T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

# YÜKSEK LİSANS TEZİ

# UÇAK UYGULAMALARI İÇİN SÜPERALAŞIM ÜRETİMİ

**Leal KARAAĞAOĞLU**

**DANIŞMAN**
**Prof. Dr. İlven MUTLU**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı**

**Nisan, 2025**

# TEZ KABUL VE ONAYI

**Leal KARAAĞAOĞLU** tarafından, **Prof. Dr. İlven MUTLU** danışmanlığında hazırlanan **" UÇAK UYGULAMALARI İÇİN SÜPERALAŞIM ÜRETİMİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **25/04/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**

Aileme ithaf ediyorum…

# BÜTÇE DESTEKLERİ

## UÇAK UYGULAMALARI İÇİN SÜPERALAŞIM ÜRETİMİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

# TEŞEKKÜR

Bugüne kadar desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen çok değerli aileme çok teşekkür ederim.

Nisan 2025 **Leal KARAAĞAOĞLU**

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa No**

**TEZ KABUL VE ONAYI** ..... **ii**
**BEYAN** ..... **iii**
**BÜTÇE DESTEKLERİ** ..... **v**
**TEŞEKKÜR** ..... **vi**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **ix**
**TABLO LİSTESİ** ..... **xi**
**SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ** ..... **xii**
**ÖZET** ..... **xiii**
**ABSTRACT** ..... **xv**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE** ..... **2**
2.1. UÇAK MOTORU TEKNOLOJİSİ ..... 2
2.2. SÜPERALAŞIMLAR ..... 6
2.3. TOZ METALURJİSİ ..... 18
2.3. LİTERATÜR TARAMASI ..... 22
**3. YÖNTEM** ..... **25**
3.1. NUMUNE ÜRETİMİ ..... 25
3.2. KARAKTERİZASYON ..... 30
3.3. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ ..... 34
**4. BULGULAR** ..... **35**
4.1. MİKROYAPI ..... 35
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER ..... 43
4.3. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON ÖZELLİKLERİ ..... 49
4.4. HESAPLAMALI FAZ DİYAGRAMLARI ..... 51
4.5. YOĞUNLUK FONKSİYONEL TEORİSİ ..... 55
**5. TARTIŞMA** ..... **62**
**6. SONUÇ VE ÖNERİLER** ..... **66**

**KAYNAKLAR** ..... **68**
**İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI** ..... **70**
**ETİK KURUL İZİN YAZISI** ..... **71**
**KURUM İZNİ YAZILARI** ..... **72**
**ÖZGEÇMİŞ** ..... **73**

# ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa No**

**Şekil 2.1:** Turbo jet motor yapısı ……..2
**Şekil 2.2:** Boeing 787'ye ait GE CF6 gaz türbin motorunda malzemeler ……...…3
**Şekil 2.3:** Gaz türbin motoru ve ortam sıcaklıkları ……..4
**Şekil 2.4:** Türbin kanatçık türleri a) eşeksenli, b) kolonsal (yönlü), c) tek kristal ……...…5
**Şekil 2.5:** Başlıca süperalaşımların sınıflandırılması ……..……..…6
**Şekil 2.6:** Alaşım elementlerinin süperalaşımların özelliklerine etkisi ……7
**Şekil 2.7:** $Ni_3Al$ kristal yapısı ……..……..……...10
**Şekil 2.8:** İngot metalürjisi ile türbin diski üretimi …….....….14
**Şekil 2.9:** Toz metalurjisi ile türbin diski üretimi ……....15
**Şekil 2.10:** Tek kristal türbin bıçağı üretimi a) tasarımlar, b) alttan döküm, c) üstten döküm.17
**Şekil 2.11:** Rolls-Royse tarafından hassas döküm ile tek kristal türbin bıçağı üretimi ……..14
**Şekil 2.12:** Toz metalurjisi aşamaları …….....19
**Şekil 2.13:** Tek eksenli ve çift eksenli pres ……..……...20
**Şekil 2.14:** Sinterleme gözenek yapısının değişimi …….....21
**Şekil 3.1:** a) Bilyeli değirmen, b) hidrolik pres, c) boru tipi sinterleme fırını …….25
**Şekil 3.2:** Sinterlenmiş numuneler a) Incoloy 907, b) Inconel 718, c) Haynes 188……..…...23
**Şekil 3.3:** Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların akış şeması ……..…i.....25
**Şekil 3.4:** a) Sertlik cihazı, b) basma cihazı, c) aşınma cihazı ……...…....27
**Şekil 3.5:** Tahribatsız ultrasonik muayene cihazı ……...…….28
**Şekil 3.6:** Tahribatsız girdap akımları test cihazı ……..…..29
**Şekil 3.7:** Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi ……..…33
**Şekil 4.1**: Ana metallerin SEM fotoğrafları a) Co, b) Ni, c) Fe……...35
**Şekil 4.2**: İlave elementlerin SEM fotoğrafları a) Mn, b) Mo, c) Ti, d) Cu, e) CNT……...36
**Şekil 4.3**: Inconel 718 SEM fotoğrafları……37
**Şekil 4.4**: Haynes SEM fotoğrafları……..38
**Şekil 4.5**: Incoloy SEM fotoğrafları…….39
**Şekil 4.6**: Inconel 718 optik mikroskop fotoğrafı……40

**Şekil 4.7**: Haynes optik mikroskop fotoğrafı……..…41
**Şekil 4.8**: Incoloy optik mikroskop fotoğrafı……..……...42
**Şekil 4.9**: Alaşımların elastisite modülleri……..……..…43
**Şekil 4.10**: Alaşımların aşınma değerleri…….…..……..44
**Şekil 4.11**: Alaşımların sertlik değerleri…….……..…45
**Şekil 4.12**: Alaşımların iletkenlik değerleri…….…..…..46
**Şekil 4.13**: Alaşımların yoğunluk değerleri…….……47
**Şekil 4.14:** Yaşlandırma sıcaklığının etkisi……..…...48
**Şekil 4.15**: Alaşımların korozyon hızı değerleri…….…..49
**Şekil 4.16**: Alaşımların yüzey oksit direnci değerleri…….…..…..50
**Şekil 4.17**: Ni-Fe-Cr sistemi……..51
**Şekil 4.18**: Fe-Ni-Co sistemi…….52
**Şekil 4.19**: Co-Ni-Cr sistemi ……53
**Şekil 4.20:** Alaşımların Pourbaix diyagramları…….……..54
**Şekil 4.21.** a) Birim kristal kafes ve b) süperlatis……..…55
**Şekil 4.22.** Alaşımların hesaplanmış teorik elastiklik modülleri……..…..60
**Şekil 4.23.** Alaşımların hesaplanmış teorik mekanik özellikleri……....61

# TABLO LİSTESİ

**Sayfa No**

**Tablo 2.1:** Inconel 718 kimyasal bileşimi …….....11
**Tablo 2.2:** Haynes 188 kimyasal bileşimi ……..….12
**Tablo 2.3:** Incoloy 907 kimyasal bileşimi ……..….13
**Tablo 3.1:** Tez kapsamındaki üretilen alaşımlar ……..…29
**Tablo 4.1:** Alaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri …….56
**Tablo 4.2:** Alaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri …….....58
**Tablo 5.1:** Üretilrn alaşımların kıyaslanması …….…….64
**Tablo 5.2:** Üretilrn alaşımların kıyaslanması …….…….65
**Tablo 5.3:** Süperalaşımlara yapılan katkıların etkileri ……..…….…….65

# SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| Simgeler | Açıklama |
|---|---|
| **Al** | : Alüminyum |
| **B** | : Bor |
| **Co** | : Kobalt |
| **Cr** | : Krom |
| **E** | : Elastisite modülü (Young modülü) |
| **Fe** | : Demir |
| **IACS** | : Uluslararası tavlanmış bakır standardı |
| **Mo** | : Molibden |
| **Mn** | : Mangan |
| **Ti** | : Titanyum |
| $\mathbf{V_L}$ | : Ultrasonik boyuna hız |
| $\mathbf{V_T}$ | : Ultrasonik enine hız |

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### UÇAK UYGULAMALARI İÇİN SÜPERALAŞIM ÜRETİMİ

**LEAL KARAAĞAOĞLU**

**İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı**

**Danışman : Prof. Dr. İlven MUTLU**

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için yenilikçi Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlar geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1250 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış ve ardından su verme uygulanmıştır. Ardından numuneler 400-550 °C arasında yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımların içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlar tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi

içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Süperalaşımların özellikleri ilk prensipler temmelli hesaplamalı malzeme mühendisliği esaslı yazılımlar (CASTEP) ve hesaplamalı faz diyagramları (CALPHAD) esaslı yazılımlar (Thermo-Calc) kullanılarak incelenmiştir.
Nisan 2025 , 89 sayfa.
**Anahtar kelimeler:** Toz metalurjisi, Süperalaşımlar, Inconel 718, Haynes 188, Incoloy 907

# ABSTRACT

## M.Sc. THESIS

### SUPERALLOY PRODUCTION FOR AIRCRAFT APPLICATIONS

**LEAL KARAAĞAOĞLU**

**İstanbul University-Cerrahpaşa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Metallurgy and Materials Engineering**

**Metallurgical and Materials Engineering Programme**

**Supervisor : Prof. Dr. İlven MUTLU**

In this thesis, the production and characterization of novel Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloys for aircraft applications were carried out. Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloys were produced by traditional powder metallurgy (press-sintering) method. In this thesis, Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloy powders were prepared by mechanical alloying (ball mill) method. Then, the green specimens were produced by hydraulic pressing. Then, the green samples were sintered at 1250 °C temperature for 1 hour. Finally, heat treatments were applied to the sintered Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloys samples. The sintered specimens were put into solution for 1 hour at 900 °C and then quenching was applied. Then, the quenched specimens were aged between 400-550 °C. The effects of various alloying elements added to Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloys on the properties were investigated. The microstructure of the produced Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloys was investigated using destructive (wear test, hardness test) and non-destructive (ultrasonic testing, eddy current test) methods. Additionally, the electrochemical

corrosion behaviour of the Ni based Inconel 718, Co based Haynes 188, Fe based Incoloy 907 superalloys was investigated in NaCl solution by using open circuit potential, Tafel and electrochemical impedance spectroscopy tests. Properties of the superalloys were investigated by ab initio based computational materiaşs science software (CASTEP) and calculated phase diagrams (CALPHAD) based software (Thermo-Calc).

April 2025, 89. pages.

**Keywords:** Powder metallurgy, Superalloys, Inconel 718, Haynes 188, Incoloy 907

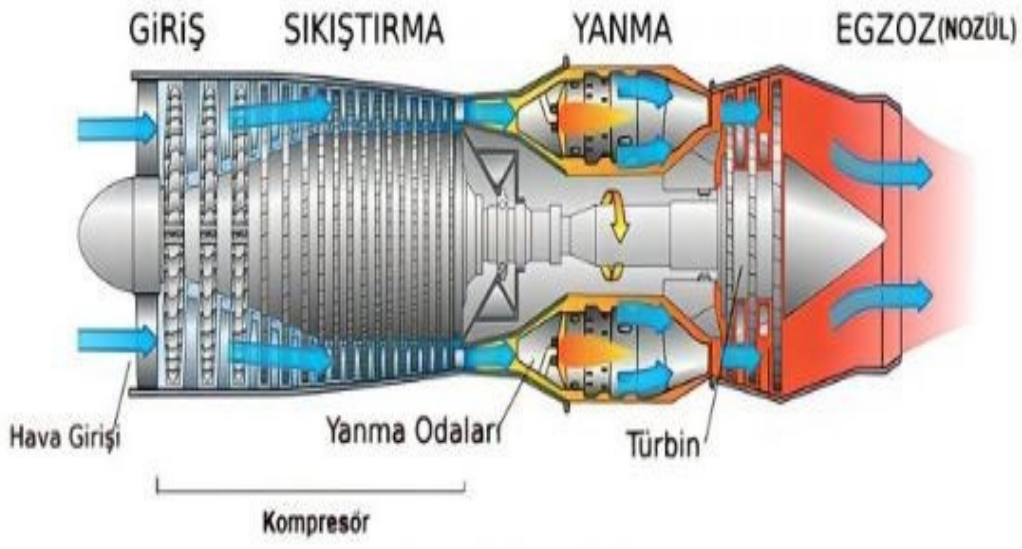
# 1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında çalışmasında, uçak uygulamaları için yenilikçi Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlar geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1250 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış ve ardından su verme uygulanmıştır. Ardından numuneler 400-550 °C arasında yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımların içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlar tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Süperalaşımların özellikleri ilk prensipler temmelli hesaplamalı malzeme mühendisliği esaslı yazılımlar (CASTEP) ve hesaplamalı faz diyagramları (CALPHAD) esaslı yazılımlar (Thermo-Calc) kullanılarak incelenmiştir.

# 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

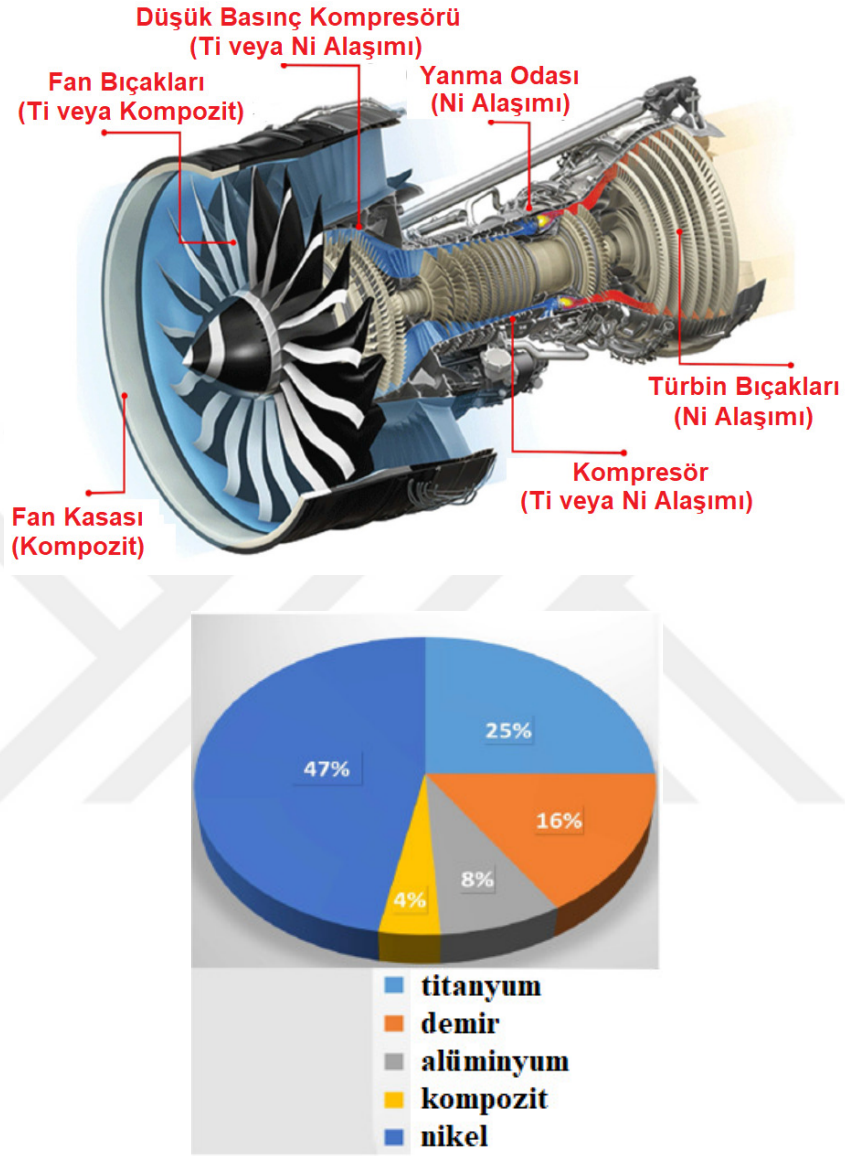
## 2.1 UÇAK MOTORU TEKNOLOJİSİ

Modern uçak motorları (gaz türbin esaslı) uçağa uçması için gerekli itkiyi sağlamaya yarar. Havadan fan yardımı ile temin edilen yaanma için gerekli oksijen yanma odasında yakılarak egzoz gazı üretilir. Gerekli itki, motor tarafından üretilen mekanik güç ile sağlanır. Motorun uç kısmında bulunan nozülden havaya gönderilen yüksek hıza sahip egzoz gazı itkiye neden olmaktadır. Yanma için gerekli oksijen havadan sağlanmaktadır [1-6].



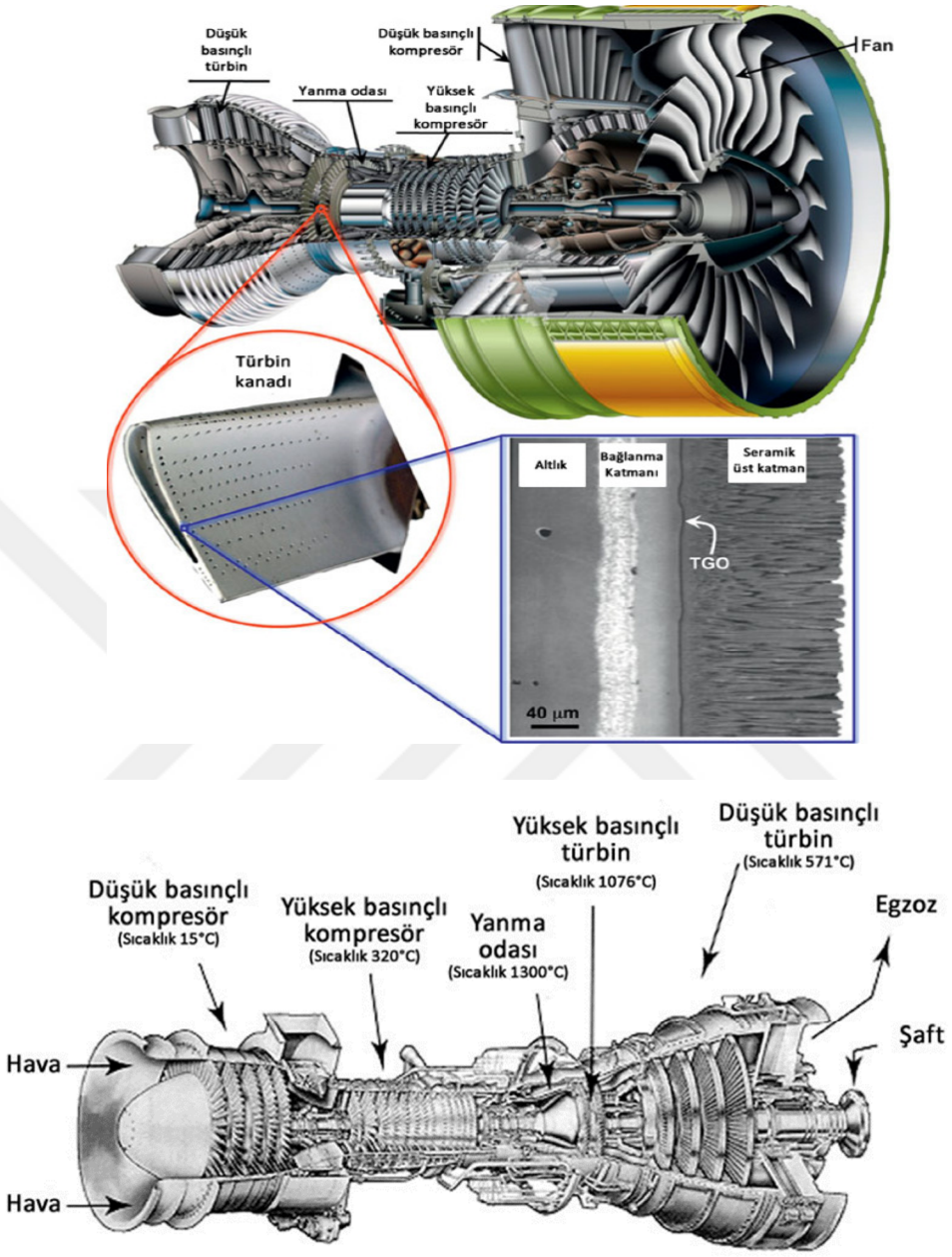

**Şekil 2.1.** Turbo jet motor yapısı [2]

Aşağıdaki şekilde Boeing 787 model uçağa ait GE CF6 gaz türbin motorunda kullanılan malzemelerin oranları görülmektedir



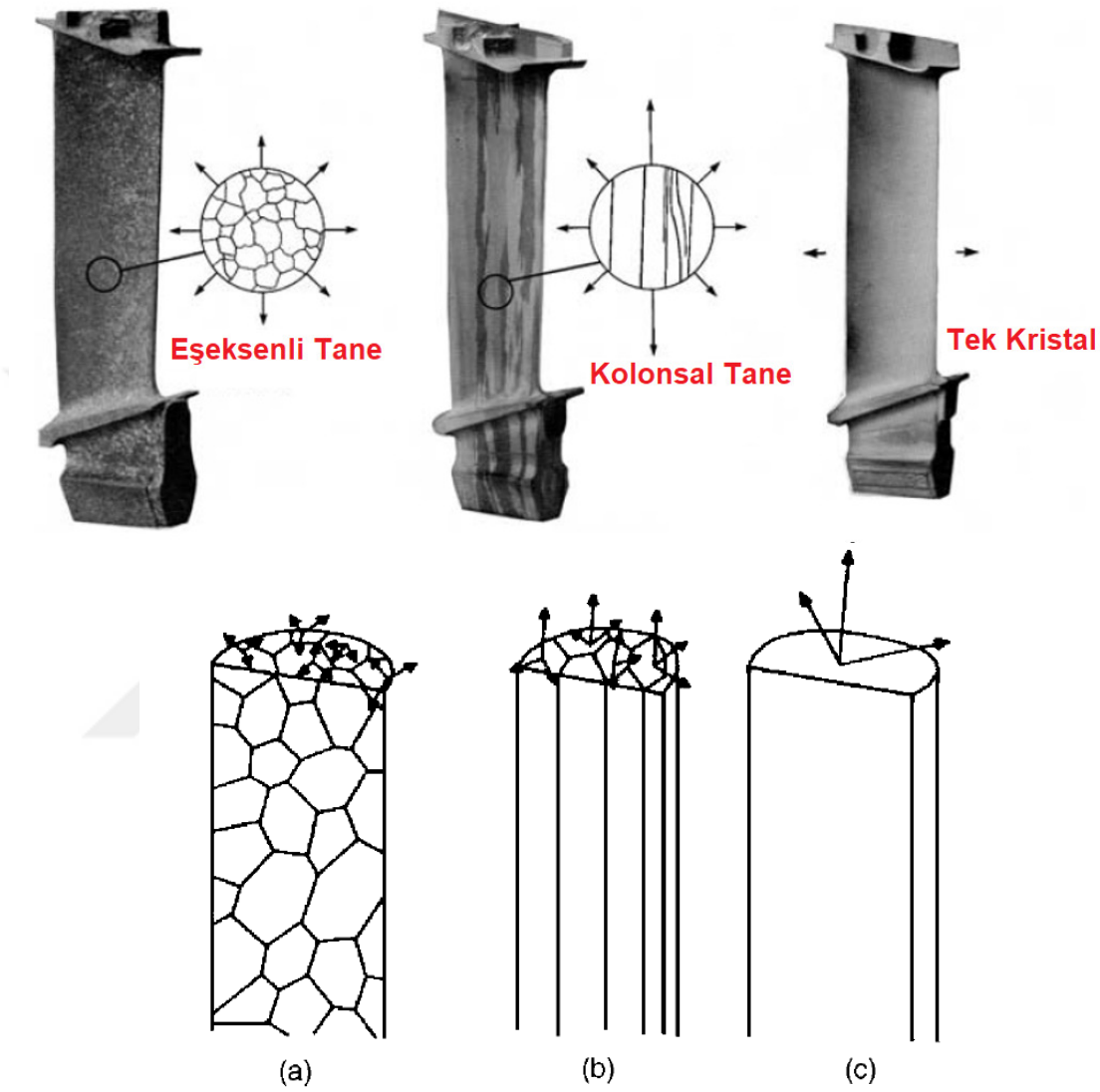

**Şekil 2.2** Boeing 787'ye ait GE CF6 gaz türbin motorunda malzemeler [3]

Aşağıdaki şekilde gaz türbin motoru ve ortam sıcaklıkları görülmektedir.




