T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ

Seden ŞEN EREN

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlven MUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Aralık, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Seden ŞEN EREN tarafından, **Prof. Dr. İlven MUTLU** danışmanlığında hazırlanan **TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **06/12/2024** 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	Prof. Dr. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr.		☒ Kabul ☐ Ret

Eşime ve aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Desteklerinden ve yardımlarından dolayı Danışman hocam Prof. Dr. İlven MUTLU'ya çok teşekkür ederim.

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

Aralık 2024 **Seden ŞEN EREN**

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. TİTANYUM VE ALASIMLARININ ÖZELLİKLERİ 2
2.2. TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ 6
2.3. TOZ METALURJİSİ 12
3. YÖNTEM **16**
3.1. NUMUNE ÜRETİMİ 16
3.2. KARAKTERİZASYON 22
4. BULGULAR **26**
4.1. MİKROYAPI 26
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER 30
4.3. KOROZYON ÖZELLİKLERİ 38
4.4. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ 40
5. TARTIŞMA **43**
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **49**
KAYNAKLAR **53**
EKLER **55**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **56**

ETİK KURUL İZİN YAZISI **57**
KURUM İZNİ YAZILARI **58**
ÖZGEÇMİŞ **59**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Titanyumun allotropik özellikleri……..…..2
Şekil 2.2: Titanyumun mühendislik malzemeleri ile karşılaştırılması……...…3
Şekil 2.3: Faz yapısının titanyumun özellikleri üzerindeki etkisi……..4
Şekil 2.4: Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması……...…4
Şekil 2.5: Alaşım elementlerinin etkileri ve çap-elektronegatiflikleri ……..……5
Şekil 2.6: Beta titanyum alaşımlarının şematik ısıl işlem diyagramı…….6
Şekil 2.7: Titanyum için beta kararlaştıcı element-sıcaklık diyagramı…….……7
Şekil 2.8: Titanyum mikroyapısında martenzit oluşumu……...….8
Şekil 2.9: Titanyum alaşımlarında omega ve beta-üssü fazlarının oluşumu……..8
Şekil 2.10: Geleneksel toz metalürjisi prosesi…….13
Şekil 2.11: Tek eksenli ve çift eksenli presleme……..14
Şekil 2.12: sinterleme prosesinde gözenek yapısının değişimi……...15
Şekil 3.1: a) Bilyeli değirmen, b) hidrolik pres, c) boru tipi sinterleme fırını…….16
Şekil 3.2: Sinterlenmiş numunelerin fotoğrafları…….…...17
Şekil 3.3: Isıl işlem çevrim parametrelerinin etkileri…….....18
Şekil 3.4: Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların akış şeması……..…...19
Şekil 3.5: a) Sertlik cihazı, b) basma cihazı, c) aşınma cihazı…….22
Şekil 3.6: Tahribatsız ultrasonik muayene cihazı……..…..23
Şekil 3.7: Tahribatsız girdap akımları test cihazı…….……24
Şekil 1.8: Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi……..25
Şekil 4.1: Titanyum tozunun farklı büyütmelerde SEM fotoğrafları…….…..26
Şekil 4.2: İlavelerin SEM fotoğrafları a) Mn b) V c) Mo d) Sn e) Co f) Ni g) Fe h) Cr …...27
Şekil 4.3: Sinterlenmiş Ti alaşımının SEM fotoğrafı…….……..28
Şekil 4.4: Sinterlenmiş Ti alaşımın optik mikroskop fotoğrafı……..….29
Şekil 4.5: Yaşlandırma ısıl işlem sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi……..….35
Şekil 4.6: Ti alaşımlarının DSC eğrileri……..……..….37

Şekil 4.7: Ti alaşımlarının çevrimsel korozyon grafikleri……..….39
Şekil 4.8: İkili faz diyagramları……...….40
Şekil 4.9: Üçlü faz diyagramları……...….41
Şekil 4.10: Pourbaix diyagramları……...….42

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Ti alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler…….....9
Tablo 2.2: Titanyum alaşımlarında alaşım elementlerinin beta fazına etkisi…….….10
Tablo 3.1: Tez kapsamındaki farklı Ti alaşımlarının kimyasal bileşimi…….…20
Tablo 4.1: Sinterlenmiş Ti alaşımlarının yoğunluk değerleri……..30
Tablo 4.2: Ti alaşımlarının ultrasonik hız ve elastisite modülü değerleri……....31
Tablo 4.3: Ti alaşımlarının aşınma değerleri……...32
Tablo 4.4: Ti alaşımlarının sertlik değerleri…….33
Tablo 4.5: Ti alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerleri…….…….34
Tablo 4.6: Ti alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerleri……..…38
Tablo 5.1: Alaşım elementlerinin özelliklere etkisi……..……..…48
Tablo 5.2: Kullanılan alaşım elementlerinin VEC değerleri……..……..……..…48

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
Al	: Alüminyum
Cr	: Krom
E	: Elastisite modülü (Young modülü)
Fe	: Demir
IACS	: Uluslararası tavlanmış bakır standardı
Mo	: Molibden
Mn	: Mangan
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
V_L	: Ultrasonik boyuna hız
V_T	: Ultrasonik enine hız
VEC	: Valans elektron konsantrasyonu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ

SEDEN ŞEN EREN

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, havacılık ve otomobil uygulamaları için yenilikçi ikili ve üçlü titanyum alaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında düşük elastisite modülüne sahip beta titanyum alaşımları ve çökelme sertleşmesi ısıl işlemi yapılabilen metastabil-beta titanyum alaşımları üretilmiştir. Tez kapsamında, ikili ve üçlü titanyum alaşımları geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; ikili ve üçlü alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1200 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış (östenitleme) ve ardından su verme (hızlı soğutma) işlemi uygulanmıştır. Ardından, su verilmiş numuneler 400-520 °C arasında 1 saat süre ile yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, titanyum içerisine ilave edilen açeşitli laşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca

titanyum alaşımı ürünlerin elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Aralık 2024 , 75 sayfa.

Anahtar kelimeler: Toz metalurjisi, Titanyum, Isıl İşlem, Karakterizasyon

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

HEAT TREATMENT OF TITANIUM ALLOYS PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Seden ŞEN EREN

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 binary and triple titanium alloys for aviation and automobile applications were carried out. In this thesis, binary and triple beta titanium alloys and metastable-beta titanium alloys with low modulus of elasticity and metastable beta titanium alloys that can be precipitation hardening heat treated were produced. Binary and triple titanium alloys were produced by traditional powder metallurgy (press-sintering) method. In this thesis, alloy 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 1200 °C temperature for 1 hour. Finally, quenching (fast cooling) and aging (precipitation hardening) heat treatments were applied to the sintered titanium alloy samples. The sintered titanium alloy samples were put into solution (austenitization) for 1 hour at 900 °C temperature and then quenching was applied. Then, the quenched titanium alloy samples were aged between 400-520 °C for 1 hour. The effects of various alloying elements added to titanium on the properties of the titanium alloy were investigated The microstructure of the produced binary and triple titanium alloys was investigated using destructive (wear test,

hardness test) and non-destructive (ultrasonic testing, eddy current test) methods. Additionally, the electrochemical corrosion behaviour of the titanium alloys was investigated in NaCl solution by using open circuit potential, Tafel and electrochemical impedance spectroscopy tests.

December 2024, 75. pages.

Keywords: Powder metallurgy, Titanium, Heat treatment, Characterization

1. GİRİŞ

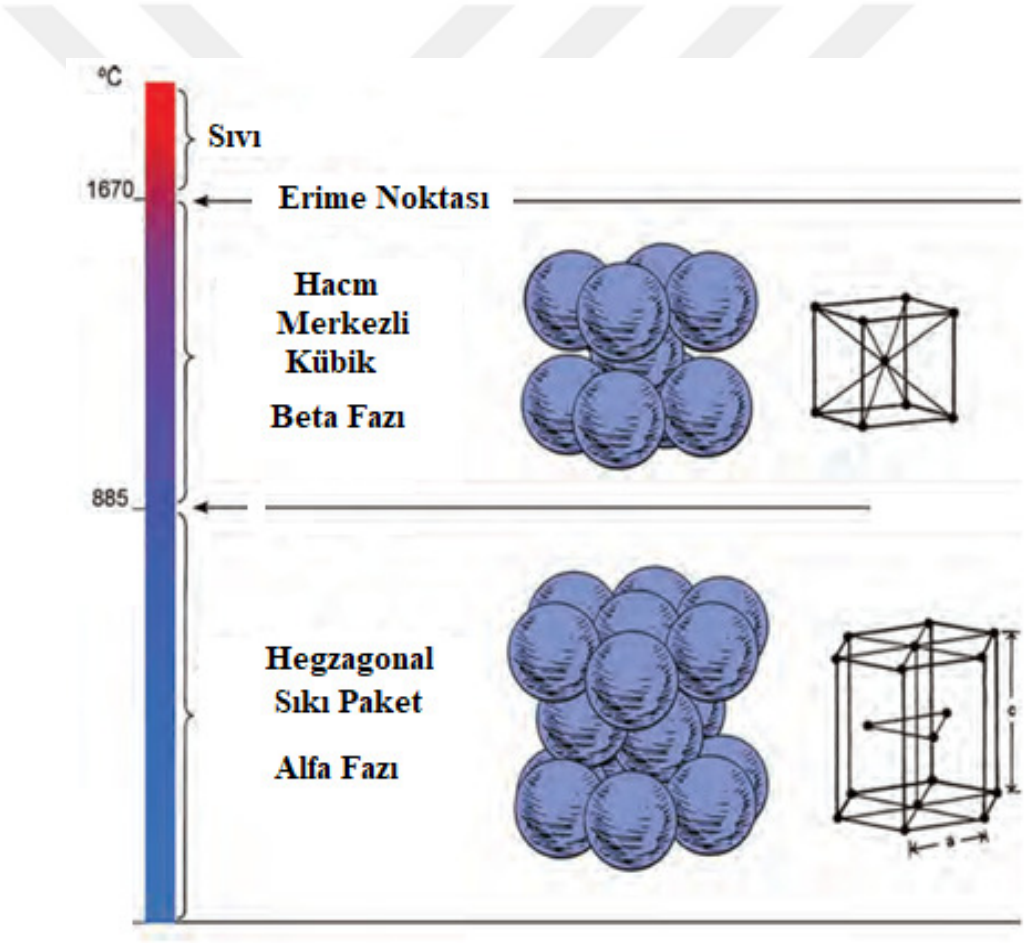
Bu tez çalışmasında, havacılık ve otomobil uygulamaları için yenilikçi ikili ve üçlü titanyum alaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında düşük elastisite modülüne sahip beta titanyum alaşımları ve çökelme sertleşmesi ısıl işlemi yapılabilen metastabil-beta titanyum alaşımları üretilmiştir. Tez kapsamında, ikili ve üçlü titanyum alaşımları geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; ikili ve üçlü alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1200 °C sıcaklıkta 1 saat sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır.

Titanyum ve titanyum alaşımları kimyasal tesisler havacılık endüstrisi ve prosesler, denizcilik, savunma sanayi, mimari gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Titanyum ve çeşitli alaşım elementleri kullanılarak döküm ile üretimi oldukça zor ve enerji sarfiyatından dolayı ekonomik değildir. Bu nedenle Ti esaslı alaşımların toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi çok daha avantajlıdır. Ayrıca toz metalurjisi-mekanik alaşımlama yöntemi ile döküm ile mümkün olmayan oranlarda alaşım elementlerinin alaşım yapısına ilave edilmesi mümkün olmaktadır. Alfa-Ti alaşımları yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Beta-Ti alaşımları yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir, ayrıca düşük elastisite modülleri nedeniyle implant uygulamalarında kullanılmaktadır. Alfa-Beta Ti alaşımları orta mukavemet ve orta sıcaklık şartlarında kullanılmaktadır. Yarı-kararlı-beta Ti alaşımları oda sıcaklığı uygulamalarında avantajlıdır aynı zamanda mukavemet, tokluk, süneklik gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Beta-Ti alaşımlarına göre düşük oranda beta kararlaştırıcı element içerdiklerinden çok daha ekonomiktirler [1-13].

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

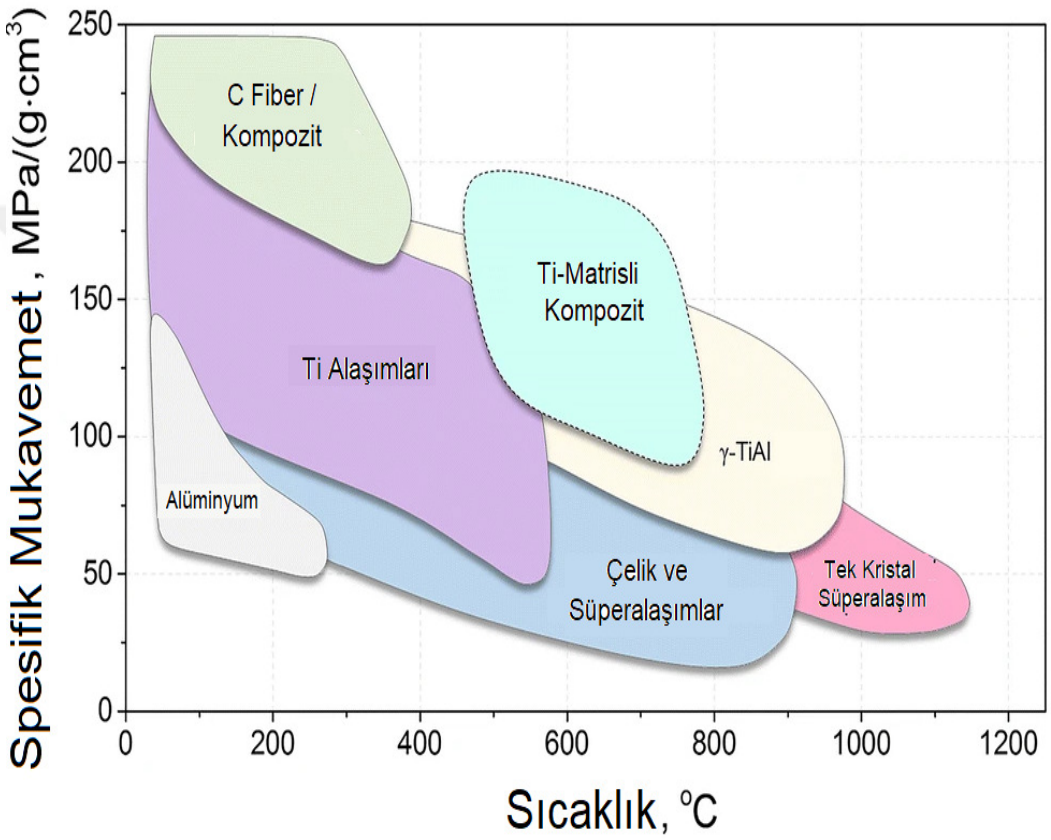
2.1 TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Aşağıdaki şekilde titanyum metalinin temel allotropik özellikleri görülmektedir. Görüldüğü gibi, titanyum 885 °C sıcaklıkta hegzagonal sıkı paket (alfa veya α) kafes yapıdan hacim merkezli kübik (beta veya β) kafes yapıya dönüşüm göstermektedir. Ayrıca, aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi, titanyum 1670 °C sıcaklıkta erimekte olup nispeten yüksek bir erime sıcaklığına sahiptir [1-13].



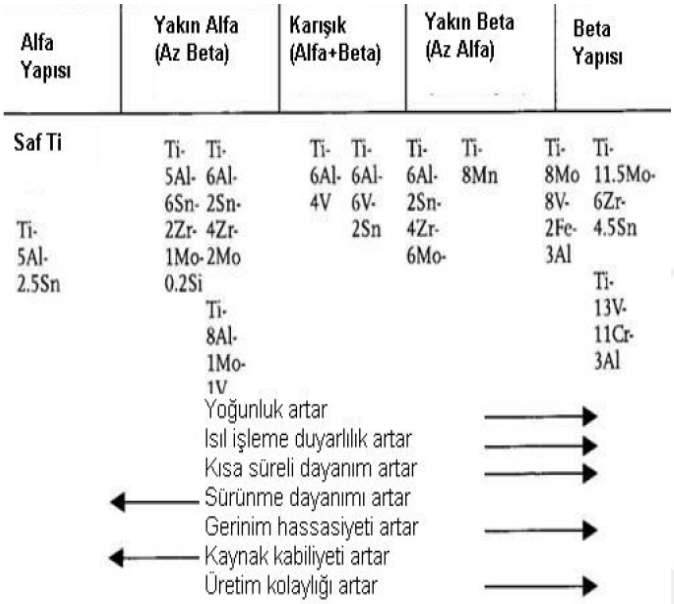
Şekil 2.1: Titanyumun allotropik özellikleri [10]

Aşağıdaki şekilde titanyum ve diğer mühendilik malzemelerinin spesifik mukavemet ve sıcaklık dayanımı bakımından genel karşılaştırılması görülmektedir. Genel olarak titanyum alaşımlarının sıcaklık dayanımı alüminyum alaşımlarından üstün olup çelik ve süperalaşımlardan düşüktür. Diğer yandan titanyum alaşımlarının spesifik mukavemeti alüminyum alaşımlarından, çeliklerden ve süperalaşımlardan üstün olup karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerden düşüktür [1].



