



**HELİKOPTER İÇİN EKLEMELİ İMALAT İLE Ti6Al4V DİŞLİ ÜRETİMİ
VE ARDIL İŞLEMLERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mahmut Şamil KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mahmut Şamil KAYA

30/06/2021

HELİKOPTER İÇİN EKLEMELİ İMALAT İLE Ti6Al4V DİŞLİ ÜRETİMİ VE ARDIL İŞLEMLERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mahmut Şamil KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Eklemeli imalat ile Ti6Al4V malzemeden üretilmiş dişli parçasının araştırıldığı bu tezde, dişli parçaların mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellikleri tespit etmek amacıyla ardıl işlem kombinasyonunun uygulandığı numunelere çekme, yorulma, mikrosertlik ve darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardıl işlemlerin sonuçlarını yorumlayabilmek için SEM, XRD ve EDS analizleri yapılmıştır. Ardıl işlem olarak sıcak izostatik pres (HIP) ve nitrürleme işlemleri belirlenmiştir. Kupon seviyesinde gerçekleştirilen deney sonuçları incelendiğinde, HIP işleminin yorulma deneyinde %31 oranında yorulma ömrünü arttırdığı, nitrürleme işleminin mikrosertlik deneyinde %47 oranında sertlik artışı sağladığı gözlemlenmiştir. Kupon seviyesinde yapılan mekanik deney sonuçlarından yola çıkılarak dişli parçaya HIP işlemi yapılmıştır. Sadece işlenmiş ve HIP işlemi yapılmış dişli parçalara yapılan tek dişten eğme yorulma testi sonuçları incelendiğinde, parçaların yorulma ömürlerinde kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, elektron ışınlı ergitme, Ti6Al4V, nitrürleme, sıcak izostatik pres

Sayfa Adedi : 77

Danışman : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

PRODUCTION OF Ti6Al4V GEAR BY ADDITIVE MANUFACTURING FOR
HELICOPTER AND INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POST-PROCESSING

(M. Sc. Thesis)

Mahmut Şamil KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

In this thesis, the gear part made of Ti6Al4V material by additive manufacturing was investigated, the mechanical and microstructural properties of gear parts were analyzed. In order to determine the mechanical properties, tensile, fatigue, microhardness and impact tests were carried out on the samples to which the post-process combination was applied. SEM, XRD and EDS analyzes were performed to interpret the results of the post-processes. Hot isostatic press (HIP) and nitriding processes were determined as post-processes. When the test results performed at the coupon level were examined, it was observed that the HIP process increased the fatigue life by 31% in the fatigue test, and the nitriding process increased the hardness by 47% in the microhardness test. Based on the mechanical test results at the coupon level, the HIP process was performed on the gear part. When the results of the single tooth bending fatigue test performed only machined and HIPed gear parts were examined, no significant difference was observed in the fatigue life of the parts.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, EBM, Ti6Al4V, nitriding, HIP

Page Number : 77

Supervisor : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca tecrübelerini benimle paylaşıp beni en iyi şekilde yönlendiren Prof. Dr. Ömer KELEŞ' e, çalışmanın kilit noktalarında deneyimleri ile beni aydınlatan Prof. Dr. Bekir Sami YILBAŞ' a, tezimin TUSAŞ'ın ArGe çalışmalarının bir parçası olmasında ve deneysel çalışmalarda her türlü desteği bana sağlayan TUSAŞ-İMPET Teknoloji Merkezi Yöneticisi Remzi Ecmel ECE' ye, tezimin yazım ve hazırlama aşamasında maddi ve manevi destekte bulunan Abdullah Taha ÖZEN' e, tezin her aşamasındaki yoğunluğuma anlayış gösterip sabırla beni bekleyen sevgili karım Cansu' ya ve kıymetli çocuklarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez, TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.'nin TÜBİTAK 1515 Öncül ArGe Laboratuvarı Desteği (proje kodu:5189901) kapsamında yürütülen çalışmaların bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR.....	3
2.1. Titanyum	3
2.1.1. Titanyumun tarihi ve genel bilgiler.....	3
2.1.2. Titanyumun kullanım alanları	5
2.1.3. Ti6Al4V alaşımı.....	6
2.2. Eklemeli İmalat	10
2.2.1. Eklemeli imalatın doğuşu ve genel bilgiler.....	10
2.2.2. Eklemeli imalatın kullanım alanları	11
2.2.3. Eklemeli imalat yöntemleri	12
2.3. Ardıl İşlemler	18
2.3.1. Sıcak izostatik pres.....	18
2.3.2. Nitrüleme	22
3. DENEYSEL YÖNTEM	31

	Sayfa
3.1. Eklemeli İmalat ile Numunelerin Üretimi	31
3.2. Üretilen Test Kuponlarına Sıcak İzostatik Pres (HIP) İşlemi Uygulanması	33
3.3. Numunelerin Nihai Boyutlarına Getirilmesi.....	34
3.4. Üretilen Test Kuponlarına Nitrürleme İşlemi Uygulanması.....	36
3.5. Mekanik Testler	37
3.5.1. Çekme testi	37
3.5.2. Darbe testi.....	38
3.5.3. Yorulma testi	39
3.5.4. Mikrosertlik testi	39
3.6. Dişli Numuneye Ardıl İşlemlerin Uygulanması.....	40
3.7. Mikroyapı Analizleri	41
3.7.1. SEM	41
3.7.2. XRD	42
3.8. Dişli numuneye yorulma testi yapılması.....	42
4. DENEY SONUÇLARI.....	43
4.1. Mekanik Test Sonuçları	43
4.1.1. Çekme testi sonuçları.....	43
4.1.2. Darbe testi sonuçları	46
4.1.3. Mikrosertlik testi sonuçları.....	47
4.1.4. Yorulma testi sonuçları.....	49
4.1.5. Dişli numunenin yorulma testi sonuçları.....	51
4.2. Mikroyapı Analiz Sonuçları.....	52
4.2.1. XRD analizi sonuçları.....	52
4.2.2. SEM analizi sonuçları.....	55

	Sayfa
4.2.3. EDS analizi sonuçları.....	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Titanyumun bazı metallerle fiziksel özelliklerinin karşılaştırması.....	4
Çizelge 2.2. Ti6Al4V alaşımının kütlece yüzde element analizi.....	6
Çizelge 2.3. Ti6Al4V'nin mekanik özellikleri	7
Çizelge 2.4. Titanyum bazlı bazı malzemelerin mekanik özellikleri	9
Çizelge 2.5. Bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri	9
Çizelge 2.6. Bazı malzemelerin sıcak izostatik pres işlemi koşulları.....	20
Çizelge 2.7. Nitrürleme işlemleri parametre karşılaştırması.....	22
Çizelge 2.8. Nitrürleme işlemlerinin avantaj ve dezavantajları	26
Çizelge 2.9. Farklı parametrelerde uygulanan nitrürleme işlemi sertlik sonuçları	28
Çizelge 4.1. Tek diştten eğme yorulma testi sonuçları.....	52
Çizelge 4.2. Ti6Al4V tozu EDS analizi	63
Çizelge 4.3. Nitrürleme işlemi yapılmış malzemenin EDS analizi	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	13
Şekil 2.2. SLS yönteminin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.3. SLM yönteminin şematik gösterimi	15
Şekil 2.4. EBM yönteminin şematik gösterimi: 1) Elektron tabancası; 2) Odaklayıcı; 3)Yönlendirici; 4) Toz haznesi; 5) Toz serici; 6) Nihai parça; 7) Platform...	16
Şekil 2.5. Sıcak izostatik pres işleminin genel şematiği	19
Şekil 2.6. Nitrüleme sonrası oluşan katmanlar	23
Şekil 2.7. Gaz Nitrüleme işleminin şematik gösterimi	25
Şekil 4.1. Tüm süreçler için en yüksek çekme dayanımları	43
Şekil 4.2. Tüm süreçler için elastik modülleri	44
Şekil 4.3. Tüm süreçler için darbe enerjileri.....	47
Şekil 4.4. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	48
Şekil 4.5. Yorulma testi sonuçları.....	50
Şekil 4.6. Sadece işlenmiş ve Sadece HIP işlemi uygulanmış numunelerin karşılaştırmalı XRD analizleri.....	53
Şekil 4.7. Sadece işlenmiş ve Sadece nitrüleme işlemi uygulanmış numunelerin karşılaştırmalı XRD analizleri.....	54

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Rutil cevheri.....	4
Resim 2.2. Titanyum malzeme ile üretilmiş örnek dişliler	5
Resim 2.3. Ti6Al4V kullanılmış örnek sistem.....	6
Resim 2.4. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş bir örnek	10
Resim 2.5. Eklemeli imalat ile üretilmiş yapı	12
Resim 3.1. Üretimlerde kullanılan tozların SEM görüntüleri.....	32
Resim 3.2. EBM ile üretim: a) Kullanılan EBM cihazı; b) ve c) numunelerin EBM’ den çıkarılması; d) EBM ile üretilmiş parça.....	33
Resim 3.3. Solda HIP işlemi yapılmış, sağda HIP işlemi yapılmamış deney numuneleri	34
Resim 3.4. Dişli parçanın son haline getirilmesi: a) EBM üretimi sonrası dişli parça; b) Destek kısımları çıkarılmış dişli parça; c) Tornalama işlemi sonrası dişli parça; d) Tel erozyon işlemi sonrası dişli parça.	35
Resim 3.5. Deney numunelerinin son haline getirilmesi: a) EBM üretimi sonrası numuneler; b) Tel erozyon ile işlenmiş numuneler; c) Taşlama işlemi yapılmış numuneler; d) Kumlama işlemi yapılmış numuneler	36
Resim 3.6. Nitrürleme fırını içindeki deney numuneleri	36
Resim 3.7. Süreçlere göre numuneler: a) HIP ve nitrürleme işlemi yapılmış numuneler; b) Sadece HIP işlemi yapılmış numuneler; c) Sadece nitrürleme işlemi yapılmış numuneler; d) Sadece işleme yapılmış numuneler	37
Resim 3.8. Deney numunesinin çekme cihazına yerleştirilmesi	38
Resim 3.9. Darbe deneyi cihazı	38
Resim 3.10. Yorulma deney cihazı.....	39
Resim 3.11. Mikrosertlik ölçüm cihazı	40
Resim 3.12. HIP işlemi yapılmış ve yapılmamış dişli parça	40
Resim 3.13. SEM için hazırlanmış numuneler	41
Resim 3.14. Dişli test mekanizması görüntüleri	42

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Çekme deneyi sonrasında her süreçten kırılmış numuneler.....	45
Resim 4.2. Darbe deneyi sonrasında her süreçten kırılmış numuneler	46
Resim 4.3. Mikrosertlik ölçümleri sırasında parça yüzeyinin durumu	48
Resim 4.4. Yorulma testleri tamamlanan numunelerin resimleri	49
Resim 4.5. Çatlak oluşmuş dişli numunesi	51
Resim 4.6. Sadece işlenmiş numunenin 1000 kat yakınlaştırılmış yüzey SEM görüntüsü	55
Resim 4.7. Sadece işlenmiş numunenin a) 5000 b) 10000 c) 15000 d) 50000 katlarda yakınlaştırılmış yüzey SEM görüntüleri.....	56
Resim 4.8. Sadece işlenmiş numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	57
Resim 4.9. HIP işlemi yapılmış numunenin a) 2000 b) 5000 c) 10000 d) 50000 katlarda yakınlaştırılmış yüzey SEM görüntüleri	58
Resim 4.10. HIP işlemi yapılmış numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	59
Resim 4.11. Nitrürleme işlemi yapılmış numunenin kesit SEM görüntüleri.....	60
Resim 4.12. Nitrürleme işlemi yapılmış numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	61
Resim 4.13. HIP ve nitrürleme işlemleri yapılmış numunenin kesit SEM görüntüleri.	62
Resim 4.14. HIP ve nitrürleme işlemleri yapılmış numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

B₄C	Bor karbür
HF	Hidrojen florür
HNO₃	Nitrik asit
TiN	Titanyum nitrür
TiO₂	Titanyum oksit

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABS	Akrilonitril bütadiyen stiren
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EBM	Elektron Işınıyla Ergitme
EDS	Enerji dispersiv spektrum
FDM	Eriyik yığma modelleme
HIP	Sıcak izostatik pres
ISO	Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SLM	Seçici lazer ergitme
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TMCA	Amerika Titanyum Metal Şirketi
TUSAŞ	Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.
XRD	X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojik ürünlerin hafifletilmesi, performans ve ekonomik açılardan büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bir ürünü mekanik özelliklerini düşürmeden daha hafif olarak tasarlayıp imal etmek günümüzdeki birçok sanayi sektörünün hedefidir. Bu hedef doğrultusunda Ti6Al4V malzemesi, yüksek özgül dayanım özellikleri nedeniyle teknolojinin odak noktası halindedir. Örneğin otomotiv sektöründeki bir kilogramlık ağırlık düşüşü 10 € değerinde kazanç sağlarken, havacılık sektöründe her bir kilogram için bu kazanç 1000 € değerine çıkmaktadır. Çok daha maliyetli ürünleri üreten uzay endüstrisinde ise her bir kilogram için bu kazanç 10.000 € değerine çıkabilmektedir. Bu nedenle düşük yoğunluğuna rağmen mekanik özelliklerinin yüksek olması, titanyum alaşımlarının bu sektörlerde önemli bir konumu olduğunu ve gelecekte daha da çok olacağını göstermektedir [1].

Küresel rekabetin bir sonucu olarak üretim, yüksek kalitede, olabildiğince malzeme tasarruflu, düşük maliyetli ve çevreye duyarlı olmak zorundadır. Bütün bu etkenler göz önüne alındığında geleneksel imalat yöntemlerinin yerine yeni bir imalat yönteminin ortaya çıkmasına ihtiyaç duyulmuştur. Eklemeli imalat yöntemleri bütün bu özelliklere daha yakın olarak ortaya çıkan yeni bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalat yöntemleri, geleneksel imalat yöntemlerinin aksine toplam kütleden eksilterek parça üretmek yerine sıfırdan katmanlar eklenerek parça üretmek esasına dayanmaktadır. Bu özelliği eklemeli imalata, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi imkânsız olan karmaşık geometrileri üretme avantajı sağlamıştır. Birçok endüstri alanında kendisine pazar bulan Ti6Al4V malzemesi, üstün özellikleri sebebiyle eklemeli imalat uygulamalarında, atomizasyon yöntemleriyle mikrometre ölçülerinde toz haline getirilip kullanılmaktadır [2].

Nihai ürünlerin üretim sonrası mekanik özellikleri bazı uygulama alanlarında yetersiz kalmaktadır. Bunun nedeni üretimde gerçekleşen hatalar veya malzemenin mekanik özellik sınırı olabilir. Üretimde meydana gelen hataların giderilmesi ya da malzemenin mekanik özellik sınırını genişletmek adına ardıl işlemlere başvurulmaktadır. Ardıl işlemler, nihai ürünlere mekanik veya ısı olarak uygulanabilirler. Örneğin, mekanik olarak soğuk izostatik pres işlemi, bilyalı dövme işlemi gibi birtakım işlemler nihai ürünlerin yorulma

dayanımını geliştirmektedirler. Isıl olarak ise, nitrürleme, borlama ve karbürleme gibi işlemler nihai ürünlerin yüzey sertlik değerlerini arttıırlar.

Bu tezde helikopter şanzımanında kullanılan, geleneksel yöntemlerle AISI 9310 serisi çelik malzemeden üretilen dişli parçasının yerine Ti6Al4V malzeme sayesinde daha hafif ve eklemeli imalat yöntemi sayesinde üretimi daha kolay olan yeni bir dişli parçanın kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç ile helikopterin ağırlığının hafifletilmesi ve dolayısıyla performans ve yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmiştir. Ti6Al4V tozu ile eklemeli imalat yöntemlerinden elektron ışıınıyla ergitme (EBM) yöntemi kullanılarak, Ti6Al4V malzemenin özellikleri incelenmiştir. Bu özellikler çekme, yorulma ve darbe testleri ve SEM, XRD ve EDS analizleri ile tespit edilmiştir. Üretim sonrası numunelere, ardıl işlemler parametre olarak düşünölüp, bu parametreler HIP ve gaz nitrürleme işlemlerinin kombinasyonları şeklinde uygulanıp, dişli için en yüksek mekanik özellik sağlayan ardıl işlem sürecini ortaya çıkarmak planlanmıştır. Ardıl işlemlerin yapılma amacı, parçanın mekanik özelliklerini arttırmaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Titanyum

Bu başlık altında titanyumun keşfi, titanyumun özellikleri, titanyumun endüstride ve literatürde kullanım ve tercih sebepleri ve titanyum alaşımları hakkında incelemelerde bulunulmuştur. Buna göre ilgili literatür araştırmaları alt başlıklarda anlatılmıştır.

2.1.1. Titanyumun tarihi ve genel bilgiler

18.YY'ın sonlarında keşfedilen titanyum ilk olarak 1950'li yıllarda Amerika Titanyum Metal Şirketi (TMCA) tarafından ticari anlamda işlenmeye ve kullanılmaya başlanmıştır [2]. Titanyum yerkürenin, alüminyum, demir ve magnezyumdan sonraki en çok bulunan metalidir. Bu değer nicel olarak Dünya'da bulunan metallerin %6'sını oluşturmaktadır. Buna ilaveten titanyum, miktar olarak tungsten elementinin 100 katı, bakır elementinin 60 katı, nikel elementinin 30 katı ve krom elementinin 20 katı hacmindedir. Ancak titanyum, oksijen ve azota karşı bileşik oluşturma ilgisinin yüksek oluşundan dolayı doğada saf olarak çok nadir bulunur [3].

Doğada bulunan titanyum metalinin yaklaşık %98'i TiO_2 (Titanyum dioksit) formundadır. Bu form madenlerden rutil cevheri (Resim 2.1) olarak çıkartılır ve işlenir. Bu işleme süreci diğer metallerle kıyaslandığında oldukça zordur. Bu zorluğun başlıca sebepleri, madenden çıkarılıp cevherden ayırıştırma aşamalarının oldukça karmaşık ve maliyetli olması, bu maden ve cevherlerin çok geniş bölgelere yayılmış olmasından dolayı gereken tesis sayısının fazla ve tesis maliyetlerinin yüksek olması olarak sıralanabilir. Bu nedenle titanyum diğer metallerle karşılaştırıldığında yüksek mekanik özellikler sergilemesine rağmen endüstride en çok tercih edilen malzemeler arasında bulunmaz [4].



Resim 2.1. Rutil cevheri [5]

Metallerle karşılaştırıldığında titanyum, ağırlıkça hafif olmasına rağmen çok yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Örneğin yoğunluğu çeliğin yaklaşık yarısına yakın olmasına karşın özgül dayanımı çelikten daha yüksektir [6]. Ek olarak titanyumun yorulma dayanımı da diğer metaller ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir [7]. Titanyum ısı genleşme katsayısı bakımından diğer metallerle oranla daha düşük bir seviyededir. Bu sayede diğer metallerle kıyasla daha yüksek çalışma sıcaklığı şartlarında kullanılabilir [8]. Titanyum reaktif bir malzemedir bu nedenle oksijen ile tepkimeye girerek yüzeyinde çok hızlı bir şekilde oksit/oksitlenme tabakası oluşturur. Titanyumun mükemmel korozyon direncine sahip olmasının sebebi bu oksit tabakasıdır. Titanyumun diğer bazı metallerle karşılaştırılması Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Titanyumun bazı metallerle fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması [9]

	Ti	Al	Fe	Ni
Yoğunluk [g/cm^3]	4,5	2,7	7,9	8,9
Erime Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	1670	660	1538	1455
Termal İletkenlik [W/mK]	15-22	221-247	68-80	72-92
Elastik Modül [GPa]	115	72	215	200
Oksijen ile Reaktivlik	çok yüksek	yüksek	düşük	düşük
Korozyon Direnci	çok yüksek	yüksek	düşük	orta
Malzeme Fiyatı	çok yüksek	orta	düşük	yüksek

2.1.2. Titanyumun kullanım alanları

Titanyum metalinin endüstride kullanımına bakıldığında titanyumun yüksek dayanımı, sağlamlığı, düşük yoğunluklu olması (hafifliği), ısı ve korozyon etkilere direncinin yüksek olması havacılık, uzay ve denizcilik başta olmak üzere biyomedikal ve otomotiv sektörleri gibi birçok alanda kullanılabilir kılmaktadır. Titanyum ile üretilmiş dişli örnekleri Resim 2.2’de gösterilmiştir.



Resim 2.2. Titanyum malzeme ile üretilmiş örnek dişliler [10]

Yüksek sıcaklıklarda çalışması gereken jet motor parçalarında, uçak kanat ve gövde yapılarında ve uzay araçlarında titanyum kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır. Buna ilaveten biyoyumluluğu ve yüzeyinde oluşturduğu oksit tabakasından dolayı vücut içerisinde kararlı kalması ve korozyona karşı direnç göstermesi titanyumu biyomedikal uygulamalarının vazgeçilmezi haline getirmiştir. Buna örnek olarak diz ve kalça protezleri ve diş implantları gösterilebilir. Ayrıca, literatürdeki titanyumun yüksek özgül mukavemet özelliği, farklı spor dallarında kullanılan spor ekipmanlarının ana malzemesi olarak seçilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte titanyumun maliyetinin yüksek oluşu, endüstride çoğunlukla yüksek güç ve dayanım isteyen maliyetli ürünlerde tercih edilmesine sebep olmuştur. Buna örnek olarak otomotiv sektöründe Formula 1 gibi yarış araçlarının bazı parçaları verilebilir.

2.1.3. Ti6Al4V alaşımı

Titanyumun mekanik özellikleri farklı metaller ile yaptığı alaşımlar ile zenginleştirilmiştir. Bu işlemde gerçekleştirilen en önemli metaller alüminyum, vanadyum ve demirdir. Ti6Al4V alaşımının içerdiği elementler izelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Ti6Al4V alaşımının kütlece yüzde element analizi [11]

Element	%
Ti	88,5-90,5
Al	5,5-6,5
V	3,5-4,5
Fe	0,25
O	0,13
C	0,08
N	0,05
H	0,0125

Titanyum alaşımlarından endüstride en çok talep göreni Ti6Al4V alaşımıdır. Titanyum üretiminin yarısı bu alaşımın elde edilmesi için kullanılmaktadır [12]. Buna ek olarak mevcut mukavemet değerlerinin geliştirilmesi amacıyla ısıl işlemler uygulanabilir. Ti6Al4V malzemeden üretilmiş bir sistem rneği Resim 2.3’te gösterilmiştir.



Resim 2.3. Ti6Al4V kullanılmış örnek sistem [13]

Ti6Al4V alaşımasının yüksek sıcaklıklarda oldukça kararlı bir yapıda olması, bu alaşımı çelik, nikel vb. esaslı diğer alaşımlardan üstün kılmaktadır. Bu alaşım eklemeli imalat sektöründe hammadde olarak kullanılmaya başlanmış ve bu sayede karmaşık geometrili parçalar malzeme kaybı olmadan tasarruflu bir şekilde üretilebilmektedir. Ti6Al4V alaşımasının mekanik özellikleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Ti6Al4V'nin mekanik özellikleri [14]

Ti6Al4V' nin Genel Özellikleri	
Ergime Noktası [°C]	1650
Yoğunluk [g/cm ³]	4,43
Sertlik [HV]	342
Poisson Oranı	0,33
Çekme Dayanımı [MPa]	890-1000
Akma Dayanımı [MPa]	795
Uzama Oranı	%10

Ti6Al4V malzeme için ısıtıl işlem uygulamaları

SLM yöntemi ile üretilen numunelerde; 650°C' de yapılan gerilme giderme işleminin, 800°C' de gerilme giderme işleminin yapıldığı numuneye göre çekme dayanımını yükselttiği gözlemlenmiştir [15]. Ti6Al4V malzemeye 760°C ve 1000°C' de tavlama işlemi yapıldığında ise 760°C' de havada soğutulan numunenin akma dayanımı, tavlama yapılmamış numuneye nazaran artmıştır. Bu artış miktarının fırında soğutulan numunede daha fazla olduğu belirlenmiştir. 1000°C' de yapılan tavlama sonuçlarında ise 760°C' de yapılan tavlama işlemine göre akma dayanımı daha az artış göstermiştir. Benzer sonuçlar en yüksek çekme dayanımı içinde söz konusudur [16]. Ayrıca Ti6Al4V numunesine HIP işlemi uygulanması en yüksek çekme dayanımında değişikliğe neden olmamıştır [17]. Ti6Al4V ve Ti6Al4V-B₄C kompozitine ayrı ayrı 650°C, 750°C, 850°C ve 950°C sıcaklıklarda 5 saat tavlama işlemi yapıldığında her iki malzeme için de 650°C' de yapılan tavlama işlemi sonrası akma dayanımlarında artış görünürken, tavlama sıcaklık dereceleri arttırıldığında doğrusal olarak azalmalar meydana gelmiştir [18]. Bunun yanında dövme yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerde, farklı sıcaklıklardaki ısıtıl işlem uygulamalarının çekme ve akma dayanımlarına etkisinin dikkate değer olmadığı anlaşılmıştır [15]. İki üretim yöntemi kıyaslandığında SLM ile üretilen numunelerin dövme ile üretilen numunelere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

SLM sonrası dövme işlemi uygulanan numunelerin ise akma ve çekme dayanımlarının düştüğü ancak kırılma tokluğunun yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 650°C’ de tavlama işlemi sonrası dövme ile üretilen numunenin sünekliği daha yüksek ölçülmüşken, 800°C’ de tavlama işlemi sonrası SLM ile üretilen numunenin sünekliği daha yüksek ölçülmüştür [15]. Ayrıca SLM ile üretilmiş Ti6Al4V numuneler için yüzde uzama değeri, 600°C’ de tavlandığında değişmemiş ve dövme ile üretilmiş numunelere göre daha düşük iken, tavlama sıcaklığı arttıkça, 800°C’ de tavlama sonrasında ciddi artış göstererek dövme ile üretilmiş numunelerden yüksek hale gelmiştir [15, 16, 19].

Elastik modüle ısıtılma işlemin etkisi incelendiğinde, 600°C’ de yapılan tavlama işlemi sonrası elastik modül artmışken, daha yüksek sıcaklıklarda tavlama yapıldığında modülün azaldığı tespit edilmiştir [19]. Uygulamanın basma dayanımına etkisini görebilmek için yapılan deneylerde, 800°C’ de ısıtılma işlemi görmüş numunenin dayanımının arttığı anlaşılmışken, HIP uygulanmış numunelerde ise basma dayanımı azaldığı anlaşılmıştır [20, 21]. HIP uygulanan numunelerin darbe deneyi sonuçları incelendiğinde, ek işlemsiz numunelere göre daha fazla darbe enerjisine karşı koyabildiği görülmüştür [17]. Yorulma açısından incelendiğinde ise, 740°C’ de yapılan ısıtılma işlemde ek işlemsiz numuneye göre değişiklik gözlemlenmezken, 900°C’ de yapılan ısıtılma işlemde ek işlemsiz numuneye göre yüksek yorulma mukavemeti gözlemlenmiştir. HIP uygulanan numunelerde ise diğer ısıtılma işlemlere göre daha yüksek yorulma dayanımı artışı ölçülmüştür [22, 23].

