T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ SÜPERALAŞIMLARIN ISIL İŞLEMİ

Gülçağrı ŞAHİN

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlven MUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Şubat, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Gülçağrı ŞAHİN tarafından, **Prof. Dr. İlven MUTLU** danışmanlığında hazırlanan **" TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ SÜPERALAŞIMLARIN ISIL İŞLEMİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **07/02/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlven MUTLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE			☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE			☒ Kabul ☐ Ret

Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ SÜPERALAŞIMLARIN ISIL İŞLEMİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

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

Şubat 2025 **Gülçağrı ŞAHİN**

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
3. YÖNTEM **22**
3.1. NUMUNE ÜRETİMİ 22
3.2. KARAKTERİZASYON 27
3.3. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ 31
4. BULGULAR **34**
4.1. MİKROYAPI 34
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER 39
4.3. KOROZYON ÖZELLİKLERİ 44
4.4. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ 47
5. TARTIŞMA **65**
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **71**
KAYNAKLAR **72**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **74**

ETİK KURUL İZİN YAZISI **75**
KURUM İZNİ YAZILARI **76**
ÖZGEÇMİŞ **77**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Turbo jet motor yapısı……...…….2
Şekik 2.2 Boeing 787'ye ait GE CF6 gaz türbin motorunda malzemeler…...……..….3
Şekil 1.3. Gaz türbin motoru ve ortam sıcaklıkları…….4
Şekil 2.4. Türbin kanatçık türleri a) eşeksenli, b) kolonsal (yönlü), c) tek kristal……..5
Şekil 1.5. Başlıca süperalaşımların sınıflandırılması……..6
Şekil 2.6. Alaşım elementlerinin süperalaşımların özelliklerine etkisi…...……...……8
Şekil 2.7. Ni_3Al kristal yapısı……...…….…..….10
Şekil 2.8: İngot metalurjisi ile türbin diski üretimi…….….14
Şekil 2.9: Toz metalurjisi ile türbin diski üretimi…….15
Şekil 2.10: Tek kristal türbin bıçağı üretimi a) tasarım, b) alttan döküm, c) üstten döküm….16
Şekil 2.11. Rolls-Royse tarafından hassas döküm ile tek kristal türbin bıçağı üretimi……17
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…….22
Şekil 3.2: Numuneler a) IN602, b) IN625, c) IN718, d) IN718-2Ti, e) IN718-7Ti……..…23
Şekil 3.3: Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların akış şeması……..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 1.7: Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi……..30
Şekil 1.8: Kafes oluşturma ve atom ekleme adımları……...……...31
Şekil 1.9: Hesaplama ve analiz adımları……...……..32
Şekil 1.10: Thermo-Calc ile faz diyagramı oluşturma……33
Şekil 4.1: Ni tozunun SEM fotoğrafları …….…..34
Şekil 4.2: İlave elementlerin SEM fotoğrafları a) Mn, b) Mo, c) Ti, d) Cu, e) Co, e) Fe…....35
Şekil 4.3: Ti katkılı alaşımların SEM fotoğrafları a) IN718, b) 2Ti, c) 3Ti d) 5Ti e) 7Ti……36

Şekil 4.4: Sinterlenmiş Inconel 718 alaşımların optik mikroskop fotoğrafları……..…..….37
Şekil 4.5: Inconel 625 ve Inconel 602 alaşımların optik mikroskop fotoğrafları…….38
Şekil 4.6: Yaşlandırma ısıl işlem sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi……43
Şekil 4.7: Ni-Fe ikili faz diyagramları ve kimyasal potansiyel diyagramları ……..……47
Şekil 4.8: Ni-Cr ikili faz diyagramları ve serbest enerji diyagramları…….…….48
Şekil 4.9: Ni-Ti ikili faz diyagramları ve serbest enerji diyagramları……..…49
Şekil 4.10: Ni-Fe-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları...50
Şekil 4.11: Ni-Fe-Ti sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları...51
Şekil 4.12: Ni-Fe-Cr a) faz diyagramı, b) kimyasal potansiyel diyagramı……...52
Şekil 4.13: Ni-Fe-Ti a) faz diyagramı, b) kimyasal potansiyel diyagramı……...…53
Şekil 4.14: Elementlerin Pourbaix diyagramları a) Ni, b) Fe, c) Cr, d) Ti……..….54
Şekil 4.15: Alaşımların Pourbaix (V-pH) diyagramları a) Ni-Cr, b) Ni-Fe, c) Ni-Fe-Cr…....55
Şekil 4.16: CASTEP hesaplama sonuçları …….…….....56
Şekil 4.17: CASTEP elastik özelliklerin analiz sonuçları ……...……57
Şekil 4.18: CASTEP elektronik özellikler ve difraksiyon analiz sonuçları …….…..….58
Şekil 4.19: a) birim kristal kafes ve b) süperlatis ……..…….….59

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Inconel 718 kimyasal bileşimi……...…….11
Tablo 2.2. Inconel 625 kimyasal bileşimi……...…….……12
Tablo 2.3. Inconel 602 kimyasal bileşimi……...…….13
Tablo 3.1: Tez kapsamındaki üretilen alaşımlar……..26
Tablo 4.1: Tez kapsamındaki alaşımlarının elastisite modülleri……..39
Tablo 4.2: Tez kapsamındaki alaşımların aşınma değerleri…….…40
Tablo 4.3: Tez kapsamındaki alaşımlarının sertlikleri…….41
Tablo 4.4: Tez kapsamındaki alaşımlarının iletkenlikleri……42
Tablo 4.5: Tez kapsamındaki alaşımlarının korozyon hızı……..44
Tablo 4.6: Tez kapsamındaki alaşımlarının yüzey oksit direnci……..…45
Tablo 4.7: Yüksek sıcaklık korozyon testi sonuçları……...…46
Tablo 4.8: Alaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri ……....…60
Tablo 4.9: Alaşımların elastik sabitleri ……...…62
Tablo 4.10: Alaşımların mekanik özellikleri ……...…...…64
Tablo 5.1: Üretilen süperalaşımların alaşımların kıyaslanması…….……..70

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
E	: Elastisite modülü (Young modülü)
Fe	: Demir
IACS	: Uluslararası tavlanmış bakır standardı
Mo	: Molibden
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
Ta	: Tantalyum
Ti	: Titanyum
$\mathbf{V_L}$	: Ultrasonik boyuna hız
$\mathbf{V_T}$	: Ultrasonik enine hız

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ SÜPERALAŞIMLARIN ISIL İŞLEMİ

GÜLÇAĞRI ŞAHİN

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 Inconel 718 esaslı süperalaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718 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 1100-1250 °C arasında 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 1000 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış ve ardından su verme uygulanmıştır. Ardından numuneler 400-550 °C arasında yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımların içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımlar tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımlarının elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık

korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Süperalaşımların özellikleri ilk prensipler temmelli hesaplamalı malzeme mühendisliği esaslı yazılımlar (CASTEP) ve hesaplamalı faz diyagramları (CALPHAD) esaslı yazılımlar (Thermo-Calc) kullanılarak incelenmiş ve kompozisyon optimize edilmiştir.

Şubat 2025 , 93 sayfa.

Anahtar kelimeler: Toz metalurjisi, Süperalaşımlar, Inconel 718, Inconel 625, Isıl İşlem

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

HEAT TREATMENT OF SUPERALLOYS PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD

GÜLÇAĞRI ŞAHİN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlven MUTLU

In this thesis, the production and characterization of novel Ni based Inconel 718 superalloys for aircraft applications were carried out. Ni based Inconel 718 superalloys were produced by traditional powder metallurgy (press-sintering) method. In this thesis, Ni based Inconel 718 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 between 1100-1250 °C for 1 hour. Finally, heat treatments were applied to the sintered Ni based Inconel 718 superalloys samples. The sintered specimens were put into solution for 1 hour at 1000 °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 superalloys on the properties were investigated. The microstructure of the produced Ni based Inconel 718 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 superalloys was investigated in NaCl solution by using open circuit potential, Tafel and electrochemical impedance spectroscopy tests. In addition,

high temperature corrosion tests were carred out. Properties of the superalloys were investigated and optimised by ab initio based computational materiaşs science software (CASTEP) and calculated phase diagrams (CALPHAD) based software (Thermo-Calc).

February 2025, 93. pages.

Keywords: Powder metallurgy, Superalloys, Inconel 718, Inconel 625, Heat Treatment

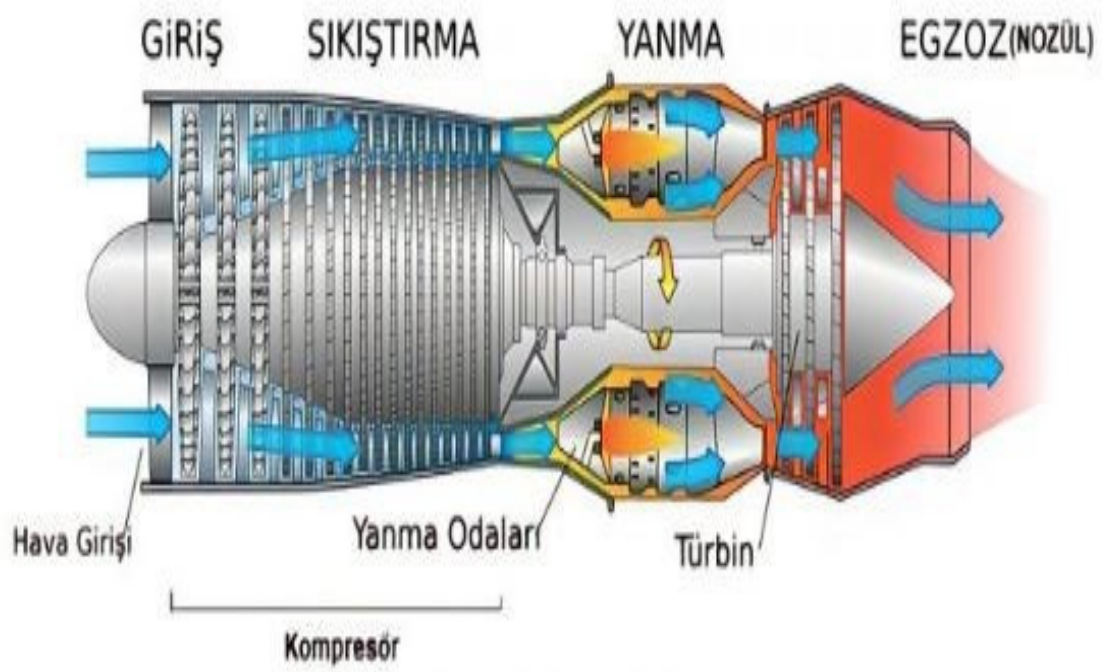
1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için Inconel 718 esaslı süperalaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718 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 1100-1250 °C arasında 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 1000 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış ve ardından su verme uygulanmıştır. Ardından numuneler 400-550 °C arasında yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımların içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımlar tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımlarının elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Süperalaşımların özellikleri ilk prensipler temmelli hesaplamalı malzeme mühendisliği esaslı yazılımlar (CASTEP) ve hesaplamalı faz diyagramları (CALPHAD) esaslı yazılımlar (Thermo-Calc) kullanılarak incelenmiş ve kompozisyon optimize edilmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

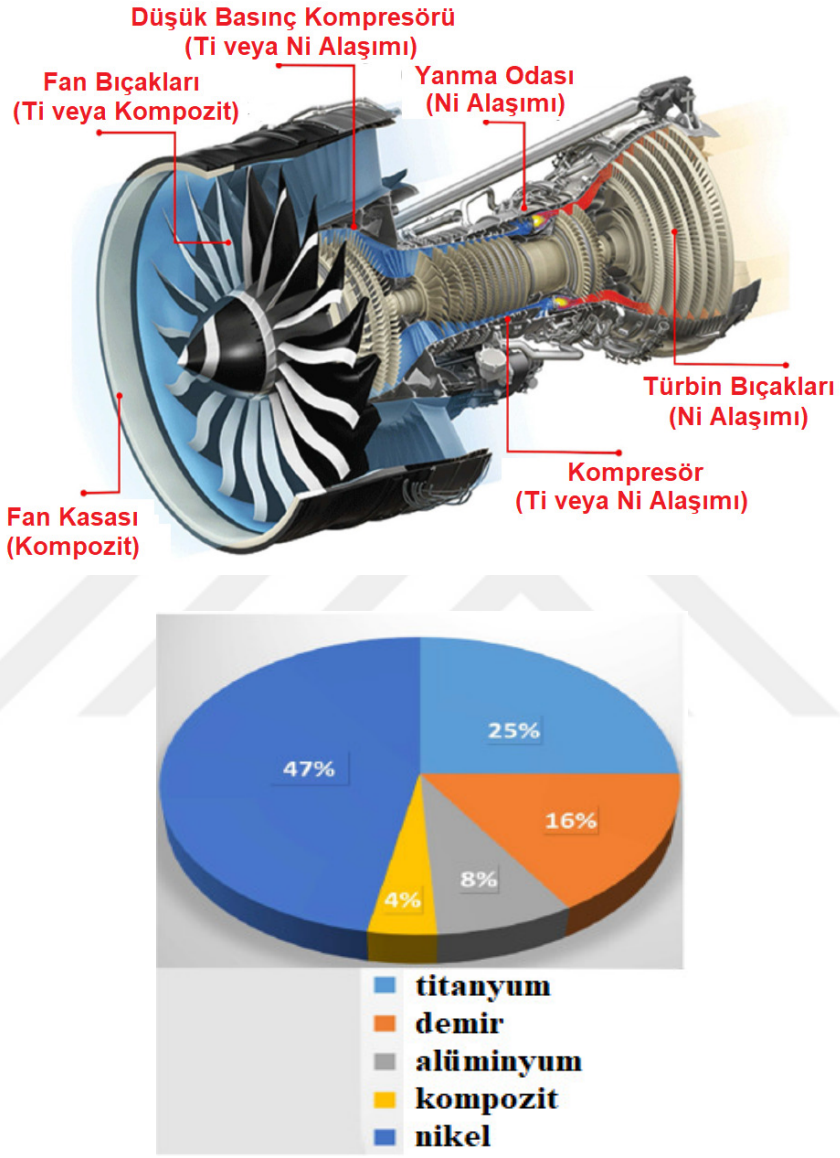
2.1 UÇAK MOTORU TEKNOLOJİSİ

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].



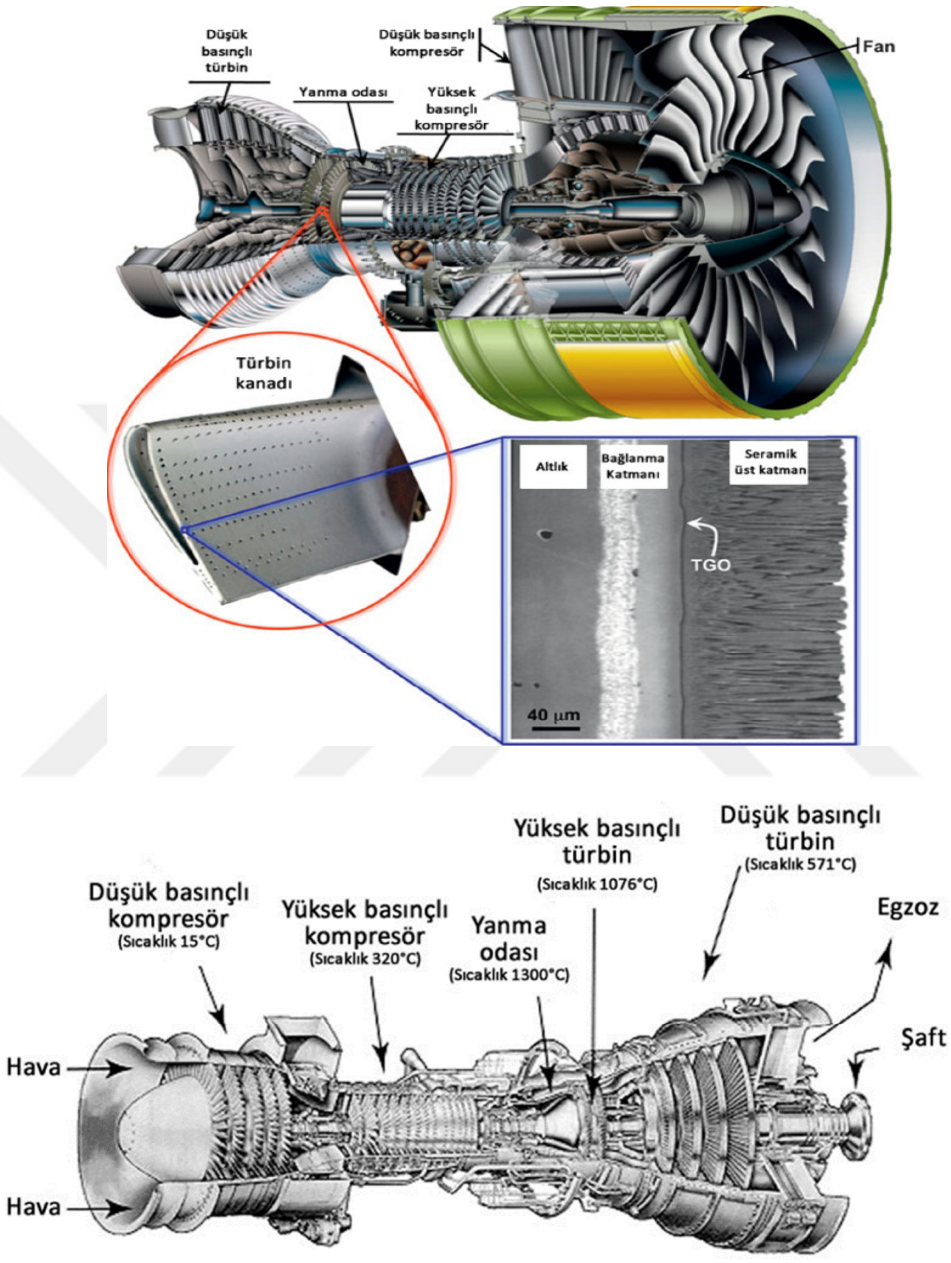
Şekil 2.1. Turbo jet motor yapısı [2]

