

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ
Ti6Al4V PARÇALARIN FARKLI ORTAM
SICAKLIKLARINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Taylan OVACIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ
Ti6Al4V PARÇALARIN FARKLI ORTAM
SICAKLIKLARINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Taylan OVACIK tarafından hazırlanan tez çalışması 29.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga MERT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Zeynep PARLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Ti6Al4V Parçaların Farklı Ortam Sıcaklıklarında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Taylan OVACIK

İmza



Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FYL-2023-5626” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme
ve
eşime

TEŞEKKÜR

“Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Ti6Al4V Parçaların Farklı Ortam Sıcaklıklarında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı tez çalışmamı oluştururken, benden bilgi birikimini, yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen kıymetli danışmanım Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ ile bugünlere gelmemde bana maddi ve manevi sonsuz destek olan ailem ile değerli eşim Bircan OVACIK’a teşekkürlerimi sunarım. Tezimin, gelecekte bu konuyu çalışacak araştırmacılara destek olmasını temenni ederim.

Taylan OVACIK

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
2 YÖNTEM ve METOT	15
2.1 Yöntem.....	15
2.2 Numune Tasarımı ve İmalatı.....	15
2.2.1 Numunenin Tasarımı	15
2.2.2 Numunenin İmalatı	16
2.3 Deneysel Çalışmalar	22
2.3.1 Yoğunluk Ölçümü	22
2.3.2 Eksenel Çekme Testi	23
2.3.3 Mikroyapı İncelemesi	26
2.3.4 SEM Analizi	27
3 BULGULAR	29
3.1 Yoğunluk Ölçümü.....	29
3.2 Eksenel Çekme Testi.....	30
3.3 Mikroyapı Testi.....	35
3.4 Elektron Mikroskopu Görüntüleri.....	41
4 SONUÇ	56
4.1 Sonuçlar	56
KAYNAKÇA	58
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	64

SİMGE LİSTESİ

°C	Celcius
H ₂ O	Su
HF	Hidrojen Florür
HNO ₃	Nitrik Asit
mm	Minimetre
MPa	Mega Pascal
N	Newton
Ti	Titanyum
Ti64	Ti6Al4V

KISALTMA LİSTESİ

3D	3 Boyutlu
ASHRAE	Amerikan Isıtma-Soğutma ve İklimlendir Mühendisleri Derneği
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
Eİ	Eklemeli İmalat
HT	Katman Kalınlığı
LE	Enerji Yoğunluğu
MMPDS	Metalik Malzeme Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Standardizasyonu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	Sinterleme Sıcaklığı
TYEİ	Toz yatak eklemeli imalat

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Çekme test numunesi teknik resmi.....	16
Şekil 2.2 Tezgah dış kabuk parametreleri	18
Şekil 2.3 Tezgah Orta Kontör parametreleri	19
Şekil 2.4 Kütlesel formdaki test numuneleri	20
Şekil 2.5 Test numuneleri	21
Şekil 2.6 Yoğunluk ölçüm cihazı	22
Şekil 2.7 Çekme test düzeneği.....	24
Şekil 2.8 Çekme test düzeneği iklimlendirme kabini	25
Şekil 2.9 Mikroyapı incelemesi için kalıplanmış numune	26
Şekil 2.10 Taramalı elektron mikroskobu	28
Şekil 3.1 Yoğunluk ölçüm sonuçlarının grafiği.....	30
Şekil 3.2 Farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiş olan çekme test sonuçlarının grafiği.....	31
Şekil 3.3 X oryantasyonunda inşa edilmiş ve 22 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	35
Şekil 3.4 Y oryantasyonunda inşa edilmiş ve 22 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	35
Şekil 3.5 Z oryantasyonunda inşa edilmiş ve 22 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	36
Şekil 3.6 X oryantasyonunda inşa edilmiş ve 200 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	37
Şekil 3.7 Y oryantasyonunda inşa edilmiş ve 200 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	37
Şekil 3.8 Z oryantasyonunda inşa edilmiş ve 200 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	38
Şekil 3.9 X oryantasyonunda inşa edilmiş ve -50 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	39
Şekil 3.10 Y oryantasyonunda inşa edilmiş ve -50 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	39
Şekil 3.11 Z oryantasyonunda inşa edilmiş ve -50 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı	40
Şekil 3.12 22 °C ortam şartları altında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	42
Şekil 3.13 200 °C ortam şartları altında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	43
Şekil 3.14 -50 °C ortam şartları altında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	45

Şekil 3.15 22 °C ortam şartları altında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	46
Şekil 3.16 200 °C ortam şartları altında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	48
Şekil 3.17 -50 °C ortam şartları altında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	49
Şekil 3.18 22 °C ortam şartları altında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	51
Şekil 3.19 200 °C ortam şartları altında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	53
Şekil 3.20 -50 °C ortam şartları altında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri	54



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Ti6Al4V Elemental Kompozisyonu	16
Tablo 2.2 EOS M280 Eklemeli İmalat Tezgahı Dış Kabuk Üretim Parametreleri	17
Tablo 2.3 EOS M280 Eklemeli İmalat Tezgahı Orta Kontör Üretim Parametreleri	17
Tablo 3.1 X, Y ve Z yönünde imal edilmiş numunelerin yoğunluk değerleri	29
Tablo 3.2 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler	32
Tablo 3.3 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)	32
Tablo 3.4 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)	32
Tablo 3.5 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)	33
Tablo 3.6 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)	33

Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Ti6Al4V Parçaların Farklı Ortam Sıcaklıklarında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Taylan OVACIK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Eklemeli imalat (Eİ), bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine dayanarak üç boyutlu geometrinin katman katman elde edilmesi işlemidir. Eklemeli imalat ile birlikte karmaşık geometrilerin üretimi kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Geleneksel yöntemler ile üretimi zor olan parçaların herhangi bir kalıp, takım ve fikstüre ihtiyaç duyulmadan üretilebilmesi eklemeli imalatın en önemli üstünlüklerindendir. Eklemeli imalatta polimer, metal, seramik ve kompozit esaslı olmak üzere pek çok malzeme kullanılabilir. Titanyum alaşımları havacılık ve medikal uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir malzemedir ve farklı çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu çalışmada, lazer toz yatak füzyon (LTYF) eklemeli imalat yöntemi ile farklı oryantasyonlarda üretilen Ti6Al4V alaşımının farklı sıcaklık koşullarında mekanik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla x, y ve z doğrultularında LTYF yöntemiyle imal edilen standart çekme test numuneleri oda sıcaklığında 22 °C, yüksek ortam sıcaklığı 200 °C ve düşük ortam sıcaklığı -50 °C koşullarında test edilmiştir. Ek olarak test numunelerinin

yoğunluğu Arşimet prensibi ile ölçölmüştür, mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir ve kopma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu ile görüntölenmiştir. Dayanım değeri lerinin 200 °C sıcaklıkta farklı oryantasyonlarda %15-17 aralığında düştüğü gözlemlenirken, -50 °C sıcaklıkta %10-13 aralığında arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yoğunluk değeri leri üzerinde oryantasyonun dikkate değeri bir etkisi gözlemlenmemiştir. Sonuçlar daha detaylı bir biçimde birbirleriyle ve ilgili literatür çalışmaları ile karşılaştırılarak değeri lendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, lazer toz yatak füzyon, Ti6Al4V, Çekme Testi, Mikroyapı



Determining Mechanical Properties of Ti6Al4V Additive Manufactured Parts at Different Test Conditions

Taylan Ovacık

Department of Mechanical Engineering

Manufacturing Program

Master of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Additive manufacturing (AM) is the process of obtaining three-dimensional geometry layer by layer based on computer-aided design (CAD) data. With additive manufacturing, the production of complex geometries can be easily achieved. One of the most important advantages of additive manufacturing is that parts that are difficult to produce with traditional methods can be produced without the need for any moulds, tools and fixtures. Many materials can be used in additive manufacturing, including polymer, metal, ceramic and composite based. Titanium alloys are a material frequently used in aerospace and medical applications and are exposed to different environmental conditions. In this study, it was aimed to examine the mechanical behavior of Ti6Al4V alloy produced in different orientations with the laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing method under different temperature conditions. For this purpose, standard tensile test samples produced by the LPBF method in x, y and z directions were tested at room temperature 22 °C, high ambient temperature 200 °C and low ambient temperature -50 °C. In addition, the density of the test samples was measured using the Archimedes principle, microstructural examinations were carried out and the fracture surfaces were imaged via a scanning electron microscope. It was observed that the strength values decreased by 15-17% in different orientations at 200 °C,

while they increased by 10-13% at -50 °C. Moreover, no notable effect of orientation on density values was observed. The results were evaluated in more detail by comparing them with each other and with relevant literature studies.

Keywords: Additive Manufacturing, laser powder bed fusion, Ti6Al4V, Tensile Test, Microstructure



Ti64 alaşımasının eklemeli imalatı (Eİ), geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor veya imkânsız olan karmaşık geometrili parçaların üretimi için giderek daha popüler hale gelen bir üretim teknolojisidir. Eİ ile Ti64 alaşımasının üretimi, geleneksel imalat yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Eİ ile Ti64 alaşımasının üretiminde kullanılan yöntemler arasında lazer sinterleme, elektron ısıyı sinterleme, plazma ark eritme ve ekstrüzyon yer almaktadır. Bu yöntemler, Ti64 alaşımasının farklı özelliklerini ve uygulamalarını hedeflemektedir. Lazer sinterleme, Ti64 alaşımasının Eİ ile üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir ve bu çalışmada kullanılması planlanmaktadır. Bu yöntemde, bir lazer ışını, Ti64 tozunu eriterek katı bir yapı oluşturmak için kullanılır. Lazer sinterleme, Ti64 alaşımından karmaşık geometrili parçaların hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesini sağlar [1].

Eİ ile Ti64 alaşımasının üretimi, geleneksel imalat yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında şunlar yer almaktadır: Daha karmaşık geometrili parçaların üretilmesi: Eİ, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor veya imkânsız olan karmaşık geometrili parçaların üretilmesini sağlar. Bu, Ti64 alaşımasının çeşitli endüstrilerde kullanımını genişletmek için önemli bir avantajdır. Buna ek olarak daha az malzeme kullanımı ve dolayısıyla daha hafif parçalar üretilmesi: Eİ, geleneksel imalat yöntemlerine göre daha az malzeme kullanılarak parça üretilmesini sağlar. Bu, daha hafif parçaların üretilmesine ve dolayısıyla yakıt verimliliğinin artmasına yardımcı olur. Ayrıca, üretim süresinin kısaltılabilmesi: Eİ, geleneksel imalat yöntemlerine göre daha kısa sürede parça üretilmesini sağlar. Bu, üretim maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olur. Sonuç olarak, Eİ, Ti64 alaşımasının üretimi için önemli bir potansiyele sahiptir. Eİ ile Ti64 alaşımından üretilen parçalar, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen parçalara göre daha karmaşık, hafif, hızlı ve verimlidir [2] [3].

Titanyum, yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu, korozyon direnci ve biyolojik uyumluluğu nedeniyle birçok endüstride kullanılan değerli bir malzemedir. Bu özellikler, onu hafif, dayanıklı ve insan vücudu ile uyumlu bir malzeme haline getirir.

Titanyumun en yaygın endüstriyel kullanımlarından bazıları havacılık ve uzay endüstrisi, tıp endüstrisi, kimya endüstrisi ve otomotiv endüstrisi olarak ifade edilebilir. Bir havacılık komponenti yüksek ve düşük sıcaklıklara, çeşitli korozyif maddelere ve neme maruz kalırken titreşim ve ağır yükleme şartlarında çalışmalı aynı zamanda kendisinden beklenen mekanik dayanımı göstermelidir. Bunun yanı sıra malzemeden başka bir beklenti ise hafiflik avantajını ortaya koymasındır. Titanyum bu anlamda beklentileri karşılama konusunda başarılı olurken titanyum ve alaşımlarının eklemeli imalat ile üretilmesi havacılıkta istenilen karmaşık geometrilerin kolaylıkla elde edilmesine de imkân verir [4]. Bu çalışma başta havacılık olmak üzere titanyum ve alaşımlarının avantajlarından faydalanan birçok sektör için eklemeli imalat ile üretilmiş titanyum alaşımı parçanın mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlamaktadır. Bunun yanında farklı ortam şartlarının da malzemenin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini görmek için farklı ortam sıcaklıklarında çekme testleri gerçekleştirme hedefinde olan çalışma endüstri ve bilim çevrelerinin özenle takip ettiği bir sahada sonuçlara ortaya koymayı amaçlamaktadır [5].

1.1 Literatür Özeti

Eklemeli imalat yani katmanlı imalat, malzemeyi katman katman hassas bir şekilde geometrik formlar oluşturacak biçimde biriktirmeyi esas alan imalat yöntemlerine verilen isimdir. Üretilmek istenilen geometrik formlara ait verileri bilgisayar destekli tasarım yani CAD yazılımı veya üç boyutlu (3B) nesne tarayıcılardan elde edilmektedir. Adından da anlaşılacağı üzere eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerin aksine bir nesne oluşturmak için malzemeleri katmanlar halinde ekler ve nihayetinde geometri oluşturulmuş olur. Geleneksel imalat yöntemlerinde bir cisim oluşturduğunuzda, genellikle frezeleme, tornalama, gibi süreçler ile gereksiz materyal parçadan uzaklaştırılır ve istenilen nihai form elde edilir. Bugünkü imalat yaklaşımında çeşitli kaynaklarda imalat yöntemleri kategorize edilirken eklemeli ve çıkarmalı imalat adı altında iki ana çatıya ayrıldığını da görmek mümkündür.

Eklemeli üretim düşüncesi çok eskilere dayanmasına rağmen bugün eklemeli imalat olarak söz edilen alana benzer çalışmalar yakın tarihlerde başlamış ve hızla gelişmiştir. Katmanlı imalat yöntemleri için aynı temel prensibe dayanan benzer

birçok üretim sürecinden bahsedilebilir. Sterolitografi, reçine püskürtme, malzeme püskürtme, lamine nesne imalatı, elektron ışını ile sinterleme ve lazer ışını ile sinterleme gibi metotlar eklemeli imalat yöntemlerine örnek olarak gösterilebilir [6] [7].

Eklemeli imalat yöntemlerinde üretim sürecinde baskı parametreleri son derece önemlidir. Lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı, katman yönü, toz parçacık boyutu gibi baskı parametrelerindeki değişimlerin parçanın mekanik dayanımı üzerinde etkisini inceleyen çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır ve bir kısmına aşağıda değinilmiştir. Bu çalışmada üretim oryantasyonunun çekme dayanımına ve mikroyapıya etkisi gözlemlenecektir.

Katmanlı imalat, son yıllarda önemli ölçüde yaygınlaşan geleneksel olmayan bir imalat yöntemi olmuştur. Eklemeli imalat yöntemleri, 3D Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) verilerinden katı bir nesne elde edilinceye kadar toz veya tel formdaki malzemenin katman katman yerleştirilmesine dayanır. İlk kez 1980 yılında Charles Hull tarafından geliştirilmiş ve stereolitografi olarak adlandırılmıştır. Eklemeli imalat (Eİ) aynı zamanda 3 Boyutlu Yazıcı, Hızlı Prototipleme ve Katmanlı imalat olarak da bilinir. Eİ son yıllarda hediyeelik eşya ve günlük aletlerin imalatının yanı sıra tıp, otomotiv, savunma ve havacılık gibi mühendislik alanlarında da uygulanarak yaygın olarak kullanılan bir üretim teknolojisi haline gelmiştir. Farklı sektörlerde farklı uygulama alanlarında kullanılan hızlı prototipleme, önümüzdeki yıllarda daha da popüler hale gelecektir. Eklemeli imalat, karmaşık yapıların herhangi bir alet, kalıp veya donanım olmadan katman katman inşa edilmesini sağlayan geleneksel olmayan bir üretim yöntemidir. Ayrıca Eİ, geleneksel yöntemlere kıyasla daha az hazırlık süresi ve daha düşük düzeyde malzeme israfı sunar. Bu avantajları nedeniyle Eİ gündeme gelmekte ve akademik ve endüstriyel alanlarda araştırmalar devam etmektedir [8].

Geleneksel imalat yöntemleri talaşlı şekil verme, talaşsız şekil verme, döküm, kaynak gibi başlıklar altında incelenebilir. Talaşlı şekil verme yönteminde parçanın nihai formuna erişmesi için ham maddeden çıkarma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Eklemeli imalat yönteminde ise bunun tersi olarak yapıp oluşturmak için parçaya malzemeler katman katman eklenmektedir. Bunun sonucu olarak eklemeli imalatla talaşlı imalata göre çok daha az oranda malzeme sarfiyatı ortaya çıkar. Eklemeli imalat yönteminde toz veya filamentler kullanılarak bir

bütün elde edilirken proses parametreleri önemli rol oynar. Prosesle büyük etkisi olan bu parametrelerin değiştirilmesiyle yüzey özelliklerinde istenilen verimin elde edilmesi mümkündür. Böylece süreç ihtiyaçlara göre optimize edilebilir. Çıkarmalı imalat yöntemlerinde, takım aşınmasından dolayı oluşacak durumlar dışında, proses parametrelerinden dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde herhangi bir değişiklik olmaz. Yani eklemeli imalatla geleneksel yöntemlere göre süreç, parçanın mekanik özelliklerini etkileyebilecek düzeyde kontrol edilebilmektedir. Eklemeli imalatın son yıllarda gelişmesinin bir diğer nedeni ise geleneksel yöntemlerle üretilmeyen geometrilerin üretilmesidir. Geometrik özgürlüğün yanı sıra imalat sırasında herhangi bir ek işleme gerek duyulmaz. Tüm bu karşılaştırmaları avantaj ve dezavantajlar olarak özetleyecek olursak [9].

Eklemeli İmalatın Avantajları;

- Ham madde kullanımının azaltılması; Eİ prosesinde talaşlı imalat yöntemlerinin aksine hurda malzeme miktarını düşürür böylelikle daha sürdürülebilir bir yöntemdir.
- Zamanın verimliliği; Eİ prosesi, imalat için maça, fiktür, kesici takım gibi herhangi bir alete ihtiyaç duymaz. Sonuç olarak üretim hazırlık süresi kısalmır.
- Esnek üretim ve parçalar; Eİ, maliyetli hazırlık süreçlerine sahip olmadığından, toplam üretim öncesinde müşteri taleplerine uygun prototiplerin hazırlanmasına olanak sağlar. Herhangi bir tartışmada prototip kolayca değiştirilebilir. Ayrıca malzeme geometrisinde herhangi bir kısıtlama yoktur, karmaşık parçaların tek parça olarak üretilmesine olanak sağlar.

Eklemeli Üretimin Dezavantajları

- Boyut sınırlaması; üretim boyutu yazıcıya göre değişir, bu durum boyutsal kısıtlamaya neden olur.
- Yüzey kalitesi; 3D baskıdan sonra malzeme pürüzlü bir yüzeye sahip olur. Bu nedenle, süper işlenmiş parçalar isteniyorsa işleme veya cilalama gibi diğer bitirme yöntemlerinin kullanılması gerekir.
- Ekonomik; Eİ, bazı süreçlerin yüksek maliyetli yazıcılar da dahil olmak üzere ek ekipmanlara ihtiyaç duyması nedeniyle yüksek hacimli üretim gerçekleştirememektedir.

Eklemeli imalat yöntemi ile son parçanın elde edilmesi sürecinde izlenecek adımlar; CAD programı yardımıyla 3 boyutlu parça tasarımı gerçekleştirilir. Tasarlanan parça “stl” formatında kaydedilir. Oluşturulan “stl” veri, iş parçasını geometrisinin bir nokta bulutu olarak temsilidir. Elde edilen dosya 3D imalat yapılacak cihaza aktarılıp parametre değerleri belirlenerek üretime geçilir. Parça imalatı tamamlandıktan sonra gerekiyorsa post-processing yapılarak parça kullanıma hazır hale getirilir.

ASTM, eklemeli imalat süreçlerini üretim metotlarına göre aşağıdaki 7 çeşit grup altında sınıflandırdı [10].

- VAT Fotopolimerizasyonu: Eklemeli imalat süreci fotopolimer reçinesinin, bir enerji kaynağı ile katman katman katılaştırılması şeklinde gerçekleşir. Genellikle termoset plastiklerin üretiminde kullanılır.
- Malzeme Püskürtme: Özel yazıcı kafaları malzemeyi katmanlar halinde püskürtür. Genellikle bu püskürtülen malzeme, UV ışığıyla katılan, ışığa duyarlı bir plastik reçinedir.
- Bağlayıcı Püskürtme: Sıvı bağlayıcı maddeyi bir toz yatağı üzerine yaymak için bir ağızlık kullanır ve tozlar bir parça oluşturacak şekilde bağlanır.
- Toz Yataklı Füzyon: Toz yataklı füzyon, tozun üst katmanını eritmek için bir enerji ışını kullanır ve katı bir parça elde edene kadar katman katman devam eder. Bu enerji elektron ışını veya lazer ışını olabilir.
- Malzeme Ekstrüzyonu: Ekstruder ucundan malzemenin ısıtılıp şekillendirilmesiyle elde edilir.
- Doğrudan Enerji Biriktirme: Malzeme yapıda konumlandırılırken eş zamanlı olarak enerji kaynağı yardımıyla iş parçası üzerine eklenmesi sağlanır.
- Levha Laminasyonu: Levha laminatları ilgili katman formunda kesilir ve bir alt katmana yapıştırılarak birleştirilir.