Ti6Al4V ve diğer titanyum alaşımları

SLM ile üretilen üç farklı Titanyum bazlı alaşımların (Ti6Al4V, Saf Titanyum ve Ti13Nb13Zr) mekanik özellikler açısından karşılaştırılması yapıldığında, elastik modülü, çekme dayanımı, süneklik ve yorulma dayanımı testlerinde en yüksek değerlerin Ti6Al4V alaşımında olduğu tespit edilmiştir [24]. Bazı titanyum bazlı malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.4’ te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Titanyum bazlı bazı malzemelerin mekanik özellikleri [24]

	En yüksek çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (MPa)	uzama ~ (%)	Yorulma Dayanımı (MPa)
Saf Titanyum	990	792	100	6	323
Ti6Al4V	1334	1110	107	6	360
Ti13Nb13Zr	1020	794	67	5	272

Ti6Al4V, Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo, Ti24Nb4Zr8Sn ve Ti6Al4V10Mo alaşımları kıyaslandığında sertlik, elastisite modülü, en yüksek çekme dayanımı açısından Ti6Al4V en iyi değerleri almasına rağmen yüzde uzama değeri en düşük alaşım olmuştur [25] [26] [27]. Bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 2.5’ te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri

	En yüksek çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (GPa)	Uzama ~ (%)	Sertlik (HV)	Ref.
Ti6Al4V	1130	962	107	9	360	[25]
Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo	863	845	68	30	309	[25]
Ti24Nb4Zr8Sn	665	563	53	14	240	[26]
Ti6Al4V10Mo	919	858	73	20	338	[27]
Ti5Al2Sn2Zr4Mo4Cr	1153	1118	-	5	413	[28]
Ti10V2Fe3Al	1128	1032	-	9	378	[29]
Ti2515Cr0.2Si	945	908	-	10	335	[30]
Ti15V3Al3Sn3Cr1Mo1Zr	800	800	-	20	275	[31]
Ti4Al1.5Mn	708	673	-	8	320	[32]
Ti35Nb7Zr5Ta0.35O	929	909	41	14	294	[33]
Ti3.5Al5Mo6V3Cr2Sn0.5Fe0.1B0.1C	1002	971	-	4	-	[34]
Ti-6Al-4.5Cr-1.5Mn	1091	1051	-	8	-	[35]
Ti6.5Al2Zr1Mo1V	956	888	-	14	-	[35]
Ti20V15Cr0.2Si	960	933	-	25	-	[36]
Ti25V10Cr0.2Si	900	865	-	24	-	[36]
Ti5Al2.5Fe	1020	895	112	15	-	[37]
Ti6Al7Nb	975	915	114	12	-	[37]

2.2. Eklemeli İmalat

2.2.1. Eklemeli imalatın doğuşu ve genel bilgiler

Eklemeli imalat 1980’li yıllarda geleneksel imalat yöntemlerine rakip olarak, malzeme eksilterek parça üretmek yerine malzeme ekleyerek parça üretme prensibine dayanan yeni bir teknoloji olarak bilim ve endüstri dünyasına giriş yapmıştır. İcat edildiği ilk dönemde eklemeli imalat tam anlamıyla potansiyelinin farkına varılmadığından dolayı sadece prototipleme olarak kullanılmaktaydı [38]. Yani, üretilmesi istenen nihai ürüne ulaşmadan önce bir prototip üretip üzerinde belirli testler yapılmaktaydı. Bu sürecin oldukça hızlı olmasından ve genelde prototip üretimi amacıyla kullanılmasından dolayı ilk zamanlar “Hızlı Prototipleme” adını almıştır. Eklemeli imalat ile üretilmiş örnek bir parça Resim 2.4’te gösterilmiştir.



Resim 2.4. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş bir örnek [39]

İstenilen herhangi bir geometrinin bilgisayar ortamında tasarlanıp kısa zamanda en az malzeme kaybı ile ekonomik olarak üretilebilirliği bu yöntemi çok hızlı bir şekilde büyüme göstererek endüstri pazarında en çok talep gören yöntemlerden biri yapmıştır. Araştırmalara göre 2023 yılında 21 milyar dolar pazar payına sahip olacağı öngörülmüştür [40]. Dördüncü Sanayi Devrimi ile evlere kadar giren eklemeli imalat otomasyon sistemi, yapay zeka teknolojisi ve robot kolları ile beraber çağın en önemli teknolojilerindendir.

Eklemeli imalatın diğer imalat yöntemlerine kıyasla bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajları kısaca şöyle özetleyebiliriz;

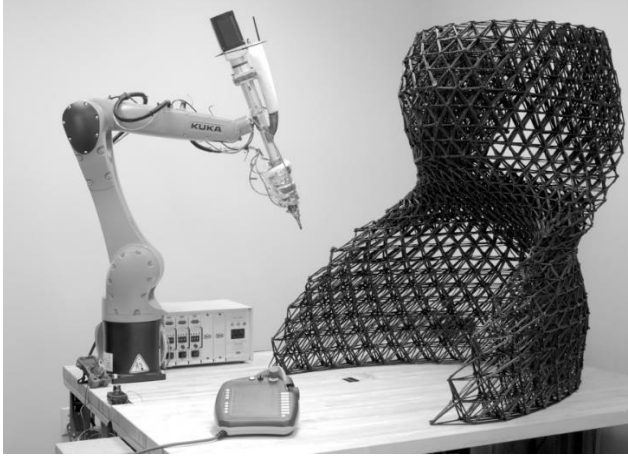
- Malzeme ekleyerek üretim yapıldığı için fire olabildiğince azdır.
- Yardımcı ekipmana ihtiyaç duyulmadan sadece eklemeli imalat cihazında nihai ürünler üretilebilir.
- Tasarımı yapılabilen karmaşık, boşluklu v.b. geometrilerin üretimi gerçekleştirilebilir.
- Geleneksel yöntemlerle üretilmiş bir parça, mekanik özellikleri değiştirilmeden daha az ağırlıkta üretilebilir.
- Birden çok malzeme türünden oluşan parçalar tek seferde üretilebilir.

Eklemeli imalatın diğer imalat yöntemlerine kıyasla bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajları kısaca şöyle özetleyebiliriz;

- Malzeme ekleme işlemi belirli bir platform üzerinde gerçekleştiğinden dolayı üretilecek parça boyutu platform boyutlarıyla sınırlıdır.
- Üretim işlemi malzeme ekleyerek yapıldığı için yüksek hacimli parçalarda imalat süresi geleneksel imalat yöntemlerinin gerisinde kalabilmektedir.
- Yöntemin çalışma prensibinden dolayı nihai ürünler pürüzlü olarak üretilmektedir.
- Teçhizat ve sarf giderleri geleneksel imalat yöntemlerine göre yüksektir.

2.2.2. Eklemeli imalatın kullanım alanları

Eklemeli imalat otomotiv, uzay, havacılık, tıp, diş hekimliği, kuyumculuk, kalıp yapımı ve mimari gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Tıp alanına örnek olarak günümüzde insan doku, organ ve kemikleri eklemeli imalat yöntemleri ile üretilebilmektedir. Ayrıca kan damarlarının üretimi üzerine çalışmalar yöntemin bu sektörde gelecekte de çok kullanılacağını (2025 yılında tıp alanındaki eklemeli imalat pazarının yaklaşık yüz kat artarak 1,9 milyar dolar olması beklenmektedir) göstermektedir [41]. Havacılık endüstrisine örnek olarak Boeing ve Airbus gibi uçak üreticilerinin bazı uçak parçalarını (22 000' den fazla) bu yöntemle üretmesi gösterilebilir [42]. Uzay sektöründe ise uzay yolculuklarında kargo kapasitesi sınırlı olduğu için hacimli parçaların üretilip taşınması yerine hammaddenin uzaya götürülüp uzayda eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesi sıradışı bir örnek olarak gösterilebilir [43]. Eklemeli imalat ile üretilmiş mimarlık alanında kullanılan bir yapı örneği Resim 2.5'te gösterilmiştir.

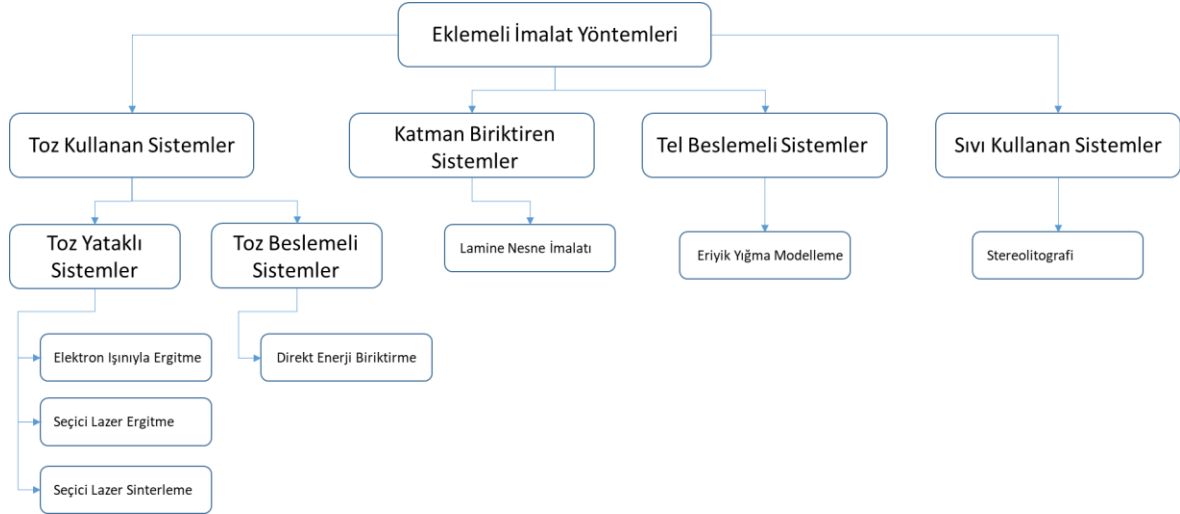


Resim 2.5. Eklemeli imalat ile üretilmiş yapı [44]

Önümüzdeki 10 yıl içerisinde eklemeli imalatın tüm sektörlerdeki pazar payının %85 olacağı öngörülmektedir. Tüm bunlarla beraber yüksek maliyetli parça imalatı yapan sektörlerde, kullanılamaz olan parçaların yeniden imalatı yerine eklemeli imalat ile daha ekonomik olarak tamiri veya yedek parça üretimi yapılabilmektedir. Buna örnek olarak Siemens firması, ürettiği gaz türbini parçalarının eklemeli imalat yöntemleriyle çok daha hızlı bir şekilde onarıldığını belirtmiştir [45].

2.2.3. Eklemeli imalat yöntemleri

Eklemeli imalat teknolojilerinin yaygınlaşması neticesinde Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) bu teknolojiyi standartları arasına almıştır. Bu standarda göre eklemeli imalat yöntemleri temelde yapılan işlem türüne, malzeme türüne, malzeme formuna ve işleme kaynağına göre dört sınıf altında incelenebilir. İşlem türüne göre ergitmeli, sinterlemeli ve kürlemeli olarak, malzeme türüne göre metal, polimer, seramik ve bunların kompoziti olarak, malzeme formuna göre toz, tel ve reçine olarak, işleme kaynağına göre ise lazer, elektron ışını ve ultraviyole ışını olarak eklemeli imalatı dallara ayırmak mümkündür. Eklemeli imalat yöntemleri Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri [46]

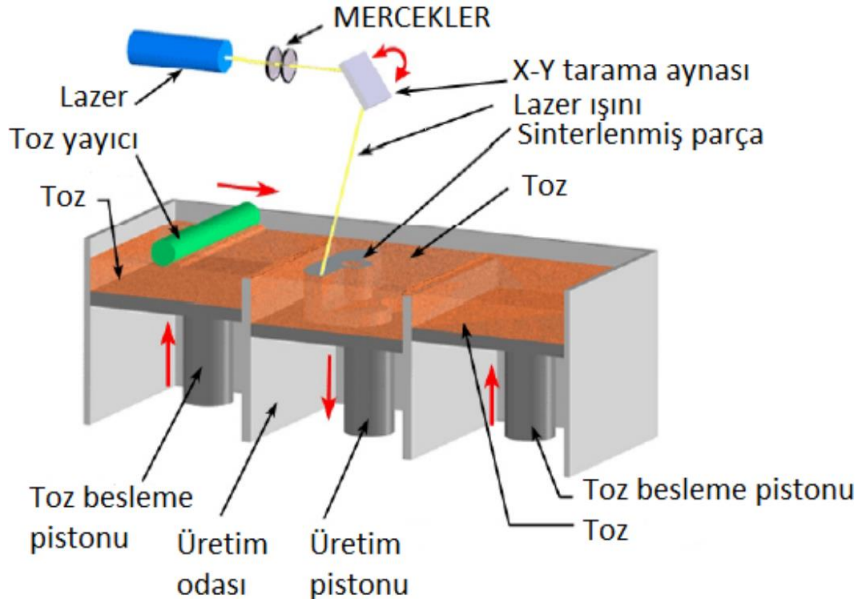
Bu tezde toz yataklı sistemlerden elektron ışınıyla ergitme yöntemi kullanıldığı için aşağıda toz yataklı sistemlere genel bir bakış ve bu sistemle çalışan yöntemlere değinilecektir.

Toz yataklı sistemlerde metal tozları bir hazneden üretim platformu üzerine, tasarım yapılırken belirlenen tek bir katman kalınlığı boyutunda serilip, tasarlanan parçanın mevcut katmandaki konumu bir lazer veya elektron ışını ile taranarak eritilir. Bu işlem üretim tamamlanana kadar katman katman devam eder. Üretim esnasında metal malzemenin oksitlenmesini önlemek amacıyla, lazer kullanan sistemde soygaz ortamında, elektron ışını kullanan sistemde ise vakum ortamında gerçekleştirilir. Toz yataklı sistemlerde kullanılan metal tozlarının boyutları 20 ile 100 mikrometre çapındadır. Toz metalurji teknolojisinin gelişmesiyle birlikte toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde paslanmaz çelik alaşımlar, takım çelikleri, bakır alaşımları, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, kobalt alaşımları, nikel alaşımları ve süper alaşımlar kullanılmaya başlanmıştır. Toz yataklı sistemler aşağıda incelenmiştir.

Seçkili lazer sinterleme

Seçkili lazer sinterleme (SLS) yöntemi tasarlanan bir modelin katman katman eklenerek üretilmesi yöntemlerinden biridir. Bu sistemde metal tozlarına lazer ışını yansıtılarak lazer kaynağının ısı enerjisinden dolayı tozların sinterlenmesi sağlanır. Üretim öncesi tozlar serbest halde bulunurlar. Bu yöntem ile oluşturulan yapı yaklaşık %95 yoğunlukta

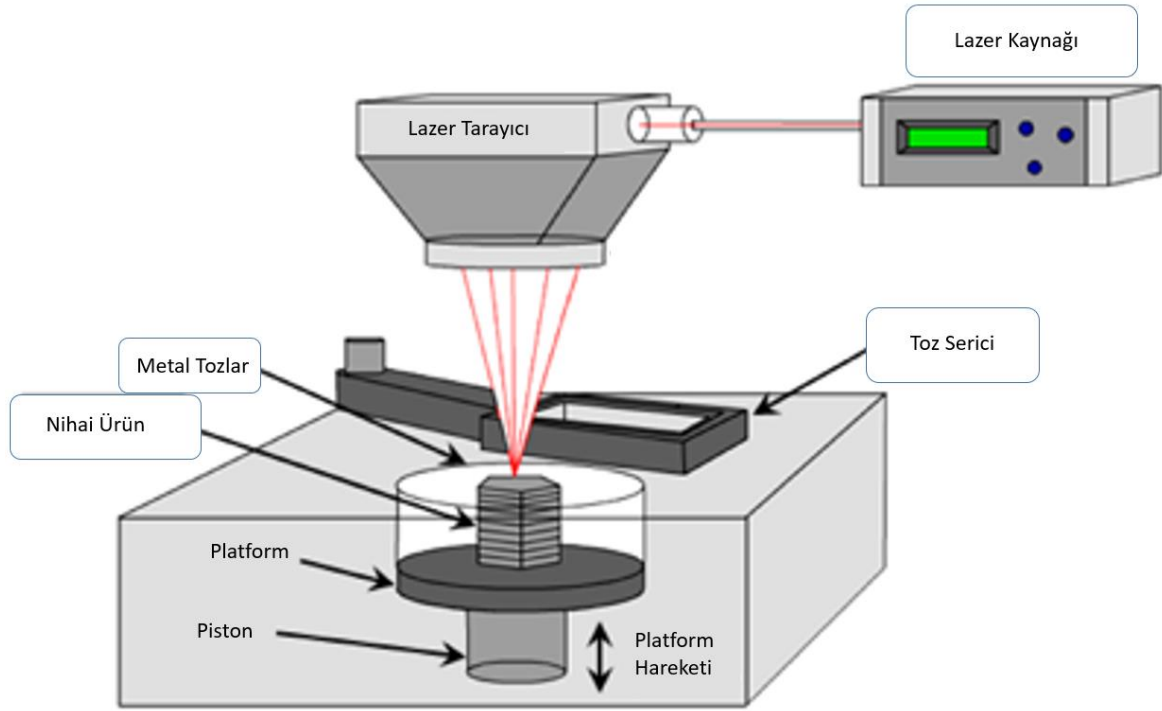
olabildiği için üretim öncesi ısıtılma işleme ihtiyaç duyulmaz [47]. SLS yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. SLS yönteminin şematik gösterimi [48]

Seçkili lazer ergitme

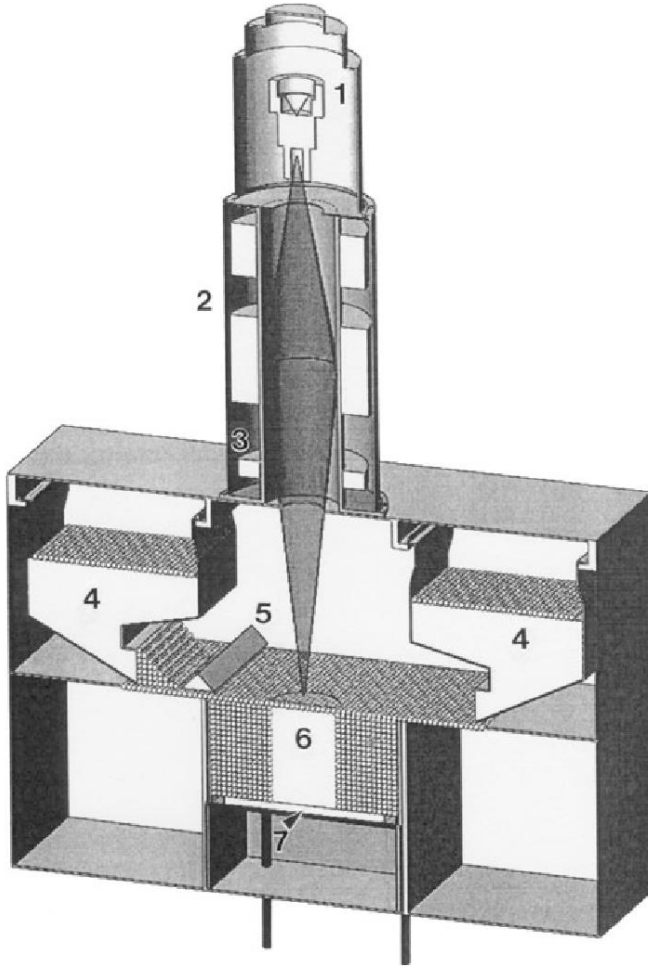
SLM yöntemi, SLS yöntemiyle temelde benzer prensiplere dayanmaktadır. Bu yöntemler arasındaki en belirgin fark taneciklerin birbirine bağlanma sıcaklığıdır. SLS yönteminde tanecikler yüzeyde bir noktadan eriyip birleştirme sağlanırken SLM yönteminde tanecikler tamamen ergitilip birleştirme sağlanır. Ayrıca SLM yönteminde ergitme işlemi metal malzemenin oksitlenmesini önlemek amacıyla koruyucu bir soygaz ortamında gerçekleştirilir. Sonuç olarak bu yöntem SLS yönteminden daha düşük yüzey pürüzlülüğünde parçalar üretebilir. SLM yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.3’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. SLM yönteminin şematik gösterimi [49]

Elektron ışınlıya ergitme

EBM yöntemi diğer toz yataklı sistemlere benzer olarak tasarlanan bir geometrinin, her bir katman için metal tozlar serilerek, bu tozların ergitilmesi prensibine dayanır. Bu yöntemde ergitme, elektron tabancasında bulunan tungsten filamentinin ısıtılmasıyla hızlandırılmış elektron ışınlarının metal tozlara manyetik lensler aracılığıyla yönlendirilmesi sonucu oluşan ısı enerjisi vasıtasıyla sağlanır. Ayrıca ergimiş metalin oksijen ile temasını önlemek amacıyla çalışma ortamı vakum altına alınmaktadır. Bu sistem elektron ışınlarının malzemeyi ergitme prensibine dayandığı için kullanılacak tozlar elektriksel iletken olmak zorundadır. Elektron ışınları, katmanın her bir noktasına aynı anda erişebildiği için üretim hızlıdır. Üretilcek katmana elektron demetinin çarpması, katmandaki tozları uçurup toz bulutu oluşturacağından dolayı katmana düşük yoğunluklu elektron gönderilerek katmandaki tozlar sinterlenip uçuşmaları engellenir. Bu işlem aynı zamanda bir ön ısıtma olarak görev yaptığı için üretilen nihai ürünlerde kalıcı gerilme de önlenmiş olur. Bu yöntemde kullanılan tungsten filament sayesinde 3500°C gibi oldukça yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Üretim bitiminde sistemdeki vakum kaldırılıp, sisteme Helyum gazı verilerek nihai ürünün elektriklenmesi önlenmiş olur. EBM yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.4' te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. EBM yönteminin şematik gösterimi: 1) Elektron tabancası; 2) Odaklayıcı; 3)Yönlendirici; 4) Toz haznesi; 5) Toz serici; 6) Nihai parça; 7) Platform. [50]

EBM yönteminde kullanılan tozlar, titanyum alaşımları, krom kobalt alaşımları, süper alaşımlar ve refrakter metaller olarak sıralanabilir. EBM yönteminde ergitme için diğer toz yataklı sistemlere göre çok daha az enerji gerekmektedir. Bu yöntemde kullanılan toz partikül boyutu büyüktür. Bundan dolayı katman kalınlığının yüksek oluşu nihai ürünlerin yüzey kalitesinin düşük olmasına neden olur [51].

Ti6Al4V alaışımının farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesinde farklı mekanik özelliklerin ortaya çıktığı görülmüştür. Literatüre bakıldığında SLM ile üretilmiş numunelerin yorulma dayanımının EBM ile üretilmiş numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [2, 52-55]. Ancak üretim sonrası, iki üretim yöntemiyle üretilen numunelere yüzey parlatma işlemi yapıldığında EBM ile üretilmiş numunelerin yorulma dayanımının daha fazla olduğu tespit edilmiştir [52]. Bununla beraber geleneksel üretim yöntemi olan sıcak haddeleme ile üretilmiş Ti6Al4V malzemenin yorulma dayanımı iki

eklemeli imalat yöntemiyle üretilen numunelerden daha üstündür [55]. Çekme dayanımı açısından incelendiğinde, SLM ile üretilmiş numunelerin EBM ile üretilmiş numunelere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu anlaşılmıştır [2, 56]. Sertlik yönünden bakıldığında, SLM ile üretilmiş numunelerin mikro yapısının alfa martenzit, EBM ile üretilmiş numunelerin mikro yapısının alfa+beta olması hasebiyle SLM ile üretilen numuneler daha serttir [53, 54, 56]. Üretim sonrası yüzey pürüzlülüğü kıyaslandığında EBM ile üretilmiş numunelerin daha büyük toz kullanıldığı için pürüzlülüğün fazla olduğu görülmüştür [2, 52-54]. EBM ile üretim esnasında ön ısıtma gerçekleştiğinden dolayı SLM ile üretilen numunelere göre daha az artık gerilmeler meydana gelmektedir [55]. SLM ile üretilen numunelerin yoğunluğu EBM ile üretilen numunelere göre daha düşüktür. Bu nedenden dolayı EBM ile üretilen numunelerin sünekliği yüksektir [54, 56]. Bu iki üretim yöntemi için, üretim parametreleri olarak seçilen yatay ve dikey oryantasyonun çekme testi sonucu incelendiğinde, iki yöntem için de dikey oryantasyon ile üretilen numunelerin en yüksek çekme dayanımı ve sünekliği yüksek ölçülmüştür [56].

EBM ile diğer bir eklemeli imalat yönteminin karşılaştırılması amacıyla lazer tel beslemeli üretim yöntemi ile yatay ve dikey oryantasyonlarda üretimler gerçekleştirilmiştir. Bu üretimlerin mekanik testleri sonucunda, lazer tel besleme ile üretilmiş numunelerde, yatay üretilmiş numunelerin çekme dayanımı dikey üretilmiş numunelerinkinden yüksek çıkmıştır. Bununla beraber süneklik değerleri iki oryantasyon için benzerdir. Lazer tel beslemeli üretim yöntemi ile üretilmiş numunelerin, aynı oryantasyon için en yüksek çekme dayanımına bakıldığında EBM ile üretilmiş numunelere kıyasla sonuçları daha yüksek ölçülmüştür. Buna rağmen süneklik konusunda EBM ile üretilmiş numunelerin daha üstün sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [57, 58]. Üretilen numunelere ısıtma işlemi uygulanması mekanik özelliklere çeşitlilik kazandırır. Bu hususta EBM ve lazer tel besleme ile iki oryantasyonda üretilmiş numunelere ısıtma işlemi uygulandığında geleneksel yöntemlerden olan döküm ve dövme ile üretilmiş numunelerin çekme dayanımına yakın sonuçlar ölçülmüştür [57, 59]. Bu genellemenin istisnai durumu, lazer tel besleme ile dikey yönde üretilen numunelerin geleneksel yöntemlerle üretilmiş numunelerden daha düşük çekme dayanımına sahip olmasıdır [57].

Bu tezde de çalışılan EBM yönteminin bazı üretim parametrelerinin ve üretim sonrası bazı ardıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisi sıklıkla araştırılan bir durumdur. Üretim öncesi belirlenen parametrelere bakıldığında; iki farklı ortalama çap büyüklüğünde toz ile üretim

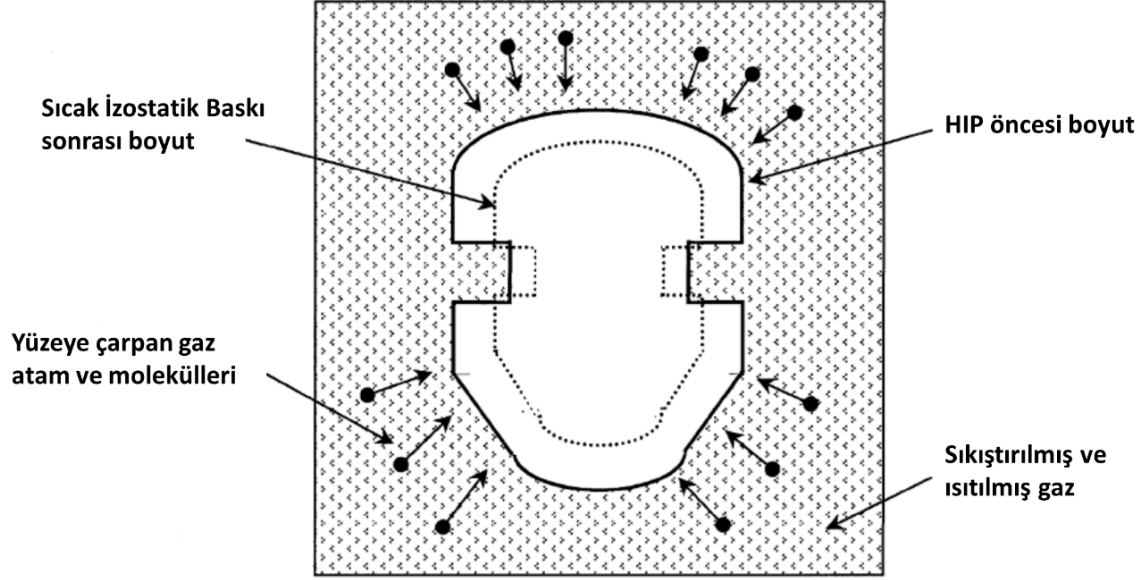
yapıldığında toz çapı küçüldükçe sertliğin azaldığı görülmüştür. Aynı tozda üretim yapılırken katman kalınlığının azaltılması yine sertliğin azalmasına neden olmuştur. Bahsedilen bu parametrelerin elastik modüle etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber toz boyutunun küçülmesi üretim sonrası yüzeylerinin daha kusurlu hale gelmesine neden olmuştur [60]. Üretim sürecindeki parametrelere bakıldığında; EBM ile üretilen numunenin üretim tablasına göre konumunun (ön kenar, merkez, arka kenar) ve üretim esnasında tablaya olan dikey mesafenin (0mm, 90mm) mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde, konuma göre; merkezde üretilen numuneler daha çok gözenek bulundururken, ön kenarda üretilen numuneler daha yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin üretim tablasındaki konumunun değişmesinin sertlik ve yüzde uzama değerlerine etki etmediği gözlemlenmiştir. Tablaya olan mesafe açısından incelendiğinde, yüksekte üretilen numune daha gözenekliyen, sertlik ve çekme testi bulguları bütün mesafelerde benzer nitelik taşımaktadır [58]. Üretim için aynı geometrideki numunelerin düz, yan ve dik oryantasyonda üretilmesi sonucunda; dik üretilen numune diğerlerinden daha pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda yorulma dayanımı en düşük olan numune, dik üretilen numune olmuştur. Çekme dayanımı ve sertlik açısından düz oryantasyonda üretilen numune en yüksek değerlere sahiptir. Ancak düz üretilen numune diğerlerine göre daha gözenekli yapıdadır [61]. Üretim esnasındaki enerji yoğunluğunun artırılması, sertliğin artmasını sağlamışken, en yüksek çekme dayanımı orta düzey enerji yoğunluğunda üretilen numunede görülmüştür [62]. Üretim sonrasında numunelere uygulanan ardıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisi araştırıldığında; üretim sonrası uygulanan dağlama işleminin numunelerin elastik modülünü, çekme dayanımını ve sünekliğini arttırdığı görülmüşken, [63] 650°C’ de yapılan ısıtma işlemi sonucunda; çekme, akma ve yorulma dayanımlarında artış olmuştur. Ancak aynı derece için süneklikte düşüş gerçekleşmiştir [64].