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



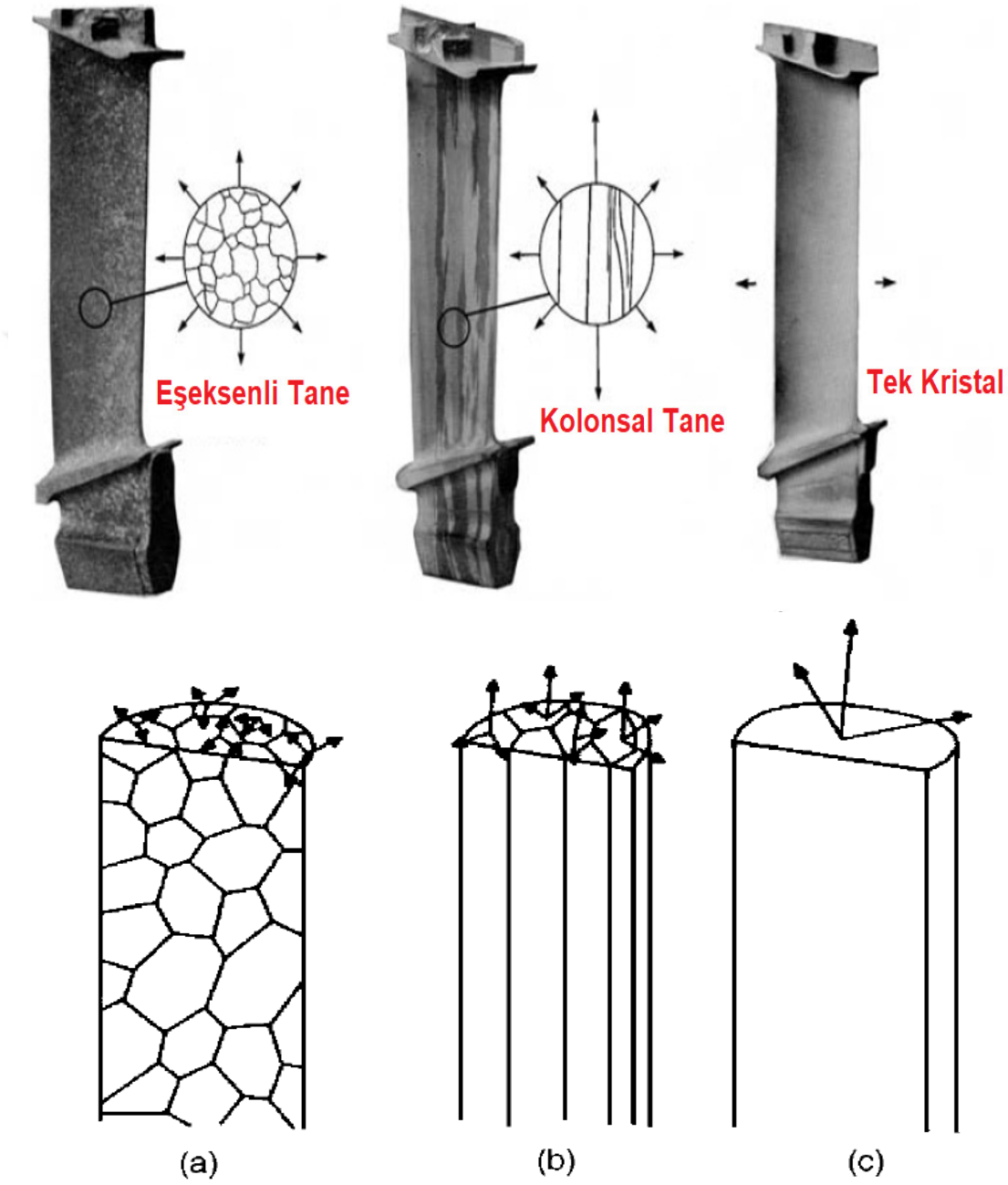
Şekik 2.2. Boeing 787'ye ait GE CF6 gaz türbin motorunda malzemeler [3]

Aşağıdaki şekilde gaz türbin motoru ve ortam sıcaklıkları görülmektedir.



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

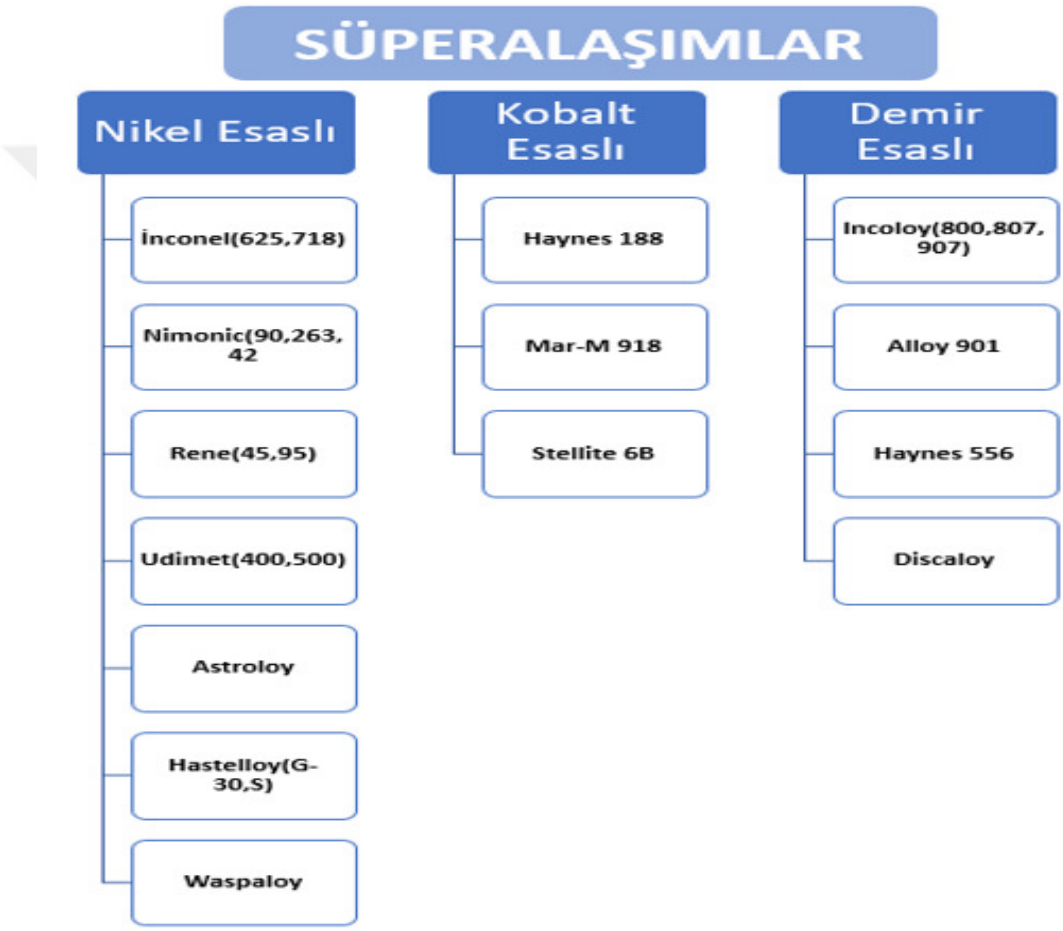
Aşağıdaki şekilde jet motoru türbin kanatçık türleri a) eşeksenli tanelerden oluşan kanatçık, b) kolonsal (yönlü) tanelerden oluşan kanatçık, c) tek kristal yapıdan oluşan kanatçık görülmektedir.



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].

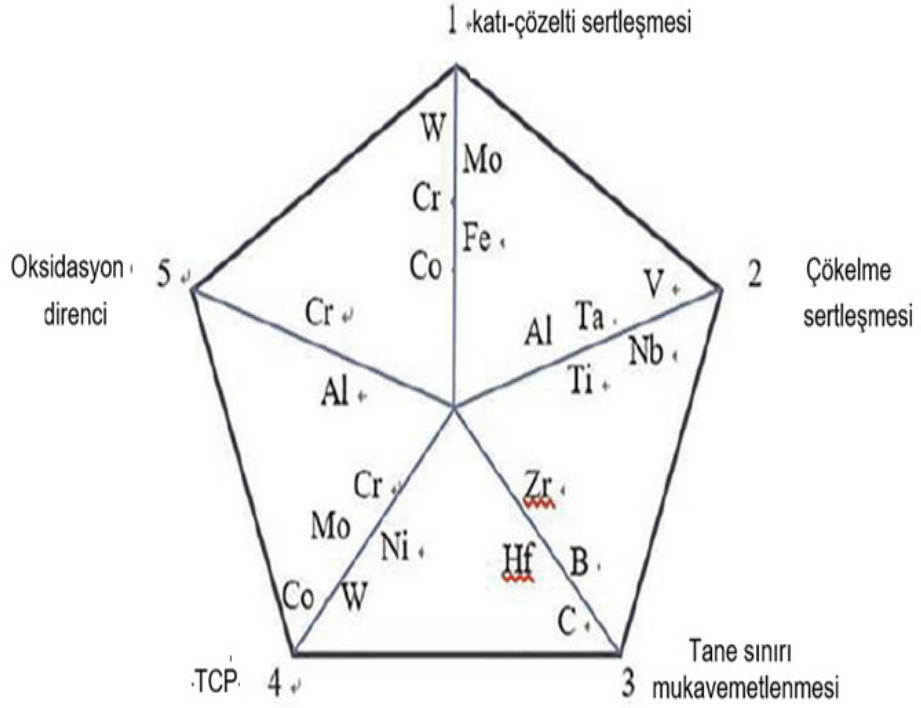


Şekil 2.5. Başlıca süperalaşımların sınıflandırılması [6]

Süperalaşımların Mikroyapırarında Görülen Fazlar aşağıdaki gibidir

- Gamma (γ^{II})
- Gama üssü (γ^{I})
- Gamma çift-üssü prime (γ^{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

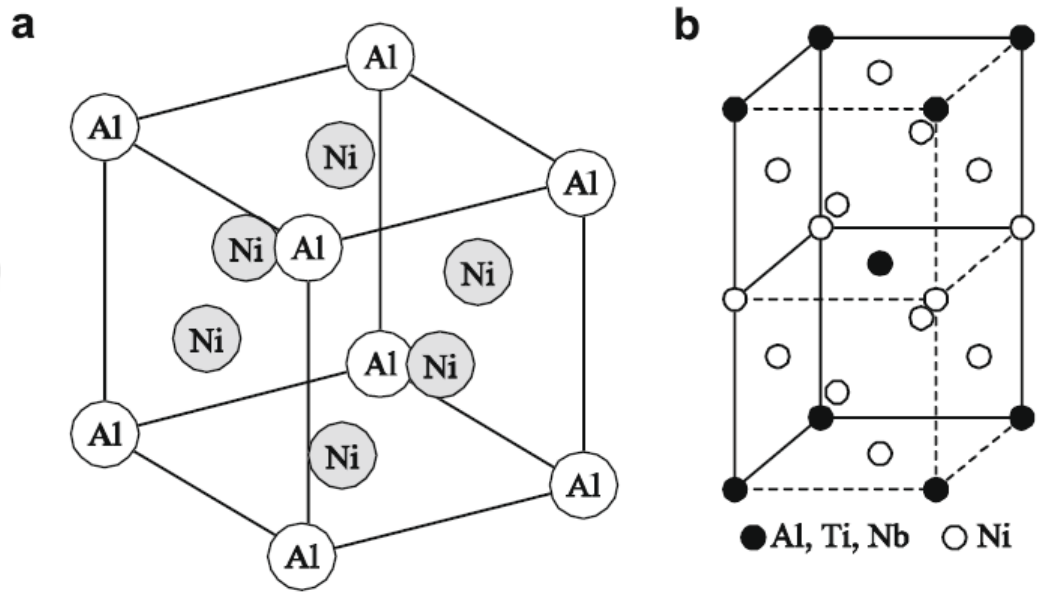
- *Çökelme sertleşmesi.*
- *Katı eriyik sertleşmesi.*
- *Tane sınırı sertleşmesi.*

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

Inconel 625 Süperalaşımı

Inconel 625 genel olarak Ni matrisli bir süperalaşımdır. Inconel 625 süperalaşımı Ni-Cr-Mo esaslı endüstride yaygın kullanılan bir süperalaşımdır. Asitlere oldukça dayanıklıdır. Aşağıdaki Tabloda Inconel 625 süperalaşımının kimyasal bileşimi görülmektedir. çökelti oluşturucu olarak Nb içermekte olup, Al ve Ti miktarı nispeten azdır. Yüksek miktarda Mo içermektedir.

Tablo 2.2. Inconel 625 kimyasal bileşimi [10]

Element	**Miktar (%)**
Ni	58
Fe	5
Co	1
Cr	20-23
Mo	8-10
Nb	3-4
Ti	0.4 max
Al	0.4 max
Si	0.5 max
Mn	0.5 max
C	0.1

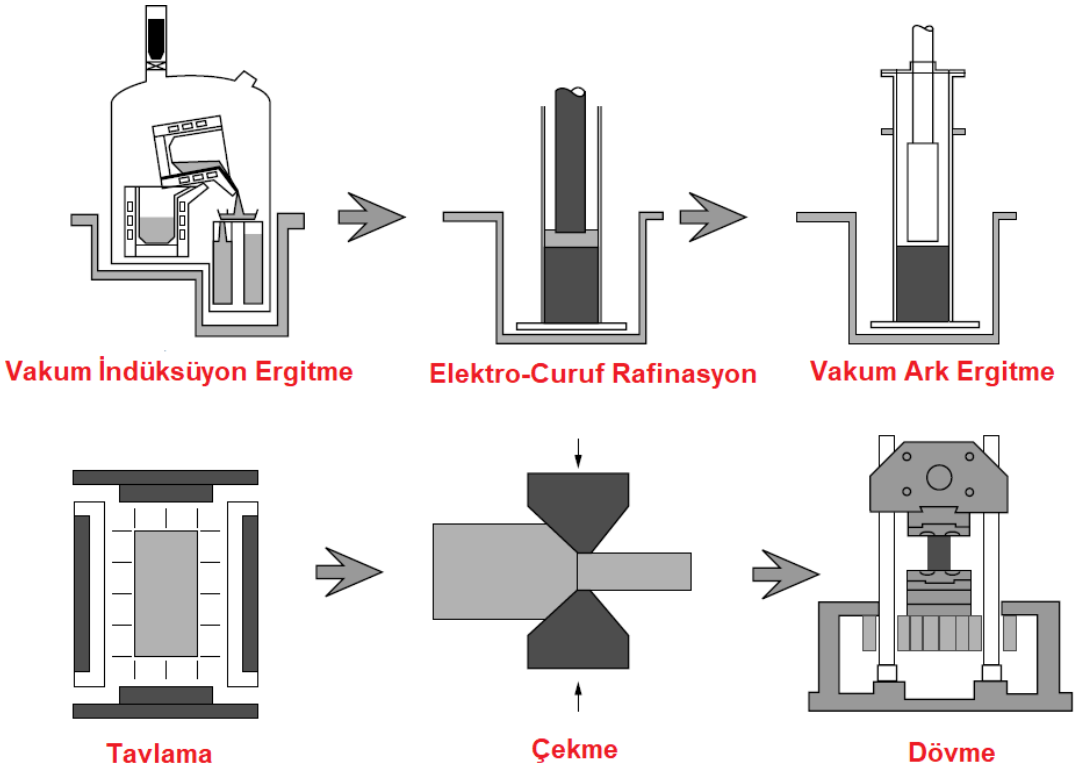
Inconel 602 Süperalaşımı

Inconel 602 genel olarak Ni matrisli yaygın olarak kullanılan bir süperalaşımdır. Yüksek karbonlu ve Al içeren Ni-Cr-Fe alaşımı olarak tanımlanabilir. Aşağıdaki Tabloda Inconel 602 süperalaşımının kimyasal bileşimi görülmektedir. Çökelti oluşturucu olarak Ti ve Al beraber yer almaktadır. Nispeten yüksek miktarda Cr içermektedir.

Tablo 2.3. Inconel 602 kimyasal bileşimi [10]

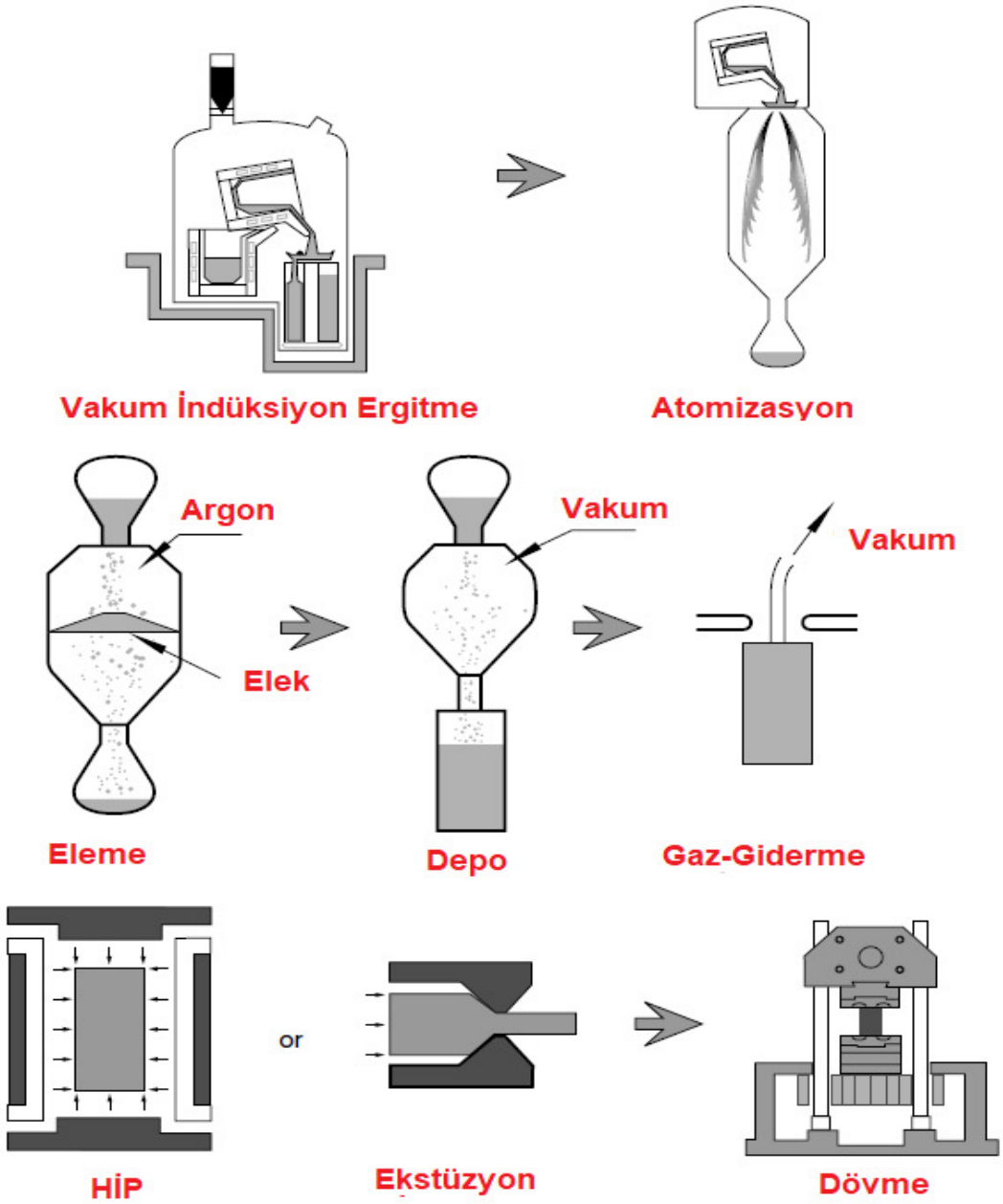
Element	**Miktar (%)**
Ni	59-66
Fe	8-11
Cr	24-26
Ti	0.1-0.2
Al	1.8-2.4
Y	0.12
Si	0.5 max
Mn	0.5 max
C	0.2