Bu çalışmada kullanılacak olan toz yatak eklemeli imalat yöntemlerinin süreç detaylarına girmek gerekirse. Lazer toz yatak eklemeli imalat sürecinin ana fikri; Tabla üzerinde lazer ışınının hareket etmesini sağlayan sürücüler bulunmaktadır. Bu hareketler erime rotasını takip eder. Bir kat malzeme eritildikten sonra diğer kat yayıcı ile serpilir ve katı bir kısım elde edilinceye kadar eritme işlemi tekrarlanır

[11] [12]. İşlem, oksidasyonu önlediği için gaz ile korunan (genellikle N veya Ar) atmosferde gerçekleştirilir.

Toz yatak eklemeli imalat yöntemlerinin parametreleri;

Lazer Gücü: Lazer kaynağına bağlıdır.

Tarama Hızı: Tarama hızı, ışının toz yatağı üzerinde ne kadar süreyle etki ettiğini açıklar. Enerji yoğunluğu ile ters orantı vardır. Bazen metal sistemlerde yüksek tarama hızlarıyla çalışmak yeterli enerji yoğunluğunu sağlayamamakta dolayısıyla gerekli proses yeterlilikleri sağlanamamaktadır. Bu nedenle tarama hızının optimum seviyede olması gerekmektedir.

Katman Kalınlığı: Üretimdeki her bir katmanın kalınlığıdır. Daha yüksek katman kalınlığı, ergime sonrasında daha fazla büzölmeye neden olur, bu da yüzey bütönlüğünü ve düzgönlüğünü azaltır.

Enerji Yoğunluğu: Bir hacmi veya alanı etkileyen birim enerji miktarı, enerji yoğunluğu olarak tanımlanır. Lazer gücünden, tarama hızından, katman kalınlığından ve tarama aralığından etkilenir [13].

Parça Yönü: Yüzey kalitesini doğrudan etkileyen bir diğör önemli parametredir. Parça şekline göre yönlendirme, bölgelerin aşırı ısınmasına ve dolayısıyla gözle görülür kusurların görülmesine neden olabilir [14] [15].

Eklemeli imalatın popölaritesi her geçen gün artarken eklemeli imalat yönteminde kullanılabilecek malzemelerin çeşitliliğı de oldukça önemlidir. Eklemeli imalat için başvurulacak yöntem belirlendikten sonra her bir yöntem için uygun olan malzemelerin de değörlendirilmesi gerekir. Farklı yöntemler için farklı malzeme alternatifleri mevcut olmak ile tasarım isterlerinin karşılanabilmesi için malzeme ve yöntem seçimi kritik bir nokta olacaktır [16]. Örneğın havacılık ve biyomedikal uygulamalarında karşımaıza çıkan ihtiyaçların karşılanabilmesi için Titanyumun alaşımlarının toz yatak eklemeli imalat ile üretimi sıkça başvuruilan bir metottur [17].

Ti64 olarak da bilinen Ti6Al4V alaşımı, yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu, yüksek kırılma tokluğuna, yüksek korozyon direncine ve üstün biyoyoumluluğaa sahip bir $\alpha + \beta$ titanyum alaşımıdır [18]. En popöler titanyum alaşımı olarak kabul edilen Ti6Al4V, bugün dünyada kullanılan titanyum ürünlerinin pazar payının

neredeyse yarısını elinde tutuyor. Ti6Al4V alaşımı ilk olarak 1950'lerde uçak yapısal uygulamaları için geliştirildi. Bu hafif ama yine de güçlü alaşım, yüksek yüklü yapılarda ağırlıktan tasarruf sağlar ve dolayısıyla jet motorları, gaz türbinleri ve birçok uçak gövdesi bileşeni için son derece uygundur. Havacılık endüstrisi hala Ti6Al4V talebine hâkim olsa da denizcilik, otomobil, enerji, kimya ve biyomedikal endüstrileri gibi diğer uygulama alanları da son yarım yüzyıl boyunca geniş kabul görmüştür. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve biyoyumluluk, köprüler ve implantlar gibi uygulamalar için Ti6Al4V'nin çekici özellikleridir. Aşındırıcı asitlerin ve alkalilerin çoğuna karşı yüksek korozyon direnci nedeniyle uygulamaları denizcilik ve kimya endüstrilerine de genişletilmiştir. Yüksek talebe rağmen, Ti6Al4V ürünlerinin üretimi, zayıf termal iletkenliği, gerinim sertleşmesi eğilimi ve oksijene karşı aktif kimyasal reaktivitesi nedeniyle her zaman zordur. Ti6Al4V ürünlerinin geleneksel üretimi, toplu hammadde malzemelerinin dövülmesine, dökümüne ve haddelenmesine ve ardından son şekil ve boyutlara göre işlenmesine dayanır. Bu geleneksel üretim süreçleri her zaman kaçınılmaz olarak büyük miktarda malzeme israfına, yüksek üretim maliyetine ve uzun teslim süresine neden olur. Bu koşullar altında, katman katman malzeme ekleyerek doğrudan CAD modellerinden net şekle yakın yapılar üreten gelişmiş bir üretim teknolojisi olan katmanlı imalat, geometrik karmaşıklığa sahip Ti6Al4V ürünlerinin imalatı için yararlı yeteneğini sunmaktadır. Geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, eklemeli imalatın en önemli avantajı, istenen şekilleri elde etmek için ekstrüzyon, dövme, döküm ve ikincil işleme süreçleri gibi geleneksel üretim yöntemlerini içermeyen karmaşık parçaları doğrudan hammadde malzemelerinden serbest biçimli imalat yeteneğidir. Bu sebeple, israfın en aza indirilmesi eklemeli imalatı uygun maliyetli bir teknik haline getirir. Ayrıca katmanlı imalat, hammadde malzeme türleri konusunda yüksek esnekliğe sahiptir ve tüketilmemiş tozlar yeniden kullanılabilir, bu da onu daha uygun maliyetli hale getirir. Eklemeli imalat süreçleri çok çeşitli çok yönlü yöntemleri içerir. Yoğun metalik yapıların imalatıyla ilgili olarak çoğunlukla doğrudan enerji depolama (DED), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışını ile ergitme (EBM) gibi toz bazlı eklemeli imalat teknikleri kullanılmaktadır. Bu işlemlerde, bir lazer veya elektron ışını hammadde tozlarıyla etkileşime girer ve hızlı erime ve yeniden katılaşmanın gerçekleştiği bir erimiş havuz üretir. Oldukça lokalize ısı girişi ve kısa etkileşim süresi nedeniyle, büyük sıcaklık gradyanları ve

yüksek soğutma hızları mevcuttur. Bu benzersiz termal özellikler, inşa edilmiş mikroyapıları önemli ölçüde etkiler ve katmanlı imalat ile inşa edilmiş Ti6Al4V ürünlerinde yüksek artık gerilimlere yol açar ve bu da onların makroskobik performanslarını belirler [19] [20]. Ayrıca, eklemeli imalat süreçleri sırasında kaçınılmaz olarak oluşan kusurlar, ürünlerin mekanik ve yorulma özelliklerini önemli ölçüde bozacaktır [21]. Hizmet kalitesi ve dayanıklılıkla ilgili olarak nihai ürünlerin malzeme özellikleri, özellikle de mekanik özellikleri, eklemeli imalat süreçlerinin geleneksel yöntemler yerine kabul edilebilir üretim teknikleri olup olamayacağına karar vermede en önemli özelliklerdir. Bu nedenle, katmanlı imalat Ti6Al4V ürünlerinin kalite değerlendirmesinde pratik uygulama gereklilikleri dikkate alınmalı ve performans, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen muadilleriyle karşılaştırılmalıdır. Ti6Al4V için en önemli talep yük taşıma uygulamalarına yöneliktir ve dolayısıyla çekme ve yorulma performansları dikkate alınması gereken temel özelliklerdir. Titanyumun kullanıldığı farklı endüstriyel alanlar göz önüne alındığında bahsedilen mekanik özelliklerin farklı ortam şartları altında da sağlanabiliyor olması dikkat edilmesi gereken bir husustur [22].

T.H. Becker ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [23], doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V titanyum alaşımının mikroyapısını ve mekanik özelliklerini incelemektedir. DMLS ile üretilen Ti-6Al-4V, geleneksel yöntemlerle üretilenden farklı bir mikroyapıya sahiptir. Bu farklılık, hızlı soğuma nedeniyle oluşan ince taneli bir yapıdır. DMLS ile üretilen Ti-6Al-4V'nin mekanik özellikleri, geleneksel yöntemlerle üretilenden benzerdir. Bununla birlikte, çekme dayanımı ve yorulma dayanımı gibi bazı özellikler, parça yapısına ve ısıtma işlem koşullarına bağlı olarak değişebilir. Makalede, DMLS ile üretilen Ti-6Al-4V'nin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkileyen çeşitli faktörler tartışılmaktadır. Bu faktörler arasında lazer güç yoğunluğu, tarayıcı hızı, toz özellikleri ve ısıtma işlem koşulları yer almaktadır. Ayrıca makalede, DMLS ile üretilen Ti-6Al-4V'nin mikroyapısının SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri yer almaktadır. Bu görseller, malzemenin ince taneli yapısını göstermektedir. Makalede, DMLS ile üretilen Ti-6Al-4V'nin mekanik özelliklerinin çekme testi, eğilme testi ve yorulma testi gibi standart test yöntemleri kullanılarak ölçüldüğü belirtilmektedir. İlk bölümde, lazer enerji yoğunluğu (LE), katman kalınlığı (HT) ve sinterleme sıcaklığı (TS) parametrelerinin mikroyapı ve

porozite seviyesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. LE'nin artması, daha ince taneli bir mikroyapıya ve daha düşük porozite seviyesine yol açmaktadır. HT'nin artması, daha kalın taneli bir mikroyapıya ve daha yüksek porozite seviyesine yol açmaktadır. TS'nin artması, daha ince taneli bir mikroyapıya ve daha düşük porozite seviyesine yol açmaktadır. İkinci bölümde, ısıtıl işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. 1000 °C'de yapılan T6 ısıtıl işlemi, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. 700 °C'de yapılan T4 ısıtıl işlemi, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu azaltmaktadır. Bu bulgulara göre, DMLS imalat parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, mikroyapı ve porozite miktarı aracılığıyla gerçekleşmektedir [23]. LE ve TS'nin artması, daha ince taneli bir mikroyapıya ve daha düşük porozite seviyesine yol açarak, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırmaktadır. HT'nin artması ise daha kalın taneli bir mikroyapıya ve daha yüksek porozite seviyesine yol açarak, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu azaltmaktadır. Isıtıl işlem parametreleri ise, mikroyapıdaki beta fazının miktarını ve dağılımını kontrol ederek, malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. T6 ısıtıl işlemi, beta fazını artırarak, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırmaktadır. T4 ısıtıl işlemi ise beta fazını azaltarak, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu azaltmaktadır. Bu bulgular, DMLS teknolojisi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının mekanik özelliklerini optimize etmek için, üretim parametrelerinin ve ısıtıl işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

ŚLIWA Romana Ewa, ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [24], uçak yapılarının bileşenlerini üretmek için titanyum alaşımlı tozun eklemeli imalat yöntemlerinden Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) metodunun potansiyelini araştırmıştır. Makale öncelikle DMLS yönteminin özelliklerini ele almakta, daha sonra uçak uygulamalarında potansiyel kullanımını değerlendirmek için titanyum alaşımlı Ti6Al4V kullanılarak deneme modelleri üretmektedir. Araştırmacılar, bu deneme modellerini çekme ve basma testlerine tabi tutarak, DMLS ile üretilen parçaların geleneksel yöntemlerle üretilenlerle karşılaştırılmasını sağlamıştır. Ayrıca yüzey morfolojisini SEM analizi ile, sertliğı Vickers sertlik testi ile incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, DMLS ile imal edilen titanyum alaşımlı parçalar, geleneksel yöntemlerle imal edilenler ile karşılaştırıldığında benzer mekanik özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çekme testleri, DMLS yöntemi ile imal edilen parçaların çekme mukavemetinin %97-100 oranında olduğunu gösterirken. Basma testleri ise, DMLS ile üretilen parçaların basma mukavemetinin %90-95 oranında olduğunu göstermektedir. Yüzey morfolojisi SEM analizi, DMLS ile üretilen parçaların yüzeyinde gözeneklerin ve diğer kusurların olduğunu göstermiştir. Ancak bu kusurlar parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilememektedir. Vickers sertlik testi ise, DMLS ile üretilen parçaların sertliğinin geleneksel yöntemlerle üretilenlere benzer olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, DMLS ile üretilen parçaların uçak yapı elemanlarında kullanılabilecek nitelikte olduğunu göstermektedir.

Karolina Karolewska ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [25], “DMLS” olarak bilinen eklemeli imalat tekniğiyle üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının statik yük şartları altındaki mukavemet özelliklerini incelemektedir. Araştırmacılar, bu tekniğin uçak parçaları gibi kritik uygulamalarda kullanılma potansiyelini değerlendirmek istemiştir. Makale ilk olarak DMLS yönteminin çalışma prensiplerini ve geleneksel üretim teknikleriyle arasındaki farkları ele alıyor. Ardından, farklı DMLS parametreleriyle üretilen test örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnekler, çekme, basma ve eğilme testlerine tabi tutularak statik yük altındaki dayanım, tokluk ve deformasyon özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Test sonuçları, DMLS ile üretilen Ti6Al4V'nin, statik yük mukavemeti açısından geleneksel yöntemlerle üretilenlerle karşılaştırılabilir, hatta bazı durumlarda daha yüksek olduğunu göstermektedir. Örneğin, çekme mukavemeti %11'e kadar artış gösterebiliyor. Ancak, DMLS ile imalattaki katmanlı yapının etkisiyle, malzeme içinde gözenek ve mikroyapısal farklılıklar oluşabilmektedir. Bu durum, yorulma ömrü gibi bazı mekanik özelliklerde düşüşe yol açabilmektedir. Araştırmacılar, son olarak farklı DMLS parametrelerinin ve post-processing işlemlerinin malzeme özelliklerine olan etkisini analiz etmiştir. Çalışma, DMLS yönteminin uçak ve diğer mühendislik uygulamalarında kullanılma potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda optimizasyon için önemli tavsiyeler sunmaktadır.

Wenbo Sun ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [26], seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının çekme ve yorulma performansını, katman yönünün etkisini incelemektedir. Çalışmada, 0°, 45° ve 90° katman yönlerinde üretilmiş üç adet Ti6Al4V numunesi incelenmiştir. Çekme testi

sonuçlarına göre, katman yönünün çekme mukavemeti ve sünekliği üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Ancak, yorulma performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. 45° katman yönünde üretilen numunelerin, 0° ve 90° katman yönlerinde üretilen numunelere göre daha yüksek yorulma mukavemeti ve daha düşük yorulma kırık büyüme hızı olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar, bu sonuçların, katman yönünün, SLM ile üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının mekanik özelliklerini etkilemede önemli bir rol oynadığını gösterdiğini belirtmektedir. 45° katman yönünün, diğer katman yönlerine göre daha yüksek yorulma performansı göstermesinin, bu yöndeki numunelerin daha homojen bir mikroyapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışma, SLM ile üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının mekanik özelliklerini daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Shubin Ren ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [27], seçici lazer ergitme (SLM) tekniğiyle üretilen Ti-6Al-4V titanyum alaşımının mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının, yapım yönelimine göre nasıl değiştiğini incelemiştir. Araştırmacılar, numuneleri farklı yönelimlerde -genellikle alt tabakaya dik, eğimli ve paralel olarak- üreterek, bu yönelimlere göre çekme, basma ve eğilme testleri gerçekleştirmiştir. Ayrıca, numunelerin mikroyapılarını ve iç gerilme dağılımlarını analiz etmiştir. Test sonuçları, yapım yöneliminin Ti-6Al-4V'nin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Örneğin, alt tabakaya paralel olarak üretilen numunelerin çekme ve basma dayanımı, dik olarak üretilenlere göre daha yüksek olabilirken eğilme dayanımı ve tokluk açısından dik olarak üretilen numunelerin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Mikroyapı analizi, farklı yapım yönelimlerinde gözenek dağılımı ve alfa/beta faz ayrımının farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu farklılıklar, mekanik özelliklerdeki değişime katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, oryantasyona bağlı olarak iç gerilme dağılımı da değişerek malzemenin davranışını etkilemektedir.

Beth E. Carroll ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [28], doğrudan enerji biriktirme (DEB) tekniğiyle üretilen Ti-6Al-4V titanyum alaşımının, çekme dayanımı açısından gösterdiği anizotropi özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada, araştırmacılar DEB ile üretilen cruciform (haç şekilli) test numuneleri kullanmıştır. Bu numuneler farklı yönlerde çekme testlerine tabi tutularak, her yöndeki çekme dayanımı ve uzama özellikleri ölçmüştür. Sonuçlar, malzemenin çekme

dayanımının, DEB katmanlarına paralel yönde en yüksek, dik yönde ise en düşük olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, DEB ile üretimdeki katmanlı yapının mekanik özellikleri üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır. Makale ayrıca, farklı DEB parametrelerinin (örneğin, lazer güç yoğunluğu, tarama hızı) malzemenin anizotropi özelliklerine olan etkisini analiz etmektedir. Sonuçlar, parametrelerin düzenlenmesiyle anizotropinin seviyesinin kısmen azaltılabileceğini göstermektedir.

Zaneta Anna ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [29], doğrudan metal laser sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının biyomedikal uygulamalarda kullanımına uygunluğunu, mekanik özellikleri ve mikroyapısı açısından incelemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada farklı lazer ışın hızlarıyla üretilmiş DMLS Ti6Al4V numuneleri incelenmiştir. Numuneler ısıtılma işlemi görmeden ve görmüş olarak test edilmiştir. Çekme testleri, mikrosertlik testleri ve mikroyapı analizi yapılmıştır. DMLS Ti6Al4V, biyomedikal implantlar için potansiyel bir malzemedir. Isıl işlem mikroyapıyı etkiler ve uzama değerlerini biyomedikal implantlar için gereken seviyelere yükseltir, ancak maksimum çekme dayanımını ve sertliği düşürebilir. İnşa yönü, mekanik özellikleri etkiler. Uygun olmayan işlem parametreleri, yüksek porozite ve mikroyapı kusurları nedeniyle standartlara uygun özellikleri elde etmeyi engelleyebilir.

Abolfazl Azarniya ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [30], Ti-6Al-4V parçalarının lazer metal birikimi (LMD) yöntemiyle işlenmesini ele almıştır. Bu metotta bir lazer ışını, metal tozunu eriterek, katman katman bir parçanın üretilmesini sağlar. Bu işlemde, lazer gücü, tarama hızı, toz besleme hızı ve katman kalınlığı gibi parametreler, parçanın özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Makalede, LMD işleminde farklı parametrelerin kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V parçaların mikroyapıları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, lazer gücü ve tarama hızının, parçanın mikroyapısında önemli değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Lazer gücü arttıkça, parçanın tane boyutu küçülürken, tarama hızı arttıkça tane boyutu büyümektedir. LMD ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların mekanik özellikleri de incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, parçaların mekanik özelliklerinin, mikroyapı ile yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Tane boyutu küçük olan parçaların, daha yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, LMD ile üretilen Ti-6Al-

4V parçaların, ekstrüzyona tabi tutularak, yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretilebileceğini göstermektedir. Bu yöntem, özellikle havacılık ve savunma sanayi gibi uygulamalarda, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi zor olan parçaların üretilmesi için önemli bir potansiyele sahiptir.

Amir Mahyar Khorasani ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [31], SLM (Seçici Lazer Ergitme) işlemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların çekme davranışını incelemektedir. Makalede, işlem parametrelerinin ve ısıtma işlemin parçaların çekme davranışına etkisi araştırılmıştır. Isıtma işlemi, malzemenin mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini değiştirebilir. Makalede, farklı işlem parametrelerinin ve ısıtma işlemlerin kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V parçaların çekme davranışı incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, işlem parametrelerinin ve ısıtma işlemin parçaların çekme davranışına önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür. İşlem parametrelerinin etkisi incelendiğinde, lazer gücü ve tarama hızının, parçaların çekme davranışını etkilediği görülmüştür. Lazer gücü arttıkça, parçaların çekme dayanımı ve akma dayanımı artmaktadır. Tarama hızı arttıkça, parçaların çekme dayanımı ve akma dayanımı azalmaktadır. Isıtma işlemin etkisi incelendiğinde, yaşlandırma işleminin, parçaların çekme davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Yaşlandırma işlemi, parçaların tane boyutunu küçülterek, malzemenin kırılabilirliğini azaltmaktadır. Çalışmanın sonuçları, SLM işlemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların mekanik özelliklerinin, mikroyapı ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

Zongyu Xie ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [32], seçici lazer eritme (SLM) işlemiyle üretilen Ti-6Al-4V titanyum alaşımının mikroyapısı ve çekme performansını incelemektedir. Makalede, parçaların üretim yönünün mikroyapı ve çekme performansına etkisi araştırılmıştır. Makalede, farklı üretim yönlerinin kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V parçaların mikroyapısı ve çekme performansı incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, üretim yönünün parçaların mikroyapısı ve çekme performansına önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür. Mikroyapı açısından, 45° üretim yönünde üretilen parçaların, 0° ve 90° üretim yönlerinde üretilen parçalara göre daha küçük tane boyutuna sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, 45° üretim yönünde üretilen parçalarda, katılma hızının daha yüksek olmasıdır. Katılma hızı yüksek olan parçalarda, tane boyutu daha küçük olur. Çekme performansına bakıldığında, 45° üretim yönünde üretilen parçaların, 0° ve

90° üretim yönlerinde üretilen parçalara göre daha yüksek çekme dayanımı ve akma dayanımı gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeni, 45° üretim yönünde üretilen parçalarda tane boyutunun daha küçük olmasıdır. Tane boyutu küçük olan parçalar, daha yüksek çekme dayanımı ve akma dayanımı gösterir. Makalenin sonuçları, SLM işlemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların, üretim yönünün dikkatli bir şekilde seçilmesi ile yüksek çekme performansına sahip parçaların üretilebileceğini göstermektedir. Bu yöntem, özellikle havacılık ve savunma sanayi gibi uygulamalarda, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi zor olan parçaların üretilmesi için önemli bir potansiyele sahiptir.

