |  |
| NbTaTi (Basma)              |                 |                                                                                                | HMK                                     | 25                                     | 620                             | 18,5                                 |                                               |  |
| TaTiZr (Basma)              |                 |                                                                                                | HMK-1 + HMK-2                           | 25                                     | -                               | 0                                    |                                               |  |
| NbTiZr (Basma)              |                 |                                                                                                | HMK                                     | 25                                     | 956                             | 14,2                                 |                                               |  |
| Nb1,5TaTiZr0,5 (Basma)      |                 |                                                                                                | HMK-1 + HMK-2 + HMK-3                   | 25                                     | 822                             | 0,33                                 |                                               |  |
| Nb0,5TaTiZr1,5 (Basma)      |                 |                                                                                                | HMK-1 + HMK-2 + HMK-3                   | 25                                     | -                               | 0                                    |                                               |  |

| Alaşım ve mekanik test yönü    | Üret. Yön.      | Isıl/İkincil İşlem     | Sapt. Fazlar   | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                   |
|--------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HfNbTaTiZr (Basma)             | VAE             | -                      | HMK            | 25             | 929             | 50     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.138">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.138</a> |
|                                |                 |                        |                | 800            | 535             | > 50   |                                                                                                           |
|                                |                 |                        |                | 1000           | 295             | > 50   |                                                                                                           |
|                                |                 |                        |                | 1200           | 92              | > 50   |                                                                                                           |
| HfNbTaTiWZr (Basma)            | VAE             | -                      | HMK-1 + HMK-2  | 25             | 1550            | 26,3   | <a href="https://doi.org/10.1007/s10853-012-6260-2">https://doi.org/10.1007/s10853-012-6260-2</a>         |
| 800                            |                 |                        |                | 577            | > 35            |        |                                                                                                           |
| 1000                           |                 |                        |                | 409            | > 35            |        |                                                                                                           |
| 1200                           |                 |                        |                | 345            | > 35            |        |                                                                                                           |
| HfMoNbTaTiWZr (Basma)          |                 |                        |                | 25             | 1637            | 15,3   |                                                                                                           |
| 800                            |                 |                        |                | 1065           | > 35            |        |                                                                                                           |
| 1000                           |                 |                        |                | 736            | > 35            |        |                                                                                                           |
| 1200                           |                 |                        |                | 703            | > 35            |        |                                                                                                           |
| HfNbTaZrTi (Çekme)             | VAE + Soğ. Döv. | Final Grain Size 40µm  | HMK            | 25             | 985             | 15,7   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.291">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.291</a> |
|                                |                 | Final Grain Size 80µm  |                | 25             | 972             | 12,6   |                                                                                                           |
|                                |                 | Final Grain Size 100µm |                | 25             | 967             | 10,8   |                                                                                                           |
| HfNbTiVZr (Basma)              | VAE             | -                      | HMK + Bilinme. | 25             | 1170            | 29,6   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.07.009">https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.07.009</a>   |
|                                |                 | 300°C-600s             | HMK            | 25             | 1120            | 30     |                                                                                                           |
|                                |                 | 500°C-600s             |                | 25             | 1253            | 38     |                                                                                                           |
|                                |                 | 700°C-600s             |                | 25             | 1140            | 29,7   |                                                                                                           |
|                                |                 | 900°C-600s             | HMK + V2M      | 25             | 1157            | 39,6   |                                                                                                           |
| CrHfNbTiZr (Basma)             |                 | -                      | HMK + L1 + L2  | 25             | 1375            | 2,8    |                                                                                                           |
|                                |                 | 300°C-600s             |                | 25             | 1420            | 4,2    |                                                                                                           |
|                                |                 | 500°C-600s             |                | 25             | 1457            | 2,2    |                                                                                                           |
|                                |                 | 700°C-600s             |                | 25             | 1322            | 1,4    |                                                                                                           |
|                                |                 | 900°C-600s             |                | 25             | 1328            | 4,5    |                                                                                                           |
| HfNbTiZr (Çekme)               | VAE             | 1300°C-6sa             | HMK            | 25             | 879             | 14,9   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.134">https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.134</a>   |
| Hf0,5Nb0,5Ta0,5Ti1,5Zr (Çekme) | VAE             | -                      | HMK            | 25             | 903             | 18,8   | <a href="http://dx.doi.org/10.1063/1.4966659">http://dx.doi.org/10.1063/1.4966659</a>                     |
| HfTaTiZr (Çekme)               | VAE             | -                      | HMK            | 25             | -               | 4      | <a href="https://doi.org/10.1002/adma.201701678">https://doi.org/10.1002/adma.201701678</a>               |
| HfTiZ25a0,4 (Çekme)            |                 |                        | HMK + HSP      | 25             | -               | 27     |                                                                                                           |
| HfTiZZrTa0,5 (Çekme)           |                 |                        | 25             | -              | 27              |        |                                                                                                           |
| HfTiZrTa0,6 (Çekme)            |                 |                        | HMK            | 25             | -               | 20     |                                                                                                           |
| Hf0,5TiV2Zr (Basma)            | VAE             | -                      | HMK            | 25             | 1160            | > 50   | <a href="https://doi.org/10.1007/s40195-">https://doi.org/10.1007/s40195-</a>                             |
|                                |                 |                        |                | 60             | 405             |        |                                                                                                           |
|                                |                 |                        |                | 800            | 85              |        |                                                                                                           |