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



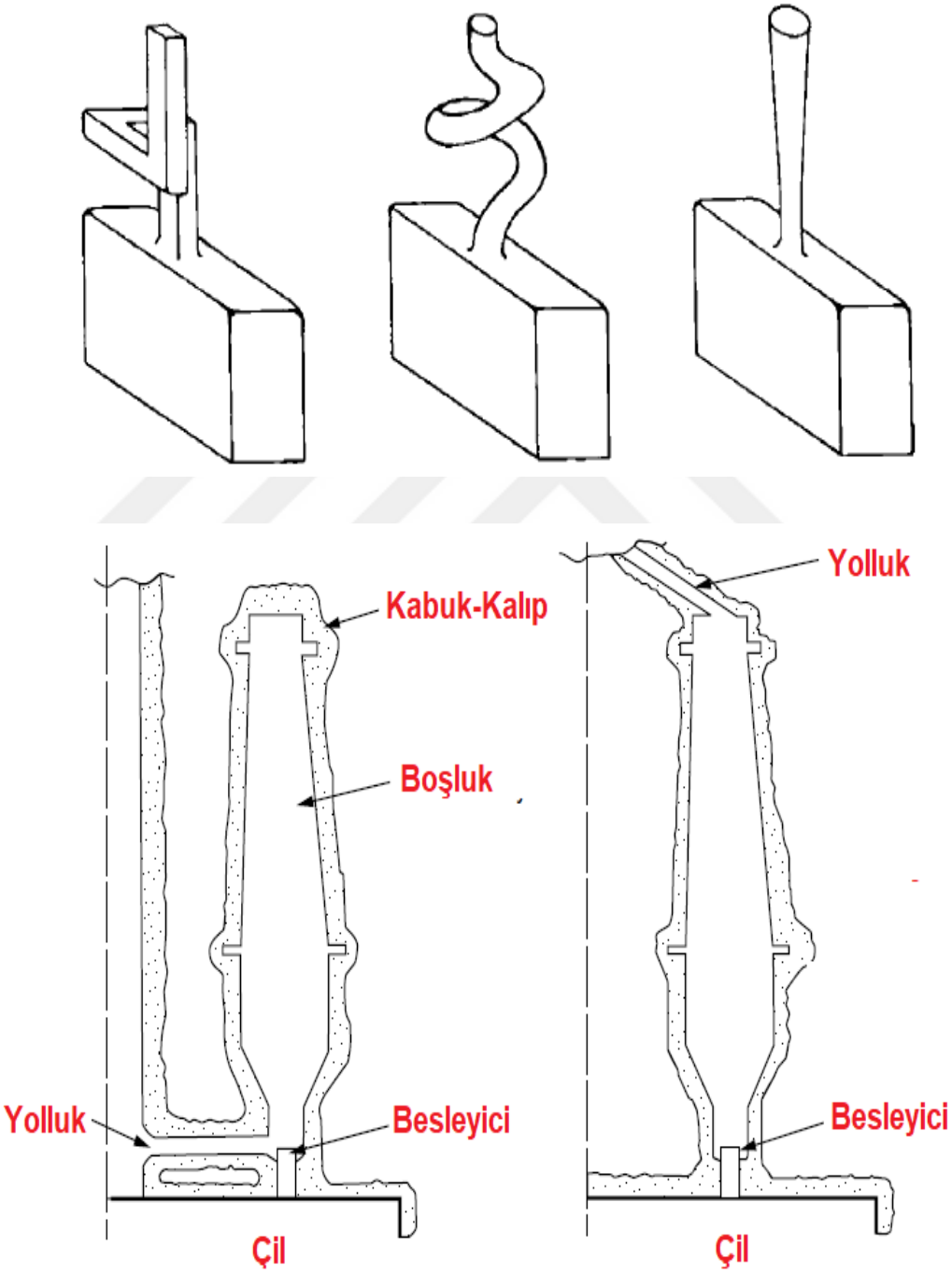
Şekil 2.8: İngot metalurjisi ile türbin diski üretimi [3]

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.



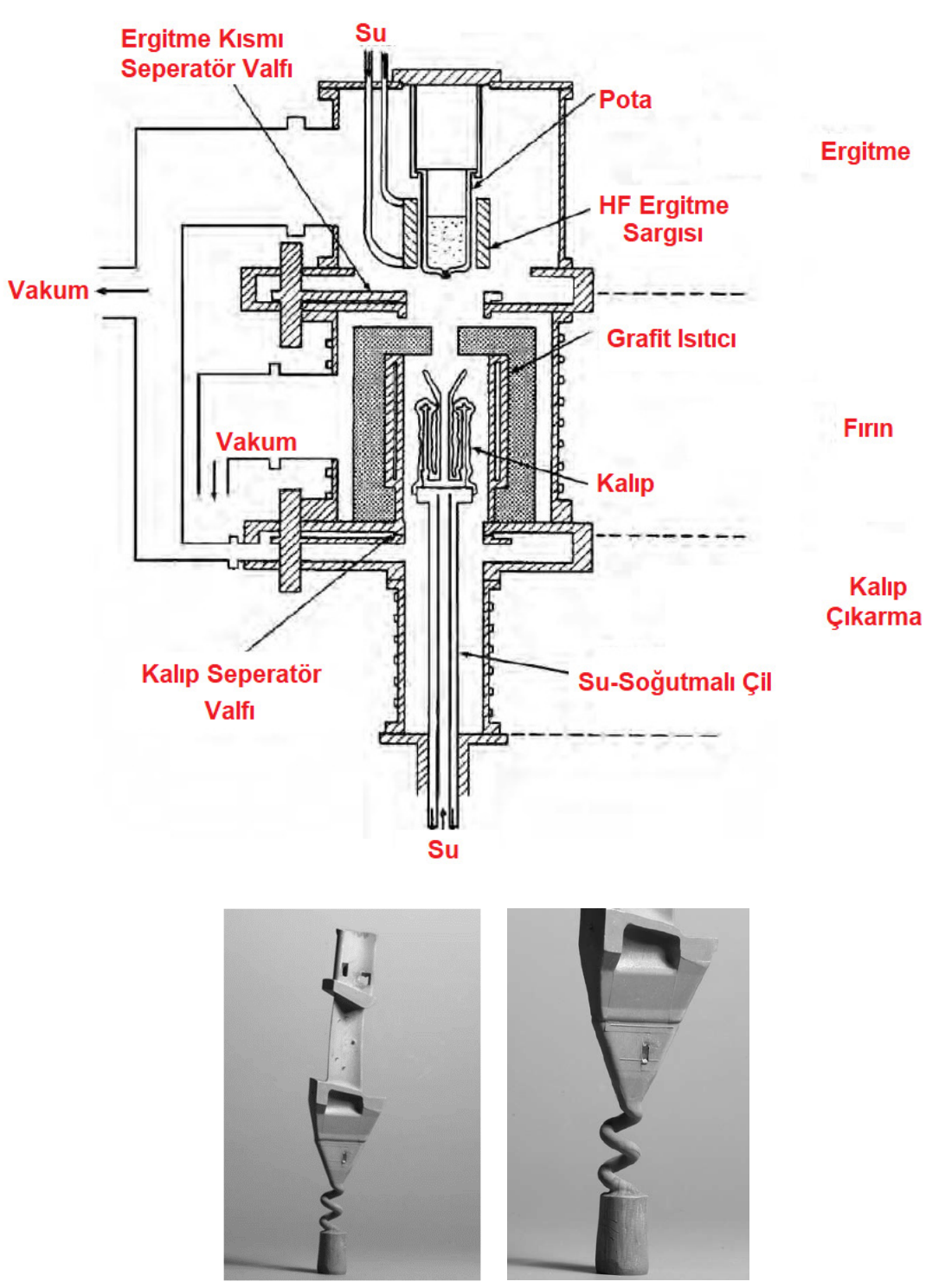
Şekil 2.9: Toz metalurjisi ile türbin diski üretimi [3]

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) tasarım, 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

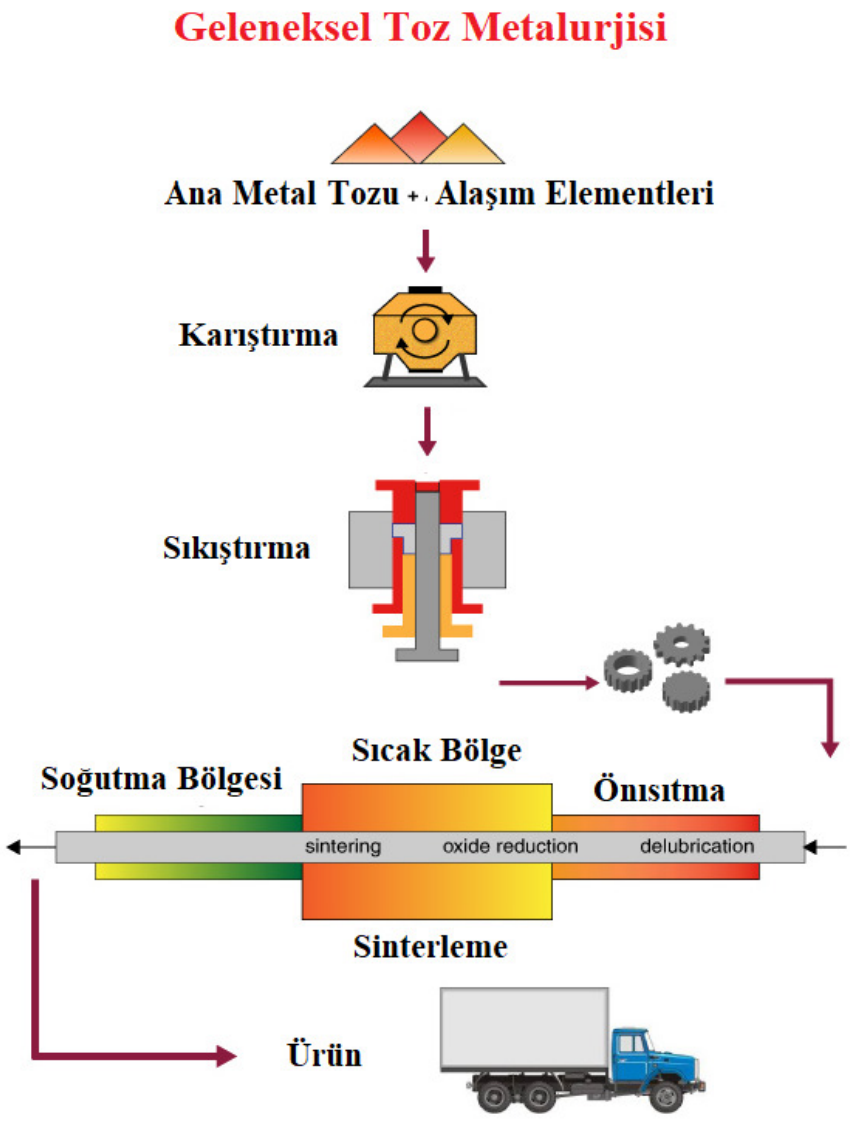
Toz metalurji yönteminde sıkıştırma çeşitleri genel olarak aşağıdaki gibidir.

- Tek eksenli presleme
- Çok eksenli presleme

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

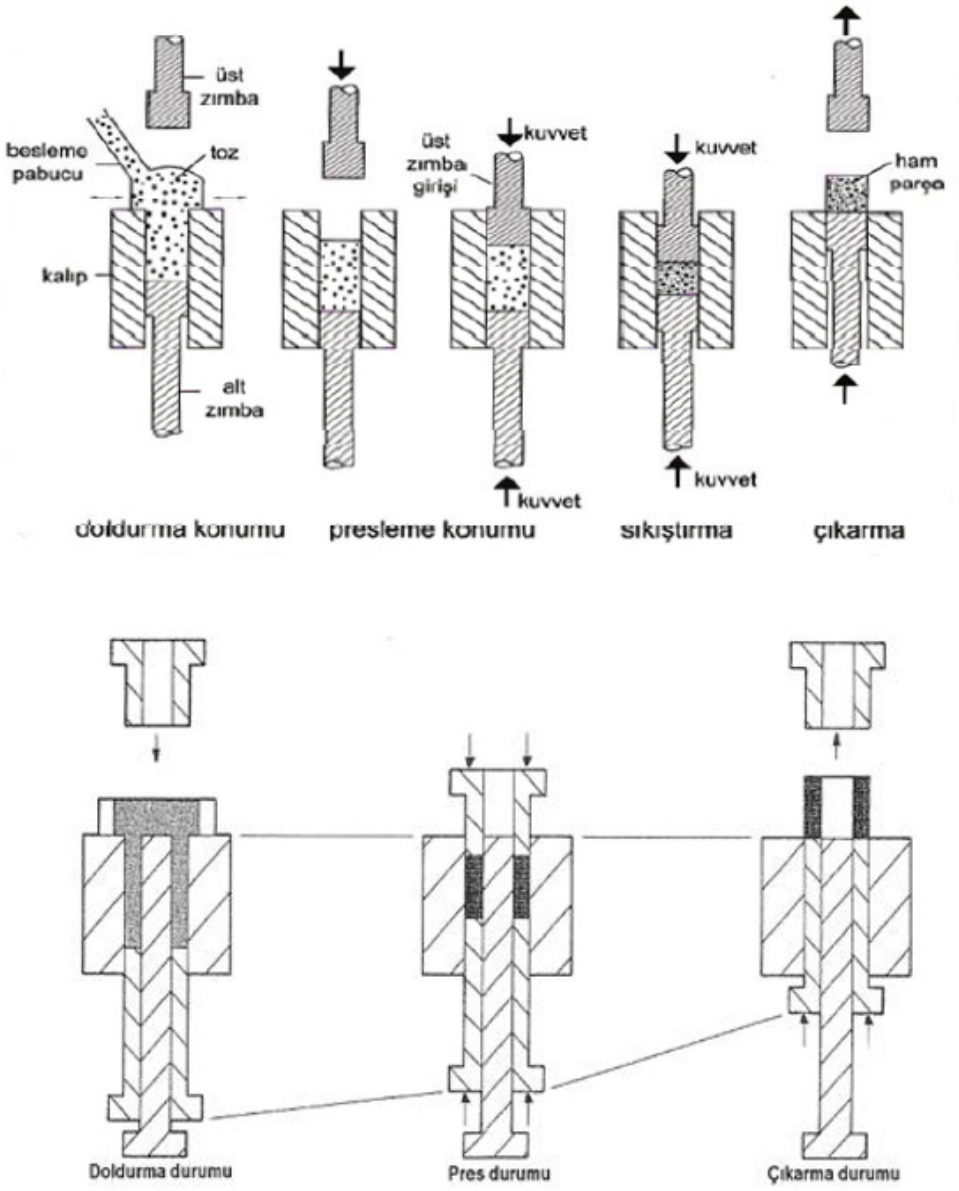
- Basınçlı sinterleme
- Basınçsız sinterleme
  - ❖ Sıvı faz sinterlemesi
    - Geçici sıvı faz sinterlemesi
    - Kalıcı sıvı faz sinterlemesi
  - ❖ Katı faz sinterlemesi

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].



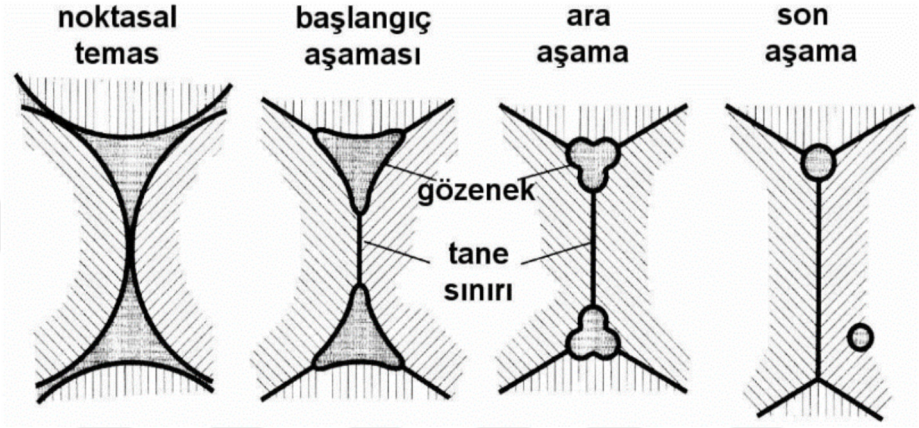
Şekil 2.12: Toz metalurjisi aşamaları [13]

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].