Wei Zhao ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [33], Ti-6Al-4V alaşımının çekme, basma, eğilme ve burulma dayanımlarının, sıcaklığın artmasıyla nasıl değiştiğini araştırmaktadır. Makale, alaşımın mekanik özelliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini anlamak için önemli bir kaynaktır. Ti-6Al-4V alaşımının çekme dayanımı, sıcaklığın artmasıyla birlikte önemli ölçüde azaldığı ilgili çalışmada ortaya konmuştur. Sıcaklığın-196 °C'den 20 °C'ye yükselmesiyle birlikte, alaşımın çekme dayanımı dikkate değer biçimde azalmıştır. Bu azalmanın nedeni, sıcaklığın arttıkça alaşımın kristal yapısının bozulmasıdır. Kristal yapı bozulduğunda, alaşımın atomları daha fazla hareket edebilir ve bu da plastik deformasyona neden olur. Plastik deformasyon, alaşımın gerilmeye karşı direncinde bir azalmaya neden olur. Bu çalışma ile Ti64 alaşımının farklı çevresel koşullar altında kullanımında karşılaşılabilecek dayanım değerleri hakkında önemli bilgiler literatüre sunulmuştur.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar ve daha fazlası eklemeli imalat ve titanyum alaşımları ile ilişkili biçimde literatürde kendisine yer bulmuştur. Bu tez çalışması ise Lazer toz yatak sinterleme tekniği ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunenin farklı ortam şartları altında nasıl dayanım göstereceği sorusuna cevap vererek literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2 YÖNTEM ve METOT

2.1 Yöntem

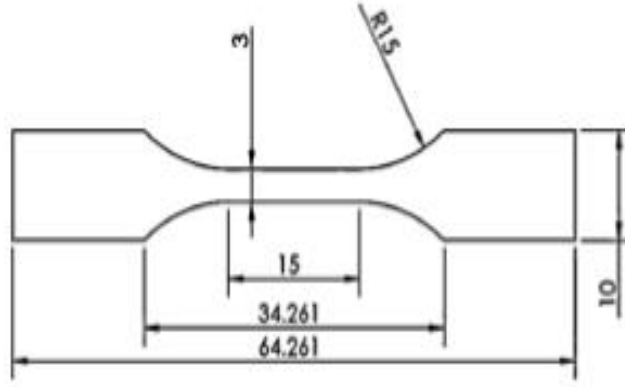
Bu çalışma titanyum alaşımlardan toz yatak eklemeli imalat ile üretilen test numunelerinin standart çekme analiz ve değerlendirmelerini içermektedir. Çalışmada Amerikan Malzeme ve Test Topluluğu (ASTM) standartlarındaki test numunesinin tasarım gerçekleştirilerek EOS M280 toz yatak füzyon tezgahında Ti64 alaşımdan test numuneleri imal edilmiştir. Takip eden süreçte üretilen test numunelerine ısı ardıl işlem uygulanmıştır. Üretilen numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Bununla birlikte imal edilen numuneler farklı ortam sıcaklıkları altında çekme testine tabi tutularak dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu testlerin dışında numunelerin mikroyapılarının anlaşılması için mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Son olarak çekme testi numunelerin kopma yüzeyleri elektron mikroskopu altında görüntülenerek test aşaması tamamlanmıştır. Çalışmada planlanan testler ile eklemeli imalat ile üretilmiş titanyum alaşımı malzemenin yapısal özelliklerinin belirlenmesi ve farklı ortam şartları altında mekanik davranışlarının saptanması amaçlanmaktadır.

2.2 Numune Tasarımı ve İmalatı

2.2.1 Numunenin Tasarımı

Bu proje çalışmasında havacılık, uzay, biyomedikal ve otomotiv gibi önde gelen alanlarda uygulamaları çoğunlukta olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. Çekme dayanımı için ilgili ASTM standardına göre numuneler tasarlanarak toz yatak eklemeli imalat tekniklerinden olan lazer toz yatak füzyon teknolojisi kullanılarak bahsedilen numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çekme numunelerinin katı modelleri Solid CAD programında oluşturulmuş olup, 3 boyutlu CAD verileri Standard Triangle Language (STL) dosyasına dönüştürülerek imalat sürecine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.1 Çekme test numunesi teknik resmi

ASTM E8/E8M-16a standartlarında yer alan çekme test numunesi ½ ölçeğinde küçültülerek bu çalışmada kullanılmıştır. Test numunesi 2 mm kalınlığında yassı bir yapıya sahip olup ölçüleri şekil 2.1’de verilmiştir.

2.2.2 Numunenin İmalatı

Bu tez çalışmasında, kullanılmış olan Grade 5 Ti6Al4V tozunun özellikle havacılık sanayinde kullanımı esnasında farklı ortam şartları atlındaki karakteri merak konusudur.

Tablo 2.1 Ti6Al4V Elemental Kompozisyonu

Malzeme	Al	V	O	N	C	H	Fe
% Min	5,5	3,5	-	-	-	-	-
% Maks.	6,75	4,5	0,2	00,5	0,08	0,015	0,3

Tablo 2.1 Ti6Al4V Elemental Kompozisyonu (devamı)

Malzeme	Fe	Y	Diğer elementler	Diğer elementler, Toplam	Ti
% Min	-	-	-	-	Bal.
% Maks.	0,3	0,005	0,1	0,4	

Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi Tablo 2.1’de görüldüğü gibidir. Bu çalışmada, deney numuneleri EOS M280 DMLS (doğrudan metal lazer sinterleme) cihazı ile imal edilmiştir. Bu cihaz ile Grade 5 Ti6Al4V tozu lazer enerjisi ile sinterlenmiştir. Üretim esnasında tabla sıcaklığı olarak 35 °C seçilmiştir. Ti6Al4V malzemesinin oksijene karşı yüksek reaktivliğinden dolayı, sinterleme işlemi gerçekleştirilirken üretim odasına koruyucu gaz olarak Argon gazı verilerek oksijen seviyesi kontrol edilmiştir. İmalat esnasında, Ti6Al4V tozu katman kalınlığına uygun şekilde serilerek her bir katmanın lazer enerjisi ile sinterlenmesi sağlanmıştır. Sinterlenen katman üzerine bir sonraki katman için toz malzeme serilmekte ve önceki tabakanın üzerine yeni katman sinterlenerek eklenmektedir. Bu işlem istenilen standart çekme test numunesi üretilene kadar katman katman devam etmiştir [34] [35].

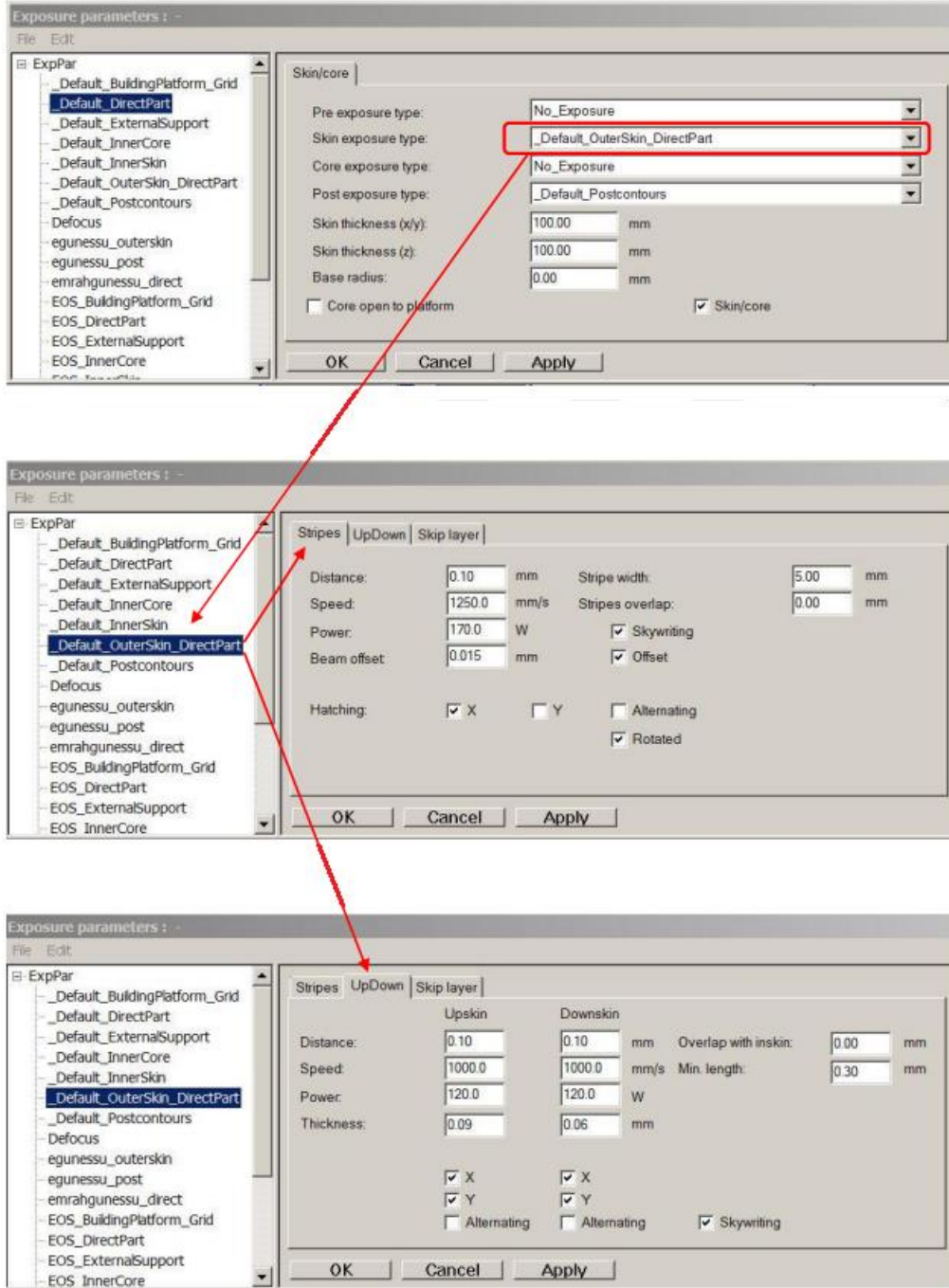
Tablo 2.2 EOS M280 Eklemeli İmalat Tezgahı Dış Kabuk Üretim Parametreleri

Parametre	Değer	
Tarama Mesafesi	0,1	mm
Tarama Hızı	1250	mm/s
Lazer Gücü	170	W
Işın Çapı	0,015	mm
Şerit Genişliği	5	mm

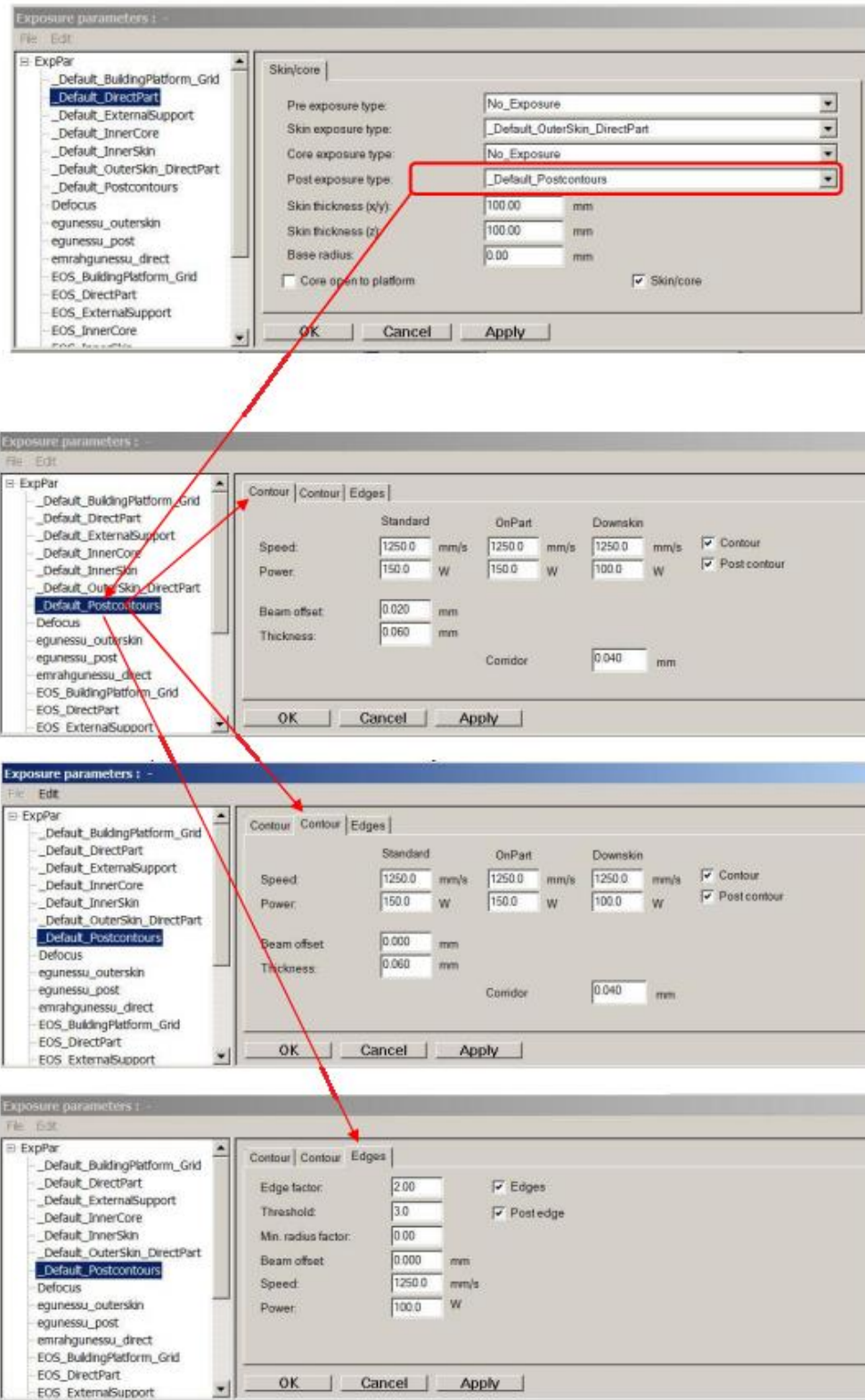
Tablo 2.3 EOS M280 Eklemeli İmalat Tezgahı Orta Kontör Üretim Parametreleri

Parametre	Değer	
Tarama Hızı	1250	mm/s
Lazer Gücü	150	W
Işın Çapı	0,02	mm
Kalınlık	0,06	mm

Toz yatak eklemeli imalatda üretim parametreleri elde edilen numunenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te yer alan parametreler Ti64 malzemenin EOS M280 tezgahında üretimi için yaygın olarak kullanılan parametre seviyeleri olup bu çalışmada da aynı parametreler tercih edilmiştir [36].



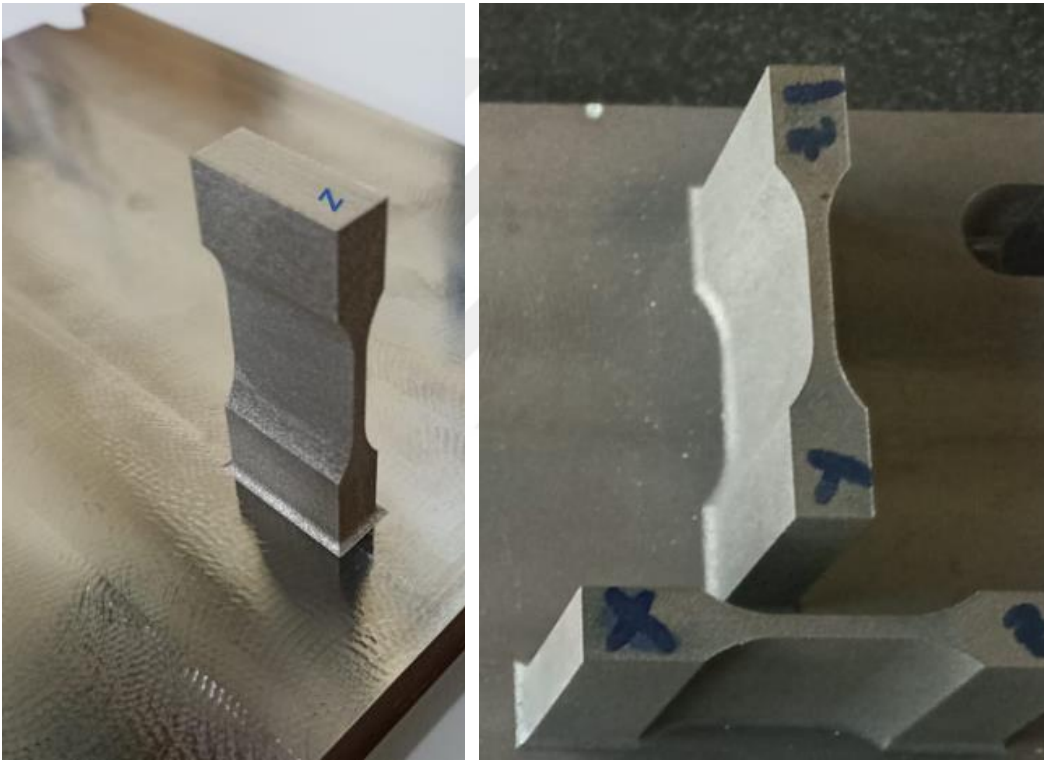
Şekil 2.2 Tezgah dış kabuk parametreleri



Şekil 2.3 Tezgaç Orta Kontör parametreleri

EOS M280 tezgahın üretim programlama ekranının görüntüsü şekil 2.2’de yer aldığı gibidir. Şekil 2.3’te görünen parametreler Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’teki değerleri sağlamaktadır.

Lazer sinterleme işlemi yaparken parça üzerinde lokal olarak sıcaklık farklılıkları yaratmaktadır. Bu sıcaklık farklılıkları üretilen parçanın mikroyapısını etkilemekle birlikte parçanın çarpılması gibi durumlara da yol açabilmektedir. Bu sorunun ortaya çıkmaması için numuneler kütsel formda imal edilip ardından elektro tel erozyon yöntemi ile 2 mm kalınlığında dilimlere ayrılmıştır.



Şekil 2.4 Kütsel formdaki test numuneleri

Şekil 2.4’te Kütsel formda üretilmiş numunelerin tezgah tablasındaki görüntüleri yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere numunelerin çekme yönü imalatın gerçekleştiği tezgahta konumlandırıldığı oryantasyon ile eşleştirilerek X, Y ve Z yönünde inşa edilmiş numuneler elde edilmiştir.

Toz yatak eklemeli imalat ile üretilen parçaların ardıl işlemleri mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir [37] [38]. Test numuneleri üretim sonrası ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Ti6Al4V malzemedan Lazer Toz Yatak Füzyon tekniği ile

EOS M280 tezgahında üretilen çekme test numuneleri üretim sonrası 650 °C sıcaklığında fırına 3 saat boyunca koruyucu Argon gazı altında ısıl işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 2.5 Test numuneleri

Şekil 2.5'te test numunelerinin son hali yer almaktadır. Görseldeki test numuneleriyle yoğunluk ölçümü, mikroyapı görüntülemesi ve farklı ortam sıcaklıkları altında çekme testi ile sonrasında elektron mikroskopunda kopma yüzeyi görüntülemesi gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen test ve hesaplamaların sonuçlarına tezin ilerleyen aşamalarında detaylı yer verilmiş olup çıktılar üzerine yorumlar yapılarak literatüre sunulmuştur.

2.3 Deneysel Çalışmalar

2.3.1 Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ölçümü Arşimet yoğunluk ölçüm metoduyla gerçekleştirilmiştir. Arşimet yoğunluk ölçüm metodunda öncelikle numunenin havada serbest halde ağırlığı ölçülmektedir. Ardından numune sıvı dolu bir tanka daldırılarak ölçüm sıvı içerisinde tekrarlanmaktadır. Sıvı içerisine daldırılan numuneye uygulanan kaldırma kuvveti numunenin yoğunluk ile orantılı olacağı için numunenin yoğunluğu hassas terazi tarafından hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.6 Yoğunluk ölçüm cihazı

Şekil 2.6’da yoğunluk testinin gerçekleştirildiği Arşimet test düzeneği yer almaktadır. Spierings, A B ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, eklemeli imalat ile üretilen parçaların yoğunluklarının hesaplanması için farklı yöntemlerin kullanımı kıyaslanmıştır. Mikroskopik analiz ve Arşimet metotlarının kıyaslandığı

çalışmada buna ek olarak arşimet metoduyla yapılan ölçümler için farklı sıvıların kullanımı üzerinde durulmuştur. Saf sudan daha düşük yoğunlukta bir sıvı kullanmanın pürüzlülüğü yüksek olan parçalarda hassasiyeti artırabileceğine değinilirken test numunesi ile reaksiyona girebileceği ve süreci karmaşıktırabileceği de ifade edilmiştir [39].

Yoğunluk ölçümü işleminde öncelikle numuneler serbest olarak tartılmış ardından su dolu tank içerisine batırılıp tartılmıştır. İki tartım sonucundan yola çıkarak Radwag AS 220 R.2 analitik terazi yardımıyla yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Her bir numune için 3 kez tekrarlanarak elde edilen sonuçlara aşağıda bulgular kısmında yer verilmiştir.