| Alaşım ve mekanik test yönü | Üret. Yön.                                                                 | Isıl/İkincil İşlem | Sapt. Fazlar                         | Test Sic. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                         |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hf0,5TiV2ZrNb0,25 (Basma)   |                                                                            |                    |                                      | 25             | 1115            | > 50   | 019-00921-3                                                                                                     |
| Hf0,5TiV2ZrNb0,5 (Basma)    |                                                                            |                    |                                      | 60             |                 |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            |                 |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 25             | 1065            | > 50   |                                                                                                                 |
| Hf0,5TiV2ZrNb0,75 (Basma)   |                                                                            |                    |                                      | 60             | 718             |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            | 135             |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 25             | 1025            | > 50   |                                                                                                                 |
| Hf0,5TiV2ZrNb1,0 (Basma)    |                                                                            |                    |                                      | 60             |                 |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            |                 |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 25             | 980             | > 50   |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 60             | 859             |        |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            | 195             |        |                                                                                                                 |
|                             | Hf <sub>24</sub> Nb <sub>23</sub> Ti <sub>38</sub> V <sub>15</sub> (Çekme) | VAE                | -                                    | HMK            | 25              | 800    | 21,6                                                                                                            |
|                             | 1100°C-10sa                                                                | 25                 | 802                                  |                | 22,5            |        |                                                                                                                 |
| HfNbTiV (Çekme)             | -                                                                          | 25                 | 1004                                 |                | 16,1            |        |                                                                                                                 |
| HfTiZr (Basma)              | VAE                                                                        | -                  | HSP                                  | 25             | 773             | 17     | <a href="https://doi.org/10.1007/s00339-019-2484-1">https://doi.org/10.1007/s00339-019-2484-1</a>               |
| HfTiZrSc (Basma)            |                                                                            |                    | HSP-1 + HSP-2                        | 25             | 1001            | 21,9   |                                                                                                                 |
| HfTiZrY (Basma)             |                                                                            |                    | HSP + α (Y) fazı                     | 25             | 554             | 17,7   |                                                                                                                 |
| HfTiZrScY (Basma)           |                                                                            |                    | HSP-1 + HSP-2 + α (Y) fazı           | 25             | 793             | 15,7   |                                                                                                                 |
| MoNbTiV (Basma)             | VAE                                                                        | -                  | HMK                                  | 25             | 1141,5          | 24,7   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.050">https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.050</a>             |
| MoNbSi0,1TiV (Basma)        |                                                                            |                    |                                      | 25             | ~1560           | ~20,5  |                                                                                                                 |
| MoNbSi0,2TiV (Basma)        |                                                                            |                    | HMK + M <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> | 25             | ~1750           | ~16    |                                                                                                                 |
| MoNbSi0,3TiV (Basma)        |                                                                            |                    |                                      | 25             | ~2050           | ~11,5  |                                                                                                                 |
| MoNbSi0,4TiV (Basma)        |                                                                            |                    |                                      | 25             | 2093,1          | 11     |                                                                                                                 |
| MoNbTaV (Basma)             | VAE                                                                        | -                  | HMK                                  | 25             | 1500            | 0,3    | <a href="https://doi.org/10.3390/e18050189">https://doi.org/10.3390/e18050189</a>                               |
| MoNbTaV (Basma)             | VAE                                                                        | -                  | HMK                                  | 25             | 1256            | 25     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.09.027">https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.09.027</a> |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            | 880             | -      |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 1000           | 811             | ~40    |                                                                                                                 |
| MoNbTaWV (Basma)            | VAE                                                                        | -                  | HMK                                  | 25             | 1246            | 0,5    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.01.004">https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.01.004</a>     |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 600            | 862             | 13     |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            | 846             | 16     |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 1000           | 842             | 14     |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 1200           | 735             | 4,2    |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 1400           | 656             | 1,6    |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 1600           | 477             | 0,95   |                                                                                                                 |
| MoNbTaW (Basma)             |                                                                            |                    |                                      | 25             | 1058            | 1,5    |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 600            | 561             | -      |                                                                                                                 |
|                             |                                                                            |                    |                                      | 800            | 552             | -      |                                                                                                                 |