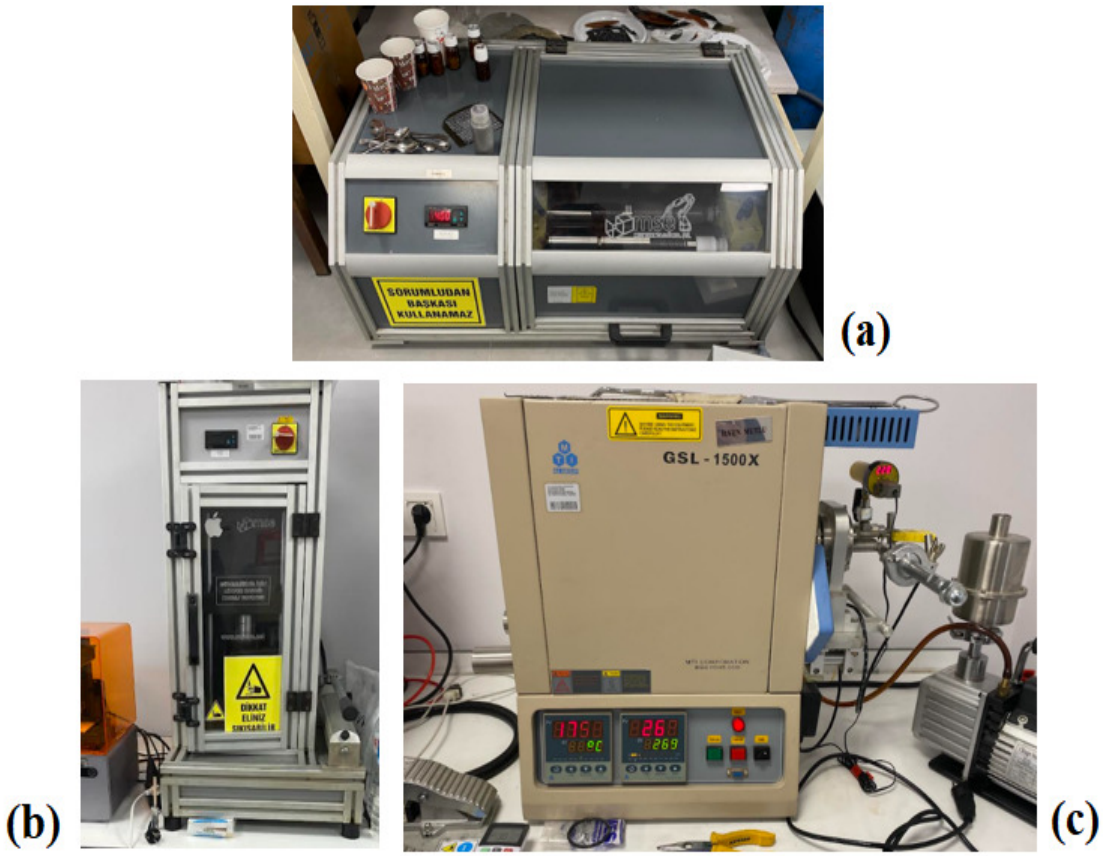


Şekil 2.14: Sinterleme gözenek yapısının değişimi [14]

3. YÖNTEM

3.1. NUMUNE ÜRETİMİ

Bu tez çalışması kapsamında, çeşitli katkılar içeren Inconel 718 esaslı süpalaşımlar yaklaşık 30-40 µm boyutunda ve en az % 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.



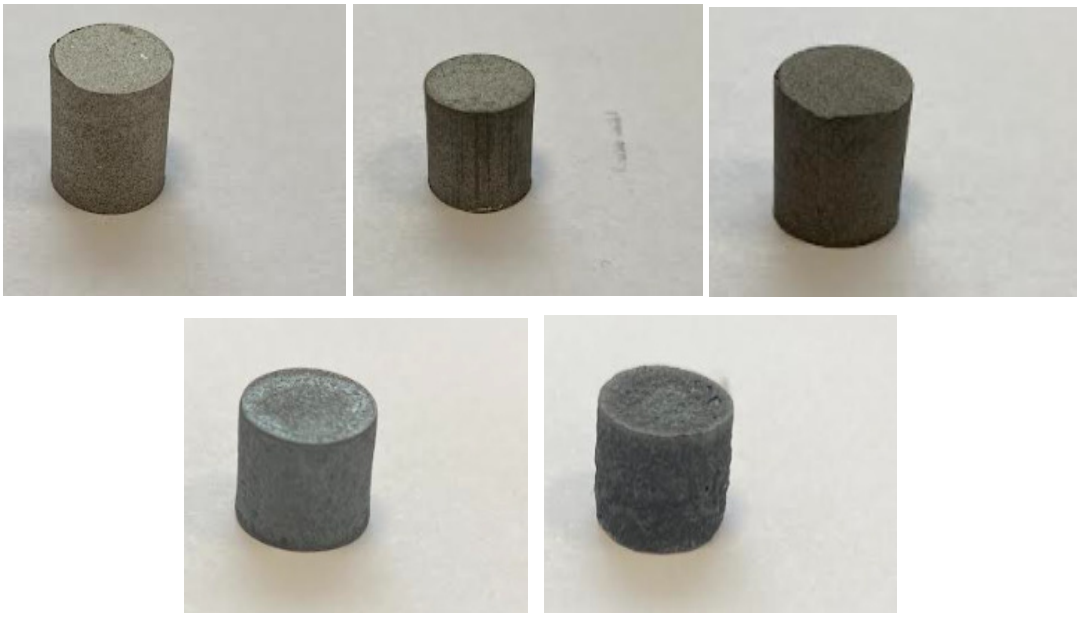
Şekil 3.1: a) Bilyeli değirmen, b) hidrolik pres, c) boru tipi sinterleme fırını

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

- Mekanik Alaşımlama: Metal toz karışımları planlanan alaşımın kimyasal bileşimine göre belirlenen miktarlarda 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: Numuneler a) IN602, b) IN625, c) IN718, d) IN718-2Ti, e) IN718-7Ti

Isıl İşlem Çevrimi

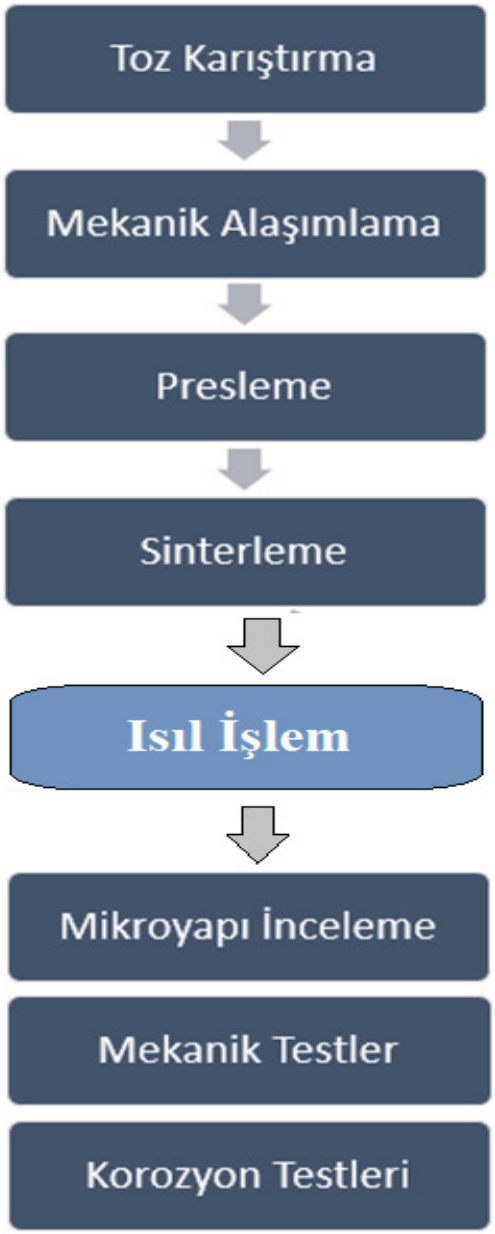
Sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır.

- 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.

Aşağıdaki 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**	**Ta**	**Mn**	**Cu**	**Al2O3**	**CNT**
Inconel 718	50	24		17	3	1	5					
Inconel 718-2Ti	50	24		17	3	2	5					
Inconel 718-3Ti	50	24		17	3	3	5					
Inconel 718-5Ti	50	24		17	3	5	5					
Inconel 718-7Ti	50	24		17	3	7	5					
Inconel 718-1CNT	49	24		17	3	1	5					1
Inconel 718-Al2O3	49	24		17	3	1	5				1	
Inconel 625	59	5	1	23	8	0.5	3		0.5			
Inconel 602	65	11		24								

3.2. KARAKTERİZASYON

Mikroyapı İncelemesi ve Mekanik Testler

Tez kapsamında üretilen süperalaşımların 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).

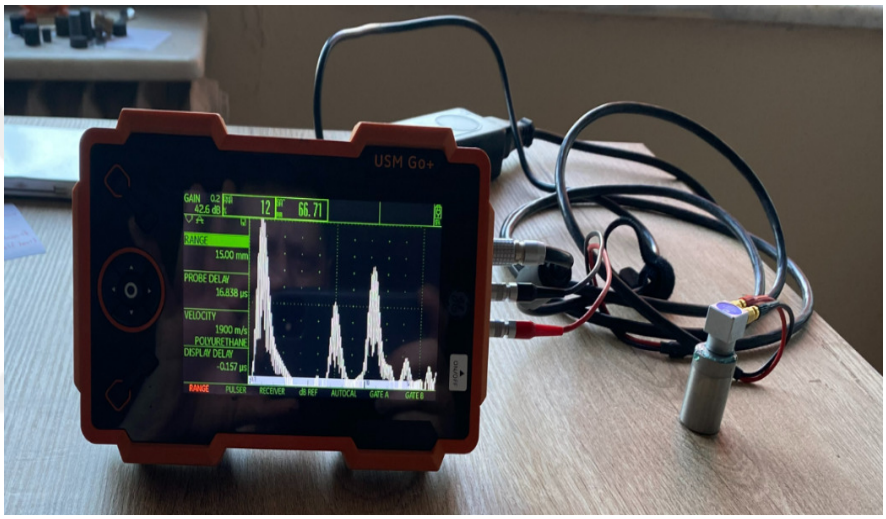


Şekil 3.4: a) Sertlik cihazı, b) basma cihazı, c) aşınma cihazı

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 süperalaşımların elektrokimyasal korozyon testleri % 5 NaCl çözeltisi 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).

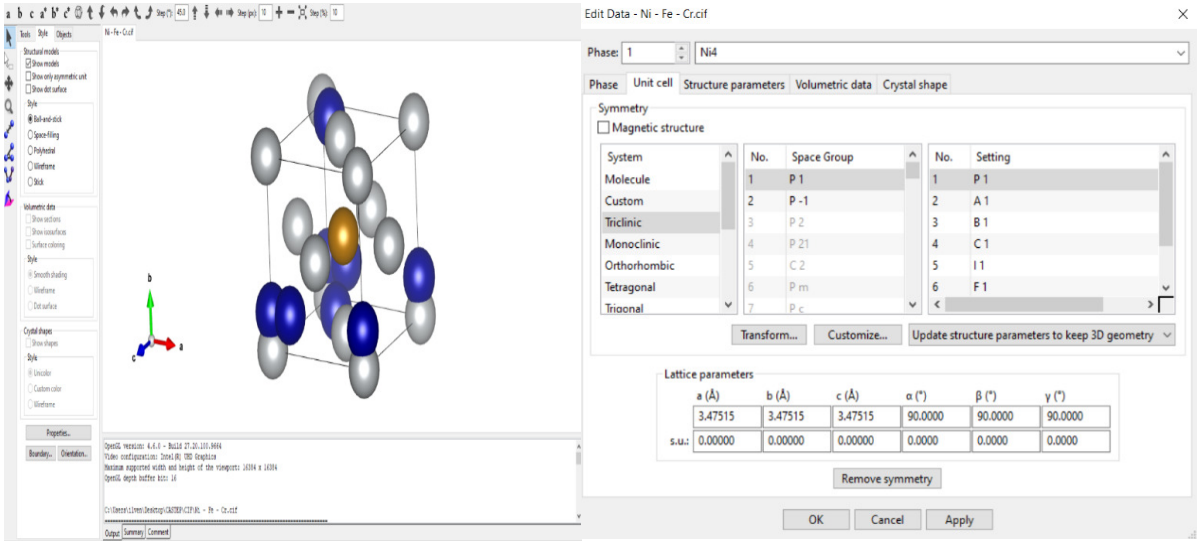


Şekil 3.7: Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi

3.3. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ

İlk Prensipler Temelli Hesaplamalı Malzeme Bilimi ile Alaşım Geliştirme

- Alaşım geliştirme kademesinde Cambridge sıralı toplam enerji paketi (CASTEP) hesaplamalı malzeme bilimi yazılımı ve Python yazılımı kullanılmıştır.
- Alaşımlarda farklı kimyasal bileşimlerin elastisite modülleri ve faz dönüşüm sıcaklığı incelenmiştir.
- Alaşım elementlerinin yer (kafes pozisyou) tercihleri yoğunluk fonsiyonel teorisi (DFT) ve termodinamik teori 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.
- Kullanılan kesilim enerjisi (cut-off) 500-600 eV değerindedir.
- Kullanılan k-noktaları (k-points): 8x8x8 *değerindedir.*
- Elektron-iyon etkileşimleri için ultrasoft pseudo-potansiyeller kullanılmıştır.

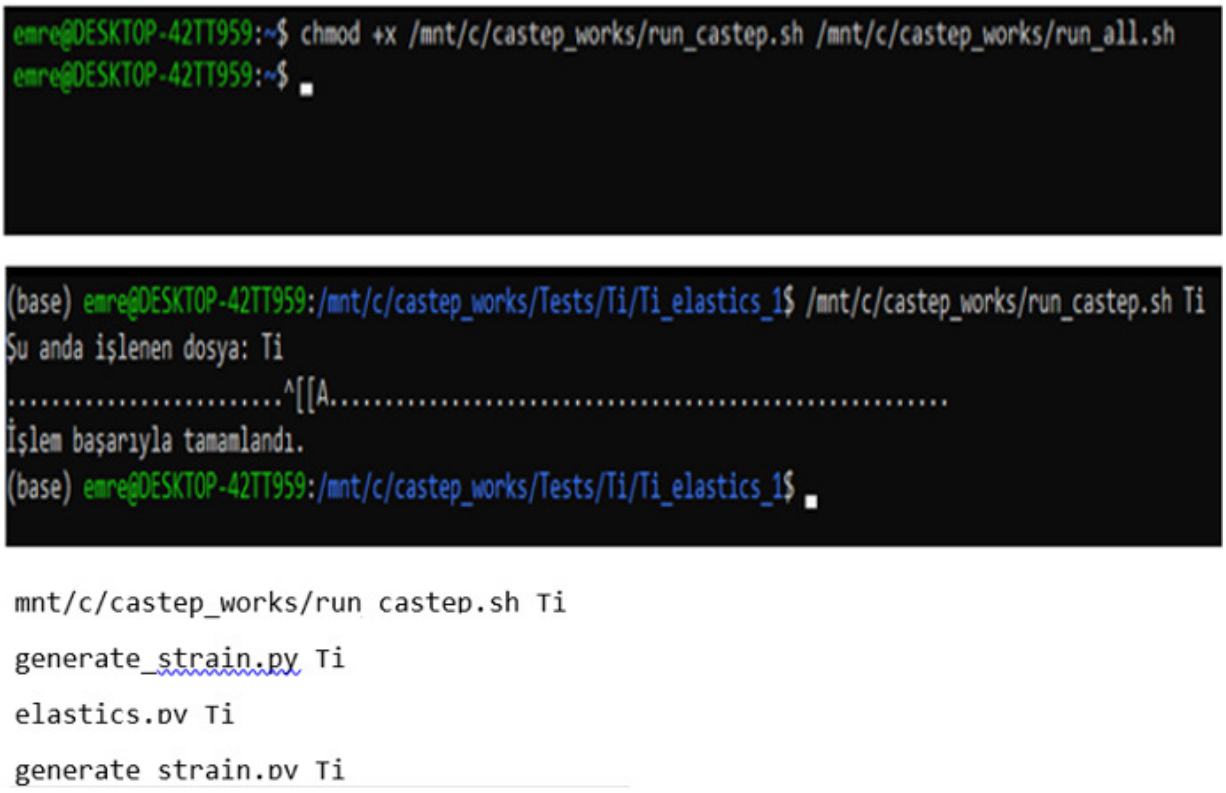


Şekil 3.8: Kafes oluşturma ve atom ekleme adımları

Öncelikle VESTA yazılımı ile birim kristal kafes oluşturulmuştur.

Ardından uygun kafes koordinatlarına alaşım atomları eklenmiştir.

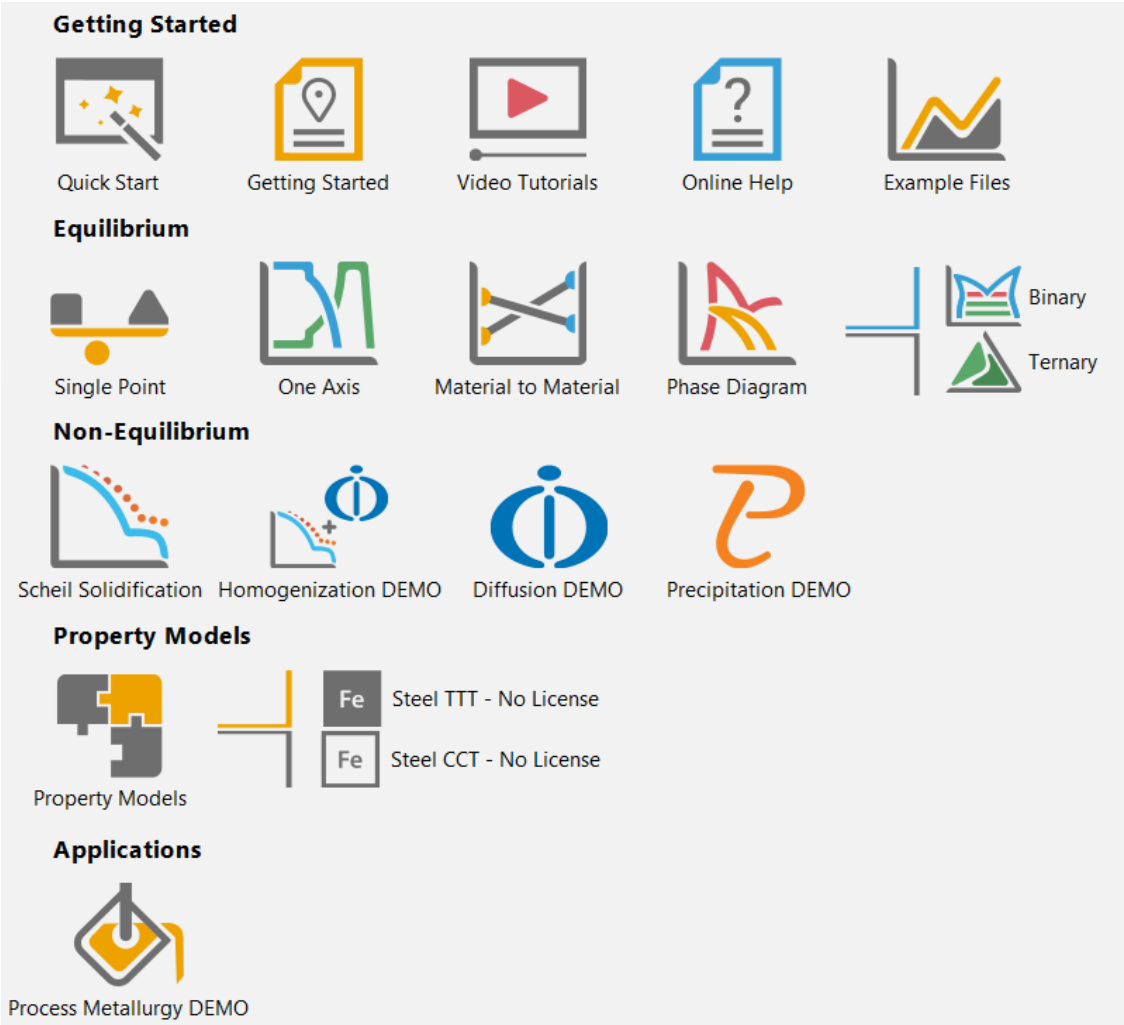
Kristal kafes türü, kristal kafes parametreleri, atom sayısı ve atom türleri belirlendikten sonra CASTEP hesaplamaları ve CASTEP analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9: Hesaplama ve analiz adımları

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.