2.3. Ardıl İşlemler

2.3.1. Sıcak izostatik pres

1955 yılında icat edilen HIP, yüksek sıcaklık (yaklaşık 2000°C) ve basınç (yaklaşık 200 MPa) altında parçanın, yüksek mukavemet özelliklerine sahip bir tank içerisinde belirli bir soygaz aracılığıyla sıkıştırılarak üretim kusurlarının giderilmesi esasına dayanır [65, 66]. Bu işlem diğer geleneksel sıkıştırma işlemlerinin aksine, parçaya bir veya birkaç yüzeyden

baskı yerine, sıkıştırma mekanizması ortamdaki gaz ile sağlandığı için bütün hacmine aynı anda ve aynı miktarda baskı uygulama işlemidir. HIP işleminin genel şaması Şekil 2.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sıcak izostatik pres işleminin genel şematığı [67]

Üretim esnasında meydana gelen gözenekler, geleneksel olarak sıcak dövme işlemi ile giderilmeye çalışıldığı için parça üzerinde şekil bozuklukları meydana gelebilir. Ancak HIP işleminde baskı izostatik olarak gerçekleştirildiği için parçanın şekli bozulmadan gözenekler giderilebilir. Bu işlem daha önce üretilmiş metal, polimer veya kompozit parçanın, şeklinde herhangi bir değişiklik yapmadan, üretim sırasında ortaya çıkan mikro ve makro gözenekler gibi bazı kusurları gidererek mekanik özelliklerin artmasını sağlar [66]. Ayrıca bu işlem seramik malzemeden yapılmış parçalarda yoğunluk arttırmak amacıyla da kullanılmaktadır [68]. Bazı malzemelerin sıcak izostatik pres işlemi koşulları Çizelge 2.6’ da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Bazı malzemelerin sıcak izostatik pres işlemi koşulları [67]

Malzeme	Erime Noktası (°C)	HIP Sıcaklığı (°C)	HIP basıncı (MPa)
Al ve alaşımları	660	500	100
Al/Al ₂ O ₃	-	300	350
Bakır ve alaşımları	1083	800 -950	100
Berilyum ve alaşımları	1289	900	103
Nimonik ve süperalaşımlar	1453	1100 -1280	100 -140
Hidroksiapatit	-	1100	200
Mg/Zn Ferrit	-	1200	100
TiAl	-	900 -1150	35 -200
Ti ₃ Al	-	925	200
Seramik süperiletkenler	-	900	100
Çelikler	1536	950 -1160	100
Titanyum ve alaşımları	1670	920	100
Al ₂ O ₃	2050	1500	100
Al ₂ O ₃ / Cam	-	1400	100
Al ₂ O ₃ / TiC	-	1935	150
Al ₂ O ₃ / ZrO ₂	-	1500	200
SiC	2837	1850	200
B ₄ C	-	2000	200
WC/Co	2867	1350	100

HIP işlemi metal malzemelerde mikroyapı ve faz yapılarında çoğunlukla olumsuz etki bırakmadığı için gözenek giderilme işlemlerinde endüstride özellikle tercih edilmektedir [69]. Bu özelliğinden dolayı üretimdeki hurda miktarını nerdeyse sıfıra indirerek üretilen parçaların güvenilirliğini artırır [68]. HIP yönteminin geleneksel yöntemlere kıyasla bazı avantajları şöyle sıralanabilir;

- İşlem yoğun soygaz ortamında gerçekleşmesi, ısı transferini kolaylaştırarak hızlı ısıtma imkânı sağlar.
- Isıtma işleminin homojen olması, kırılğan malzemelerde bile bu işlemin uygulanabilir olmasını sağlar.
- Çok karmaşık şekilli parçalara bu işlem uygulanabilir.
- İşlem sonrası parçalar tamamen homojen yoğunluktadır.

İlk olarak nükleer endüstride kullanılmak üzere geliştirilen HIP işleminin gelişmesiyle birlikte madencilik, elektronik, uzay ve havacılık, otomotiv, savunma ve biyomedikal endüstrileri olmak üzere birçok endüstride kendisine pazar oluşturmuştur [70]. Bu

sektörlerde genellikle titanyum alaşımları, paslanmaz çelikler ve nikel alaşımları gibi yüksek özellikli metallere HIP işlemi yapılmaktadır. Örnek olarak uzay ve havacılık sanayiinde üretilen uçak türbin kanatlarının gözeneklerinin giderilmesinde, biyomedikal endüstrisinde eklem protezlerinin geliştirilmesinde ve otomotiv endüstrisinde motor ekipmanlarının iyileştirilmesinde HIP işlemi tercih edilmektedir.

Eklemeli imalat ile üretilmiş numunelere üretim sonrasında HIP (920°C, 100MPa, 2 saat) işleminin uygulanması, malzemede bulunan gözenek miktarını ciddi oranda azaltmıştır [71]. Bunun sayesinde üretim sonrası HIP uygulanan numunelerde yorulma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir [52, 53, 55, 63, 72, 73]. Bazı çalışmalarda HIP'in parametrelerinde ufak değişiklikler yapıp yorulma dayanımına etkisi araştırılmıştır. 900°C, 100Mpa, 2 saat; 1000°C, 150Mpa, 1 saat; 930°C, 130MPa, 3saat; 900°C, 103MPa, 2 saat parametrelerinde yapılan HIP işlemi sonrasında, standart HIP uygulamasına göre benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır [56, 59, 64, 71, 74]. EBM ile üretilmiş numunelerin SLM ile üretilmiş numunelere göre yorulma dayanımının daha düşük olduğu eklemeli imalat başlığı altında açıklanmıştır. Bu iki yöntem ile üretilmiş numunelere HIP uygulandığında, EBM ile üretilmiş numunelerin yorulma dayanımlarının, SLM ile üretilmiş numunelerinkinden daha yüksek olduğu görülmüştür [52]. Üretilen numunenin tablaya dikey ve yatay yerleştirilmesinin yorulmaya etkisi incelendiğinde, HIP işlemi iki oryantasyonda üretilen numunelere yorulma dayanımlarında artış sağlarken, dikey üretilen numunenin yorulma dayanımını orantısal olarak daha çok arttırmıştır [74]. EBM ile üretilen numunede üretim parametresi olarak doluluk oranları (%33, %50, %84) kullanılıp sonrasında uygulanan HIP işleminin yorulmaya etkisi incelendiğinde, %33 doluluk oranıyla üretilen numunenin HIP sonrası yorulma dayanımı düşmüş olup, %50 ve %84 doluluk oranlarında yorulma dayanımı artmıştır. Eklemeli imalat sonrası HIP işleminin diğer mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımını azalttığı görülmüştür [53, 56, 59, 63, 64, 71, 74]. Ancak HIP sonrası pürüzlerin giderilmesi amaçlı talaş kaldırma işlemi yapıldığında, HIP yapılmamış numuneye göre en yüksek çekme dayanımı artmıştır [55, 63]. HIP sonrası malzemede beta titanyum fazlarının genişlemesi sonucu süneklik artışı meydana gelmiş [59, 63, 64], elastik modülde ise değişiklik olmamıştır. Diğer taraftan HIP sonrası talaş kaldırma işleminin elastik modülü arttırdığı tespit edilmiştir [63]. Eklemeli imalat ile üretim sonrası numuneye uygulanan HIP işleminde sertlikte düşüş gözlemlenmiştir [53, 72, 73].

2.3.2. Nitrürleme

Nitrürleme işlemi, 20. yüzyılın başlarında Alman bilim adamları tarafından malzeme yüzeyinin sertleştirilmesi amacıyla yapılan termokimyasal bir yüzey işlemidir [75]. Bu termokimyasal işlem, metal yüzeyine çeşitli yöntemlerle, azot atomlarının diğer metal atomlarından çok daha küçük olmasından faydalanılarak sıcaklık etkisiyle difüze edilmesidir. Bu difüzyon sonucunda yüzeyde metal-nitrür içeren sert bir koruyucu tabaka oluşturulur. Sertleştirme işlemi sadece yüzeyde gerçekleştiği için malzemenin yüzeyden derin kısımları işleminden etkilenmez. Genel mekanizması, özellikle çeliklere uygulanan karbürleme işlemine benzese de sistemdeki gazın bileşimi ve işlem sıcaklığı açısından farklıdır. Neredeyse bütün metaller uygun sıcaklıklarda azot ile etkileşime girerek metal-nitrür bileşiği oluşturabilir. Ancak nitrürleme işlemi, yapılarında kimyasal olarak azota ilgi duyan element bulunduran malzemeler için daha uygundur . Bu elementlerin bazıları Ti, Al, V, W, Mo, Cr olarak sıralanabilir [76].

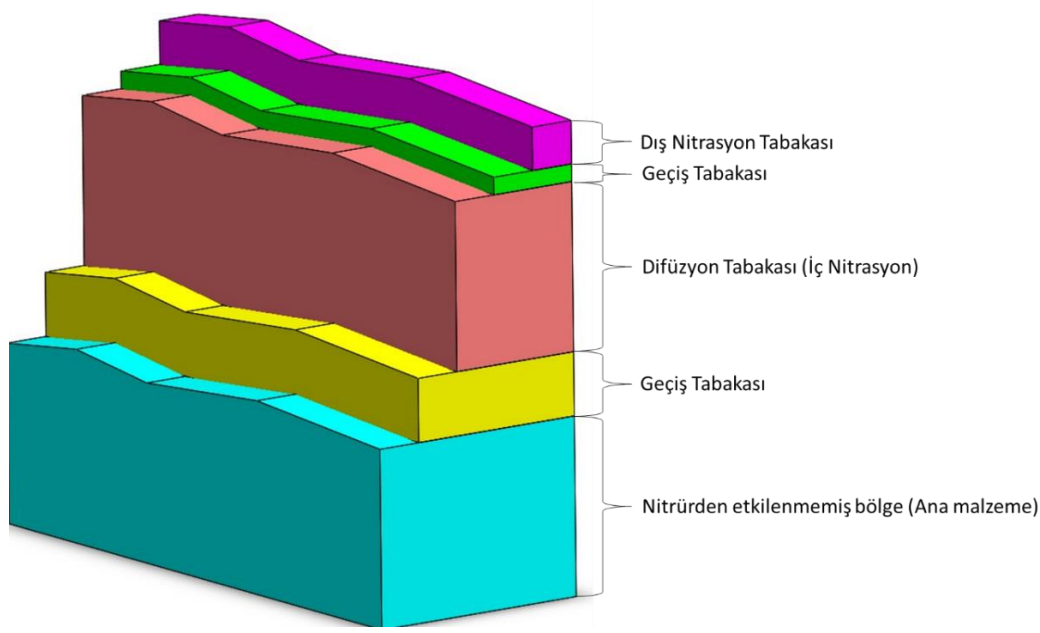
Malzemenin yorulma mukavetini, aşınma ve korozyon dirençlerini arttırmaya yarayan nitrürleme işlemi, diğer benzer yüzey sertleştirme işlemlerinden (karbürleme, borlama) daha avantajlıdır [77]. Bunun en önemli nedeni işlem sıcaklığının temperleme sıcaklığından düşük olmasıdır. Bu özelliğinden dolayı nitrürleme işleminde parçaya hızlı soğutma yapılmadığı için ısıl gerilmelerin, oksidasyonun ve distorsiyonun en az seviyede oluşu ve ucuzluğu nitrürleme işlemini diğer işlemlere göre avantajlı konuma getirmiştir [75]. Nitrürleme işlemlerinin karşılaştırmalı parametreleri Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.7. Nitrürleme işlemleri parametre karşılaştırması [78]

Nitrürleme Türü	İşlem Ortamı	Nitrürleme Sıcaklığı (°C)	Süre (saat)	Sertlik Derinliği (µm)	Sertlik (HRC)
Gaz	Susuz amonyak	480 - 1200	10 - 120	0,1 - 750	50 - 70
Tuz Banyosu	Siyanür bazlı tuz	510 - 1060	0,1 - 4	2,5 - 750	50 - 70
Plazma	H + N + CH ₄	340 - 1250	0,1 - 30	50 - 750	50 - 70

Nitrürleme işlemi sonucunda nitrürlenmiş malzemenin yüzeyinde yaklaşık 1-20 mikrometre kalınlığında harici bir katman meydana gelir. Bu katman yoğun nitrür bileşiği içerdiğinden dolayı oldukça sert ve kırılgandır. Katman bu özelliğinden dolayı genelde olabildiğince

ince bir tabaka olarak istenmektedir. Bu katmanın kalınlığı işlem parametreleri değiştirilerek inceltip kalınlaştırılabilir. Bu sert ve kırılğan tabakanın altında difüzyon tabakası adı verilen, dış katman kadar sert olmasa da parçanın mekanik özelliklerini yükselten asıl bölge bu tabakadır. Difüzyon tabakası yüzeydeki katmanın aksine 250 mikrometre kalınlıklarına kadar çıkarılabilmektedir. Nitrürleme sonrası parça yüzeyinde oluşan katmanlar Şekil 2.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Nitrürleme sonrası oluşan katmanlar

Tarihte ilk olarak demir içeren parçalar üzerinde kullanılmaya başlanmış olan nitrürleme işleminin, uzun yıllar boyu gelişimi sürmüştür ve son yıllarda havacılık endüstrisi, otomotiv sanayisi, türbin üretimi ve birçok çeşitte makine parçası başta olmak üzere çok farklı endüstri kolunda ve neredeyse tüm malzeme türlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [79].

Endüstride kullanılan nitrürleme yöntemlerinin genel mekanizmaları aynı olup, azot atomlarının malzeme yüzeyine gönderilme yolu açısından farklılıkları bulunmaktadır [76]. Bu yöntemlerin başlıcaları gaz nitrürleme, plazma nitrürleme ve tuz banyosu nitrürleme olup özel işlemler için geliştirilmiş özel yöntemler de mevcuttur. Bu başlıca yöntemler alt başlıklar altında incelenecek olup bu tez çalışmasında kullanılan gaz nitrürleme yöntemi detaylı olarak anlatılacaktır.

Tuz banyosu nitrürleme

Tuz banyosu nitrürleme işleminde malzeme, nitrürlenmek üzere erimiş tuz içine gömülerek gerçekleştirilir. Yöntemdeki tuz, içerisinde siyanat bulunduran azotlu bir çözeltilidir. Nitrürleme işlemi sonunda parça suda ani olarak soğutulur. Bu nedenle parçanın boyutsal kararlılığı çok fazla korunamaz. İşleminde kullanılan malzemeler yüzünden çevreye ve insan sağlığına zararlı bir yöntemdir. Tuz banyosu nitrürleme yöntemi daha çok paslanmaz çelikler, takım çelikleri ve karbonlu çelikler gibi çelik türlerine uygulanmaktadır [80].

Plazma nitrürleme

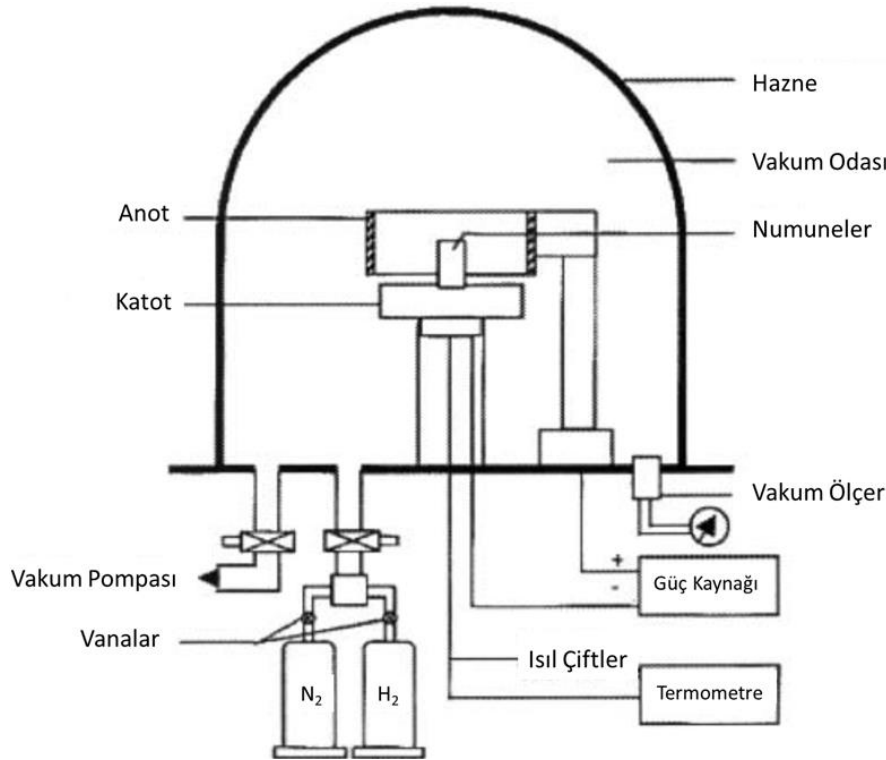
İyon nitrürleme olarak da bilinen plazma nitrürleme işleminde, metal yüzeyine yapılacak olan azot difüzyonu, yüksek voltaj değerindeki bir akım kaynağı aracılığıyla, ortamdaki azotun iyonlarına ayrıştırılmasıyla oluşan plazma formu ile gerçekleştirilir. Azot iyonları ivmeli olarak parça yüzeyine yönlendirilerek nitrürleme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemdeki azot kaynağı azot içeren gaz karışımı ya da amonyak olabilir.

Yöntemin ilk yatırım maliyetleri yüksek olsa da genel bakım masrafları düşüktür. Diğer yöntemlere göre en önemli avantajı dış yüzeyinde oluşan tabakanın daha az kırılgan olmasıdır. Ancak aynı işlemde sadece kalınlıkları birbirine yakın malzemelerin nitrürlenebilir olması ve azot iyonları parçaya doğrusal olarak gönderildiği için karmaşık yapıdaki parçalara uygun olmaması diğer yöntemlere göre dezavantajıdır.

Gaz nitrürleme

Gaz nitrürleme işleminde, nitrürlenecek olan malzemeye azot, gaz formunda, sıcaklık ve basınç kontrollü olarak difüze edilmektedir. Bu sayede nitrürleme işlemi homojen olarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlemdeki söz konusu gaz, N_2 , H_2 ve NH_3 karışımından meydana gelmektedir. Gaz nitrürleme işleminde difüzyon, N_2 gazından değil NH_3 gazı kullanılarak gerçekleşmektedir. Sistemde N_2 gazı, malzemenin oksitlenmesini önlemek amacıyla tepkimeye girmeyen soygaz görevi görür. N_2 gazı kullanılmaz ise oluşacak olan oksit tabakası nitrürleme işlemini engellemektedir. H_2 gazı ise NH_3 gazının derişimini ayarlamak amacıyla kullanılır [81]. İşlem, düşük kısmen düşük sıcaklık ve metal gaz etkileşimiyle gerçekleştiği için difüzyon hızı oldukça düşüktür. Bu nedenle nitrürleme

süresi çok uzun olabilmektedir. Nitrürleme işlemi sonrası parçalar kontrollü bir şekilde hava ortamında soğutulmaktadır. Bu yavaş soğutma işlemi nitrürlenmiş parçada ısıl gerilmelerin oluşmasını engellemektedir. Gaz nitrürleme işleminden önce oksitlerin temizlenmesi, işleme esnasında yüzeyde kalabilecek yağların temizlenmesi gibi yüzey hazırlama işlemleri önem arz etmektedir. Bu yöntemde kullanılan malzemeler çoğunlukla çelikler, titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımlarıdır. Gaz nitrürleme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Gaz Nitrürleme işleminin şematik gösterimi [82]

Gaz nitrürleme işlemi, yüzey kalitesini değiştirmemesi, seri üretime uygun oluşu, çevre ve insan sağlığına zarar vermemesi gibi özelliklerinden dolayı tuz banyosu nitrürleme yönteminin yerini almaya başlamıştır [83]. Bununla beraber karmaşık şekilli parçaların nitrürlenebilmesi, fırın içinde sık ve temas halinde parça yerleşimine izin vermesi ve ekonomik oluşu gibi özelliklerinden dolayı plazma nitrürleme yönteminin önüne geçmektedir. Ancak nitrürleme süresinin uzun olması ve ilk yatırım maliyetinin yüksek oluşu gibi dezavantajları bulunmaktadır. Nitrürleme işlemlerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.8’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. Nitrürleme işlemlerinin avantaj ve dezavantajları [84]

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajları
Gaz nitrürleme	Dış nitrürleme katman kalınlığının ve faz içeriğinin kontrol edilebilmesi	Paslanmaz çelikler için aktivatöre ihtiyaç duyulması
	İşlemin tam otomatik olması	
	Bütün parametrelerin kontrol edilebilmesi	
	Sonuçların tekrarlanabilir olması	
	Basit ve kolay olması	Çok uzun işlem süreleri olması
	İşlem sonrası taşlama gereksinimi olmaması	
	Düşük sıcaklıklarda uygulanabilir olması	
Tuz Banyosu Nitrürleme	Hızlı ısıtma olanağı	İşlemin kontrollü olmaması
		Sadece kısa süreli yapılabilmesi
	Düşük karbonlu çeliklerde iyi yüzey kalitesi vermesi	İşlem sonrası tuz kalıntılarının temizlenmek zorunda olması
	İşlem sonrası su verebilme imkânı	Sağlığa zararlı malzeme kullanılması
		İşlem sonuçlarının parça geometrisine ve fırın yerleşimine bağlı olması
Plazma Nitrürleme	Nitrür istenmeyen bölgelerin maskelenebilmesi	Sıcaklık kontrolünün zor olması
		Sıcaklık homojenliğinin az olması
	Paslanmaz çeliklerin nitrürlenebilmesi	İşlem boyunca takip gerekliliği
		İşlem sonuçlarının parça geometrisine ve fırın yerleşimine bağlı olması
	Düşük sıcaklıklarda uygulanabilir olması	

Ti6Al4V malzemesine nitrürleme ardıl işlemi uygulamak malzemenin mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Yorulma dayanımı açısından bakıldığında, nitrürlemenin yorulma ömrüne olumsuz etki gösterdiği tespit edilmiştir [85-88]. Nitrürleme işleminin süresi arttırıldığında bu olumsuz etki daha da artmaktadır [87]. Nitrürleme sonrası talaş kaldırma işlemi, nitrürlemenin yorulma dayanımı üzerindeki olumsuz etkisini azaltır [85, 86]. Nitrürleme ile aynı süre ve sıcaklıkta uygulanan ısıt işlemler kıyaslandığında, ısıt işlemlerin nitrürlemeye göre daha yüksek yorulma dayanımı

sağladığı gözlemlenmiştir [85, 86]. Nitrürleme işlemi en yüksek çekme dayanımını düşürmüşken [85, 86, 88, 89], aynı süre ve sıcaklıkta uygulanan ısıtma işlemleri nitrürlemeye göre daha yüksek çekme dayanımı sağlamıştır [86]. Ancak nitrürlemenin sertliğe etkisi araştırıldığında, sertliği ciddi anlamda arttırdığı tespit edilmiştir [85-98]. Bu sertlik artışının, nitrürleme süresi ve sıcaklığı arttıkça yükseldiği görülmüştür [87-89, 91, 92, 94, 96, 97]. Aynı şekilde nitrürleme süresi ve sıcaklığı arttığında difüzyon derinliği de artar [87, 92, 93, 96, 98]. Bunun yanında aynı süre ve sıcaklık için yapılan nitrürlemede, ortamın %100 N₂ yerine %96 N₂ ve %4 H₂'den oluşması sertliğin ve difüzyon derinliğinin artmasına neden olmuştur [96]. Öte yandan nitrürleme ile ısıtma işlemlerinin sertliğe etkisini kıyasladığımızda, aynı sıcaklık ve süredeki tavlama ve gerilme gidermeye göre nitrürlemenin en yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür [85, 86, 88, 96]. Ancak nitrürlemeyi oksidasyon işlemi ile kıyasladığımızda, oksidasyon işlemi sonrası sertlik değerinin nitrürleme işlemine göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır [90]. Nitrürleme uygulanmış numunelerde yüzey pürüzlülüğü, uygulama işleminin süresi ile paralel şekilde artarken, uygulama işlem sıcaklığının değişmesinin etkisi göz ardı edilebilir düzeydedir [95, 97]. Nitrürlemenin aşınma direncine etkisi incelendiğinde uygulama sıcaklığı arttıkça aşınma direnci artarken, sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür [92]. Farklı parametrelerde uygulanan nitrürleme işlemi sertlik sonuçları Çizelge 2.9' da gösterilmiştir.

Çizelge 2.9. Farklı parametrelerde uygulanan nitrürleme işlemi sertlik sonuçları

Sıcaklık (°C)	Süre (Saat)	Atmosfer	Sertlik (HV)	Ref.
540	8	NH ₃	405	[97]
540	16	NH ₃	412	[97]
540	24	NH ₃	424	[97]
650	6	NH ₃	440	[102]
700	6	NH ₃	483	[94]
750	3	NH ₃	520	[102]
750	6	NH ₃	613	[102]
750	9	NH ₃	670	[102]
800	4	N ₂	505	[89]
800	6	NH ₃	515	[84]
800	24	NH ₃	710	[99]
850	1	N ₂	432	[95]
850	3	N ₂	532	[95]
850	4	-	626	[86]
850	5	N ₂	532	[95]
850	6	NH ₃	1140	[92]
850	10	N ₂	623	[95]
850	15	N ₂	758	[88]
900	1	-	460	[87]
900	2	N ₂	923	[90]
900	4	N ₂	582	[89]
900	4	NH ₃	700	[91]
900	5	%96 N ₂ +%+H ₂	1240	[96]
900	5	N ₂	1120	[96]
900	6,5	N ₂	660	[89]
900	10	N ₂	1050	[96]
900	24	-	700	[87]
950	1	N ₂	550	[95]
950	3	N ₂	563	[95]
950	5	-	638	[93]
950	5	N ₂	633	[95]
950	8	N ₂	876	[90]
950	10	N ₂	643	[95]
950	12	N ₂	1600	[91]
1030	3	N ₂	610	[89]
1050	5	N ₂	995	[96]
1050	10	N ₂	910	[96]
1120	7	-	1800	[98]
1250	12	N ₂	1900	[91]

Bu tezde Ti6Al4V malzemeden eklemeli imalat yöntemlerinden EBM yöntemiyle dişli parçası üretimi gerçekleştirilmiştir. Tezin odak noktaları olan Ti6Al4V, eklemeli imalat ve dişli parçası konuları ortak olarak değerlendirildiğinde literatüre bu alanda katkı sağlanabileceği tespit edilmiştir. Bu tezde gerçekleştirilmiş olan farklı ardıl işlemlerin (HIP ve nitrürleme) aynı numuneye birlikte uygulanması ve sonuçlarının incelenmesi literatürde bulunan bir boşluktur. Literatürde malzeme, yöntem ve nihai parça konusunda bu tez çalışmasına yakın olan örnekler aşağıda özetlenmiştir.

Ramadani v.d. ilgili araştırmalarında düşük titreşimde çalışan hafif dişli sistemi tasarımı yapmışlardır. Buna göre gerçekleştirilen çalışmada, topoloji optimizasyonu yapılarak gövde yapısını kafes yapı olarak yeniden tasarlamış, dişli titreşimini ve ağırlığını azaltmayı amaçlamışlardır. Deneysel çalışma, SLM yöntemi ile 35 mikrometre katman kalınlığında, 600 mm/s hızda Ti6Al4V–ELI alaşımı kullanılarak dişli üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar analizi ile yapılan bu çalışma doğrulanmıştır. Böylece eklemeli imalat yöntemi ile kafes yapıya dişli üretiminin gerçekleştirilebilirliği ispatlanmıştır [103].