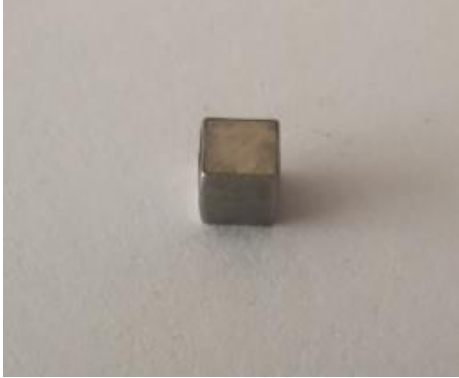
| Alaşım ve mekanik test y6n6                                                        | 6ret. Y6n. | Isıl/İkincil İşlem | Sapt. Fazlar | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|--------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                    |            |                    |              | 1000           | 548             | 16     |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 1200           | 506             | 12     |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 1400           | 421             | 9      |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 1600           | 405             | 27     |                                                                                                                             |
| Nb <sub>15,7</sub> Mo <sub>35</sub> Ta <sub>34,95</sub> W <sub>14,35</sub> (Basma) | VAE        | -                  | HMK          | 25             | 919             | 2,2    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105370">https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105370</a>                     |
| Nb <sub>35</sub> Mo <sub>5</sub> Ta <sub>35</sub> W <sub>25</sub> (Basma)          |            |                    |              | 25             | 705             | 1,2    |                                                                                                                             |
| Nb <sub>35</sub> Mo <sub>25</sub> Ta <sub>5</sub> W <sub>35</sub> (Basma)          |            |                    |              | 25             | 940             | 6,3    |                                                                                                                             |
| Nb <sub>25</sub> Mo <sub>35</sub> Ta <sub>35</sub> W <sub>5</sub> (Basma)          |            |                    |              | 25             | 777             | 1,2    |                                                                                                                             |
| Nb <sub>25</sub> Mo <sub>25</sub> Ta <sub>25</sub> W <sub>25</sub> (Basma)         |            |                    |              | 25             | 1058            | 6      |                                                                                                                             |
| MoNbTaTiW (Basma)                                                                  | VAE        | -                  | HMK          | 25             | ~1500           | ~13    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157542">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157542</a>                   |
|                                                                                    |            | 1100°C-10sa        |              | 25             | ~1450           | ~8     |                                                                                                                             |
| MoNbTaTiW (Basma)                                                                  | VAE        | -                  | HMK          | 25             | 1343            | 14,1   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.01.007">https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.01.007</a>                 |
|                                                                                    |            |                    |              | 600            | 689             | 35,4   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 800            | 674             | 46,6   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 1000           | 620             | 35,5   |                                                                                                                             |
| 1200                                                                               |            |                    |              | 586            | 10,2            |        |                                                                                                                             |
| MoNbTaTiV (Basma)                                                                  |            |                    |              | 25             | 1515            | 10,6   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 600            | 973             | 18,8   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 800            | 791,3           | 9,4    |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 1000           | 752,8           | 23,7   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            |                    |              | 1200           | 659             | 8,4    |                                                                                                                             |
| MoNbTiV (Basma)                                                                    | VAE        | -                  | HMK          | 25             | 1200            | 25,62  | <a href="https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.043">https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.043</a>                     |
| MoNbReTaW (Basma)                                                                  | VAE        | -                  | HMK          | 25             | 1000            | 1,7    | <a href="https://doi.org/10.1007/s11665-019-04540-y">https://doi.org/10.1007/s11665-019-04540-y</a>                         |
|                                                                                    |            | 400°C-12sa         |              | 25             | 1225            | 4,25   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            | 600°C-12sa         |              | 25             | 1272            | 4,84   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            | 800°C-12sa         |              | 25             | 1304            | 4,96   |                                                                                                                             |
|                                                                                    |            | 1000°C-12sa        |              | 25             | 1290            | 8,11   |                                                                                                                             |
| MoTaTiV (Basma)                                                                    | VAE        | -                  | HMK          | 25             | 1221            | 9,93   | <a href="https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.638">https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.638</a> |
| MoTaTiVAl0,2 (Basma)                                                               |            |                    |              | 25             | 1021            | 6,81   |                                                                                                                             |
| MoTaTiVAl0,6 (Basma)                                                               |            |                    |              | 25             | 962             | 4,2    |                                                                                                                             |
| MoTaTiVAl (Basma)                                                                  |            |                    |              | 25             | -               | -      |                                                                                                                             |
| Mo0,5NbHf0,5Z25i (Basma)                                                           | VAE        | -                  | HMK          | 25             | 1176            | 24,61  | <a href="https://doi.org/10.1016/j.interme">https://doi.org/10.1016/j.interme</a>                                           |
| Mo0,5NbHf0,5Z25iC0,1 (Basma)                                                       |            |                    |              | 25             | 1183            | 38,39  |                                                                                                                             |