2.3.2 Eksenel Çekme Testi

Eksenel çekme testi bir malzemenin mekanik dayanımını belirlemek için sıkça başvurulmuş bir testtir [40] [41]. Eklemeli imalat yöntemlerinden toz yatak füzyon yöntemi ile EOS M280 tezgahında Ti6Al4V metal tozundan üretilmiş olan standart çekme test numuneleri Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarlarında INSTRON 5982 100 kN çekme test cihazında çekme testine tabi tutulmuştur. Testler her bir oryantasyon için üç numune ayrıca her farklı ortam şartı için yine üçer numune olacak şekilde üç tekrarlı gerçekleştirilirken toplamda 27 adet numune test edilmiştir. Ortam sıcaklığında yapılacak testler için 22 °C tercih edilirken yüksek ortam sıcaklığında yapılacak testler için 200 °C tercih edilmiş ve son olarak düşük ortam sıcaklığında gerçekleştirilecek olan testler için -50 °C sıcaklık tercih edilmiştir. Bu sıcaklık seviyelerini seçerken Federal Havacılık İdaresinin onayı ile yayınlanan Metalik Malzeme Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Standardizasyonu (MMPDS) dokümanından faydalanılmıştır. İlgili dokümanda Ti6Al4V malzemenin çekme dayanımının sıcaklığa bağlı değişimini ifade eden grafikte dayanım sıcaklığın 200 °C seviyesini geçtikten sonra dramatik olarak değiştiği için malzemenin kullanımı için sıklıkla tercih edilecek aralığın en üst noktası olarak 200 °C belirleyerek yüksek ortam sıcaklıklarındaki testler bu sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu sıcaklıkta gerçekleştirme açısından kritik bir değer olarak görülebilecek 200 °C derece, testlerde yüksek ortam sıcaklığı olarak seçilmiştir. Düşük ortam sıcaklığı olarak ise Amerikan Isıtma-Soğutma ve iklimlendirme birliği (ASHRAE)'nin bir uçak için maruz kalınacak hava şartları

grafiğinde yer alan minimum sıcaklık olan -65 °F referans alınarak -50°C seçilmiştir.



Şekil 2.7 Çekme test düzeneği

Test numuneleri INSTRON 5982 tezgahına şekil 2.7'deki gibi yerleştirildikten sonra mengenerler yardımıyla numuneler sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Çekme hızı 3 mm/dk seçilerek numuneler kopana kadar teste devam edilmiş ve test sonucu olarak maksimum dayanım, akma dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı çıktısı elde edilmiştir.

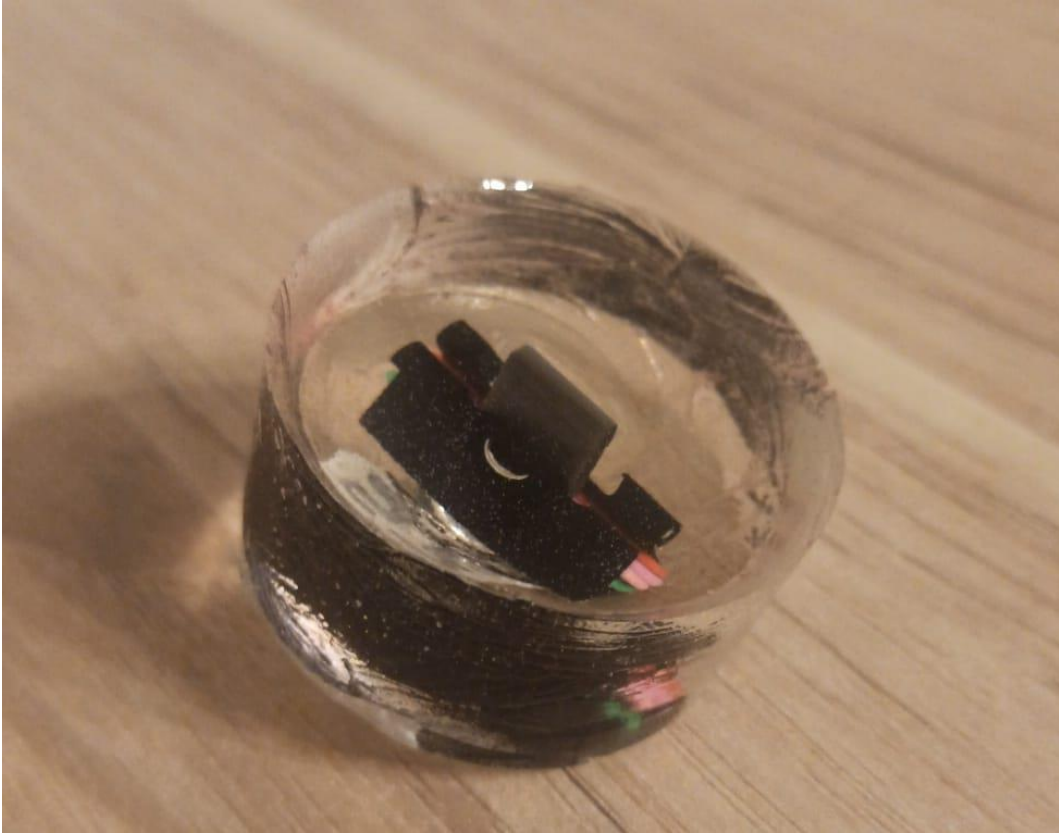


Şekil 2.8 Çekme test düzeneği iklimlendirme kabini

Oda sıcaklığı koşulunda çekme testi sonrasında yüksek ortam sıcaklığında çekme testi, tezgahın iklimlendirme ünitesi içerisinde 200 °C derece sıcaklık altındaki numuneye çekme işlemi yapılarak icra edilmiştir. Düşük ortam sıcaklığı testi için ise tezgahın iklimlendirme kabinine nitrojen gazı verilirken şekil 2.8’de görülen iklimlendirme kabini üzerinden sıcaklığın -50 °C değerini yakaladığı saptandıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Her ortam için üçer numuneden elde edilen test sonuçlarının ortalaması alınarak farklı oryantasyonlar ve farklı ortam sıcaklıklarına bağlı oluşan test sonuçlarının grafikleri bulgular kısmında verilmiştir.

2.3.3 Mikroyapı İncelemesi

Titanyum alaşımları havacılık, otomotiv ve medikal gibi pek çok sektörde sıkça kullanılan malzemelerdir. Bunu sebebi titanyum alaşımlarının sahip oldukları mekanik özelliklerdir. Fakat titanyum malzemeler aynı zamanda şekillendirilmesi zor ve üretimi maliyetli malzemelerdir. Titanyum alaşımlarının mikroyapısında alfa ve beta olmak üzere iki farklı yapı bulunduğu görülebilir [42]. Titanyumun beta fazı hacim merkezli kübik yapıda iken alfa fazı ise sıkı düzen hekzagonal yapıdadır. Titanyumun farklı fazlarının mikroyapısında bulunma oranları ve dağılımı titanyumun mekanik özelliklerini belirlemede son derece etkilidir [43] [44]. Mikroyapı analizi ile titanyumun iç yapısı ve faz dağılımları görüntülenerek malzemenin mekanik özelliklerine dair fikirler verir [45] [46].



Şekil 2.9 Mikroyapı incelemesi için kalıplanmış numune

Mikroyapı analizi için öncelik titanyum numuneler, numune kesme cihazı yardımıyla kesilmiş ardından kesilen numuneler zımparalama işlemi esnasında daha rahat tutulabilmesi için epoksi yardımıyla şekil 2.9’da görüldüğü gibi kalıplara alınmıştır. Epoksinin sertleşmesiyle numuneler zımpara ve parlatma işlemi için hazır hale gelmiştir. Zımpara numaraları zımpara üzerindeki tanecik boyutu ile

ilgilidir. Zımpara numarası arttıkça zımpara yüzeyindeki taneciklerin boyutu küçülmektedir. Titanyumun mikroyapı analizine hazırlanması için oldukça hassas zımparalar kullanılması gerekmektedir. Buradan yola çıkarak numuneler öncelikle 600'lük zımpara ile zımparalanır ardından 1000'lik 1500'lük 2000'lik ve 2500'lük zımpara ile zımparalanmıştır. Zımparalama sürecini takiben numuneler sırasıyla 6 mikron ve 1 mikronluk solüsyonlar ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi ile yüzeyleri pürüzsüz hale gelen numuneler kroll solüsyonu ile dağlanmıştır. Kroll solüsyonu titanyumun dağlanması için sıkça kullanılan bir solüsyondur [47] [48]. Bu çalışmada kroll solüsyonu 100 ml suya 3 ml HF (%60 saflıkta) ve 9 ml HNO₃ (%60 saflıkta) katılarak elde edilmiştir. Solüsyon parlatılmış yüzeye damlatılıp ortalama 30-35sn yüzeyde tutularak sağlanmıştır. Dağlama sonrası yüzey saf su ile temizlenip kurutularak Olypmus PME3 optik mikroskop ile yüzey görüntüleri alınmıştır. Mikroyapı görüntülerine bulgular bölümünde yer verilmiştir.

2.3.4 SEM Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektron ışınlarının odaklanıp numune yüzeyine düşürülmesi suretiyle ilgili yüzeyin görüntüsünün elde edilmesini sağlayan bir görüntüleme aletidir. Elektron ışınları incelenmek istenen yüzeye odaklanıp yüzey elektronlar ile taranarak görüntü elde edilir. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller SEM mikroskopunun dedektörlerince toplanarak bilgisayar ortamına aktarılır ve neticesinde görüntü elde edilir. Bu çalışmada taramalı elektron mikroskobu görüntüsü elde edilmesi için şekil 2.10'da görülen SEM ZEISS EVO LS10 cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.10 Taramalı elektron mikroskobu

Numune taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilmeden önce eğer iletken bir malzeme değilse kaplama yapılır. İletken malzemeler için kaplama ihtiyacı yoktur. Bu çalışmada kullanılan malzemenin Ti esaslı olmasından kaynaklı bir kaplama ihtiyacı ortaya çıkmamıştır. Cihaza uygun aparatlar yardımıyla sensörün göreceği şekilde sabitlenen numunelere cihaza yerleştirilir. Kırık yüzey incelemesi yapılmak üzere numunelerin kırık yüzeyleri sensörleri görececek şekilde cihaza yerleştirilmiştir. Numuneler elektron ışınlarının yüzeye transfer edilebilmesine uygun şekilde ortam sağlayabilmek için vakum ortamına alınır. Cihaz bölmesinde yeterli vakum sağlandıktan sonra elektron ışınları ilgili yüzeye transfer edilir ve oluşan görüntü sensörler marifeti ile elde edilip bilgisayara aktarılır. Farklı yaklaştırma değerlerinde görüntüler alınarak kırılma yüzeyinde malzeme yapısı tespit edilir buna ek olarak kırılan yüzeylerde gerçekleşen kırılma türü yüzeydeki deformasyona bağlı yorumlanabilir. Farklı yaklaştırma oranlarında elde edilen görüntülere çalışmanın bulgular bölümünde yer verilmiştir.

3

BULGULAR

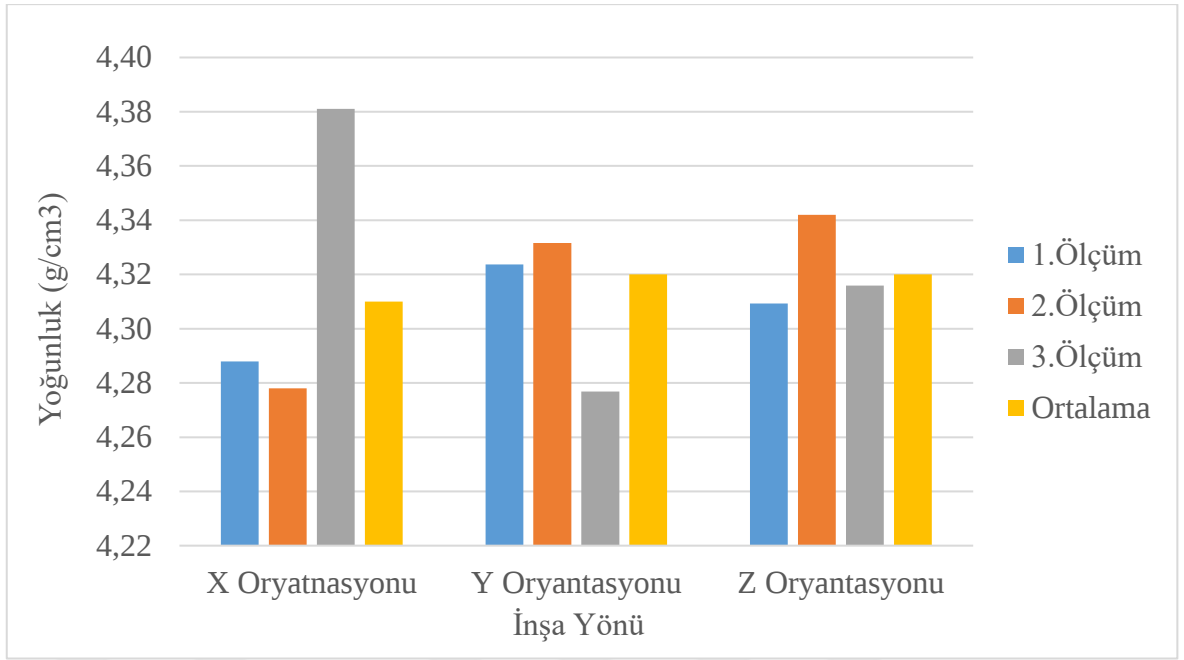
3.1 Yoğunluk Ölçümü

Radwag AS 220 R.2 analitik terazi cihazının okuma doğruluğu +/- %0,1 mg'dır. Arşimet yöntemi ile ilgili cihazda hesaplanan yoğunluk değerlerinin üretim yönünden çok etkilenmediği tablo 3.1'den anlaşılabilmektedir.

Tablo 3.1 X, Y ve Z yönünde imal edilmiş numunelerin yoğunluk değerleri

	Sonuç 1 (g/cm ³)	Sonuç 2 (g/cm ³)	Sonuç 3 (g/cm ³)	Ortalama (g/cm ³)	Standart Sapma	Genel Ortalama (g/cm ³)
X	4,27	4,24	4,36	4,29	0,06	4,31
	4,26	4,30	4,42	4,32	0,08	
	4,22	4,32	4,39	4,31	0,08	
Y	4,30	4,20	4,33	4,28	0,07	4,32
	4,39	4,23	4,37	4,33	0,09	
	4,39	4,36	4,28	4,34	0,05	
Z	4,38	4,42	4,35	4,38	0,03	4,32
	4,27	4,29	4,27	4,28	0,01	
	4,30	4,40	4,24	4,32	0,08	

X, Y ve Z yönünde toz yatak eklemeli imalat ile üretilen numunelerin her birisi için Arşimet yöntemi ile yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen yoğunluk değerlerinin dikkate değer farklılıklar içermediği görülmektedir. Fakat benzer yoğunluğa sahip Ti64 alaşımları farklı mikroyapıları sayesinde farklı mekanik özellikler gösterebilir.

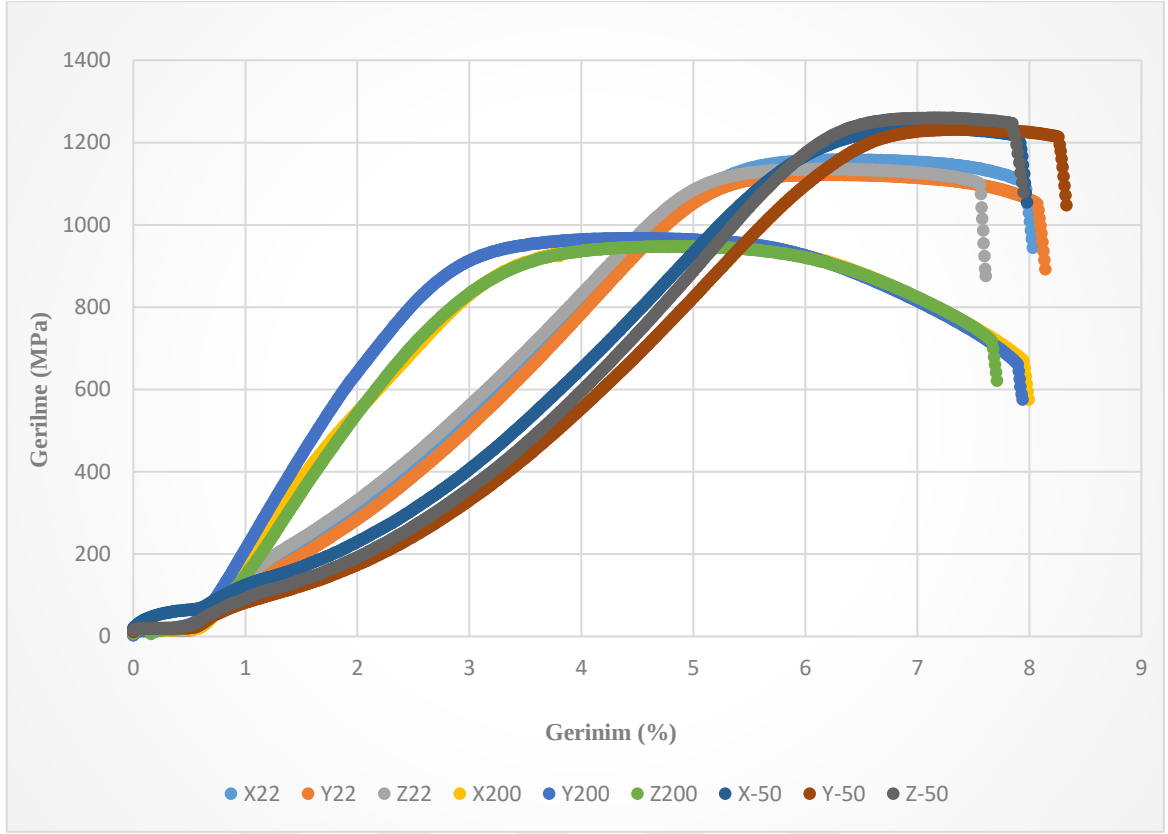


Şekil 3. 1 Yoğunluk ölçüm sonuçlarının grafiği

Yoğunluk ölçümüm sonucunda elde edilen değerleri gösteren grafik şekil 3.1’de yer almaktadır. Şekil 3.1’den her bir tekrarlı ölçüm ve ortalamalar gözlemlenebilir.

3.2 Eksenel Çekme Testi

X, Y ve Z oryantasyonunda üretilmiş olan numunelere -50 °C, 22 °C ve 200 °C ortam sıcaklıklarında ayrı ayrı eksenel çekme testi yapılmıştır. Testler her test koşulu için 3’er tekrarlı olacak şekilde toplamda 27 numune ile tamamlanmıştır. Her bir koşul için 3 kez tekrarlanan testlerin sonuçlarının ortalaması alınarak gerilim gerinim grafikleri elde edilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen grafikler ortak bir şekil üzerinde gösterilerek dayanım değerlerinin nasıl değiştiğinin kolaylıkla gözlemlenebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.2 Farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiş olan çekme test sonuçlarının grafiği

Şekil 3.2’de farklı ortam sıcaklıklarında X, Y ve Z oryantasyonları için elde edilen sonuçlardan oluşturulan grafiğe yer verilmiştir.

Instron 5982 100 kN çekme test tezgahında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonuçları olarak maksimum dayanım, akma dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı elde edilmiştir. Elde edilen test sonuçlara tablo 3.2’de yer verilmiştir. Akredite bir laboratuvar olan Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında yer alan Instron 5982 çekme test cihazının ölçüm doğruluğu $\pm 0,5\%$ ’tır.