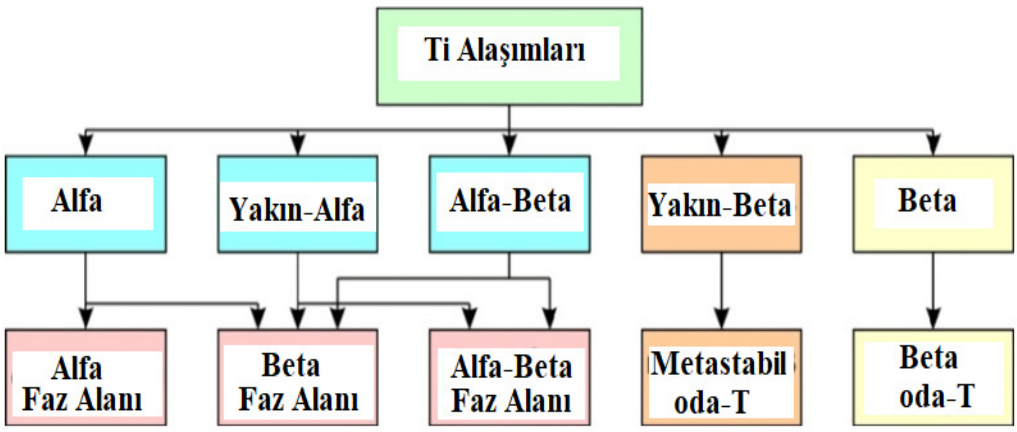
Şekil 2.2: Titanyumun mühendislik malzemeleri ile karşılaştırılması [1]

Titanyum alaşımları mikroyapılarına göre alfa (α-Ti), yakın alfa, yakın beta, alfa-beta (β-α-Ti) ve beta (β-Ti) olarak sınıflandırılmaktadır. Aşağıdaki şekilde alfa (α-Ti), yakın alfa, yakın beta, alfa-beta (β-α-Ti) ve beta (β-Ti) faz yapılarının titanyum alaşımlarının temel özellikleri (yoğunluk, sürünme direnci, kaynak kabiliyeti vb) üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak görülmektedir [1-13].



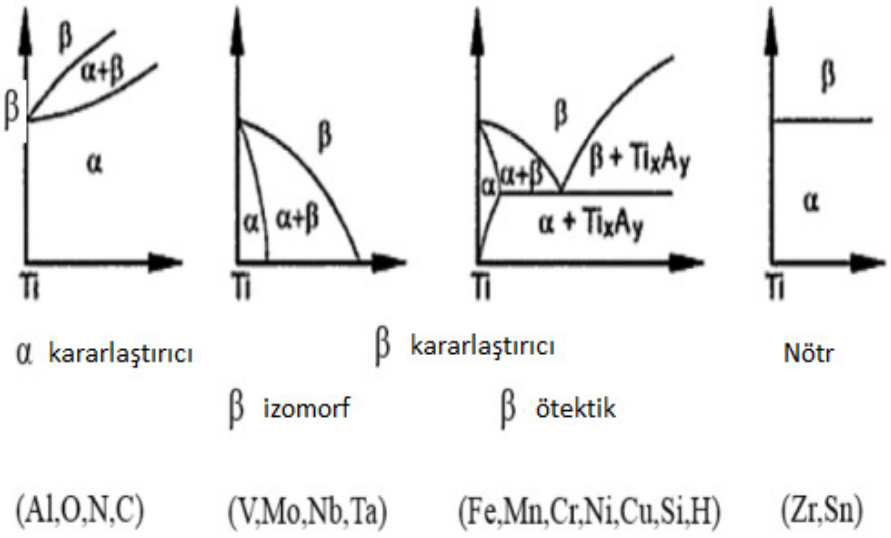
Şekil 2.3: Faz yapısının titanyumun özellikleri üzerindeki etkisi [2]

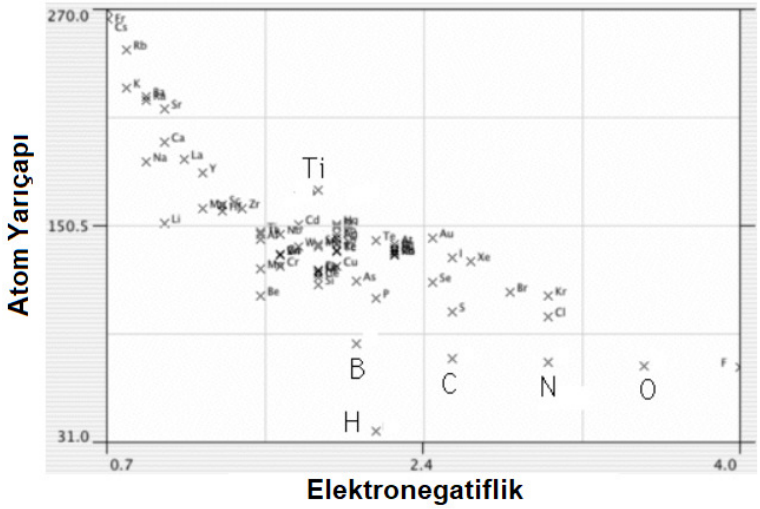
Aşağıdaki şekilde titanyum alaşımlarının faz türlerine göre genel sınıflandırılması görülmektedir. Faz yapısı titanyumun özelliklerini ve buna bağlı olarak kullanım alanını büyük ölçüde belirlemektedir [3].



Şekil 2.4: Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması [3]

Aşağıdaki şekilde a) titanyum içerisine ilave edilen metalik alaşım elementlerinin şematik ikili faz (Ti-X) diyagramlarına etkileri (solidus ve likidus eğrilerine etkileri) ve b) alaşım elementlerinin çapları-Pauli elektronegatiflikleri gösterilmektedir. Titanyuma ilave edilen alaşım elementlerinin alfa kararlaştırıcı, beta kararlaştırıcı ve etkisiz olmak üzere üç temel etkisi bulunmaktadır. Ayrıca, beta kararlaştırıcı elementler izomorf ve ötektik yapıcılar olarak iki alt dala ayrılmaktadır. Al, O, C ve N elementleri alfa-Ti kararlaştırıcıdır. V, Mo, Ta, Nb elementleri izomorf beta-Ti yapıcı, Fe, Cr, Mn, Ni, Cu elementleri ile ötektik beta-Ti yapıcıdır. Zirkonyum ve kalay elementleri etkisizdir [12].





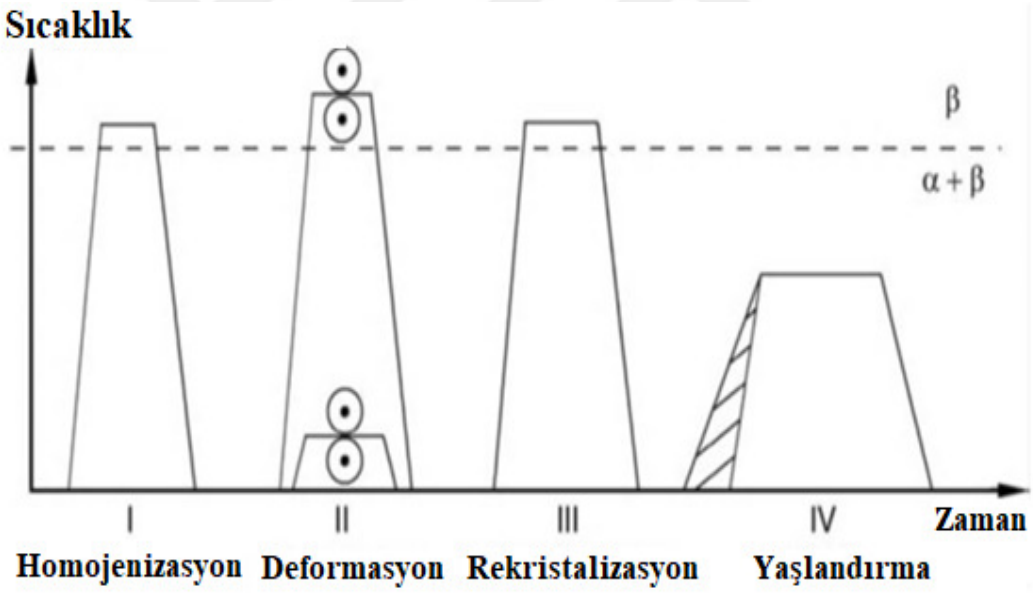
Şekil 2.5: a) Alaşım elementlerinin etkileri [12] ve b) çap-elektronegatiflikleri [4]

2.2 TİTANYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

Titanyum ve titanyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler, amaçlanan özellikler dikkate alındığında aşağıdaki gibidir:

- Gerilim giderme ısıl işlemi. Amaç üretim sırasında titanyum alaşımında meydana gelen artık iç gerilmelerin engellenmesidir.
- Tavlama ısıl işlemi. Amaç sertlik, süneklik gibi önemli özelliklerin geliştirilmesidir.
- Çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemi, Amaç mekanik özelliklerin geliştirilmesidir.

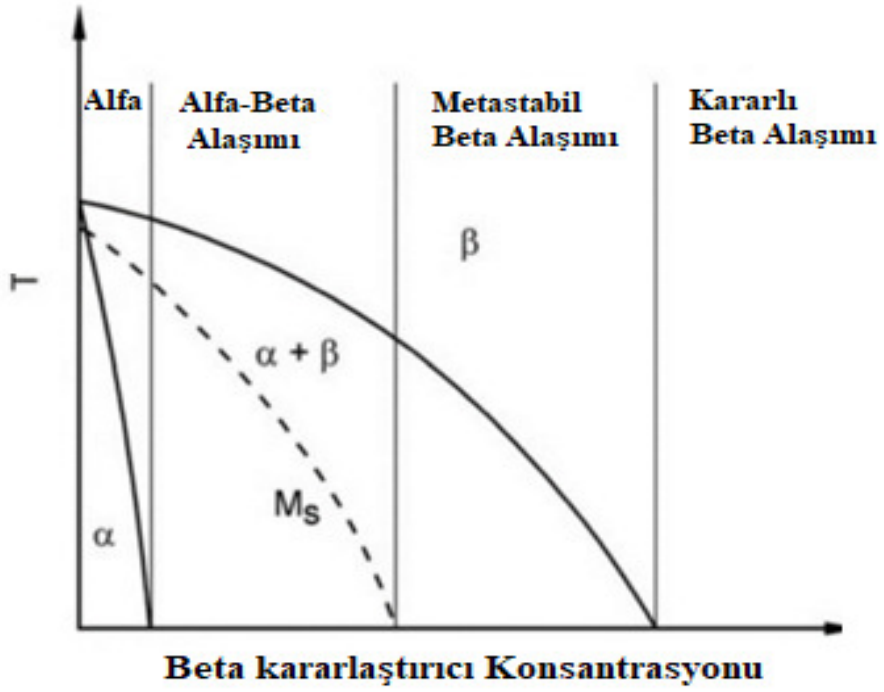
Aşağıdaki şekilde β-Ti alaşımlarının ısıl işlem çevrimi sıcaklığa ve zamana bağlı olarak verilmektedir. Şekilde, homojenizasyon, deformasyon, rekristalizasyon (yeniden kristalleşme), yaşlandırma işlemleri sıcaklığa (alfa ve alfa-beta sıcaklıklarına bağlı olarak) ve zamana bağlı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Beta titanyum alaşımlarının şematik ısıl işlem diyagramı [12]

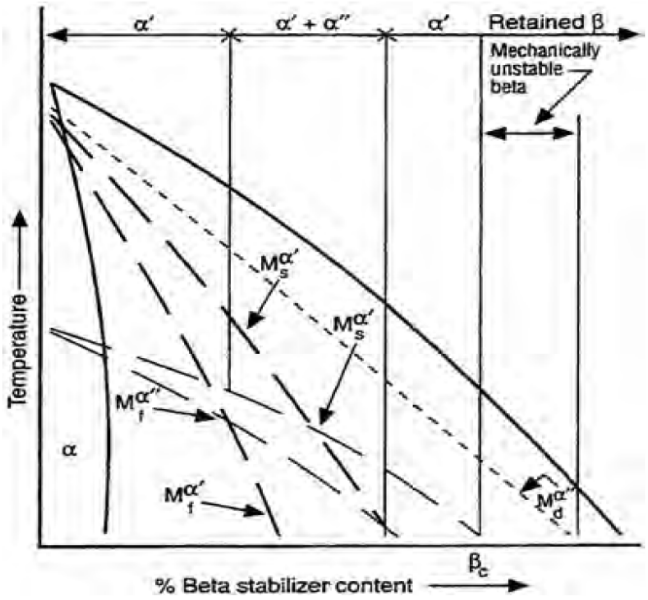
Aşağıdaki şekilde, titanyum alaşımlarında alaşım elementi miktarı (beta kararlaştırıcı element miktarı) ve sıcaklık arasındaki ilişki sonucu faz yapıları (alfa, alfa-beta, kararlı beta, metastabil-beta fazları) görülmektedir. Ayrıca grafiğe bakıldığında martenzit başlangıç eğrisi görülmektedir [12].

- Alfa titanyum alaşımları ve kararlı beta titanyum alaşımları tek fazlı olduklarından dolayı ısıl işlem ile sertleştirilememektedir.
- Alfa-beta titanyum alaşımları su verme işlemi sonucu martenzite dönüşerek sertleştirilebilmektedir.
- Metastabil-beta titanyum alaşımlarının çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma ısıl işlemi ile mukavemetleri geliştirilebilmektedir.



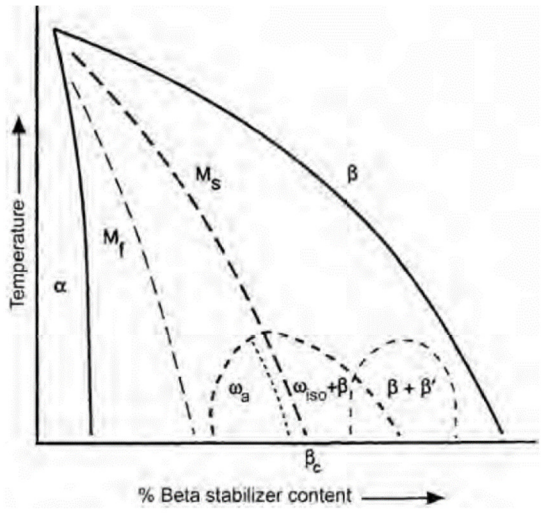
Şekil 2.7: Titanyum için beta kararlaştıcı element-sıcaklık diyagramı [12]

Aşağıdaki şekilde, titanyum alaşımlarında alaşım elementi miktarı (beta kararlaştırıcı element miktarı) ve sıcaklık arasındaki ilişki sonucu martenzit oluşumu görülmektedir [12].



Şekil 2.8: Titanyum mikroyapısında martenzit oluşumu [12]

Titanyum alaşımlarında görülen ve önemli etkilere sahip bir diğer metasatbil faz ise omega (ω) fazıdır. Omega (ω) fazı oldukça ince bir yapıda olup optik mikroskop ile incelenebilmektedir. Genel olarak izotermal veya atermal olarak meydana getirilebilmekte olup, atermal ω fazı yaşlandırma ısıl işlemi ile oluşturulmaktadır. Titanyum alaşımlarında görülen bir diğer metastabil faz ise beta-üssü fazıdır (β^l).



Şekil 2.9: Titanyum alaşımlarında omega ve beta-üssü fazlarının oluşumu [12]

Aşağıdaki tabloda titanyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlem türleri, ısıl işlem şartları ve ısıl işlemler sonucu oluşan mikroyapılar özet olarak görülmektedir. Çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işleminde, genel olarak beta dönüşüm sıcaklığının 40 °C altında çözeltiye alma işlemi, su verme işlemi ve 535-675 °C sıcaklıkta 2-8 saat yaşlandırma işlemi uygulanmaktadır. Beta fazı tavlaması ısıl işleminde, beta dönüşüm sıcaklığının 15 °C üstünde çözeltiye alma, havada soğutma ve 650-760 °C sıcaklıkta 2 saat bekletme uygulanmaktadır [7].

Tablo 2.1: Ti alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler [7]

ISIL İŞLEM TÜRÜ	ISIL İŞLEM ŞARTLARI	OLUŞAN İÇYAPI
Dubleks Tavlama	β dönüşüm sıcaklığının 50-75 °C altında çözeltiye alma, havada soğutma ve 540-675 °C sıcaklığında 2-8 saat yaşlandırma	Birincil α ve Widmanstatten tipi α+β bölgeleri
Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma	β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 40 °C altında çözeltiye alma, su verme ve 535-675 °C sıcaklıkta 2-8 saat yaşlandırma	Birincil α ve temperlenmiş α martenziti veya α+β karışımı içyapı
β Fazı Tavlaması	β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 15 °C üstünde çözeltiye alma, havada soğutma ve 650-760 °C 'de 2 saat kararlaştırma	Widmanstatten tipi α+β bölgeleri
β Fazında Su Verme	β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 15 °C üstünde çözeltiye alma, su verme ve 650-760 °C 'de 2 saat temperleme	Temperlenmiş α martenziti
Normalizasyon Tavlaması	925 °C 'de 4 saat ısıtmanın ardından 760 °C 'ye kadar 50 °C/saat hızla soğutma ve daha sonra havada soğutma	Eşeksenli α taneleri sınırlarında noktasal β fazları
Yeniden Kristalleştirme Tavlaması	α+β fazında yapılan sıcak işlem sonrası 705 °C de en az 30 dakika tavlama ve havada soğutma	Kısmi kristalleşmiş α taneleri içinde hacimce küçük β partikülleri.

Aşağıdaki tabloda titanyum alaşımlarında titanyuma ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin valens elektron sayıları, su verme sonucu %100 beta fazı elde edilmesi için ilave edilmesi gereken miktarları (β_C) ve son olarak (β_C) değerinde atom başına ortalama valens elektron sayıları gibi beta fazına etkileri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Görüldüğü gibi en yüksek valens elektron sayısı nikel atomunda ve hemen ardından kobalt atomunda bulunmaktadır. En düşük valens elektron sayısı V ve Ta atomlarında bulunmaktadır.

Su verme sonucu %100 beta fazı elde edilmesi için ilave edilmesi gereken alaşım elementi miktarları (β_C) değerlerine bakıldığında en düşük değer Fe atomunda (en güçlü beta fazı oluşturucu) hemen ardından Cr ve Mn atomlarındadır. Ta elementi en düşük etkiye sahip olup, ardından W ve hemen ardından Mo gelmektedir.