Tezel v.d. geleneksel ve eklemeli imalat yöntemleri ile dişli üretimini karşılaştırdıkları çalışmalarında üç farklı metal alaşım malzeme kullanmışlardır. Yöntem olarak, azdırma ve SLS yöntemleri belirlenmiştir. Malzeme olarak ise 316L serisi çelik, Ti6Al4V alaşımı ve AlSi10Mg alaşımı seçilmiştir. Ek olarak döküm yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının T6 ısıtıl işlemi yapılmış varyasyonu da kullanılmıştır. Üretilen dişlilerin özgül aşınma oranı, performans, sertlik ve yoğunluk özellikleri incelenmiştir. Sertlik deneyleri sonuçlarına göre, çelik malzemede geleneksel yöntemle üretilen dişlinin sertliği rakibine göre %273 oranında daha sert ölçülmüştür. Ti6Al4V alaşımı için farklı yöntemler arasında sertlik farkı gözlemlenmemiştir. AlSi10Mg alaşımı için azdırma tezgahında üretime göre sertlik değeri, T6 ısıtıl işlemi sonrası %33 oranında, eklemeli imalat üretim sonrası %75 oranında daha yüksek ölçülmüştür. Yoğunluk incelemelerine göre eklemeli imalat ve geleneksel imalat arasında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Özgül aşınma oranı 0,25 N.m tork ve 500 ve 1000 s⁻¹ hız parametrelerinde incelenmiş olup sonuçlarına göre azdırma ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımı dışındaki bütün varyasyonlarda aşınma oranı düşmüştür. Eklemeli imalat ile üretilen numunelerin aşınma oranları geleneksel üretilmiş numunelere göre daha düşük saptanmıştır. Dişli performans deney sonuçlarına göre, çelik malzeme için eklemeli imalat ile üretilmiş numunenin performansı daha düşük ölçülmüştür. Ti6Al4V alaşımı için eklemeli imalat ile üretilmiş numunenin performansında

değişiklik ölçülmemiştir. AlSi10Mg alaşımı için T6 ısıt işleminin performansı yükseltmiş olup eklemeli imalat ile üretilmiş numunenin performansı diğer iki varyasyondan daha yüksek ölçülmüştür. Testler sonrası kırılmış numunelerde dış yüzeyi hasarları SEM ile incelenmiştir [104].

3. DENEYSEL YÖNTEM

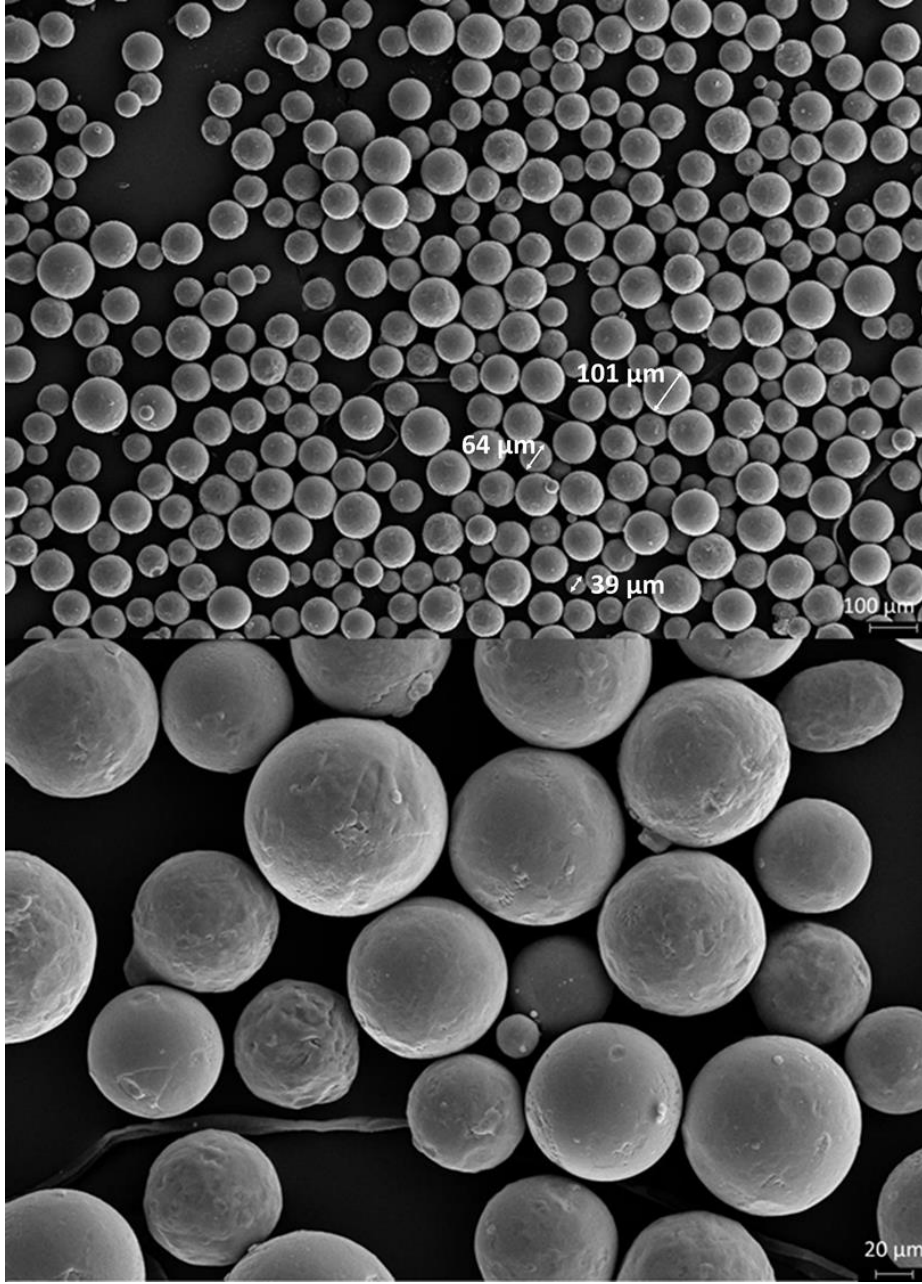
Bu başlık altında gerçekleştirilen deneylerin prosedürleri (EBM, HIP, nitrürleme) anlatılmıştır. Üretilen numunelere uygulanan mekanik testler (çekme, darbe, mikrosertlik, yorulma) ve mikroyapı (XRD, SEM, EDS) analizleri açıkça listelenmiştir.

3.1. Eklemeli İmalat ile Numunelerin Üretimi

Bu tezde eklemeli imalat yöntemlerinden EBM ile helikopter için dişli üretimi yapılarak yöntemin helikopter aktarma organlarında uygulanabilirliği incelenmiştir. Malzeme olarak Ti6Al4V seçilmiş, bu malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla HIP ve nitrürleme ardıl işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya öncelikle test kuponları üzerinden başlanmış, elde edilen sonuçlara göre dişli üretimi gerçekleştirilerek mekanik özellikler incelenmiştir. Mekanik özelliklerdeki bu gelişmenin tespiti için dört farklı süreç tasarlanmıştır. Bunlar;

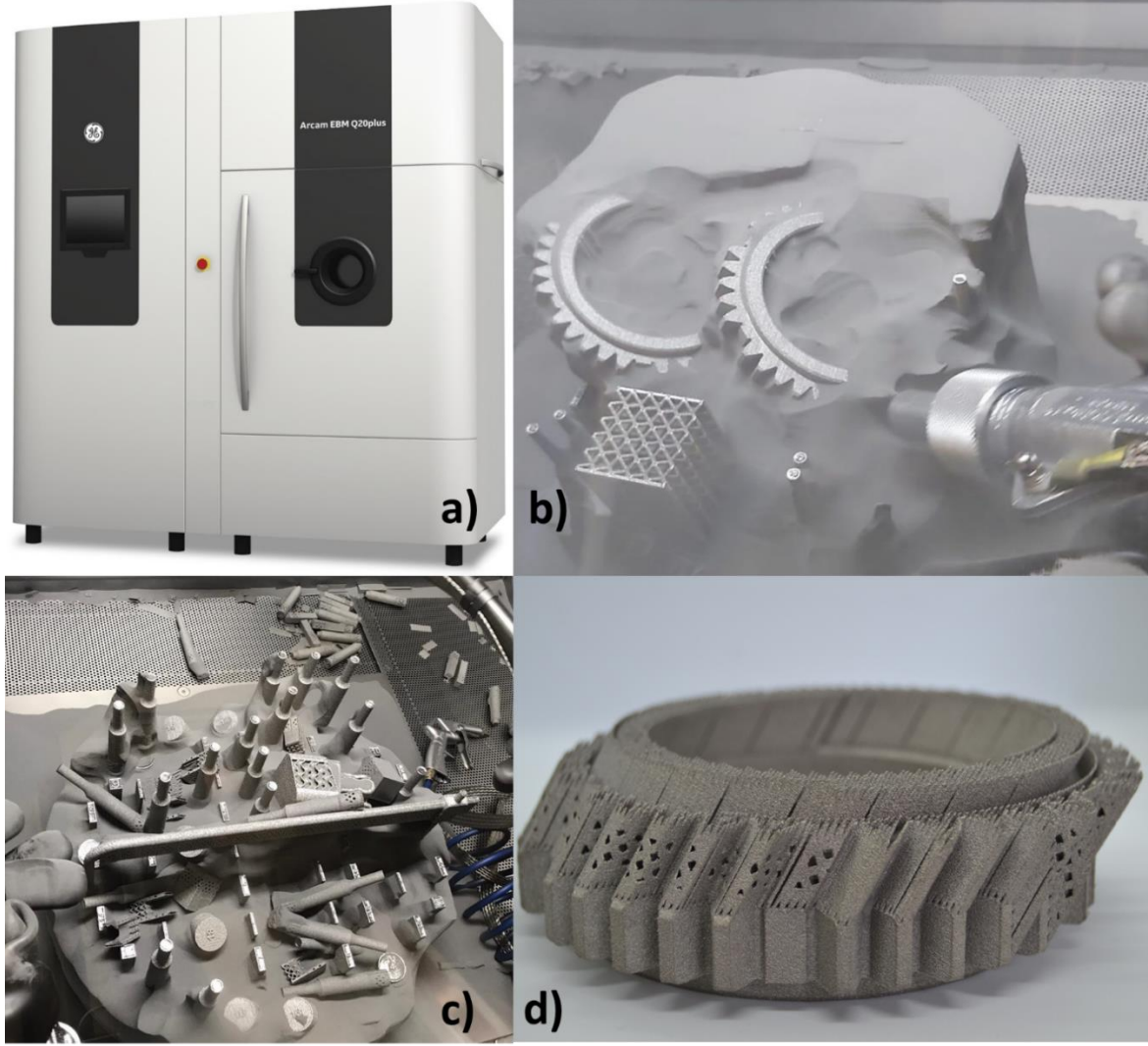
1. Sadece işlenmiş,
 2. Sadece HIP,
 3. Sadece Nitrürleme
 4. HIP + Nitrürleme
- olarak sıralanabilir.

Her bir süreçten üç adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece bir deney için on iki adet, bütün deneyler için (çekme, yorulma, darbe) toplam otuz altı adet deney numunesi üretilmiştir. Üretilen deney numunelerinin standartları sırasıyla çekme testi için TS EN ISO 6892-1, yorulma testi için TS EN ISO 13674-1, darbe testi için TS EN ISO 148-1 olarak seçilmiştir. Üretimde kullanılan tozlar 45 – 100 mikrometre ortalama toz çapına sahiptir. EBM yöntemiyle üretimde kullanılan tozların küreselliklerinin yeterli seviyede olduğu, toz üzerinde kalitesini düşüren uydulaşma diye adlandırılan küre harici parçaların ihmal edilebilir seviyede olduğu ve toz boyutlarının katalog standardına uygun olduğu gözlemlenmiştir. EBM yöntemiyle üretimde kullanılan tozların küreselliklerinin yeterli seviyede olduğu, toz üzerinde kalitesini düşüren uydulaşma diye adlandırılan küre harici parçaların ihmal edilebilir seviyede olduğu ve toz boyutlarının katalog standardına uygun olduğu gözlemlenmiştir. Üretimde kullanılan tozların SEM görüntüleri Resim 3.1’ de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Üretimlerde kullanılan tozların SEM görüntüleri

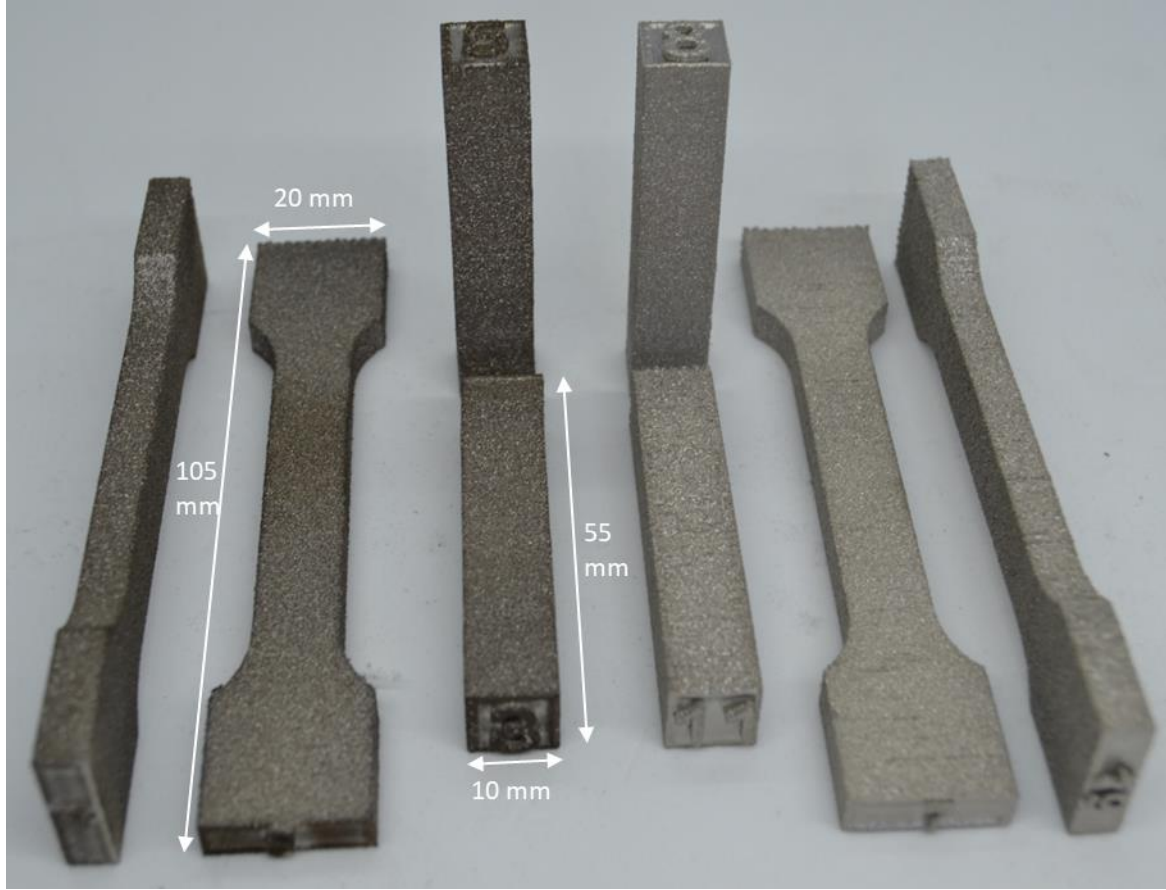
Deney numunelerinin üretimi EBM yöntemiyle (Arcam Q20 plus) gerçekleştirilmiştir. Üretim parametreleri; 90 mikrometre katman kalınlığı, 28 mA akım, 450 mm/s elektron ışın hızı ve 0,22 mm ışın çizgi aralığı olarak belirlenmiştir. Deney numuneleri için inşa yönü üretim tablasına dikey yönde, dişli parçalar için inşa yönü üretim tablasına 30° açıyla gerçekleştirilmiştir. EBM cihazı ve EBM yöntemiyle üretim sonu işlemleri Resim 3.2’ de gösterilmiştir. EBM ile üretimde tek seferde çok fazla ürün üretilebildiğinden dolayı Resim 3.2’ de bu tez çalışması kapsamında bulunmayan numunelerde görülmektedir.



Resim 3.2. EBM ile üretim: a) Kullanılan EBM cihazı; b) ve c) numunelerin EBM'den çıkarılması; d) EBM ile üretilmiş parça.

3.2. Üretilen Test Kuponlarına Sıcak İzostatik Pres (HIP) İşlemi Uygulanması

Eklemeli imalat ile üretimi tamamlanan, Süreç 2 ve Süreç 4 için geçerli 18 adet numuneye HIP işlemi Quintus marka cihaz ile (Tübitak MAM, Gebze) yapılmıştır. İşlem için belirlenen parametreler; sıcaklık 920°C, basınç 100 MPa ve süre 2 saattir. İşlem sonrası parçalar 10°C/dakika hızla oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. EBM üretimi sonrası HIP işlemi yapılmış ve HIP işlemi yapılmamış standart deney numuneleri Resim 3.3' te gösterilmiştir.



Resim 3.3. Solda HIP işlemi yapılmış, sağda HIP işlemi yapılmamış deney numuneleri.

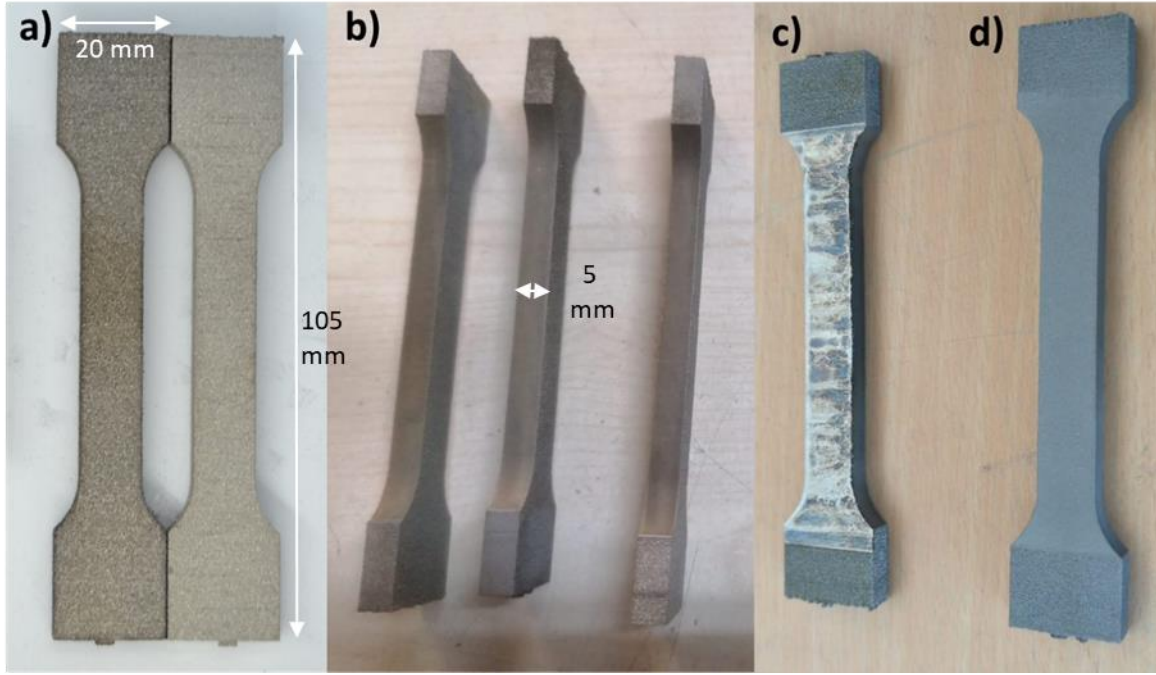
3.3. Numunelerin Nihai Boyutlarına Getirilmesi

HIP işleminin parça boyutlarını azalttığı bilindiğinden dolayı parça standart boyutlarından büyük üretilmiştir. HIP işlemi öncesi destek kısımları çıkartılan dişli parçalarına öncelikli olarak talaş kaldırma işlemlerinden tornalama işlemi yapılmıştır. Daha sonra tel erozyon ile işleme yöntemiyle işlenerek nihai boyutları elde edilmiştir. Dişli parçanın EBM üretimi sonrasında nihai boyutuna gelene kadar geçtiği aşamalar Resim 3.4' te gösterilmiştir.



Resim 3.4. Dişli parçanın son haline getirilmesi: a) EBM üretimi sonrası dişli parça; b) Destek kısımları çıkarılmış dişli parça; c) Tornalama işlemi sonrası dişli parça; d) Tel erozyon işlemi sonrası dişli parça.

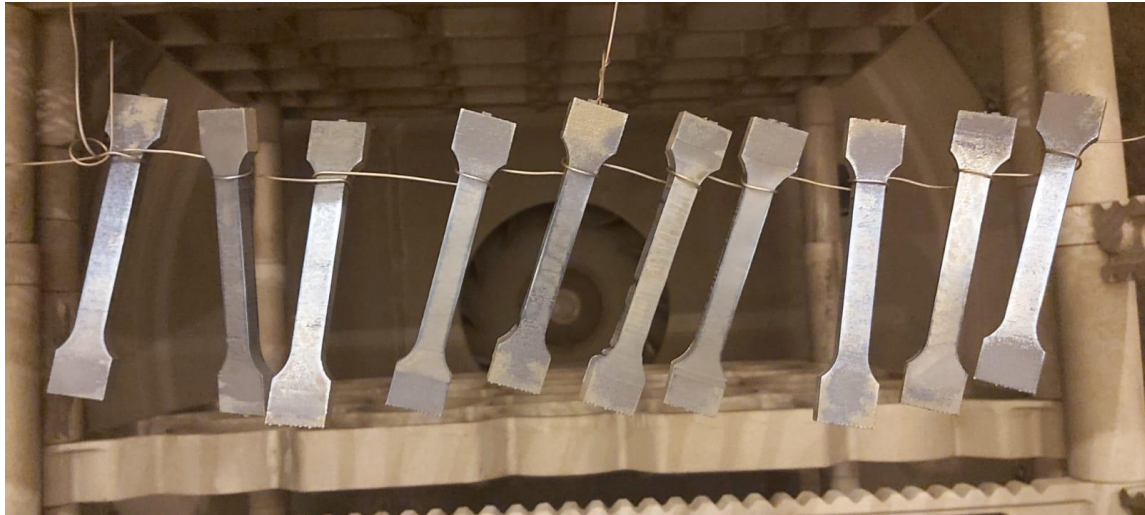
EBM ile üretimi tamamlanmış çekme, yorulma ve darbe deney numuneleri destek unsurları temizlendikten ve HIP işlemi yapıldıktan sonra öncelikli olarak tel erozyon ile işlemi yöntemiyle ve sonrasında taşlama ve kumlama işlemleriyle nihai boyutlarına getirilmiştir. Deney numunelerinin EBM üretimi sonrasında nihai boyutlarına gelene kadar geçtiği aşamalar Resim 3.5’ te gösterilmiştir.



Resim 3.5. Deney numunelerinin son haline getirilmesi: a) EBM üretimi sonrası numuneler; b) Tel erozyon ile işlenmiş numuneler; c) Taşlama işlemi yapılmış numuneler; d) Kumlama işlemi yapılmış numuneler.

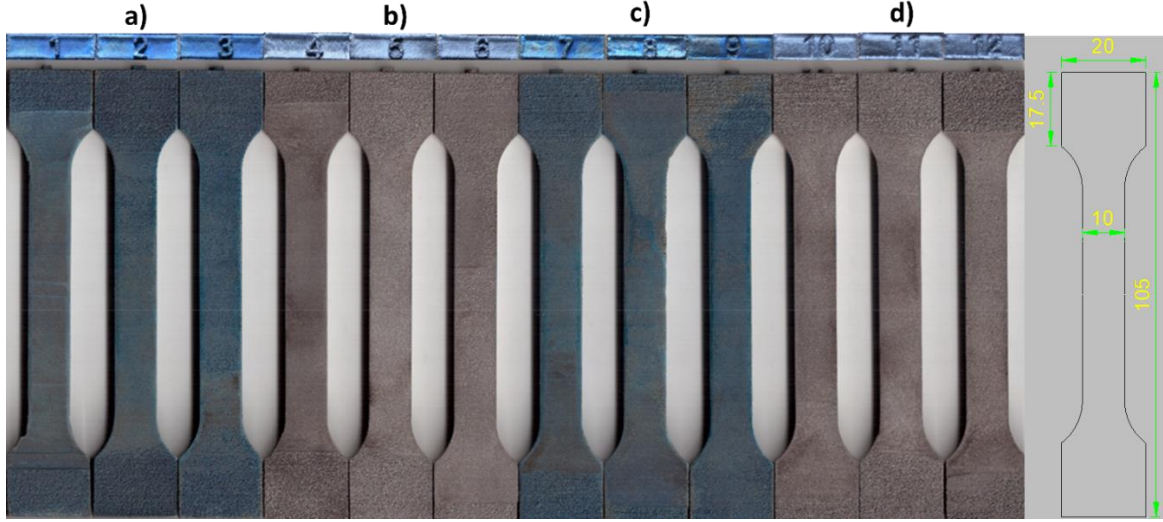
3.4. Üretilen Test Kuponlarına Nitrürleme İşlemi Uygulanması

Eklemeli imalat ile üretimi tamamlanan numunelerden Süreç 3 ve Süreç 4 için geçerli 18 adet numuneye gaz nitrürleme işlemi Seco/Warwick (TUSAŞ, ANKARA) cihazında yapılmıştır. Deney numunelerinin cihazda nitrürlenmeye hazırlanışı Resim 3.6’ da gösterilmiştir.



Resim 3.6. Nitrürleme fırını içindeki deney numuneleri

İşlem için belirlenen parametreler; sıcaklık 600°C, K_n 1,3 ve süre 24 saattir. İşlem sonrası parçalar 10°C/dakika hızla oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Belirlenen süreçlere göre üretimi ve ardıl işlemleri tamamlanmış numuneler Resim 3.7’ de gösterilmiştir.



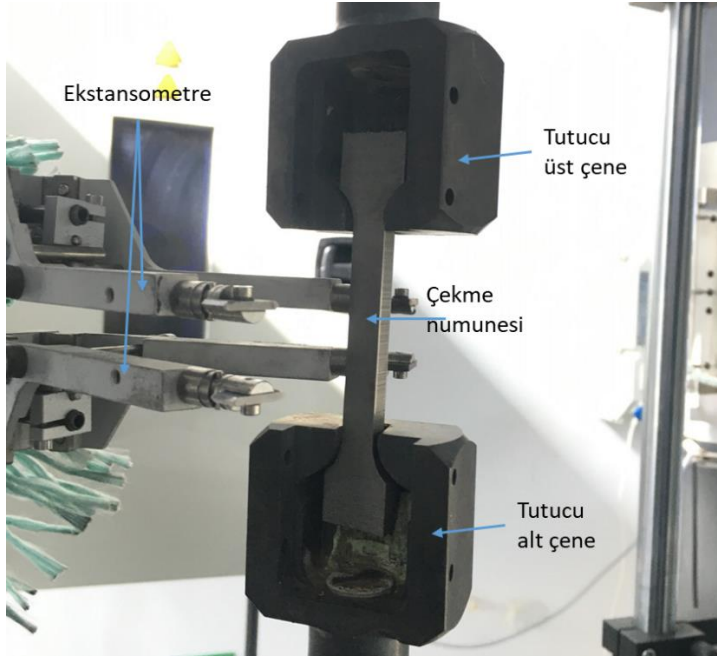
Resim 3.7. Süreçlere göre numuneler: a) HIP ve nitrüleme işlemi yapılmış numuneler; b) Sadece HIP işlemi yapılmış numuneler; c) Sadece nitrüleme işlemi yapılmış numuneler; d) Sadece işleme yapılmış numuneler.

3.5. Mekanik Testler

Bu başlık altında üretilen numunelere uygulanan çekme, darbe ve yorulma testlerinin prosedürleri anlatılmıştır.