Tablo 3.2 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler

Baskı Yönü	Sıcaklık (°C)	Maksimum Dayanım [MPa]				Standart Sapma [MPa]	Değişim (%)
		1. Test	2. Test	3. Test	Ortalama		
X	22	1121,78	1131,55	1120,51	1124,61	6,04	-
	200	927,72	926,69	939,66	931,36	7,21	-17,18
	-50	1242,05	1233,82	1241,62	1239,16	4,63	10,19
Y	22	1106,54	1093,23	1112,73	1104,17	9,96	-
	200	931,16	943,73	929,73	934,87	7,70	-15,33
	-50	1242,43	1224,19	1231,81	1232,81	9,16	11,65
Z	22	1087,57	1118,05	1114,16	1116,11	2,75	-
	200	930,92	940,08	935,01	935,34	4,59	-16,20
	-50	1254,89	1263,90	1262,96	1259,40	6,37	12,84

Tablo 3.3 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)

Baskı Yönü	Sıcaklık (°C)	Akma Dayanımı [MPa]				Standart Sapma [MPa]	Değişim (%)
		1. Test	2. Test	3. Test	Ortalama		
X	22	1121,78	1131,98	1120,51	1124,76	6,29	-
	200	929,48	927,91	940,96	932,78	7,12	-17,07
	-50	1242,86	1235,52	1242,03	1240,14	4,02	10,26
Y	22	1107,85	1093,23	1112,73	1104,60	10,15	-
	200	931,03	945,63	932,04	936,23	8,15	-15,24
	-50	1242,44	1224,19	1233,19	1233,27	9,12	11,65
Z	22	1087,57	1119,72	1115,59	1117,66	2,92	-
	200	932,24	941,26	936,90	936,80	4,51	-16,18
	-50	1255,70	1265,88	1263,77	1260,79	7,19	12,81

Tablo 3.4 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)

Baskı Yönü	Sıcaklık (°C)	Elastisite Modülü [GPa]				Standart Sapma [GPa]	Değişim (%)
		1. Test	2. Test	3. Test	Ortalama		
X	22	28,02	27,53	26,42	27,32	823,22	-
	200	33,65	31,70	28,53	31,29	2584,66	14,52
	-50	29,63	28,90	28,17	28,90	734,63	5,77
Y	22	27,82	28,98	28,82	28,54	627,95	-
	200	29,67	31,65	35,87	32,40	3167,24	13,52
	-50	28,72	28,38	27,48	28,19	637,67	-1,21
Z	22	14,28	28,02	27,59	27,81	303,03	-
	200	26,46	27,38	35,86	29,90	5180,51	7,51
	-50	32,52	29,42	28,98	30,97	2195,67	11,37

Tablo 3.5 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)

Baskı Yönü	Sıcaklık (°C)	Maksimum Dayanım Noktasındaki Eksenel Uzama (%)				Standart Sapma (%)	Değişim (%)
		1. Test	2. Test	3. Test	Ortalama		
X	22	6,35300	6,17200	6,57300	6,36600	0,20	-
	200	6,53000	6,46500	6,91600	6,63700	0,24	4,26
	-50	6,89900	7,53300	6,33400	6,92200	0,60	8,73
Y	22	6,43400	5,82300	6,34700	6,20133	0,33	-
	200	6,02900	6,34500	6,36200	6,24533	0,19	0,71
	-50	7,46000	7,01100	7,67600	7,38233	0,34	19,04
Z	22	1,14440	6,12400	6,22000	6,17200	0,07	-
	200	6,57900	6,72900	6,47600	6,59467	0,13	6,85
	-50	7,35800	7,24000	13,83100	7,29900	0,08	18,26

Tablo 3.6 Farklı ortam sıcaklıkları altında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonucunda elde edilen değerler (devamı)

Baskı Yönü	Sıcaklık (°C)	Akma Noktasındaki Eksenel Uzama (%)				Standart Sapma (%)	Değişim (%)
		1. Test	2. Test	3. Test	Ortalama		
X	22	6,35300	6,14800	6,57300	6,35800	0,21	-
	200	6,25000	6,35100	6,68500	6,42867	0,23	1,11
	-50	6,98700	7,52200	6,27200	6,92700	0,63	8,95
Y	22	6,51100	5,82300	6,34700	6,22700	0,36	-
	200	5,71300	5,96400	6,14600	5,94100	0,22	-4,59
	-50	7,58500	7,01100	7,51500	7,37033	0,31	18,36
Z	22	1,14440	6,20000	6,33400	6,26700	0,09	-
	200	6,28000	6,58200	6,09500	6,31900	0,25	0,83
	-50	7,42200	7,32800	13,90700	7,37500	0,07	17,68

Instron 5982 tezgahında gerçekleştirilen eksenel çekme testi sonuçları olarak maksimum dayanım, akma dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı elde edilmiştir. Elde edilen test sonuçlara tablo 3.2’de yer verilmiştir.

Z yönünde inşa edilmiş numunenin 22 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen ilk testindeki veriler ve -50 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen üçüncü testindeki veriler diğer sonuçlar ve literatür ile oldukça uyumsuz bir görüntü sergilediği için ortalamalara dahil edilmemiştir.

Şekil 3.2’deki grafiği, tablo 3.2’yi ve tablo 3.3’ü oluştururken INSTRON 5982 tezgahın her saniye test numunesine uygulanan kuvvet ile alt ve üst tutma çeneleri arasındaki mesafe verilerini kaydetmesinden faydalanılmıştır. Tezgahın yazılımı kuvvet ve mesafe verilerinden yola çıkarak otomatik olarak elastisite modülü, maksimum çekme dayanımı, akma dayanımı gibi verileri hesaplamaktadır. Titanyum alaşımlarının ortam sıcaklığı arttıkça mukavemetinin azaldığı

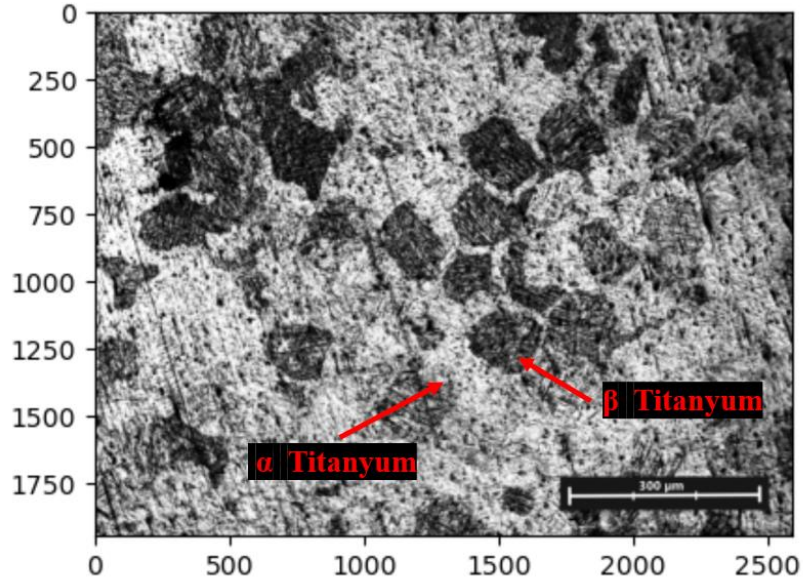
bilinmektedir [33] [49]. Bu sebepten sıcaklık arttıkça Ti64 alaşımının mukavemetinin düşeceği beklenmektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi oryantasyondan bağımsız olarak ortam sıcaklığının artmasıyla maksimum dayanım ve akma dayanımı düşmüştür. Aynı şekilde numunelerin sıcaklıklar arttıkça kopma noktasına kadar daha fazla plastik deformasyon gerçekleştirdiği yani akma sonrası uzamanın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çekme testi esnasında sıcaklık değişiminden kaynaklı olarak test parçaları üzerinde önyüklem oluşması deneysel sonuçlarda grafik eğiminin testin başlangıç aşamalarında beklenin dışında görünmesine sebebiyet vererek elastisite modülünün sıcaklıklar arttıkça arttığı sonucunu çıkarsa da sonucun sıcaklık değişimi ile test numunelerinde gerçekleşen genleşme kaynaklı istenmeyen önyüklemmeden etkilendiği düşünülmektedir. Ek olarak Z oryantasyonundaki numune için 22 °C sıcaklığında gerçekleştirilen 1.test ve -50 °C sıcaklığında gerçekleştirilen 3.test sonuçları diğer test sonuçları ile uyumsuz olduğu için ortalamalara dahil edilmemiştir. Numuneler aynı baskı bloğundan hazırlandığı için bu uyumsuzluğun test esnasında ortaya çıkan rassal hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

X Y ve Z oryantasyonlarında üretilen numunelerin imalat sürecinde maruz kaldığı ısı gradyanlarından dolayı farklı iç yapılara sahip olarak mekanik özelliklerinin değişiklikler gösterdiği düşünülebilir. Farklı yönlerde üretilmiş parçaların tane yönelimleri birbirinden farklı şekilde gerçekleşebilir [49]. Bu durum malzemelerin farklı oryantasyonlarda farklı dayanım değerleri vermesine sebebiyet verebilirken bunu önlemek için ardıl ısı işlemler uygulanabilir.

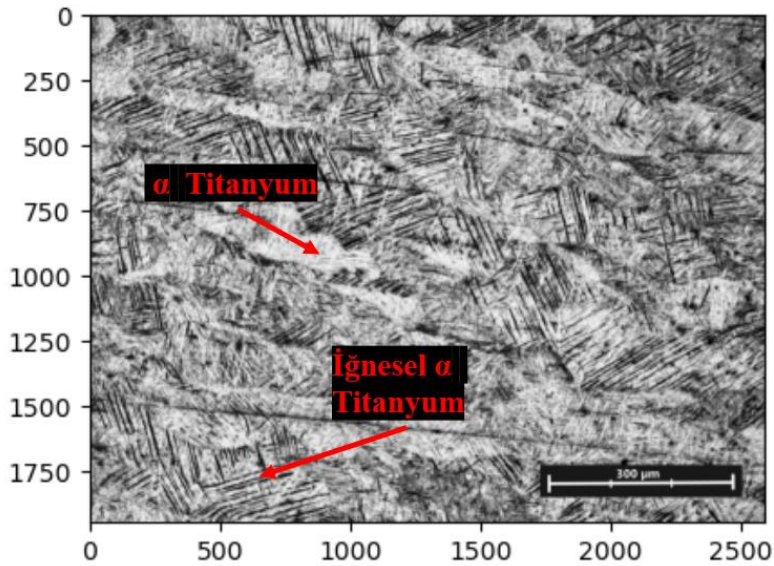
Yapılan testler neticesinde elde edilen sonuçlara göre dayanım değerlerinde sıcaklığa bağlı değişimler farklı oryantasyonlar için %3’ten fazla farklılık içermemektedir. 22 °C sıcaklıktan 200 °C sıcaklığa çıkıldığında dayanım değerlerindeki değişimin en az gözlemlendiği oryantasyon Y oryantasyonu olurken en fazla gözlemlendiği oryantasyon X oryantasyonudur. 22 °C sıcaklıktan -50 °C sıcaklığa düşüldüğünde ise dayanım değerlerindeki değişimin en az gerçekleştiği oryantasyon X oryantasyonu olurken en fazla gözlemlendiği oryantasyon Z oryantasyonudur. Dayanım değerlerindeki değişikliklerin mikroyapı sonuçları ile değerlendirilmesi neticesinde daha tutarlı yorumlar yapılabilir.

3.3 Mikroyapı Testi

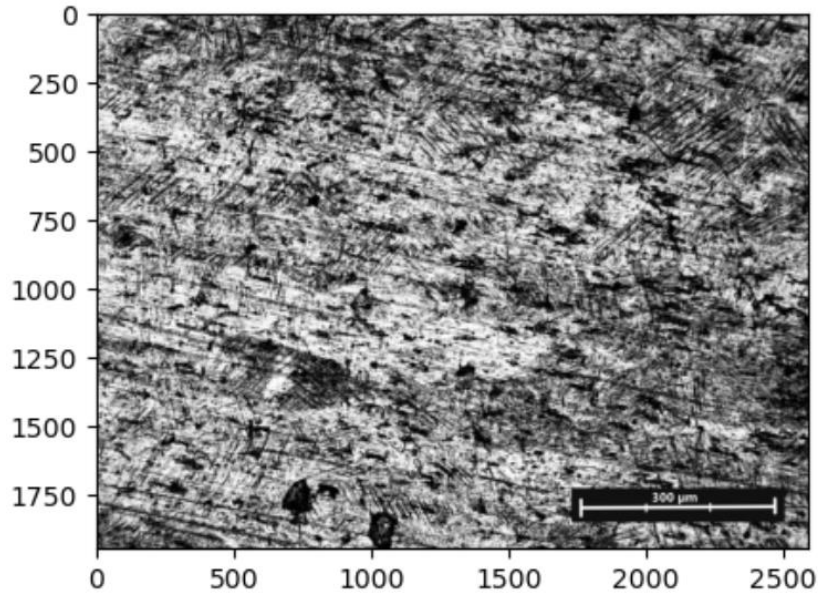
Titanyum numunelerin mikroyapılarına bakılarak mekanik özellikleri ile ilgili fikirler elde edilebilir. Bu çalışmada da çekme testi sonuçları ve mikroyapı görüntüleri birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 3.3 X oryantasyonunda inşa edilmiş ve 22 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı



Şekil 3. 4 Y oryantasyonunda inşa edilmiş ve 22 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı

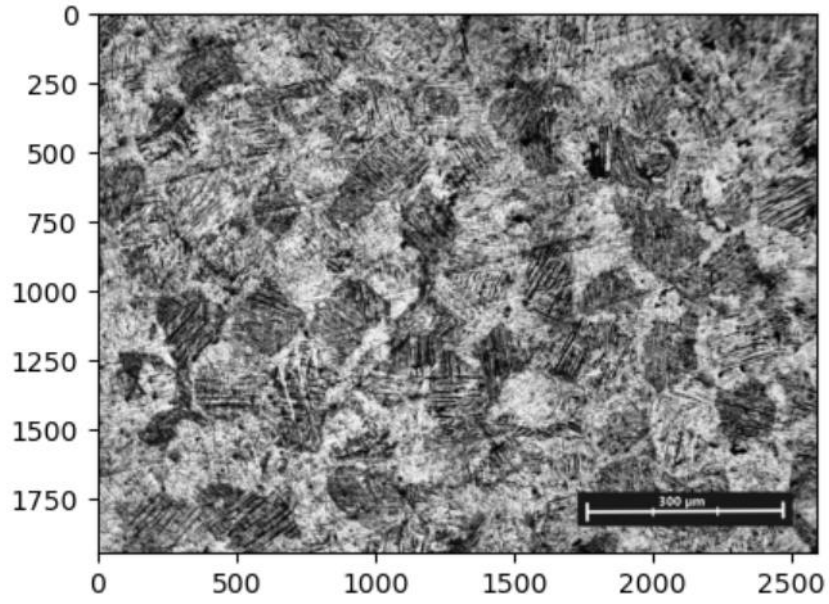


Şekil 3.5 Z oryantasyonunda inşa edilmiş ve 22 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı

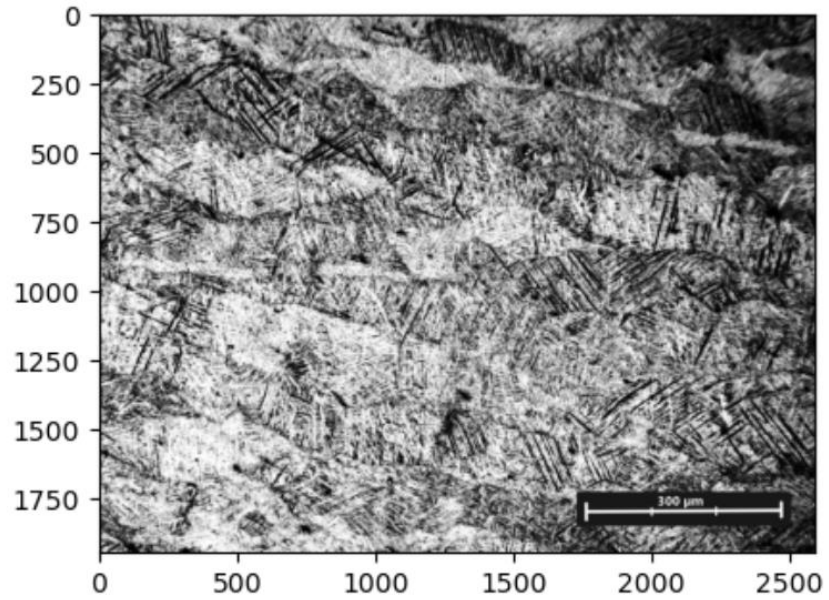
Şekil 3.3'te yer alan mikroyapı görseli X oryantasyonunda üretimi yapılmış eklemeli imalat numunesine aittir. Şekil 3.4'te yer alan mikroyapı görseli ise Y oryantasyonunda üretimi gerçekleştirilmiş eklemeli imalat numunesini belirtmektedir. Son olarak Şekil 3.5'te ise Z oryantasyonunda üretilen numunenin mikroyapısı görseline yer verilmiştir. Numunelerin inşa yönleri şekil 2.4'te yer alan tezgah üzerindeki görsellerinde gösterilmiştir.

Oda sıcaklığında çekme testi gerçekleştirilmiş olan numunelerden X yönünde üretilmiş numunenin mikroyapı görselinden yola çıkarak alfa beta fazlarının daha homojen dağıldığı görülmüştür. Bunun aksine Z ve Y yönünde inşa edilmiş eklemeli imalat numunelerinin mikroyapılarında alfa ve beta fazlarının yönlendirilmiş olduğu saptanmıştır. Farklı oryantasyonlar inşa edilen numunelerde ısıl gradyanların dağılımı değişim gösterdiği için soğuma süreçlerindeki farklılıktan kaynaklı olarak Y oryantasyonunda ve Z oryantasyonunda üretilmiş numunelerin iç yapısında X oryantasyonunda üretilmiş numunenin iç yapısının aksine martenzitik fazlar yer almaktadır. İğnesel alfa ve beta fazları mikroyapı içerisinde görünürken soğumadan kaynaklı olarak oluşan bu fazlar yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Martenzitik iç yapıdaki malzemelerin daha yüksek mukavemet değeri gösterirken aynı zamanda daha gevrek malzemeler olduğu bilinmektedir [3]. Ayrıca Ti64 bir alfa beta titanyum alaşımıdır. Titanyumun alfa

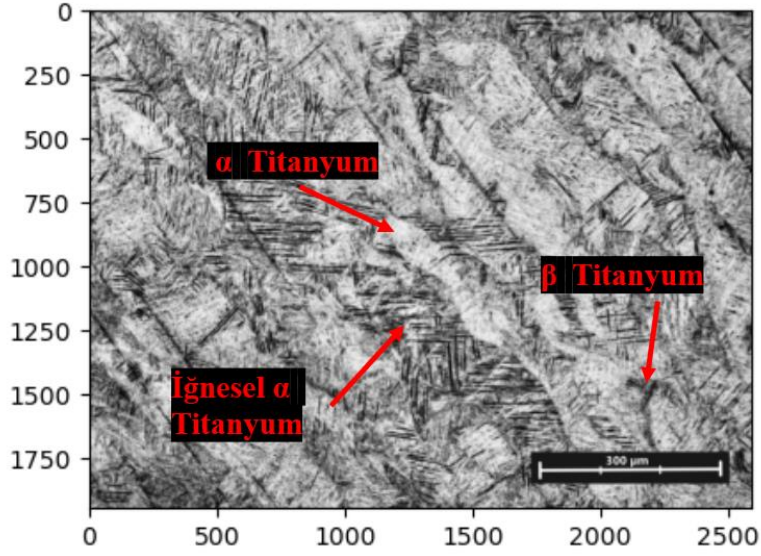
fazı düşük mukavemet ve tokluğa sahip iken yüksek korozyon direncine sahiptir. Titanyumun beta fazı ise yüksek mukavemet ve tokluğa sahip iken düşük korozyon direncine sahiptir [47].



Şekil 3.6 X oryantasyonunda inşa edilmiş ve 200 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı



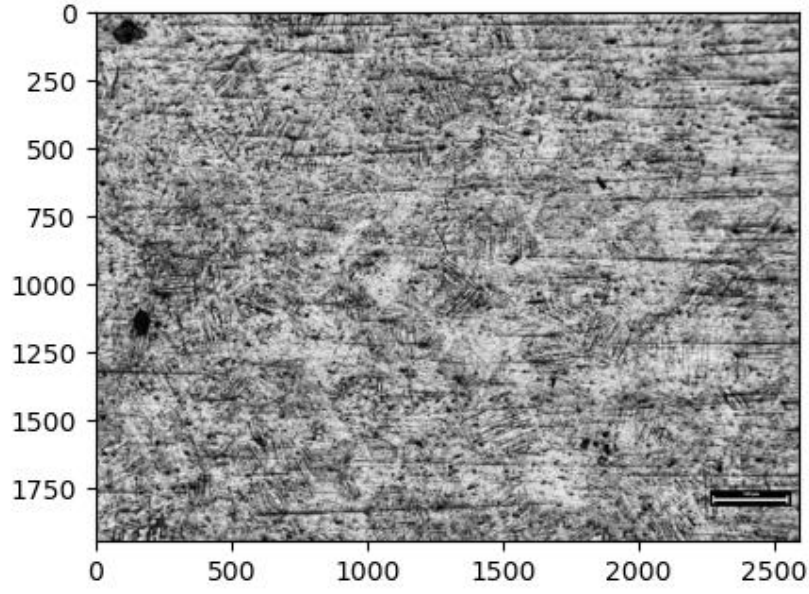
Şekil 3.7 Y oryantasyonunda inşa edilmiş ve 200 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı



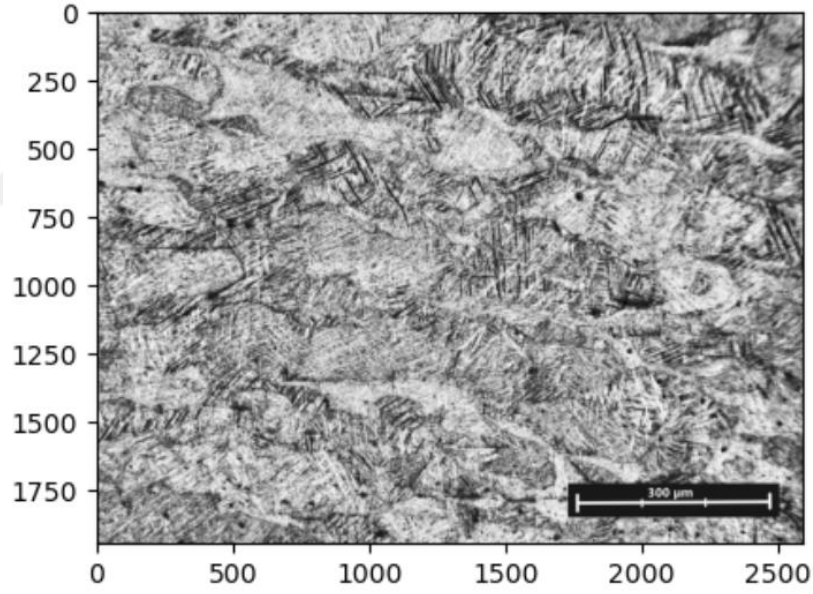
Şekil 3.8 Z oryantasyonunda inşa edilmiş ve 200 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı

200 °C yüksek ortam sıcaklığında çekme testi gerçekleştirilen numunelerin mikroyapıları yukarıdaki şekillerde yer almaktadır. Şekil 3.6'da yer alan mikroyapı görseli X oryantasyonunda üretimi yapılmış eklemeli imalat numunesine aittir. Şekil 3.7'de yer alan mikroyapı görseli ise Y oryantasyonunda üretimi gerçekleştirilmiş eklemeli imalat numunesini belirtmektedir. Son olarak Şekil 3.8'de ise Z oryantasyonunda üretilen numunenin mikroyapısı görseline yer verilmiştir.