**Şekil 2.3.** Gaz türbin motoru ve ortam sıcaklıkları [4]

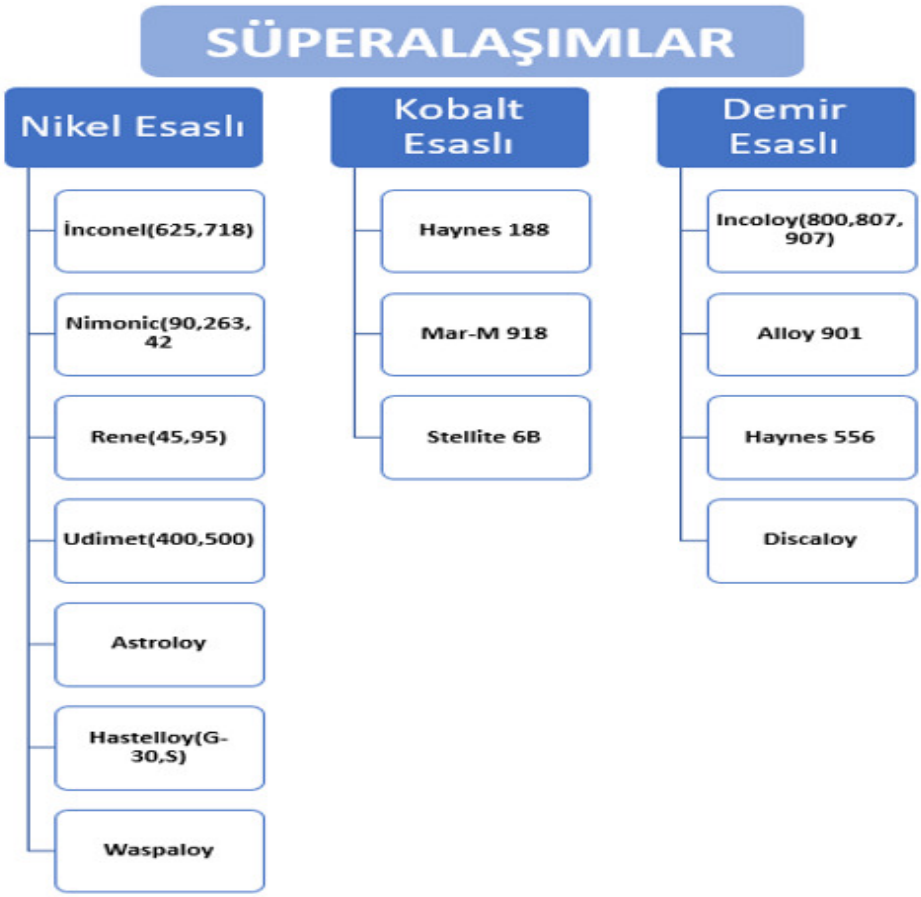
Aşağıdaki şekilde jet motoru türbin kanatçık türleri a) eşeksenli tanelerden oluşan kanatçık, b) kolonsal (yönlü) tanelerden oluşan kanatçık, c) tek kristal yapıdan oluşan kanatçıkgörülmektedir.




**Şekil 2.4.** Türbin kanatçık türleri a) eşeksenli, b) kolonsal (yönlü), c) tek kristal [3]

## 2.2 SÜPERALAŞIMLAR]

Süperalaşımlar, oksidasyon direncine, korozyon direncine, sürünme direncine ve yorulma direncine sahip alaşımlardır. Genellikle uçak motorları üretiminde kullanılırlar. Süperalaşımlar; Ni, Co ve Fe esaslı olan ve 1000 °C üzerindeki yüksek sıcaklıklarda alaşımlarıdır. Ana alaşım elementinin yanı sıra yüksek oranlarda Cr, Nb, Mo, Al, Ti, W, B, Ru, Re gibi alaşım elementleri de içerebilmektedir [6-9].

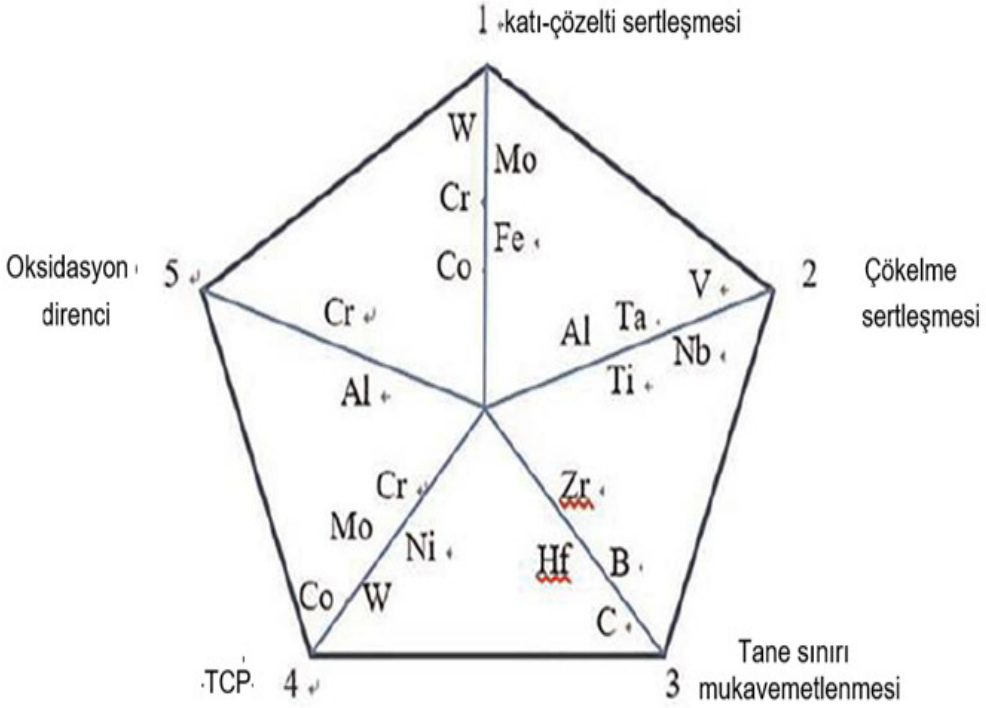



**Şekil 2.5.** Başlıca süperalaşımların sınıflandırılması [6]

***Mikroyapıda Görülen Fazlar***

- Gamma ($\gamma^{II}$)
- Gama üssü ($\gamma^{I}$)
- Gamma çift-üssü prime ($\gamma^{II}$)
- TCP (topolojik sıkı paket)
- Karbür ve borür

Aşağıdaki şekilde alaşım elementlerinin süperalaşımların özelliklerine etkisi görülmektedir [8].




**Şekil 2.6.** Alaşım elementlerinin süperalaşımların özelliklerine etkisi [8]

Cr ve Al elementlerinin ilavesi yüzeyde sert, gözeneksiz ve koruyucu bir oksit filmi oluşumuna ve bunun sonucu olarak yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncinin artmasına neden olmaktadır.

W, Co, Cr, Mo ve Fe elementlerinin ilavesi katı eriyik sertleşmesine ve mukavemet artışına neden olmaktadır.

Cr, Ni, Mo, W ve Co elementlerinin ilavesi genellikle istemeyen TCP fazının oluşumuna neden olmaktadır.

Zr, B, C ve Hf elementlerinin ilavesi tane sınırında çökeltilere ve alaşımın mukavemetlenmesine neden olmaktadır

Ti, Al, Ta, Nb, V elementlerinin ilavesi matris içerisinde çökelti oluşumuna ve bunun sonucu olarak alaşımda çökelme sertleşmesine neden olmaktadır.

***Süperalaşımlarda Mukavemet Arttırıcı Yöntemler***

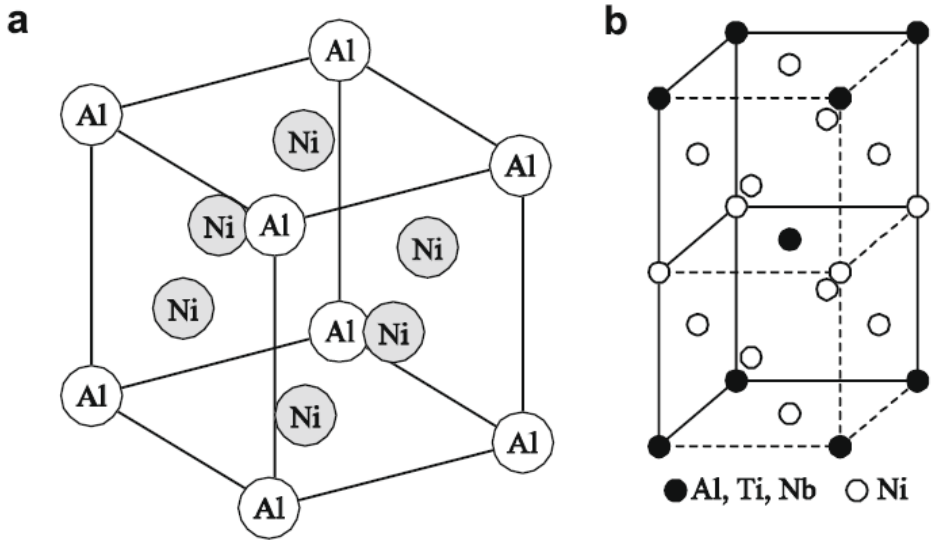
- *Çökelme sertleşmesi.*
- *Katı eriyik sertleşmesi.*
- *Tane sınırı sertleşmesi.*

W, Co, Cr, Mo ve Fe elementlerinin ilavesi katı eriyik sertleşmesine ve mukavemet artışına neden olmaktadır.

Zr, B, C ve Hf elementlerinin ilavesi tane sınırında çökeltilere ve alaşımın mukavemetlenmesine neden olmaktadır

Ti, Al, Ta, Nb, V elementlerinin ilavesi matris içerisinde çökelti oluşumuna ve bunun sonucu olarak alaşımda çökelme sertleşmesine neden olmaktadır.

Aşağıdaki şekilde Ni esaslı süperalaşımlarda en önemli yüksek sıcaklıklarda mukavemet artış mekanizması olan ince $Ni_3Al$ çökeltilerinin kristal yapısı görülmektedir. Ayrıca Ti ve Nb katkıları durumunda çökeltilerin yapısı da görülmektedir. Genel olarak Al, Ti ve Nb çökeltilerin oluşmasında gereklidir [7].




**Şekil 2.7.** $Ni_3Al$ kristal yapısı [7]

### *Inconel 718 Süperalaşımı*

Inconel 718 genel olarak Ni matrisli bir süperalaşımdır. Aşağıdaki Tabloda Ni-Fe esaslı bir süperalaşım olan ve endstride yaygın olarak kullanılan Inconel 718 süperalaşımının kimyasal bileşimi görülmektedir. Çökelti oluşturucu olarak Nb, Al ve Ti elementlerini yüksek oranlarda içermektedir. Ayrıca Mo ve Cr elementlerini içermektedir.

**Tablo 2.1**. Inconel 718 kimyasal bileşimi [10]

| **Element** | **Miktar (%)** |
|---|---|
| Ni | 50-55 |
| Fe | kalan |
| Co | 1 max |
| Cr | 17-21 |
| Mo | 2.8-3.3 |
| Nb | 4.75-5.5 |
| Ti | 0.65-1.15 |
| Al | 0.2-0.8 |
| Ta | 0.05 max |
| B | 0.006 |
| Cu | 0.30 max |
| Si | 0.35 max |
| Mn | 0.35 max |
| C | 0.08 max |

***Haynes 188 Süperalaşımı***

Haynes 188 Co esaslı bir süperalaşımdır. Aşağıdaki Tabloda haynes 188 süperalaşımının kimyasal bileşimi görülmektedir.

**Tablo 2.2**. Haynes 188 kimyasal bileşimi [11]

| **Element** | **Miktar (%)** |
|---|---|
| Co | >37 |
| Ni | 22 |
| Cr | 22 |
| Fe | <3 |
| W | 14 |
| Mn | <1.25 |
| Si | <0.50 |
| C | <0.15 |

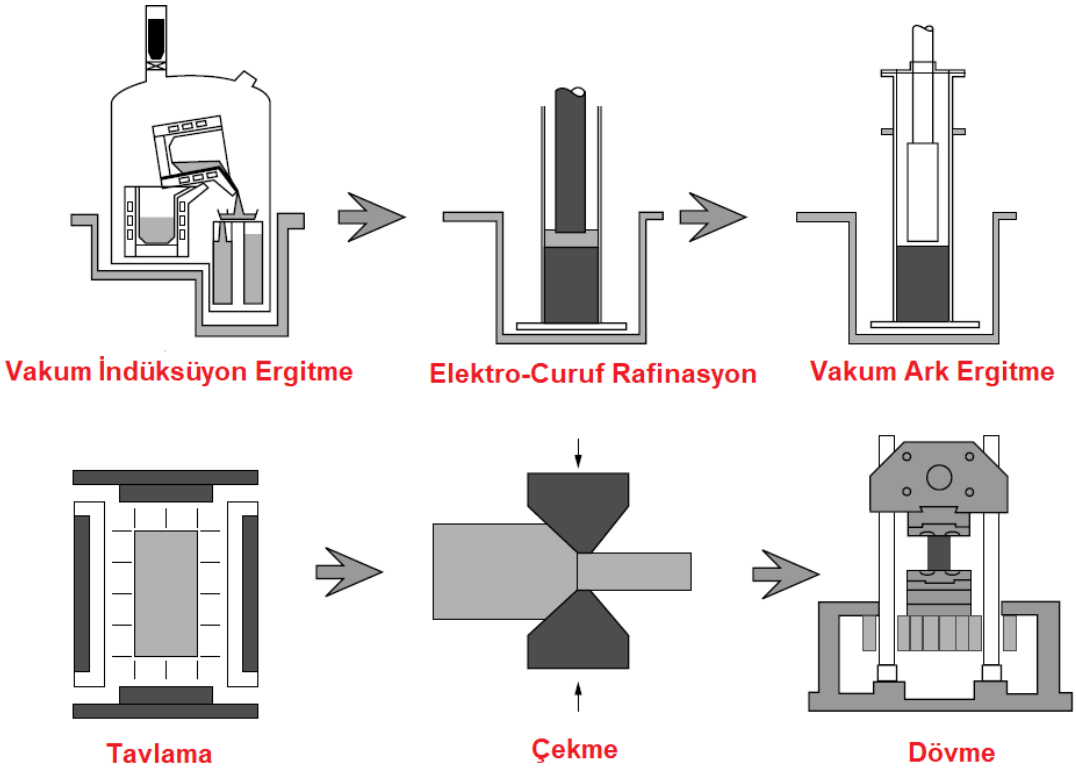
***Incoloy 907 Süperalaşımı***

Incoloy 907 Fe esaslı bir süperalaşımdır. Aşağıdaki Tabloda Incoloy 907 süperalaşımının kimyasal bileşimi görülmektedir.

**Tablo 2.3**. Incoloy 907 kimyasal bileşimi [12]

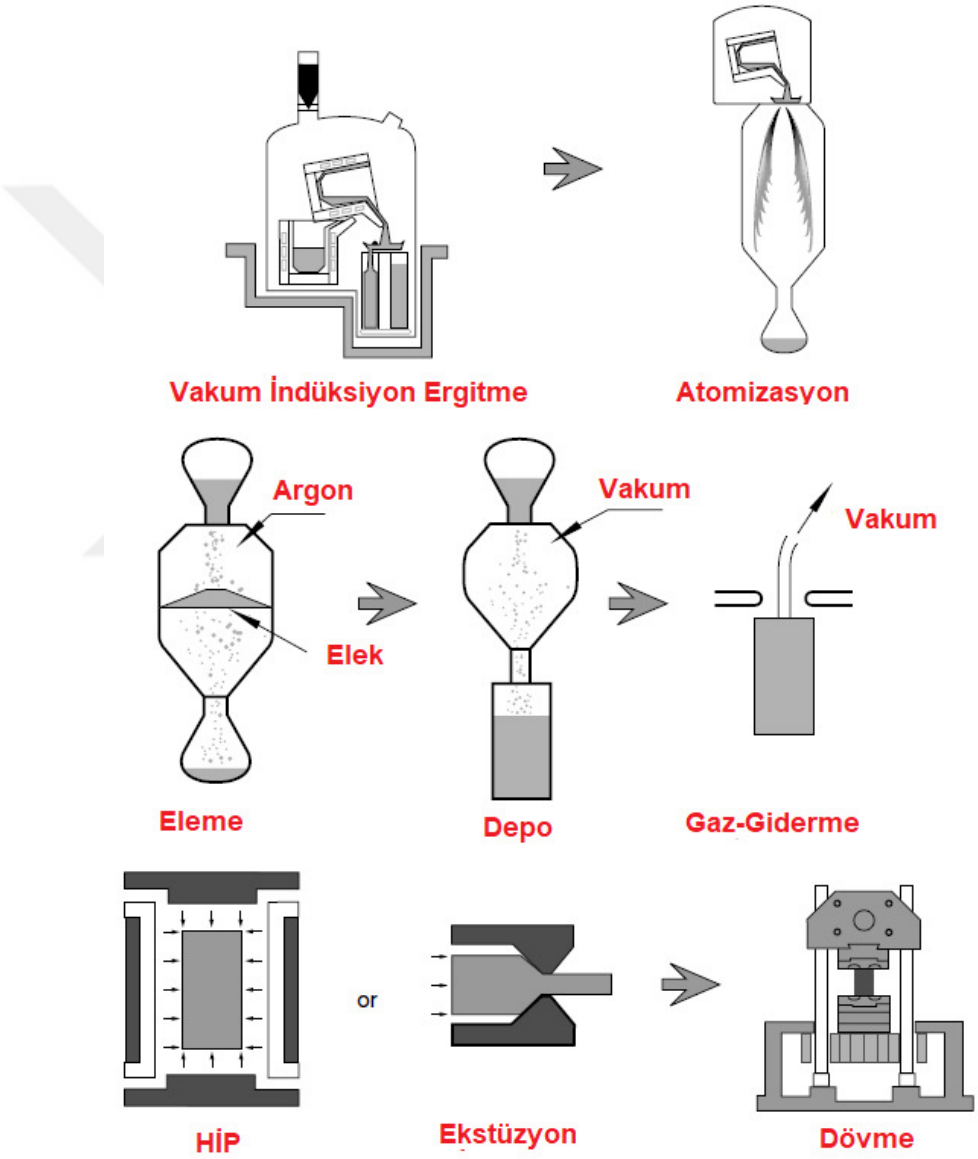
| **Element** | **Miktar (%)** |
|---|---|
| Fe | 42 |
| Ni | 38 |
| Co | 13 |
| Nb | 4.7 |
| Ti | 1.5 |
| Si | 0.15 |
| Al | 0.03 |
| C | <0.15 |

Aşağıdaki şekilde ingot metalurjisi yöntemi ile jet motoru türbin diski üretimi temel adımları görülmektedir. Genel olarak işlem vakum indüksiyon ergitme, elektro-curuf rafinasyon, vakum ark ergitme, tavlama, çekme ve dövme aşamalarından oluşmaktadır.



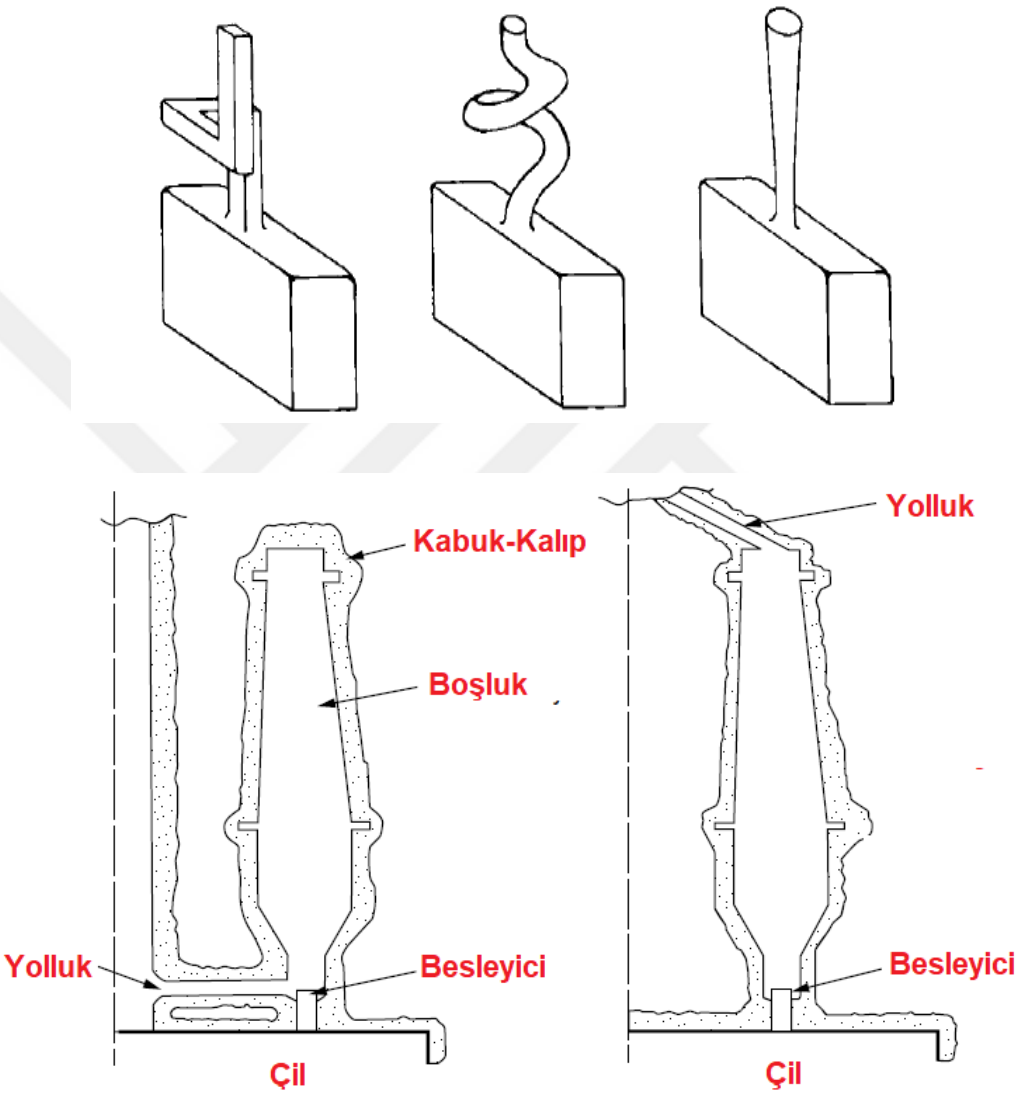

**Şekil 2.8:** İngot metalurjisi ile türbin diski üretimi [3]

Aşağıdaki şekilde toz metalurjisi yöntemi ile jet motoru türbin diski üretimi temel adımları görülmektedir. Vakum indüksiyon, atomizasyon, eleme, gaz giderme, sıcak izostatik presleme (HİP), dövme adımlarından oluşmaktadır. Atomizasyon aşamasında küresel ve ince tozlar üretilmektedir. Eleme kademesinde parçacık boyutunun homojen hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Sıcak izostatik presleme (HIP) kademesinde yoğunluk artışı (tam yoğunlaşma) ve şekil verme hedeflenmektedir. Dövme kademesinde tane boyutunun incelmesi ve mukavemette artış hedeflenmektedir.