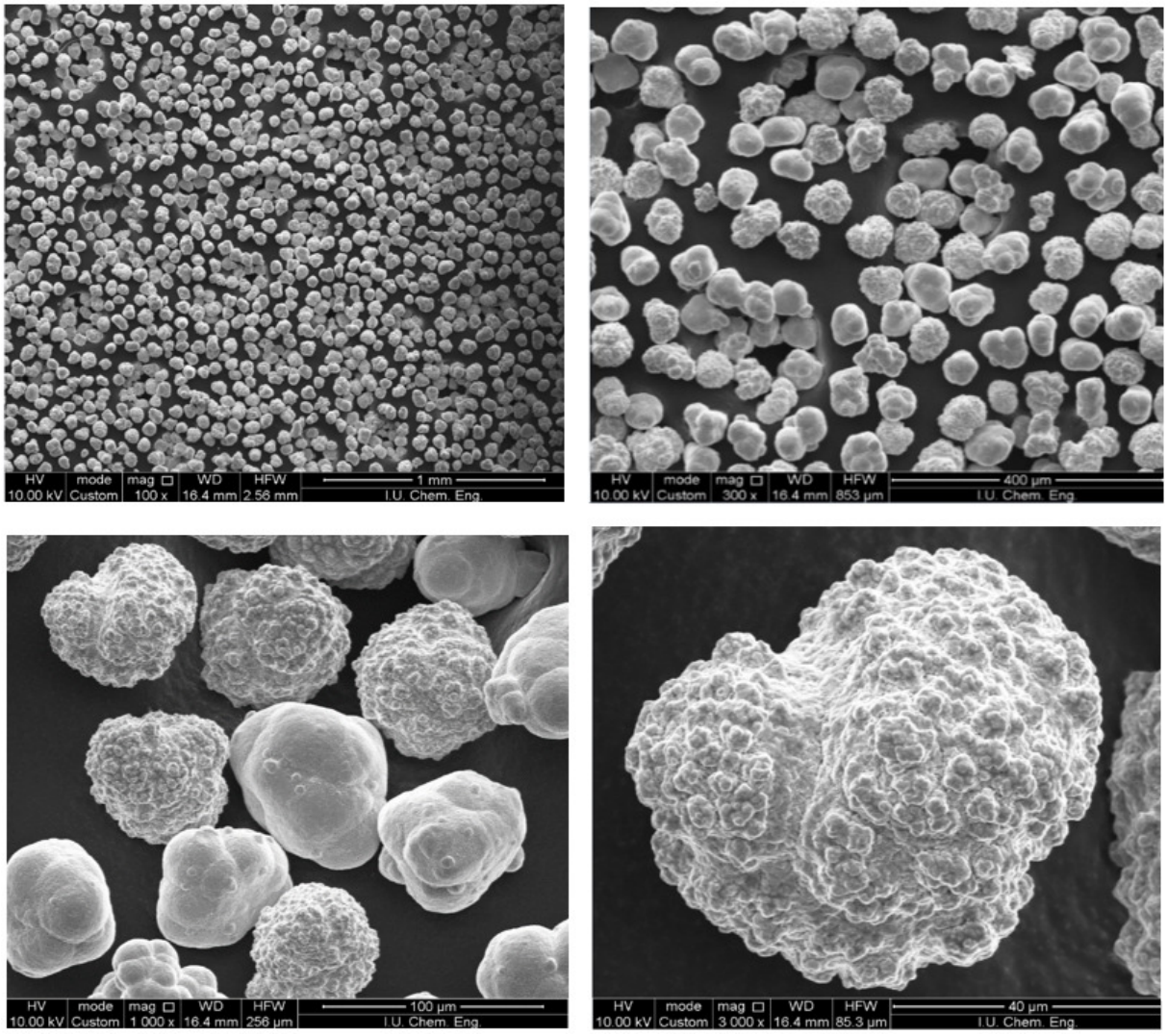


Şekil 3.10: Thermo-Calc ile faz diyagramı oluşturma

4. BULGULAR

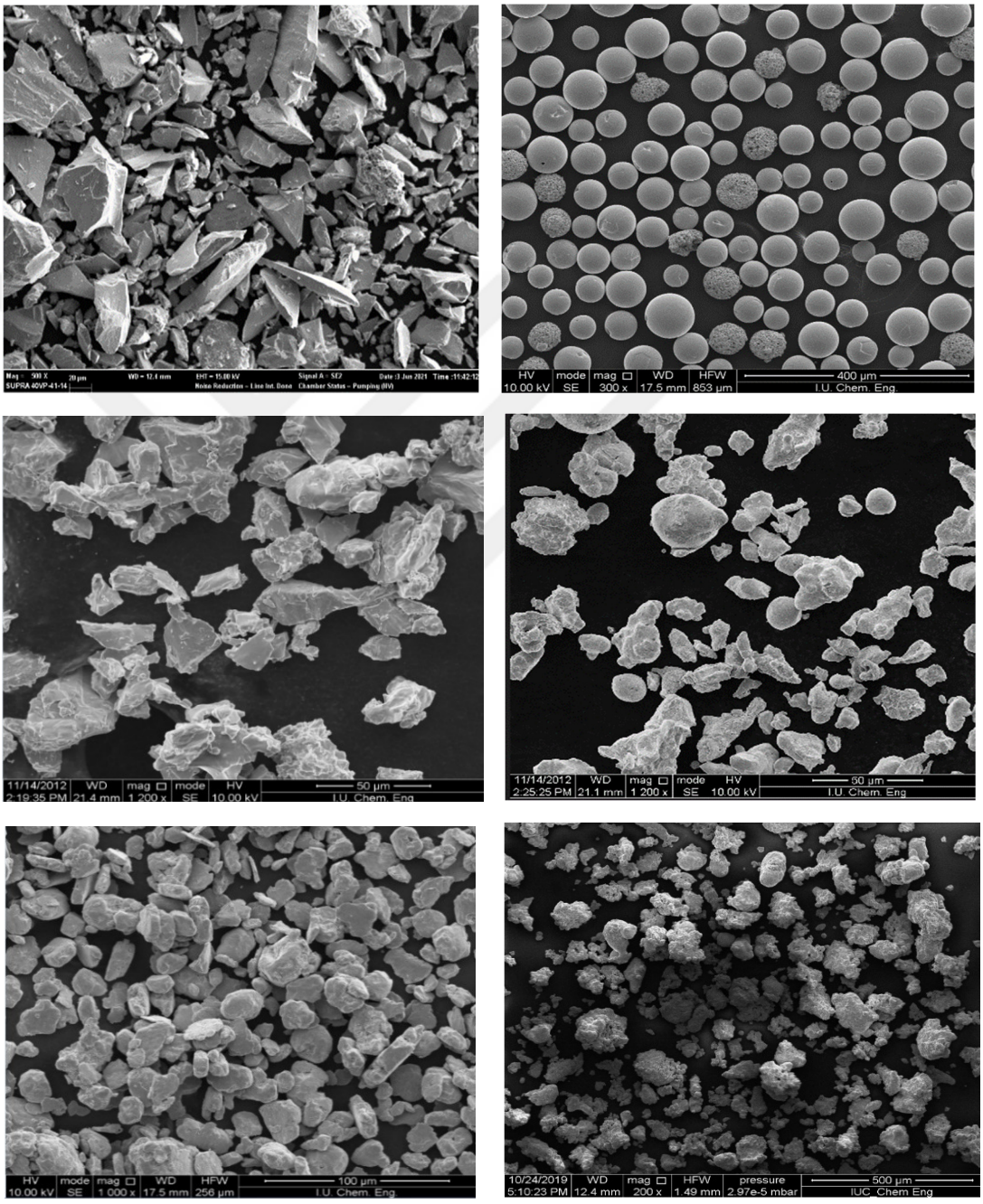
4.1 MİKROYAPI

Aşağıdaki Şekilde süperalaşım üretiminde kullanılan ana metalin (Ni) SEM fotoğrafları görülmektedir. Tozlar homojen boyutlu olup safsızlık içermemektedir.



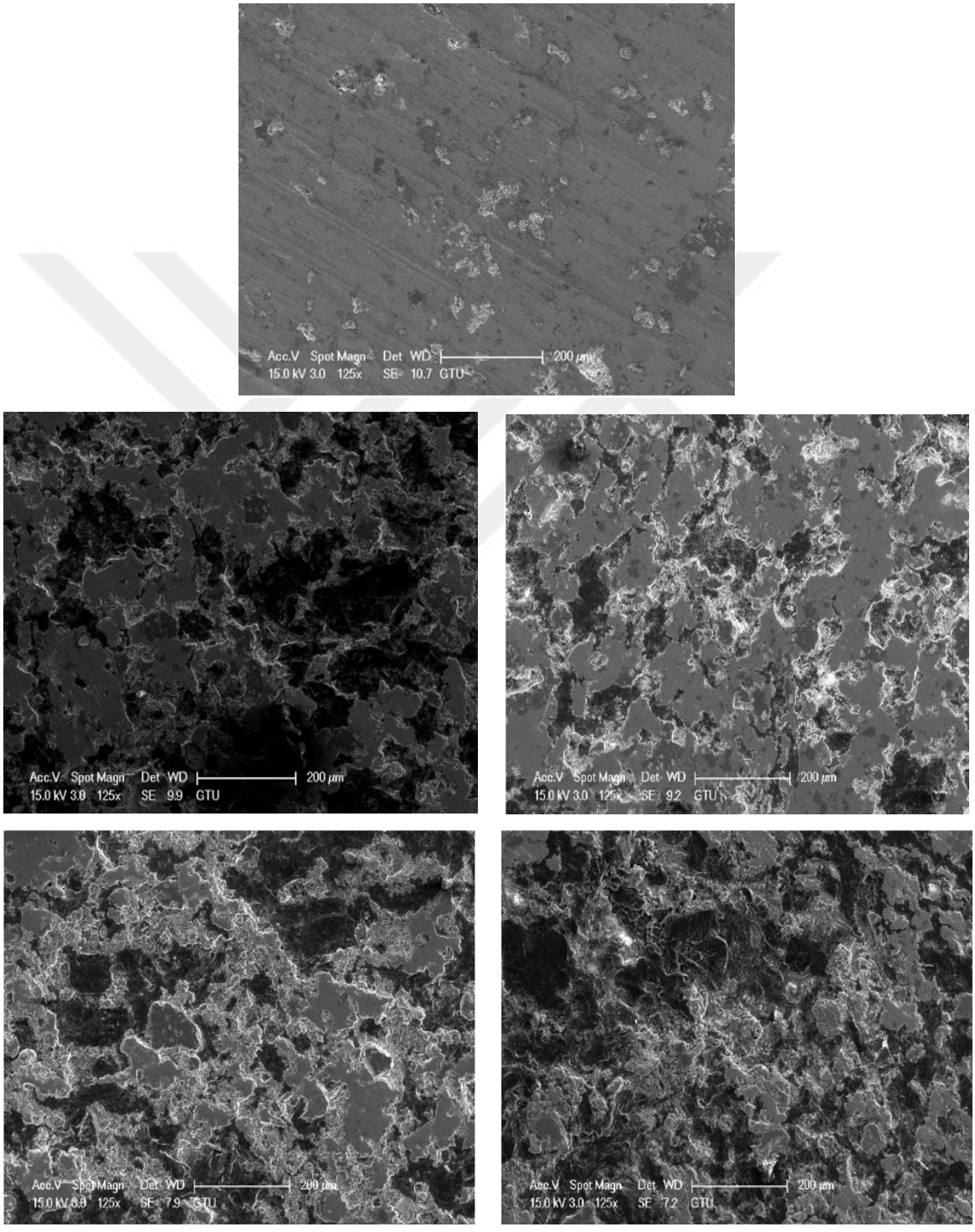
Şekil 4.1: Ni tozunun SEM fotoğrafları

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



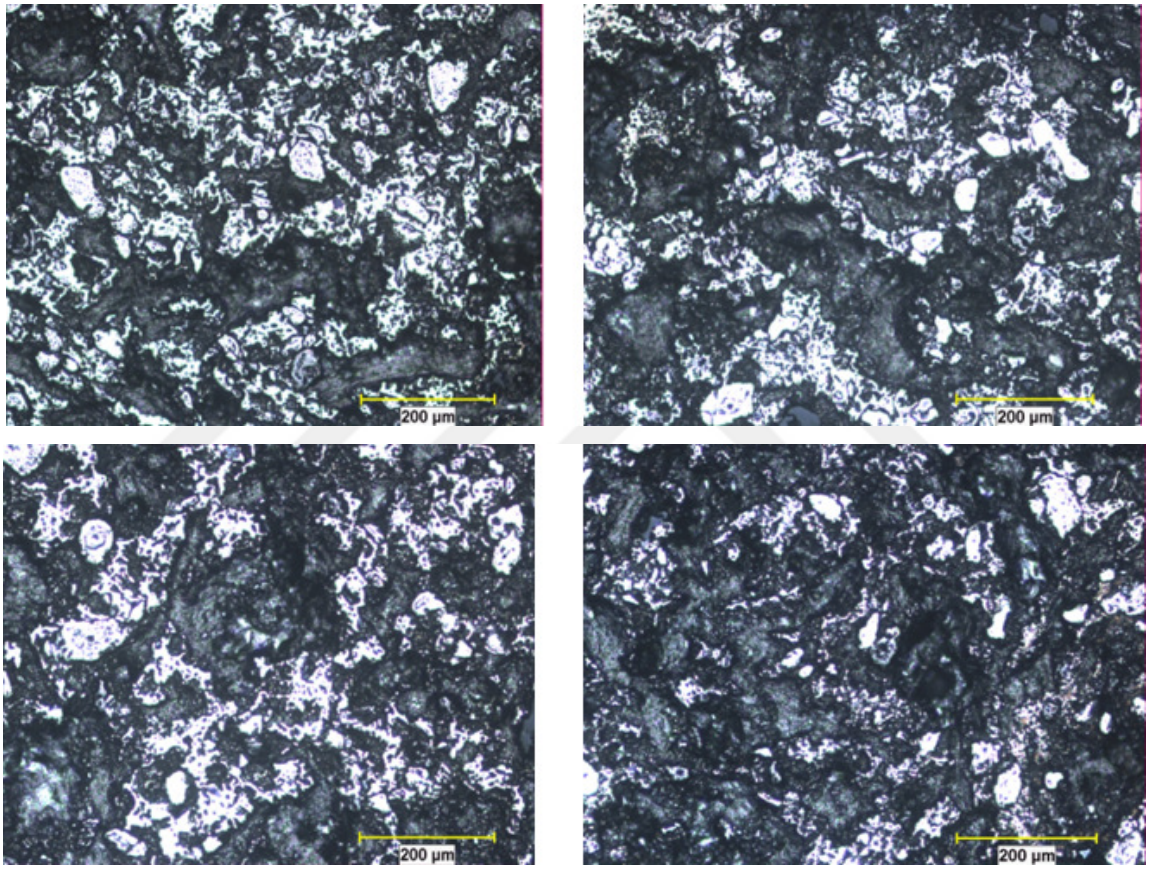
Şekil 4.2: İlave elementlerin SEM fotoğrafları a) Mn, b) Mo, c) Ti, d) Cu, e) Co, e) Fe

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş süperalaşımların taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı 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.



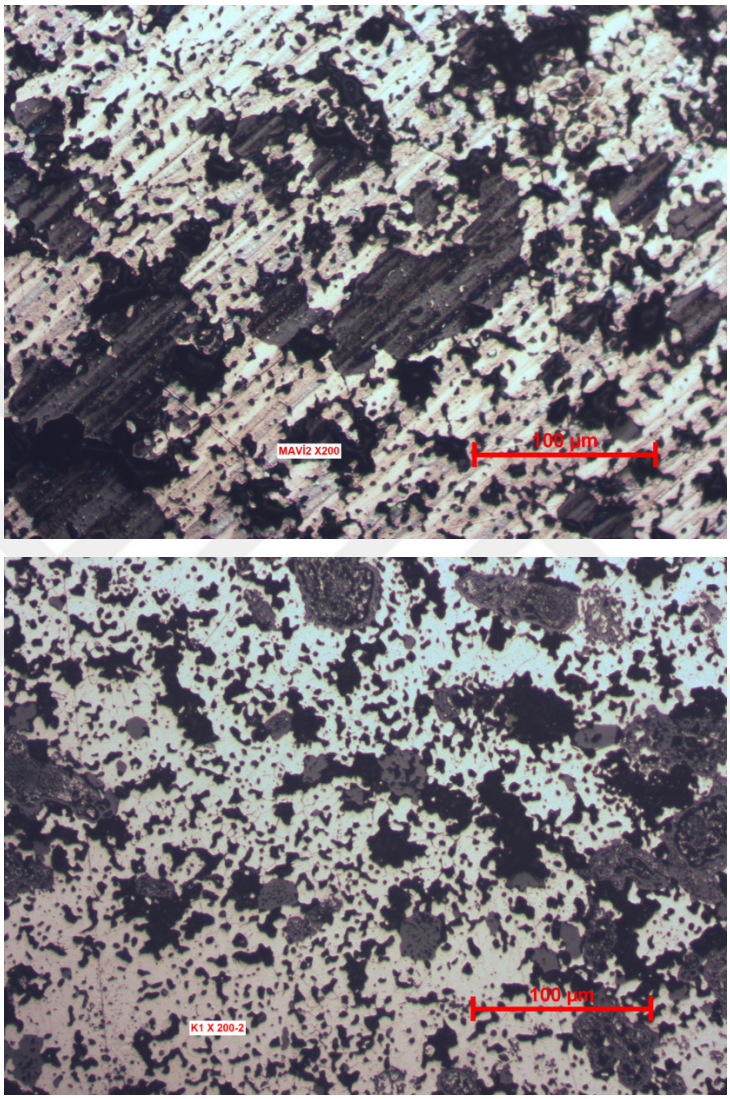
Şekil 4.3: Ti katkılı alaşımların SEM fotoğrafları a) IN718, b) 2Ti, c) 3Ti d) 5Ti e) 7Ti

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş Inconel 718 alaşımların 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. Mikroyapı gama (γ) matris ve (γ^I) çökelti bölgelerinden oluşmaktadır. Parlak bölgeler gama (γ) matrisi ve koyu renkli bölgeler (γ^I) çökelti fazını işaret etmektedir.