| Alaşım ve mekanik test yn  | ret. Yn. | Isıl/İkincil İşlem | Sapt. Fazlar          | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                       |
|------------------------------|------------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------|
| Mo0,5NbHf0,5Z25iC0,3 (Basma) |            |                    |                       | 25             | 1201            | 32,62  | t.2015.09.011                                 |
| NbTiVZr (Basma)              | VAE        | -                  | HMK                   | 25             | 1104            | 50     | https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.072  |
| Mo0,3NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1289            | 42     |                                               |
| Mo0,5NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1473            | 32     |                                               |
| Mo0,7NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1706            | 32     |                                               |
| Mo1,0NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1179            | 32     |                                               |
| Mo1,3NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1496            | 30     |                                               |
| Mo1,5NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1603            | 20     |                                               |
| Mo1,7NbTiVZr (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1645            | 15     |                                               |
| Mo2,0NbTiVZr (Basma)         |            |                    | HMK + HMK-B2          | 25             | 1765            | 12     |                                               |
| NbTiV0,3Zr (Basma)           |            |                    | HMK                   | 25             | 866             | 45     |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo0,1 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 932             | 45     |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo0,3 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 1312            | 50     |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo0,5 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 1301            | 43     |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo0,7 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 1436            | 26,6   |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo1,0 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 1455            | 25     |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo1,3 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 1603            | 20     |                                               |
| NbTiV0,3ZrMo1,5 (Basma)      |            |                    |                       | 25             | 1576            | 8      |                                               |
| MoNbTiZr (Basma)             | VAE        | -                  | HMK                   | 25             | 1500            | 33     | https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5     |
| MoNbTiZrV0,25 (Basma)        |            |                    |                       | 25             | 1800            | 30     |                                               |
| MoNbTiZrV0,50 (Basma)        |            |                    |                       | 25             | 1600            | 28     |                                               |
| MoNbTiZrV0,75 (Basma)        |            |                    |                       | 25             | 1700            | 29     |                                               |
| MoNbTiZrV1,0 (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1800            | 25     |                                               |
| MoNbTiZrV1,5 (Basma)         |            |                    |                       | 25             | 1750            | 20     |                                               |
| MoNbTiZrV2 (Basma)           |            |                    |                       | 25             | 1500            | 24     |                                               |
| MoNbTiZrV3 (Basma)           |            |                    | HMK + $\beta$ Zr fazı | 25             | 1400            | 25     |                                               |
| MoNbTaW (Basma)              | MA + SPS   | -                  | YMK + HMK             | 800            | 1630            | 24     | https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153423 |
| NbMoTa (Basma)               |            | -                  | HMK                   | 25             | 874             | 5,8    |                                               |