Tablo 2.2: Titanyum alaşımlarında alaşım elementlerinin beta fazına etkisi [12]

Alaşım Elementi	Valens Elektronları	%100 beta fazı elde edilmesi için ilave edilmesi gereken miktarları (β_C)	(β_C) değerinde atom başına ortalama valens elektron sayıları
Mn	7	6.5	4.17
Fe	8	3.5	4.12
Cr	6	6.3	4.12
Co	9	7.0	4.29
W	6	22.5	4.13
Ni	10	9	4.45
Mo	6	10.0	4.11
V	5	15.0	4.14
Ta	5	45.0	4.18

Molibden Eşdeğeri Parametresi

Titanyum alaşımlarında mikroyapıda bulunan beta-Ti fazının kararlılığını belirlemede kullanılan yöntemlerden biri literatürde bilinen molibden eşdeğeri (MoE) parametresinin kullanılmasıdır. Genel olarak MoE parametresi için titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranlarını içeren aşağıdaki eşitlik (1) kullanılmaktadır. En ciddi etkiyi Fe, Cr, Co, Mo ve Mn elementleri göstermekte ve molibden eşdeğerini büyük miktarda arttırmaktadırlar (beta-Ti fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar). V, Nb, W, Ta, Ni, Nb elementleri de molibden eşdeğerini arttırmaktadırlar ve beta-Ti fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar. Al ilavesi molibden eşdeğerini azaltıp beta-Ti fazı oluşumunu zorlaştırmaktadır [14].

$$MoE=1.0Mo+0.6V+0.4W+0.2Nb+0.2Ta+2.9Fe+1.6Cr+1.2Ni+1.7Mn+1.7\ o-1.0Al \quad (1)$$

Ayrıca, beta-titanyum fazını kararlı hale getiren metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranları ile su verme neticesinde mikroyapıda meydana gelen martenzit fazı başlangıç sıcaklığı (Ms) arasında aşağıda görülen titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranlarını içeren eşitlik (2) bulunmaktadır. En ciddi etkiyi Fe ve Mn elementleri göstermekte ve martenzit başlangıç sıcaklığını büyük miktarda düşürmektedirler (martenzit oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar). Cr, Ni, Mo, Cu, V, Nb elementleri de martenzit başlangıç sıcaklığını miktarda düşürmekte ve martenzit fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Al ilavesi martenzit başlangıç sıcaklığını miktarda artırıp martenzit fazı oluşumunu zorlaştırmaktadır [15].

$$M_S = 1156-150Fe-107Mn–96Cr-67\ Ni-49Mo-41Cu-37V-17Nb\ -7Z+15Al \quad (2)$$

Genellikle su verme (hızlı soğutma) ısıl işlemi esnasında mikroyapı içerisinde beta-Ti fazını kararlı hale getirmek ve miktarını artırmak için için MoE değeri 10 veya 10'dan büyük olmalıdır. Aşağıda molibden eşdeğerine göre mikroyapıda oluşması beklenen fazlar özet olarak görülmektedir [15].

- Alfa-Ti alaşımları: MoE değeri < 5
- Yakın-beta alaşımları: 5< MoE değeri <10
- Metastabil beta alaşımları: 10 < MoE değeri < 30
- Kararlı beta alaşımları: 30 < MoE değeri

2.3 TOZ METALURJİSİ

Genel olarak 1 mm den daha düşük boyuta sahip katı parçacıkların (partikül) meydana getirdiği yığına toz denilmektedir. Tozların bir kalıp içerisinde basınç uygulayarak şekil verilmesi, ardından erime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta uygun bir süre bekletilmesi, parçacıkların birbirlerine temas ettiği noktalarda boyun oluşturup, yapıda bulunan gözeneklerin azalması ile parça üretilmesine toz metalurjisi denir.

Geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi üç temel adımdan oluşmakta olup adımlar aşağıdaki gibidir [5-15].

- Toz hazırlama
- Sıkıştırma
- Sinterleme

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

- Karıştırma
- Harmanlama
- Mekanik alaşımlama

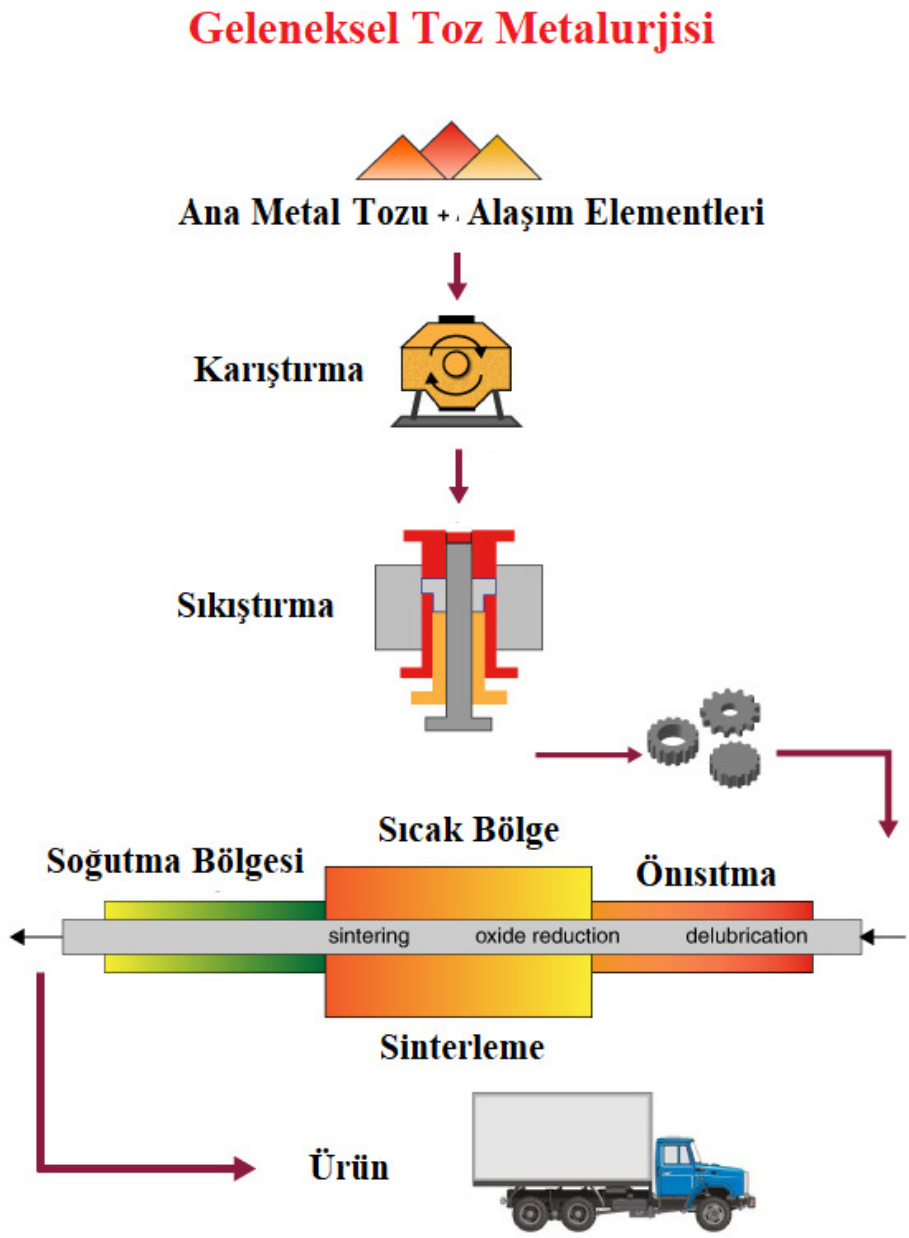
Toz metalurji yönteminde sıkıştırma çeşitleri genel olarak aşağıdaki gibidir.

- Tek eksenli presleme
- Çok eksenli presleme

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

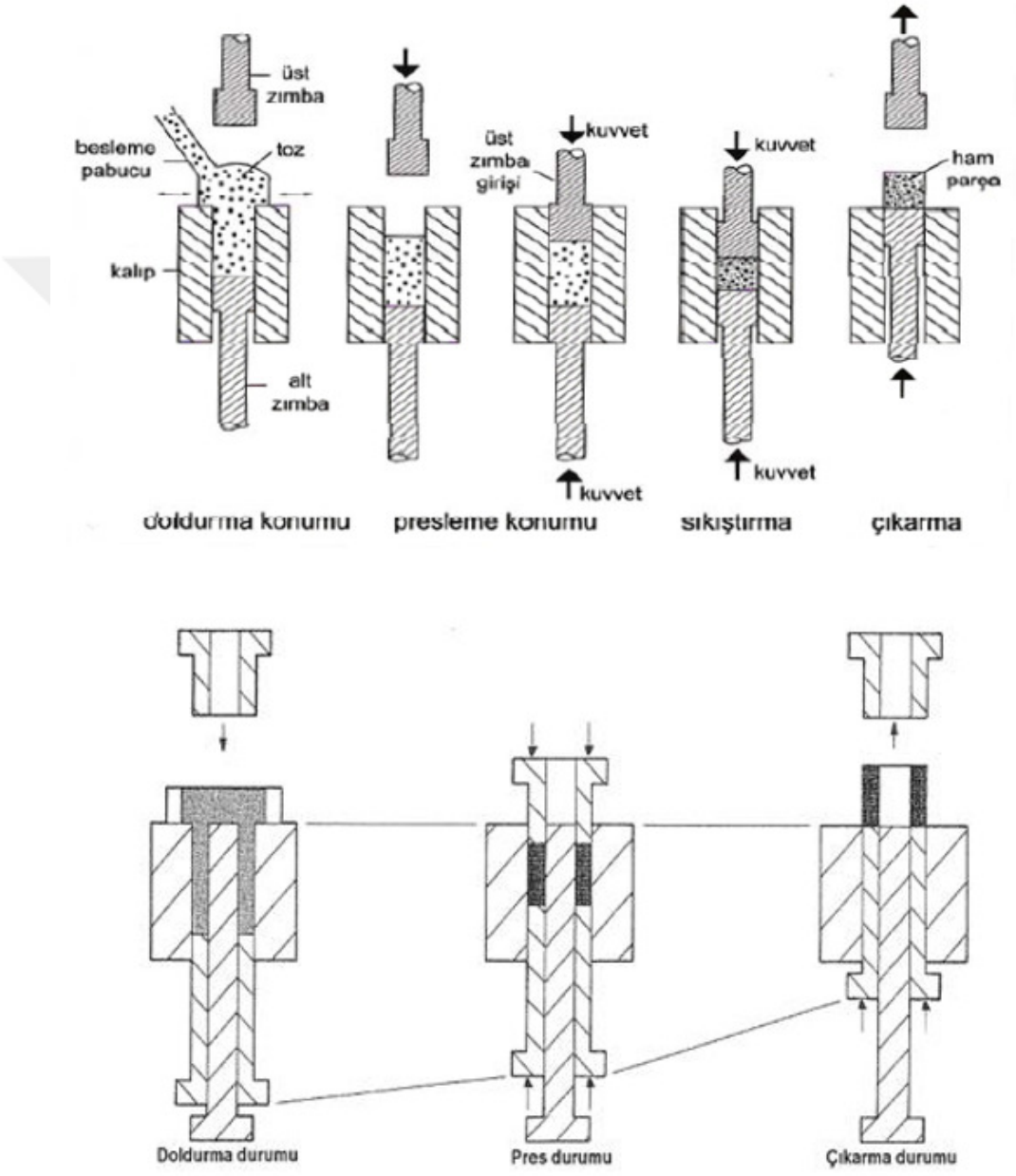
- Basınçlı sinterleme
- Basınçsız sinterleme
  - ❖ Sıvı faz sinterlemesi
    - Geçici sıvı faz sinterlemesi
    - Kalıcı sıvı faz sinterlemesi
  - ❖ Katı faz sinterlemesi

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 [5].



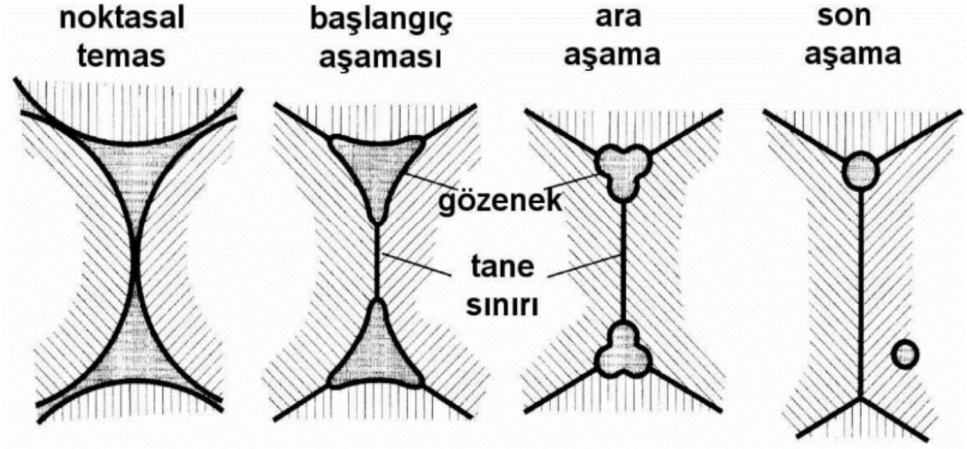
Şekil 2.10: Geleneksel toz metalürjisi prosesi [5]

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 [8].



Şekil 2.11: Tek eksenli ve çift eksenli presleme [8]

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 [8].



Şekil 2.12: Sinterleme prosesinde gözenek yapısının değişimi [8]

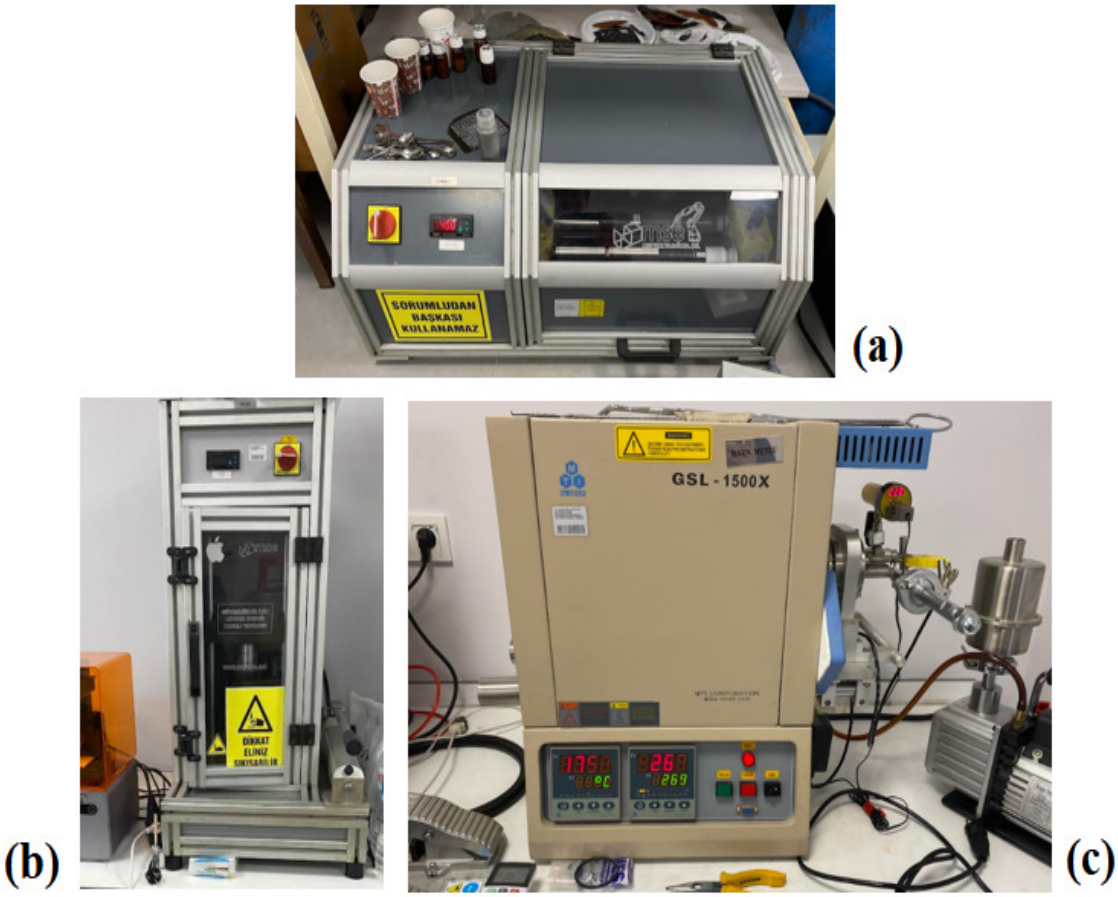
Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama, toz parçacıklarının kırılma, kaynaklanma ve yeniden tekrarlı olarak kırılma- kaynaklanma sürecini içeren yüksek enerjili bilyalı öğütme işlemidir. Mekanik alaşımlama tozların belirli oranlarda karıştırarak öğütücü malzemeyle birlikte öğütme ortamına konulması ile başlar. Karışım kararlı hale gelinceye kadar işleme devam edilir.

3. YÖNTEM

3.1. NUMUNE ÜRETİMİ

Bu tez çalışması kapsamında, titanyum alaşımları yaklaşık 30-40 µm boyutunda ve en az % 99.8 saflıkta metal tozları kullanılarak geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemiyle üretilmiştir. Numune üretiminde kullanılan cihazlar (bilyeli değirmen, tek eksenli hidrolik pres ve yatay boru tipi sinterleme fırını) aşağıda görülmektedir.

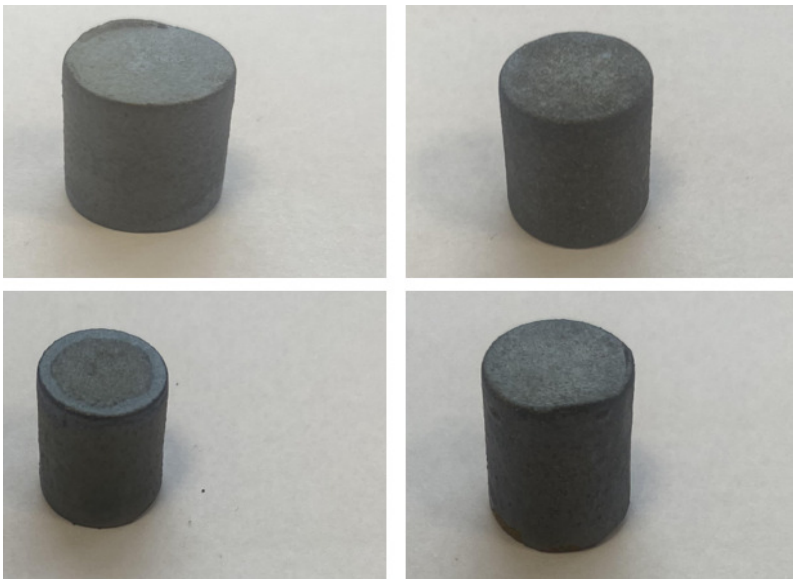


Şekil 3.1: a) Bilyeli değirmen, b) hidrolik pres, c) boru tipi sinterleme fırını

Geleneksel toz metalurjisi tekniği (presleme-sinterleme) ile numune üretim temel 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 6 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, titanyum alaşımı 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, 250 MPa basınç altında preslenip ham numuneler elde edilmiştir.
- Sinterleme: Presleme işleminden sonra elde edilen silindirik ham numuneler 1200 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi boru tipi yatay fırında (MTI, GLS-1500X, USA) vakum ortamında gerçekleştirilmiştir.