3.5.1. Çekme testi

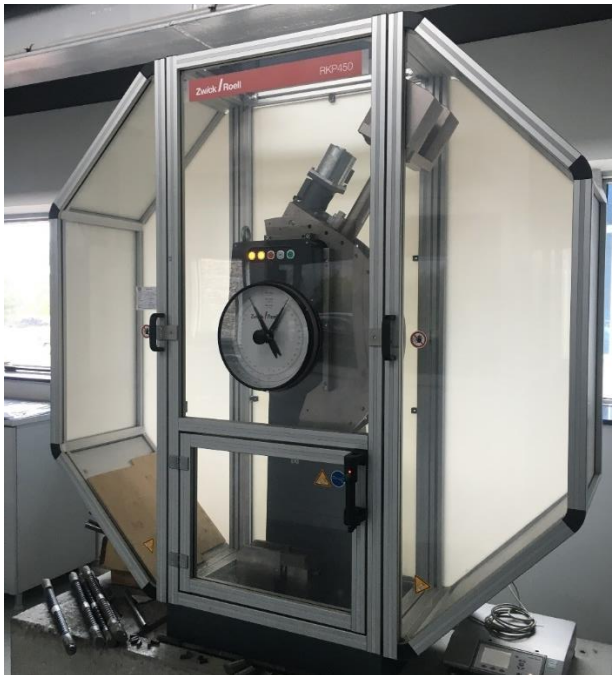
Deneyler 12 adet çekme numunesiyle Zwick/Roell Z600 (Demir Çelik Enstitüsü, KARABÜK) cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri, oda sıcaklığı ve 2 mm/dk çekme hızı olarak belirlenmiştir. Deney numunesinin çekme cihazında deneye hazırlık aşaması Resim 3.8’ de gösterilmiştir.



Resim 3.8. Deney numunesinin çekme cihazına yerleştirilmesi

3.5.2. Darbe testi

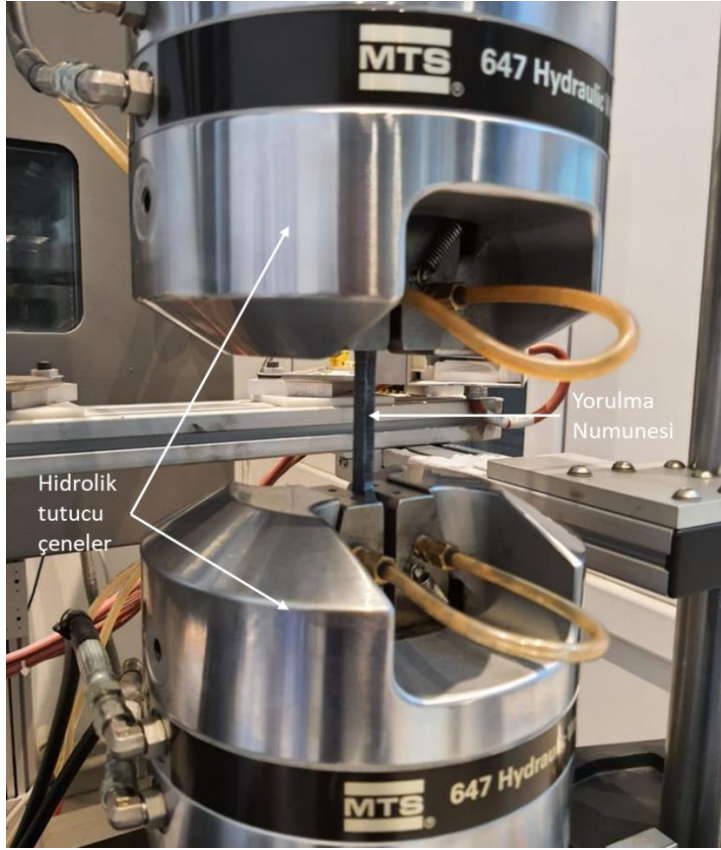
Deneyler 12 adet darbe numunesiyle Zwick/Roell Rk450 (Demir Çelik Enstitüsü, KARABÜK) cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney parametresi olarak oda sıcaklığı belirlenmiştir. Deneyde kullanılan test cihazı Resim 3.9’ da gösterilmiştir.



Resim 3.9. Darbe deneyi cihazı

3.5.3. Yorulma testi

Deneyler 12 adet yorulma numunesiyle MTS 647 Hydraulic (Demir Çelik Enstitüsü, KARABÜK) cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri 20 Hz frekans, 42,5 kN yük ve 0,1 yük oranı (çekme-çekme) olarak seçilmiştir. Deneyde kullanılan test cihazı Resim 3.10' da gösterilmiştir.



Resim 3.10. Yorulma deney cihazı

3.5.4. Mikrosertlik testi

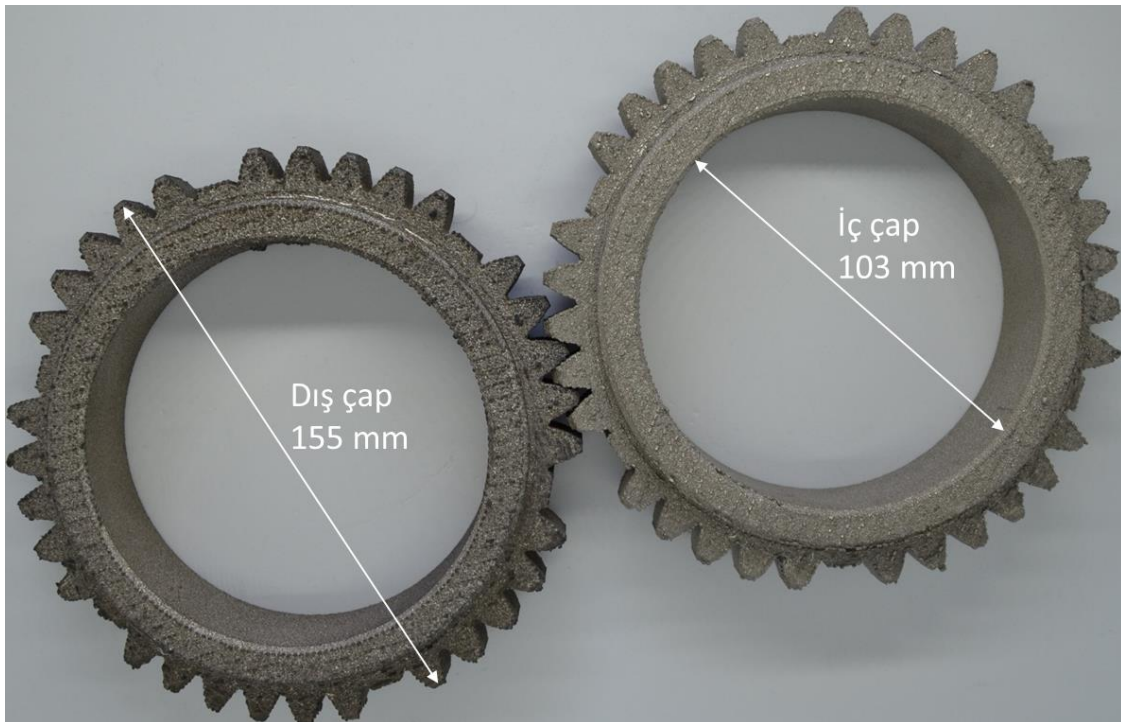
Nitrüleme ile yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra yüzeydeki sertlik artışını belirlemek için nitrüleme yapılmış ve yapılmamış numunelere TTS HWMMT-X3B mikrosertlik cihazında (Gazi Üniversitesi, ANKARA) deney uygulanmıştır. Deney parametreleri olarak; yük 100 gram ve süre 10 saniye olarak seçilmiştir. Deneyde kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazı Resim 3.11' de gösterilmiştir.



Resim 3.11. Mikrosertlik ölçüm cihazı

3.6. Dişli Numuneye Ardıl İşlemlerin Uygulanması

Belirlenen süreçlere mekanik testler yapıp en yüksek yorulma dayanımına sahip olan Süreç 2, nihai test edilecek parça olan dişli parçasına uygulanmıştır. Buna göre diğer numuneler için uygulanan HIP parametreleri dişli parçası için de gerçekleştirilmiştir. Dişli parçanın HIP işlemi yapıldıktan sonraki hali Resim 3.12’ de gösterilmiştir.



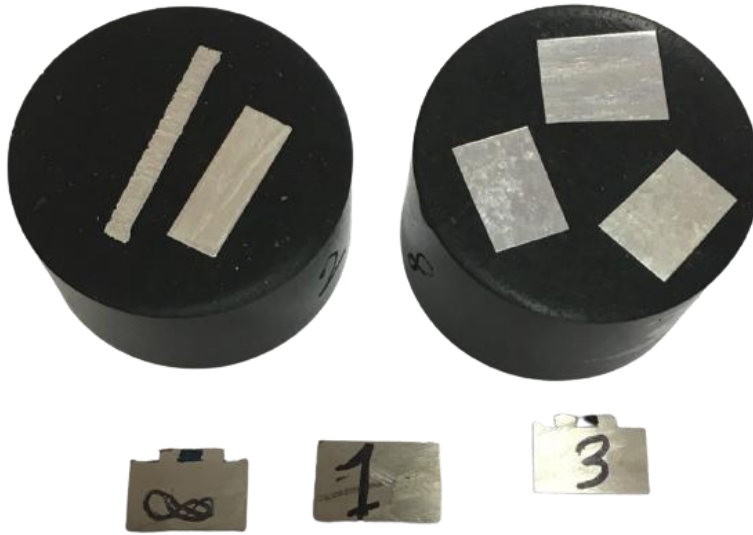
Resim 3.12. HIP işlemi yapılmış ve yapılmamış dişli parça

3.7. Mikroyapı Analizleri

Bu başlık altında bu tezde üretilen deney numunelerinin mikroyapıları incelenmiştir.

3.7.1. SEM

Üretimi ve test aşaması tamamlanan numuneler SEM analizi yapılabilmesi için öncelikle kesilip ardından bakalite alınıp daha sonra 120-220-400-800-1200-2000 numaralı zımparalarla zımparalanıp sonrasında 6 ve 1 μm ile parlatma işlemi yapıp en son olarak da 30 ml HNO_3 -3 ml HF -67 ml H_2O çözeltisi içerisinde 25-30 saniye süreyle mikro dağlama işlemi yapılmıştır. SEM ve EDS analizleri için hazırlanmış numuneler Resim 3.13'te gösterilmiştir.



Resim 3.13. SEM için hazırlanmış numuneler

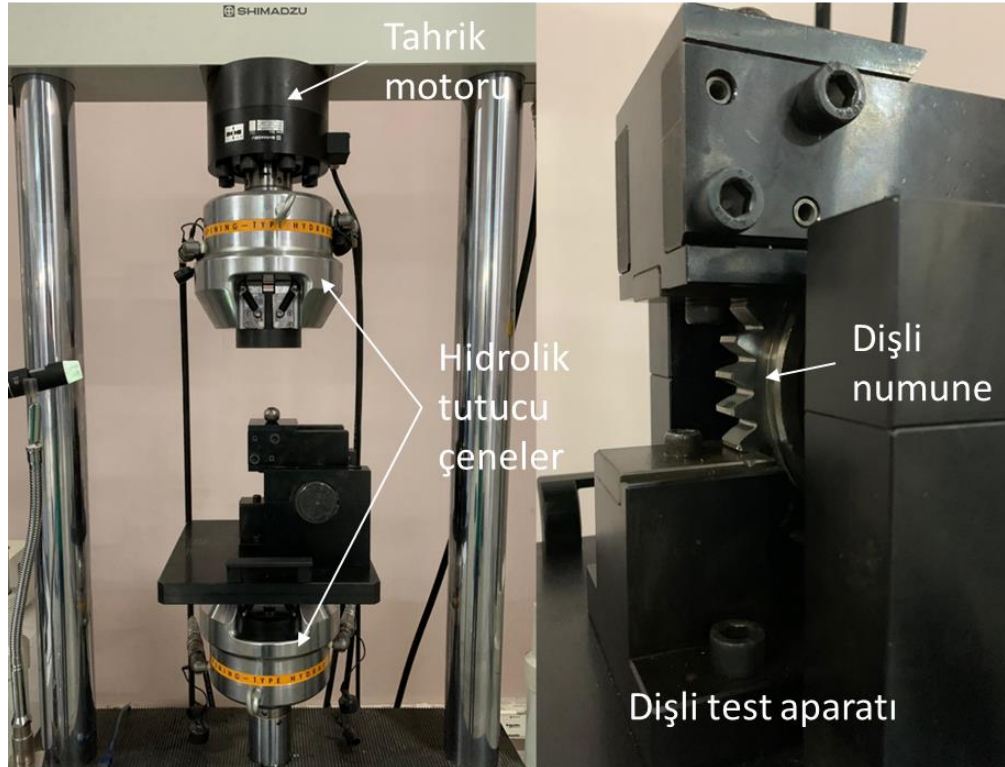
SEM analizleri için numunelerle aynı anda üretilip, aynı ardıl işlemler uygulanan parçaların yüzeylerine ve nitrüleme işleminde oluşan tabakaları gözlemlemek için nitrüleme yapılmış darbe numunelerinden kesilen parçalara ZEISS GEMINI Supra 40VP SEM (Pamukkale Üniversitesi, DENİZLİ) cihazında 1000-2000-5000-10000-15000-50000 kat yakınlaştırmayla inceleme yapılmıştır. Titanyum alaşımında oluşan fazlar ve nitrüleme etkileri gözlemlenmiştir. EDS analizi ile numunelerin kütlece elementsel kompozisyonları tespit edilmiştir. SEM ve EDS analizlerinin yapıldığı cihaz Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

3.7.2. XRD

Üretilen ve ardıl işlemler uygulanan numunelere Rigaku Ultima-IV (ODTÜ, ANKARA) cihazında 40 kV gerilim ve 30 mA akım şiddetinde ince filmlerde kırınım deseni çekimi yapılarak 20-90° tarama aralığında 0,1°/dk tarama hızında inceleme yapılmıştır. Titanyum alaşımında oluşan fazlar ve nitrürleme etkileri gözlemlenmiştir. XRD analizinin yapıldığı cihaz Resim 3.15’ te gösterilmiştir.

3.8. Dişli numuneye yorulma testi yapılması

EBM ile üretimi tamamlanan dişli parçaya, yorulma testi sonuçlarına göre en yüksek yorulma ömrünü sağlayan Süreç 2 işlemleri uygulanmıştır. Süreç 2 gereği HIP işlemi yapılmış dişli parçası üzerinde HIP işleminin etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla diğer dişli ek işlemsiz olarak ayrılmıştır. Dişli test parametreleri olarak karşılaştırma yapılacak olan standart dişli parçanın yorulma testi parametreleri seçilmiştir. Dişli testleri Shimadzu Yorulma Cihazında (Bursa Teknik Üniversitesi, BURSA) 20 Hz frekans, 42,5 kN yük ve 0,1 yük oranı parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Dişli testleri yapılan test cihazı Resim 3.16’ da gösterilmiştir.



Resim 3.14. Dişli test mekanizması görüntüleri

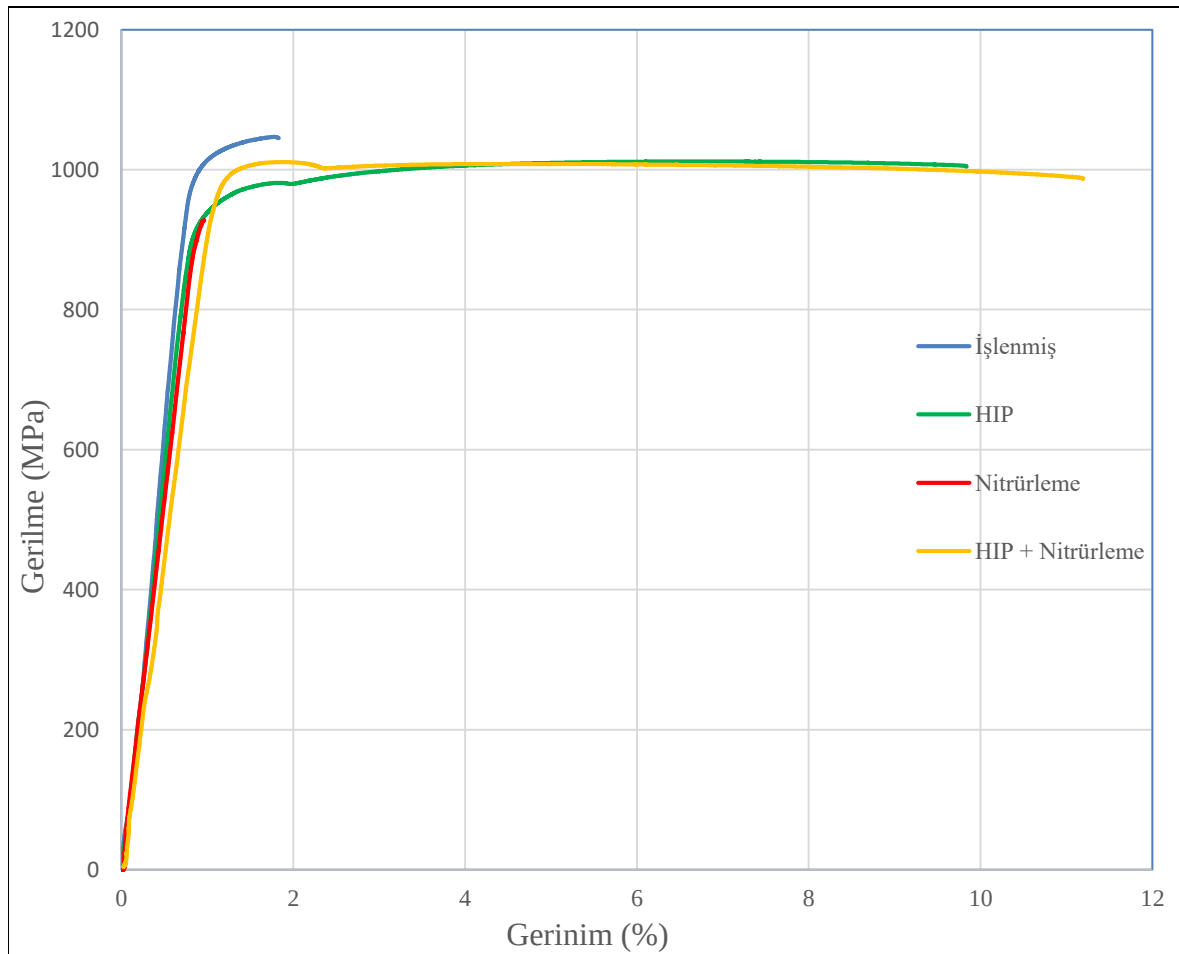
4. DENEY SONUÇLARI

Bu tezde gerçekleştirilen mekanik testler ve mikroyapı analizleri bu başlık altında incelenmiştir. Mekanik testler olarak çekme, darbe, mikrosertlik ve yorulma deneyleri tüm süreçler için gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri olarak SEM, XRD ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili deney sonuçları alt başlıklarda açıklanmıştır.

4.1. Mekanik Test Sonuçları

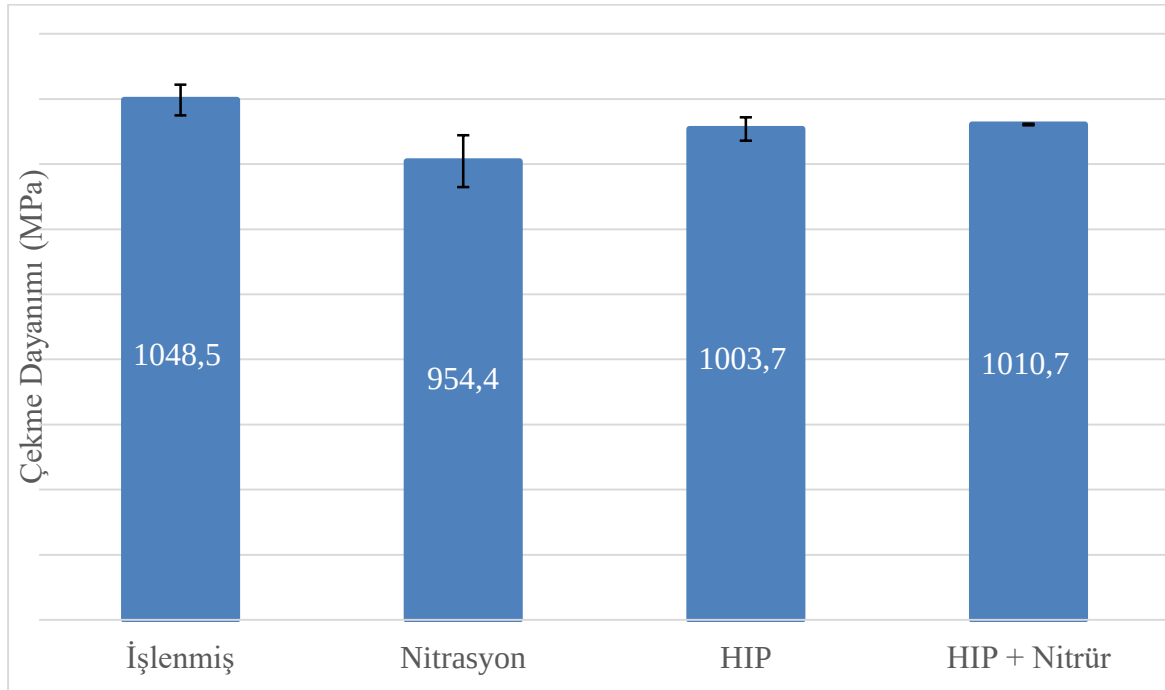
4.1.1. Çekme testi sonuçları

Tüm süreçler için gerçekleştirilen çekme deneyleri, 2 mm/dk çekme hızı ve 23°C ortam sıcaklığı şartlarında yapılmıştır. Numunelerin çekme grafikleri Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelerin çekme grafikleri

Çekme deneyi sonucunda oluşturulan çekme grafikleri incelendiğinde, işlenmiş ve nitrürleme yapılmış numunelerin gevrek kırılma özellikleri gösterdiği, HIP yapılmış ve HIP ile nitrürleme yapılmış numunelerin görece daha sünek kırılma özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Bu bilgi ise literatürdeki HIP işleminin sünekliği arttırdığı bilgisini doğrular niteliktedir [59, 63, 64]. Bu artışın sebebi, HIP işlemiyle beraber malzeme içerisindeki gözeneklerin minimize olmasından dolayı gözenek kaynaklı kırılmaların gözlemlenmemesidir. Çekme testi ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tüm süreçler için en yüksek çekme dayanımları

Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, EBM ile gerçekleştirilen üretimin literatür ile benzerlik gösterdiği görülmüştür [57, 64, 89]. Brandl v.d.’nin çalışmalarına göre aynı oryantasyonda üretilmiş çekme numuneleri (sadece işlenmiş) bu çalışmada %9,2 daha yüksek çekme dayanımı göstermiştir [57]. Çizelge 4.1’ de belirtildiği gibi bu çalışmada yapılan ardıl işlemler numunelerin en yüksek çekme dayanımlarını düşürmüştür. Franz v.d.’nin çalışmalarına göre aynı oryantasyonda üretilmiş çekme numuneleri (Nitrürleme yapılmış) bu çalışmada %6 daha düşük çekme dayanımı göstermiştir. Ayrıca, Franz v.d.’nin çekme testi sonuçları incelendiğinde, nitrürleme işlemi yapılmış numunenin en yüksek çekme dayanımı sadece işlenmiş numunenin en yüksek çekme dayanımına göre %15,6 oranında düşük gözlemlenmiştir [89]. Bu çalışmada ise nitrürleme işlemi yapılmış numunenin en yüksek çekme dayanımı sadece işlenmiş numunenin en yüksek çekme

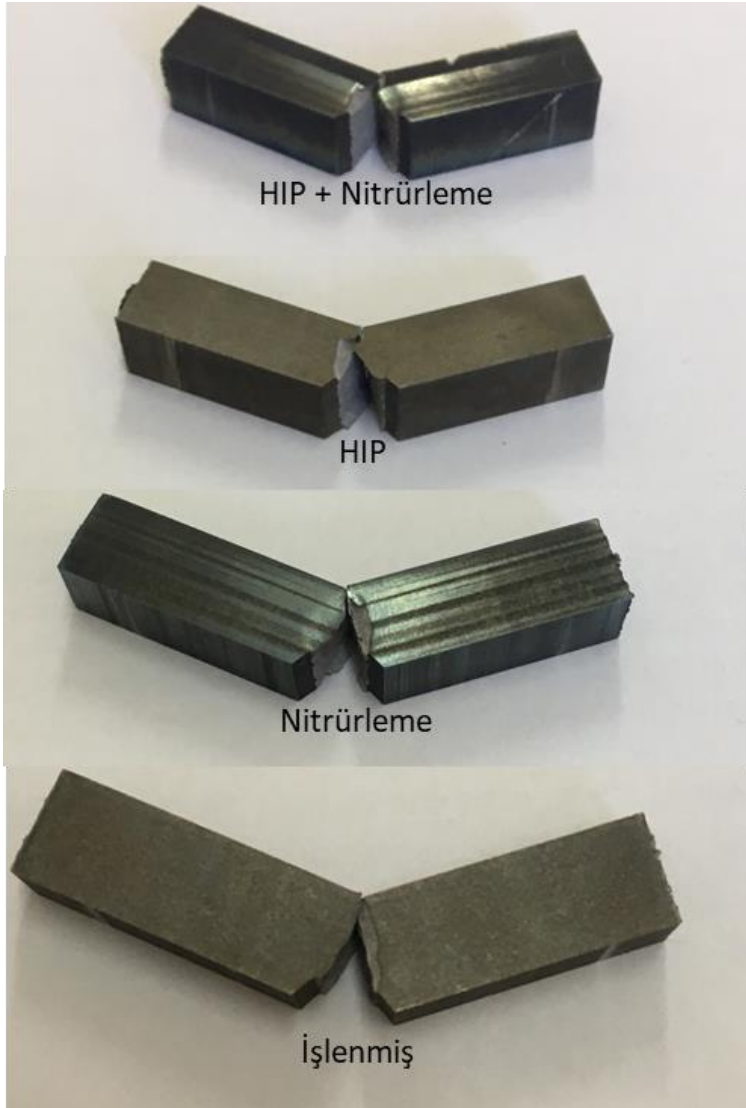
dayanımına göre %7,2 oranında düşük ölçülmüştür. Nitrürleme işlemi sonrası ölçülen çekme dayanımı değerlerinin bir miktar düşmesinin sebebi, işlem sırasında gerçekleşen difüzyon ve ısıtılma işlem etkilerinden dolayı malzeme mikroyapısındaki yüksek dayanımlı beta titanyum fazlarının yüzeyde yok olup, yüzeyde miktar olarak artan alfa titanyum fazlarının daha düşük dayanımlı olmasıdır. Hrabe v.d.'nin çalışmalarına göre aynı oryantasyonda üretilmiş çekme numuneleri (HIP yapılmış) bu çalışmada %2,6 daha düşük çekme dayanımı göstermiştir. Ayrıca, Hrabe v.d.'nin çekme testi sonuçları incelendiğinde HIP işlemi yapılmış numunenin en yüksek çekme dayanımı sadece işlenmiş numunenin en yüksek çekme dayanımına göre %2,8 oranında düşük gözlemlenmiştir [64]. Bu çalışmada ise HIP işlemi yapılmış numunenin en yüksek çekme dayanımı sadece işlenmiş numunenin en yüksek çekme dayanımına göre %4,3 oranında düşük ölçülmüştür. Süreç 4 koşullarında üretilmiş numunelerin en yüksek çekme dayanımları %3,6 oranında düşüş göstermiştir. Çekme testleri tamamlanan numunelerin resimleri Resim 4.1' de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Çekme deneyi sonrasında her süreçten kırılmış numuneler

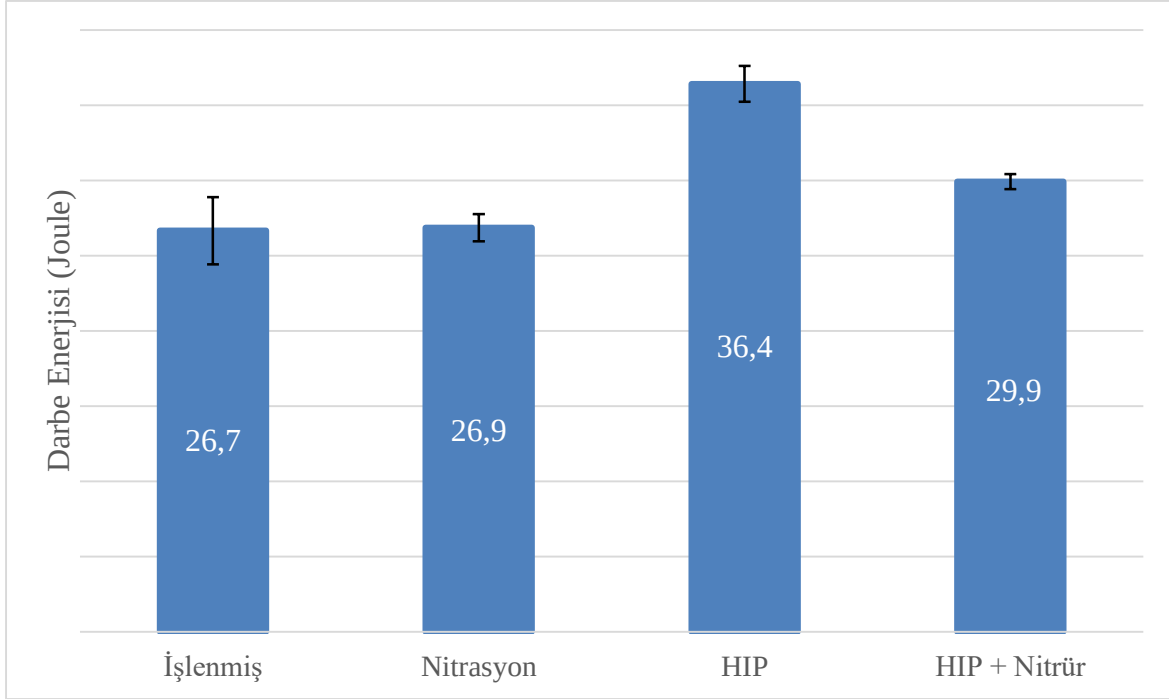
4.1.2. Darbe testi sonuçları

TS EN ISO 148-1 standardında tüm süreçlerle üretilen darbe testi numunelerinin deneyleri uygun koşullarda gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri tamamlanan numunelerin resimleri Resim 4.2’ de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Darbe deneyi sonrasında her süreçten kırılmış numuneler

Darbe deneyi sonrasında kırılmış numuneler incelendiğinde tüm süreçler benzer kırılma özellikleri göstermiştir. Deney sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.3’ de gösterilmiştir.