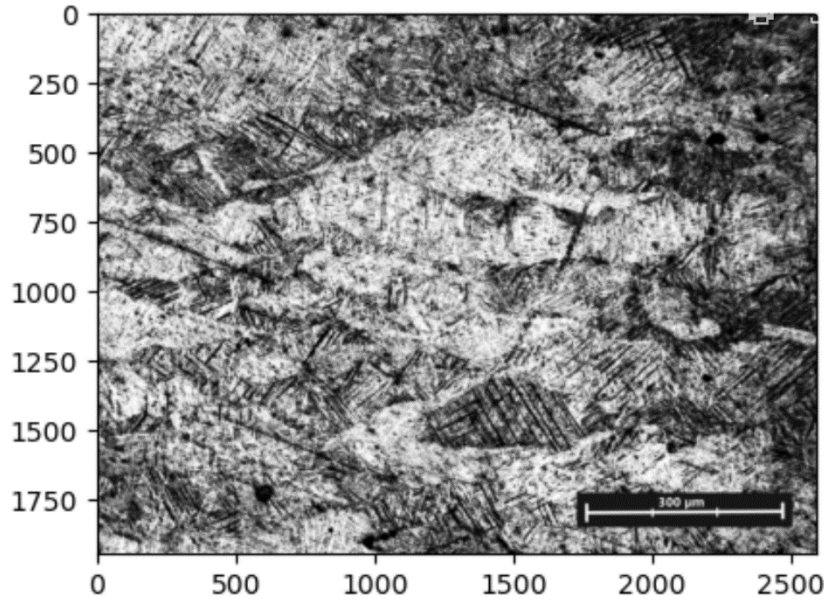
Y ve Z yönünde üretilmiş olan test numunelerinin mikroyapılarında iğnesel alfa titanyum fazı görülebilir. X yönünde üretilmiş numunenin ise mikroyapı görselinden yola çıkarak alfa beta fazlarının daha homojen dağıldığı görülmüştür. Bunun aksine Y ve Z yönünde inşa edilmiş eklemeli imalat numunelerinin mikroyapılarında alfa ve beta fazlarının yönlenmiş olduğu saptanmıştır. Titanyumun Beta fazının yüksek sıcaklıkta kararlılığı daha düşük olduğu bilinmektedir. Yapı içerisindeki beta fazı oranı yapının yüksek sıcaklıklardaki mukavemetini belirlemek için oldukça kritiktir [49].



Şekil 3.9 X oryantasyonunda inşa edilmiş ve -50 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı



Şekil 3.10 Y oryantasyonunda inşa edilmiş ve -50 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı



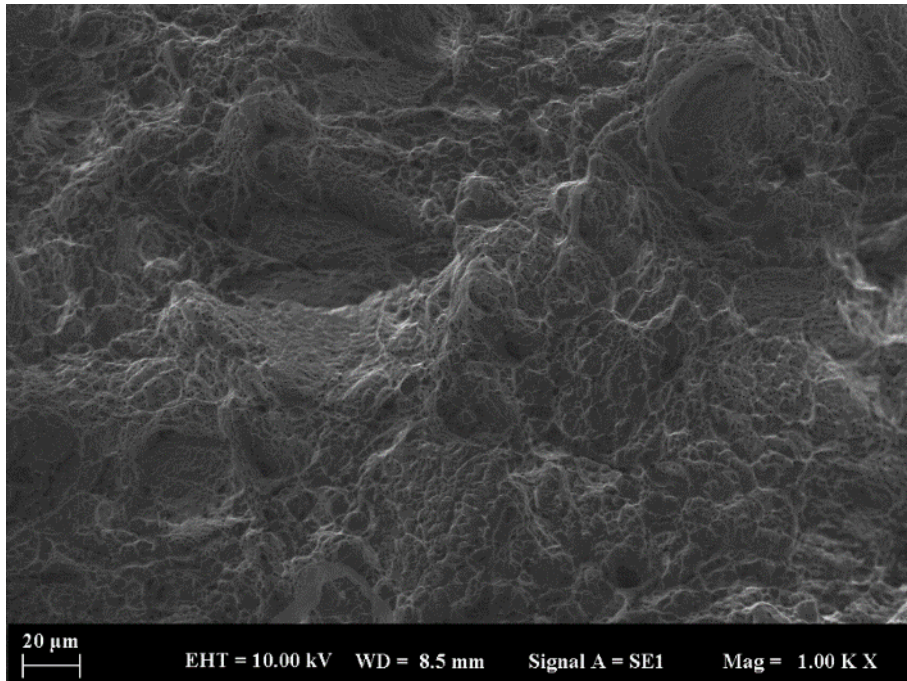
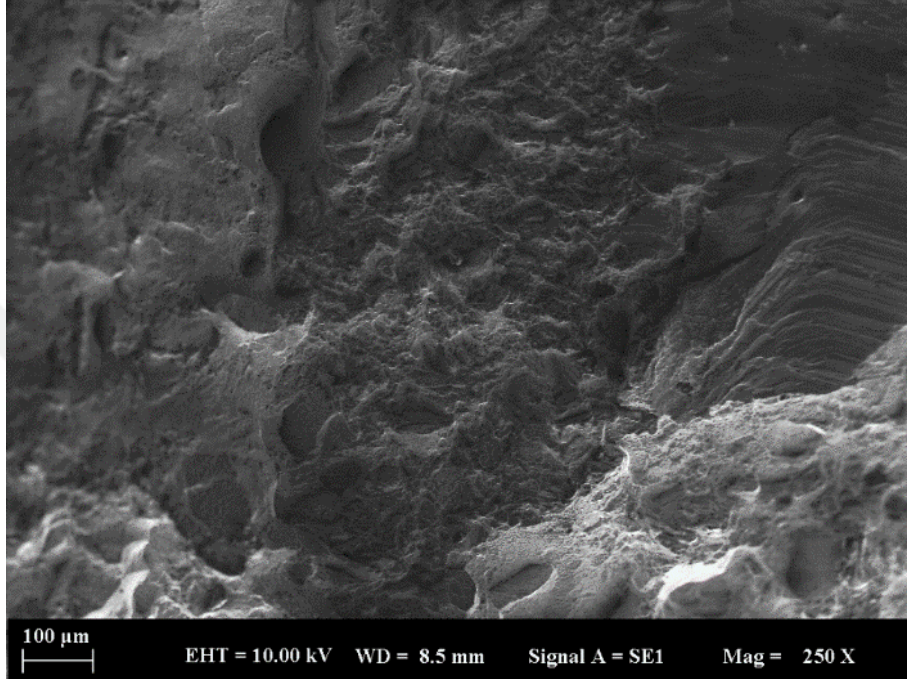
Şekil 3.11 Z oryantasyonunda inşa edilmiş ve -50 °C'de ortam sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuş numunenin mikroyapısı

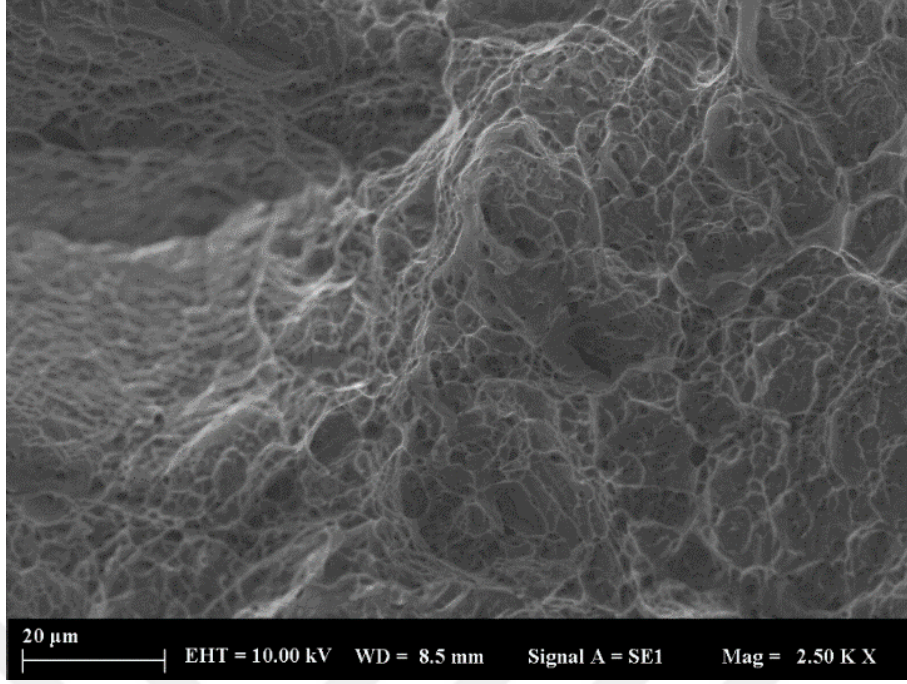
-50 °C düşük ortam sıcaklığında çekme testi gerçekleştirilen numunelerin mikroyapıları yukarıdaki şekillerde yer almaktadır. Şekil 3.10'da yer alan mikroyapı görseli X oryantasyonunda üretimi yapılmış eklemeli imalat numunesine aittir. Şekil 3.10'da yer alan mikroyapı görseli ise Y oryantasyonunda üretimi gerçekleştirilmiş eklemeli imalat numunesini belirtmektedir. Son olarak Şekil 3.11'de ise Z oryantasyonunda üretilen numunenin mikroyapısı görseline yer verilmiştir.

Her üç sıcaklıkta test edilmiş olan parçalar için elde edilen mikroyapı görüntülerinde Y ve Z yönünde üretilmiş olan test numunelerinin mikroyapılarında genellikle martenzitik yapıya daha çok rastlanmıştır. Oda sıcaklığında yapılan testlerde de bu bilgiye uyumlu olacak şekilde en düşük elastisite modülünün X oryantasyonunda üretilmiş numunede olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, yapı içerisindeki beta fazı oranı, yapının yüksek sıcaklıklardaki mukavemetini belirlemek için oldukça kritiktir. Mikroyapılarda benzer alfa ve beta fazları oranları görüntülenmesinden yola çıkarak, numunelerin sıcaklık değişiminden benzer oranlarda etkilendiği düşünülebilmektedir ve çekme testleri bu tez ile uyumlu şekilde gerçekleşmiştir.

3.4 Elektron Mikroskopu Görüntüleri

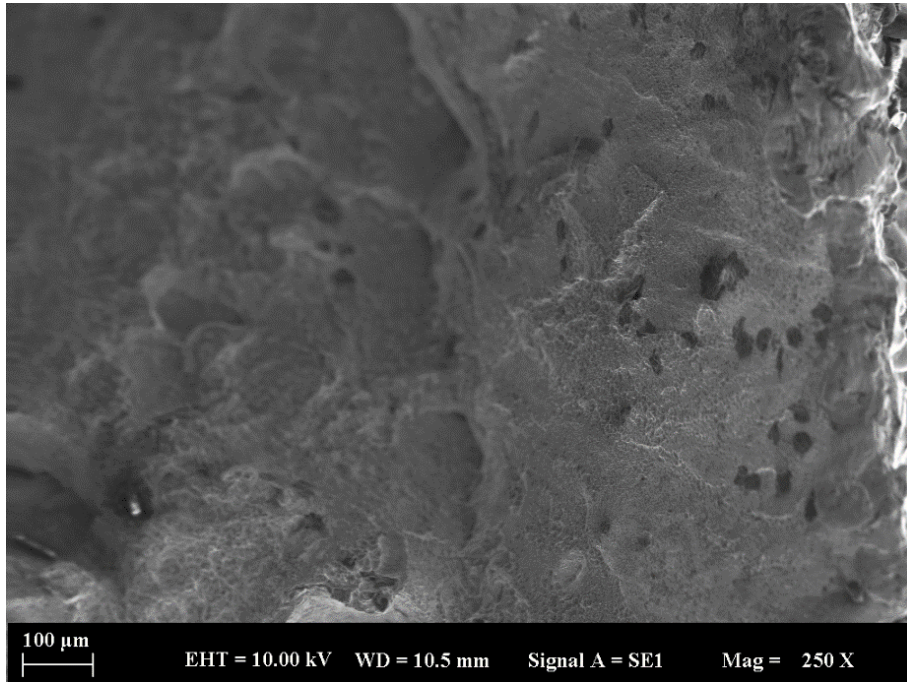
Çekme testinde elde edilen kopma yüzeyleri malzemelerin göstermiş olduğu davranış ile ilgili bilgi vermektedir. Gevrek veya sünek bir kopma süreci kırılma yüzeyinin incelenmesi ile anlaşılabilir. Taramalı elektron mikroskopu ile parçaların kopma yüzeylerini inceleyerek mekanik özellikler hakkında bilgi elde edilebilir.

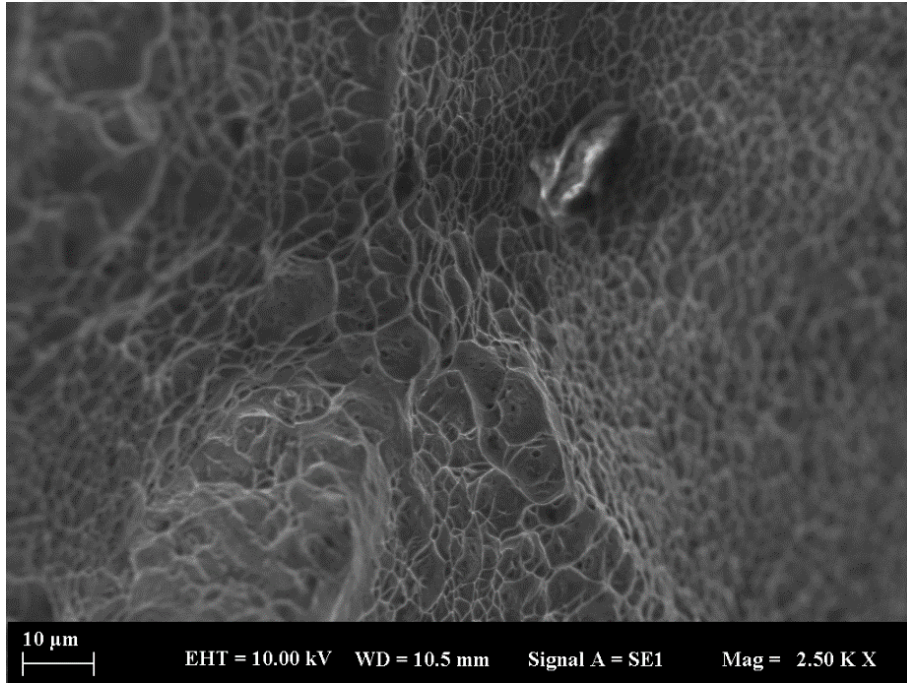
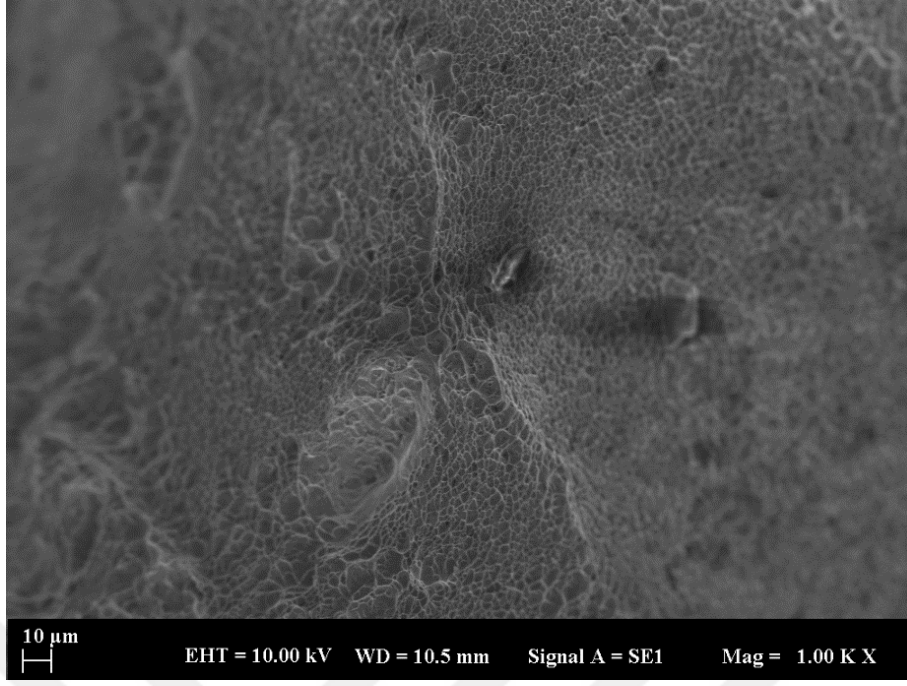




Şekil 3.12 22 °C ortam şartları altında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

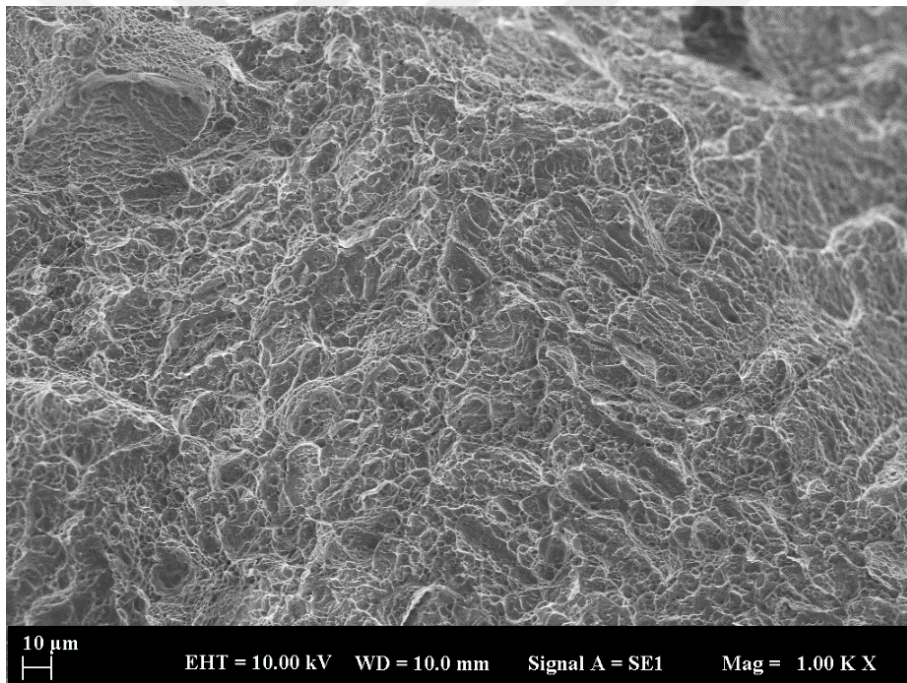
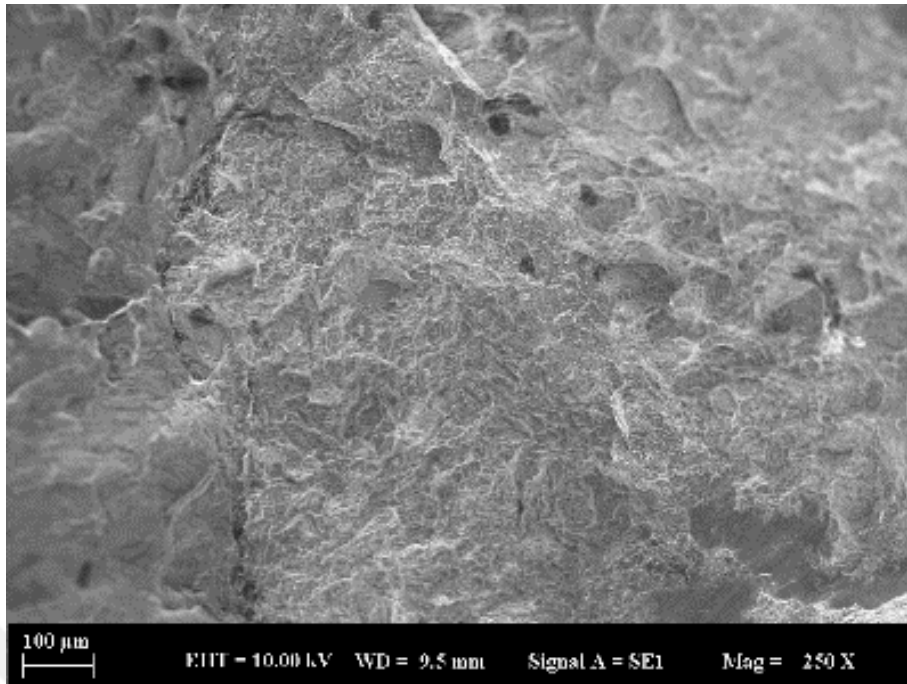
Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, 22 °C sıcaklıkta eksenel çekme testi esnasında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.12’de gösterilmiştir.