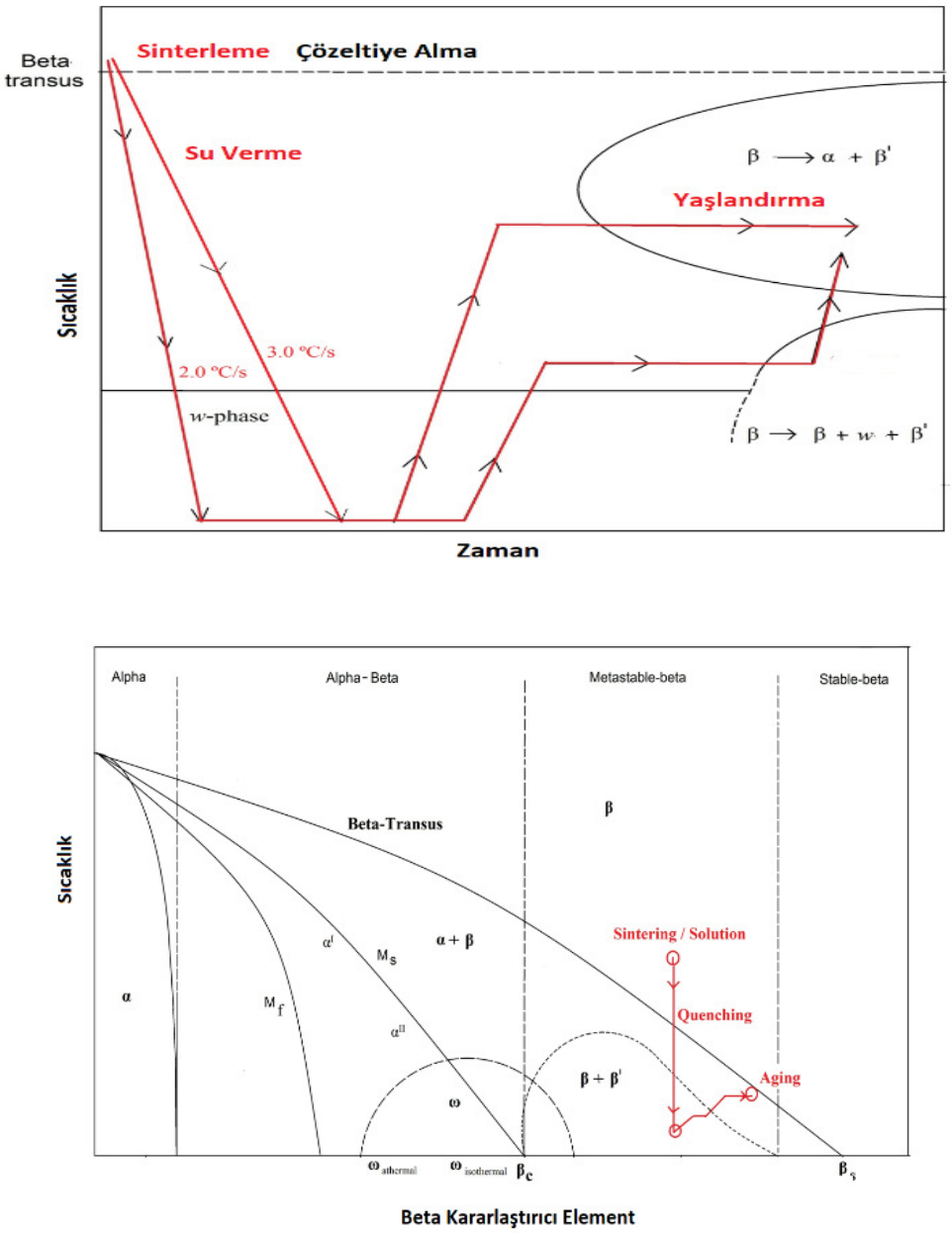
Şekil 3.2'de sinterlenmiş (a) Ti-Co, (b) Ti-Cr, (c) Ti-Fe, (d) Ti-Fe-Cr numunelerin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.2: Sinterlenmiş numunelerin fotoğrafları

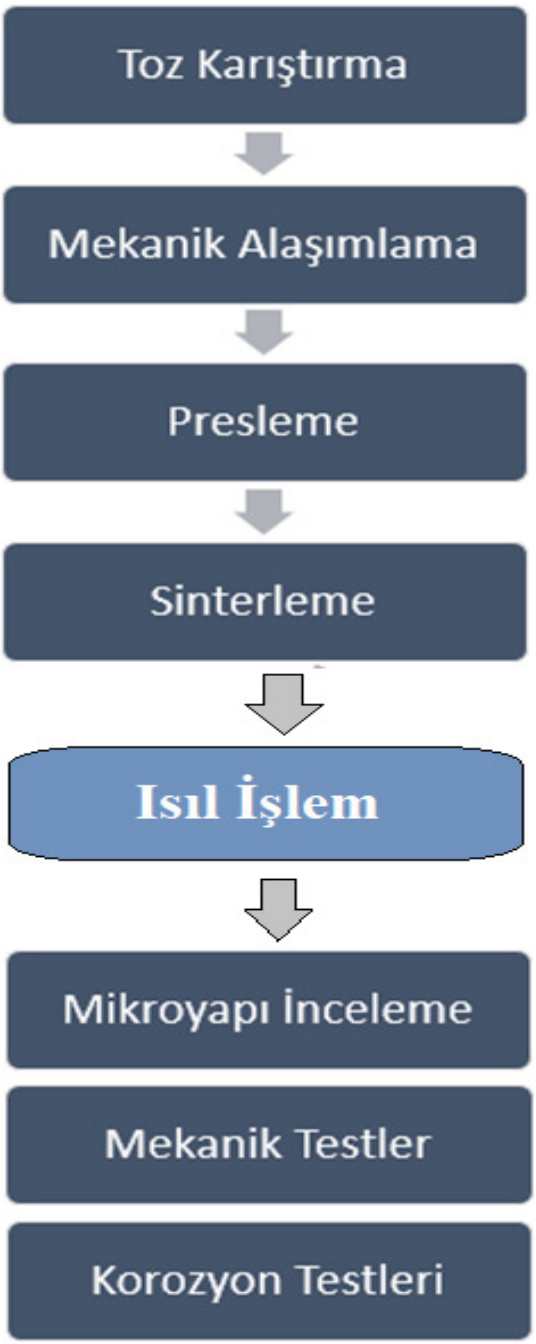
Isıl İşlem Çevrimi

Sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır. Öncelikle sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış (östenitleme) ve ardından su verme işlemi uygulanmıştır. Ardından, su verilmiş numuneler 400-520 °C arasında 1 saat süre ile kamara tipi fırın içerisinde yaşlandırılmıştır.



Şekil 3.3: Isıl işlem çevrim parametrelerinin etkileri

Şekil 3.2'de 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 3.4: Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların akış şeması

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen titanyum alaşımlarının kimyasal bileşimi görülmektedir. Titanyum içerisine belirlenen oranlarda çeşitli metalik elementler ilave edilerek ikili ve üçlü titanyum alaşımları üretilmiştir.

Tablo 3.1: Tez kapsamındaki farklı Ti alaşımlarının kimyasal bileşimi

Alaşım	Kimyasal Bileşim (ağ.%)								
	Ti	**Ni**	**Mn**	**Co**	**Mo**	**V**	**Sn**	**Fe**	**Cr**
Ti-10Ni	90	10							
Ti-10Mn	90		10						
Ti-10Co	90			10					
Ti-10Mo	90				10				
Ti-10V	90					10			
Ti-10Sn	90						10		
Ti-8Fe	92							8	
Ti-20Fe	80							20	
Ti-35Fe	65							35	
Ti-40Fe	60							40	
Ti-3.0Cr	97								3.0
Ti-4.5Cr	95.5								4.5
Ti-5.0Cr	95								5.0
Ti-5.5Cr	94.5								5.5
Ti-6.0Cr	94								6.0
Ti-7.0Cr	93								7.0
Ti -6Ni -6Co	88	6		6					
Ti -6Fe -6Cr	88							6	6
Ti-6Mo-6Fe	88				6			6	

Molibden Eşdeğeri Parametresi

Titanyum alaşımlarında mikroyapıda bulunan beta-Ti fazının kararlılığını belirlemede kullanılan yöntemlerden biri literatürde bilinen molibden eşdeğeri (MoE) parametresinin kullanılmasıdır. Genel olarak MoE parametresi için titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranlarını içeren aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır. En ciddi etkiyi Fe, Cr, Co, Mo ve Mn elementleri göstermekte ve molibden eşdeğerini büyük miktarda arttırmaktadırlar (beta-Ti fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar). V, Nb, W, Ta, Ni, Nb elementleri de molibden eşdeğerini arttırmaktadırlar ve beta-Ti fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar. Al ilavesi molibden eşdeğerini azaltıp beta-Ti fazı oluşumunu zorlaştırmaktadır [14].

MoE=1.0 Mo+0.6 V+0.4 W+0.2 Nb+0.2 Ta+2.9 Fe+1.6 Cr+1.2 Ni+1.7 Mn+1.7 Co-1.0 Al

Ayrıca, beta-titanyum fazını kararlı hale getiren metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranları ile su verme neticesinde mikroyapıda meydana gelen martenzit fazı başlangıç sıcaklığı (Ms) arasında aşağıda görülen titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranlarını içeren bağıntı bulunmaktadır. En ciddi etkiyi Fe ve Mn elementleri göstermekte ve martenzit başlangıç sıcaklığını büyük miktarda düşürmektedirler (martenzit oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar). Cr, Ni, Mo, Cu, V, Nb elementleri de martenzit başlangıç sıcaklığını miktarda düşürmekte ve martenzit fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Al ilavesi martenzit başlangıç sıcaklığını miktarda artırıp martenzit fazı oluşumunu zorlaştırmaktadır [15].

M_S = 1156 - 150Fe - 107Mn – 96Cr - 67 Ni - 49Mo - 41Cu - 37V - 17Nb - 7Zr + 15Al

Genellikle su verme (hızlı soğutma) ısıl işlemi esnasında mikroyapı içerisinde beta-Ti fazını kararlı hale getirmek ve miktarını artırmak için için MoE değeri 10 veya 10'dan büyük olmalıdır. Aşağıda molibden eşdeğerine göre mikroyapıda oluşması beklenen fazlar özet olarak görülmektedir [15].

- Alfa-Ti alaşımları: MoE değeri < 5
- Yakın-beta alaşımları: 5< MoE değeri <10
- Metastabil beta alaşımları: 10 < MoE değeri < 30
- Kararlı beta alaşımları: 30 < MoE değeri

3.2. KARAKTERİZASYON

Mikroyapı İncelemesi ve Mekanik Testler

Tez kapsamında üretilen titanium alaşımlarının 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 metre aşınma uzunluğu kullanılarak aşınma cihazında belirlenmiştir (Devotrans, Türkiye).



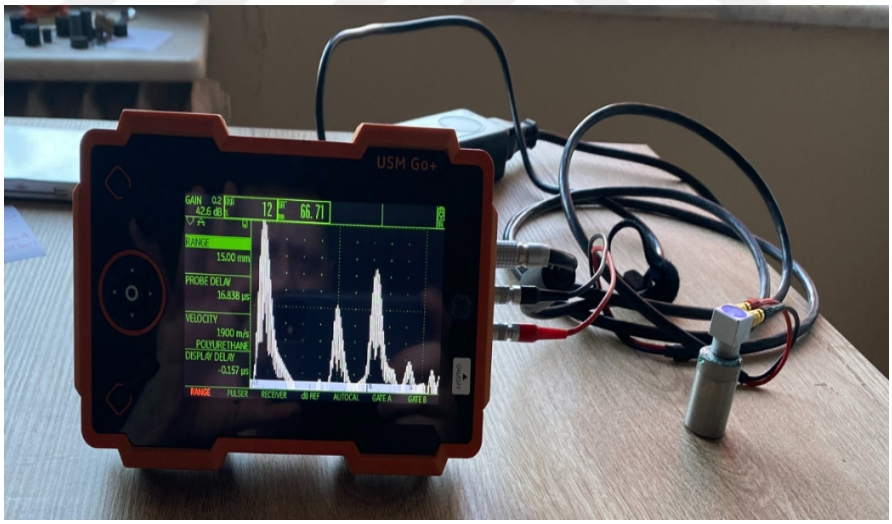
Şekil 3.5: a) Sertlik cihazı, b) basma cihazı, c) aşınma cihazı

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 eşitlik (3) yardımı ile hesaplanmıştır. Bu bağıntıda V_T ve V_L enine ve boyuna dalga ultrasonik hızı, (ρ) ise yoğunluğu ifade etmektedir [16, 17].

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

Ultrasonik test, malzemenin dış yüzeyinden görülmeyen iç ve yüzey kusurlarını tespit etmek için kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntem, yüksek frekansta ses dalgalarının malzemenin içine gönderilmesi prensibine dayanır. Ses dalgaları, malzeme içindeki yüzeylerden ve iç kusurlardan yansır veya sızar.



Şekil 3.6: Tahribatsız ultrasonik muayene cihazı

Girdap Akımları (Eddy Current) İletkenlik Testi

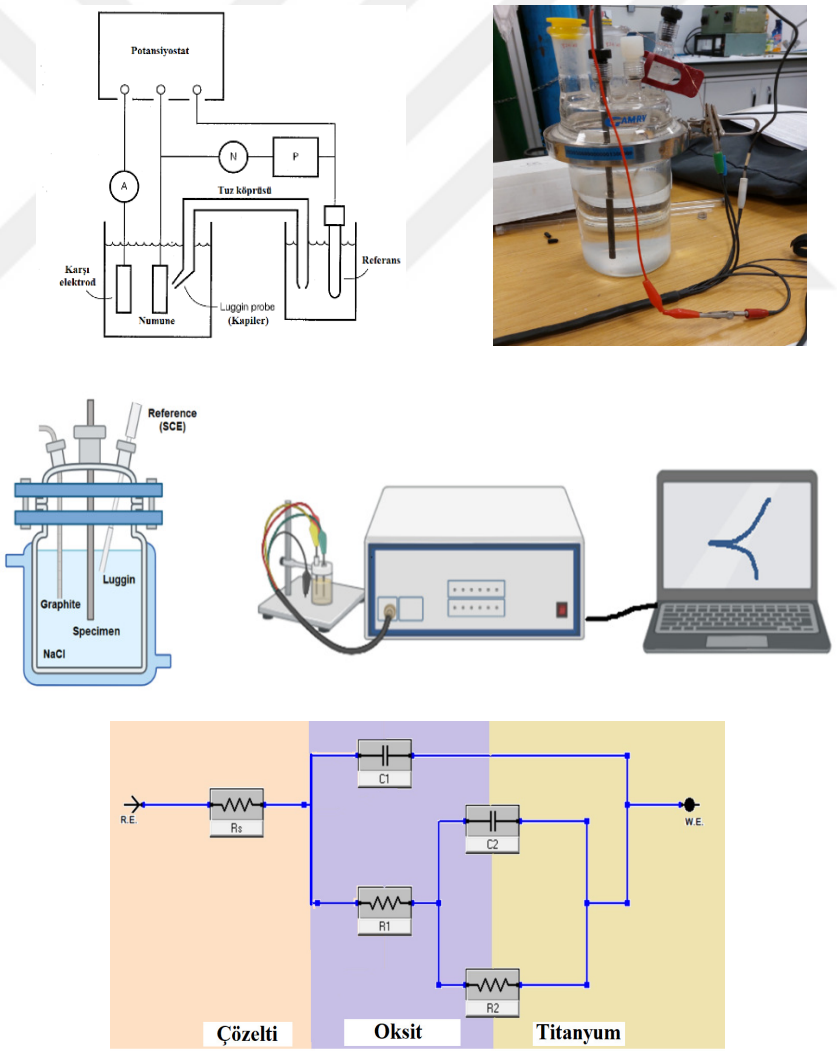
Üretilen alaşımların elektirksel iletkenlikleri % IACS (uluslararası tavlanmış bakır standardı) biriminden girdap akımları cihazı (EtherCheck, Ether NDE) kullanarak belirlenmiştir. Aşağıdaki şekilde girdap akımları (eddy current) cihazı görülmektedir. Numunenin yüzey ve yüzeye yakın hatalarının belirlenebilmesi için uygun bir yöntemdir. Numune, elektrik iletkenliğine sahip olan bütün metal ve alaşımları olabilir. Bu yöntem ile korozyon, çatlak, boya ve kaplama kalınlığı ölçülebilir. Bu metot iletken olmayan malzemelere uygulanamaz, ayrıca ferromanyetik malzemelerin muayenesi için özel prosedürler gerekir. Nüfuz etme derinliği sınırlıdır. Muayene sonucu tarama yönüne bağlı olduğundan uygun olmayan yönlerde tarama sonunda bazı hatalar gözlenemeyebilir. Yüzey şartları muayene sonucunu çok etkiler. Girdap akımları yönteminde, alternatif akım prob içindeki bobin'den geçirilir. Bobinde değişen akım malzemede alternatif bir manyetik alan oluşturur. Numunedeki değişen manyetik alan malzemedegirdap akımları oluşturur. Numunedeki süreksizlikler girdap akımlarının manyetik alanını ve yönünü değiştirmekte olup test sinyali ile süreksizliğin tespiti mümkün olmaktadır.