Şekil 4.4: Ti katkılı alaşımların optik mikroskop fotoğrafları a) IN718, b) IN718-2Ti, c) IN718-3Ti d) IN718-5Ti e) IN718-7Ti

Aşağıdaki şekilde Inconel 625 ve Inconel 602 alaşımların optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Mikroyapı gama (γ) matris ve (γ^I) çökelti bölgelerinden oluşmaktadır. Parlak bölgeler gama (γ) matrisi ve koyu renkli bölgeler (γ^I) çökelti fazını işaret etmektedir.



Şekil 4.5: Inconel 625 ve Inconel 602 alaşımların optik mikroskop fotoğrafları

4.2 MEKANİK ÖZELLİKLER

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elastisite modülü değerleri görülmektedir.

Görüldüğü gibi Ti ilavesi elastisite modülü değerlerini azaltmıştır. CNT ve alümina ilavesi alaşımların elastisite değerlerini artırmıştır.

Tablo 4.1: Tez kapsamındaki alaşımlarının elastisite modülleri

Alaşım	Elastisite Modülü (GPa)
Inconel 718	201
Inconel 718-2Ti	199
Inconel 718-3Ti	197
Inconel 718-5Ti	186
Inconel 718-7Ti	185
Inconel 718-1CNT	202
Inconel 718-1Al2O3	206
Inconel 625	200
Inconel 602	206

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

Görüldüğü gibi Ti ilavesi aşınma direnci değerlerini bir miktar azaltmıştır. CNT ve alümina ilavesi alaşımların aşınma direncini artırmış % aşınma değerlerini azaltmıştır.

Tablo 4.2: Tez kapsamındaki alaşımların aşınma değerleri

Alaşım	Aşınma (%)
Inconel 718	0.3
Inconel 718-2Ti	0.3
Inconel 718-3Ti	0.3
Inconel 718-5Ti	0.4
Inconel 718-7Ti	0.4
Inconel 718-1CNT	0.2
Inconel 718-Al2O3	0.1
Inconel 625	0.3
Inconel 602	0.3

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

Ti ilavesi alaşımların sertlik değerlerini bir miktar düşürmüştür. CNT ve alümina ilavesi sertlik değerlerini artırmıştır.

Tablo 4.3: Tez kapsamındaki alaşımlarının sertlikleri

Alaşım	Sertlik (HV3)
Inconel 718	265
Inconel 718-2Ti	260
Inconel 718-3Ti	259
Inconel 718-5Ti	255
Inconel 718-7Ti	253
Inconel 718-1CNT	269
Inconel 718-Al2O3	279
Inconel 625	270
Inconel 602	266

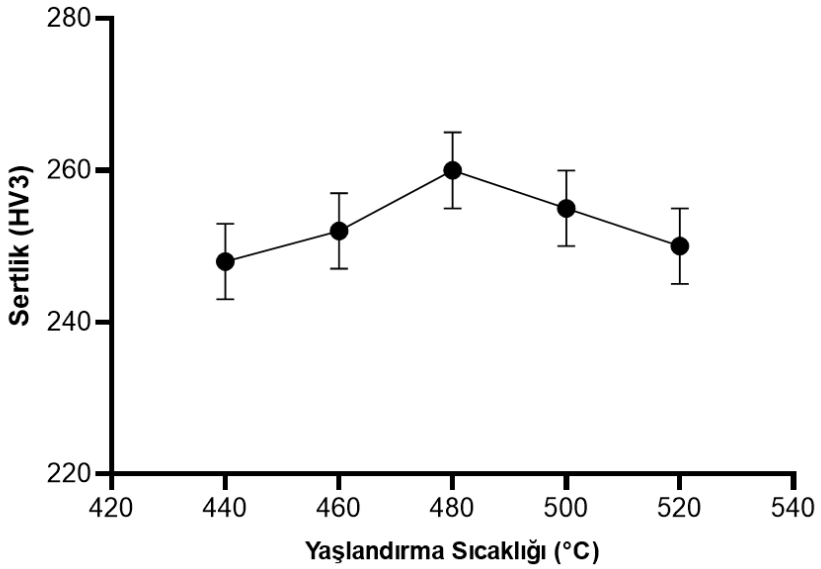
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elektriksel iletkenlik değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Ti ilavesi ve alümüna ilavesi alaşımların iletkenlik değerlerini düşürmüştür. CNT ilavesi alaşımın iletkenlik değerini arttırmıştır.

Tablo 4.4: Tez kapsamındaki alaşımlarının iletkenlikleri

Alaşım	Elektriksel İletkenik (IACS%)
Inconel 718	1.9
Inconel 718-2Ti	1.9
Inconel 718-3Ti	1.8
Inconel 718-5Ti	1.6
Inconel 718-7Ti	1.5
Inconel 718-1CNT	2.2
Inconel 718-Al2O3	1.5
Inconel 625	2.0
Inconel 602	2.0

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 4.6: Yaşlandırma ısıl işlem sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi

4.3 ELEKTROKİMYASAL KOROZYON ÖZELLİKLERİ

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

Görüldüğü gibi Ti ilavesi ile elektrokimyasal korozyon hızı değerleri azalmaktadır. CNT ve alümina ilavesi kayda değer bir etki yapmamış olup Ti katkılı alaşımlara göre yüksek korozyon görülmektedir.

Tablo 4.5: Tez kapsamındaki alaşımlarının korozyon hızı

Alaşım	Korozyon Hızı (mm/yıl)
Inconel 718	0.34
Inconel 718-2Ti	0.31
Inconel 718-3Ti	0.26
Inconel 718-5Ti	0.24
Inconel 718-7Ti	0.22
Inconel 718-1CNT	0.28
Inconel 718-Al2O3	0.30
Inconel 625	0.28
Inconel 602	0.30

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

Görüldüğü gibi Ti ilavesi ile yüzey oksit film direnci değerleri artmakta elektrokimyasal korozyon azalmaktadır. CNT ve alümina ilavesi kayda değer bir etki yapmamış olup Ti katkılı alaşımlara göre yüksek korozyon görülmektedir.

Tablo 4.6: Tez kapsamındaki alaşımlarının yüzey oksit direnci

Alaşım	Yüzey oksit direnci (Ω cm^2)
Inconel 718	1.9
Inconel 718-2Ti	2.0
Inconel 718-3Ti	2.1
Inconel 718-5Ti	2.2
Inconel 718-7Ti	2.4
Inconel 718-1CNT	1.8
Inconel 718-Al2O3	1.8
Inconel 625	2.0
Inconel 602	2.0

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların ağırlık değişimi ile tespit edilmiş yüksek sıcaklık elektrokimyasal korozyon direnci değerleri görülmektedir.

Görüldüğü gibi Ti ilavesi ile yüksek sıcaklık elektrokimyasal korozyon direnci değerleri artmakta ağırlık değişimi azalmaktadır. CNT ve alümina ilavesi kayda değer bir etki yapmamış olup Ti katkılı alaşımlara göre yüksek ağırlık değişimi görülmektedir.

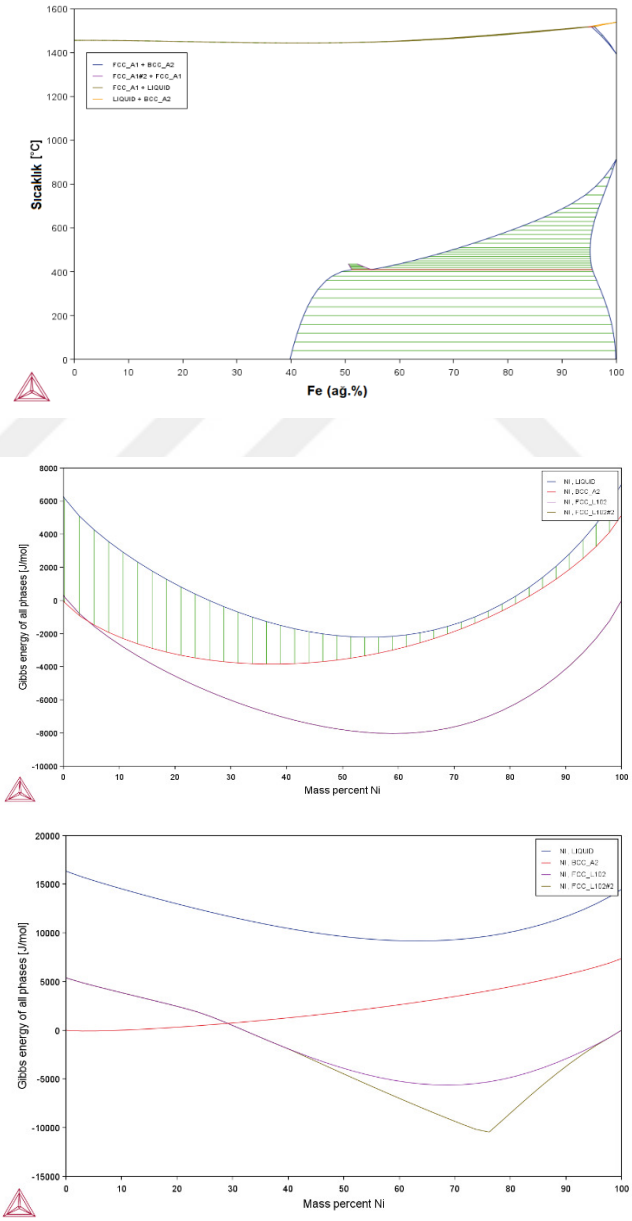
Tablo 4.7: Yüksek sıcaklık korozyon testi sonuçları

Alaşım	Ağırlık Değişimi (%)
Inconel 718	1.5
Inconel 718-2Ti	1.4
Inconel 718-3Ti	1.2
Inconel 718-5Ti	1.0
Inconel 718-7Ti	0.8
Inconel 718-1CNT	1.4
Inconel 718-Al2O3	1.5
Inconel 625	1.4
Inconel 602	1.3

4.4 HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ

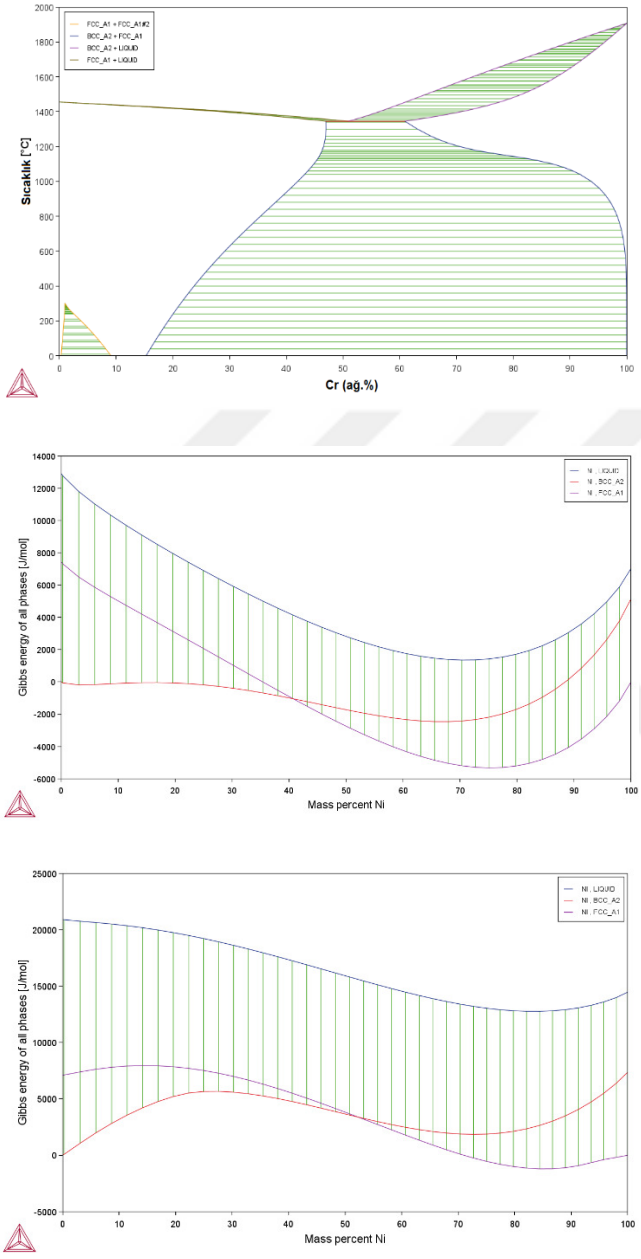
Hesaplamalı Faz Diyagramları (CALPHAD)

Tez kapsamında üretilmiş alaşımların "*Thermo-Calc*" yazılımı ile faz diyagramları, kristal kafes yapıları ve serbest enerji diagramları elde edilmiştir. Aşağıdaki şekilde, "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş Ni-Fe faz diyagramı ve kimyasal potansiyel diyagramları (30 °C ve 700 °C) görülmektedir.



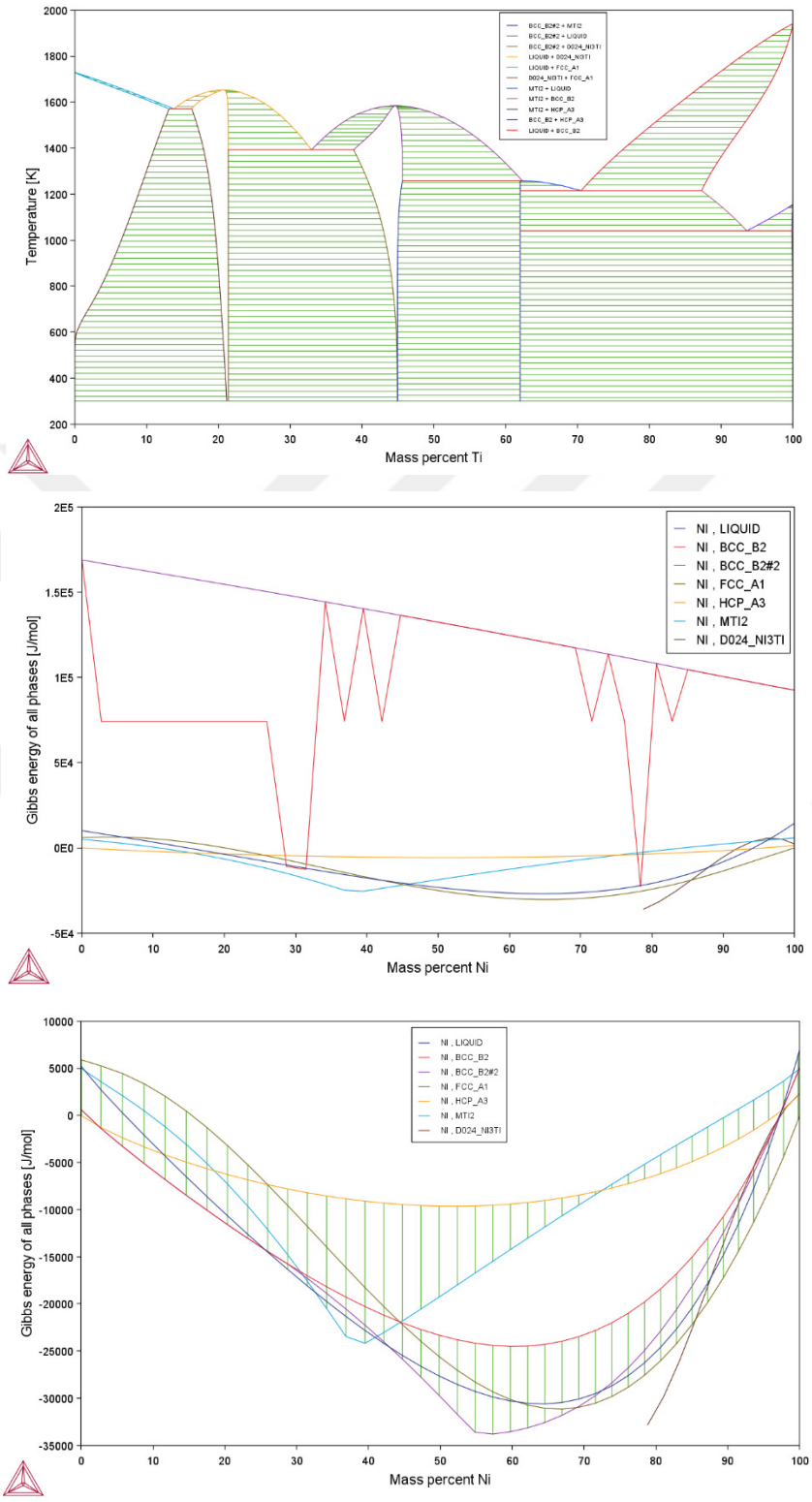
Şekil 4.7: Ni-Fe ikili faz diyagramları ve kimyasal potansiyel diyagramları

Aşağıdaki şekilde, "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş Ni-Cr faz diyagramı ve serbest enerji diyagramları (30 °C ve 700 °C) görülmektedir.



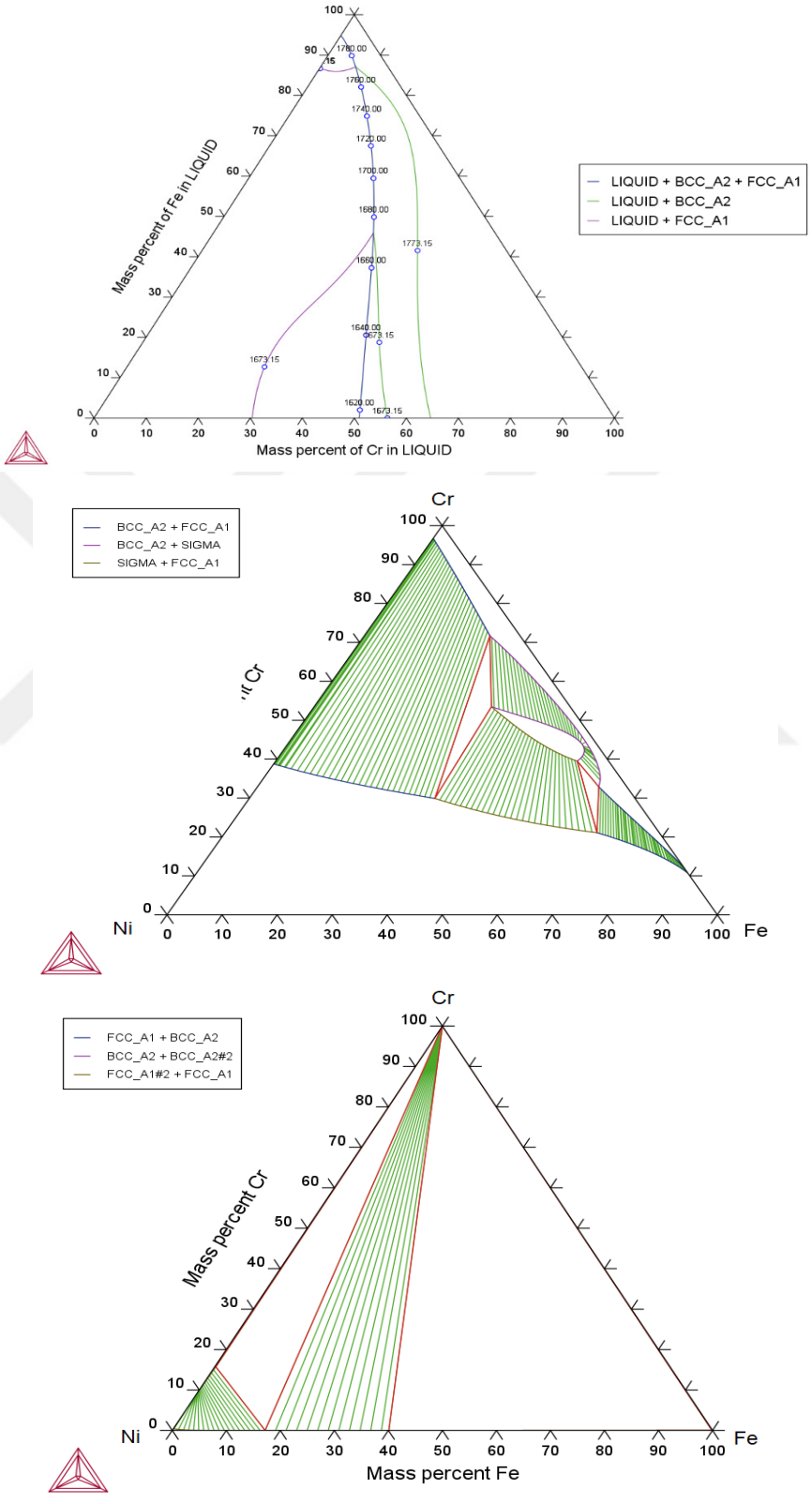
Şekil 4.8: Ni-Cr ikili faz diyagramları ve serbest enerji diyagramları

Aşağıdaki şekilde, "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş Ni-Ti faz diyagramı ve serbest enerji diyagramları (30 °C ve 700 °C) görülmektedir.