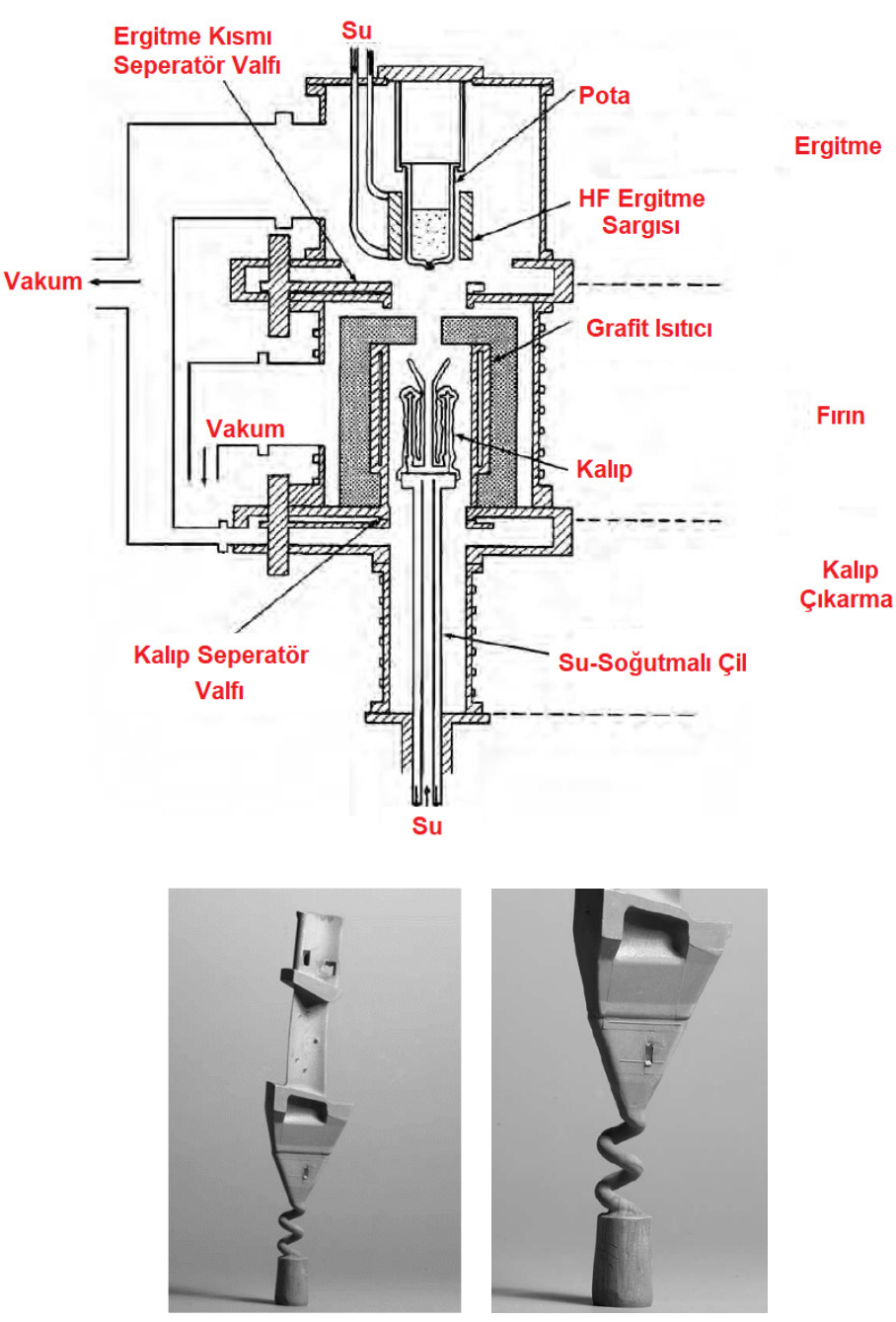

**Şekil 2.9:** Toz metalurjisi ile türbin diski üretimi [3]

Aşağıdaki şekilde jet motorunda kullanılan tek kristal türbin bıçağı üretimi a) tasarımlar, b) alttan döküm, c) üstten döküm temel adımları görülmektedir. Genel olarak uygun tasaımda yolluk, besleyici ve çil kullanılarak yönlendirilmiş ve kontrollü bir katılaştırma yapılması hedeflenmektedir [3].




**Şekil 2.10:** Tek kristal türbin bıçağı üretimi a) tasarımlar, b) alttan döküm, c) üstten döküm [3]

Aşağıdaki şekilde Rolls-Royse firması tarafından hassas döküm ile tek kristal türbin bıçağı üretimi prosesinin şematik resmi görülmektedir. Malzemelerin yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanmını arttırmanın en önemli yolu tane boyutunu irileştirmek veya tek kristal üretimi yapmaktır [3].




**Şekil 2.11.** Rolls-Royse tarafından hassas döküm ile tek kristal türbin bıçağı üretimi [3]

## 2.3 TOZ METALURJİSİ

Geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi üç temel adımdan oluşmakta olup adımlar aşağıdaki gibidir [13-18].

- Toz hazırlama
- Sıkıştırma
- Sinterleme

Toz metalurji yönteminde temel toz hazırlama proses çeşitleri genel olarak aşağıdaki gibidir.

- Karıştırma
- Harmanlama
- Mekanik alaşımlama

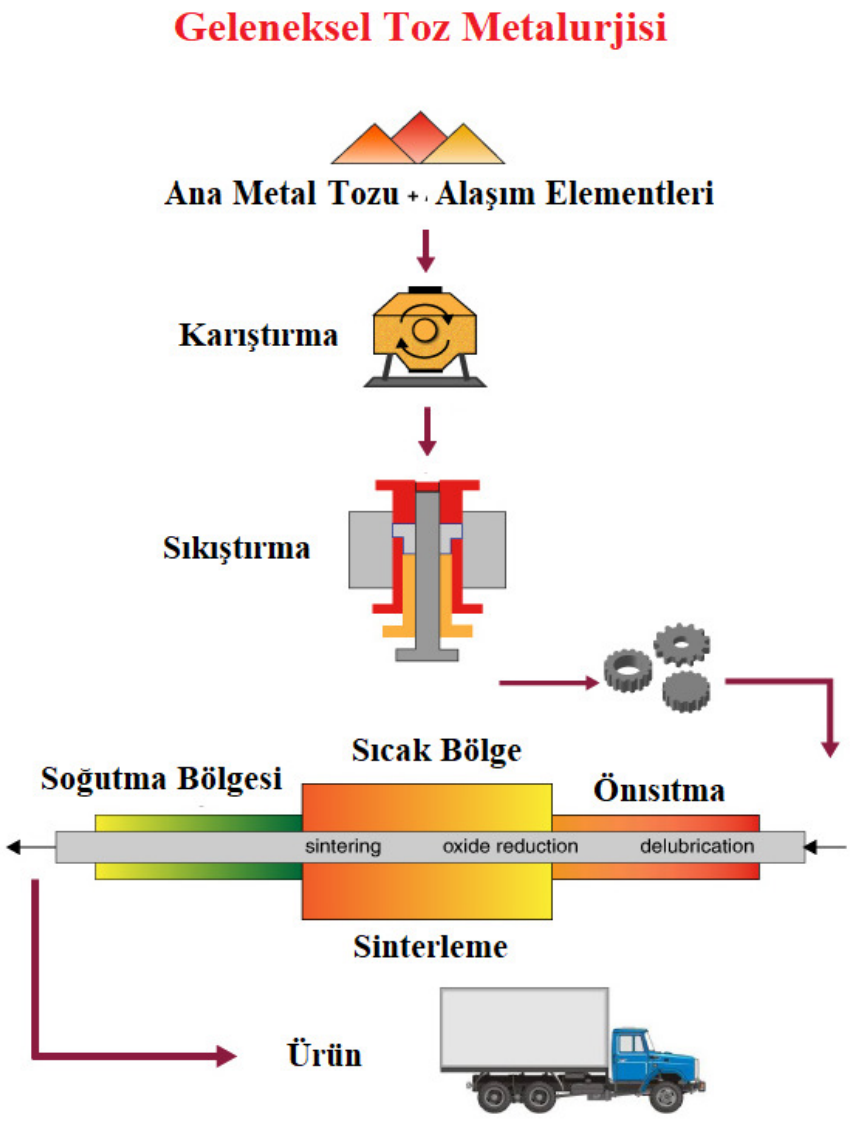
Toz metalurji yönteminde sıkıştırma çeşitleri genel olarak aşağıdaki gibidir.

- Tek eksenli presleme
- Çok eksenli presleme

Toz metalurji yönteminde temel sinterleme proses çeşitleri genel olarak aşağıdaki gibidir.

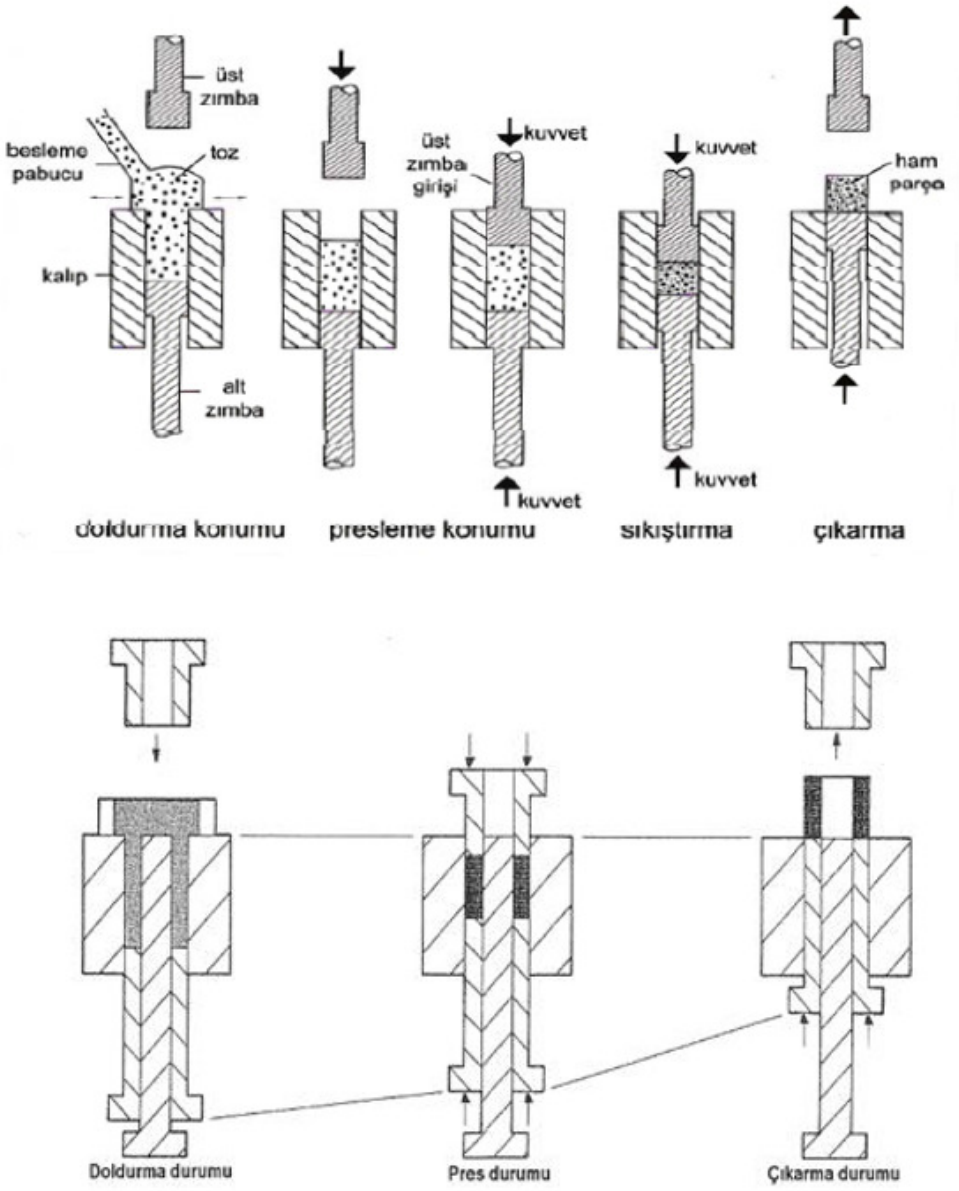
- Basınçlı sinterleme
- Basınçsız sinterleme
  - ❖ Sıvı faz sinterlemesi
    - Geçici sıvı faz sinterlemesi
    - Kalıcı sıvı faz sinterlemesi
  - ❖ Katı faz sinterlemesi

Aşağıdaki şekilde geleneksel toz metalürji yönteminin temel aşamaları özet olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi toz metalurjisi prosesi, tozların tartılması, tozların karıştırılması, tozların sıkıştırılması ve son olarak sinterleme aşamalarını içermektedir. Ayrıca atomizasyon gibi çeşitli toz üretim prosesleri de toz metalürjisi içerisinde değerlendirilebilir. Geleneksel toz metalürjisi yönteminde sinterleme sonrası yapıda yaklaşık % 5 gözenek bulunabilmekte olup, tam yoğunluk elde edilmek istendiğinde ileri toz metalürjisi tekniklerinden (soğuk izostatik presleme, sıcak izostatik presleme, plazma sinterleme, sıcak pres) yararlanılmaktadır [8].



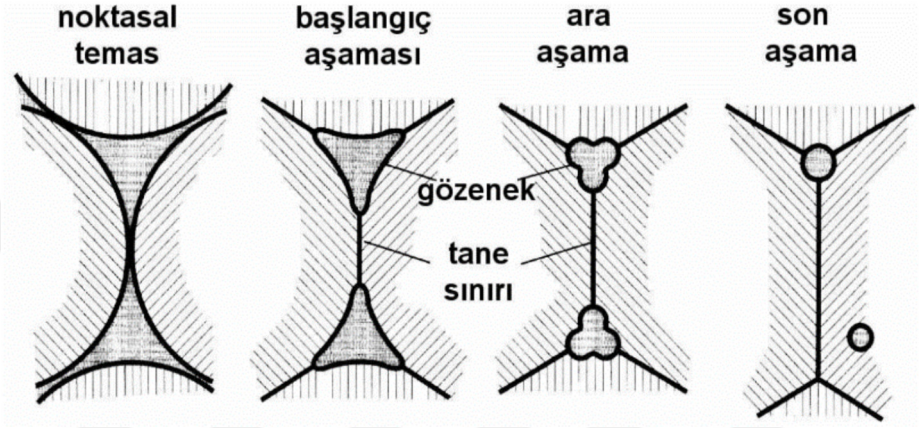

**Şekil 2.12:** Toz metalurjisi aşamaları [13]

Aşağıdaki şekilde, tek eksenli presleme ve çift eksenli presleme prosesleri görülmektedir. Toz metalurjisi yönteminde, karıştırma/mekanik alaşımlama işleminden sonra elde edilen tozu pres kullanılarak sıkıştırılmakta ve ham numune elde edilmektedir. Sıkıştırma (presleme) sırasında parçacıkların temas bölgelerinde plastik deformasyon meydana gelmektedir [11].




**Şekil 2.13:** Tek eksenli ve çift eksenli pres [14]

Aşağıdaki şekilde, sinterleme ısıl işlemi sırasında parça içerisinde yer alan gözenek yapısının değişimi zamana bağlı olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi sinterleme ısıl işlemi sürdükçe öncelikle parçacıkların temal bölgelerinde noktasal temas meydana gelmekte (noktasal temas aşaması), ardından iri gözenekler oluşmakta (başlangıç aşaması), daha sonra gözenekler küreselleşmekte (ara aşama) ve son olarak küreselleşmiş gözenekler küçülmektedir (son aşama). Genel olarak sinterleme işleminde temel itici güç toplam yüzey enerjisinin azalması (parçacıkların irileşmesi) olduğu bilinmektedir [11].




**Şekil 2.14:** Sinterleme gözenek yapısının değişimi [14]

## 2.4 LİTERATÜR TARAMASI

Erdem [21] gerçekleştirdiği lisansüstü tez çalışmasında, Ni esaslı süperalaşım toz karışımı, mekanik alaşımlama ile hazırlanmıştır. Toz karışımı % 75 nikel, % 20 krom, % 3 alümina, % 0.6 titanyum, % 0.3 ytria içeriğine sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Öğütme işleminden geçen metal tozlarında, artan mekanik alaşımlama zamanına göre ortalama parçacık boyutunda azalma, sertlikte ise artış meydana gelmiştir. Mekanik alaşımlama işleminin ardından gerçekleştirilen x-ışını difraksiyın testlerinde 23 saate mekanik alaşımlanmış tozlarda, intermetalik bileşik oluşmamıştır. Üretilen süperalaşımlara, oksidasyon davranışlarını kinetik açıdan incelemek amacıyla 1000 °C sıcaklıkta 1 saat, 10 saat, 50 saatve 100 saat oksitlenme prosesi uygulanmıştır. Süperalaşımların yüzeylerinde oluşan oksit tabakasının oksidasyon süresine göre arttığı ve süperalaşıma yapışma kabiliyetinin üstün olduğu edilmiştir.

Erdeniz [22] gerçekleştirdiği lisansüstü tez çalışmasında, ince intermetalik çökeltilerin oluşumunu karakterize etmek amacıyla çeşitli ısıl işlem prosesleri gerçekleştirmiştir. Öncelikle, soğuma çökeltilerinin meydna gelişi araştırılmıştır. İkinci aşamada, 1140 °C sıcaklıkta çökeltilerin meydana gelişi incelenmiştir. 1120 °C sıcaklıkta 10-500 saat aralığında tatbik edilen ısıl işlem prosesleri ile intermetaliklerin oluşum, büyüme ve çözeltiye geçme mekanizmaları çalışılmış ve irdelenmiştir. Dördüncü aşamada, iri ve ince intermetaliklerin gerçek parametrelerde büyüme özellikleri irdelenmiştir. Isıl işlemler 950 °C sıcaklıkta 1-500 saat tatbik edilmiştir.

Özgün [23] gerçekleştirdiği lisansüstü tez çalışmasında, Inconel 718, Inconel 625 ve Nimonic 90 nikel esaslı süperalaşım tozundan toz (metal) enjeksiyon kalıplama (TEK/MEK) ile süperalaşım numuneler elde edilmiştir. Enjeksiyon ile elde edilen numunelere değişen sinter ve ısıl işlem reçeteleri uygulanmıştır. Sinterlenmiş numunenin ve ısıl işlem uygulanmış numunenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve ardından optimum toz enjeksiyon kalıplama ve ısıl işlem parametrelerinin tespit edilmiştir. Öncelikle metal tozlarının parçacık morfolojilerinin belirlenmesi için SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından, ortalama parçacık boyut dağılımlarının belirlenmesi için boyut dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Her üç malzeme tozu parafin, PE, carnauba wax ve stearik asitten oluşan polimer bağlayıcı feedstock kullanılmıştır. Bağlayıcı giderme (debinding) 2 kademede gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle kimyasal bağlayıcı giderme uygulanmıştır. Beklenildiği gibi, üç alaşım için artan sinter sıcaklığı sinter sonrası yoğunluk ve sertliği artırmıştır.