Şekil 3.7: Tahribatsız girdap akımları test cihazı

Elektrokimyasal Korozyon Özellikler

Tez kapsamında üretilen alaşımlarını elektrokimyasal korozyon testleri % 5 NaCl çözeltisi ortamında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan NaCl çözeltisinin 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 3.8: Elektrokimyasal korozyon testi prensibi, hücre, eşdeğer elektrik devresi

İlk Prensipler Temelli Hesaplamalı Malzeme Bilimi ile Alaşım Geliştirme

Alaşım geliştirme kademesinde "*CASTEP*" (Cambridge sıralı toplam enerji paketi) hesaplamalı malzeme bilimi yazılımı, "*Materials Studio*" yazılımı ve *Python* kullanılmıştır.

Ti esaslı 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 kullanılacaktır. Geometrik ve mekanik özellikler için optimize k noktaları ve kesilim kinetik enerjisi kullanılmıştır.

Görsel model oluşturma kademesinde Materials Studio, Materials Project ve VESTA yazılımları kullanılmıştır. VESTA, krsital ve elektronik yapılarının 3-boyutlu görsellerinin elde edilmesinde kullanılan VICS (Visualization of Crystal Structures) ve VEND (Visualization of Electron/Nuclear Densities) C dilinde yazılmış görselleştirme programlarının VENUS platformunda birleştirilmesi ile geliştirilmiş bir yazılımdır.

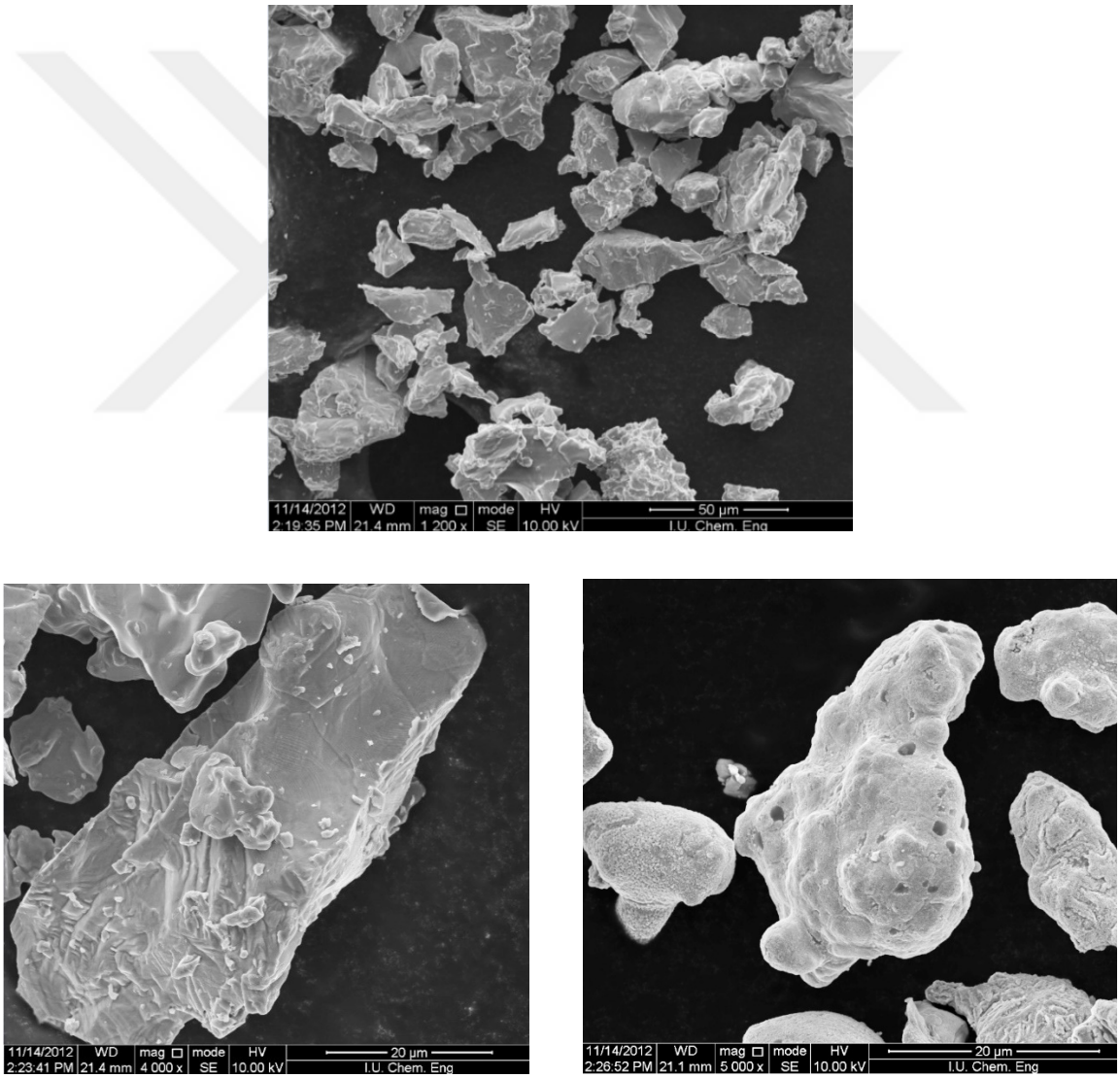
Hesaplamalı Faz Diyagramları (CALPHAD) Yöntemi

CALPHAD (Calculated Phase Diagrams) yöntemi ile inceleme kapsamında Thermo-Calc yazılımı kullanılarak faz diyagramları ve termodinamik parametreler hesaplanmıştır.

4. BULGULAR

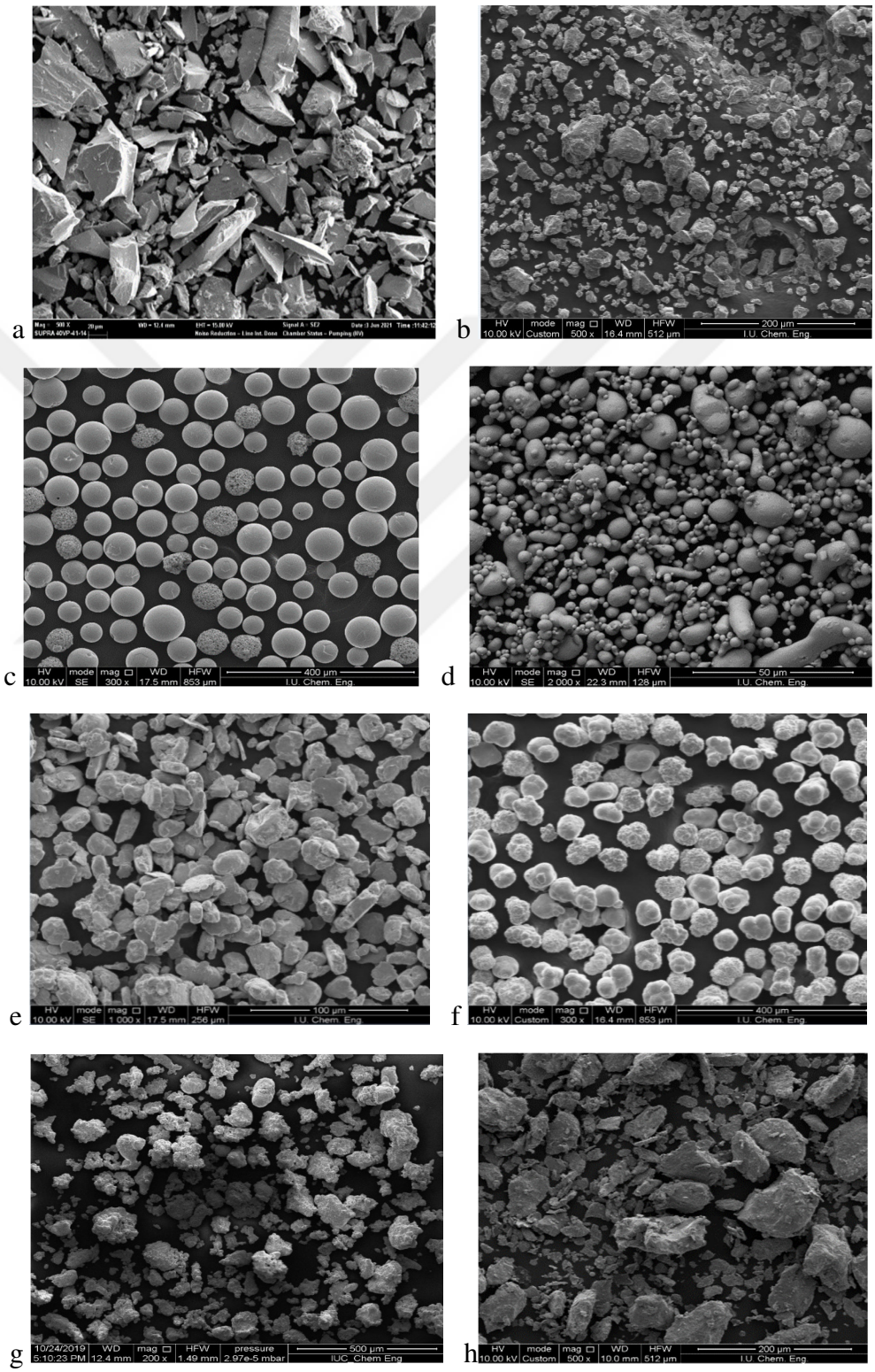
4.1 MİKROYAPI

Şekil 4.1'de Titanyum esaslı alaşımların üretiminde hammadde olarak kullanılan başlangıç tozlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları görülmektedir. Görüldüğü gibi kullanılan titanyum tozları üretim tekniklerine bağlı olarak karmaşık şekillidir ve genel olarak homojen boyut aralığındadır.



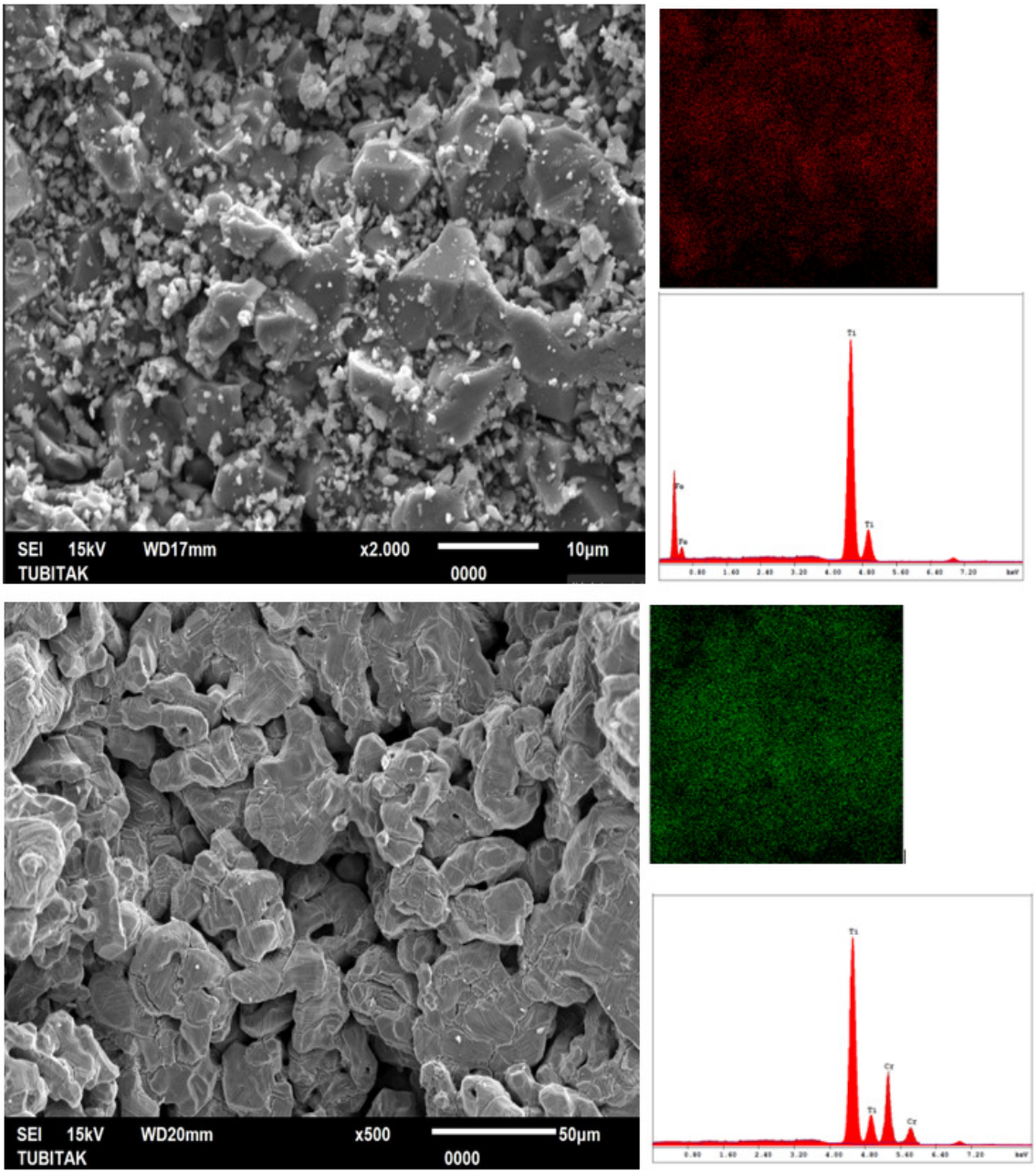
Şekil 4.1: Titanyum tozunun farklı büyütmelerde SEM fotoğrafları

Aşağıdaki Şekilde alaşım elementi olarak kullanılan a) Mn tozu, b) V tozu, c) Mo tozu, d) Sn tozu, e) Co tozu, f) Ni tozu, g) Fe tozu, h) Cr tozunun SEM fotoğrafları görülmektedir. Kullanulan tozlar homojen parçacık boyutlarında olup üretim tekniklerine (su/gaz atomizasyonu) bağlı olarak Mo tozu küresel diğer tozlar ise karmaşık şekillidir.



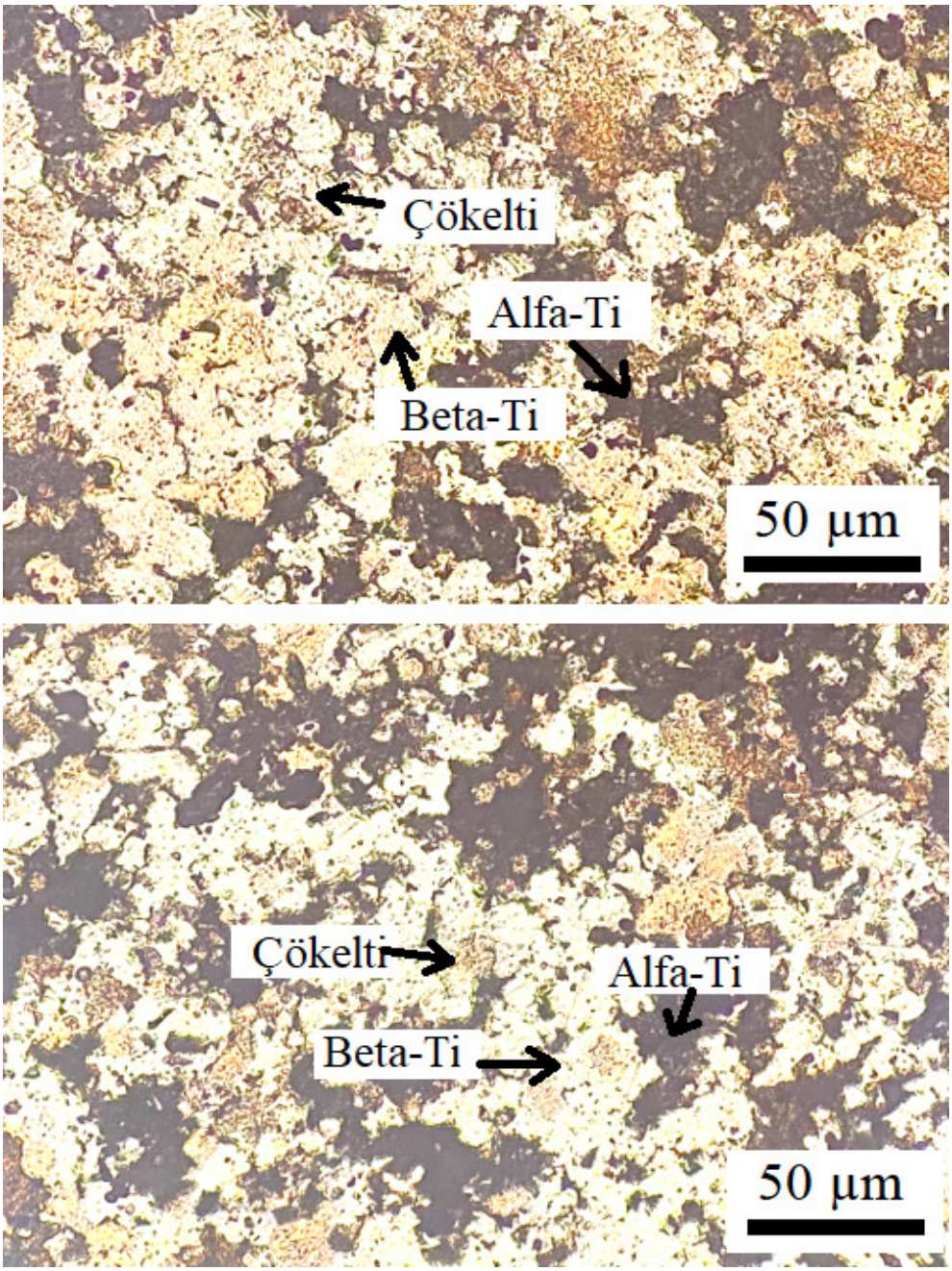
Şekil 4.2: İlavelerin SEM fotoğrafları a) Mn, b) V, c) Mo, d) Sn, e) Co, f) Ni, g) Fe, h) Cr

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş Ti-8Fe ve Ti-6Cr 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. Ayrıca, Ti-8Fe ve Ti-6Cr alaşımlarında, EDS, Fe dağılımı ve Cr dağılımı haritaları görülmektedir. Alaşımların istenen şekilde elde edildiği ve alaşım elementlerinin (Fe veCr) homojen dağıldığı söylenebilir.