| Alaşım ve mekanik test yönü                                                                        | ret. Yn. | Isıl/İkincil İşlem       | Sapt. Fazlar              | Test Sic. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------|---------------------------|----------------|-----------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NbMoTa (Basma)                                                                                     | Laz. Yığma |                          |                           | 1000           | 530             | 8,5    | <a href="https://doi.org/10.3390/ma12030533">https://doi.org/10.3390/ma12030533</a>                         |
| NbMoTaW0,16 (Basma)                                                                                |            |                          |                           | 25             | 840             | -      |                                                                                                             |
| NbMoTaW0,33 (Basma)                                                                                |            |                          |                           | 25             | 895             | -      |                                                                                                             |
| NbMoTaW0,53 (Basma)                                                                                |            |                          |                           | 25             | 890             | -      |                                                                                                             |
| MoNbTaW (Basma)                                                                                    | VAE        | -                        | HMK                       | 25             | 996             | 1,9    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.004">https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.004</a>         |
| Ti0,25NbMoTaW (Basma)                                                                              |            |                          |                           | 25             | 1109            | 2,5    |                                                                                                             |
| Ti0,5NbMoTaW (Basma)                                                                               |            |                          |                           | 25             | 1211            | 5,9    |                                                                                                             |
| Ti0,75NbMoTaW (Basma)                                                                              |            |                          |                           | 25             | 1304            | 8,4    |                                                                                                             |
| TiNbMoTaW (Basma)                                                                                  |            |                          |                           | 25             | 1455            | 11,5   |                                                                                                             |
| MoNbTaWCr (Basma)                                                                                  | VAE        | -                        | HMK                       | 25             | 1056            | 4,6    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106928">https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106928</a> |
| MoNbTaWZr (Basma)                                                                                  |            |                          |                           | 25             | 1480            | 15,9   |                                                                                                             |
| MoNbTaWV (Basma)                                                                                   |            |                          |                           | 25             | 1460            | 8,8    |                                                                                                             |
| MoNbTaWHf (Basma)                                                                                  |            |                          |                           | 25             | 1252            | 5,7    |                                                                                                             |
| MoNbTaWRe (Basma)                                                                                  |            |                          |                           | 25             | 1147            | 4,2    |                                                                                                             |
| MoNbTiVW (Basma)                                                                                   |            |                          |                           | 25             | 1289            |        |                                                                                                             |
| Mo <sub>22,5</sub> Nb <sub>22,5</sub> V <sub>22,5</sub> W <sub>22,5</sub> Ti <sub>10</sub> (Basma) | VAE        | -                        | HMK                       | 25             | -               |        | <a href="https://doi.org/10.3390/met10111530">https://doi.org/10.3390/met10111530</a>                       |
| MoNbVW (Basma)                                                                                     |            |                          |                           | 25             | 1243            |        |                                                                                                             |
| MoNbTiV (Basma)                                                                                    |            |                          |                           | 25             | 1210            |        |                                                                                                             |
| Mo <sub>30</sub> Nb <sub>30</sub> V <sub>30</sub> Ti <sub>10</sub> (Basma)                         |            |                          |                           | 25             | 1441            |        |                                                                                                             |
| NbTaTi (Basma)                                                                                     | VAE        | 1400°C-210 MPa - 4sa HIP | HMK                       | 25             | 724             | 35,4   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158003">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158003</a>   |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 400            | 469             | 16,5   |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 341             | 17,1   |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 800            | 268             | 12,2   |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 1000           | 201             | 3,5    |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 1200           | 129             | 2,3    |                                                                                                             |
| NbTaZr (Basma)                                                                                     |            |                          | HMK-1 + HMK-2 + YMK + HSP | 25             | 1027            | 16,9   |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 400            | 865             | 9,2    |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 795             | 12,8   |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 800            | 530             | 10,1   |                                                                                                             |
|                                                                                                    | 1000       | 319                      | 2,9                       |                |                 |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    | 1200       | 162                      | 1,8                       |                |                 |        |                                                                                                             |
| NbTaTi (Basma)                                                                                     | VAE        | 1400°C-7sa               | HMK                       | 25             | 573             | -      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006</a>   |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 220             |        |                                                                                                             |
| AlNbTaTi (Basma)                                                                                   |            |                          |                           | 25             | 1151            |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 680             |        |                                                                                                             |
| HfNbTaTi (Basma)                                                                                   |            |                          |                           | 25             | 834             |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 472             |        |                                                                                                             |
| MoNbTaTi (Basma)                                                                                   |            |                          |                           | 25             | 1211            |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 592             |        |                                                                                                             |
| NbTaTiW (Basma)                                                                                    |            |                          |                           | 25             | 1056            |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 596             |        |                                                                                                             |
| CrMoNbTi (Basma)                                                                                   |            |                          |                           | 25             | 1631            |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    |            |                          |                           | 600            | 1062            |        |                                                                                                             |
| CrMoTaTi (Basma)                                                                                   | 25         | 1795                     |                           |                |                 |        |                                                                                                             |
|                                                                                                    | 600        | 1166                     |                           |                |                 |        |                                                                                                             |