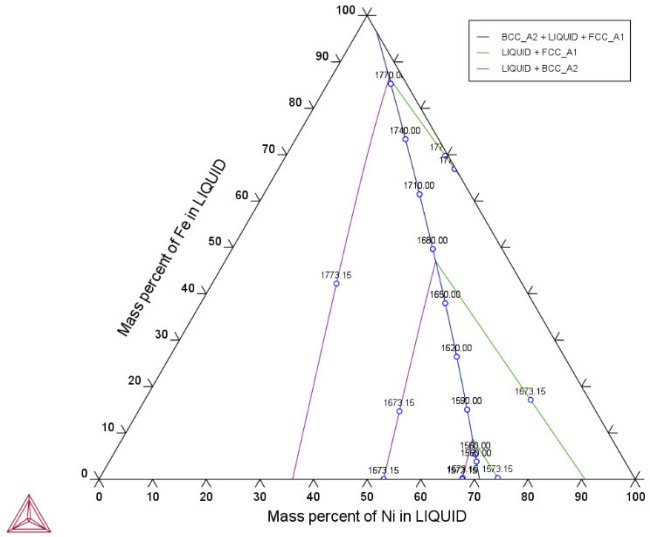
Şekil 4.9: Ni-Ti ikili faz diyagramları ve serbest enerji diyagramları

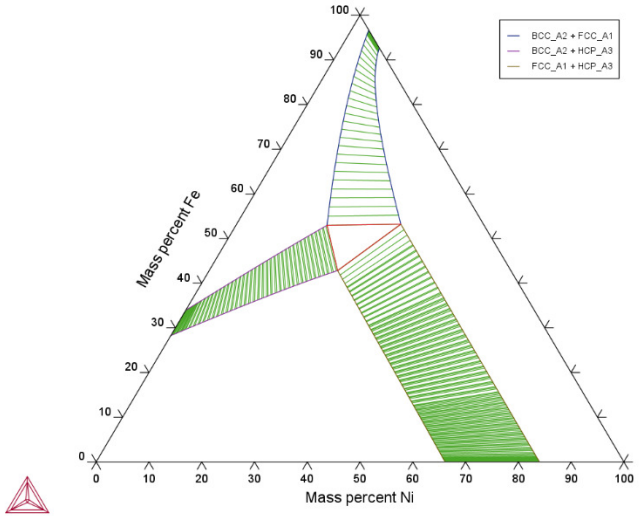
Aşağıdaki şekilde Ni-Fe-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu (30-1500 °C), b) 900 °C üçlü faz diyagramı, c) 30 °C faz diyagramı görülmektedir.

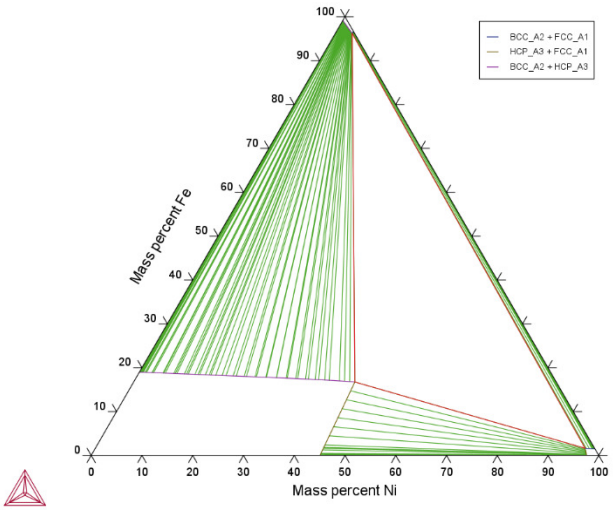


Şekil 4.10: Ni-Fe-Cr sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları

Aşağıdaki şekilde Ni-Fe-Ti sistemi a) likidus projeksiyonu (30-1500 °C), b) 900 °C üçlü faz diyagramı, c) 30 °C faz diyagramı görülmektedir.

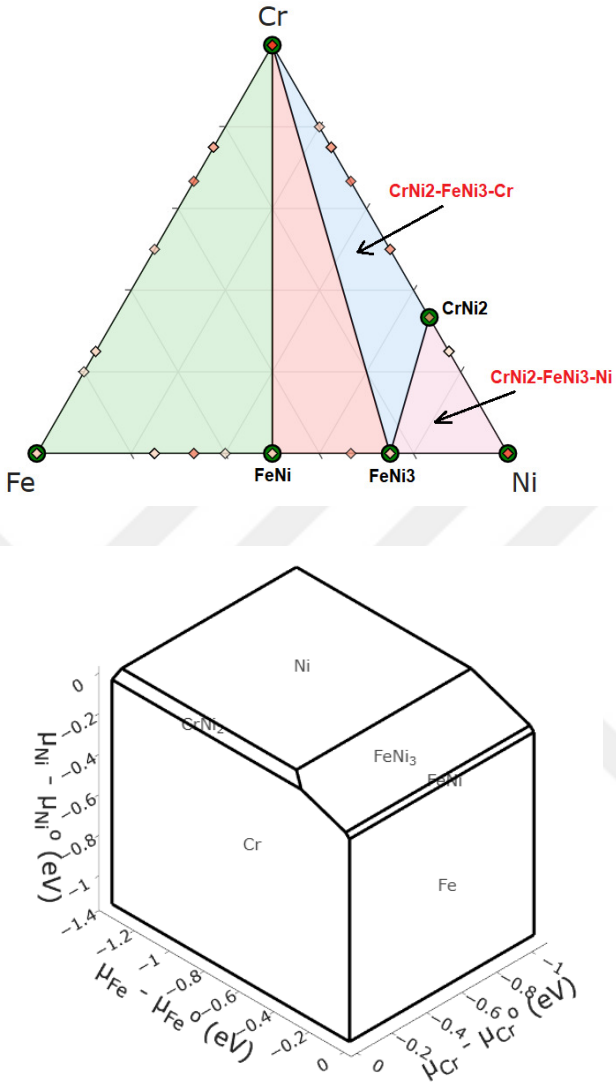






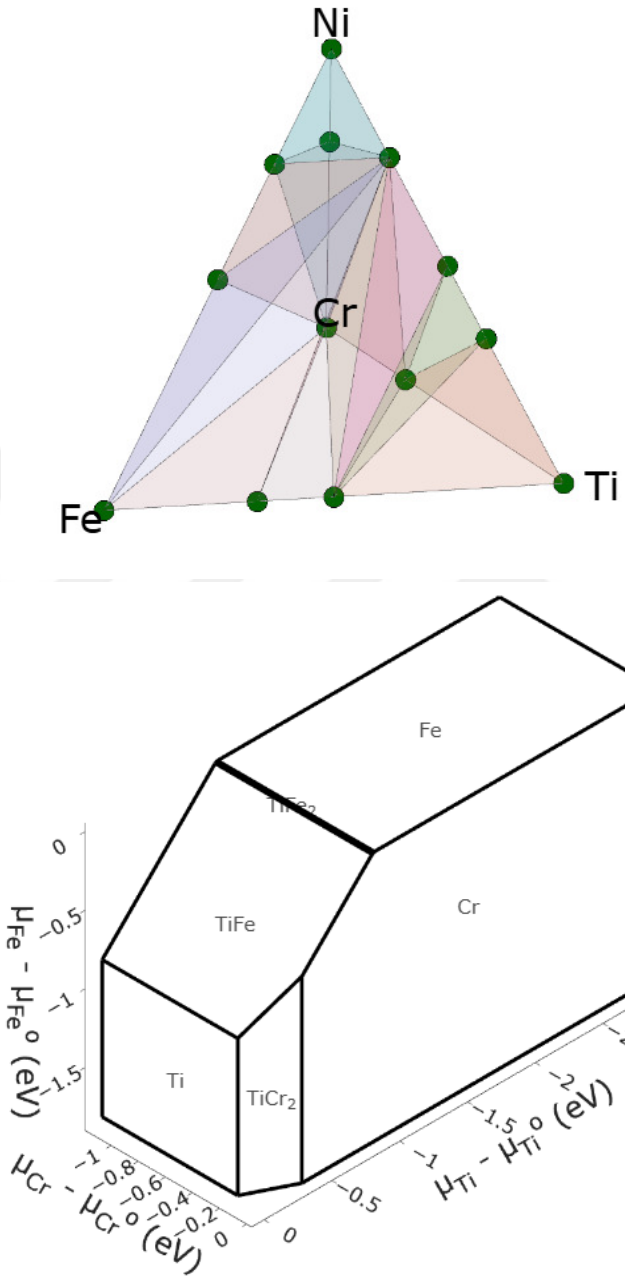
Şekil 4.11: Ni-Fe-Ti sistemi a) likidus projeksiyonu, b) 900 °C, c) 30 °C faz diyagramları

Aşağıdaki şekilde, "*Materials Projec*t" yazılımı ile elde edilmiş Ni-Fe-Cr üçlü faz diyagramı ve kimyasal potansiyel diyagramları görülmektedir.

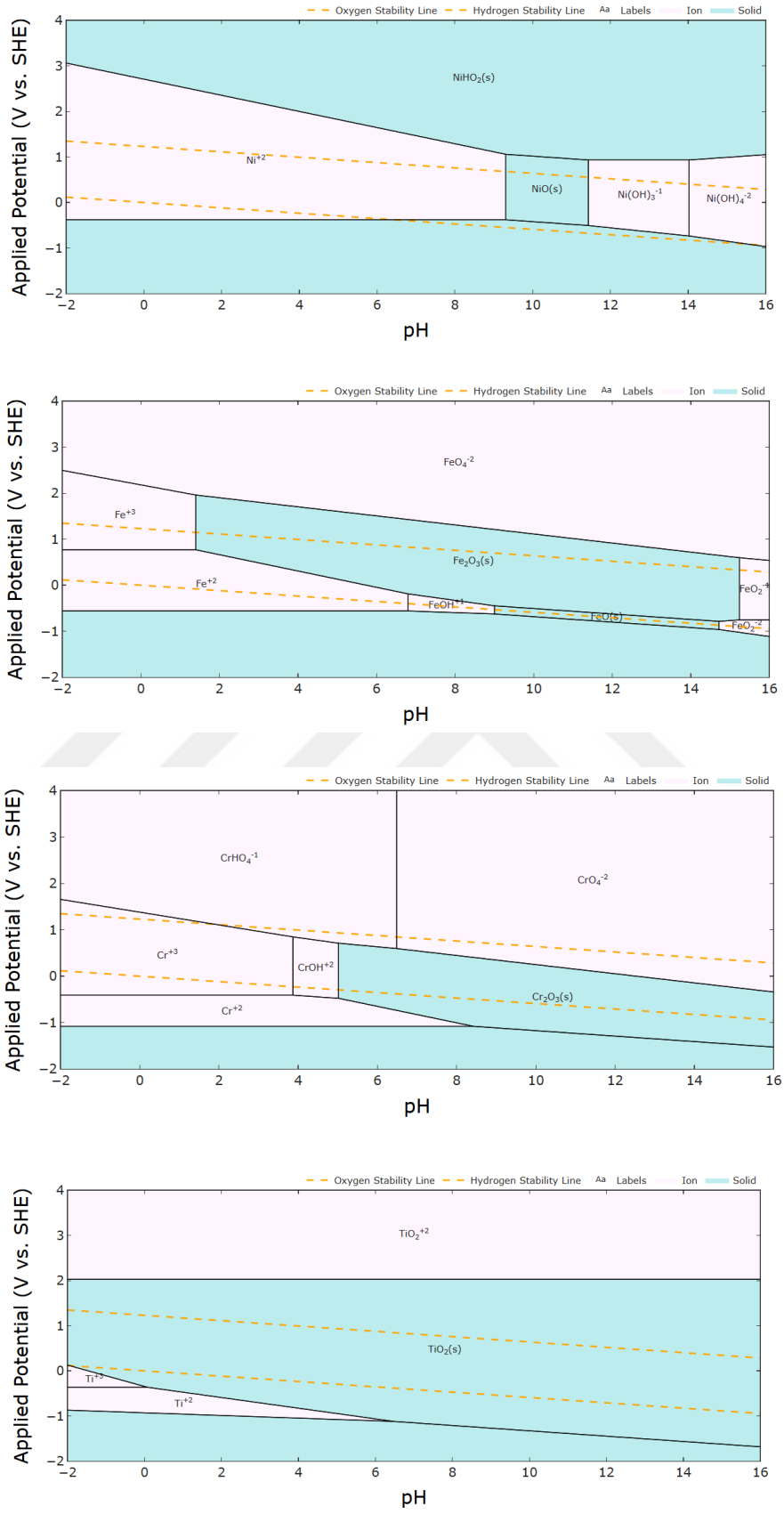


Şekil 4.12: Ni-Fe-Cr a) faz diyagramı, b) kimyasal potansiyel diyagramı

Aşağıdaki şekilde, "*Materials Projec*t" yazılımı ile elde edilmiş Ni-Fe-Ti üçlü faz diyagramı ve kimyasal potansiyel diyagramları görülmektedir.

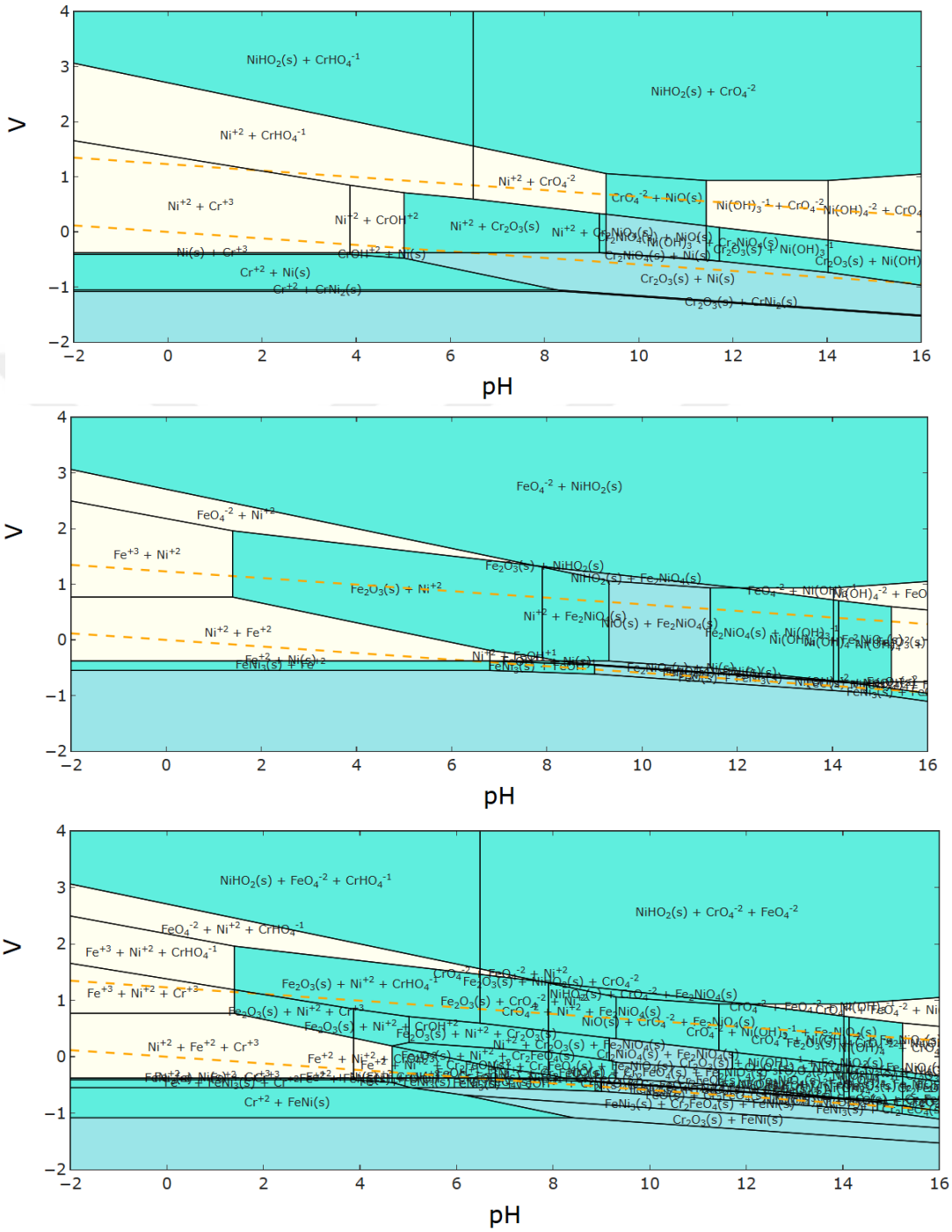


Şekil 4.13: Ni-Fe-Ti a) faz diyagramı, b) kimyasal potansiyel diyagramı



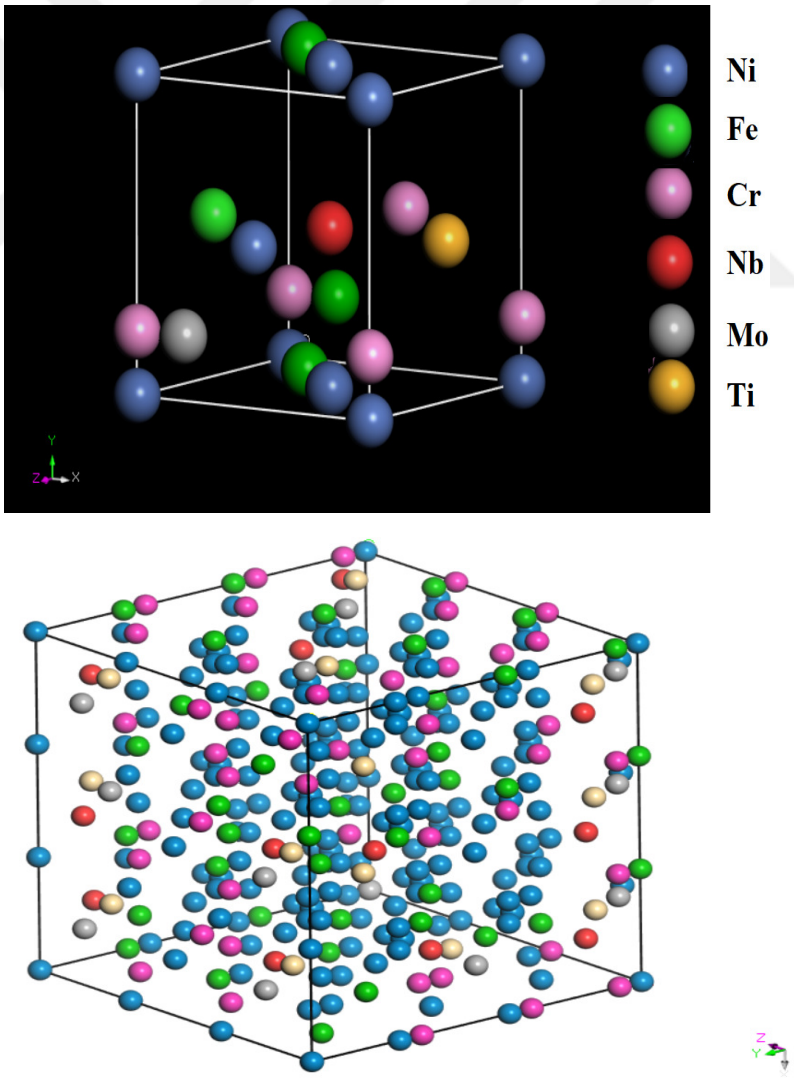
Şekil 4.14: Elementlerin Pourbaix diyagramları a) Ni, b) Fe, c) Cr, d) Ti