Şekil 4.3: Sinterlenmiş a) Ti-8Fe ve b) Ti-6Cr alaşımlarının SEM fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde sinterlenmiş Ti-6Cr ve Ti-8Fe alaşımlarının optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroskop fotoğraflarından 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 beta-Ti matris ve bir miktar alfa-Ti fazı içermektedir. Ayrıca tane sınırlarında bir miktar intermetalik bileşik (çökelti) görülmektedir.



Şekil 4.4: Ti-6Cr ve Ti-8Fe alaşımlarının optik mikroskop fotoğrafları

4.2 MEKANİK ÖZELLİKLER

Fiziksel özelliklerin beirlenmesi kapsamında geometrik yöntem kullanılarak sinterlenmiş numunelerin yoğunlukları belirlenmiştir. Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen sinterlenmiş titanyum alaşımı numunelerin yoğunluk değerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek yoğunluk değeri %10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Mo alaşımında, tüm alaşımlarda ise Ti40Fe alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış yoğunluğu beklenildiği gibi arttırmıştır.

Tablo 4.1: Sinterlenmiş Ti alaşımlarının yoğunluk değerleri

Alaşım	Sinter Yoğunluk (g/cm^3)
Ti-10Ni	4.2
Ti-10Mn	4.1
Ti-10Co	4.2
Ti-10Mo	4.5
Ti-10V	4.1
Ti-10Sn	4.0
Ti-8Fe	4.0
Ti-20Fe	4.5
Ti-35Fe	4.6
Ti-40Fe	4.8
Ti-3.0Cr	4.0
Ti-4.5Cr	4.0
Ti-5.0Cr	4.1
Ti-5.5Cr	4.1
Ti-6.0Cr	4.2
Ti-7.0Cr	4.2
Ti -6Ni -6Co	4.3
Ti -6Fe -6Cr	4.3
Ti-6Mo-6Fe	4.3

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların tahribatsız ultrasonik test ile belirlenmiş elastisite modülü değerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek elastisite modülü değeri %1 0 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Co alaşımında, tüm alaşımlarda ise Ti-40Fe alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış elastisite modülünü arttırmıştır. Isıl işlem sonrası elastisite modülü değerleri artmıştır.

Tablo 4.2: Ti alaşımlarının elastisite modülü değerleri

Alaşım	(Yaşlandırma Öncesi) Elastisite Modülü (GPa)	(Yaşlandırma Sonrası) Elastisite Modülü (GPa)
Ti-10Ni	90	90
Ti-10Mn	83	82
Ti-10Co	90	89
Ti-10Mo	89	90
Ti-10V	89	90
Ti-10Sn	86	86
Ti-8Fe	89	92
Ti-20Fe	94	94
Ti-35Fe	99	99
Ti-40Fe	99	101
Ti-3.0Cr	86	86
Ti-4.5Cr	86	86
Ti-5.0Cr	86	85
Ti-5.5Cr	87	87
Ti-6.0Cr	87	87
Ti-7.0Cr	89	90
Ti -6Ni -6Co	91	91
Ti -6Fe -6Cr	91	91
Ti-6Mo-6Fe	92	92

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların aşınma değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek aşınma direnci (düşük aşınma yüzdesi) değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Mo alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış aşınma direncini arttırmıştır. Isıl işlem sonrası aşınma direnci değerleri artmıştır.

Tablo 4.3: Ti alaşımlarının aşınma değerleri

Alaşım	(Yaşlandırma Öncesi) Aşınma (%)	(Yaşlandırma Sonrası) Aşınma (%)
Ti-10Ni	0.9	0.8
Ti-10Mn	0.9	0.8
Ti-10Co	0.8	0.7
Ti-10Mo	0.7	0.6
Ti-10V	0.8	0.7
Ti-10Sn	1.0	1.0
Ti-8Fe	0.9	0.8
Ti-20Fe	0.8	0.7
Ti-35Fe	0.8	0.7
Ti-40Fe	0.8	0.7
Ti-3.0Cr	0.8	0.8
Ti-4.5Cr	0.9	0.9
Ti-5.0Cr	0.9	0.8
Ti-5.5Cr	0.9	0.8
Ti-6.0Cr	0.8	0.7
Ti-7.0Cr	0.8	0.7
Ti -6Ni -6Co	0.8	0.7
Ti -6Fe -6Cr	0.8	0.7
Ti-6Mo-6Fe	0.7	0.6

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek sertlik değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Mo alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış sertlik değerini arttırmıştır. Isıl işlem sonrası sertlik değerleri artmıştır.

Tablo 4.4: Ti alaşımlarının sertlik değerleri

Alaşım	(Yaşlandırma Öncesi) Sertlik (HV3)	(Yaşlandırma Sonrası) Sertlik (HV3)
Ti-10Ni	298	310
Ti-10Mn	300	312
Ti-10Co	330	341
Ti-10Mo	332	338
Ti-10V	328	333
Ti-10Sn	285	290
Ti-8Fe	299	309
Ti-20Fe	309	318
Ti-35Fe	320	329
Ti-40Fe	328	335
Ti-3.0Cr	300	301
Ti-4.5Cr	303	305
Ti-5.0Cr	303	306
Ti-5.5Cr	306	307
Ti-6.0Cr	308	310
Ti-7.0Cr	308	312
Ti -6Ni -6Co	311	313
Ti -6Fe -6Cr	312	318
Ti-6Mo-6Fe	318	322

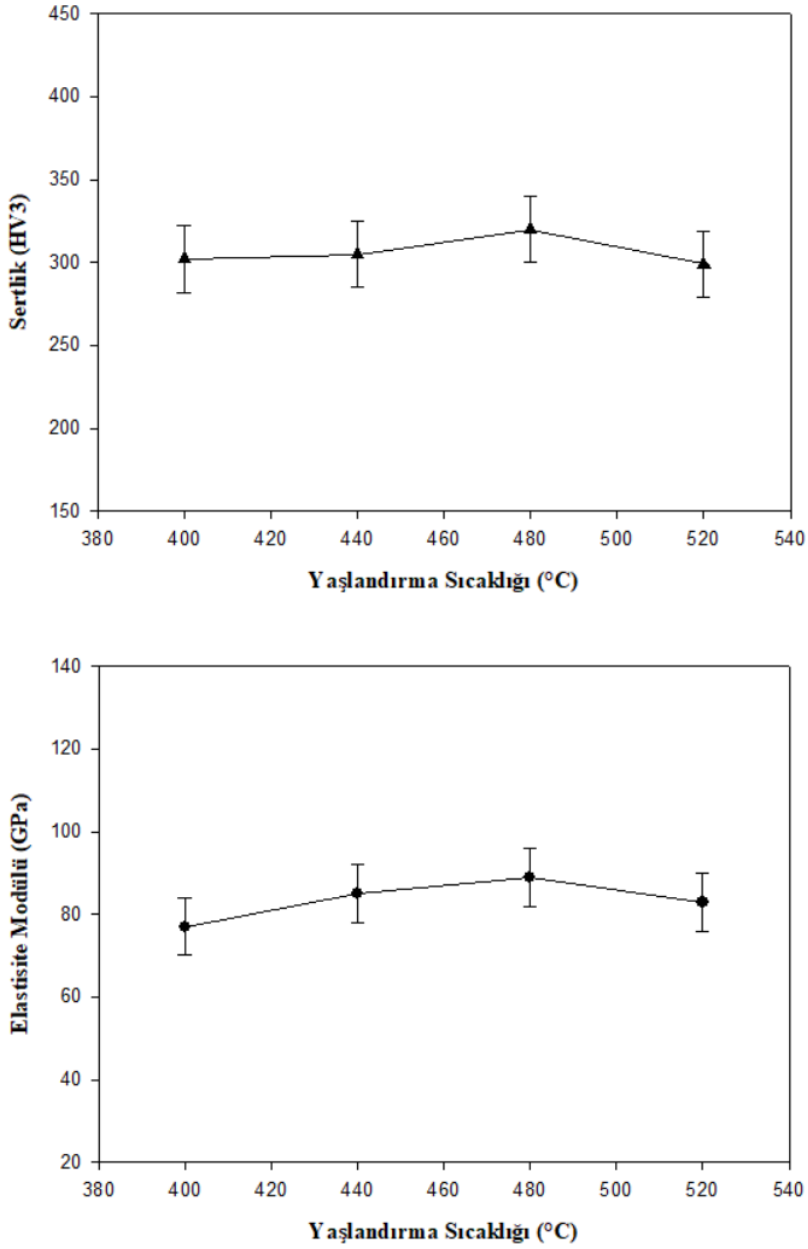
Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elektriksel iletkenlik değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek iletkenlik değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Co alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış iletkenlik değerini arttırmıştır. Isıl işlem sonrası aşınma iletkenlik değerlerinde değişim yaşanmamıştır.

Tablo 4.5: Ti alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerleri

Alaşım	(Yaşlandırma Öncesi) Elektriksel İletkenik (IACS%)	(Yaşlandırma Sonrası) Elektriksel İletkenik (IACS%)
Ti-10Ni	4.9	4.9
Ti-10Mn	2.5	2.3
Ti-10Co	2.9	2.7
Ti-10Mo	2.8	2.8
Ti-10V	2.6	2.6
Ti-10Sn	3.5	3.4
Ti-8Fe	3.6	3.6
Ti-20Fe	4.3	4.3
Ti-35Fe	5.7	5.7
Ti-40Fe	6.6	6.6
Ti-3.0Cr	2.7	2.6
Ti-4.5Cr	2.9	2.9
Ti-5.0Cr	3.1	3.0
Ti-5.5Cr	3.2	2.9
Ti-6.0Cr	3.3	3.3
Ti-7.0Cr	3.5	3.3
Ti-6Ni-6Co	4.7	4.5
Ti-6Fe-6Cr	3.5	3.5
Ti-6Mo-6Fe	3.4	3.3

Yaşlandırma Sıcaklığının Etkisi

Aşağıdaki Şekilde Ti-6Cr-6Fe alaşımı numunelerin yaşlandırma ısıl işlem sıcaklığının (60 dakika süre) etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek mekanik özellikler 480 °C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilmiştir.

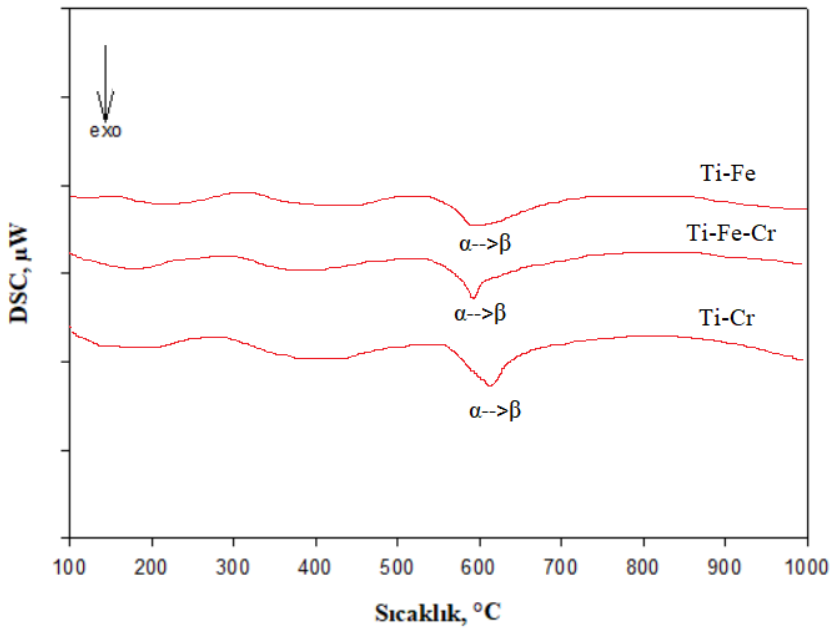


Şekil 4.5: Yaşlandırma sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi

DSC testi, malzemelerin termal davranışını incelemek ve karakterize etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu test, bir malzemenin sıcaklık değişikliklerine nasıl tepki verdiğini ve termal özelliklerini ölçmek için kullanılır. DSC testi, iki ayrı örneği (bir referans ve test örneği) karşılaştırarak çalışır. Temel olarak, örnekler aynı sıcaklık programına tabi tutulur ve ısı alışverişi gözlemlenir. DSC eğrileri, sıcaklık karşısında ısı akışı değişikliklerini gösterir. Bu değişiklikler, malzemenin faz geçişleri, erime veya kristalizasyon gibi termal olayları yansıtır [18-20].

Aşağıdaki şekilde Ti alaşımlarının diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) eğrileri görülmektedir. DSC eğrilerinde alfa-beta faz dönüşümünü gösteren pik görülmektedir. Fe ve Cr ilavesi Ti alaşımında alfa-beta faz dönüşüm sıcaklığını düşürmüştür. Alfa-beta faz dönüşüm sıcaklığının Ti-Fe alaşımında Ti-Cr alaşımına göre daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6: Ti alaşımlarının DSC eğrileri

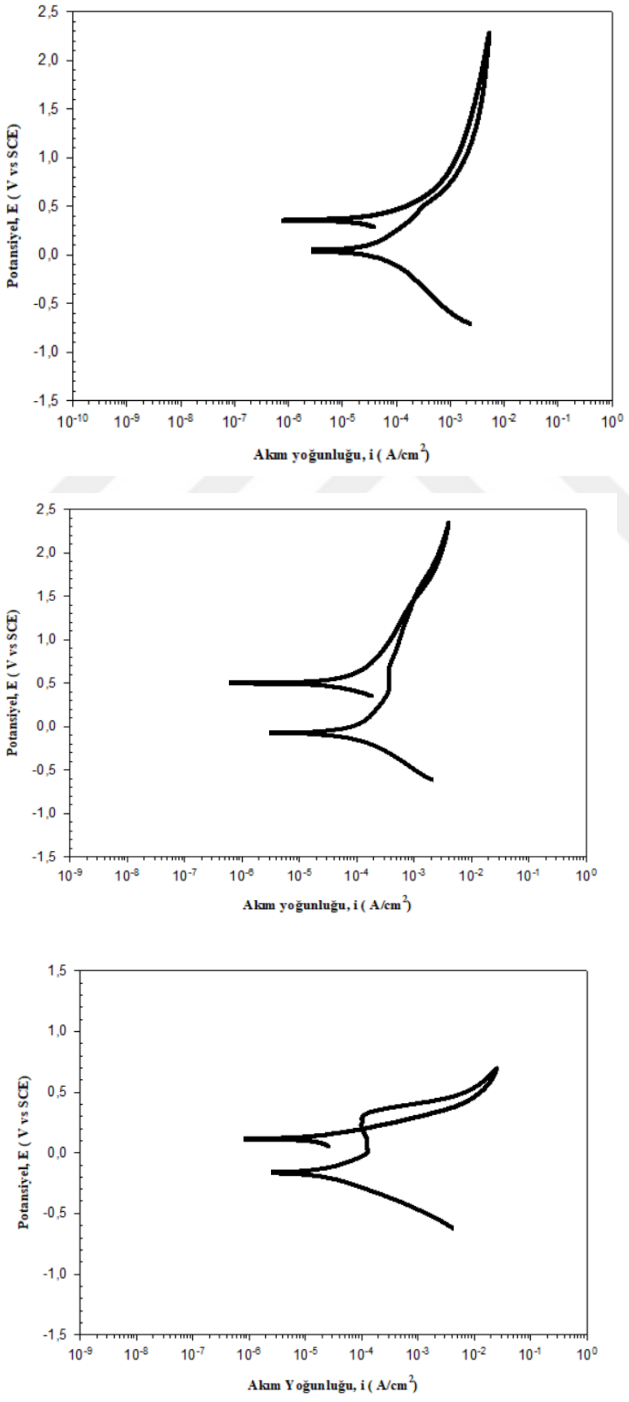
4.3 ELEKTROKİMYASAL KOROZYON ÖZELLİKLERİ

Korozyon, metalin içinde bulunduğu ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir. Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp, normal şartlar altında bile korozyona uğrayabilir. Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında üretilen alaşımların elektrokimyasal korozyon testleri ile tespit edilen korozyon hızı değerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi en düşük elektrokimyasal korozyon hızı değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Co alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe miktarındaki artış elektrokimyasal korozyon hızı değerini bir miktar arttırmıştır. Isıl işlem sonrası elektrokimyasal korozyon hızı değerlerinde değişim yaşanmamıştır.