| Alaşım ve mekanik test yönü | Üret. Yön. | Isıl/İkincil İşlem                  | Sapt. Fazlar | Test Sıc. (°C) | Akma Day. (MPa) | % Uza. | Ref DOI                                                                                             |
|-----------------------------|------------|-------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NbTaTiW (Basma)             | VAE        | -                                   | HMK          | 25             | 965             | > 50   | <a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.102">https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.102</a> |
| NbTaWV (Basma)              |            |                                     |              | 25             | 1530            | 13     |                                                                                                     |
| NbTaTiWV (Basma)            |            |                                     |              | 25             | 1420            | 20     |                                                                                                     |
| NbTaTiV (Basma)             | VAE        | 1200°C-3 gün                        | HMK          | 25             | 1064            | -      | <a href="https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz4748">https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz4748</a>         |
|                             |            |                                     |              | 500            | 678             |        |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 700            | 630             |        |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 900            | 595             |        |                                                                                                     |
| NbTiV (Basma)               | VAE        | 1200°C-1sa + 500°C 0,5sa yaşlandır. |              | 25             | 920             | 50     | <a href="https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00172">https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00172</a>     |
|                             |            |                                     |              | 600            | 650             | 25     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 800            | 320             | 43     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 1000           | 90              | > 50   |                                                                                                     |
| Nb0.5TiVZr (Basma)          |            |                                     |              | 25             | 1000            | 50     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 600            | 700             | 48     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 800            | 325             | 45     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 1000           | 150             | > 50   |                                                                                                     |
| NbTiVZr (Basma)             |            |                                     |              | 25             | 950             | 49     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 600            | 850             | 37     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 800            | 750             | 40     |                                                                                                     |
|                             |            |                                     |              | 1000           | 450             | > 50   |                                                                                                     |

EK-3 Basma Testi Sonrası Deforme Olan Numunelere Ait Görüntüler

|           |                                                                                     |                                                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Numune    | RYEA-1                                                                              | KKA-1                                                                                |
| Test Sıc. | Oda Sıcaklığı                                                                       | Oda Sıcaklığı                                                                        |
|           |    |    |
| Numune    | RYEA-2                                                                              | CM247LC                                                                              |
| Test Sıc. | Oda Sıcaklığı                                                                       | Oda Sıcaklığı                                                                        |
|           |   |   |
| Numune    | Inconel 718                                                                         | RYEA-1_HT                                                                            |
| Test Sıc. | Oda Sıcaklığı                                                                       | Oda Sıcaklığı                                                                        |
|           |  |  |

|           |                                                                                     |                                                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Numune    | KKA-1_HT                                                                            | RYEA-2_HT                                                                            |
| Test Sic. | Oda Sıcaklığı                                                                       | Oda Sıcaklığı                                                                        |
|           |    |    |
| Numune    | RYEA-1                                                                              | KKA-1                                                                                |
| Test Sic. | 600°C                                                                               | 600°C                                                                                |
|           |   |   |
| Numune    | RYEA-2                                                                              | RYEA-1_HT                                                                            |
| Test Sic. | 600°C                                                                               | 600°C                                                                                |
|           |  |  |