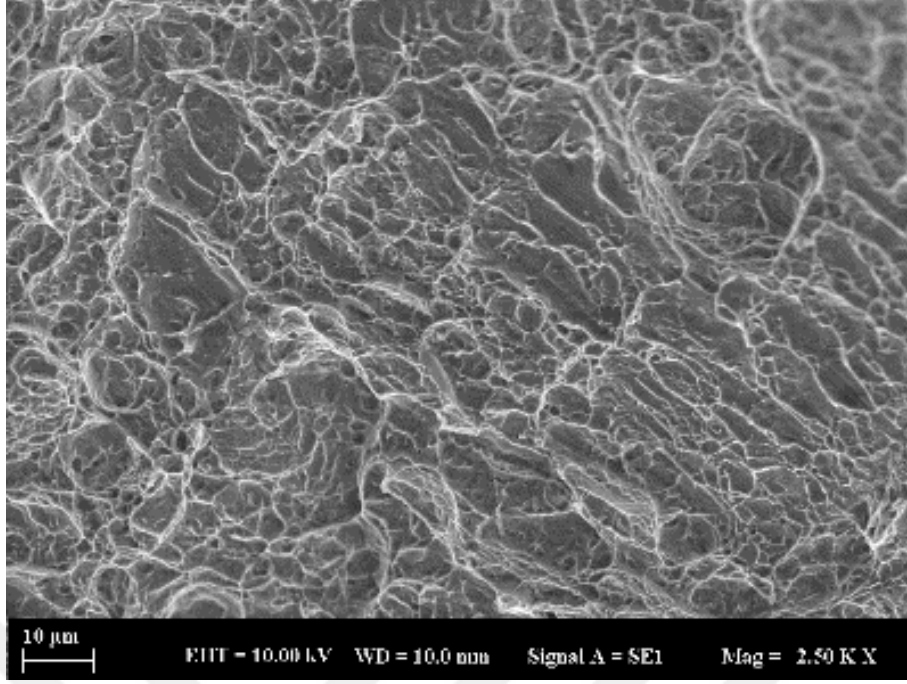




Şekil 3.13 200 °C ortam şartları altında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

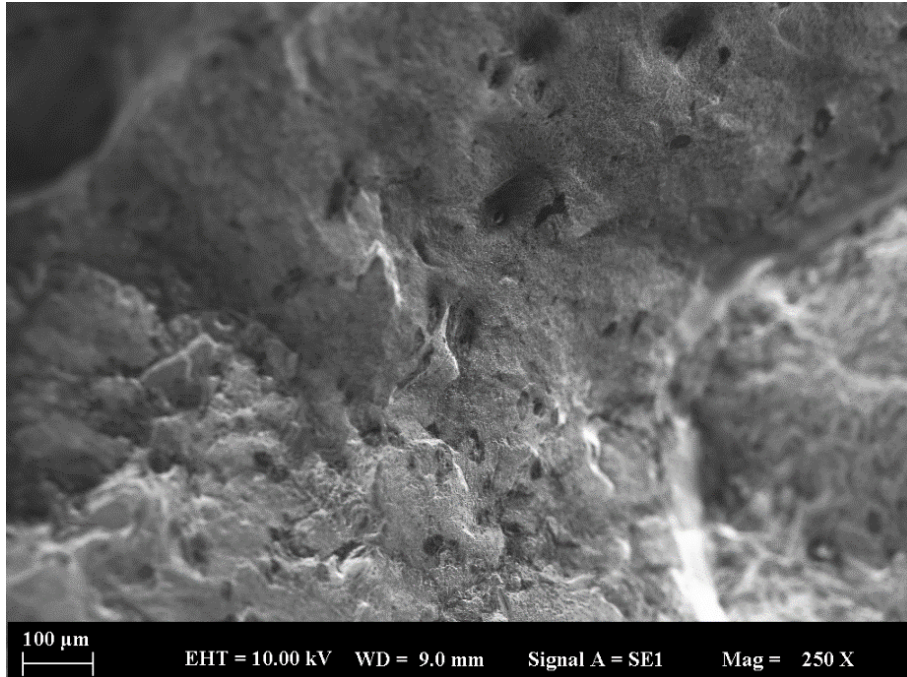
Taramalı elektron mikroskopu yardımıyla, 200 °C sıcaklıkta aksenal çekme testi esnasında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskopu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.13'te gösterilmiştir.

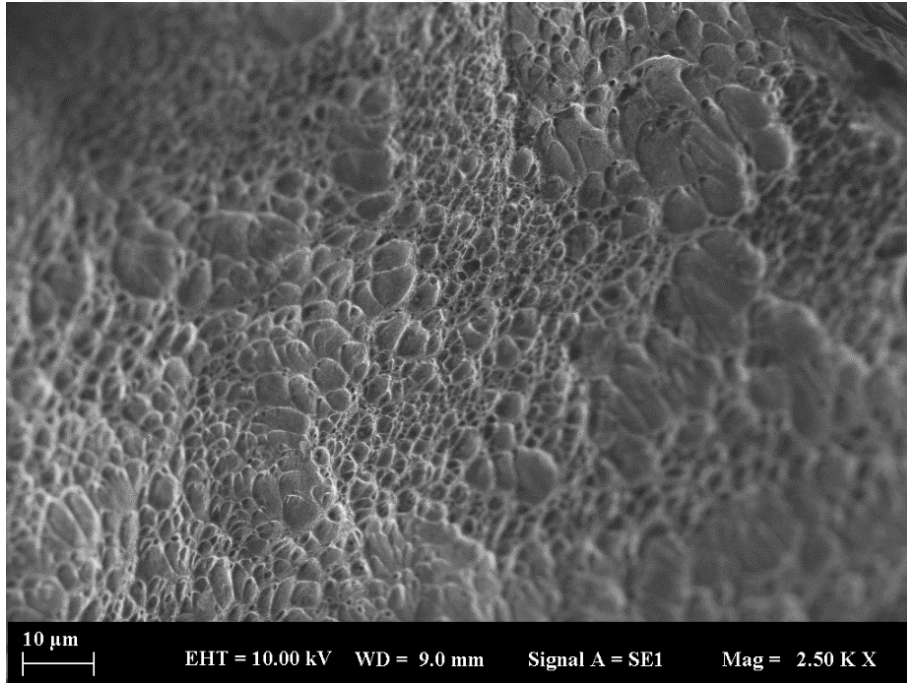




Şekil 3.14 -50 °C ortam şartları altında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, -50 °C sıcaklıkta eksenel çekme testi esnasında kopan X yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.14'te gösterilmiştir.

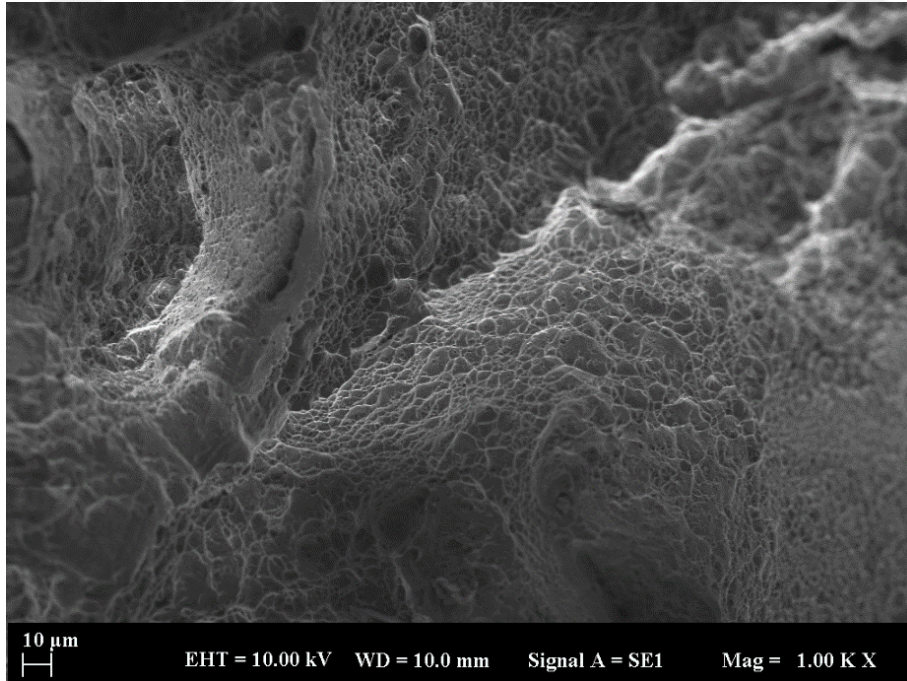
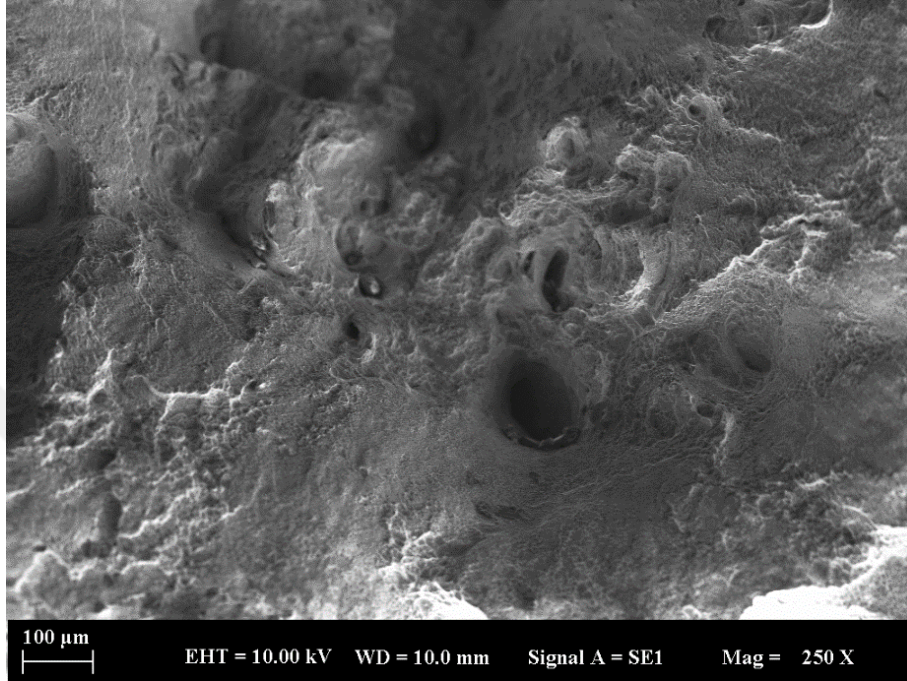


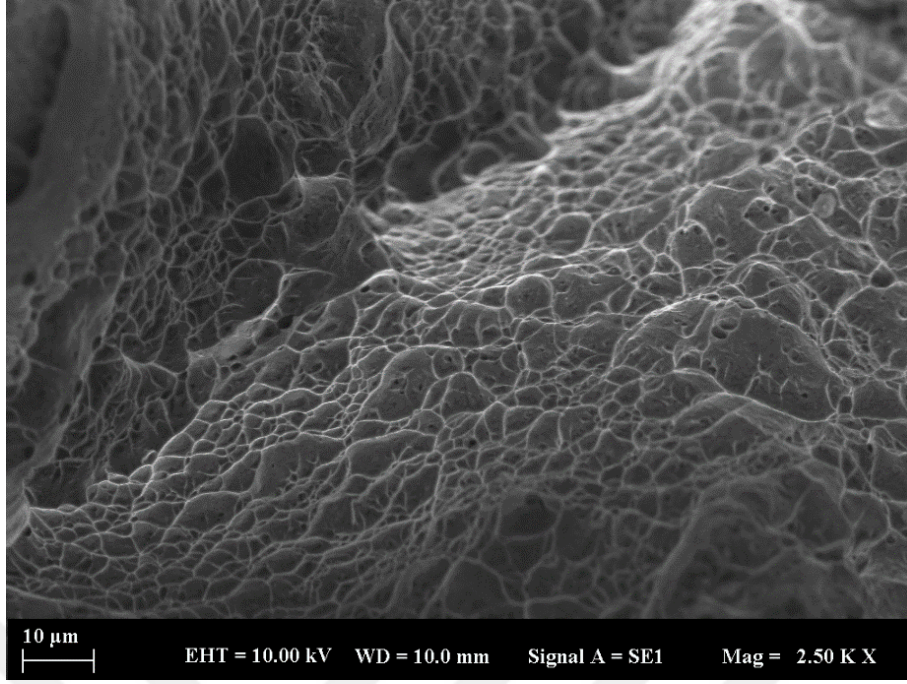


Şekil 3.15 22 °C ortam şartları altında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, 22 °C sıcaklıkta eksenel çekme testi esnasında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.15'te gösterilmiştir.

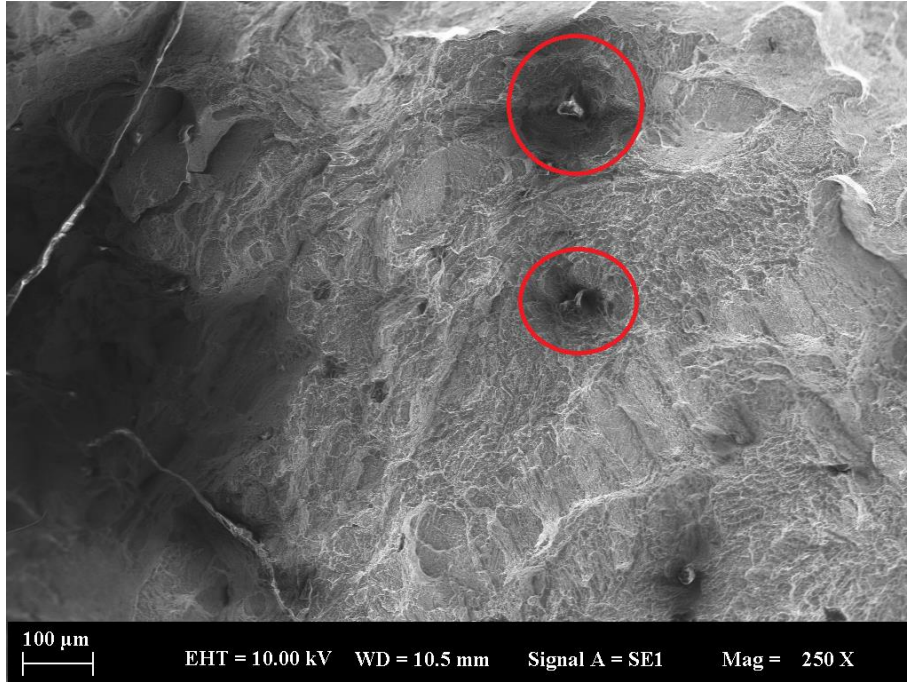
Şekil 3.15'te kırmızı daire içerisinde görülen sıçrayıklar imalatın şekil 2.4'teki yerleşim ile gerçekleşmesinden kaynaklanıyor olabilir. Argon gazı sıçrayıkları uzaklaştırırken X numunelerinin yanında konumlanan Y numunelerinde sıçrayıklara sebebiyet vermiş olabileceği düşünülebilir.

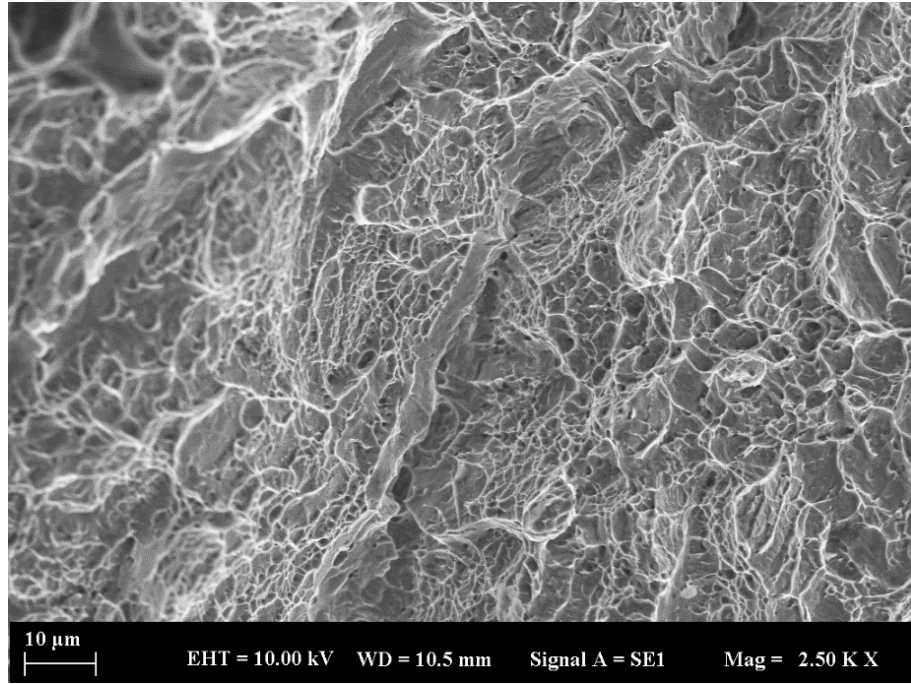
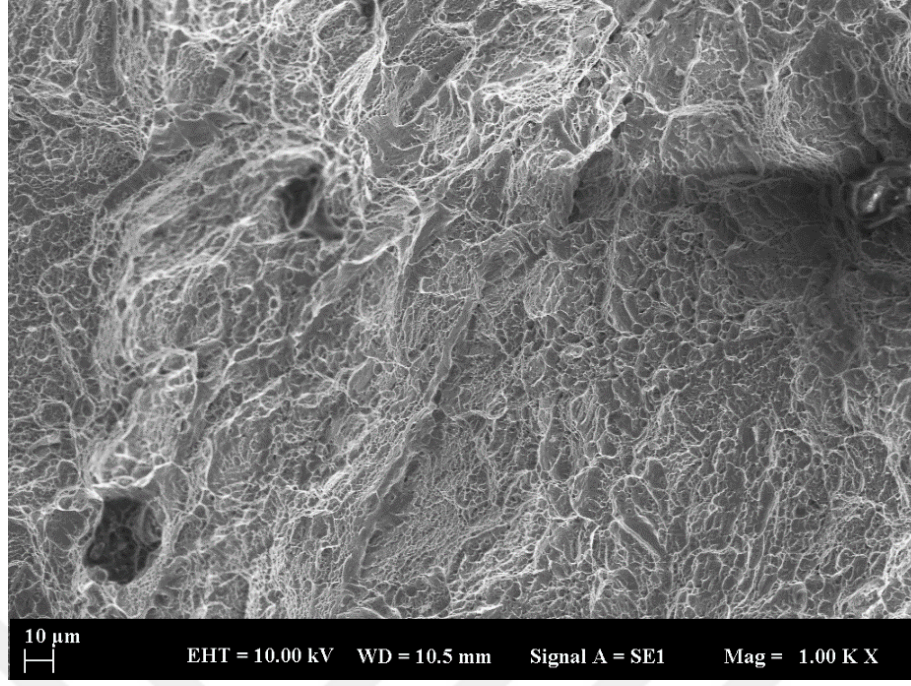




Şekil 3.16 200 °C ortam şartları altında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

200 °C sıcaklıkta eksenel çekme testi esnasında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.16’da gösterilmiştir.

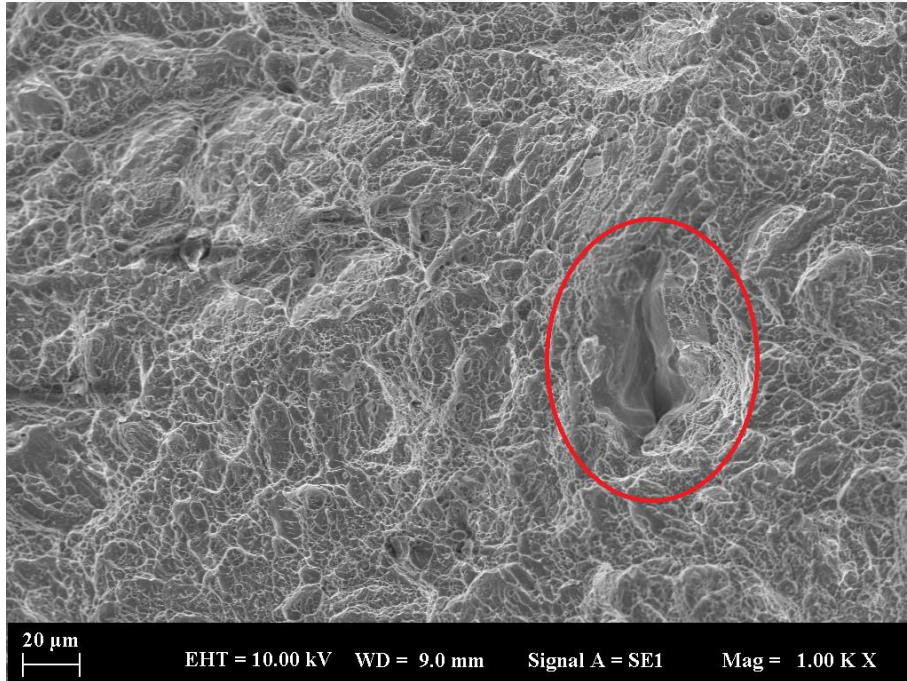
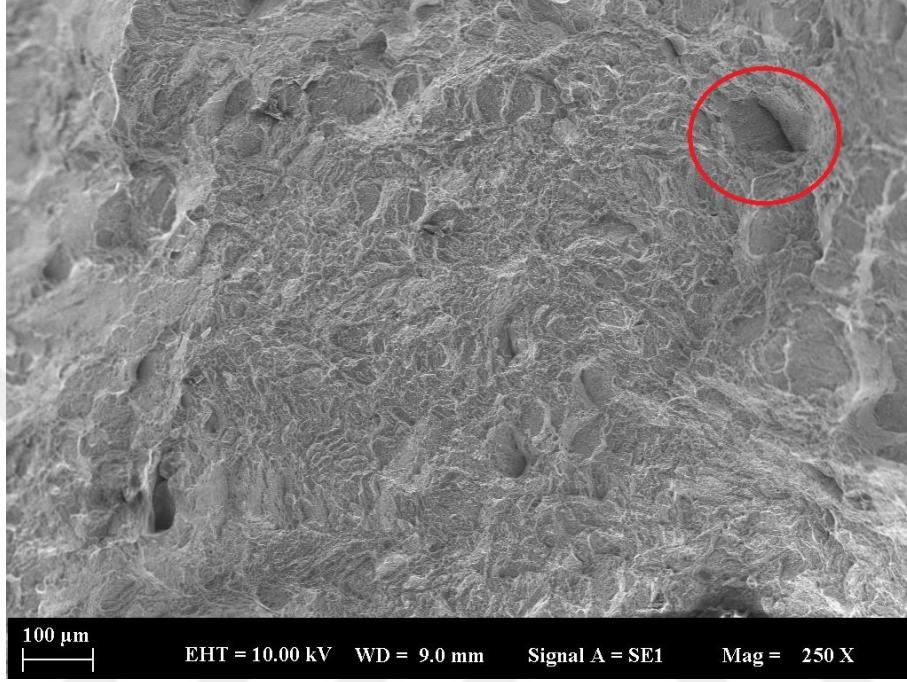


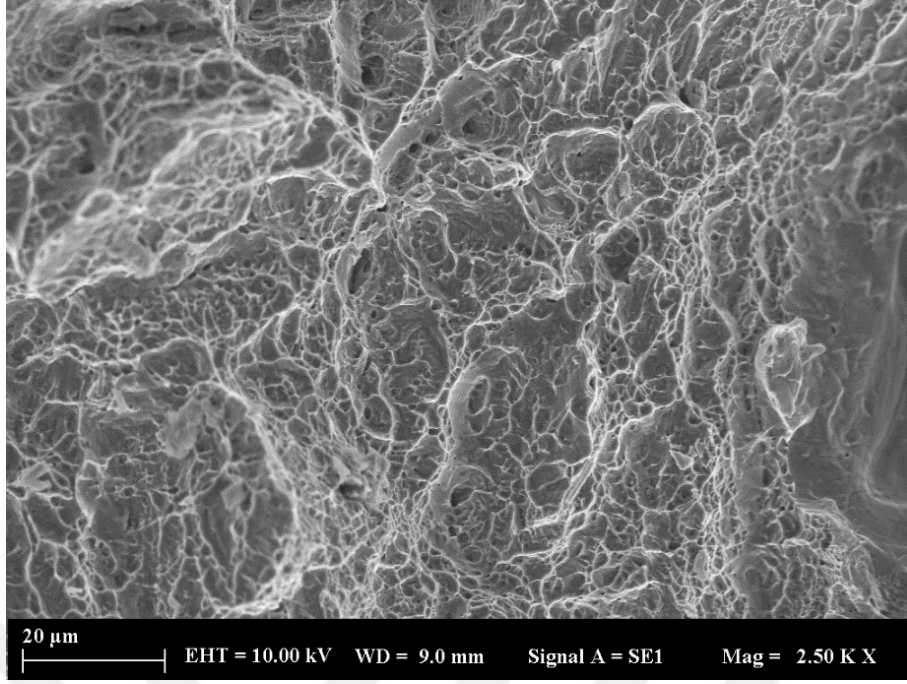


Şekil 3.17 -50 °C ortam şartları altında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, -50 °C sıcaklıkta aksenal çekme testi esnasında kopan Y yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.17’de gösterilmiştir.