Günay [24] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, CMSX-4 yüksek sıcaklık süperalaşımların ısıl işlem proses parametreleri uygun ısıl işlem sıcaklık aralığı göz önüne alınarak çeşitli prosesler uygulanarak, mikro-yapısal analiz ve mekanik testlerle belirlenmiştir. Bu çalışmada, CMSX-4 süperalaşımına iki farklı ısıl işlem prosesi uygulanmıştır ve bu ısıl işlemlerin numune üzerinde gösterdiği morfolojik ve mekanik etkileri belirlenmiştir. Uygulanan standart ısıl işlem sonrası ötektik bölgelerin tamamen çözündüğü tespit edilmiş olup, uyarlanan ısıl işlem sonrasında ötektik fazların varlığı gözlenmiştir. Bu ısıl işlemler sonrasında γ ve γ' çözeltilerinin uygun boyutta dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda, oda sıcaklığı için uyarlanmış ısıl işlem uygulanmış malzemenin daha iyi dayanım gösterdiği belirlenmiştir. 982 °C sıcaklıkta yapılan testlerde numuneler, 1038 °C'de yapılan testlere nazaran daha düşük uzama göstermesine karşılık, daha yüksek dayanım gösterdiği belirlenmiştir. Gerilim-kopma test sonuçlarında standart ısıl işlem uygulanmış numunelerden daha iyi dayanım verileri elde edilmiştir. Sertlik deneyleri sonucunda, iki ısıl işlem uygulanmış numuneler arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir fakat standart ısıl işlem uygulanmış numunelerde daha iyi bir sertlik verileri elde edilmiştir. Uyarlanmış ısıl işlem sonrası yapıda bulunan ötektik bölgelerden alınan sonuçlar ile döküm hali numunelerinin ötektik bölgelerinden alınan sertlik değerleri arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

Topuz [25] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, 3 farklı kompozisyona sahip Fe-Ni esaslı süperalaşımda ısıl işlem sonrası alaşım elementlerinin karakterizasyon ve yorulma çatlağı ilerlemesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, farklı kimyasal kompozisyona ve üretim yöntemine sahip Fe-Ni esaslı süperalaşımların aynı ısıl işlem parametresine farklı cevaplar verdiği görülmüştür. Buna ek olarak, ısıl işlem sonrası γ' oluşumu ve karbürlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Cengiz [26] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, Mo ve Co (%2 ve 4 at.%) alaşım elementi ilavesinin üçlü Ni-11Al-9Cr süperalaşımlarının katılaşma davranışı (solvus, solidus ve likuidus sıcaklıkları), yoğunluk, dağılma davranışı (γ matrisinde veya γ' fazında bulunma) çökelti yarıçapı, çökelti hacim oranı ve çökelti boyut dağılımı üzerine etkisi, hesaplamalı malzeme bilimi ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hesaplamalı malzeme mühendisliği tasarımı Thermo-

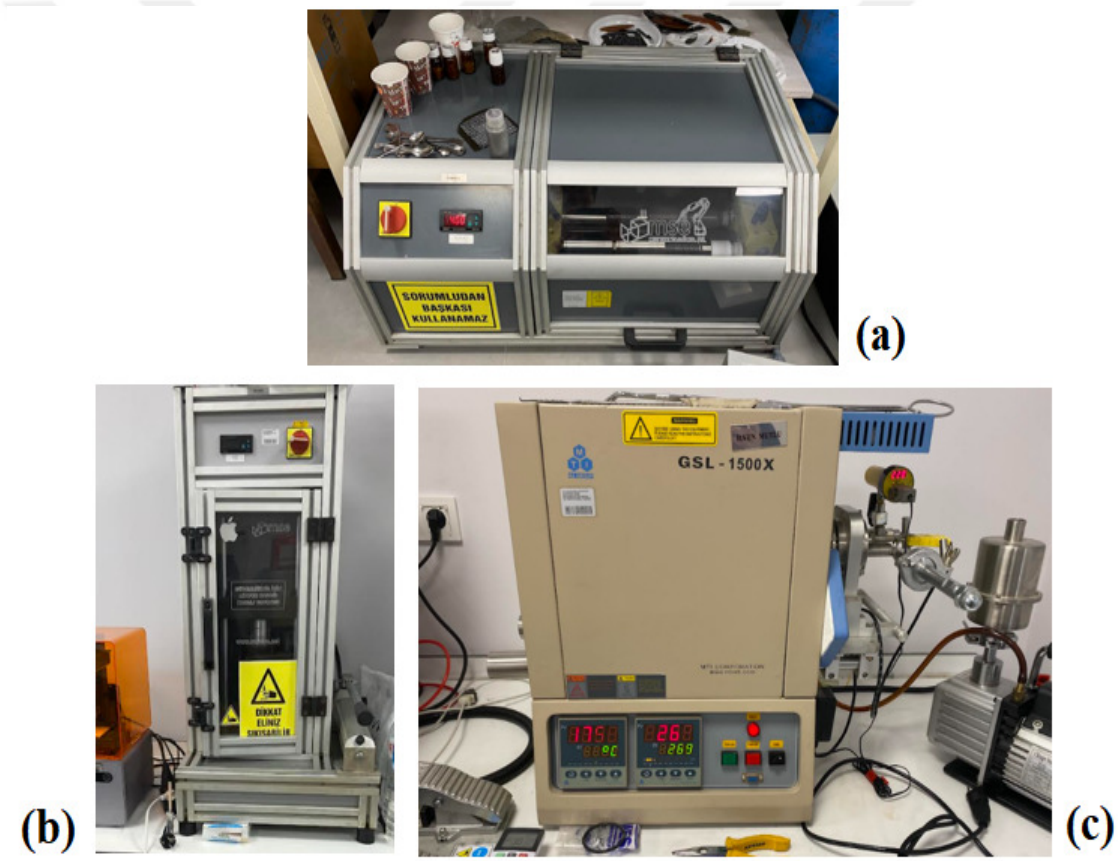
Calc 2022a CALPHAD (Faz Diyagramlarının Hesaplanması) yaklaşımı kullanılarak ve faz diyagramları için TCNi11 termodinamik veri tabanı ile gerçekleştirilmiştir. Mo ilavesinin solvüs sıcaklığını arttırdığı, γ' çökelti boyutunu düşürdüğü ve çökeltilerin hacim oranını arttırdığı görülmüştür. Öte yandan Co ilavesi ile solvüs sıcaklığı az da olsa azalmış, çökelti boyutunda az bir azalma hacim oranında ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca Mo ve Co elementlerinin γ-Ni matris fazını tercih ettiği de görülmüştür.

Turan [27] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, yerli imkanlar kullanılarak üretilen Inconel 625 süperalaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda üçlü ergitme yöntemiyle üretilen ingotlar gaz atomizasyon yöntemiyle toz haline getirilmiş, ardından seçici lazer ergitme yöntemiyle 3B olarak üretilmiştir. Numuneler 1070 °C'de çözeltiye alma, 870 °C'de birinci yaşlandırma ve 649 °C'de ikinci yaşlandırma ısıl işlemlerine tabi tutulmuştur. Isıl işlem prosesleri tamamlandıktan sonra mikroyapıda meydana gelen değişiklikler, fazların oluşumu, fazların çözünmesi, tane yapısı ve morfolojisi SEM/EDS ile karakterize edilmiştir. Mikroyapıda meydana gelen değişiklerin mekanik özelliklere yansıması 760°C'de yapılan yüksek sıcaklık çekme ve 760°C/207 MPa'da yapılan sürünme testleriyle desteklenmiştir. As-built halde mikroyapıda meydana gelen eriyik havuzu yapısı ısıl işlemle tamamen kaybolmuş ve homojen bir yapı elde edilmiştir. Isıl işlem ile tane sınırlarında çökelen MC karbürlerin ve δ-fazlarının sürünme ömrünü arttırdığı tespit edilmiştir.

# 3. YÖNTEM

## 3.1. NUMUNE ÜRETİMİ

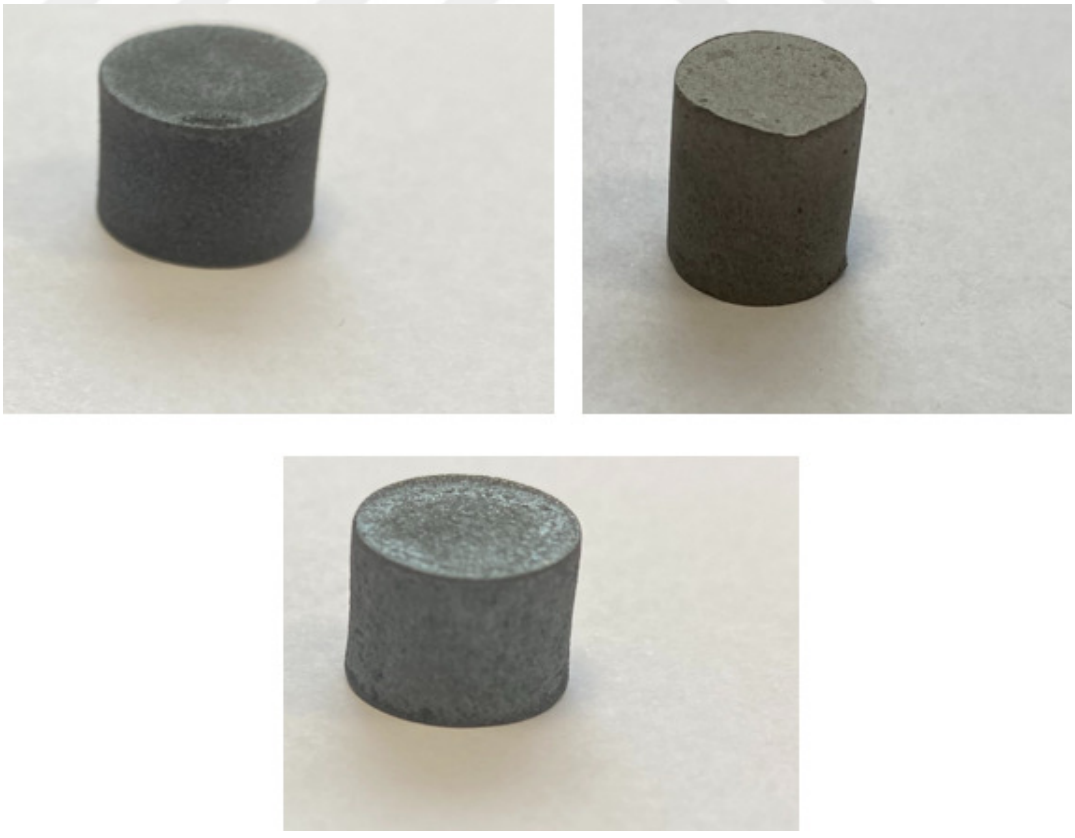
Bu tez çalışması kapsamında, çeşitli katkılar içeren Inconel 718, Haynes 188, Incoloy 907 esaslı süpalaşımlar 30-40 µm boyutunda ve % 99.8 saflıkta metal tozları kullanılarak toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Numune üretiminde kullanılan cihazlar (bilyeli değirmen, tek eksenli hidrolik pres ve yatay boru tiği sinterleme fırını) aşağıda görülmektedir.




**Şekil 3.1**: a) Bilyeli değirmen, b) hidrolik pres, c) boru tipi sinterleme fırını

Geleneksel toz metalurjisi tekniği (presleme-sinterleme) ile üretim aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Mekanik Alaşımlama: Metal toz karışımları planlanan alaşımın kimyasal bileşimine göre hassas teraziyle tartılmıştır. Mekanik alaşımlama yapabilmek için bilyeli değirmen ve öğütücü olarak 3 mm çapında zirkonya bilyeler kullanılmıştır. Metal tozu/zirkonya bilye oranı tüm karışımlarda 1/10 olacak şekilde yükleme yapılmıştır. Numuneler bilyeli değirmende 20 saat 400 rpm devirde çalıştırılmıştır.
- Presleme: Mekanik alaşımlama işlemi sonrasında, ham numunelerde yeterli düzeyde mukavemet elde etmek için metal tozlarına yaklaşık olarak ağırlıkça % 1-3 polivinilalkol(bağlayıcı)-su karışımı bağlayıcı çözeltisi eklenilip, homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Kalıp Zn-stearat esaslı yağlayıcı madde ile kalıplar yağlanılıp, metal toz karışımları tek eksenli hidrolik preste, 200-250 MPa basınç altında preslenip ham numuneler elde edilmiştir.
- Sinterleme: Presleme işleminden sonra elde edilen silindirik ham numuneler belirli sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi boru tipi yatay fırında (MTI, GLS-1500X, USA) vakum ortamında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.2**: Sinterlenmiş numuneler a) Incoloy 907, b) Inconel 718, c) Haynes 188

*Isıl İşlem Çevrimi*

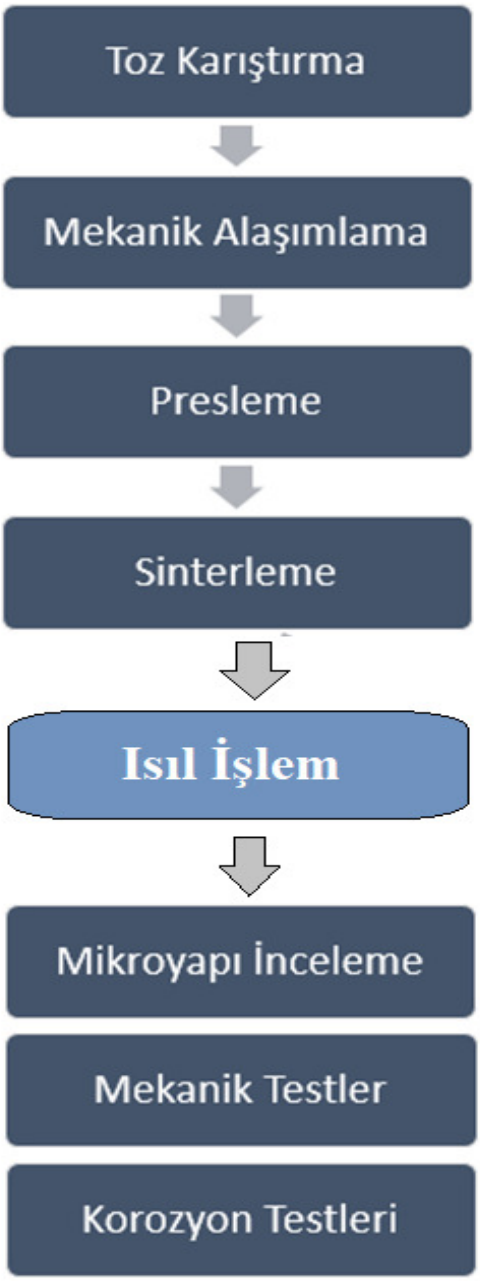
Sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır.

- Öncelikle sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmıştır (östenitleme).

- Ardından su verme işlemi uygulanmıştır.

- Ardından, su verilmiş numuneler 400-550 °C arasında 1 saat süre ile kamara tipi fırın içerisinde yaşlandırılmıştır.

Şekilde tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların (üretim aşamaları ve kararkterizasyon testleri) özet akış şeması görülmektedir. Öncelikle metal tozları istenen oranda tartılmış, karıştırılmış, alaşım haline gelene kadar bilyeli değirmende mekanik alaşımlamaya tabi tutulmuş, daha sonra preslenmiş, daha sonra uygun sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Son olara tüm numunelere mikroyapı incelemesi, mekanik testler ve korozyon testleri uygulanmıştır.




**Şekil 3.3:** Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların akış şeması

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımlarının kimyasal bileşimi görülmektedir.

**Tablo 3.1:** Tez kapsamındaki üretilen alaşımlar

| Alaşım | Kimyasal Bileşim (ağ.%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ni | Fe | Co | Cr | Mo | Ti | Nb | W | Ta | Mn | Cu | B | CNT |
| **Inconel 718** | 50 | 25 | | 17 | 3 | 1 | 4 | | | | | | |
| **Inconel 718-5Cu** | 50 | 20 | | 17 | 3 | 1 | 4 | | | | 5 | | |
| **Inconel 718-8Cu** | 50 | 17 | | 17 | 3 | 1 | 4 | | | | 8 | | |
| **Inconel 718-5Mn** | 50 | 20 | | 17 | 3 | 1 | 4 | | | 5 | | | |
| **Inconel 718-3W** | 50 | 22 | | 17 | 3 | 1 | 4 | 3 | | | | | |
| **Inconel 718-0.5CNT** | 50 | 24.5 | | 17 | 3 | 1 | 4 | | | | | | 0.5 |
| **Inconel 718-1CNT** | 50 | 24 | | 17 | 3 | 1 | 4 | | | | | | 1.0 |
| **Incoloy 907** | 35 | 48 | 12 | | | 1 | 4 | | | | | | |
| **Incoloy 907-5Cu** | 30 | 48 | 12 | | | 1 | 4 | | | | 5 | | |
| **Incoloy 907-5Mn** | 30 | 48 | 12 | | | 1 | 4 | | | 5 | | | |
| **Incoloy 907-5Ta** | 30 | 43 | 12 | | | 1 | 4 | | 5 | 5 | | | |
| **Incoloy 907-0.5CNT** | 35 | 48 | 11.5 | | | 1 | 4 | | | | | | 0.5 |
| **Incoloy 907-1CNT** | 35 | 48 | 11 | | | 1 | 4 | | | | | | 1.0 |
| **Haynes 188** | 20 | | 46 | 20 | | | | 13 | | | | 1 | |
| **Haynes 188-5Cu** | 15 | | 46 | 20 | | | | 13 | | | 5 | 1 | |
| **Haynes 188-5Mn** | 15 | | 46 | 20 | | | | 13 | | 5 | | 1 | |
| **Haynes 188-13Ta** | 13 | | 46 | 14 | | | | 13 | 13 | | | 1 | |
| **Haynes 188-0.5CNT** | 19.5 | | 46 | 20 | | | | 13 | | | | 1 | 0.5 |
| **Haynes 188-1CNT** | 19 | | 46 | 20 | | | | 13 | | | | 1 | 1.0 |

## 3.2. KARAKTERİZASYON

*Mikroyapı İncelemesi ve Mekanik Testler*

Tez kapsamında üretilen alaşımların mikroyapıları optik mikroskop (Olympus) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir. Numunelerin ham ve sinterlenme sonrası yoğunlukları geometrik yöntem ile belirlenmiştir.

Numunelerin sertlikleri Vickers sertlik yöntemiyle belirlenmiştir (Zwick Roell). Numunelerin aşınma davranışı pin-on disc yöntemiyle 20 m aşınma uzunluğu kullanılarak aşınma cihazında belirlenmiştir (Devotrans, Türkiye).

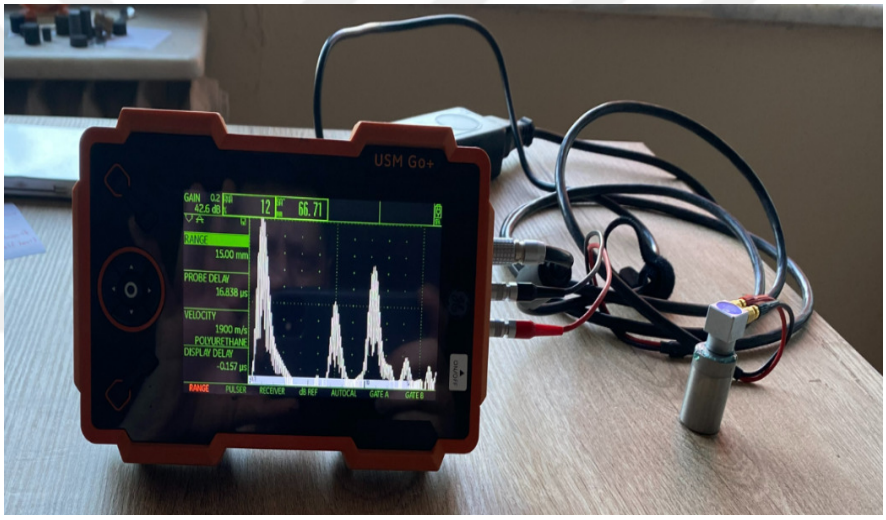


**Şekil 3.4: a)** Sertlik cihazı, b) basma cihazı, c) aşınma cihazı

*Tahribatsız Muayene (Ultrasonik Tes ve Girdap Akımları Testi)*

Numunelerin elastisite modüllerini belirlemek amacıyla ultrasonik hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir (General Electric, USM). Ultrasonik hız ölçümleri darbe-yankı tipi çift kristalli normal prob kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş numunelerin elastisite modülü (E) aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanmıştır. Bu bağıntıda $V_T$ ve $V_L$ enine ve boyuna dalga ultrasonik hızı, (ρ) ise yoğunluğu ifade etmektedir [19, 20].

$$E = \rho V_T^{\,2} \frac{3V^2_L - 4V_T^{\,2}}{V_L^{\,2} - V_T^{\,2}}$$




**Şekil 3.5:** Tahribatsız ultrasonik muayene cihazı

*Girdap Akımları (Eddy Current) İletkenlik Testi*

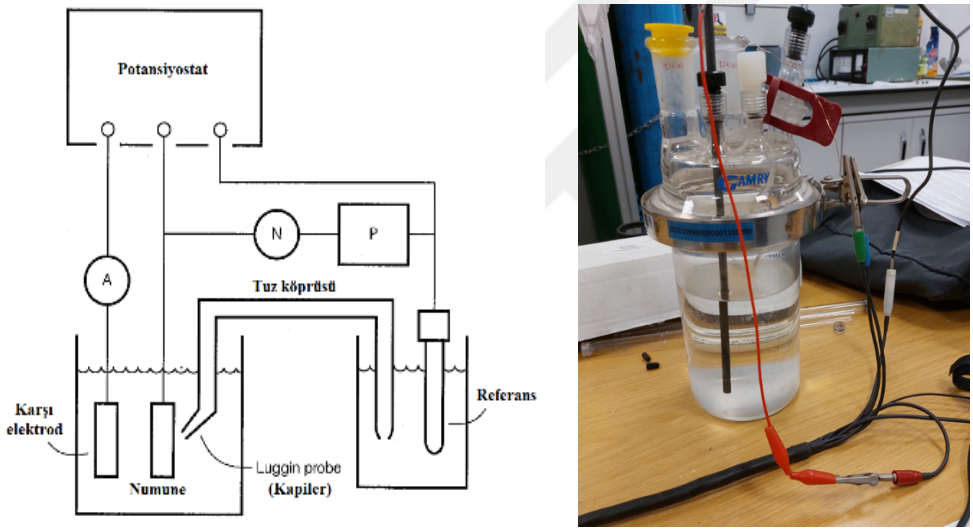
Üretilen süperalaşımların elektirksel iletkenlikleri % IACS (uluslararası tavlanmış bakır standardı) biriminden girdap akımları cihazı (EtherCheck, Ether NDE) kullanarak belirlenmiştir. Aşağıdaki şekilde girdap akımları (eddy current) cihazı görülmektedir.




**Şekil 3.6:** Tahribatsız girdap akımları test cihazı

*Elektrokimyasal Korozyon Özellikler*

Tez kapsamında üretilen alaşımların elektrokimyasal korozyon testleri %5 NaCl ortamında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çözeltinin pH değeri 6.6 olarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal korozyon testleri 1litre hacimli korozyon hücresinde potansiyostat (Interface 1000, Gamry) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Referans elektrod olarak standart kalomel elektrot (SCE), karşı elektrot olarak ise yüksek yoğunluklu grafit elektrot kullanılmıştır. Numune ise çalışma elektrodu olarak hücreye bağlanmıştır. Tüm testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Testler bilgisayar yazılımı ile elde edilmiş ve analiz edilmiştir (Gamry Framework, Gamry Analyst). Aşağıdaki şekilde elektrokimyasal test düzeneğinin şematik resmi (sol) ve kullanılan korozyon test düzeneğinin fotoğrafı görülmektedir (sağ).




**Şekil 3.7:** Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi

## 3.3. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ

*İlk Prensipler Temelli Hesaplamalı Malzeme Bilimi ile Alaşım Geliştirme*

Yenilikçi alaşım geliştirme kademesinde Cambridge sıralı toplam enerji paketi (CASTEP) hesaplamalı malzeme bilimi yazılımı kullanılmıştır. Alaşım elementlerinin yer (kafes pozisyou) tercihleri yoğunluk fonsiyonel teorisi (DFT) ile incelenmiştir. Pseudo-potansiyellerin hesaplanması kübik yapılar için Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) temelli "Genelleştirilmiş Gradyan Yaklaşımı (GGA)" kullanılarak yapılmıştır. Elektron-iyon etkileşimleri için ultrasoft pseudo-potansiyeller kullanılmıştır. Geometrik ve mekanik özellikler için optimize k noktaları ve kesilim kinetik enerjisi kullanılmıştır. Öncelikle uygun kristal kafes (hmk, ymk, hsp vb) oluşturulmuştur. Ardından uygun kafes koordinatlarına atomlar eklenmiştir. Kristal kafes türü, kristal kafes parametreleri, atom sayısı ve atom türleri belirlendikten sonra CASTEP hesaplamaları ve CASTEP analizi gerçekleştirilmiştir.