|           |                                                                                     |                                                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Numune    | KKA-1_HT                                                                            | RYEA-2_HT                                                                            |
| Test Sic. | 600°C                                                                               | 600°C                                                                                |
|           |    |    |
| Numune    | Inconel 718                                                                         | CMSX-4                                                                               |
| Test Sic. | 600°C                                                                               | 600°C                                                                                |
|           |   |   |
|           | RYEA-1                                                                              | KKA-1                                                                                |
|           | 800°C                                                                               | 800°C                                                                                |
|           |  |  |

|           |                                                                                     |                                                                                     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Numune    | RYEA-2                                                                              | RYEA-1_HT                                                                           |
| Test Sic. | 800°C                                                                               | 800°C                                                                               |
|           |    |   |
|           | KKA-1_HT                                                                            | RYEA_2_HT                                                                           |
|           | 800°C                                                                               | 800°C                                                                               |
|           |   |  |
|           | Inconel 718                                                                         |                                                                                     |
|           | 800°C                                                                               |                                                                                     |
|           |  |                                                                                     |

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Rifat YILMAZ

Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Geçmişi

-2021, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bilim Dalı/ Doktora

-2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans

-2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü (Çift Anadal)

-2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

### Mesleki Geçmişi

-2018, Teknoloji Programları Teknik Lideri, Tusaş Motor Sanayii A.Ş. (TEI), Teknoloji Programları Müdürlüğü.

-2015, Kıdemli Teknoloji Programları Mühendisi, Tusaş Motor Sanayii A.Ş. (TEI), Teknoloji Programları Müdürlüğü.

-2012, Teknoloji Geliştirme Mühendisi, Tusaş Motor Sanayii A.Ş. (TEI), Teknoloji Geliştirme Müdürlüğü.

### Yayınları

-Tüzemen, C., Yılmaz, R., Tıgılı, C. (2018). Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured Inconel 718 Alloy, 19th International Metallurgy and Materials Congress (IMMC 2018), 25-27 October, TÜYAP, Istanbul, Turkey.

-Yılmaz, R., Atar, E., and Cimenoglu, H. (2017). Boriding of WC-6wt.%Co Inserts for Machining of Inconel 718 Alloy, 9th International Conference on Tribology (BalkanTRib'17), 13-15 September, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

-Yılmaz, R., Karasu, B. (2017). Havacılık ve Uzay Endüstrisinde Kullanılan Camlar, *Şişecam Teknik Bülten*, Cilt:46, Sayı 3 (232), 5-14.

-Uğur Solakoğlu, E. Yılmaz, R., Ören, S., Akbulut, G., Poyraz, Ö., Yasa, E. (2016). Process Limits Of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) In Terms Of Minimum Hole And Boss Diameters With Varying Aspect Ratios, 17th International Conference on Machine Design and Production, July 12 – July 15, Bursa, Turkey.

-Yasa, E., Poyraz, Ö., Yağmur, A., Yılmaz, R., Pilatin, S. (2014). Benchmarking for Metal Additive Manufacturing, MSI Defence Review , Special Issue.

-Yılmaz, R., Demir, F., Akbulut, G., Pilatin, S. (2013). Şekillendirilmiş Metal Katotlar ve Elektrokimyasal İşleme Yöntemi ile Süperalaşım Blisk İmalatı, 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2013), 07-09 Kasım, Kuşadası, İzmir.

-Özdemir, E., Yılmaz, R., Parlar, Z., Arı, Ş. (2013). An Analysis of Geometric Parameters' Effects on Flow Characteristic of a Reactive Muffler. 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" (TMT 2013), Istanbul, Turkey.

-Demir, F., Yılmaz, R. (2013). Çok Eksenli Elektrokimyasal İşleme Yöntemi ile Blisk Üretimi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası VI. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı, 06-07 Mayıs, Eskişehir, Türkiye.

-Parlar, Z., Arı, Ş., Yılmaz, R., Özdemir, E., Kahraman, A. (2013). Acoustic and Flow Field Analysis of a Perforated Muffler Design. World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol:7, pp. 600-604.

### Ödülleri

-2011, Bölüm İkinciliği, İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm İkinciliği, İstanbul.