Tablo 4.6: Ti alaşımlarının korozyon hızı değerleri

Alaşım	(Yaşlandırma Öncesi) Korozyon Hızı (mm/yıl)	(Yaşlandırma Sonrası) Korozyon Hızı (mm/yıl)	(Yaşlandırma Öncesi) Yüzey oksit direnci (Ω cm^2)	(Yaşlandırma Sonrası) Yüzey oksit direnci (Ω cm^2)
Ti-10Ni	2.2	2.2	430	427
Ti-10Mn	2.9	3.0	370	366
Ti-10Co	2.3	2.3	440	440
Ti-10Mo	2.4	2.8	430	426
Ti-10V	2.5	2.6	400	400
Ti-10Sn	3.1	3.1	390	387
Ti-8Fe	3.0	3.1	366	360
Ti-20Fe	3.3	3.3	350	350
Ti-35Fe	3.7	3.7	340	337
Ti-40Fe	3.9	4.0	322	320
Ti-3.0Cr	2.7	2.8	380	377
Ti-4.5Cr	2.8	2.9	372	370
Ti-5.0Cr	3.1	3.1	376	370
Ti-5.5Cr	3.1	3.3	375	371
Ti-6.0Cr	3.2	3.3	375	372
Ti-7.0Cr	3.3	3.3	370	366
Ti-6Ni-6Co	3.7	3.6	399	393
Ti-6Fe-6Cr	3.5	3.5	389	385
Ti-6Mo-6Fe	3.4	3.4	390	389

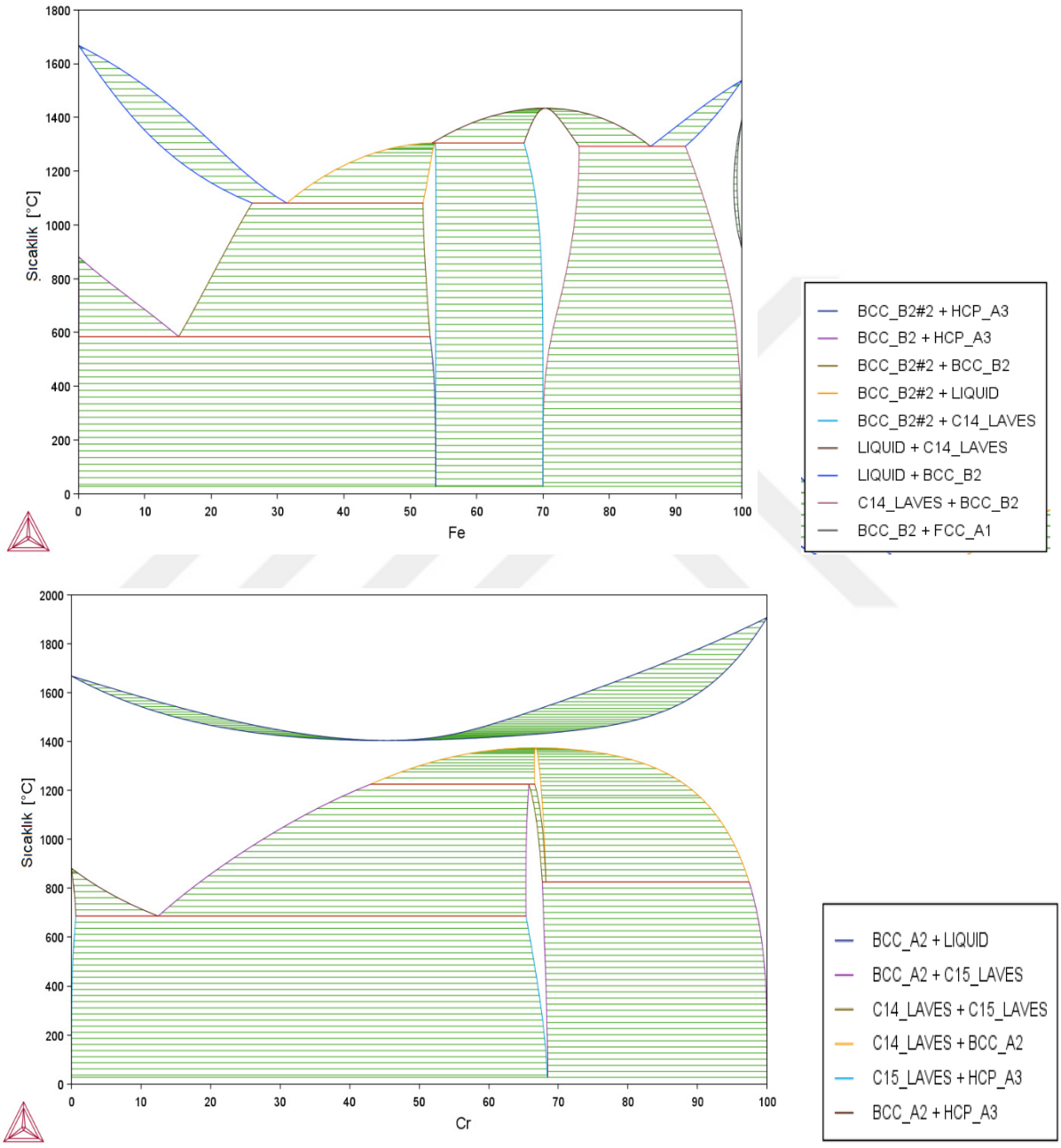
Aşağıdaki şekilde a) Ti-Cr, b) Ti-Cr-Fe, c) Ti-Fe alaşımlarının çevrimsel korozyon grafikleri görülmektedir. Çevrimsel korozyon grafiğinde ileri ve geri polarizasyonda kapalı bir ilmek (loop) görülmesi pitting (oyukçuk) korozyonunun meydana geldiğini ifade etmektedir. İlmek bölgesinin büyüklüğü oyuklanmanın şiddeti ile orantılıdır. Ti-Cr ve Ti-Cr-Fe alaşımlarında oyuklanma meydana gelmemiş, Ti-Fe alaşımlarında ise düşük miktarda oyuklanma oluşmuştur.



Şekil 4.7: Ti alaşımlarının çevrimsel korozyon grafikleri

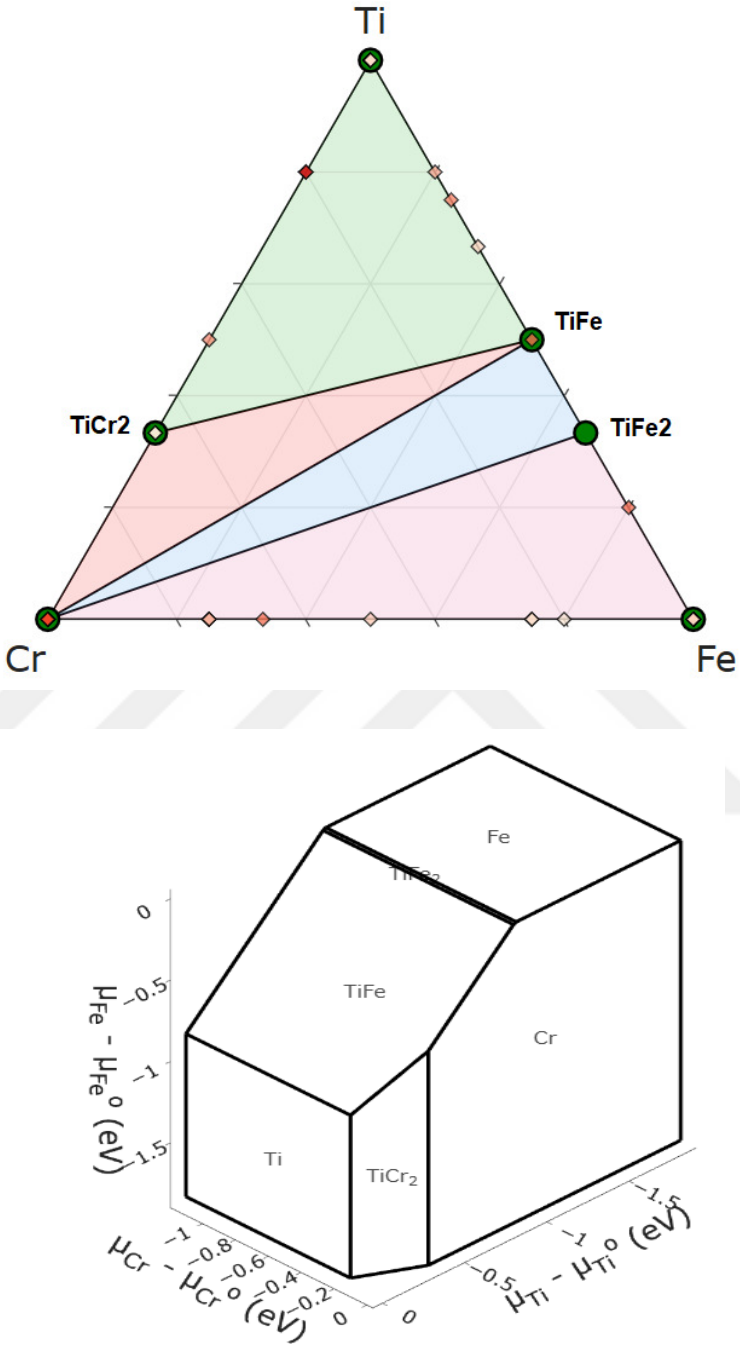
4.4 HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ

Aşağıdaki şekilde, "*Thermo-Calc*" yazılımı ile elde edilmiş a) Ti-Fe, b) Ti-Cr ikili faz diyagramları ve kristal kafes yapıları görülmektedir.



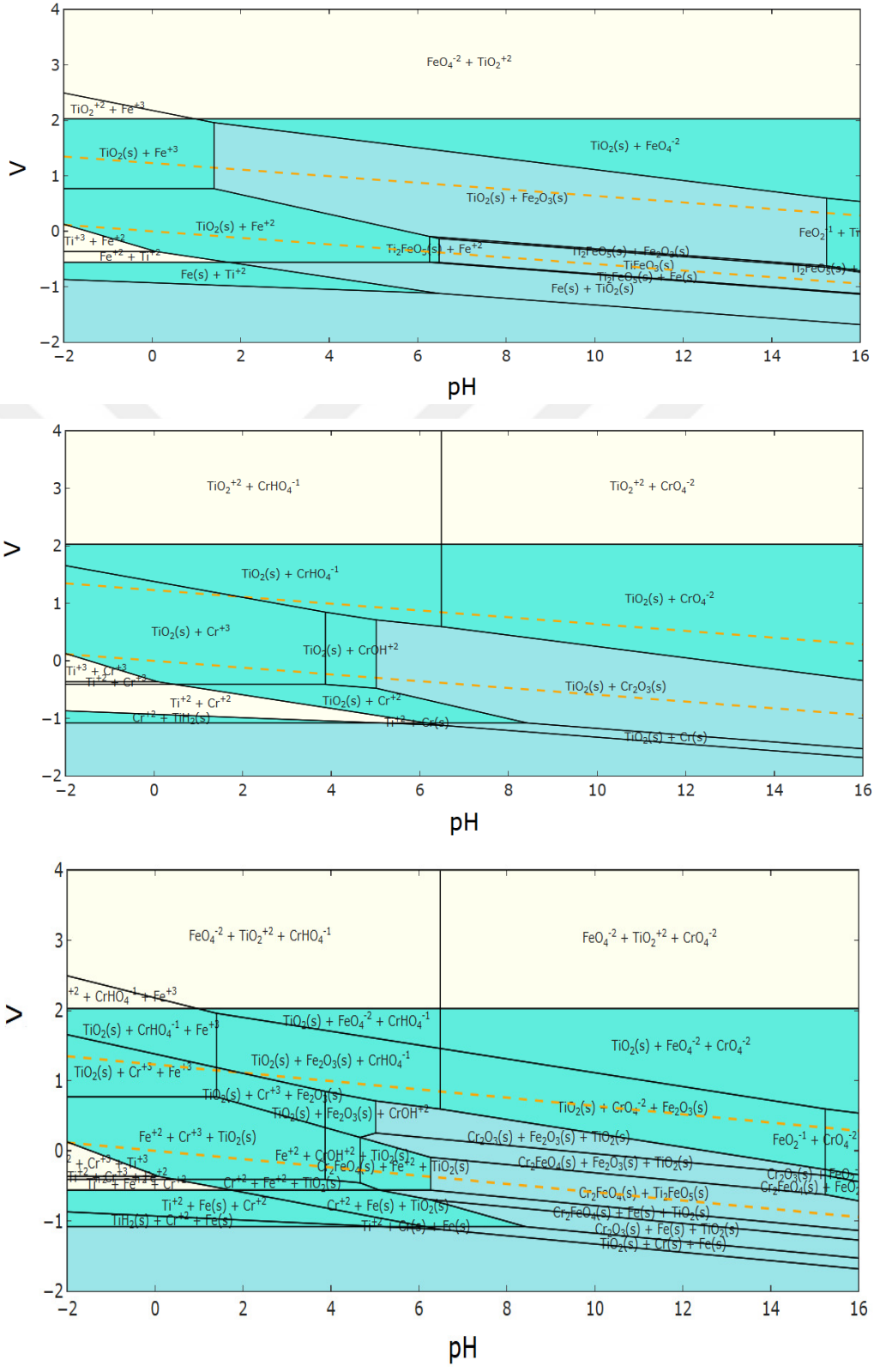
Şekil 4.8: İkili faz diyagramları a) Ti-Fe, b) Ti-Cr

Aşağıdaki şekilde, "*Materials Project*" yazılımı ile hesaplanmış Ti-Fe-Cr üçlü faz diyagramı ve kimyasal potansiyel diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.9: Üçlü faz diyagramı (Ti-Fe-Cr) ve kimyasal potansiyel diyagramı

Aşağıdaki şekilde, "*Materials Project*" yazılımı ile hesaplanmış a) Ti-8Fe ikili, b) Ti-6Cr ikili ve c) Ti-6Fe-6Cr üçlü Pourbaix (pH-V) diyagramları görülmektedir.



Şekil 4.10: Pourbaix diyagramları a) Ti-Fe, b) Ti-Cr, c) Ti-Cr-Fe

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, havacılık ve otomobil uygulamaları için yenilikçi ikili ve üçlü titanyum alaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında düşük elastisite modülü değerine sahip beta titanyum alaşımları ve çökelme sertleşmesi ısıl işlemi yapılabilen metastabil-beta titanyum alaşımları üretilmiştir. Tez kapsamında, ikili ve üçlü titanyum alaşımları geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; ikili ve üçlü alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1200 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış (östenitleme) ve ardından su verme (hızlı soğutma) işlemi uygulanmıştır. Ardından, su verilmiş numuneler 400-520 °C arasında 1 saat süre ile yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, titanyum içerisine ilave edilen açeşitli laşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca titanyum alaşımı ürünlerin elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Titanyum, bir geçiş metali olup buna bağlı olarak yüksek mekanik özellikler ve allotropi göstermektedir. Titanyumun atom çapı orta seviyede olup genel olarak hafif bir metaldir. Ayrıca, titanyum alaşımlarının termal iletkenlikleri ve termal genleşmeleri düşük, korozyon dirençleri üst düzeydedir. Hafif olması ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle titanyum alaşımları önemli bir mühendislik malzemesi olarak çeşitli kritik alanlarda kullanılmaktadır. Genel olarak titanyum alaşımlarının sıcaklık dayanımı alüminyum alaşımlarından üstün olup çelik ve süperalaşımlardan düşüktür. Diğer yandan titanyum alaşımlarının spesifik mukavemeti alüminyum alaşımlarından, çeliklerden ve süperalaşımlardan üstün olup karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerden düşüktür [1].

Titanyum içerisine ilave edilen alaşım elementleri, allotropik dönüşüm sıcaklığında yaptıkları etkiye bağlı olarak etkisiz elementler, beta kararlaştırıcı elementler ve alfa kararlaştırıcı elementler olarak üç sınıfta gruplandırılmaktadır. Ayrıca, titanyum alaşımlarında

kararsız (metastabil veya yarıkararlı) fazlar da bulunmaktadır. Bu fazlar belirli kimyasal bileşime sahip titanyum alaşımlarında su verme sonucunda oluşmaktadırlar. Başlıca denge dışı fazlar omega, martenzit, β^I, metastable-beta fazlarıdır. Ancak, omega, martenzit, β^I, metastable-beta fazlarından difüzyon oluşumu için uygun zamanın varlığında kararlı fazlara oluşmaktadır. Beta kararlaştırıcı elementlerin kritik bir seviyeyi aştığında, hızlı soğutma ile meydana gelen yapı yarı metastable-beta titanyum olarak adlandırılmaktadır. Ti alaşımlarında mikroyapının tamamen beta fazından oluşması için gerekli alaşım elementi miktarı (β_c) uygun bir değerdedir. Titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin alfa kararlaştırıcı, beta kararlaştırıcı ve etkisiz olmak üzere üç temel etkisi bulunmaktadır. Ayrıca, beta kararlaştırıcı elementler izomorf ve ötektik yapıcılar olarak iki alt dala ayrılmaktadır. Al, O, C ve N elementleri alfa-Ti kararlaştırıcıdır. V, Mo, Ta, Nb elementleri izomorf beta-Ti yapıcı, Fe, Cr, Mn, Ni, Cu elementleri ile ötektik beta-Ti yapıcıdır. Zirkonyum ve kalay elementleri etkisizdir [12].

Titanyum alaşımlarına uygulanan temel ısıl işlemler, üretim sırasında meydana gelen artık iç gerilmelerin engellenmesi amaçlı gerilim giderme ısıl işlemi, sertlik, süneklik gibi önemli özelliklerin geliştirilmesi amaçlı tavlama ısıl işlemi, mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlı çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemi yapılabilmektedir. Çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işleminde, genel olarak beta dönüşüm sıcaklığının 40 °C altında çözeltiye alma işlemi, su verme işlemi ve 535-675 °C sıcaklıkta 2-8 saat yaşlandırma işlemi uygulanmaktadır. Beta fazı tavlaması ısıl işleminde, beta dönüşüm sıcaklığının üstünde çözeltiye alma, havada soğutma ve 650-760 C sıcaklıkta 2 saat bekletme uygulanmaktadır [7].

Titanyum alaşımlarında titanyuma ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin valens elektron sayıları, su verme sonucu %100 beta fazı elde edilmesi için ilave edilmesi gereken miktarları (β_C) ve (β_C) değerinde atom başına ortalama valens elektron sayıları gibi beta fazına etkileri önem taşımaktadır. En yüksek valens elektron sayısı nikel atomunda ve hemen ardından kobalt atomunda bulunmaktadır. En düşük valens elektron sayısı V ve Ta atomlarında bulunmaktadır. Su verme sonucu %100 beta fazı elde edilmesi için ilave edilmesi gereken alaşım elementi miktarları (β_C) değerlerinde en düşük değer Fe atomunda (en güçlü beta fazı oluşturucu) hemen ardından Cr ve Mn atomlarındadır. Ta elementi en düşük etkiye sahip olup, ardından W ve hemen ardından Mo gelmektedir.

Titanyum alaşımlarında beta-Ti fazının kararlılığını belirlemede kullanılan yöntemlerden biri literatürde bilinen molibden eşdeğeri parametresinin kullanılmasıdır. Genel olarak bu parametre için titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranlarını içeren bir bağıntı kullanılmaktadır. En ciddi etkiyi Fe, Cr, Co, Mo ve Mn elementleri göstermekte ve molibden eşdeğerini büyük miktarda arttırmaktadırlar (beta-Ti fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar). V, Nb, W, Ta, Ni, Nb elementleri de molibden eşdeğerini arttırmaktadırlar ve beta-Ti fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar. Al ilavesi molibden eşdeğerini azaltıp beta-Ti fazı oluşumunu zorlaştırmaktadır [14]. Ayrıca, beta-titanyum fazını kararlı hale getiren metalik alaşım elementlerinin ağırlıkça oranları ile su verme neticesinde mikroyapıda meydana gelen martenzit fazı başlangıç sıcaklığı arasında titanyuma ilave edilen metalik alaşım elementlerinin oranlarını içeren bir bağıntı bulunmaktadır. En ciddi etkiyi Fe ve Mn elementleri göstermekte ve martenzit başlangıç sıcaklığını büyük miktarda düşürmektedirler (martenzit oluşumunu kolaylaştırmaktadırlar). Cr, Ni, Mo, Cu, V, Nb elementleri de martenzit başlangıç sıcaklığını miktarda düşürmekte ve martenzit fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Al ilavesi martenzit başlangıç sıcaklığını miktarda artırıp martenzit fazı oluşumunu zorlaştırmaktadır [15].