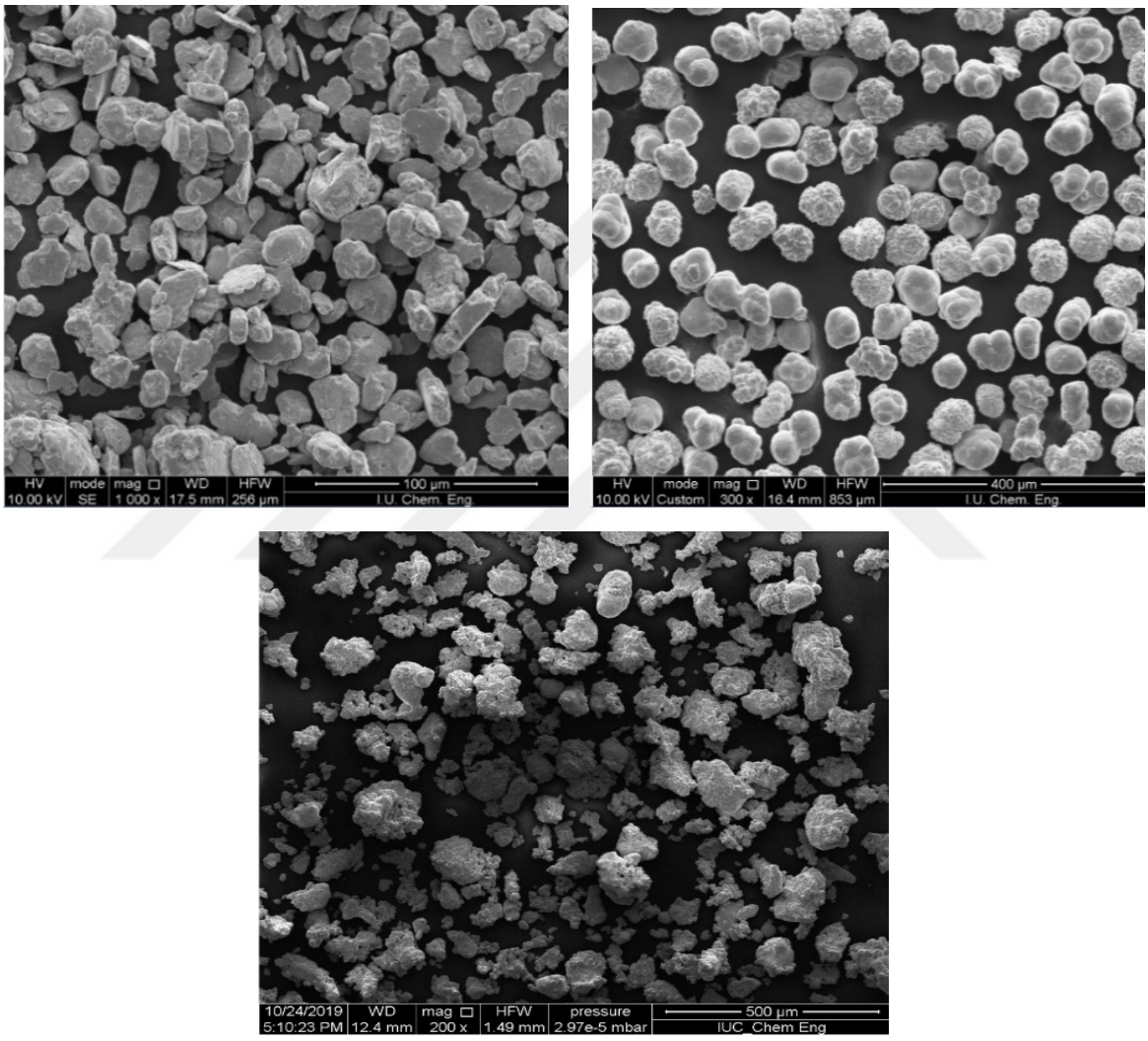
*Hesaplamalı Faz Diyagramları (CALPHAD) Yöntemi ile İnceleme*

CALPHAD temelli araştırma kapsamında Thermo-Calc yazılımı kullanılarak ikili ve üçlü faz diyagramları ve çeşitli termodinamik parametreler hesaplanmıştır.

# 4. BULGULAR

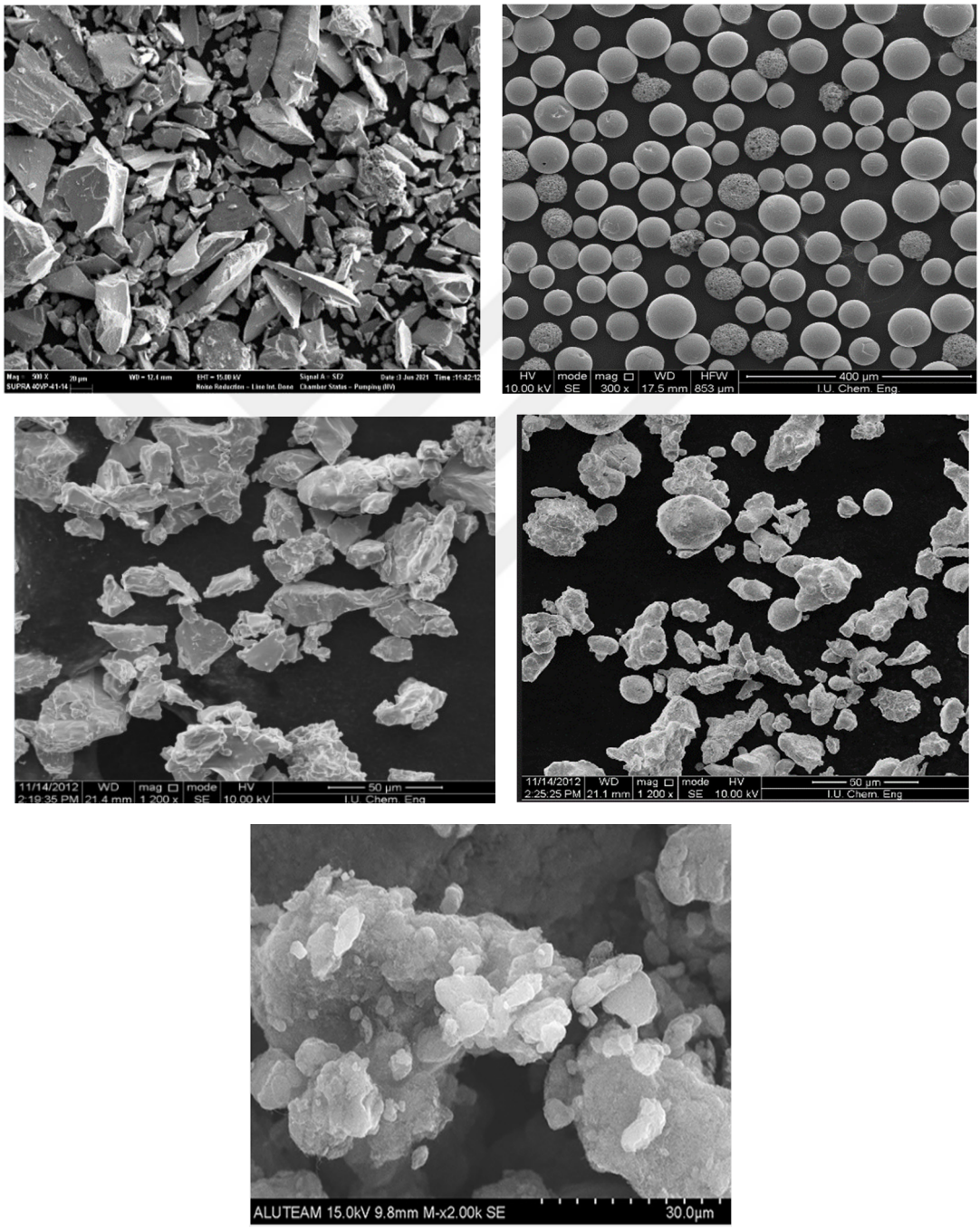
## 4.1 MİKROYAPI

Aşağıdaki Şekilde süperalaşım üretiminde kullanılan ana metallerin a) Co, b) Ni, c) Fe SEM fotoğrafları görülmektedir.



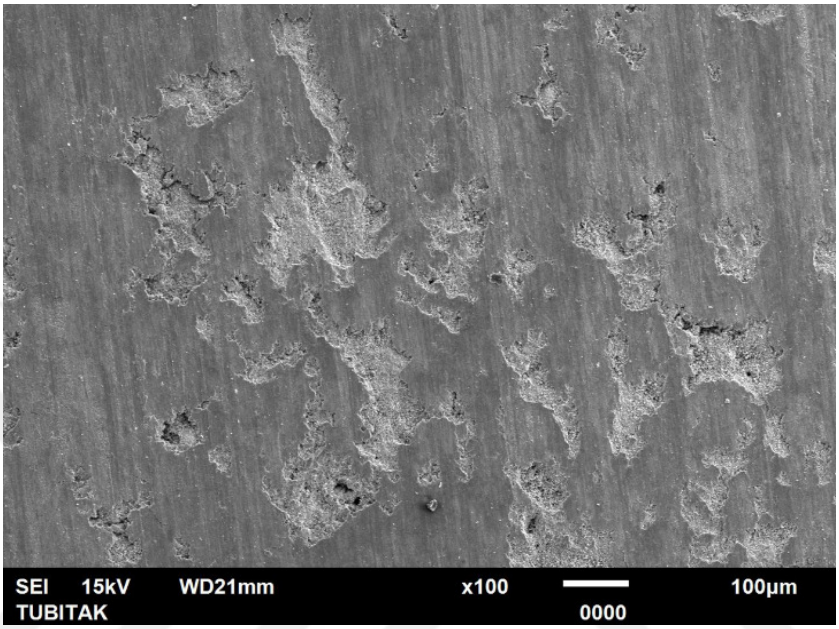

**Şekil 4.1**: Ana metallerin SEM fotoğrafları a) Co, b) Ni, c) Fe

Aşağıdaki Şekilde alaşım elementi olarak kullanılan a) Mn, b) Mo, c) Ti, d) Cu, e) CNT tozlarının SEM fotoğrafları görülmektedir. Alaşımlamada kullanulan metal tozları homojen parçacık boyutlarında olup üretim tekniklerine (su/gaz atomizasyonu) bağlı olarak Mo tozu küresel diğer tozlar ise karmaşık şekillidir.



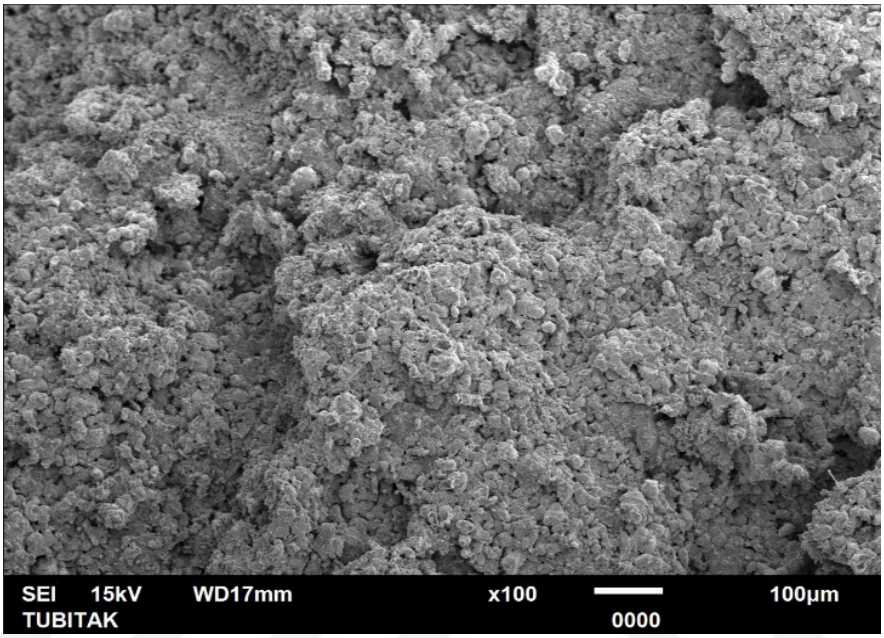

**Şekil 4.2**: İlave elementlerin SEM fotoğrafları a) Mn, b) Mo, c) Ti, d) Cu, e) CNT

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğrafından görüldüğü gibi yapıda makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir.



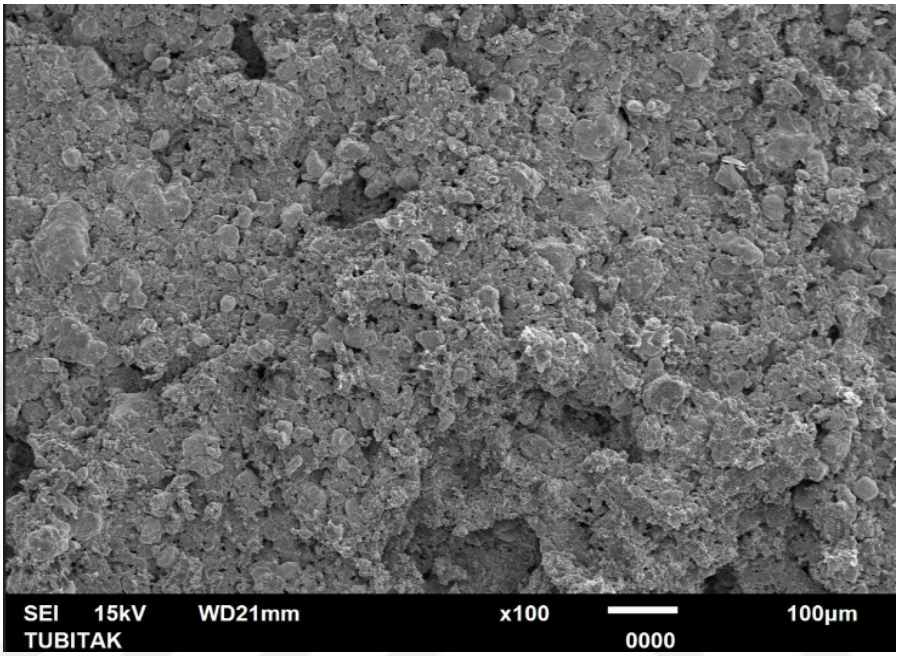

**Şekil 4.3**: Inconel 718 SEM fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğrafından görüldüğü gibi yapıda makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir.



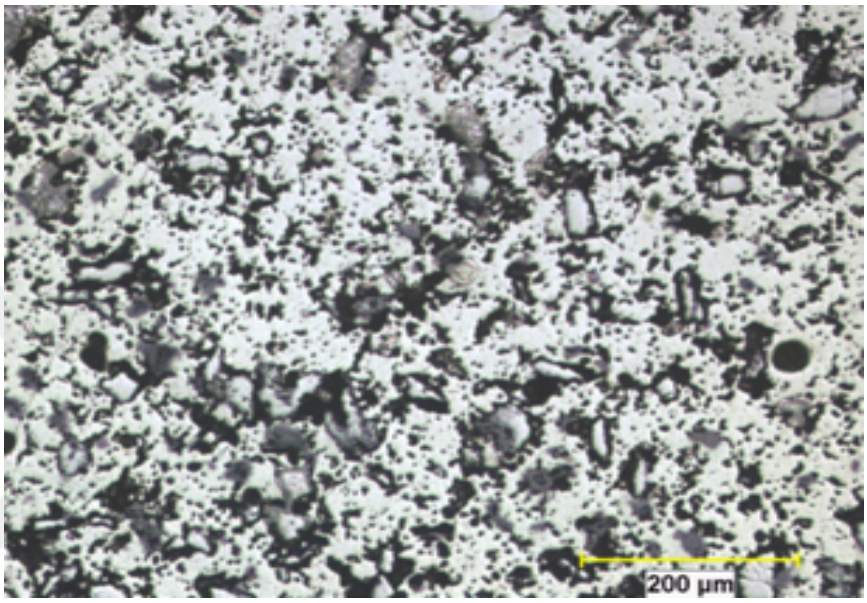

**Şekil 4.4**: Haynes 188 SEM fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğrafından görüldüğü gibi yapıda makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir.



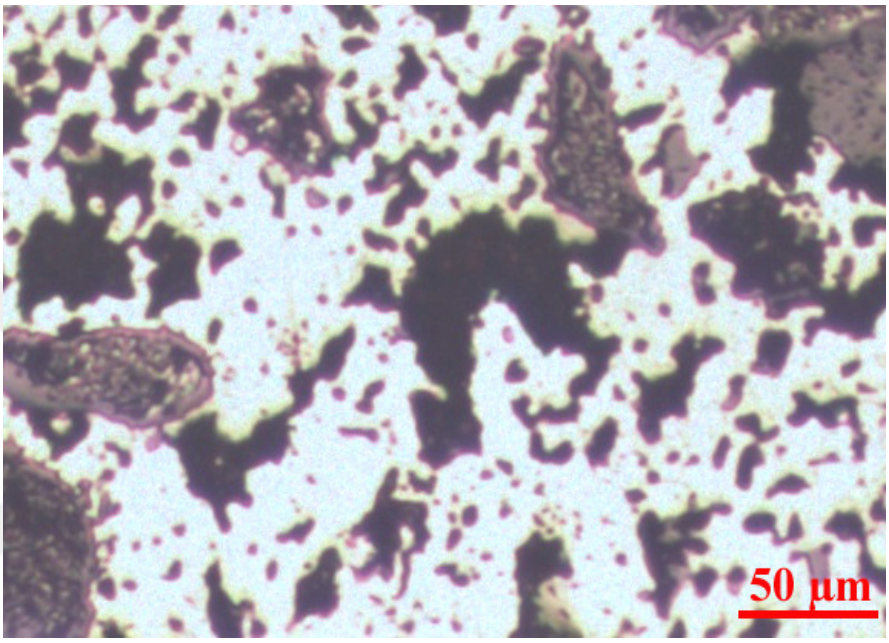

**Şekil 4.5**: Incoloy 907 SEM fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş a) Inconel 718, b) Haynes 188, c) Incoloy 907 süperalaşımların mikroyapılarını gösteren optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroskop fotoğraflarından da görüldüğü gibi yapıda makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında tane sınırlarında bir miktar intermetalik bileşik görülmektedir.



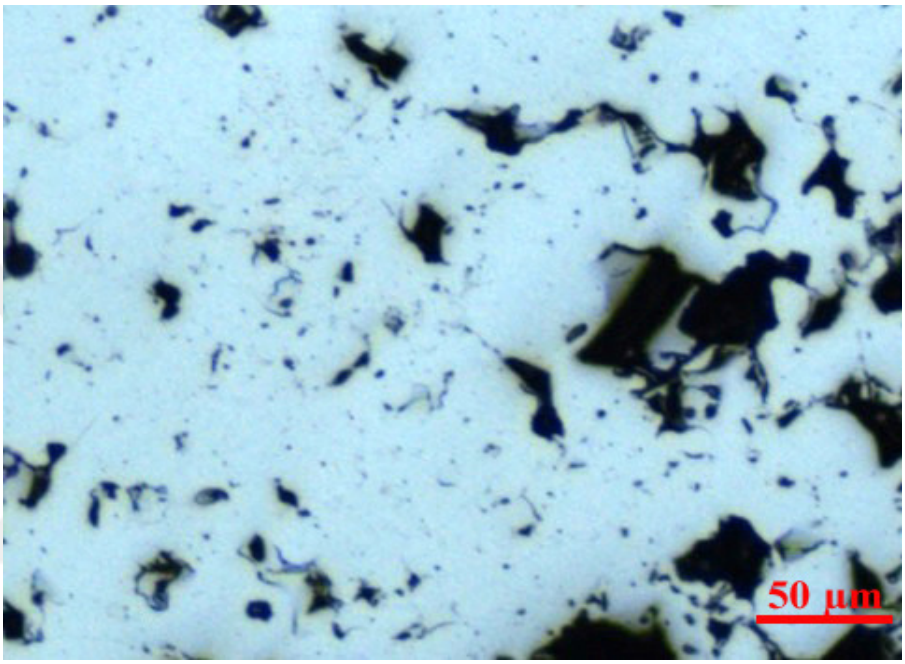

**Şekil 4.6**: Inconel 718 optik mikroskop fotoğrafı

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş a) Inconel 718, b) Haynes 188, c) Incoloy 907 süperalaşımların mikroyapılarını gösteren optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroskop fotoğraflarından da görüldüğü gibi yapıda makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında tane sınırlarında bir miktar intermetalik bileşik görülmektedir.




**Şekil 4.7**: Haynes 188 optik mikroskop fotoğrafı

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş a) Inconel 718, b) Haynes 188, c) Incoloy 907 süperalaşımların mikroyapılarını gösteren optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroskop fotoğraflarından da görüldüğü gibi yapıda makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında tane sınırlarında bir miktar intermetalik bileşik görülmektedir.




**Şekil 4.8**: Incoloy 907 optik mikroskop fotoğrafı

## 4.2 MEKANİK ÖZELLİKLER

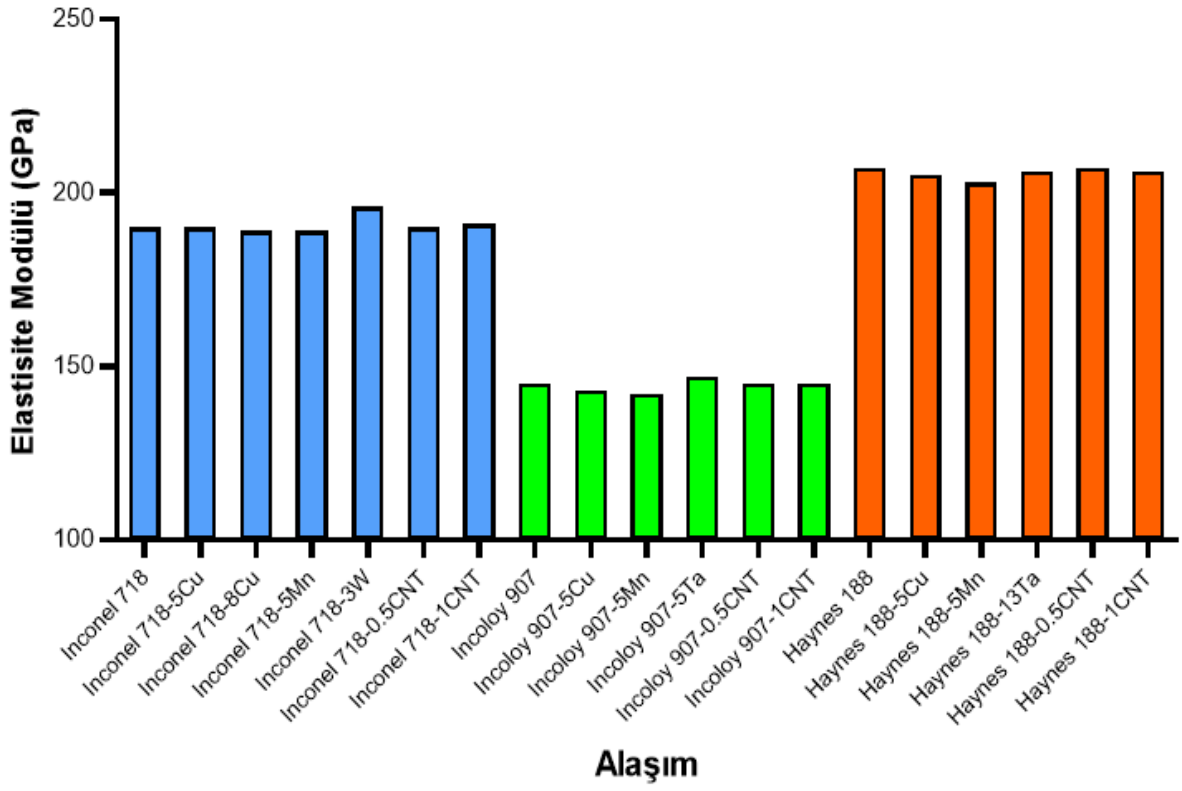
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elastisite modülü değerleri görülmektedir.