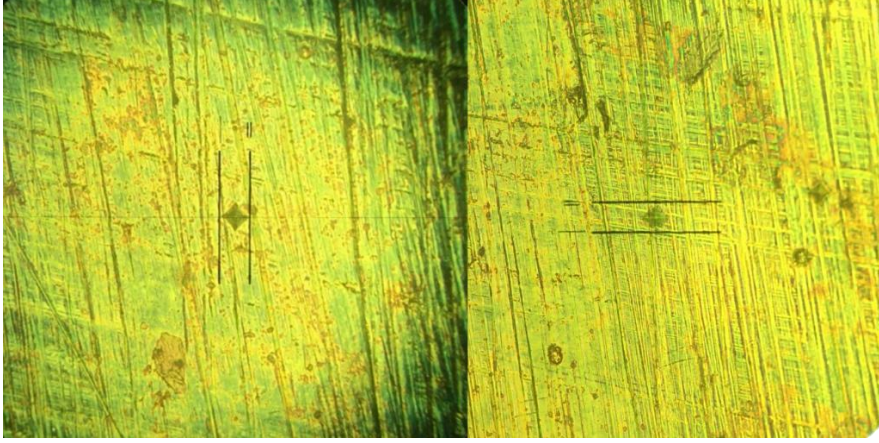


Şekil 4.3. Tüm süreçler için darbe enerjileri

Darbe deneyi sonuçları incelendiğinde, sadece işlenmiş numunelere nitrürleme işlemi yapıldıktan sonra darbe enerjisinde bir değişiklik görülmemiştir. Ancak HIP işlemi sonrası darbe enerjisinde %36 oranında artış görülmüştür. Bu artışın sebebi HIP işlemiyle birlikte numunelerde yüksek tokluğa sahip beta titanyum fazlarının büyüyerek düşük tokluğa sahip alfa titanyum fazlarının azalmasıdır. HIP işlemi sonrası nitrürleme işlemi yapılan numunelerde darbe enerjisinde azalma gözlemlenmiştir.

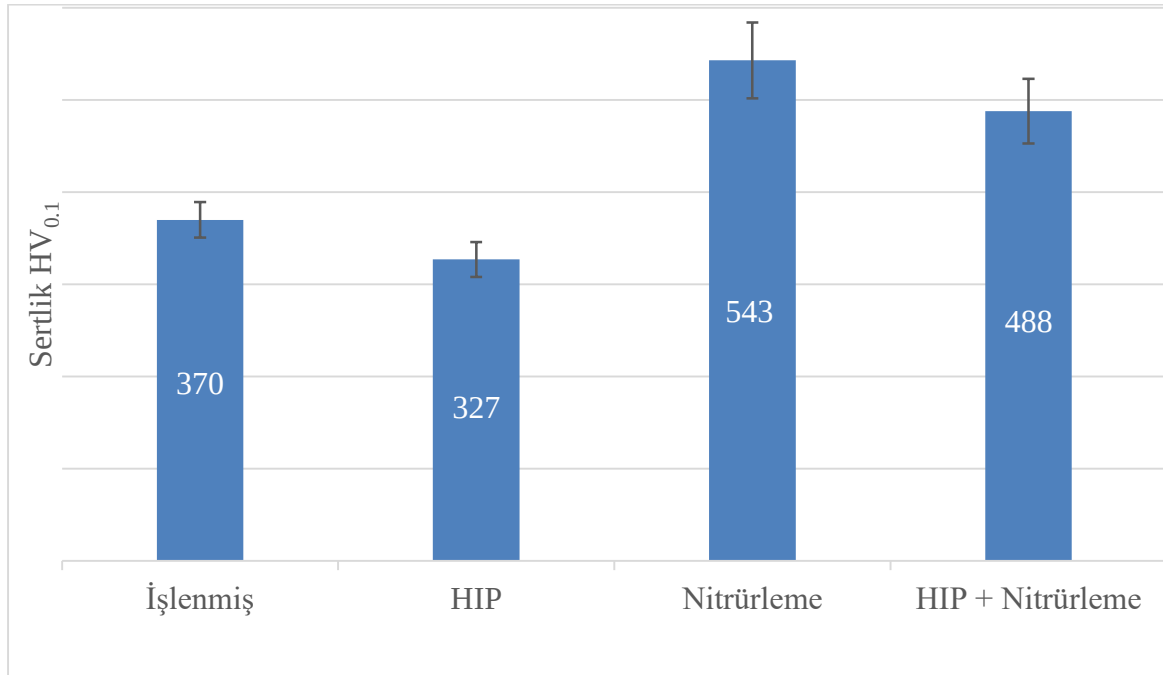
4.1.3. Mikrosertlik testi sonuçları

Tüm süreçler için gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümleri, 100 gram ağırlık ve 10 saniye süre şartlarında yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri sırasında parça yüzeyinin durumu Resim 4.3' de gösterilmiştir.



Resim 4.3. Mikrosertlik ölçümleri sırasında parça yüzeyinin durumu

Mikrosertlik ölçümleri yapılırken gözlenen yüzey durumları incelendiğinde nitrürleme işleminin numunelerin yüzey pürüzlülüğünü ihmal edilebilecek ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Mikrosertlik ölçüm sonuçları

Mikrosertlik sonuçları Şekil 4.4’te incelendiğinde Nitrürleme işlemi yapılmış numunelerin sonuçları incelendiğinde yüzey sertliğinde %46,8 oranında artış ölçülmüştür. Bu artışın sebebi nitrürleme işlemi sırasında meydana gelen azot difüzyonu sonucu oluşan titanyum nitrür tabakasıdır. Kahlin v.d.’nin çalışmalarına göre aynı oryantasyonda üretilmiş numuneler (sadece işlenmiş) bu çalışmada %8,1 daha yüksek mikrosertlik göstermiştir.

Ayrıca, Kahlin v.d.'nin mikrosertlik sonuçları incelendiğinde HIP işlemi yapılmış numunenin mikrosertliği sadece işlenmiş numunenin mikrosertliğine göre %7,4 oranında düşük gözlemlenmiştir [53]. Bu çalışmada ise HIP işlemi yapılmış numunenin mikrosertliği sadece işlenmiş numunenin mikrosertliğine göre %11,6 oranında düşük ölçülmüştür. Bu düşüşün sebebi, HIP işlemiyle birlikte malzeme mikroyapısındaki görece yumuşak olan beta titanyum fazlarının genişlemesidir. Her iki ardıl işlemin de uygulandığı numunelerin sonuçları incelendiğinde ise yüzey sertliğinde %31,9 oranında bir artış ölçülmüştür.

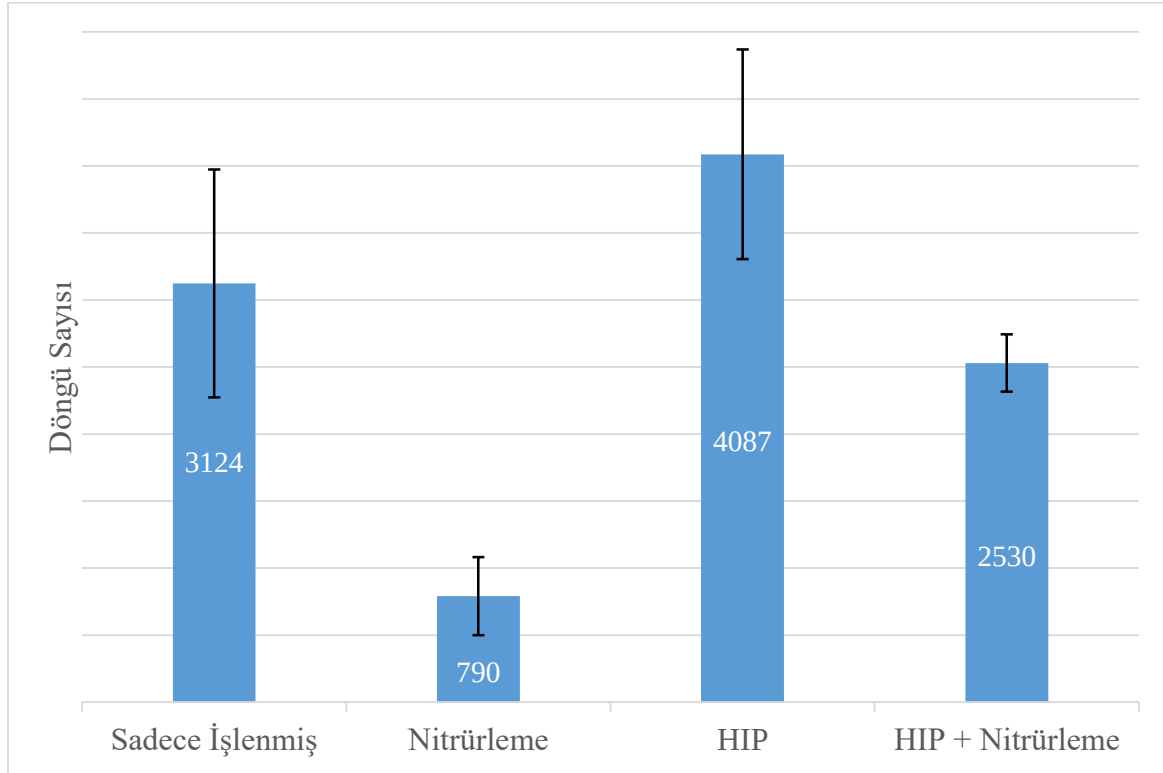
4.1.4. Yorulma testi sonuçları

Tüm süreçler için gerçekleştirilen yorulma deneyleri, 0,1 yük oranında (çekme-çekme) ve 23°C ortam sıcaklığı şartlarında yapılmıştır. Yorulma testleri tamamlanan numunelerin resimleri Resim 4.4' te gösterilmiştir.



Resim 4.4. Yorulma testleri tamamlanan numunelerin resimleri

Bu tezdeki yorulma deneyinin amacı, farklı süreçlerde üretilmiş malzemelerin yorulma ömürlerini karşılaştırmaktır. Kupon seviyesindeki yorulma testi sonuçlarına göre dişlinin yorulma testi parametreleri belirlenmiştir. Yorulma testinde kullanılan yük değerinin yüksek oluşu sebebiyle numunelerin yorulma ömürleri düşük sonuçlanmıştır. Yorulma deneyi sonuçları Şekil 4.5’ te gösterilmiştir.



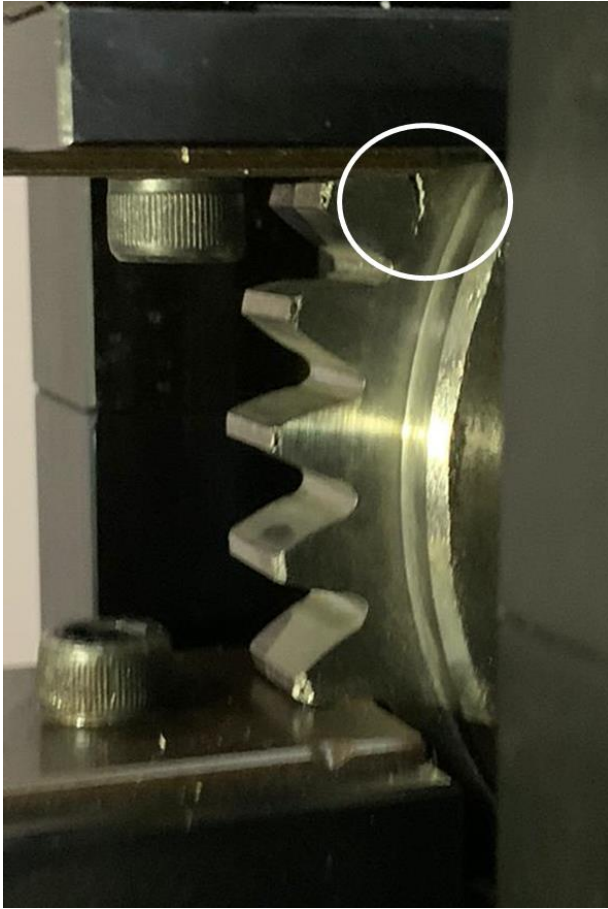
Şekil 4.5. Yorulma testi sonuçları

Yorulma deney sonuçları incelendiğinde, ardıl işlemlerin yorulma testi sonuçlarına etkisi konusunda literatüre benzerlik gösterdiği görülmüştür [73, 85, 86]. Mukhtar v.d.’nin çalışmalarına göre nitrüleme yapılmış Ti6Al4V numunelerin yorulma ömründe %33 oranında düşüş gözlemlenmiştir [85, 86]. Bu çalışmada yapılan yorulma deney sonuçlarına göre nitrüleme yapılmış numunenin yorulma ömrü %74 oranında daha düşük ölçülmüştür. Yorulma ömürlerindeki düşüşün farklı olmasının sebebi nitrüleme koşullarının farklı olmasıdır. Nitrüleme işleminin yorulma ömrünü olumsuz etkilemesinin sebebi, nitrüleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan TiN tabakasının görece çok daha yüksek elastik modülü yüzünden şiddetli deformasyon altında kalarak erken çatlak oluşturmaktır. Popov v.d.’nin çalışmalarına göre HIP işlemi yapılmış numunelerin yorulma ömründe %76 oranında artış gözlemlenmiştir [73]. Bu çalışmada yapılan yorulma deney sonuçlarına göre HIP işlemi uygulanmış numunelerin yorulma ömrü %31 oranında daha yüksek

ölçülmüştür. Literatür örneği ile bu tez çalışmasındaki yorulma ömrü miktarlarının farklılık göstermesinin sebebi, üretim parametrelerinin farklılığı olarak yorumlanabilir. HIP işleminin yorulma ömrünü arttırmasının sebebi, HIP işlemiyle birlikte malzeme içindeki gözeneklerin en aza indirilmesi sonucu gözenek kaynaklı çatlak başlangıcının engellenmesidir. HIP ve nitrürleme işleminin birlikte uygulandığı numunelerin yorulma ömürleri diğer sonuçlar doğrultusunda beklendiği gibi HIP yapılmış numuneden daha düşük, nitrürleme yapılmış numuneden daha yüksek ölçülmüştür.

4.1.5. Dişli numunenin yorulma testi sonuçları

HIP işlemi yapılmış ve üretim sonrası ek işlem yapılmayan dişli numunelere 20 Hz frekans ve 42,5 kN yük ile tek dişten eğme yorulma testi uygulanmıştır. Çatlak oluşumu gerçekleşmiş dişli numunesi Resim 4.5’ te gösterilmiştir.



Resim 4.5. Çatlak oluşmuş dişli numunesi

Tek dişten eğme yorulma testi sonuçlarına göre sadece işlenmiş dişli ile HIP yapılmış dişli numunesinin yorulma ömürleri arasında kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir. Tek dişten eğme yorulma testi sayısal sonuçları izelge 4.1' de gösterilmiştir.

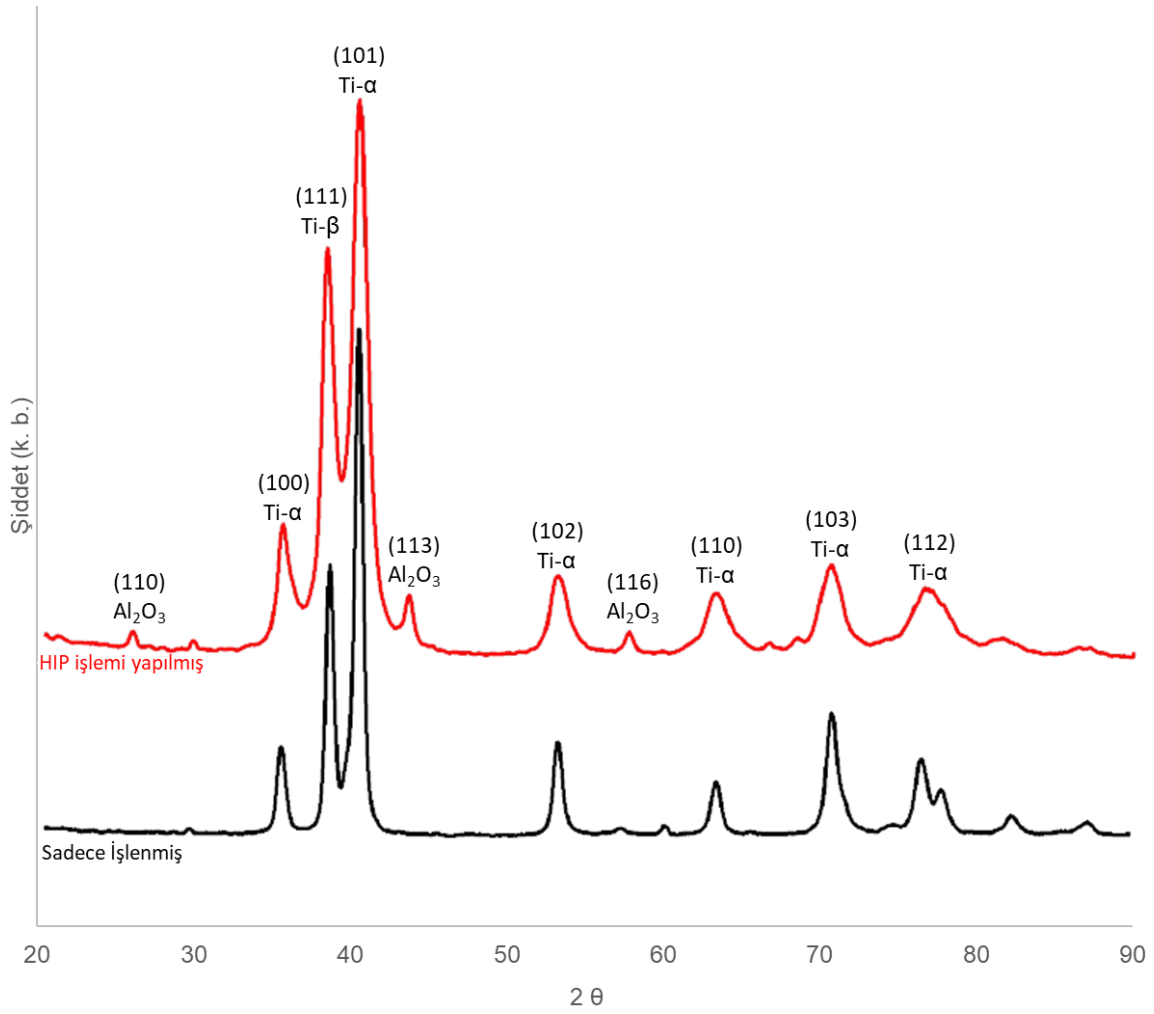
Çizelge 4.1. Tek dişten eğme yorulma testi sonuçları

Numuneler	Yorulma mr (evrim)
HIP yapılmış	5460 ± 380
Ek işlemsiz	6021 ± 587

4.2. Mikroyapı Analiz Sonuçları

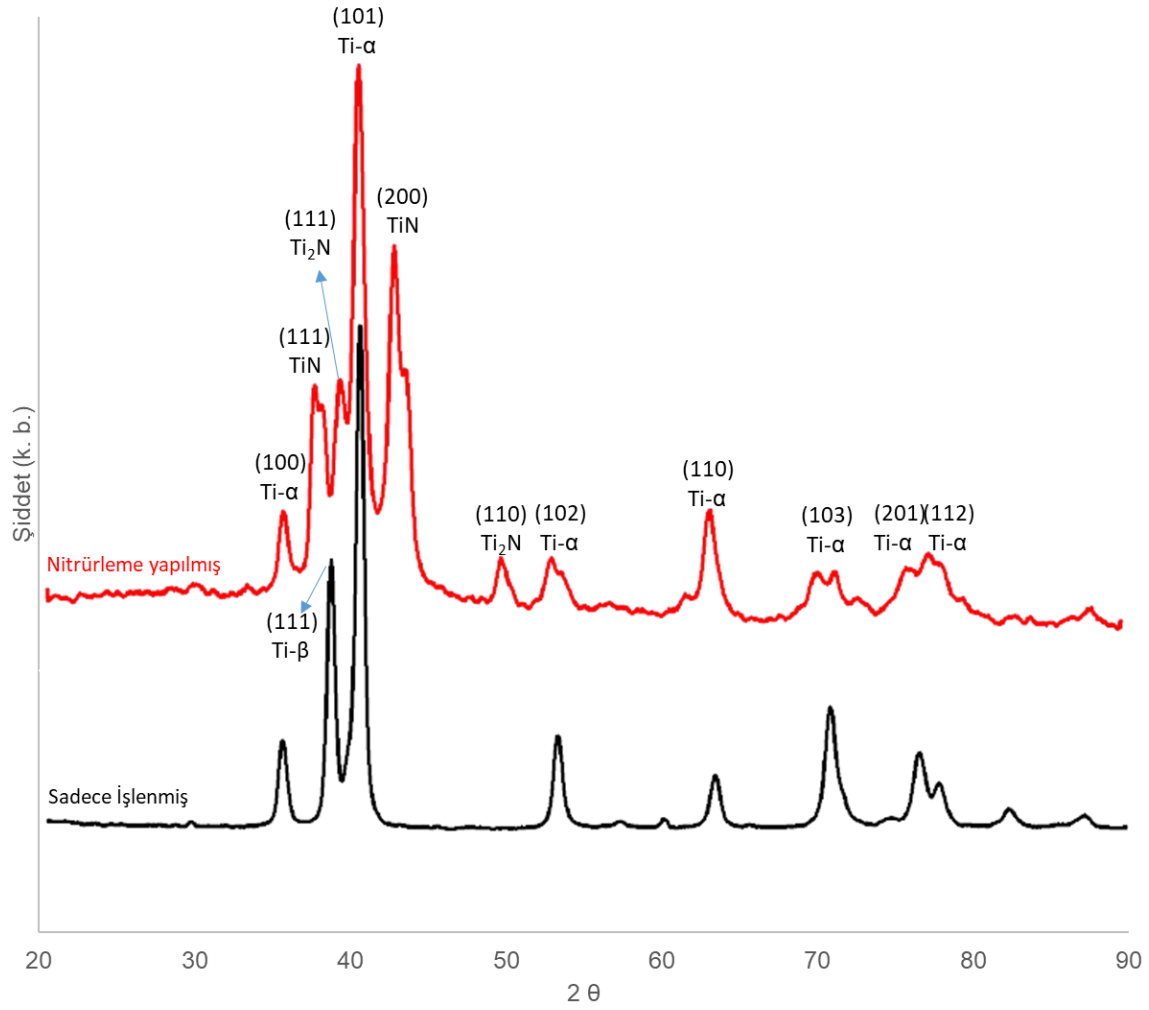
4.2.1. XRD analizi sonuçları

Bütün süreçlere XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizlerinde, malzeme mikroyapısındaki faz değişimleri, oksitlenme meydana gelmişse görülmesi ve nitrürleme sonrasında yeni oluşacak olan titanyum nitrür bileşiklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ardıl işlemlerin birleşik olarak uygulandığı numunelerinin XRD analizleri, sadece nitrürleme işlemi yapılmış numunelerin XRD analizleriyle birebir aynı sonuç verdiği için ayrıca incelenmemiştir. Sadece işlenmiş, sadece HIP işlemi uygulanmış ve sadece nitrürleme işlemi uygulanmış numunelerin karşılaştırmalı XRD analizleri şekil 4.6 ve şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Sadece işlenmiş ve Sadece HIP işlemi uygulanmış numunelerin karşılaştırmalı XRD analizleri

Sadece işlenmiş ve HIP işlemi yapılmış numunelerin karşılaştırmalı XRD sonuçları Şekil 4.6’ da incelendiğinde, HIP işleminin malzemede görülen titanyum fazlarını değiştirmedeği gözlemlenmiştir. HIP işlemi yapılmış numunede Al_2O_3 pikleri gözlemlenmiştir. 100 yoğunluktaki Al_2O_3 piki yaklaşık 57° de (00-001-1296) görülmüştür. HIP ve işlenmiş numunede ortak olarak alfa titanyum ve beta titanyum fazları tespit edilmiştir. 100 yoğunluktaki α Ti piki yaklaşık 40° de (00-044-1294) ve 100 yoğunluktaki β Ti piki yaklaşık 38° de (01-079-6208) görülmüştür.

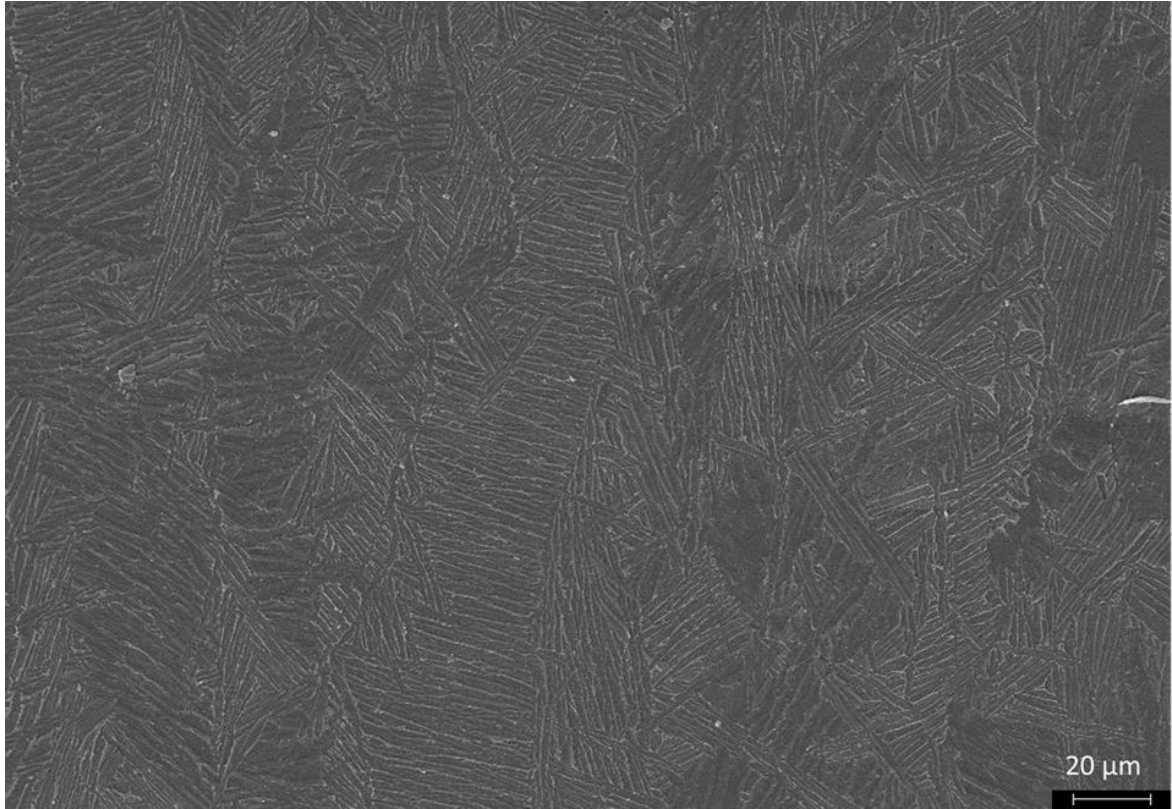


Şekil 4.7. Sadece işlenmiş ve Sadece nitrüleme işlemi uygulanmış numunelerin karşılaştırmalı XRD analizleri

Sadece işlenmiş ve nitrüleme işlemi yapılmış numunelerin karşılaştırmalı XRD sonuçları Şekil 4.7’ de incelendiğinde, esas malzemede görülen alfa titanyum piklerinin tamamı aynı derecelerde nitrüleme sonrasındaki desende de görülmüştür. Bunun yanında esas malzemede bulunan beta titanyum piki literatürde örneklerini gördüğümüz gibi faz değişimine uğramıştır. Buna ilaveten nitrüleme sonrası azot atomlarının difüzyonu sonucu oluşan titanyum nitrid fazları nitrüleme yapılmış malzeme deseninde gözlemlenmiştir. 100 yoğunluktaki TiN piki yaklaşık 42°’ de (00-006-0642) ve 100 yoğunluktaki Ti₂N piki yaklaşık 39°’ de (01-076-0198) görülmüştür. Bu sonuçlar nitrüleme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermekle birlikte nitrüleme performansı hakkında bilgi vermemektedir.