Aşağıdaki şekilde "*Materials Project*" yazılımı ile elde edilmiş a) Ni-Cr, b) Ni-Fe, c) Ni-Fe-Cr Pourbaix diyagramları (pH-V diyagramları) görülmektedir.



Şekil 4.15: Alaşımların Pourbaix (V-pH) diyagramları a) Ni-Cr, b) Ni-Fe, c) Ni-Fe-Cr

Bu metotta pseudo potansiyelleri kullanılmaktadır. Bu potansiyel sadece valans elektronlarında etkin olan bir potansiyeldir. CASTEP programında yoğunluk fonksiyon teorisi kullanılarak; bir malzemenin fiziksel büyüklükleri hesaplanmaktadır. Enerjinin koordinata göre birinci türevi sisteme etki eden kuvveti verir. Kuvvetler sıfır olduğunda sistemin denge durumunu elde edilir. Enerjinin birinci türevinden sistem geometrisi elde edilir (geometrik optimizasyonu). CASTEP yazılımı kullanılarak alaşımların çeşitli özellikleri teorik olarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekilde incelenen süperalaşımların birim kafesi ve hesaplamaların yapıldığı süperkafes yapısı görülmektedir. CASTEP yazılımı ile gerçekleştirilen hesaplamalar için aşağıda görülen kafes yapıları oluşturulmuş ve ardından hesaplamalar süperkafes üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16. a) Birim kristal kafes ve b) süperlatis

Süperalaşımların Kafes Özellikleri

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

Görüldüğü gibi artan Ti ilavesi ile Inconel 718 alaşımının kafes parametresi ve birim kafes hacmi bir miktar artış göstermiştir.

Tablo 4.8. Alaşımların kafes parametreleri ve birim kafes hacimleri

Alaşım	a=b=c (A)	Birim Kafes Hacmi (A^3)
Inconel 718	3.597	46.53
Inconel 718-2Ti	3.599	46.61
Inconel 718-3Ti	3.599	46.61
Inconel 718-5Ti	3.601	46.69
Inconel 718-7Ti	3.603	46.77
Inconel 718-1CNT	3.597	46.53
Inconel 718-1Al2O3	3.598	46.57
Inconel 625	3.599	46.61
Inconel 602	3.590	45.10

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.

Görüldüğü gibi artan Ti ilavesi ile elastik sabitlerde düşüş meydana gelmiştir.

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.

Tablo 4.9. Alaşımların elastik sabitleri

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 718-2Ti	240	141	101	49,5	2,04
Inconel 718-3Ti	231	130	99	50,5	1,96
Inconel 718-5Ti	225	129	99	48	2,06
Inconel 718-7Ti	225	129	99	48	2,06
Inconel 718-1CNT	250	148	107	51	2,09
Inconel 718-1Al2O3	252	150	109	51	2,13
Inconel 625	231	130	99	50,5	1,90
Inconel 602	247	147	100	50	2.00

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.

Tablo 4.10. Alaşımların mekanik özellikleri

Alaşım	B (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	ρ	G/B	H (GPa)	K (MPa $m^{1/2}$)
Inconel 718	180	83,4	216,72	0,2993	0,4633	31,69	2.4
Inconel 718-2Ti	174	80,4	209,00	0,2998	0,4620	30,39	2.3
Inconel 718-3Ti	163	79,6	205,48	0,2907	0,4863	33,33	2.2
Inconel 718-5Ti	161	78,6	202,79	0,2900	0,4881	33,16	2.2
Inconel 718-7Ti	161	78,6	202,79	0,2900	0,4881	33,16	2.1
Inconel 718-1CNT	182	84,6	219,75	0,2987	0,4648	32,36	2.2
Inconel 718-1Al2O3	184	85,8	222,77	0,2982	0,4663	33,02	1.9
Inconel 625	163	79,6	205,48	0,2907	0,4863	33,33	2.5
Inconel 602	180	80.0	209,08	0,3067	0,4436	27,87	2.4

5. TARTIŞMA

Süperalaşımlar, oksidasyon direnci, yüzey kararlılığı, yüksek sıcaklıklarda sürünme ve yorulma direnci gibi özelliklere sahip olacak şekilde geliştirilmiş önemli bir mühendislik malzeme grubudur. Uçak motorları yapısında kullanılan malzemelerin en başında gelen ve endüstriyel uygulamalarda sıkça rastladığımız malzemelerden en önemlisi süperalaşım malzemelerdir. Uçak motorları oldukça zorlayıcı koşullar altında çalışmaktadır. Süperalaşımlar; nikel, kobalt, demir ve nikel-demir esaslı ve çoğunlukla 900°C üstündeki sıcaklıklarda kullanılan ve bu derecelerin üzerinde oldukça yüksek ısıl, mekanik ve kimyasal direnç gösterebilmesi için tasarlanan malzemelerdir. Genel olarak nikel esaslı süperalaşımların mekanik özelliklerinin daha da geliştirilmesi için Çökelme sertleşmesi, katı eriyik sertleşmesi, tane sınırı sertleşmesi kullanılmaktadır. Genel olarak nikel esaslı süperalaşımlarda nikel matris fazı içinde çökelen küçük Ni_3Al çökeltileri dislkokasyonların hareketini engelleyerek mukavemet artışına neden olmaktadır. Nikelin elektronik yapısından dolayı nikel esaslı matris fazının (γ) yüksek katı çözünürlük sınırı bulunmaktadır. Bu amaçla kullanılacak alaşım elementlerinin erime sıcaklıklarının yüksek olması, nikel matris fazı içerisinde katı çözünürlük oranlarının yüksek olması ve son olarak nikel kafes yapısında gerilim oluşturabilmesi amacıyla atom çapının büyük olması gerekmektedir. Özellikle nikel esaslı süperalaşımlarda tane sınırı sertleşmesi önemli bir mukavemet arttırma yöntemidir. Bor veya karbon ilavesi ile tane sınırlarında karbür veya börür esaslı çökeltiler oluşturarak süperalaşımda mukavemet artışı sağlanabilir.

Genel olarak özellikle yüksek sıcaklık bölgelerinde kullanılacak süperalaşımlar ince bir seramik bir ile kaplanarak yüksek sıcaklık dayanımları (oksitlenme ve korozyon) geliştirilmektedir. Genellikle uçak motorunu çevresel şartlardan korumayı amaçlayan krom veya alüminyum bakımından zengin oksit esaslı koruyucu kaplamalar kullanılmaktadır. Uçak motorlarında yanmanın meydana geldiği kısım ve türbin kısmında sıcaklık nispeten daha yüksek olduğundan bu kısımlarda şartlar sıcaklık açısından daha zorludur. Yanmanın meydana geldiği bölgede bulunan alaşımların 1050-1150 °C arasında sıcaklıklara dayanıklı olması beklenmektedir. örneğin Boeing 787 uçağının GE CF6 türbin motorunda en büyük pay nikel esaslı süperalaşımlara aittir. Daha sonra titaanyum alaşımları ve demir esaslı alaşımlar gelmektedir. Ayrıca bir miktar alüminyum alaşımı ve kompozit malzeme de kullanılmaktadır. Türbin bıçakları nikel esaslı süperalaşımlardan, yüksek basınç kompresörü kısmı titanyum alaşımı veya nikel esaslı süperalaşımdan, fan çerçevesi kompozit malzemeden, yanma odası

nikel esaslı süperalaşımlardan, düşük basınç kompresörü kısmı titanyum alaşımı veya nikel esaslı süperalaşımdan, motor girişinde bulunan fan bıçakları titanyum alaşımı veya kompozit malzemeden üretilmektedir.

SEM fotoğrafından görüldüğü sinterlenmiş numunelerde makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak alaşımda yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir. Başlangıç malzemesi olarak kullanılan metal tozları ağırlıklı olarak karmaşık şekillidir ve homojen bir ortalama parçacık boyut aralığındadır. Sinterlenmiş alaşımın 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. Genel olarak mikroyapı γ fazını içermektedir. Ayrıca mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında tane sınırlarında bir miktar intermetalik bileşik görülmektedir.

Erdem [21] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, nikel esaslı süperalaşım toz karışımı (%75 Ni, %20 Cr, %4 Al2O3, %0.6 Ti, %0.4 Y2O3) inert gaz ortamında, mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Hem çelik kazanda hem de seramik kazanda öğütülen tozlarda, artan MA süresine bağlı olarak toz boyutlarında küçülme, toz sertliklerinde artma ve lameller arası mesafede de daralma tespit edilmiştir. MA sonrası yapılan XRD analizlerinde 24 saate kadar ö,ütülmü2 tozlarda, herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır. Elde edilen süperalaşım numunelerin oksitlenme kinetiğini belirlemek üzere hazırlanan parçalar, 1000 °C'de 1, 10, 50 ve 100 saatlik sürelerle oksidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Numune yüzeylerinde oluşan oksit filminin oksitlenme süresine bağlı olarak arttığı, ve süreklilik arz eden bir film şeklinde oluştuğu ve alttaki metale iyi yapıştığı tespit edilmiştir.

Erdeniz [22] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, çökeltilerin gelişimini gözlemek adına bazı ısıl işlemler tatbik edilmiştir. İlk bölümde, soğuma çökeltilerinin oluşumu incelenmiştir. İkinci bölümde, 1140°C'de iki farklı boyutta çökeltilerin oluşumu gözlenmiştir. 1120°C'de 12-480 saat arasında uygulanan ısıl işlemlerin ışığında, çökeltilerin büyüme ve çözünme mekanizmaları bu çalışmanın üçüncü bölümünde ele alınmıştır. Bu işlemler çökelti birleşme mekanizmasının da gözlemlenmesine olanak tanımıştır. Dördüncü bölümde, büyük ve küçük çökeltilerin gerçek ısıl koşullar altındaki büyüme nitelikleri üzerinde durulmuştur. Isıl işlemler

950°C'de 1-480 saat uygulanmıştır. Sonuçlar, küçük çökeltilerin daha hızlı büyüdüğünü, ancak 480 saatin tek boyutlu bir çökelti içyapısı elde etmek için yeterli olmadığını göstermiştir.

Özgün [23] gerçekleştirdiği tez çalışmasında, IN718, IN625 ve Nimonic 90 ticari isimli üç farklı nikel esaslı süperalaşım tozundan TEK yöntemi ile süperalaşım malzemeler şekillendirilmiştir. Şekillendirilen malzemeler farklı sinterleme ve farklı ısıl işlem çevrimlerine maruz bırakılmışlardır. Hem sinterlenmiş durumdaki hem de ısıl işleme tabi tutulmuş durumdaki numunelerin mikroyapısal ve mekaniksel olarak karakterizasyon işlemlerinin gerçekleştirilerek en uygun üretim ve ısıl işlem parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalara toz malzemelerin tane şekillerinin belirlenmesi amacıyla SEM görüntüleri alınarak ve tane boyut dağılımlarının tespiti için boyut dağılımı analizleri yapılarak başlanmıştır. Her üç malzeme tozu parafin mum, polipropilen, brezilya mumu ve stearik asit içeren çok bileşenli bir bağlayıcı sistemi ile karıştırılarak üç farklı besleme stoğu hazırlanmıştır. Elde edilen karışımlar granül haline getirilip enjeksiyonla standart çekme çubuğu ve kırma numunesi formunda kalıplanmışlardır. Kalıplanan numunelerin polimerik malzemelerden arındırılması amacıyla uygulanan bağlayıcı giderme işlemi, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada solventle ayrıştırma uygulanmıştır. Her üç malzeme için de sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasına paralel olarak bağıl yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Uygulanan ısıl işlemlerin malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği; ısıl işlemler sonucu oluşan intermetalik çökeltilerin ve karbür çökeltilerinin her üç malzemede de sertlik ve mukavemet değerlerini arttırdığı, kırılma tokluğu ve darbe tokluğu değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

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, 871°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 yöntemleriyle 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.

Ham ve sinterlenmiş numune yoğunluk değerleri;

- Genel olarak geleneksel toz metalürjisi (pres-sinter) ile üretilen parçalarda % 10 gözenek kalmakta olup, alaşımlarda elde edilen ham ve sinterlenmiş yoğunluk değerlerinin uygun olduğu söylenebilir.
- Alümina ilavesi yoğunlukta kayda değer bir etki yaratmamıştır. Nispeten düşük olan yoğunluğundan dolayı, artan alümina miktarı ile yoğunluk değerlerinin bir miktar düşüş yaşandığı söylenebilir.
- Düşük miktarda ilave edildiğinden karbon nanotüp (CNT) ilavesinin ve artan CNT miktarının ham ve sinterlenmiş yoğunluk üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir.

Elastisite modülü değerleri;

- Genel olarak basma testi ve ultrasonik test ile belirlenmiş elastisite modülü değerlerinin uygun olduğu ve birbiri ile uyumlu oldukları söylenebilir.
- Alümina ilavesi elastisite modülü değerinde kayda değer bir etki yaratmamıştır.
- Düşük miktarda ilave edilmesine rağmen karbon nanotüp (CNT) ilavesinin ve artan CNT miktarının elastisite modülü üzerinde olumlu yönde etkisi olduğu ve elastisite modülünün karbon nanotüp (CNT) ilavesi ile arttığı söylenebilir.

Aşınma değerleri;

- Alümina ilavesi aşınma miktarında azalmaya neden olmuştur. Nispeten sert olan alümina partiküllerinin ilavesinden dolayı, artan alümina miktarı ile aşınma miktarı değerlerinde düşüş yaşandığı söylenebilir.
- Düşük miktarda ilave edildiğinden karbon nanotüp (CNT) ilavesinin ve artan CNT miktarının aşınma davranışı üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir.

Sertlik değerleri;

- Alümina ilavesi sertlikte artışa neden olmuştur. Nispeten sert olan alümina partiküllerinin ilavesinden dolayı, artan alümina miktarı ile sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir.
- Düşük miktarda ilave edildiğinden karbon nanotüp (CNT) ilavesinin ve artan CNT miktarının sertlik üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Elektrik iletkenlik değerleri;

- Alümina ilavesi elektrik iletkenlik değerinde azalışa neden olmuştur. Genel olarak alümina seramik esaslı olup iletkenlik göstermemektedir.
- Düşük miktarda ilave edilmesine rağmen karbon nanotüp (CNT) ilavesinin ve artan CNT miktarının iletkenliği arttırdığı söylenebilir.

Korozyon direnci değerleri;

- Alümina ilavesi elektrokimyasal korozyon hızında artışa neden olmuştur.
- Düşük miktarda ilave edildiğinden karbon nanotüp (CNT) ilavesinin ve artan CNT miktarının korozyon hızına kayda değer etkisinin olmadığı söylenebilir.

Tablo 5.1: Üretilen süperalaşımların alaşımların kıyaslanması

	Korozyon Direnci	**Yüksek Sıcaklık Korozyon**	**Sertlik**	**İletkenlik**	**Elastisite Modülü**	**Aşınma**
Inconel 718	+++	+++	++	++	++	++
Inconel 718-7Ti	++++	++++	++	++	++	++
Inconel 625	++	++	+++	++	+++	+++
Inconel 602	+	+	+	++	++	++

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için Inconel 718 esaslı süperalaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Ni esaslı Inconel 718 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 1100-1250 °C arasında 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 1000 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış ve ardından su verme uygulanmıştır. Ardından numuneler 400-550 °C arasında yaşlandırılmıştır..

Genel Sonuçlar:

- Ni esaslı Inconel 718, Inconel 625, Inconel 02 süperalaşımları mekanik alaşımlama-toz metalurjisi yöntemi ile başarı ile üretilmiştir.
- Ni esaslı Inconel 718, Inconel 625, Inconel 602 süperalaşımları genel olarak uçak uygulamalarında kullanılabilir.
- Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımlarının mekanik özellikleri Ti ilavesi ile artırılabilir.
- Ni esaslı Inconel 718 süperalaşımlarının korozyon dirençleri Ti ilavesi ile artırılabilir.
- Ni esaslı Inconel 718 ve Ti katkılı Inconel 718 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. Antolovich A.S.. 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] Yang L., Ren X., C. Ge, Q. 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] Sarıtaş S, 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 G.M., 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.