Elastisite modülünün Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Incoloy 907 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir.

Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elastisite modülünü bir miktar azalttığı görülmektedir.

Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elastisite modülünü bir miktar azalttığı görülmektedir.

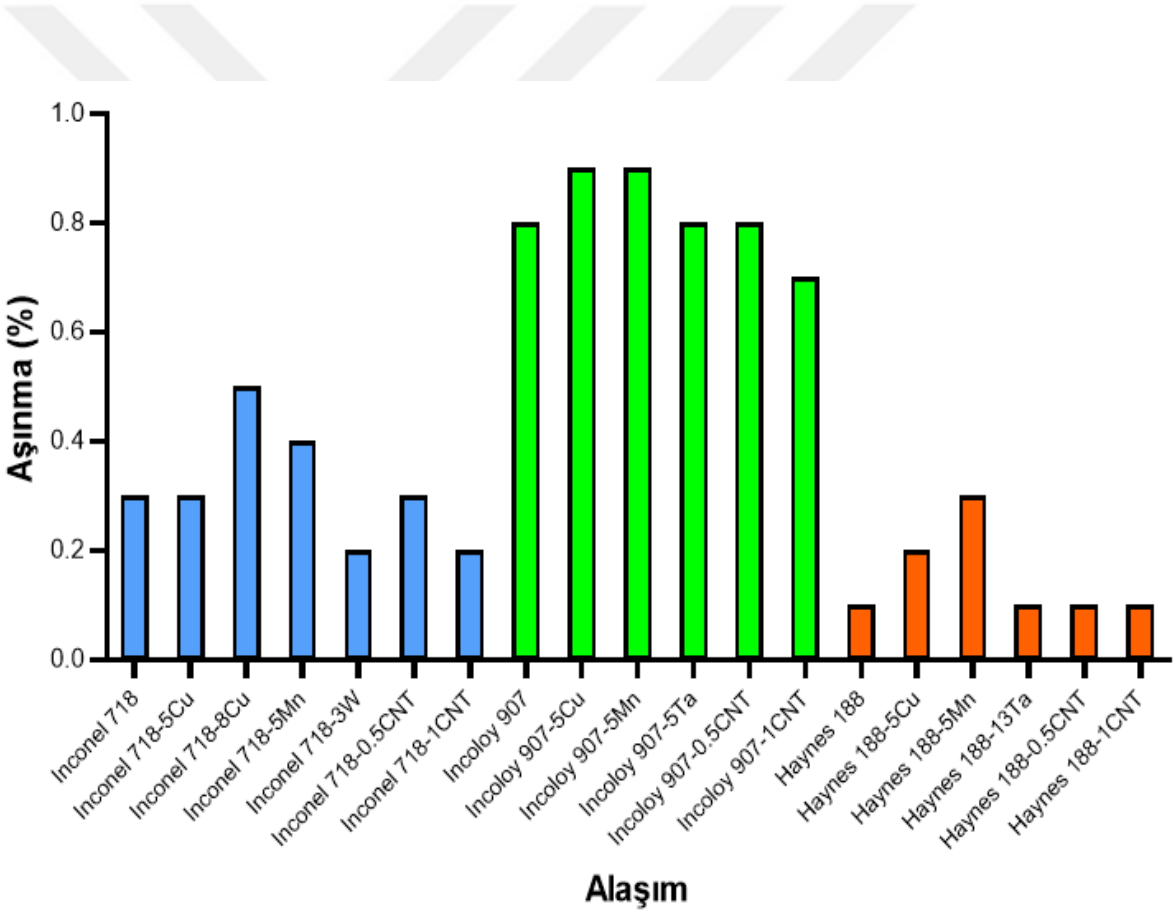
CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elastisite modülünde önemli bir değişim yaratmamıştır.




**Şekil 4.9**: Alaşımların elastisite modülleri

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların aşınma değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Aşınma oranının Haynes 188 alaşımlarında en düşük, Incoloy 907 alaşımlarında en yüksek olduğu (düşük aşınma direnci) görülmektedir.
Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında aşınma oranını artırdığı görülmektedir.
Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında aşınma oranını artırdığı görülmektedir.
CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında aşınma oranını azaltmıştır (aşınma direnci artmıştır).




**Şekil 4.10**: Alaşımların aşınma değerleri

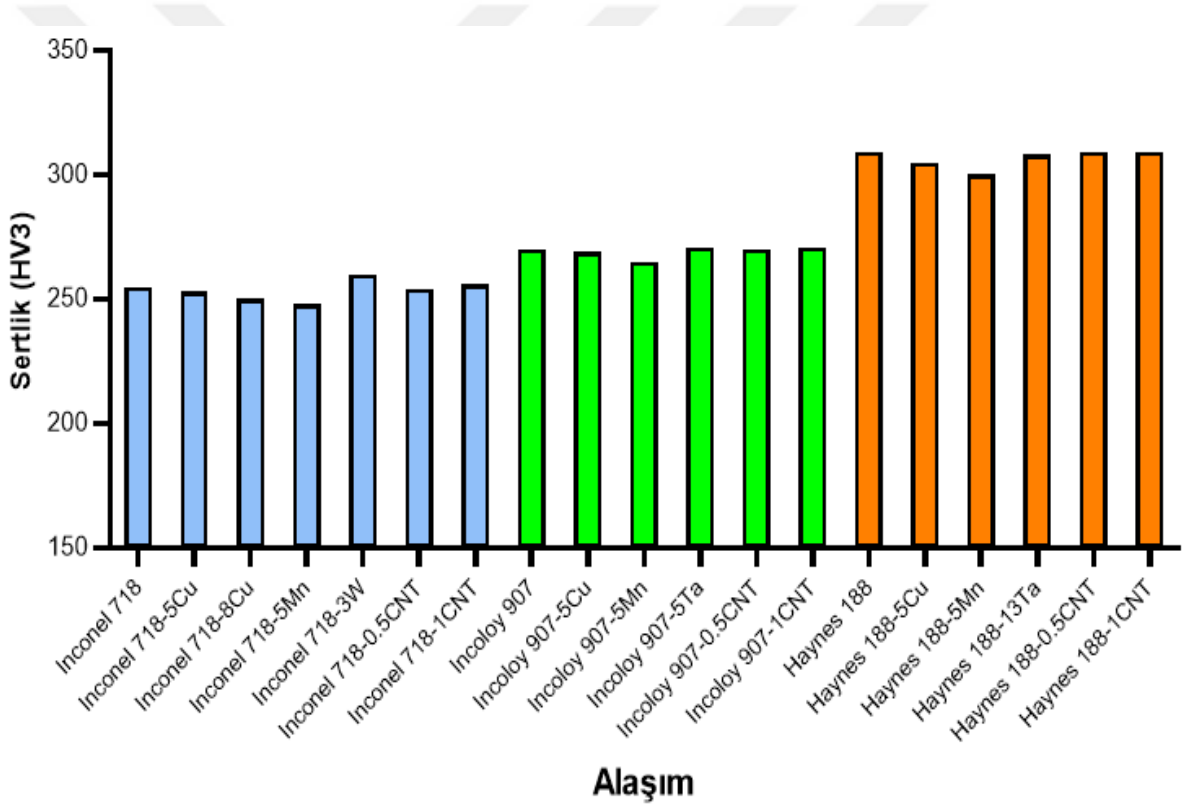
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların sertlik değerleri görülmektedir.

Sertlik değerinin Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Inconel 718 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir.

Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında sertlik değerini bir miktar azalttığı görülmektedir.

Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında sertlik değerini bir miktar azalttığı görülmektedir.

CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında sertlik değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır.




**Şekil 4.11**: Alaşımların sertlik değerleri

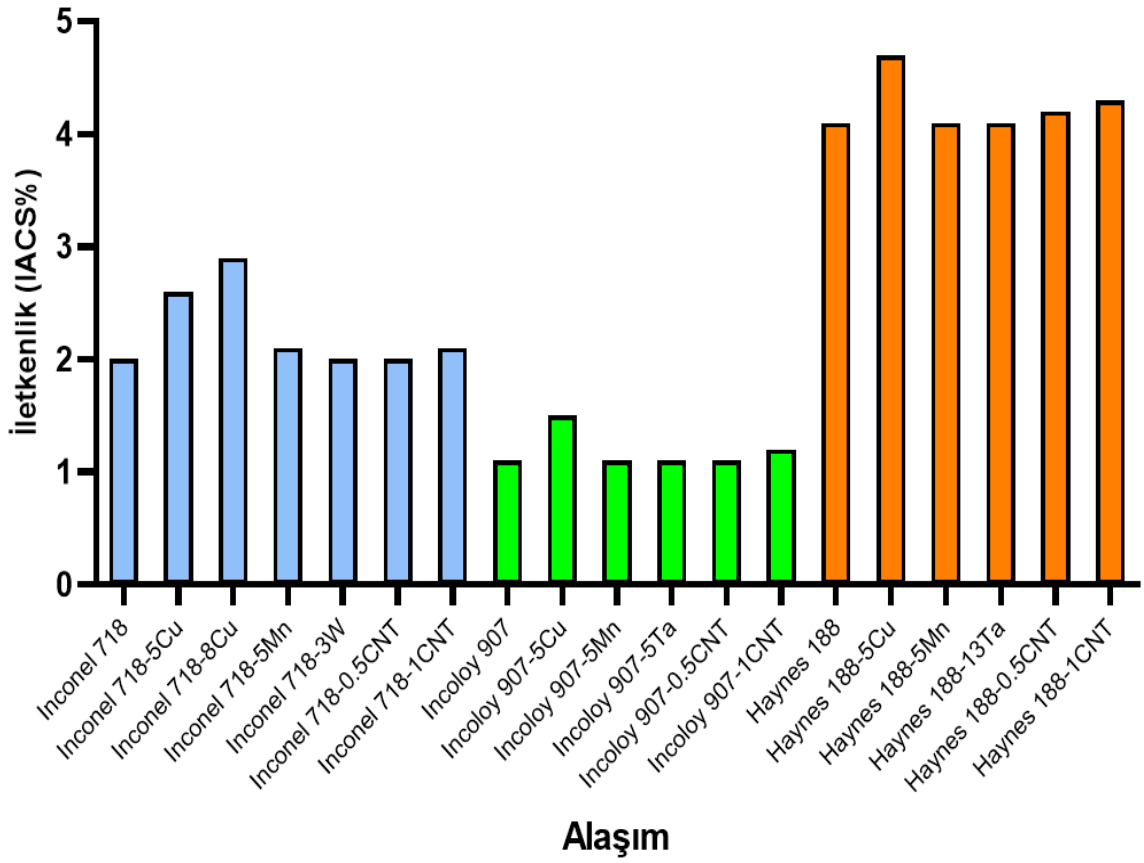
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elektriksel iletkenlik değerleri görülmektedir.

Elektriksel iletkenlik değerinin Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Incoloy 907 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir.

Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elektriksel iletkenlik değerini bir miktar azalttığı görülmektedir.

Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elektriksel iletkenlik değerini çok ciddi bir oranda artırdığı görülmektedir.

CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elektriksel iletkenlik değerinde bir miktar artış yaratmıştır.




**Şekil 4.12**: Alaşımların iletkenlik değerleri

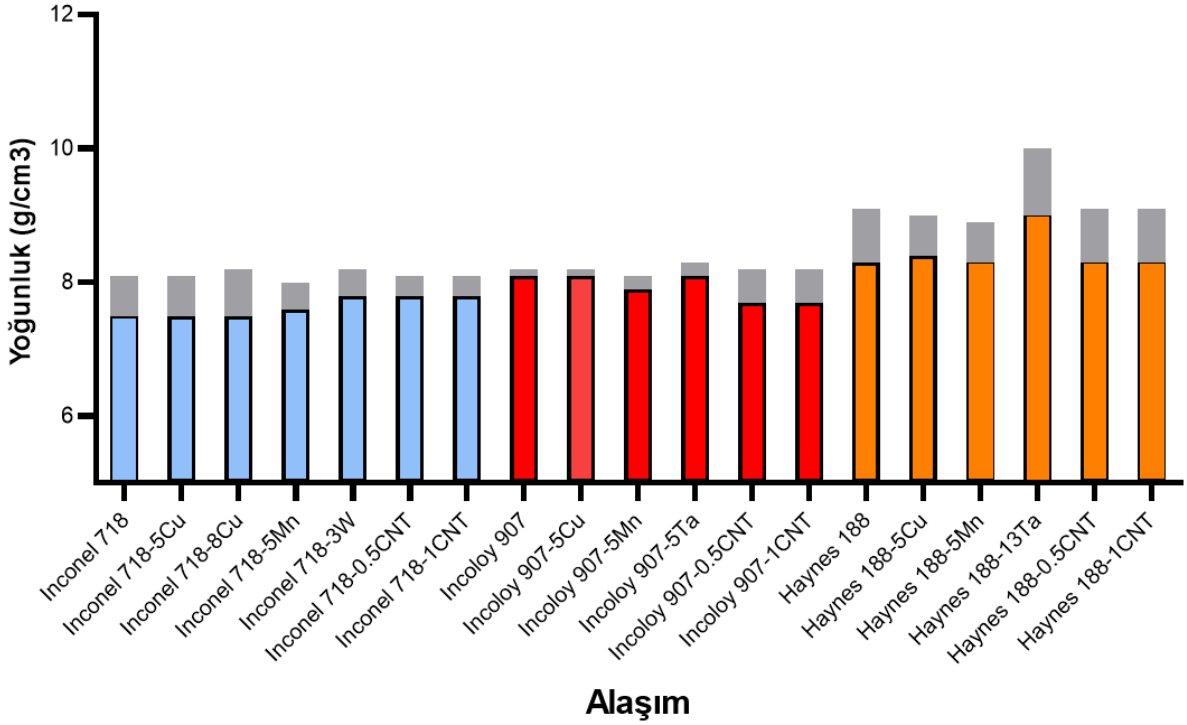
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların sinterlenmiş numune yoğunlukları ve teorik yoğunluk değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Yoğunluk değerinin Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Incoloy 907 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir.

Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yoğunluk değerini bir miktar azalttığı görülmektedir.

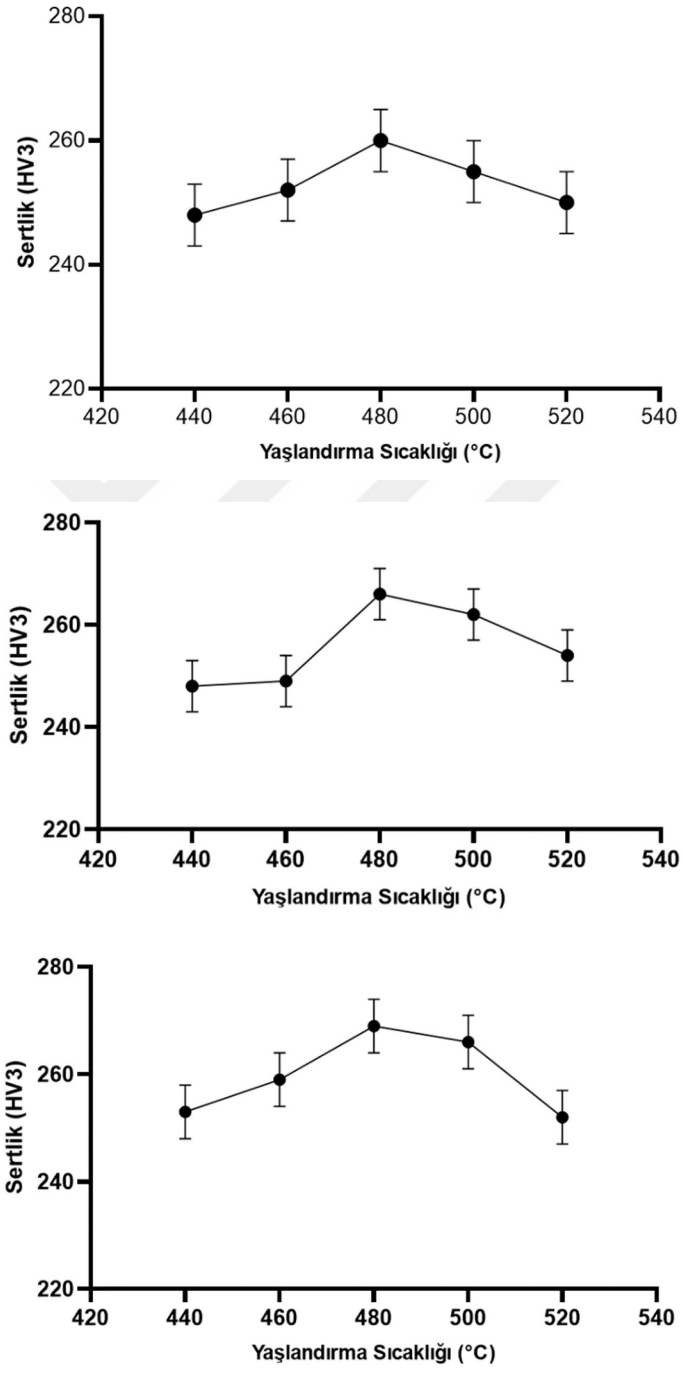
Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yoğunluk değerini bir miktar azalttığı görülmektedir.

CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yoğunluk değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır. Bu durum CNT ilave oranının çok düşük olmasına bağlanabilir.




**Şekil 4.13**: Alaşımların yoğunluk değerleri

Aşağıdaki Şekilde sinterlenmiş numunelerin yaşlandırma sıcaklığının etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek mekanik özellikler 480 °C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilmiştir.




**Şekil 4.14:** Yaşlandırma sıcaklığının etkisi a) Inconel 718, b) Incoloy 907, c) Haynes 188

## 4.3 ELEKTROKİMYASAL KOROZYON ÖZELLİKLERİ

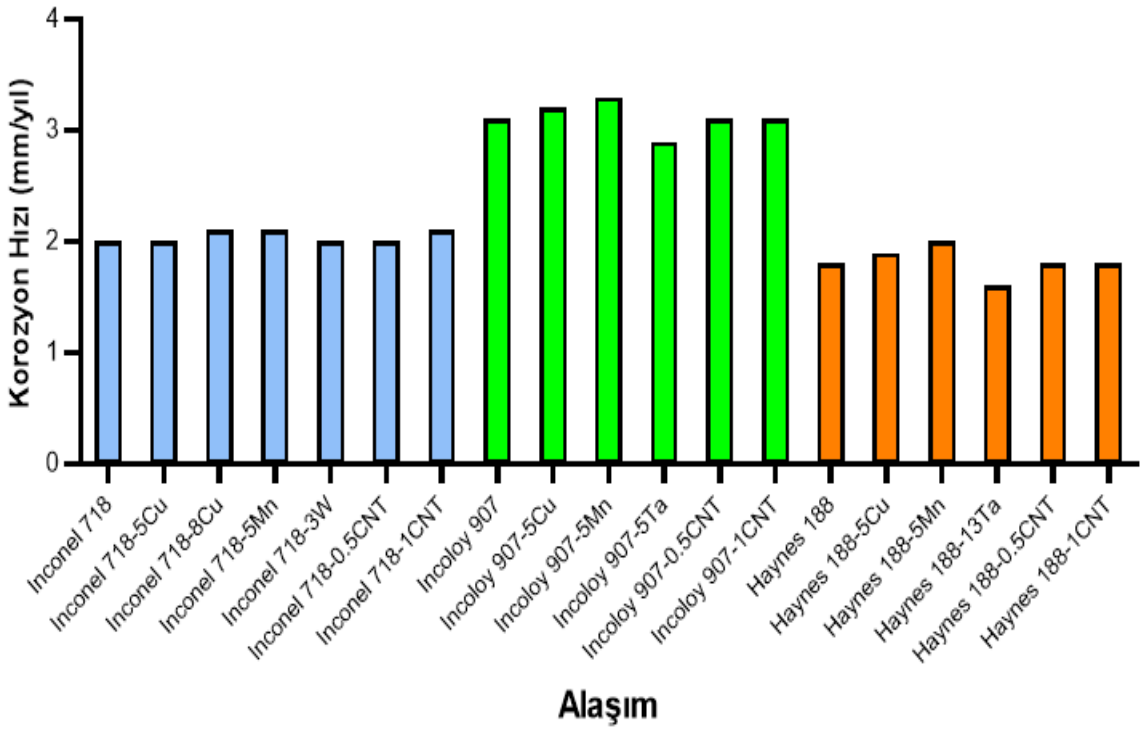
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elektrokimyasal korozyon testleri ile tespit edilen korozyon hızı değerleri görülmektedir.

Korozyon hızının Incoloy 907 alaşımlarında en yüksek, Haynes 188 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir.

Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında korozyon hızı değerini bir miktar artırdığı görülmektedir.

Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında korozyon hızı değerini bir miktar artırdığı görülmektedir.

CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında korozyon hızı değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır.




**Şekil 4.15**: Alaşımların korozyon hızı değerleri

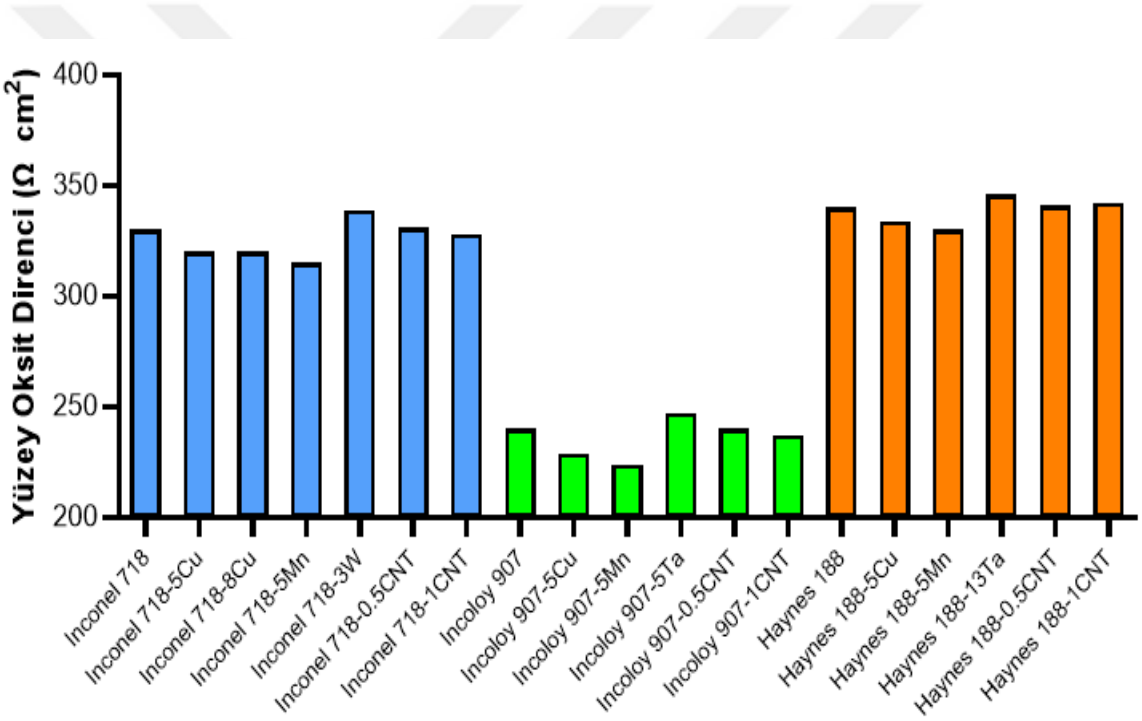
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elektrokimyasal empedans spektroskopisi testi ile tespit edilen yüzey oksit film direnci değerleri görülmektedir.