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 metalurjisi yönteminde sinterleme sonrası yapıda yaklaşık % 5 gözenek bulunabilmekte olup, tam yoğunluk elde edilmek istendiğinde ileri toz metalurjisi tekniklerinden (soğuk izostatik presleme, sıcak izostatik presleme, plazma sinterleme, sıcak pres) yararlanılmaktadır [5]. Kullanılan titanyum tozları üretim tekniklerine bağlı olarak karmaşık şekillidir ve genel olarak homojen boyut aralığındadır. Alaşımlam hazırlamada kullanılan metal tozları genel olarak homojen parçacık boyutlarında olup üretim tekniklerine (su/gaz atomizasyonu) bağlı olarak Mo tozu küresel diğer tozlar ise karmaşık şekillidir. SEM fotoğrafından görüldüğü gibi sinterlenmiş titanyum alaşımı numunelerin yapısında makro ve mikro çatlaklar bulunmamaktadır. Ayrıca mikroyapıda gözenek bulunmadığı da görülmektedir. Sonuç olarak yeterli bir sinterlenme meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca optik mikroskop incelemesi yapılmış olup, 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.

Mekanik Özelliklerin İrdelenmesi

En yüksek yoğunluk değeri %10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Mo alaşımında, tüm alaşımlarda ise Ti40Fe alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış yoğunluğu arttırmıştır.

En yüksek elastisite modülü değeri %10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Co alaşımında, tüm alaşımlarda ise Ti-40Fe alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış elastisite modülünü arttırmıştır. Isıl işlem sonrası elastisite modülü değerleri artmıştır.

En yüksek aşınma direnci (düşük aşınma yüzdesi) değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Mo alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış aşınma direncini arttırmıştır. Isıl işlem sonrası aşınma direnci değerleri artmıştır.

En yüksek sertlik değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Mo alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış sertlik değerini arttırmıştır. Isıl işlem sonrası sertlik değerleri artmıştır.

En yüksek iletkenlik değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Co alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe ve Cr miktarındaki artış iletkenlik değerini arttırmıştır. Isıl işlem sonrası aşınma iletkenlik değerlerinde değişim yaşanmamıştır.

En yüksek mekanik özellikler 480 °C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilmiştir.

En düşük elektrokimyasal korozyon hızı değeri % 10 katkılı ikili Ti-X alaşımlarında Ti-10Co alaşımında elde edilmiştir. Ti içerisine yapılan Fe miktarındaki artış elektrokimyasal korozyon hızı değerini bir miktar arttırmıştır. Isıl işlem sonrası elektrokimyasal korozyon hızı değerlerinde değişim yaşanmamıştır.

Jabur ve diğerleri [21] şekil bellekli Ni-Ti alaşımı numuneleri toz metalurjisi yöntemi ile üretmişler ve çeşitli özelliklerini incelemişlerdir. Basıncın numunelerin mekanik özelliklerine etksisini incelemişlerdir. Ayrıca, şekil bellekli Ni-Ti alaşımı içerisine yapılan Cr ilavesinin ve Al ilavesinin numunelerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Cr ilavesinin ve Al ilavesinin sertlik üzerinde düşük bir etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil bellekli Ni-Ti numunelere yapılan Cr ilavesinin ve Al ilavesinin dönüşüm sıcaklığını yükselttiğini tespit etmişlerdir. Genel olarak, şekil bellekli Ni-Ti içerisine yapılan Cr ilavesinin ve Al ilavesinin numunelerdeki gözenek miktarını düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Eda ve diğerleri [22] gerçekleştirdikleri çalışmada toz metalurjisi esaslı şekil bellekli Ti-Ni alaşımı numuneleri incelemişlerdir. Ni-Ti alaşımı numunelere mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla yaklaşık olarak % 2 oranında Co ilave etmişlerdir. Co ilaveli şekil bellekli Ti-Ni alaşımı numuneler yüksek şekil bellek özelliği göstermişir. Bu arada üretilen numunelerin akma mukavemeti değerleri sabit kalmıştır.

Yaşar [23], Ti-Ni alaşımlarının üretmiş ve karakterize etmiştir. Numunelere 925 °C sıcaklıkta 30 dakika çözeltiye alma uygulanıp ardından su verilmiştir. Sonuç olarak üretilen numunelerin yeterli bir şekil bellek davranışı gösterdiği belirtilmiştir.

Wang [24] termomekanik şekil bellek eğitim sıcaklığının iki-yönlü şekil bellek özelliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarını Ti-Ni ve Ti-45Ni-5Cu alaşımı şekil bellekli yaylar ile gerçekleştirmişlerdir.

Aşağıdaki Tabloda, çalışmada Ti içerisine ilave edilen alaşım elementlerinin Ti alaşımlarının özelliklerine etkileri özet olarak görülmektedir.

Tablo 5.1: Alaşım elementlerinin özelliklere etkileri

Alaşım Elementi	Yoğunluk	Elastisite Modülü	Sertlik	Aşınma	İletkenlik	Korozyon Direnci	Fiyat
Ni	--	++	+	+	+++	-	---
Mn	--	++	+	+	+	---	+++
Co	--	+++	+++	+++	+	-	---
Mo	---	+++	+++	+++	+	-	---
V	--	++	++	++	+	-	--
Sn	--	-	---	---	+	---	+++
Fe	--	++	+	+	++	---	+++
Cr	--	++	++	++	+	-	++

(+): istenen olumlu etki, (-): istenmeyen olumsuz etki

Aşağıdaki Tabloda, çalışmada Ti içerisine ilave edilen alaşım elementlerinin valans elektron konsantrasyon (VEC) değerleri görülmektedir.

Tablo 5.2: Kullanılan alaşım elementlerinin VEC değerleri

	Element								
	Ni	**Co**	**Fe**	**Mn**	**Mo**	**Cr**	**V**	**Ti**	**Sn**
VEC	10	9	8	7	6	6	5	4	4

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, havacılık ve otomobil uygulamaları için yenilikçi ikili ve üçlü titanyum alaşımlarının üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında düşük elastisite modülü değerine sahip beta titanyum alaşımları ve çökelme sertleşmesi ısıl işlemi yapılabilen metastabil-beta titanyum alaşımları üretilmiştir. Tez kapsamında, ikili ve üçlü titanyum alaşımları geleneksel toz metalurjisi (presleme-sinterleme) yöntemi ile üretilmiş olup; ikili ve üçlü alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Tozların hazırlanmasının ardından, presleme ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler 1200 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Son olarak, sinterlenmiş numunelere su verme ve yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıl işlemleri uygulanmıştır. Sinterlenmiş numuneler 900 °C sıcaklıkta 1 saat çözeltiye alınmış (östenitleme) ve ardından su verme (hızlı soğutma) işlemi uygulanmıştır. Ardından, su verilmiş numuneler 400-520 °C arasında 1 saat süre ile yaşlandırılmıştır. Tez kapsamında, titanyum içerisine ilave edilen açeşitli laşım elementlerinin alaşımın özelliklerine etkileri incelmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı tahribatlı (aşınma, sertlik) ve tahribatsız (ultrasonik test, girdap akımları) yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca titanyum alaşımı ürünlerin elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyel, Tafel, empedans elektrokimyasal spektroskopisi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Titanyum, bir geçiş metali olup buna bağlı olarak yüksek mekanik özellikler ve allotropi göstermektedir. Titanyumun atom çapı orta seviyede olup genel olarak hafif bir metaldir. Ayrıca, titanyum alaşımlarının termal iletkenlikleri ve termal genleşmeleri düşük, korozyon dirençleri üst düzeydedir.

Hafif olması ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle titanyum alaşımları önemli bir mühendislik malzemesi olarak çeşitli kritik alanlarda kullanılmaktadır.

Titanyum içerisine ilave edilen alaşım elementleri, allotropik dönüşüm sıcaklığında yaptıkları etkiye bağlı olarak etkisiz (nötr) elementler, beta kararlaştırıcı elementler ve alfa kararlaştırıcı elementler olarak üç sınıfta gruplandırılmaktadır.

Ayrıca, titanyum alaşımlarında kararsız (metastabil veya yarıkararlı) fazlar da bulunmaktadır. Bu fazlar belirli kimyasal bileşime sahip titanyum alaşımlarında su verme sonucunda oluşmaktadırlar.

Başlıca denge dışı fazlar omega, martenzit, β^I, metastable-beta fazlarıdır. Ancak, omega, martenzit, β^I, metastable-beta fazlarından difüzyon oluşumu için uygun zamanın varlığında kararlı fazlara oluşmaktadır.

Beta kararlaştırıcı elementlerin kritik bir seviyeyi aştığında, hızlı soğutma ile meydana gelen yapı yarı metastable-beta titanyum olarak adlandırılmaktadır.

Ti alaşımlarında mikroyapının tamamen beta fazından oluşması için gerekli olan alaşım elementi miktarı (β_c) uygun bir değerdedir.

Genel Sonuçlar:

- Fe ilavesi elektriksel iletkenliği, sertliği, elastisite modulunu arttırmıştır.
- Fe ilavesi korozyon hızını arttırmış, yüzey oksit film direncini düşürmüştür.
- Cr ilavesi elektriksel iletkenliği, sertliği, aşınma direncini, elastisite modulunu arttırmıştır.
- Cr ilavesi korozyon hızını arttırmış, yüzey oksit film direncini düşürmüştür.
- Yaşlandırma işlemi sertliği, aşınma direncini, elastisite modülünü arttırmış,
- Yaşlandırma işlemi, yüzey oksit film korozyon direncini düşürmüştür

Gelecek çalışmalara tavsiyeler:

- Daha geniş kimyasal bileşim aralığında ikili ve üçlü titanyum alaşımları 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 (östenitleme) sıcaklığı aralığında ısıl işlemler yapılması ve su verme (östenitleme)sıcaklığının etkileri daha detaylı olarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Wei S., Huang L, Li X, Jiao Y, Ren W, Geng L., Network-Strengthened 2019, Ti-6Al-4V/(TiC+TiB) Composites: Powder Metallurgy Processing and Enhanced Tensile Properties at Elevated Temperatures. *Metal and Mater Trans A*, 50A, 36

[2] Leyens, C. and Peters, M., 2003, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Wiley VCH, Weinheim,

[3] Oleksik V. Trzepiecinski T, Marcin S. 2019, Single-Point Incremental Forming of Titanium and Titanium Alloy Sheets. *Materials* 14(21):6372.

[4] https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/titanium/titanium.html

[5] https://www.mpif.org/IntrotoPM/Processes/ConventionalPowderMetallurgy.aspx .

[6] https://mae.ufl.edu (son ziyaret 18.07.2021)

[7] ASM, *Titanium: A Technical Guide*, ASM International, 1988, Metals Park, USA

[8] Sarıtaş S, Türker M, Durlu N, 2008, *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*, Uyum Ajans, Ankara.

[9] Upadhyaya, G.S., 2000, S*intered Metallic and Ceramic Materials:Preparation, Properties, and Applications*, Wiley, New York.

[10]. Froes F.H. 2015. *Physical Metallurgy Processing and Applications* ASM International.

[11]. Quian, M., Froes F.H.S., 2015. *Titanium Powder Metallurgy*, Butterworth-Heinemann, Elsevier, USA.

[12]. Lütjering, G., Williams J.C., 2003. *Titanium, Engineering Materials and Processes*, 3th Edition, Springer, New York.

[13]. Suryanarayana, C., 2001, Mechanical alloying and milling, *Progress in Materials and Science,* 46, 1-184.

[14] Kang, S.J.L., 2005, *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*, Elsevier.

[15] Neelakantan S, Díaz-del Castillo P.R., van der Zwaag S., Scripta Materialia 60, 2009; 611.

[16] https://www.ndt.net/article/brown/us_prop2.htm

[17] https://www.olympus-ims.com/en/applications/elastic-modulus-measurement/

[18] Lemke J.N., Coda A, 2019, DSC and microstructure analysis of high temperature Ni-Ti-Hf, low hysteresis Ni-Ti-Cu and conventional super-elastic and shape memory Ni-Ti alloy ingots and wires, *Materials Today Communications* 21, 100666

[19] Jang J.Y, Chun S, Kim N.S., Cho J.W, Kim J, Yeom J.Y, Kim J, Nam T. 2013, Martensitic transformation behavior in Ti-Ni-X (Ag, In, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi) ternary alloys, *Materials Research Bulletin* 48, 5064-5069

[20] https://devotrans.com/tr/nedir/dsc-diferansiyel-taramali-kalorimetre-testi-nedir.html

[21] Jabur A.S.., Al-Haidary J.T.., Al-Hasani E.S., 2013, *Journal of Alloys and Compounds*, 578, 136-142.

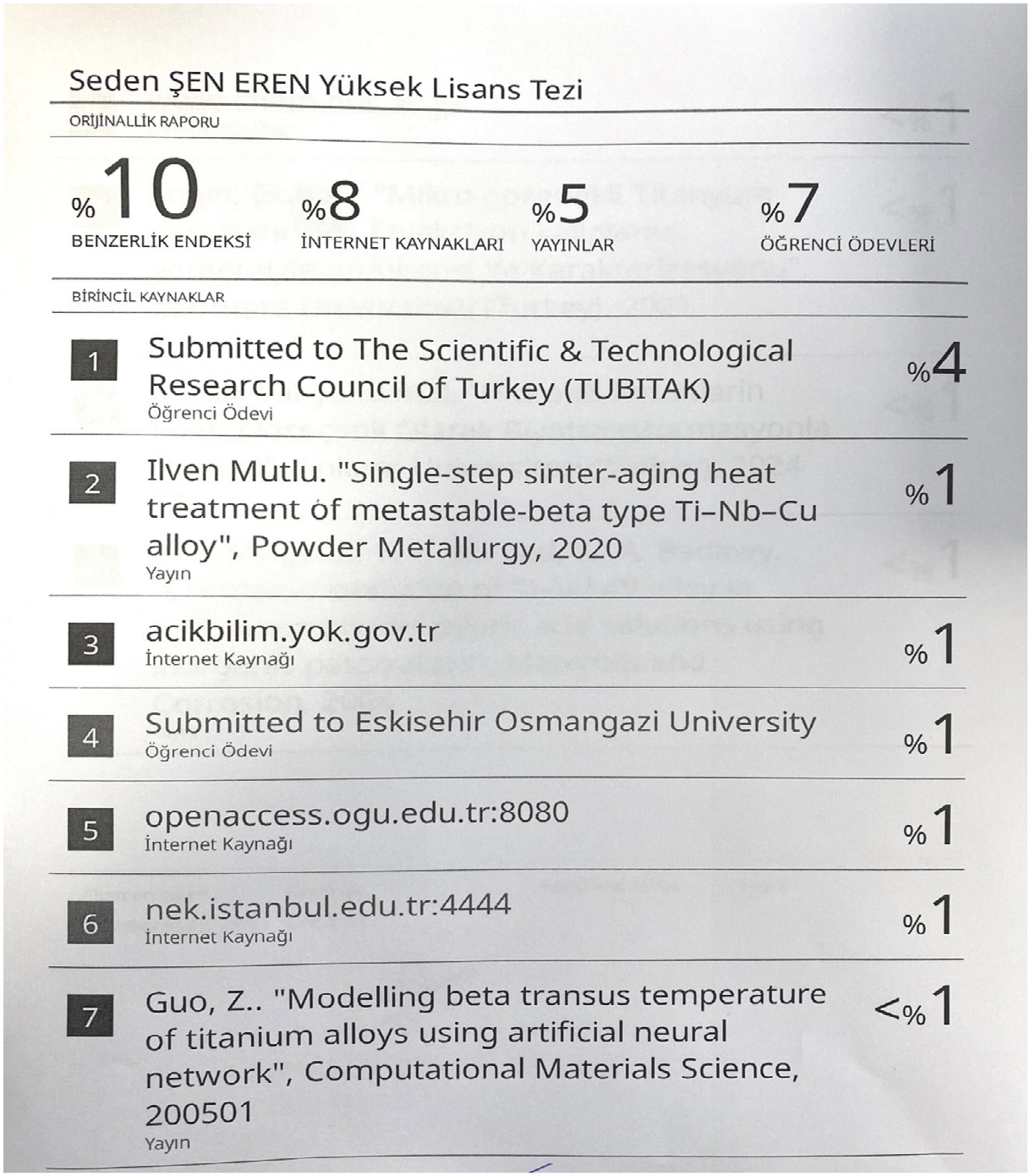
[22] Eda T., Khantachawana A., Umeda J., Kondoh K., 2019, *Materials Transactions*, 60, 8, 1583-1590.

[23] Yaşar F., 2006. *Thermomechanical Characterization of Ti-rich TiNi Shape Memory Alloys*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi.

[24] Wang Z.G. , Zu X.T., Dai J.Y., Fu P,Feng X.D 2003, *Materials Letters* 57, 1501-1507

EKLER

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



Seden ŞEN EREN Yüksek Lisans Tezi

ORİJİNALLİK RAPORU

%10	%8	%5	%7
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%4
2	Ilven Mutlu. "Single-step sinter-aging heat treatment of metastable-beta type Ti–Nb–Cu alloy", Powder Metallurgy, 2020 Yayın	%1
3	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
4	Submitted to Eskisehir Osmangazi University Öğrenci Ödevi	%1
5	openaccess.ogu.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	%1
6	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	%1
7	Guo, Z.. "Modelling beta transus temperature of titanium alloys using artificial neural network", Computational Materials Science, 200501 Yayın	<%1