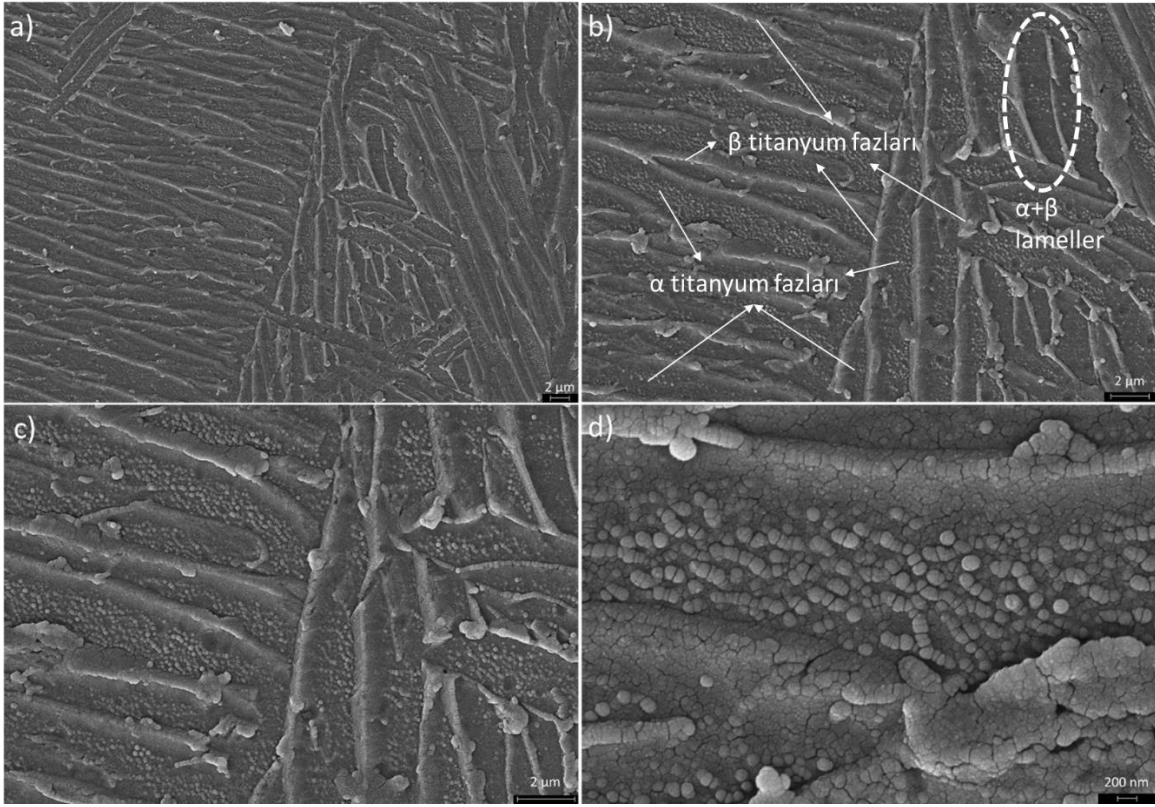
4.2.2. SEM analizi sonuçları

Üretimi tamamlanmış bütün süreçlere SEM analizi yapılmıştır. SEM analizlerinde sadece işlenmiş ve sadece HIP işlemi yapılmış süreçlerin yüzeyleri, nitrürleme işlemi yapılmış olan numunelerin kesit yüzeyleri ve bütün süreçlerin yorulma deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Sadece işlenmiş numunenin SEM görüntüsü Resim 4.6’ da gösterilmiştir.



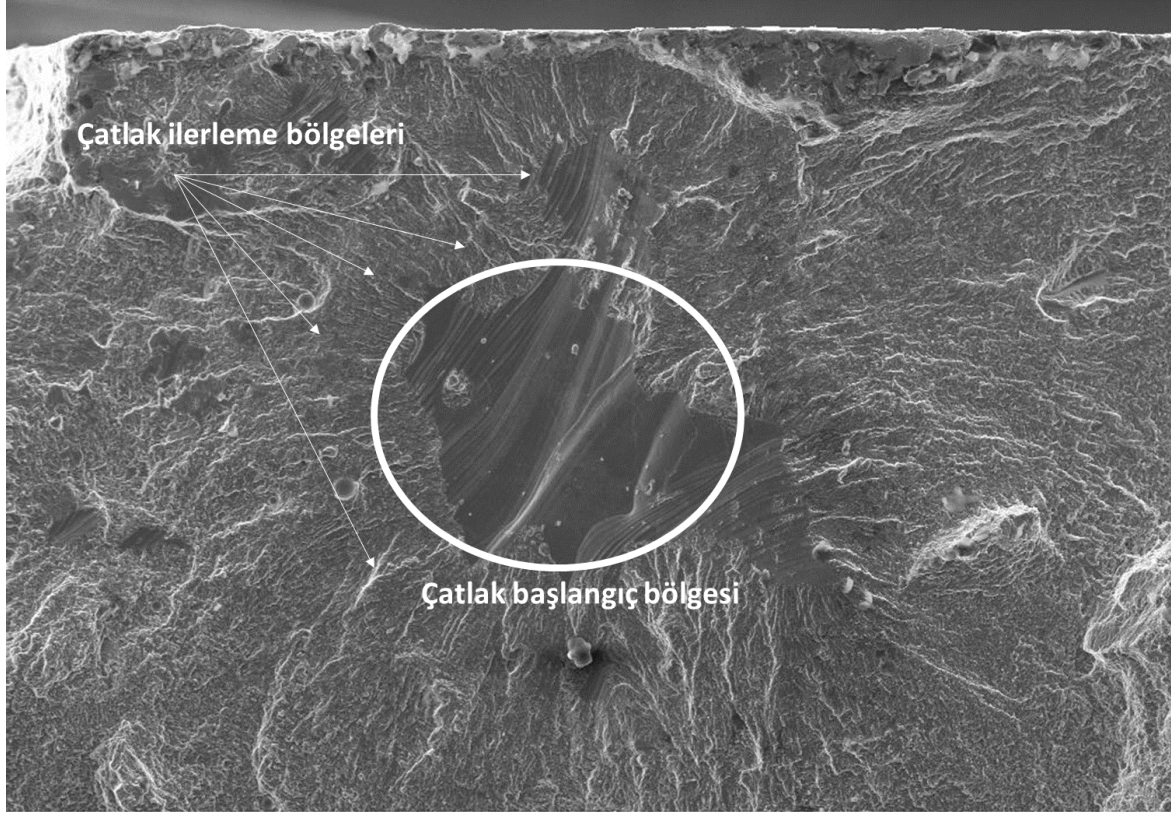
Resim 4.6. İşlenmiş numunenin 1000 kat büyütmede çekilmiş yüzey SEM görüntüsü

Sadece işlenmiş numunenin 1000 kat büyütme altında SEM görüntüsü incelendiğinde titanyumun alfa ve beta fazlarının tane sınırları geniş perspektifte görülmektedir. Sadece işlenmiş numunenin daha detaylı SEM görüntüleri Resim 4.7’ de gösterilmiştir.



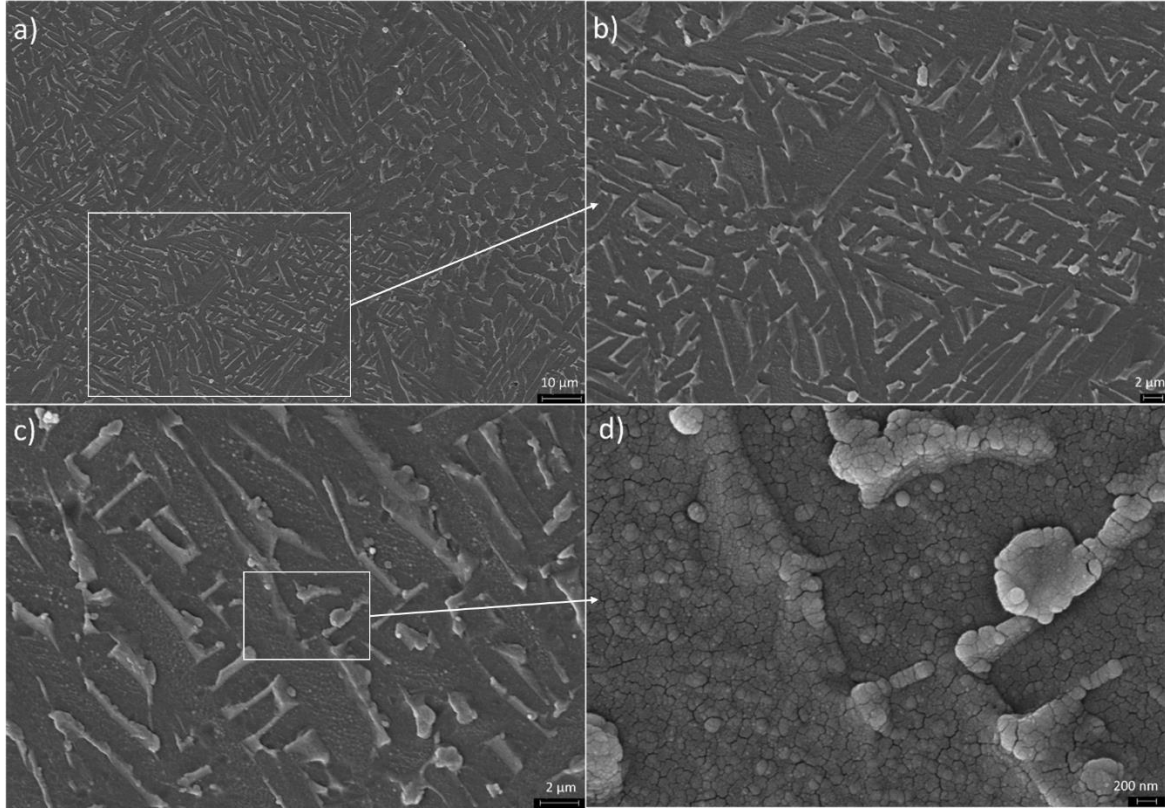
Resim 4.7. İşlenmiş numunenin a) 5000 b) 10000 c) 15000 d) 50000 büyütmelerde çekilmiş yüzey SEM görüntüleri

Sadece işlenmiş numunenin 5000-10000-15000-50000 büyütme altında SEM görüntüleri incelendiğinde titanyumun alfa ve beta fazlarının tane sınırları net bir şekilde görülmektedir. Burada görülen $\alpha+\beta$ lamellerinin kenarlarında bulunan açık renkli çizgi şeklindeki yapılar beta titanyum fazlarını, arka plan olarak görülen gri renkli bölgeler ise alfa titanyum fazlarını göstermektedir. Sadece işlenmiş numunenin kırılma yüzeyi görüntüsü Resim 4.8’ de gösterilmiştir.



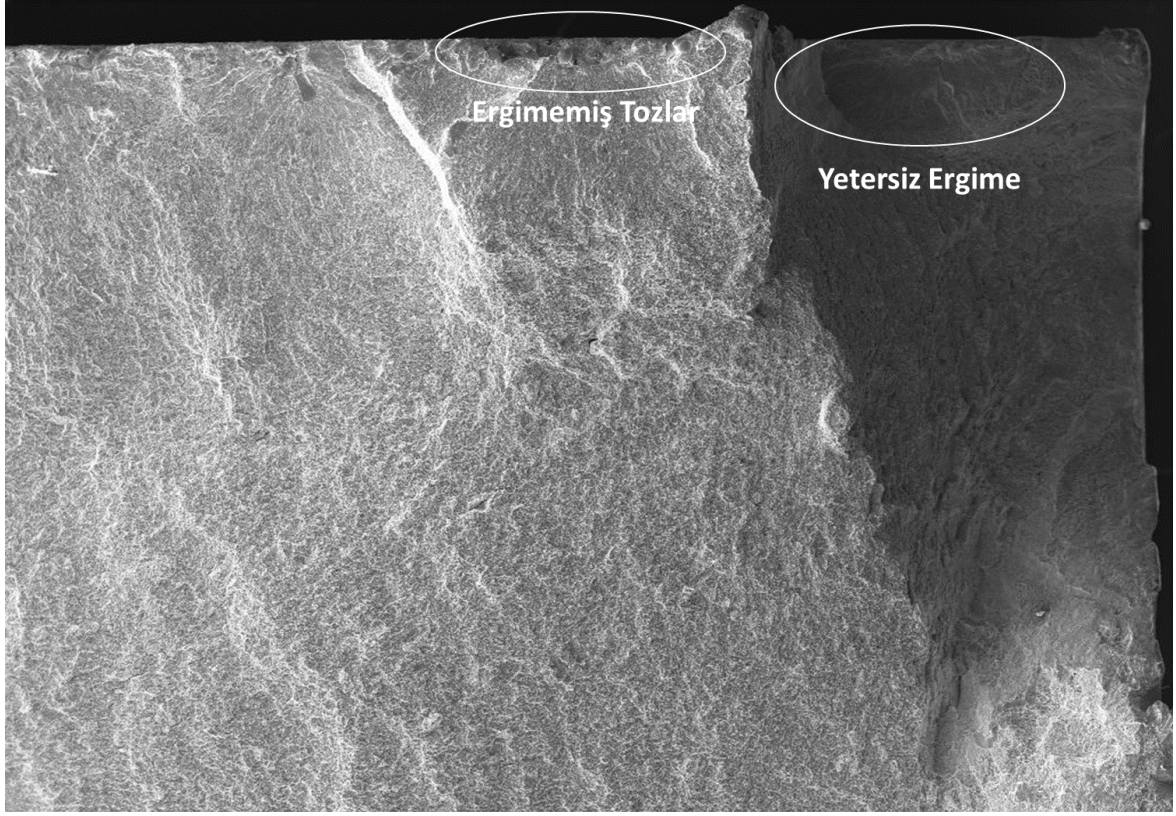
Resim 4.8. İşlenmiş numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

Sadece işlenmiş numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Resim 4.8’ de incelendiğinde, çatlak başlangıcı halka içine alınmış bölgede gösterilen yetersiz ergime sonucu oluşmuştur. Çatlak başlangıç bölgesi çevresinde çatlak ilerlemelerini gösteren çizgi şeklindeki yapılar görülmektedir. HIP işlemi yapılmış numunenin SEM görüntüleri Resim 4.9’ da gösterilmiştir.



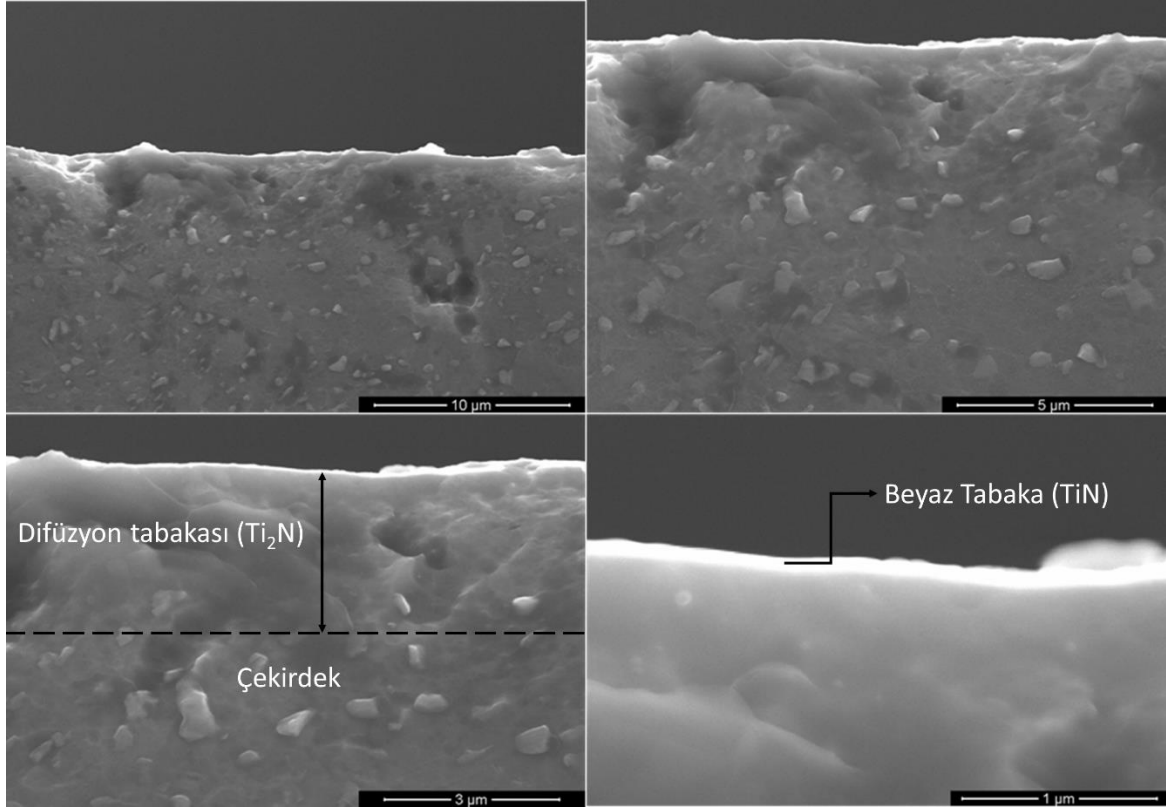
Resim 4.9.HIP işlemi yapılmış numunenin a) 2000 b) 5000 c) 10000 d) 50000 büyütmelerde çekilmiş yüzey SEM görüntüleri

HIP işlemi yapılmış numunenin 2000-5000-10000-50000 büyütme altında SEM görüntüleri incelendiğinde titanyumun alfa ve beta fazlarının tane sınırları net bir şekilde görülmektedir. Bu görüntülerde açık renkli çizgi şeklindeki yapılar beta titanyum fazlarıdır. Beta titanyum fazının dışında kalan koyu renkli yapı ise alfa titanyum fazıdır. HIP işlemi sonrası işlemin ısı işlem etkilerinden dolayı beta titanyum fazları genişlemiştir. Bu durum sonucunda süneklik artışı belirlenmiştir. HIP işlemi yapılmış numunenin kırılma yüzeyi görüntüsü Resim 4.10’ da gösterilmiştir.



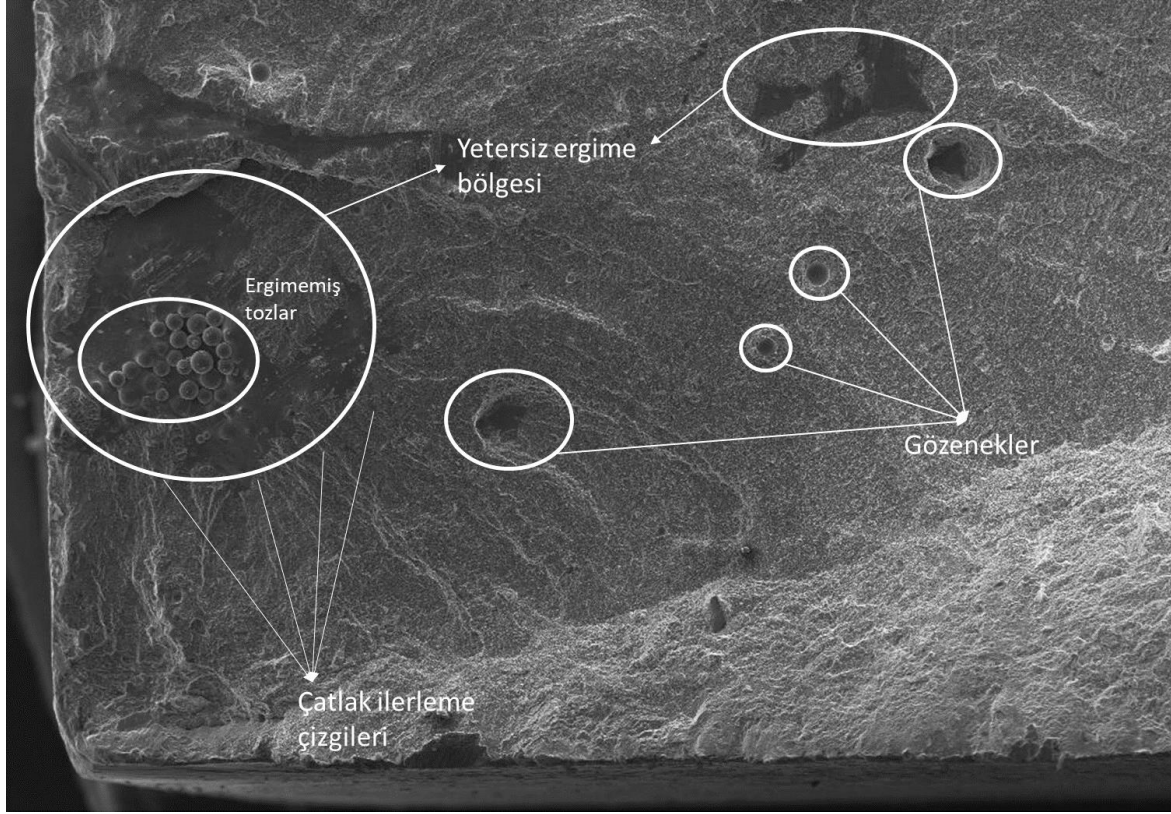
Resim 4.10. HIP işlemi yapılmış numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

HIP işlemi yapılmış numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Resim 4.10' da incelendiğinde, malzeme dış yüzeyine temas eden ergimemiş tozlar ve yetersiz ergime bölgeleri gösterilmiştir. Kırılma başlangıcının yüzeyden olduğu gözlemlenmiştir. Nitritleme işlemi yapılmış numunenin kesit SEM görüntüleri Resim 4.11' de gösterilmiştir.



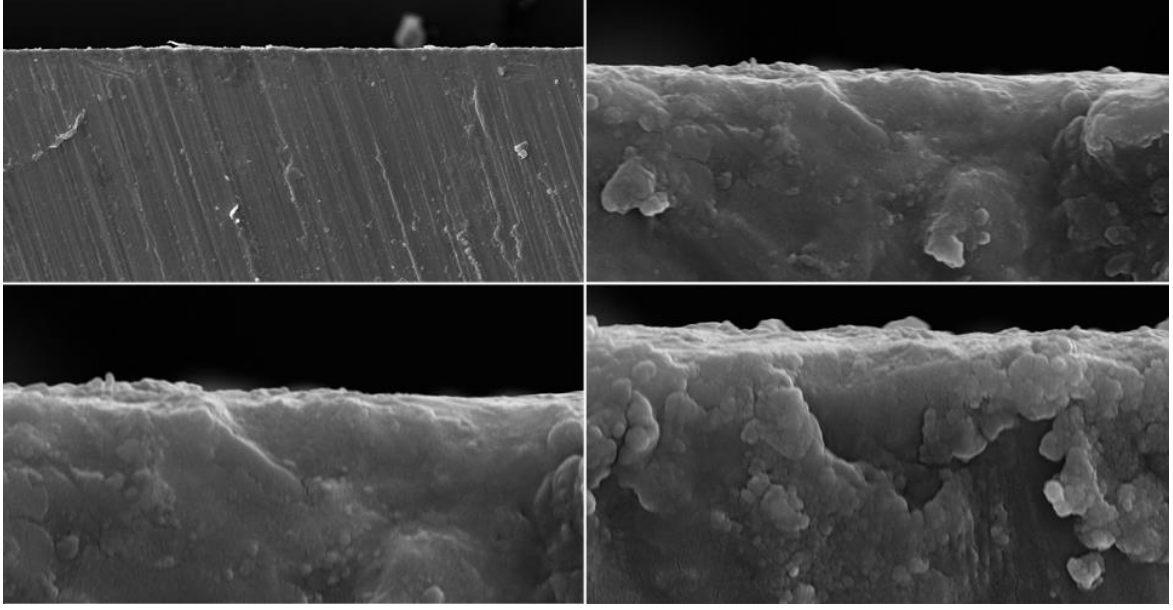
Resim 4.11. Nitrürleme işlemi yapılmış numunenin kesit SEM görüntüleri

Nitrürleme yapılmış numunenin kesit görüntüleri incelendiğinde malzeme yüzeyinde meydana gelen titanyum nitrür (TiN) katmanını görüntülerde beyaz renkte görülmektedir. Görselde beyaz tabakanın altındaki bölgede parçacık yapısının olmayışı bu bölgenin nitrürleme difüzyon tabakası (Ti_2N) olduğunu göstermektedir. Bu beyaz tabaka ve difüzyon tabakasının oluşumu nitrürleme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermekle beraber difüzyon tabakasının yaklaşık 3 mikrometre kalınlığında olması işlemin malzemeye difüzyon derinliği açısından yeterince etkili olmadığını göstermektedir. Kesit görüntülerinde titanyum nitrür tabakalarının aşağısında görülmeye başlayan parçacıklar beta titanyum fazlarıdır. Nitrürleme işlemi yapılmış numunenin kırılma yüzeyi görüntüsü Resim 4.12’ de gösterilmiştir.