Yüzey oksit direncinin Incoloy 907 alaşımlarında en düşük, Haynes 188 alaşımlarında en yüksek olduğu görülmektedir.

Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yüzey oksit direncini bir miktar azalttığı görülmektedir.

Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yüzey oksit direncini bir miktar azalttığı görülmektedir.

CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yüzey oksit direncini değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır.

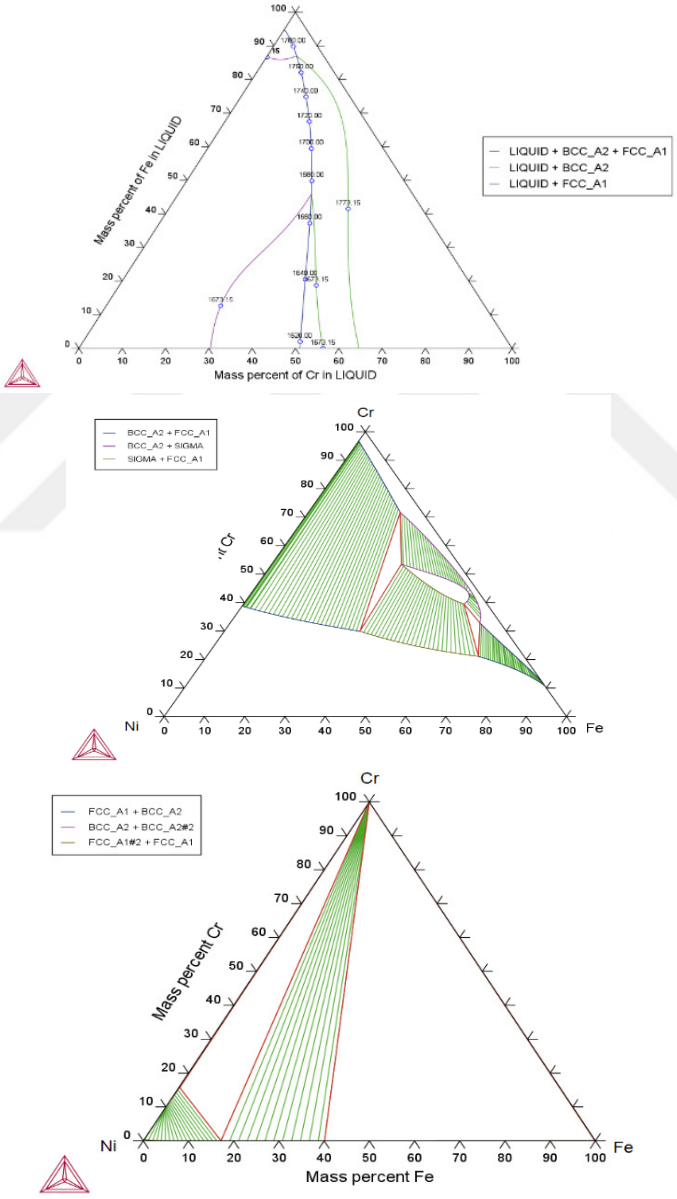



**Şekil 4.16**: Alaşımların yüzey oksit direnci değerleri

## 4.4 HESAPLAMALI FAZ DİYAGRAMLARI

*Ni-Fe-Cr Sistemi (Inconel 718)*

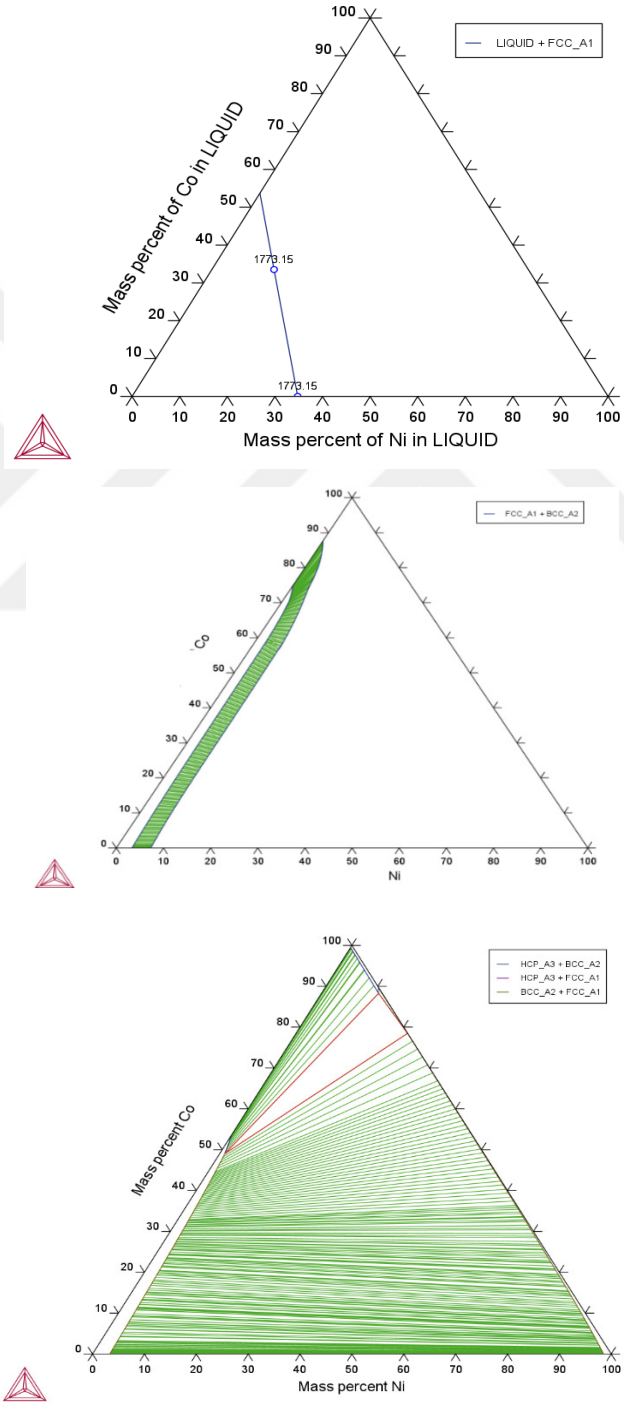
Aşağıdaki şekilde "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş Ni-Fe-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu (30-1500 °C), b) 900 °C üçlü faz diyagramı, c) 30 °C üçlü faz faz diyagramı görülmektedir.




**Şekil 4.17**: Ni-Fe-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları

*Fe-Ni-Co Sistemi (Incoloy 907)*

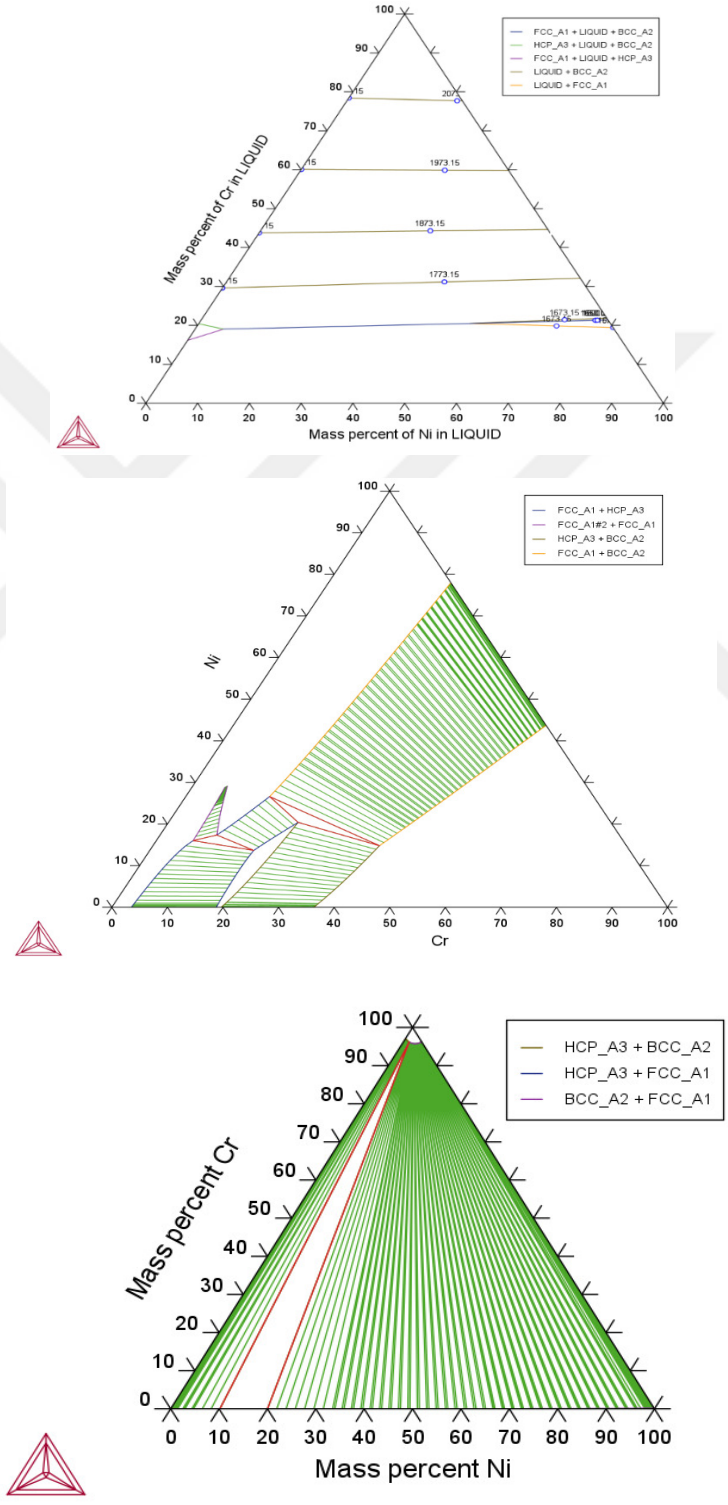
Aşağıdaki şekilde "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş Fe-Ni-Co sistemi a) likidus projeksiyonu (30-1500 °C), b) 900 °C üçlü faz diyagramı, c) 30 °C üçlü faz faz diyagramı görülmektedir.




**Şekil 4.18**: Fe-Ni-Co sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları

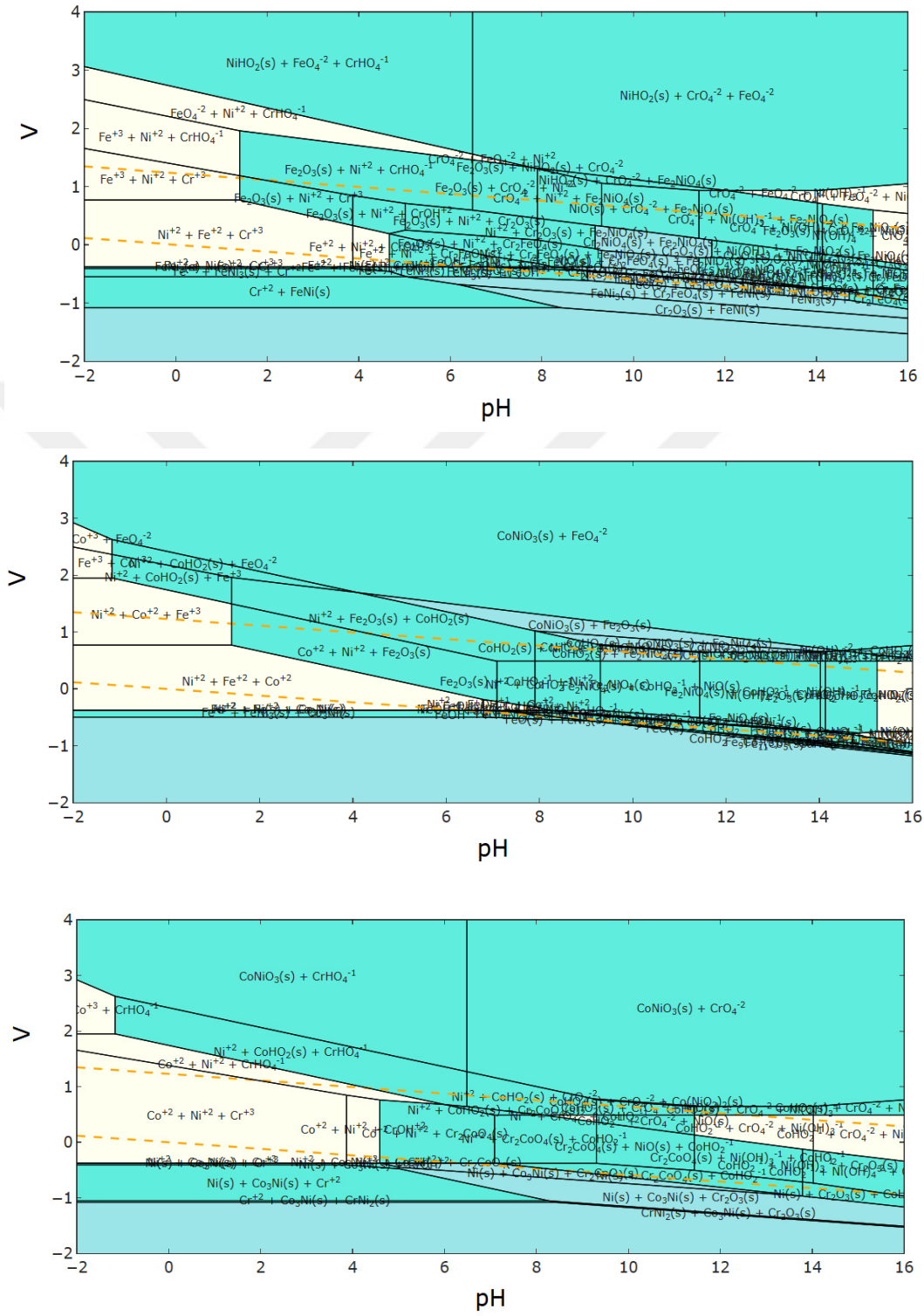
*Co-Ni-Cr Sistemi (Haynes 188)*

Aşağıdaki şekilde "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş Co-Ni-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu (30-1500 °C), b) 900 °C üçlü faz diyagramı, c) 30 °C üçlü faz faz diyagramı görülmektedir.




**Şekil 4.19**: Co-Ni-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları

Aşağıdaki şekilde a) Ni-Fe-Cr üçlü sistemi, b) Fe-Ni-Co üçlü sistemi, c) Co-Ni-Cr üçlü sistemi Pourbaix diyagramları görülmektedir.

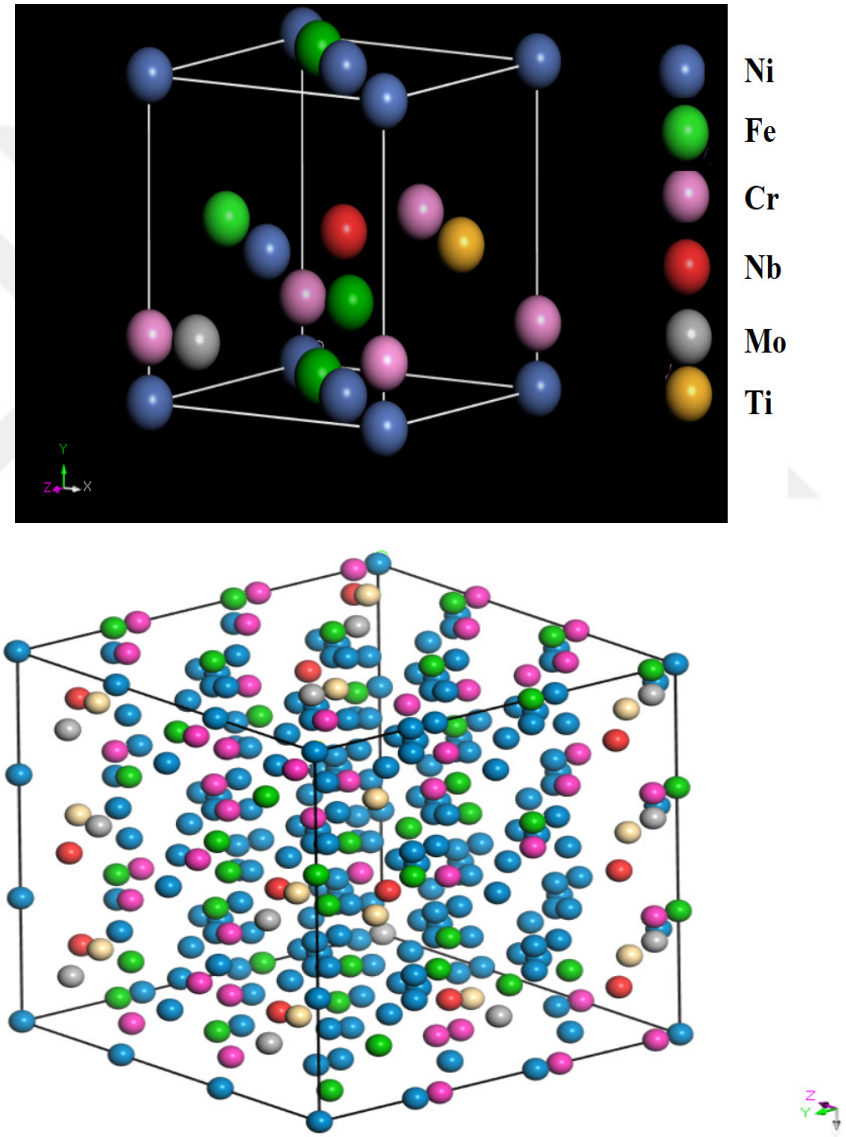



**Şekil 4.20:** Alaşımların Pourbaix diyagramları a) Ni-Fe-Cr sistemi, b) Fe-Ni-Co sistemi, c) Co-Ni-Cr sistemi

## 4.5 YOĞUNLUK FONKSİYONEL TEORİSİ HESAPLAMALARI

*Malzeme Bilimi (CASTEP - Materials Studio)*

Aşağıdaki şekilde Tez kapsamında incelenen süperalaşımların birim kafesi ve hesaplamaların yapıldığı süperkafes yapısı görülmektedir. CASTEP yazılımı ile gerçekleştirilen ilk prensipler esaslı hesaplamalar için aşağıda görülen kafes yapıları oluşturulmuş ve ardından hesaplamalar süperkafes üzerinde gerçekleştirilmiştir.




**Şekil 4.21.** a) Birim kristal kafes ve b) süperlatis

*Kafes Özellikleri*

Aşağıdaki tabloda alaşımların CASTEP kodu ile hesaplanmış kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri değerleri görülmektedir.

**Tablo 4.1.** Alaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri

| Alaşım | a (A) | b (A) | c (A) | α (°) | β (°) | γ (°) | Hacim (A) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Inconel 718** | 3.595 | 3.595 | 3.595 | 90 | 90 | 90 | 46.46 |
| **Inconel 718-5Cu** | 3.620 | 3.620 | 3.620 | 90 | 90 | 90 | 47.43 |
| **Inconel 718-8Cu** | 3.626 | 3.626 | 3.626 | 90 | 90 | 90 | 47.67 |
| **Inconel 718-5Mn** | 3.601 | 3.601 | 3.601 | 90 | 90 | 90 | 46.69 |
| **Inconel 718-3W** | 3.640 | 3.640 | 3.640 | 90 | 90 | 90 | 48.22 |
| **Inconel 718-0.5CNT** | 3.596 | 3.596 | 3.596 | 90 | 90 | 90 | 46.50 |
| **Inconel 718-1CNT** | 3.599 | 3.599 | 3.599 | 90 | 90 | 90 | 46.61 |
| **Incoloy 907** | 3.655 | 3.655 | 3.655 | 90 | 90 | 90 | 48.82 |
| **Incoloy 907-5Cu** | 3.662 | 3.662 | 3.662 | 90 | 90 | 90 | 49.10 |
| **Incoloy 907-5Mn** | 3.659 | 3.659 | 3.659 | 90 | 90 | 90 | 48.98 |
| **Incoloy 907-5Ta** | 3.671 | 3.671 | 3.671 | 90 | 90 | 90 | 49.47 |
| **Incoloy 907-0.5CNT** | 3.655 | 3.655 | 3.655 | 90 | 90 | 90 | 48.82 |
| **Incoloy 907-1CNT** | 3.656 | 3.656 | 3.656 | 90 | 90 | 90 | 48.86 |
| **Haynes 188** | 3.570 | 3.570 | 3.570 | 90 | 90 | 90 | 45.49 |
| **Haynes 188-5Cu** | 3.578 | 3.578 | 3.578 | 90 | 90 | 90 | 45.80 |
| **Haynes 188-5Mn** | 3.573 | 3.573 | 3.573 | 90 | 90 | 90 | 45.61 |
| **Haynes 188-13Ta** | 3.598 | 3.598 | 3.598 | 90 | 90 | 90 | 46.57 |
| **Haynes 188-0.5CNT** | 3.571 | 3.571 | 3.571 | 90 | 90 | 90 | 45.53 |
| **Haynes 188-1CNT** | 3.572 | 3.572 | 3.572 | 90 | 90 | 90 | 45.57 |

*Elastik Özellikler*

Üretilen süperalaşımların mekanik kararlılıkları Born-Huan kübik yapı mekanik kararlılık şartları dikkate alınarak incelenmiştir. Üretilen süperalaşımların elastik sabitleri hesaplanmış ve aşağıdaki bağıntılar ile mekanik karalılık hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

$$C^I = \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} \quad (4.1)$$

$$A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} \quad (4.2)$$

$$C_{11} + 2C_{12} > 0 \quad (4.3)$$

$$C_{11} - C_{12} > 0 \quad (4.4)$$

$$C_{44} > 0 \quad (4.5)$$

Kübik kristal kafes yapılarda $C_{11}$, $C_{12}$ ve $C_{44}$ bağımsız elastik değişkenlerdir

Aşağıdaki tabloda üretilen süperalaşımların CASTEP kodu ile hesaplanmış elastiklik sabitleri değerleri ($C_{11}$, $C_{12}$, $C_{44}$) ve anizotropi parametresi (A) görülmektedir.

Genel olarak elastiklik sabitleri değerleri ($C_{11}$, $C_{12}$, $C_{44}$) mekanik kararlılık kriterlerini (Eşitlik 4.3, 44, ve 4.5) sağlamakta olup alaşımların kararlı oldukları söylenebilir.

$C^I$ değerinin negatif olması alaşımın kararsız olduğu, pozitif olması kararlı olduğu anlamına gelmekte olup, tüm $C^I$ değerleri pozitif olduğundan mekanik kararlılık şartı sağlanmaktadır.

Anizotropi katsayısı (A), alaşımın anizotropisi hakkında bilgi vermekte olup 1.0 değeri izotropik davranışı 1.0 değerinden farklı olması anizotropiyi göstermektedir. Genel olarak alaşımların anizotropi değerleri birbirine yakın olup 2.0 değeri yakınındadır.

Aşağıdaki tabloda tez kapsamında üretilen süperlaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri görülmektedir.

**Tablo 4.2.** Alaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri

| Alaşım | $C_{11}$ (GPa) | $C_{12}$ (GPa) | $C_{44}$ (GPa) | $C^I$ (GPa) | A (GPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Inconel 718** | 246 | 147 | 106 | 49,5 | 2,14 |
| **Inconel 718-5Cu** | 240 | 141 | 101 | 49,5 | 2,04 |
| **Inconel 718-8Cu** | 231 | 130 | 99 | 50,5 | 1,96 |
| **Inconel 718-5Mn** | 225 | 129 | 99 | 48 | 2,06 |
| **Inconel 718-3W** | 225 | 129 | 99 | 48 | 2,06 |
| **Inconel 718-0.5CNT** | 250 | 148 | 107 | 51 | 2,09 |
| **Inconel 718-1CNT** | 252 | 150 | 109 | 51 | 2,13 |
| **Incoloy 907** | 231 | 130 | 99 | 50,5 | 1,96 |
| **Incoloy 907-5Cu** | 247 | 147 | 100 | 50 | 2.00 |
| **Incoloy 907-5Mn** | 240 | 150 | 110 | 45 | 2,44 |
| **Incoloy 907-5Ta** | 241 | 131 | 106 | 55 | 1,92 |
| **Incoloy 907-0.5CNT** | 230 | 129 | 97 | 50,5 | 1,92 |
| **Incoloy 907-1CNT** | 226 | 126 | 101 | 50 | 2,02 |
| **Haynes 188** | 220 | 127 | 102 | 46,5 | 2,19 |
| **Haynes 188-5Cu** | 247 | 149 | 100 | 49 | 2,04 |
| **Haynes 188-5Mn** | 250 | 152 | 111 | 49 | 2,26 |
| **Haynes 188-13Ta** | 233 | 130 | 100 | 51,5 | 1,94 |
| **Haynes 188-0.5CNT** | 246 | 147 | 102 | 49,5 | 2,06 |
| **Haynes 188-1CNT** | 247 | 145 | 101 | 51 | 1,98 |

**Mekanik Özellikler**

Tez kapsamında üretilen Inconel 718 esaslı süperalaşımların Bulk modülü (B), Kayma modulu (G), Young's modülü (E), Poisson oranı (ρ), sertlik (H) değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır ve değerlendrilmiştir.

$$\mathrm{E} = \frac{1}{5}\left(3C_{44} + C_{11} - C_{12}\right) \tag{4.6}$$

$$\mathrm{B} = \frac{1}{3}\left(C_{11} + 2C_{12}\right) \tag{4.7}$$

$$\mathrm{G} = \frac{\mathrm{C_{11}} - \mathrm{C_{12}} + 3\mathrm{C_{44}}}{5} \tag{4.8}$$

$$\rho = \frac{3\mathrm{B} - 2\mathrm{G}}{2(3B + G)} \tag{4.9}$$

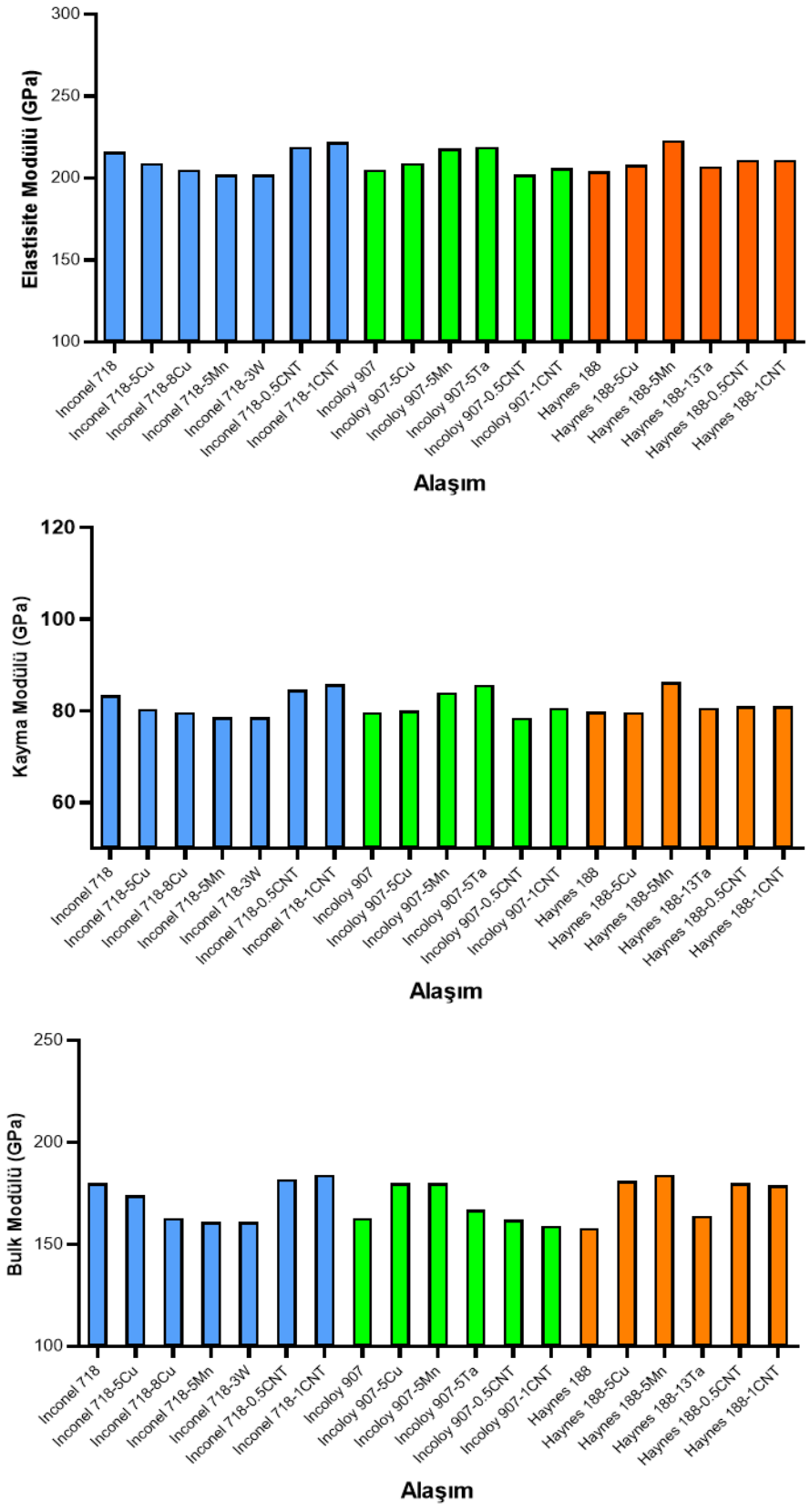
$$\left(H_V\right)_{Tian} = 0.92\left(\frac{\mathrm{G}}{\mathrm{B}}\right)^2 G^{0.708} \tag{4.10}$$

Aşağıdaki tabloda alaşımların CASTEP kodu ile hesaplanmış Bulk modülü (B), Kayma modülü (G), Young modülü (E), Poisson oranı (ρ), G/B oranı (Pugh oranı), sertlik değeri (H) ve kırılma tokluğu (K) değerleri görülmektedir.

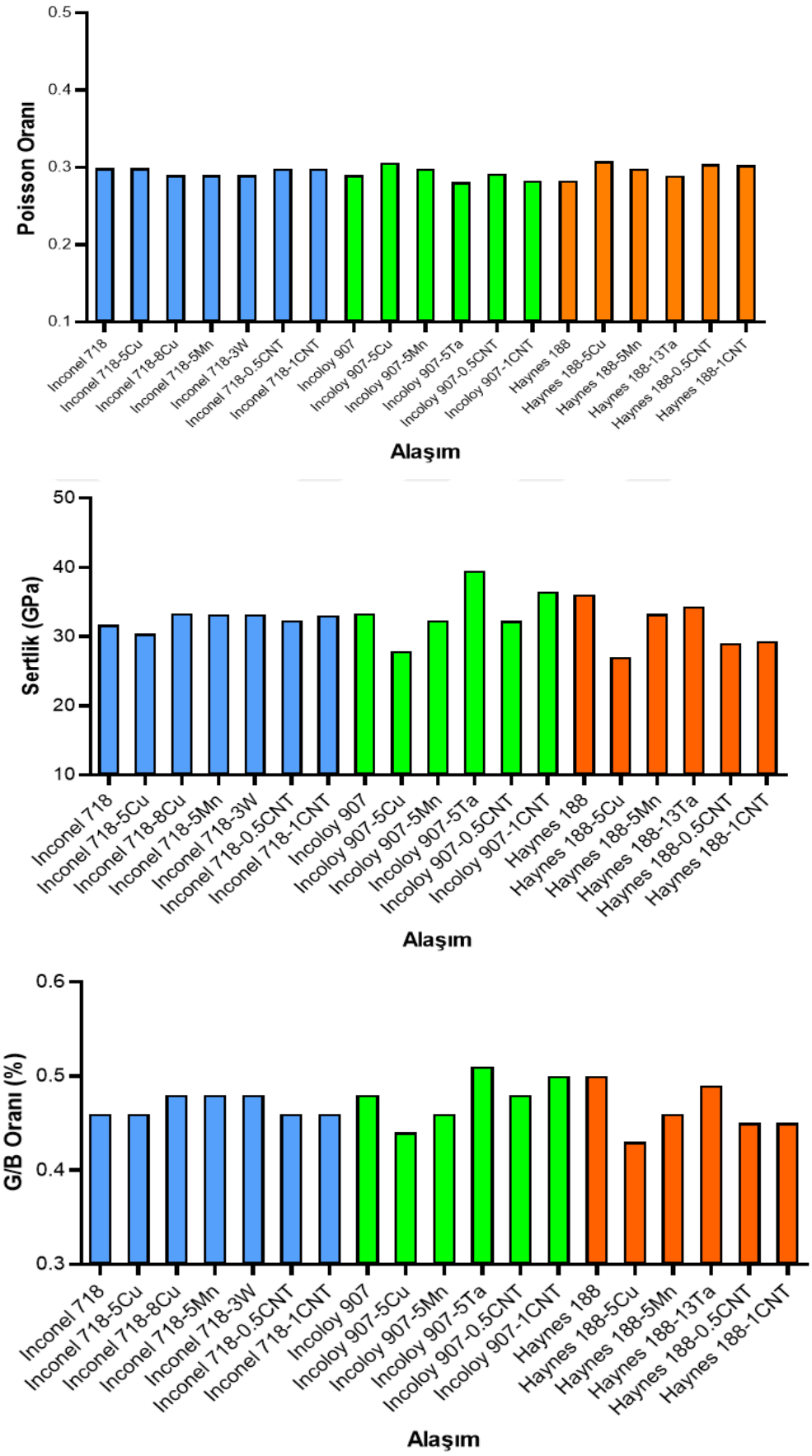
Ti ilavesi ile Bulk modülü (B), Kayma modülü (G), Young modülü (E) değerlerinde bir miktar düşüş meydana gelmiştir.

Genel olarak Poisson oranı bağ yapısı, plastik deformasyon kapasitesi ve süneklik hakkında bilgi vermekte olup 0.3 ve üzerinde sünek davranış görülmektedir. Gevrek ve kovalent malzemelerde Poisson oranı yaklaşık 0.1 değerindedir.

Pugh değeri sünek-gevrek davranış için bir kriter olup 0.57 değerinden düşük olması sünek karakteri işaret etmektedir.




**Şekil 4.22.** Alaşımların hesaplanmış teorik elastiklik modülleri




**Şekil 4.23.** Alaşımların hesaplanmış teorik mekanik özellikleri

# 5. TARTIŞMA

Elastisite modülünün Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Incoloy 907 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elastisite modülünü bir miktar azalttığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elastisite modülünü bir miktar azalttığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elastisite modülünde önemli bir değişim yaratmamıştır.

Aşınma oranının Haynes 188 alaşımlarında en düşük, Incoloy 907 alaşımlarında en yüksek olduğu (düşük aşınma direnci) görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında aşınma oranını artırdığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında aşınma oranını artırdığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında aşınma oranını azaltmıştır (aşınma direnci artmıştır).

Sertlik değerinin Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Inconel 718 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında sertliği bir miktar azalttığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında sertlik değerini bir miktar azalttığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında sertlik değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır. Turan [27] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, yerli imkanlar kullanılarak üretilen Inconel 625 süperalaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda üçlü ergitme yöntemiyle üretilen ingotlar gaz atomizasyon yöntemiyle toz haline getirilmiş, ardından seçici lazer ergitme yöntemiyle 3B olarak üretilmiştir. Numuneler 1070 °C'de çözeltiye alma, 870 °C'de birinci yaşlandırma ve 649 °C'de ikinci yaşlandırma ısıl işlemlerine tabi tutulmuştur. Mikroyapıda meydana gelen değişiklerin mekanik özelliklere yansıması 760°C'de yapılan yüksek sıcaklık çekme ve 760°C/207 MPa'da yapılan sürünme testleriyle desteklenmiştir. Isıl işlem ile tane sınırlarında çökelen MC karbürlerin ve δ-fazlarının sürünme ömrünü arttırdığı tespit edilmiştir.

Elektriksel iletkenlik değerinin Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Incoloy 907 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188

alaşımlarında elektriksel iletkenlik değerini bir miktar azalttığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elektriksel iletkenlik değerini çok ciddi bir oranda artırdığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında elektriksel iletkenlik değerinde bir miktar artış yaratmıştır.

Yoğunluk değerinin Haynes 188 alaşımlarında en yüksek, Incoloy 907 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yoğunluk değerini bir miktar azalttığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yoğunluk değerini bir miktar azalttığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yoğunluk değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır. Bu durum CNT ilave oranının çok düşük olmasına bağlanabilir.

Korozyon hızının Incoloy 907 alaşımlarında en yüksek, Haynes 188 alaşımlarında en düşük olduğu görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında korozyon hızı değerini bir miktar artırdığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında korozyon hızı değerini bir miktar artırdığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında korozyon hızı değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır.

Yüzey oksit direncinin Incoloy 907 alaşımlarında en düşük, Haynes 188 alaşımlarında en yüksek olduğu görülmektedir. Mn ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yüzey oksit direncini bir miktar azalttığı görülmektedir. Cu ilavesinin Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yüzey oksit direncini bir miktar azalttığı görülmektedir. CNT ilavesi Inconel 718, Incoloy 907 ve Haynes 188 alaşımlarında yüzey oksit direncini değerinde önemli bir değişim yaratmamıştır.

Aşağıdaki tabloda ilk prensipler esaslı hesaplamalı malzeme bilimi (CASTEP) yazılımı ile elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması görülmektedir. Alaşımlarının teorik elastisite modülleri ile deneysel belirlenmiş elastisite modülleri arasında yaklaşık % 0-50 fark oluşmuştur. Genel olarak mevcut bilgisayar kapasitesinden dolayı belirli boyutta süperlatis üretilebilmesi ve hesaplamaların hassas yerine orta hassasiyet modunda gerçekleştirilmesi sonucu teorik ve deneysel veriler arasında fark oluştuğu kanaatine varılmıştır. Ayrıca deneysel alaşımlarda mikroyapıda kalıntı fazların bulunması ve tamamen homojen yapı olmaması ve kafes hatalarının bulunmasının sonuçları etkildiği söylenebilir.

**Tablo 5.1.** Alaşımların mekanik özellikleri

| Alaşım | Teorik Elastisite Modülü (GPa) | Deneysel Elastisite Modülü (GPa) | Fark (%) |
|---|---|---|---|
| **Inconel 718** | 216 | 190 | 13 |
| **Inconel 718-5Cu** | 209 | 190 | 10 |
| **Inconel 718-8Cu** | 205 | 189 | 8 |
| **Inconel 718-5Mn** | 202 | 189 | 6 |
| **Inconel 718-3W** | 202 | 196 | 3 |
| **Inconel 718-0.5CNT** | 219 | 190 | 15 |
| **Inconel 718-1CNT** | 222 | 191 | 16 |
| **Incoloy 907** | 205 | 145 | 41 |
| **Incoloy 907-5Cu** | 209 | 143 | 46 |
| **Incoloy 907-5Mn** | 218 | 142 | 53 |
| **Incoloy 907-5Ta** | 219 | 147 | 48 |
| **Incoloy 907-0.5CNT** | 202 | 145 | 39 |
| **Incoloy 907-1CNT** | 206 | 145 | 42 |
| **Haynes 188** | 204 | 207 | 1 |
| **Haynes 188-5Cu** | 208 | 205 | 1 |
| **Haynes 188-5Mn** | 223 | 203 | 9 |
| **Haynes 188-13Ta** | 207 | 206 | 1 |
| **Haynes 188-0.5CNT** | 211 | 207 | 1 |
| **Haynes 188-1CNT** | 211 | 206 | 2 |

Aşağıdaki tabloda süperalaşımlarının genel özellikleri açısından kıyaslanması görülmektedir.

**Tablo 5.2:** Üretilen süperalaşımların kıyaslanması

| | Korozyon Direnci | Yüksek Sıcaklık Korozyon | Sertlik | İletkenlik | Elastisite Modülü | Aşınma | Maliyet |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Inconel 718** | +++ | +++ | ++ | ++ | ++ | ++ | -- |
| **Haynes 188** | ++ | ++ | +++ | ++ | +++ | +++ | --- |
| **Incoloy 907** | + | + | + | ++ | ++ | ++ | - |

Aşağıdaki tabloda tez kapsamında üretilen Inconel 718, Haynes 188 ve Incoloy 907 süperalaşımlarına yapılan Mn, Cu ve CNT katkılarının kıyaslanması görülmektedir.

**Tablo 5.3:** Süperlaşımlara yapılan katkıların etkileri

| | Korozyon Direnci | Yüksek Sıcaklık Korozyon | Sertlik | İletkenlik | Elastisite Modülü | Aşınma | Maliyet |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mn** | - | - | + | + | + | + | ++ |
| **Cu** | - | - | + | +++ | + | + | +++ |
| **CNT** | + | + | + | +++ | + | + | - |

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için yenilikçi Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlar geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1250 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış ve ardından su verme uygulanmıştır. Ardından numuneler 400-550 °C arasında yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımların içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlar tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

.

***Genel Sonuçlar:***

- Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımları genel olarak uçak uygulamalarında kullanılabilir.
- Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının toz metalurjisiyöntemi ile çatlama olmadan istenen boyutlarda üretilmiş olup, toz metalurjisi uygun bir yöntemdir.
- Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının mekanik alaşımlama ile istenen kimyasal bileşimde ve homojen mikroyapıda, aşırı oksitlenme olmadan üretilmiş olup, mekanik alaşımlama yöntemi uygun bir alaşım hazırlama yöntemdir.
- Ni esaslı Inconel 718, Co esaslı Haynes 188, Fe esaslı Incoloy 907 süperalaşımlarının mekanik özellikleri yaşlandırma ısıl işlemi ile artırılabilir.

***Gelecek çalışmalara tavsiyeler:***

- Daha geniş kimyasal bileşim aralığında süperalaşımlar üretilmeli ve alaşım elementlerinin etkileri daha detaylı olarak incelenmelidir.
- Daha geniş yaşlandırma sıcaklığı aralığında ısıl işlemler yapılması ve yaşlandırma sıcaklığının etkileri daha detaylı olarak incelenmelidir.
- Daha geniş su verme sıcaklığı aralığında ısıl işlemler yapılması ve su verme sıcaklığının etkileri daha detaylı olarak incelenmelidir.

# KAYNAKLAR


[1] Rolls-Royce, 1996, The jet engine. Rolls-Royce.

[2] www.commons.wikimedia.org

[3] Reed, R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. 2006, Cambridge, UK.

[4] Dokur M.M. 2014, Çok Katmanlı CYSZ Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Isıl-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, İTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

[5] Bradley, E.F. Superalloys, 1989, ASM International Metals Park, OH.

[6] Metals Handbook, 10th Edition, 1983. ASM (American Soci. for Met.), Metals Park, Ohio, 10: 761.

[7] A. Pineau, S. Antolovich. 2009, High temperature fatigue of nickel-base superalloys: A review with special emphasis on deformation modes and oxidation Engineering Failure Analysis 16, 2668-2697

[8] Lebiao Yang, Xiaona Ren, Changchun Ge, Qingzhi Yan, Int. J. Mater. Res. 110 (2019) 10

[9] Yücel M. 2017, Inconel 713 LC Süper Alaşımının Akışkan Yataklı Fırın Sistemi ile Nitrürlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

[10] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4459

[11] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7836

[12] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7743

[13] www.mpif.org/IntrotoPM/Processes

[14] S. Sarıtaş, M. Türker, N. Durlu, 2008, *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*.

[15]. Suryanarayana, C., Mechanical alloying and milling, Progress in Mater and Sci, 46, 2001, 1-184.

[16] Upadhyaya, G.S., Sintered Metallic and Ceramic Materials:Preparation, Properties, and Applications, 2000, Wiley, New York.

[17]. ASM Handbook, 1998, *Powder Metal Tehnologies and Applications, Volume 7,* ASM International.

[18]. Randall M. German, 2005, *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing, Metal Powder Industry*.

[19]. Hellier, C., 2003. *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw Hill, USA.

[20]. Mutlu, İ., 2006. *Paslanmaz ve Takım Çeliklerinde Tane Boyutunun Ultrasonik Dalgaların Saçılmasına Etkisi*, İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

[21]. Erdem, M., 2007, *Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Ni Esaslı Bir Süperalaşımın Üretilmesi ve Mikroyapı, Mekanik ve Oksitlenme Özelliklerinin Araştırılması.* Gazi Üniversitesi, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi.

[22]. Erdeniz, D., 2008, *Nikel Bazlı Süperalaşım IN738LC'de Çökelti Gelişimi.* Boğaziçi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

[23]. Özgün, Ö., 2012, *Nikel Süperalaşım Malzemelerin Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu.* Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.

[24]. Günay, G., 2017, *Nikel Süperalaşım Malzemelerin Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu.* Gebze Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

[25]. Topuz, S., 2022, *Alaşım Elementleri ve Isıl İşlemin Fe-Ni Esaslı Süperalaşımların Yorulma ÇatlağıİlerlemesiTavrı Üzerindeki Etkisi.* ODTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

[26]. Cengiz, R., 2023, *Ni-Bazlı Süperalaşımların Çökelme Sertleşmesi Davranışının Thermo-Calc Simulasyonu ile İncelenmesi.* Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

[27]. Turan, S., 2024, *Ni-Bazlı Süperalaşımların Çökelme Sertleşmesi Davranışının Thermo-Calc Simulasyonu ile İncelenmesi.* Gebze Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.