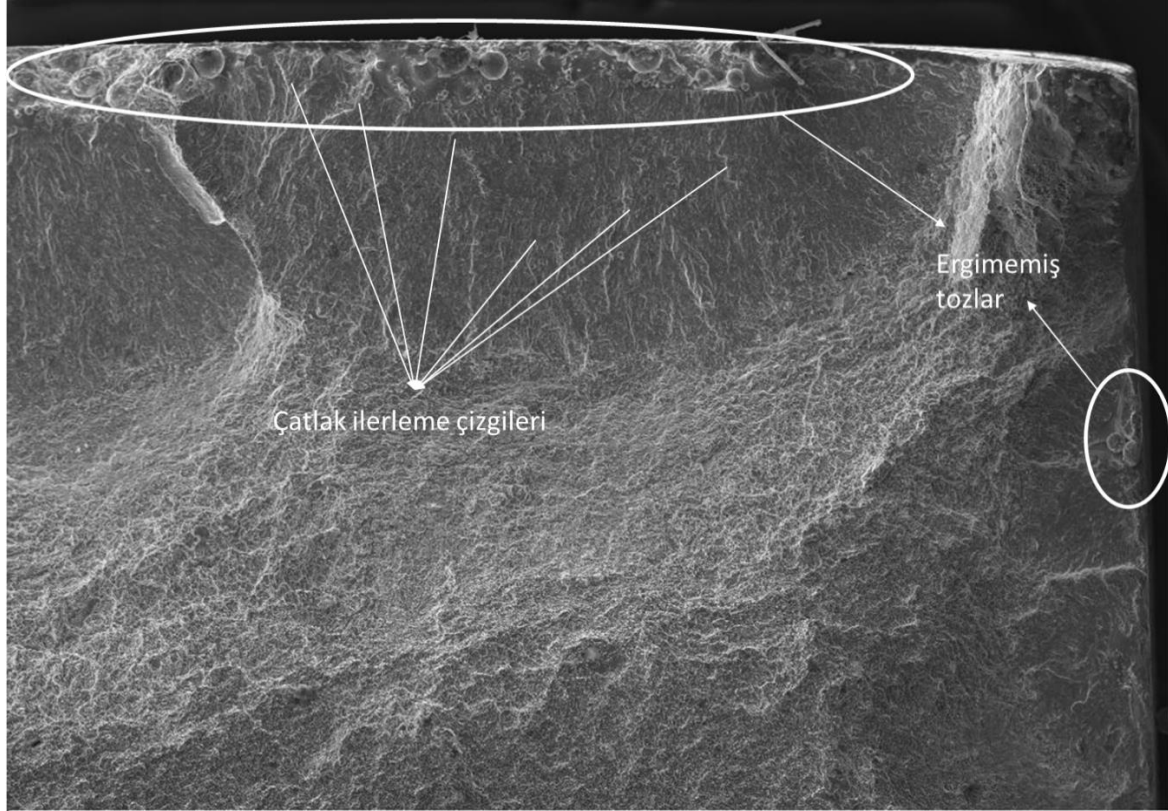
Resim 4.12. Nitrüleme işlemi yapılmış numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

Nitrüleme işlemi yapılmış numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Resim 4.12’ de incelendiğinde, yetersiz ergime bölgeleri, ergimemiş tozlar, gözenek yapıları ve çatlak ilerleme çizgileri görülmektedir. Bu bölgelere dikkat edildiğinde çatlak başlangıcının yüzeye yakın yetersiz ergime bölgesi üzerinde başladığı ve çatlak ilerleme çizgileri boyunca ilerleyip kırılmaya sebep olduğu anlaşılmıştır. HIP ve nitrüleme işlemleri yapılmış numunenin kesit SEM görüntüleri Resim 4.13’ te gösterilmiştir.



Resim 4.13. HIP ve nitrürleme işlemleri yapılmış numunenin kesit SEM görüntüleri

HIP işlemi sonrası nitrürleme yapılmış numunenin kesit görüntüsü Resim 4.13' te incelendiğinde, sadece nitrürleme işlemi yapılmış numunenin kesit görüntüsünde görülen yapılan aynen görülmüştür. Sadece nitrürleme yapılmış numunenin SEM görüntülerinde farklılık göstermesinin sebebi HIP ve nitrürleme yapılmış numunenin SEM analizi için yapılan hazırlık aşamalarının farklı düzeyde olmasıdır. HIP ve nitrürleme işlemleri yapılmış numunenin kırılma yüzeyi görüntüsü Resim 4.14' te gösterilmiştir.



Resim 4.14. HIP ve nitrürleme işlemleri yapılmış numunenin yorulma deneyindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

HIP ve nitrürleme işlemleri yapılmış numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Resim 4.14’ te incelendiğinde, halka içinde gösterilen, malzeme dış yüzeyine teması bulunan ergimemiş tozların çatlak başlangıcına neden olduğu anlaşılmaktadır.

4.2.3. EDS analizi sonuçları

SEM analizi ile birlikte gerçekleştirilen EDS analizi ile farklı süreçlerdeki malzemelerin elementsel analizleri yüzde kütlece olarak listelenmiştir. Üretimlerde kullanılan Ti6Al4V tozlarının elementsel kütlece yüzdesi Çizelge 4.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Ti6Al4V tozu EDS analizi

Ti6Al4V tozu	
Element	Kütlece %
Ti	90,10
Al	6,38
V	3,52

Üretimde kullanılan Ti6Al4V tozunun standartlara uygun olduğu EDS sonuçları ile teyit edilmiştir. Nitrürleme işlemi yapılmış malzemelerin elementsel kütlece yüzdesi Çizelge 4.3’ te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Nitrürleme işlemi yapılmış malzemenin EDS analizi

Nitrürleme	
Element	Kütlece %
Ti	86,05
N	8,39
Al	3,43
V	2,13

Nitrürleme işlemi yapılmış numunelerin EDS analizleri incelendiğinde işlemdeki azot difüzyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, Ti6Al4V malzemeden eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmiş numunelere uygulanan farklı ardıl işlemlerin mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Ardıl işlemler olarak seçilen HIP ve nitrürleme işlemlerinin kombinasyonları ile üretilen numunelere çekme, darbe, mikrosertlik ve yorulma testlerine tabi tutulmuştur.

- Sadece HIP işlemi uygulanan numunelerin mekanik deney sonuçları incelendiğinde, çekme deneyinde kayda değer bir değişiklik göstermediği, darbe deneyinde süneklik artışı sağlaması sebebiyle %36 oranında artış sağladığı, mikrosertlik deneyinde yine süneklik artışı sebebiyle %12 oranında düşüş gösterdiği ve yorulma deneyinde iç gözenekleri minimize ettiği için %31 oranında artış sağladığı gözlemlenmiştir.
- Sadece nitrürleme işlemi uygulanan numunelerin mekanik deney sonuçları incelendiğinde, çekme deneyinde, gerçekleşen difüzyon sebebiyle numunelerin yüzeyin bulunan beta titanyum fazları yok olarak görece daha düşük dayanımlı alfa fazları sebebiyle %7 oranında düşüş gösterdiği, darbe deneyinde gözle görülür bir değişiklik göstermediği, mikrosertlik deneyinde oluşan titanyum nitrür kaplaması sayesinde %47 oranında artış gözlemlendiği ve yorulma deneyinde yüksek kırılgenlik sebebiyle %74 oranında düşüş sergilediği görülmüştür.
- HIP ve nitrürleme işlemlerinin beraber uygulandığı numunelerin mekanik deney sonuçları incelendiğinde, çekme deneyinde sadece nitrürleme uygulanan numunelerin aksine kayda değer bir düşüş gözlemlenmediği, darbe deneyinde sadece nitrürleme yapılmış numunenin aksine darbe enerjisini %12 oranında artış gösterdiği, mikrosertlik deneyinde beklendiği üzere HIP işlemiyle azalan ve nitrürleme işlemiyle artan şekilde %32 oranında artış gözlemlendiği ve yorulma deneyinde HIP işleminin katkısı sayesinde nitrürleme işleminin düşüşü sönümlenerek %19 oranında düşüş gözlemlenmiştir. HIP ve nitrürleme işlemlerinin beraber kullanıldığı süreç incelendiğinde HIP işleminin, nitrürleme işleminin olumsuz etkilerini azalttığı görülmüştür.

Bu tezin odak noktası olan dişli parça araştırması gereğince belirlenen ardıl işlemler, mekanik testlerle karşılaştırılmış ve dişli parçalara uygulanacak olan yorulma testinde en yüksek ömrü veren süreç olan sadece HIP işlemi dişli parçasına uygulanmıştır. HIP

işleminin dişli parçası üzerindeki etkisini haricen görebilmek adına bir tane HIP işlemi yapılmış bir tane de ek işlem yapılmamış dişli parçaları yorulma testine tabi tutulmuştur. Bu test sonucunda, HIP işlemi yapılmış dişli parça ile sadece işlenmiş dişli numunenin yorulma ömürleri arasında fark gözlemlenmemiştir.

Bu tez, dişli parçasının Ti6Al4V malzeme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirliğinin mekanik açıdan değerlendirilmesi konusunda literatürde özgünlük taşımaktadır. Ti6Al4V malzeme üzerinde ardıl işlemlerin birlikte kullanılması açısından HIP ile nitrüleme işlemlerinin birlikte kullanımı literatürde örneği bulunmayan bir inceleme sağlamıştır.

Bu tezde, numune ve dişli parça üretiminde talaş kaldırma payı olarak belirlenen yarım milimetrelik fazlalık parçaların dış gözenek boyutundan düşük kalması sebebiyle parça yüzeyindeki gözenekler tam olarak yok edilememiştir. Gelecek çalışmalarda yüzey gözeneklerini yok etmek amacıyla daha fazla talaş kaldırma payı verilmelidir. Belirlenen numunelere uygulanan nitrüleme işlemi sonrasında yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda nitrüleme işleminin difüzyon derinliği açısından yeterli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle gelecek çalışmalarda nitrüleme sıcaklığı (en az 750°C) daha yüksek ve nitrüleme süresi daha düşük değerlerde seçilmelidir. Bunun yanında dişli parçası gibi görece karmaşık geometrili parçalarda gaz nitrüleme işlemi daha avantajlı görünse de diğer nitrüleme yöntemleri denenebilir. HIP işleminin yapılmasının temel amacı da olan eklemeli imalat ile üretimlerdeki gözenek yapısını daha iyi incelemek adına gelecek çalışmalarda bilgisayarlı tomografi analizinden faydalanılabilir. Dişli parçasının eklemeli imalat yöntemiyle üretiminde EBM yöntemi seçilmiştir. Gelecek çalışmalarda EBM yöntemine ek olarak SLM yöntemiyle de aynı üretimler gerçekleştirilip daha geniş çaplı karşılaştırma yapılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Leyens, C., and Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys-fundamentals and applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 333-532.
2. Greitemeier, D., Dalle Donne, C., Syassen, F., Eufinger, J., and Melz, T. (2016). Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science and Technology*, 32(7), 629-634.
3. Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., and Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface & Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207
4. Weissbach, W. (1993). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi* (Çev: S. Anık, S. Anık ve M. Vural). İstanbul: Birsen Kitabevi. (Eserin orijinali 1989'da yayımlandı), 248-251.
5. İnternet: Rutile. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rutile>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2021.
6. Henriques, V. A. R., Galvani, E. T., Petroni, S. L. G., Paula, M. S. M., and Lemos, T. G. (2010). Production of Ti-13Nb-13Zr alloy for surgical implants by powder metallurgy. *Journal of Materials Science*, 45(21), 5844-5850.
7. Anselme, K., and Bigerelle, M. (2005). Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion. *Acta Biomaterialia*, 1(2), 211-222.
8. Ensarioğlu C., ve Çakır M. C. (2005). Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü. *Mühendis ve Makina*, 46(546), 36 - 46.
9. Veiga, C., Davim, J. P., and Loureiro, J. R. (2012). *Properties and applications of titanium alloys: a brief review*. Advanced Study Center Co. Ltd., 133-148.
10. İnternet: Types of Titanium Alloys. URL: <https://titaniumprocessingcenter.com/the-element-titanium/>, Son Erişim Tarihi: 13.01.2021.
11. İnternet: Chemical Composition of Ti and Its Alloys. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10155807/ASTM%20F67>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2021.
12. Fujii, H. (1998). Strengthening of $\alpha + \beta$ titanium alloys by thermomechanical processing. *Materials Science and Engineering A*, 243(1-2), 103-108.
13. İnternet: How can aerospace benefit from 3D printed titanium Ti6Al4V. URL: <https://www.farinia.com/blog/how-can-aerospace-benefit-3d-printed-titanium-ti6al4v>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2021.
14. Donachie, M.J. (2000). *Titanium A Technical Guide*. Ohio: ASM International, Metals Park, 139-142.

15. Dolev, O., Osovski, S., and Shirizly, A. (2021). Ti-6Al-4V hybrid structure mechanical properties-wrought and additive manufactured powder-bed material. *Additive Manufacturing*, 37, 101657.
16. Yang, J., Wu, J., Zhang, Q., Han, R., and Wang, K. (2020). Investigation of flow behavior and microstructure of Ti-6Al-4V with annealing treatment during superplastic forming. *Materials Science and Engineering A*, 797, 140046.
17. Cutolo, A., Engelen, B., Desmet, W., and Van Hooreweder, B. (2020). Mechanical properties of diamond lattice Ti-6Al-4V structures produced by laser powder bed fusion: On the effect of the load direction. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 104, 103656.
18. Li, H., Jia, D., Yang, Z., Liao, X., Jin, H., Cai, D., and Zhou, Y. (2021). Effect of heat treatment on microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V and TiB/Ti-6Al-4V composite: A comparative study. *Materials Science and Engineering A*, 801, 140415.
19. Liang, Z., Sun, Z., Zhang, W., Wu, S., and Chang, H. (2019). The effect of heat treatment on microstructure evolution and tensile properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 1041–1048.
20. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J. P., and Van Humbeeck, J. (2015). Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 5, 77–84.
21. Alimov, A., Sizova, I., Biba, N., and Bambach, M. (2020). Prediction of mechanical properties of Ti-6Al-4V forgings based on simulation of microstructure evolution. *Procedia Manufacturing*, 47, 1468–1475.
22. Frkan, M., Konecna, R., Nicoletto, G., and Kunz, L. (2019). Microstructure and fatigue performance of SLM-fabricated Ti6Al4V alloy after different stress-relief heat treatments. *Transportation Research Procedia*, 40, 24–29.
23. Yan, X., Yin, S., Chen, C., Huang, C., Bolot, R., Lupoi, R., Kuang, M., Ma, W., Coddet, C., Liao, H., and Liu, M. (2018). Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 1056–1071.
24. Zhou, L., Yuan, T., Tang, J., He, J., and Li, R. (2019). Mechanical and corrosion behavior of titanium alloys additively manufactured by selective laser melting – A comparison between nearly β titanium, α titanium and $\alpha + \beta$ titanium. *Optics and Laser Technology*, 119, 1–12.
25. Madikizela, C., Cornish, L. A., Chown, L. H., and Möller, H. (2019). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo compared to Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 747, 225–231.

26. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., and Van Humbeeck, J. (2014). Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting. *Acta Materialia*, 68, 150–158.
27. Zhang, L. C., Klemm, D., Eckert, J., Hao, Y. L., and Sercombe, T. B. (2011). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy. *Scripta Materialia*, 65(1), 21–24.
28. Chi, J., Cai, Z., Wan, Z., Zhang, H., Chen, Z., Li, L., and Guo, W. (2020). Effects of heat treatment combined with laser shock peening on wire and arc additive manufactured Ti17 titanium alloy: Microstructures, residual stress and mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*, 396, 125908.
29. Chamanfar, A., Huang, M.-F., Pasang, T., Tsukamoto, M., and Misiolek, W. Z. (2020). Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-10V-2Fe-3Al (Ti1023) titanium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7721–7731.
30. Zhang, F., Qiu, Y., Hu, T., Clare, A. T., Li, Y., and Zhang, L. C. (2020). Microstructures and mechanical behavior of beta-type Ti-25V-15Cr-0.2Si titanium alloy coating by laser cladding. *Materials Science and Engineering A*, 796, 140063.
31. Mishin, I. P., Naydenkin, E. V, Zabudchenko, O. V, Manisheva, A. I., Bobrov, D. I., and Aleksandrovskiy, E. K. (2021). Evolution of structure, mechanical properties and fracture of β titanium alloy in the process of wire obtaining. *Materials Letters*, 303, 130476.
32. Tian, X. J., Zhang, S. Q., and Wang, H. M. (2014). The influences of anneal temperature and cooling rate on microstructure and tensile properties of laser deposited Ti-4Al-1.5Mn titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 608, 95–101.
33. Vishnu, J., Sankar, M., Rack, H. J., Rao, N., Singh, A. K., and Manivasagam, G. (2020). Effect of phase transformations during aging on tensile strength and ductility of metastable beta titanium alloy Ti-35Nb-7Zr-5Ta-0.35O for orthopedic applications. *Materials Science and Engineering A*, 779, 139127.
34. Chen, Z., Xu, L., Liang, Z., Cao, S., Yang, J., Xiao, S., and Chen, Y. (2021). Effect of solution treatment and aging on microstructure , tensile properties and creep behavior of a hot-rolled β high strength titanium alloy with a composition of Ti-3.5Al-5Mo-6V-3Cr-2Sn-0.5Fe-0.1B-0.1C. *Materials Science & Engineering A*, 823, 141728.
35. Wang, H. B., Wang, S. sen, Gao, P. yue, Jiang, T., Lu, X. gang, and Li, C. he. (2016). Microstructure and mechanical properties of a novel near- α titanium alloy Ti6.0Al4.5Cr1.5Mn. *Materials Science and Engineering A*, 672, 170–174.
36. Zhao, Y. Q., Xin, S. W., and Zeng, W. D. (2009). Effect of major alloying elements on microstructure and mechanical properties of a highly β stabilized titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 481(1–2), 190–194.

37. Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1–2), 231–236.
38. Kayacan, M. Y., ve Yılmaz, N. (2019). DMLS ile eklemeli imalatda dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 79–94.
39. İnternet: Top Ten Advantages of Additive Manufacturing. URL: <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/10-additive-manufacturing-advantages>, Son Erişim Tarihi: 15.01.2021.
40. Beyer, C. (2014). Strategic implications of current trends in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 1–8.
41. Webb, P. A. (2000). A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 24(4), 149–153.
42. İnternet: What lies ahead for 3-D printing?. URL: <https://www.smithsonianmag.com/sciencenature/what-lies-ahead-for-3-d-printing-37498558/>, Son Erişim Tarihi: 11.01.2021.
43. İnternet: 3-D printing coming to the manufacturing space and outer space. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2012-01-09/3-D-printingcoming-to-the-manufacturing-space-andouter-space>, Son Erişim Tarihi: 11.01. 2021.
44. İnternet: 3D Printed Titanium Pen: Lattice Cubed from SALVO. URL: <https://www.3printr.com/3d-printed-titanium-pen-lattice-cubed-salvo-3344783/>, Son Erişim Tarihi: 11.01. 2021.
45. İnternet: Additive manufacturing: Facts and forecasts. URL: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/industry-andautomation/Additivemanufacturing-facts-and-forecasts.html>, Son Erişim Tarihi: 13.01.2021.
46. M. Yakout, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis. (2018). A review of metal additive manufacturing Technologies. *Solid State Phenom*, 278, 1–14.
47. Rahmati, S. (2014). Direct Rapid Tooling. *Comprehensive Materials Processing*, 10, 303–344.
48. Bas, H., ve Yapici, F. (2015). Ergonomik tasarım ve üretimde hızlı prototipleme teknolojisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 199–204.
49. Khan, M., Sheikh, N. A., Jaffery, S. H. I., Ali, L., and Alam, K. (2014). Numerical simulation of meltpool instability in the selective laser melting (SLM) process. *Lasers in Engineering*, 28(5–6), 319–336.

50. Murr, L. E., Martinez, E., Gaytan, S. M., and Ramirez, D. A. (2012). Contributions of light microscopy to contemporary materials characterization: The new directional solidification. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 1(1), 45–58.
51. İnternet: Additive manufacturing technologies overview. URL: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologiesoverview>, Son Erişim Tarihi: 18.01.2021.
52. Chastand, V., Quaegebeur, P., Maia, W., and Charkaluk, E. (2018). Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM). *Materials Characterization*, 143, 76–81.
53. Kahlin, M., Ansell, H., and Moverare, J. J. (2017). Fatigue behaviour of notched additive manufactured Ti6Al4V with as- built surfaces. *International Journal of Fatigue*, 101(1), 51–60.
54. Rafi, H. K., Karthik, N. V, Gong, H., Starr, T. L., and Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, 3872–3881.
55. Vayssette, B., Saintier, N., Brugger, C., Elmay, M., and Pessard, E. (2018). Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the high cycle fatigue life. *Procedia Engineering*, 213, 89–97.
56. Zhao, X., Li, S., Zhang, M., Liu, Y., Sercombe, T. B., Wang, S., Hao, Y., Yang, R., and Murr, L. E. (2016). Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Materials and Design*, 95, 21–31.
57. Brandl, E., Leyens, C., and Palm, F. (2011). Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes. *Materials Science and Engineering*, 26(1), 1–10.
58. Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., and Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*, 10, 47–57.
59. Kircher, R. S., Christensen, A. M., and Wurth, K. W. (n.d.). The Effects of Specimen Dimensions on the Mechanical Behavior of EBM Produced Ti6Al4V Alloys. *Solid Freeform Fabrication*, 1, 398–405.
60. Karlsson, J., Snis, A., Engqvist, H., and Lausmaa, J. (2013). Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti – 6Al – 4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2109–2118.

61. Mian, M. J., Razmi, J., and Ladani, L. (2021). Defect analysis and fatigue strength prediction of as-built Ti6Al4V parts, produced using electron beam melting (EBM) AM technology. *Materialia*, 16, 101041.
62. Mohammad, A., Alahmari, A. M., Mohammed, M. K., Renganayagalu, R. K., and Moiduddin, K. (2017). Effect of energy input on microstructure and mechanical properties of titanium aluminide alloy fabricated by the additive manufacturing process of electron beam melting. *Materials*, 10(2), 1–16.
63. Persenot, T., Martin, G., Dendievel, R., Buffière, J. Y., and Maire, E. (2018). Enhancing the tensile properties of EBM as-built thin parts: Effect of HIP and chemical etching. *Materials Characterization*, 143, 82–93.
64. Hrabe, N., Gnäupel-herold, T., and Quinn, T. (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti – 6Al – 4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 94, 202–210.
65. Loh, N. L., and Sia, K. Y. (1992). An overview of hot isostatic pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 30(1), 45–65.
66. Zimmerman, F. X. (2008). Hot isostatic pressing: today and tomorrow. *Journal of Materials Science and Technology*, 1, 1–11.
67. Atkinson, H. V., and Davies, S. (2000). Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 31A(12), 2981–3000.
68. Mostafavi Kashani S.M., Rhodin H., and Boutorabi S.M.A. (2013). Effects of hot isostatic pressing on the tensile properties of A356 cast alloy. *Journal of Materials Science & Engineering*, 10, 54-64.
69. Zheng, X. G., Shi, Y. N., and Lou, L. H. (2015). Healing process of casting pores in a Ni-based superalloy by hot isostatic pressing. *Journal of Materials Science and Technology*, 31(11), 1151–1157.
70. Appa Rao, G., Sankaranarayana, M., and Balasubrananiam, S. (2012). Hot isostatic pressing technology for defence and space applications. *Defence Science Journal*, 62(1), 73-80.
71. Wu, M., Chen, J., Lin, B., Chiang, P., and Tsai, M. (2020). Compressive fatigue properties of additive-manufactured Ti-6Al-4V cellular material with different porosities. *Materials Science & Engineering A*, 790, 1–9.
72. Masuo, H., Tanaka, Y., Morokoshi, S., Yagura, H., Uchida, T., Yamamoto, Y., and Murakami, Y. (2017). Effects of Defects, Surface Roughness and HIP on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V manufactured by Additive Manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, 7, 19–26.

73. Popov, V., Katz-Demyanetz, A., Garkun, A., Muller, G., Strokin, E., and Rosenson, H. (2018). Effect of Hot Isostatic Pressure treatment on the Electron-Beam Melted Ti-6Al-4V specimens. *Procedia Manufacturing*, 21, 125–132.
74. Mohammadhosseini, A., Fraser, D., Masood, S. H., and Jahedi, M. (2013). Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*, 17(2), 107–111.
75. Pye, D. (2003). *Practical nitriding and ferritic nitrocarburising*. Ohio: ASM International, Materials Park, 53-86.
76. Davis, J. R. (2002). *Surface hardening of steels: understanding the basics*. Ohio: ASM International, Materials Park, 272-302.
77. Du, H., Somers, M. A. J., and Agren, J., (2000). Metallurgical and materials transactions. *Physical Metallurgy and Materials Science*, 31, 195-211.
78. Stephen, M. C. (1991). Introduction to Surface Hardening. *Heat Treatment*, 4, 607-620.
79. Rao, K. S., Chandra, R. G., and Dinesh. K. (2013). Improvement of wear resistance in engine cylinder liners using gas nitriding. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(10), 54-57.
80. Huiliang, C., Luo, C.P., Liu, J. and Zou, G. (2007). Phase transformations in low-temperature chromized 0.45 wt.% C plain carbon steel. *Surface & Coatings Technology*, 201(18), 7970-7977.
81. Winter, Karl-Michael. (2009). *Gaseous Nitriding: In theory and in real life*. ASM Heat Treating Society - 25th Conference and Exposition: Gearing Up for the Winds of Change. Indianapolis, USA, 2-10.
82. Arslan, A., and Çelik, A. (2001). Structural characterization of ion-nitrided AISI 5140 low-alloy steel. *Materials Characterization* 47, 207- 213.
83. Funatani, K. (2004). Low-temperature salt bath nitriding of steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 46(7), 12-17.
84. Korwin M. J., Morawski C. D., Tymowski G. J., and Liliental W. K. (2004). Design of nitrided and nitrocarburized materials. *Handbook of Metallurgical Process Design*, 1, 40.
85. Mukhtar, A., Fry, M., Jackson, B., and Bolzoni, L. (2019). Effects of gas nitriding on fatigue and crack initiation of Ti6Al4V produced by selective laser melting. *Materials Research*, 22, 1–6.
86. Mukhtar, A., Fry, M., and Jackson, B. (2018). Evaluation of nitriding and surface machining effects on tensile and fatigue properties of additively manufactured Ti6Al4V. *World Congress on Powder Metallurgy*, 11, 1575–1583.

87. Morita, T., Shimizu, M., Kawasaki, K., and Chiba, T. (1991). Fatigue properties of nitrided Ti-6Al-4V alloy. *Mechanical and Corrosion Properties. Series A, Key Engineering Materials*, 51–52, 43–48.
88. Tokaji, K., Ogawa, T., and Shibata, H. (1999). The effects of gas nitriding on fatigue behavior in titanium and titanium alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 8(2), 159–167.
89. Franz, P., Mukhtar, A., Downing, W., Smith, G., and Jackson, B. (2016). Mechanical behaviour of gas nitrided Ti6Al4V bars produced by selective laser melting. *Key Engineering Materials*, 704, 225–234.
90. Lee, D. B., Abro, W. A., Lee, K. S., Abro, M. A., Pohrelyuk, I., and Yaskiv, O. (2018). Gas nitriding and oxidation of Ti-6Al-4V alloy. *Defect and Diffusion Forum*, 382, 155–159.
91. Siyahjani, F., and Atar, E. (2014). Nitriding behavior of Ti6Al4V alloy in gas atmosphere. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1, 1057–1062.
92. Januszewicz, B., and Klimek, L. (2010). Nitriding of titanium and Ti6Al4V alloy in ammonia gas under low pressure. *Materials Science and Technology*, 26(5), 586–590.
93. Zhecheva, A., Malinov, S., and Sha, W. (2007). Studying and modeling surface gas nitriding for titanium alloys. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials*, 59(6), 38–40.
94. Liu, J., Suslov, S., Vellore, A., Ren, Z., Amanov, A., Pyun, Y. S., Martini, A., Dong, Y., and Ye, C. (2018). Surface nanocrystallization by ultrasonic nano-crystal surface modification and its effect on gas nitriding of Ti6Al4V alloy. *Materials Science and Engineering A*, 736, 335–343.
95. Zhecheva, A., Malinov, S., and Sha, W. (2006). Titanium alloys after surface gas nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2467–2474.
96. Mahdipoor, M. S., Kevorkov, D., Jedrzejowski, P., and Medraj, M. (2016). Water droplet erosion behaviour of gas nitrided Ti6Al4V. *Surface and Coatings Technology*, 292, 78–89.
97. Toboła, D., Morgiel, J., and Maj, Ł. (2020). TEM analysis of surface layer of Ti-6Al-4V ELI alloy after slide burnishing and low-temperature gas nitriding. *Applied Surface Science*, 515, 1–11.
98. Siyahjani, F., and Cimenoglu, H. (2012). Characteristics and wear performance of nitrided Ti6Al4V. *Defect and Diffusion Forum*, 326–328, 494–497.
99. Rolinski, E., and Karpinski, T. (2016). Principles of the Process of Ionitriding of Titanium and Its Alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 15(6), 530–532.

100. Kao, W. H., Su, Y. L., Horng, J. H., Huang, H. C., and Yang, S. E. (2015). Improved tribological, electrochemical and biocompatibility properties of Ti6Al4V alloy by gas-nitriding and Ti-C:H coating. *Surface and Coatings Technology*, 283, 70–79.
101. Spies, H. J., Reinhold, B., and Wilsdorf, K. (2001). Gas nitriding - Process control and nitriding non-ferrous alloys. *Surface Engineering*, 17(1), 41–54.
102. Ge, L., Tian, N., Lu, Z., and You, C. (2013). Influence of the surface nanocrystallization on the gas nitriding of Ti-6Al-4V alloy. *Applied Surface Science*, 286, 412–416.
103. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., and Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *The International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92–104.
104. Tezel, T., Topal, E. S., and Kovan, V. (2019). Characterising the wear behaviour of DMLS-manufactured gears under certain operating conditions. *Wear*, 440–441, 203106.



GAZİ GELECEKTİR..