Şekil 3.17’de kırmızı daire içerisinde görülen sıçrayıklar yine Y yönünde üretilmiş numunelerin imalat sırasında şekil 2.4’teki gibi yerleştirilmiş olmasından kaynaklanıyor olabilir.

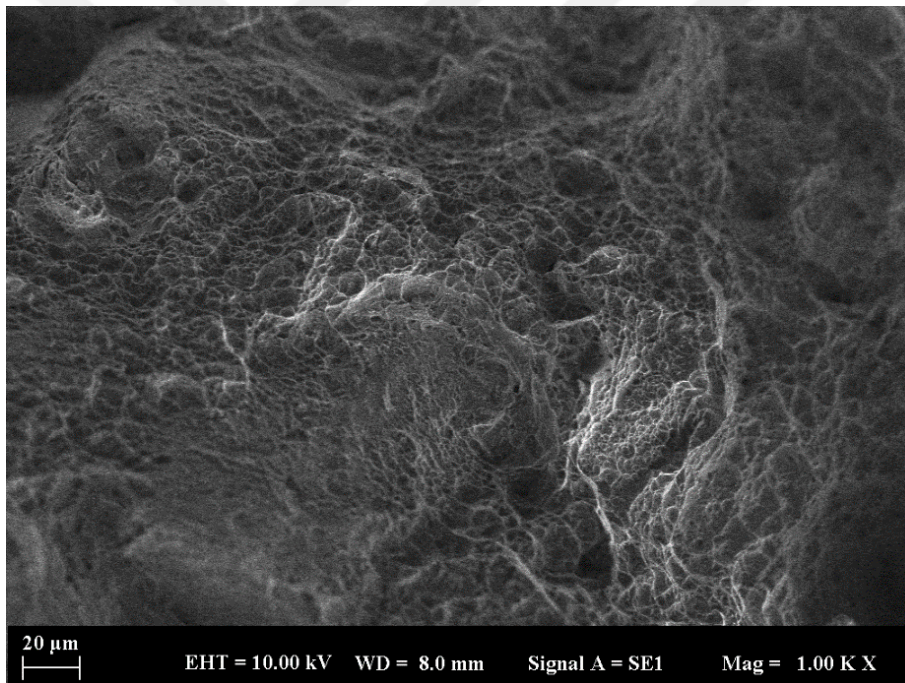
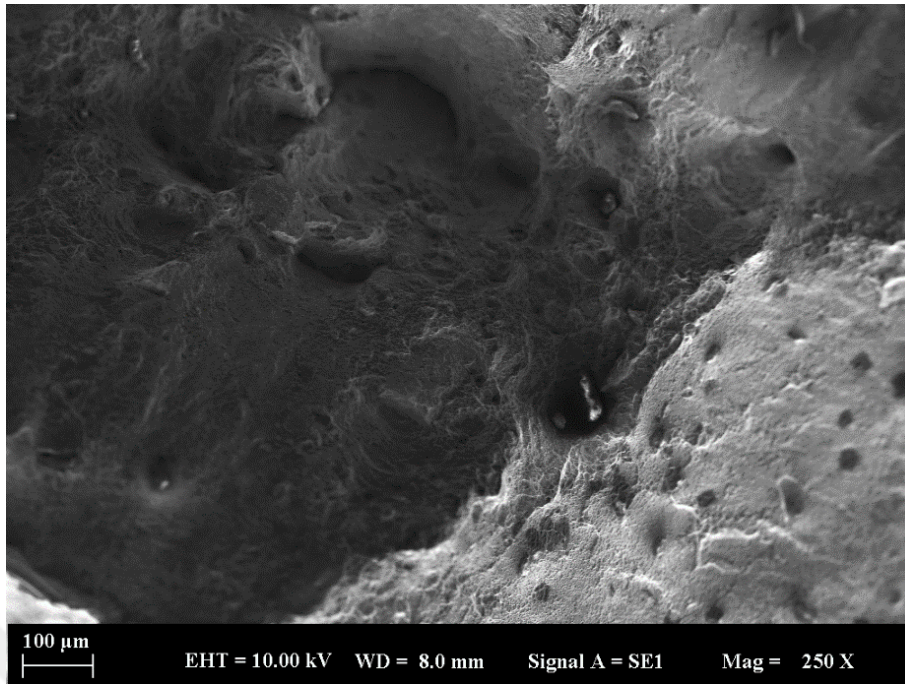


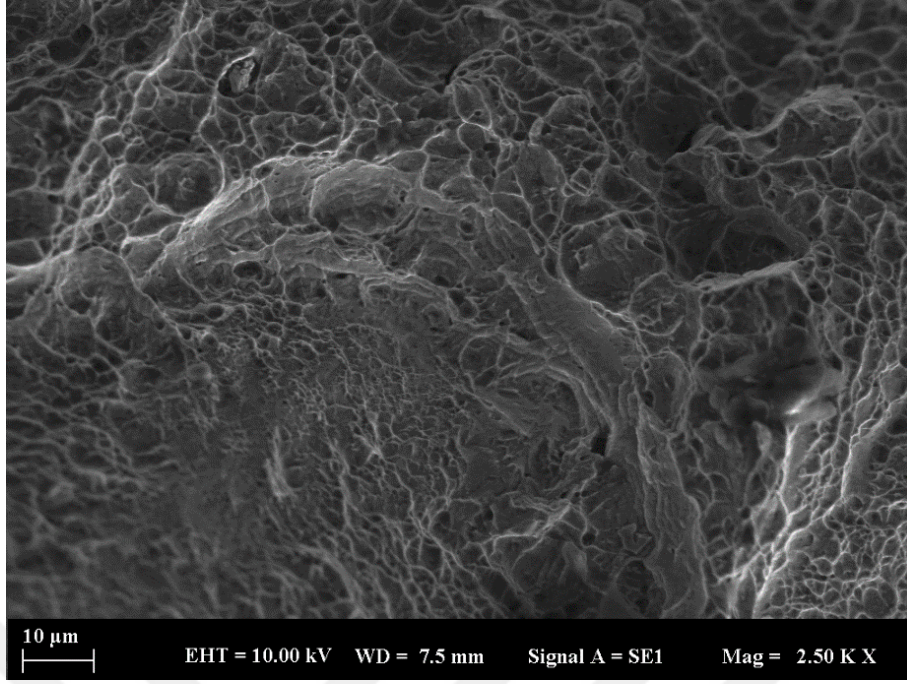


Şekil 3.18 22 °C ortam şartları altında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, 22 °C sıcaklıkta eksenel çekme testi esnasında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.17’de gösterilmiştir.

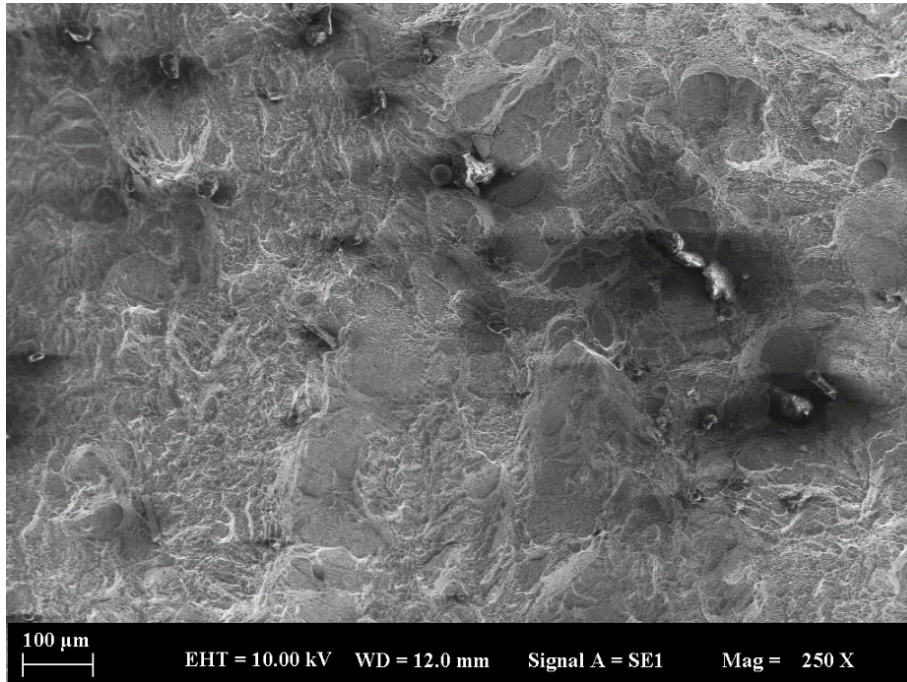
Ergiyik hazunun çökmesin sonucu oluşabilen anahtar tipi porozite şekil 3.18’de kırmızı daire içerisinde gözlemlenebilir.

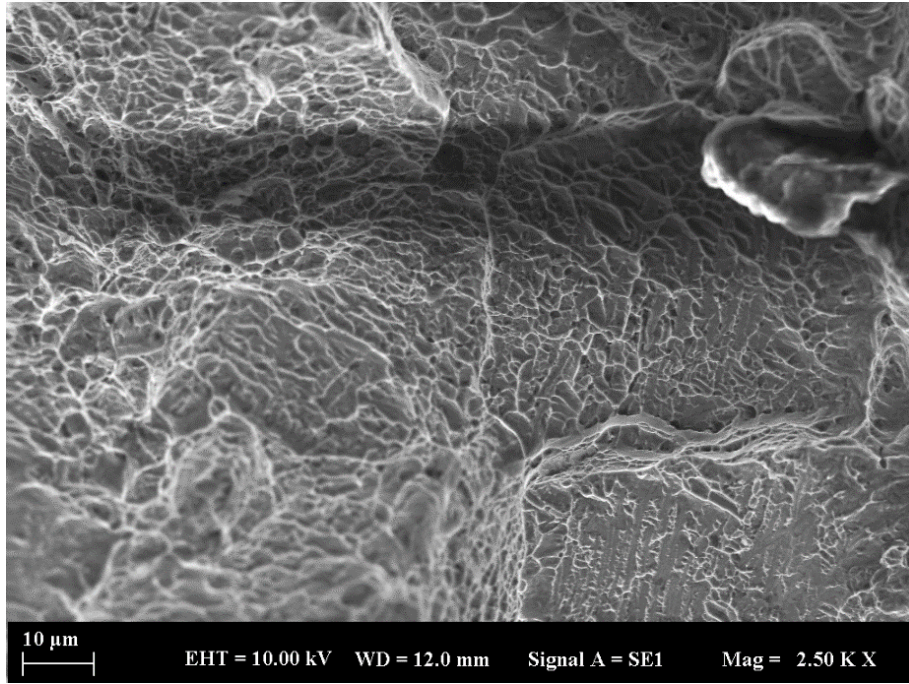
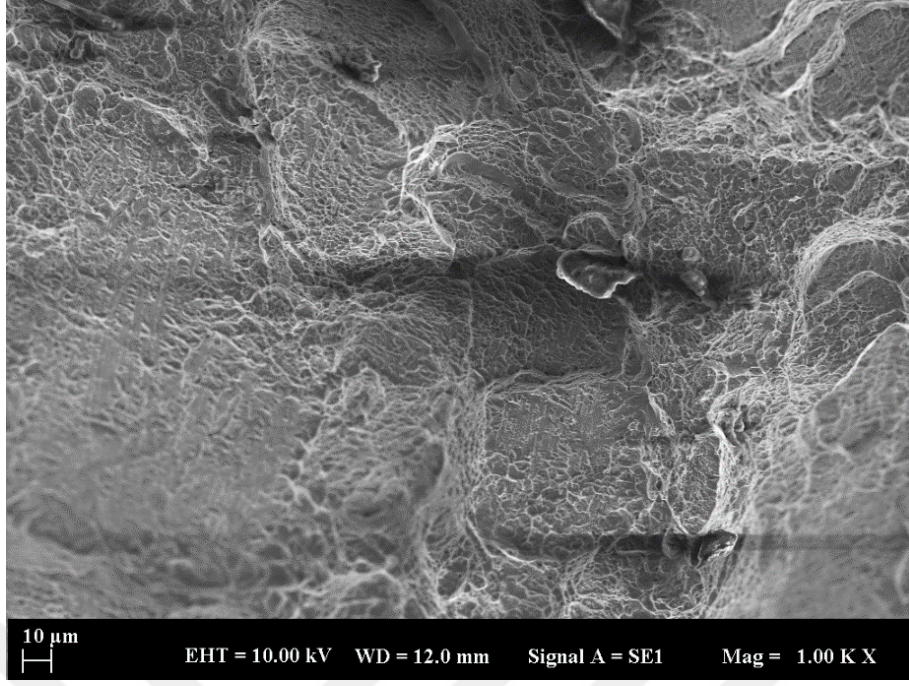




Şekil 3.19 200 °C ortam şartları altında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskopu yardımıyla, 200 °C sıcaklıkta aksel çekme testi esansında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskopu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.19’da gösterilmiştir.





Şekil 3.20 -50 °C ortam şartları altında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, -50 °C sıcaklıkta aksenal çekme testi esansında kopan Z yönünde inşa edilmiş numunenin görselleri taramalı elektron mikroskobu ile 250 kat 1000 kat ve 2500 kat yüzeye yaklaşılarak görüntüler alınmış ve yukarıda şekil 3.20’de gösterilmiştir.

Şekil 3.20’de eksik ergime sonucu ergimemiş bir toz partikül gözlemlenebilir.

Taramalı elektron mikroskopu ile çekme testi sonucunda kopan test numunelerinin kopma yüzeyleri incelenmiştir. Çekme testlerin numunelerin kopma yüzeylerine bakarak numunelerin sünek bir kırılma mı yoksa gevrek bir kırılmayı gerçekleştirdiği tespit edilebilir. Sünek olarak kopan parçaların kopma yüzeylerinde kopma öncesi gerçekleşen uzamanın etkisiyle plastik deformasyona uğramış kısımlar yer almaktadır. Gevrek olarak kopmuş olan malzemelerin kopma yüzeylerinde ise plastik deformasyon sünek kopmaya göre çok daha az gerçekleştiği için plastik deformasyon etkisi görülmez daha parlak bir kopma yüzeyi elde edilir. X Y ve Z yönünde inşa edilmiş bütün numunelerde 200 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen çekme testlerinde kopma yüzeylerinde plastik deformasyonun etkisi görülürken, -50 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen çekme testlerinde kopma yüzeylerinde plastik deformasyonun etkisi gözlemlenmeyip parlak bir kopma yüzeyi elde edilmiştir. Oryantasyonlara bağlı olarak kopma mekanizmasının değişmesi beklenmezken elde edilen taramalı elektron mikroskopu görüntüsü bu beklenti ile uyumlu şekilde gerçekleşmiştir.

4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada toz yatak eklemeli imalat yöntemiyle Ti6Al4V malzemeden farklı oryantasyonlarda üretilmiş standart çekme test numunelerinin Arşimet yöntemi ile yoğunlukları hesaplanmıştır. Bunun yanında farklı çevresel sıcaklık koşullarında çekme testine tabi tutulmuş olan numunelerinin kopma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiştir. Son olarak test numunelerinin mikroyapıları görüntülenmiştir.

Ti6Al4V malzemenin yoğunluğunun 4.41 g/cm^3 olduğu göz önüne alınırsa toz yatak eklemeli imalat ile elde edilmiş test numunelerinin yoğunluk değerlerinin daha düşük olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, yoğunluk ölçümü sonrası elde edilen değerlere göre inşa yönü yoğunluk üzerinde dikkate değer bir etki yaratmamıştır.

Çekme testlerinde elde edilen sonuçlarda yüksek ortam sıcaklığında numunelerin mukavemet değeri düşerken ortam sıcaklığı düşürüldüğünde numunelerin akma dayanımı ve maksimum eksenel dayanım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan testler neticesinde elde edilen sonuçlara göre dayanım değerlerinde sıcaklığa bağlı değişimler farklı oryantasyonlar için %3'ten fazla farklılık içermemektedir. Ayrıca 22°C ortam sıcaklığında yapılan testlere kıyasla, 200°C yüksek ortam sıcaklığında yapılan testlerde dayanımı en çok düşen numune oryantasyonunun X oryantasyonu olduğu gözlemlenmiştir ve bununla birlikte, -50°C sıcaklıkta yapılan testlerde dayanımı en çok artan numune oryantasyonunun Z oryantasyonu olduğu gözlemlenmektedir. MMPDS dokümanında yer alan grafikten yola çıkarak oda sıcaklığından 200°C yüksek ortam sıcaklığına çıkıldığında malzemenin akma dayanımının yaklaşık %28 düştüğü gözlemlenirken maksimum dayanımının yaklaşık olarak %21 azaldığı görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda ise dayanımın oryantasyona bağlı olarak değişmek ile birlikte %15,33- %17,18 aralığında düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı dokümandan yola çıkarak -50°C düşük ortam sıcaklığına inildiğinde malzemenin akma dayanımının ve maksimum dayanımının yaklaşık %14 arttığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada elde edilen

sonuçlarda ise dayanımın oryantasyona bağı olarak değışmek ile birlikte %10,19-%12,84 aralığında arttığı gözlemlenmiştir.

X Y ve Z yönünde inşa edilmiş bütün numunelerde alfa ve beta titanyum fazlarına rastlanırken Y ve Z oryantasyonlardaki numunelerde fazların yönlenmiş şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Her üç sıcaklıkta test edilmiş olan parçalar için elde edilen mikroyapı görüntülerinde Y ve Z yönünde üretilmiş olan test numunelerinin mikroyapılarında genellikle martenzittik yapıya daha çok rastlanmıştır.

Taramalı elektron mikroskopu ile çekme testi sonucunda kopan test numunelerinin kopma yüzeyleri incelenmiştir. Çekme test grafiklerinde de görüldüğü gibi sıcaklıklar arttıkça akma noktası sonrası uzamanın daha fazla olduğu yani plastik deformasyonun elastik deformasyona kıyas ile uzamanın daha büyük bir kısmını oluşturduğu görülmüştür. Buna uygun şekilde X Y ve Z yönünde inşa edilmiş bütün numunelerde 200 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen çekme testlerinde kopma yüzeylerinde plastik deformasyonun etkisi görülmektedir.

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak farklı oryantasyonlarda üretilen numunelerin farklı iç yapılara sahip olarak farklı dayanım değerleri gösterebileceği literatüre uygun şekilde ortaya konmuştur. Çekme testi sonuçlarında çevresel sıcaklığa bağı değişikliklerin üretim oryantasyonundan etkilendiği fakat bu etkinin yapı içerisindeki alfa beta fazlarını oranlarının benzer olmasından kaynaklı olarak önemli bir farka sebebiyet vermediği gözlemlenmiştir.

- [1] Ö. Z. E. R. Gökhan, “Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme,” *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 9, s. 606–621, 2020.
- [2] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, D. Rosen, B. Stucker ve M. Khorasani, *Additive manufacturing technologies*, cilt 17, Springer, 2021.
- [3] H. D. Nguyen, A. Pramanik, A. K. Basak, Y. Dong, C. Prakash, S. Debnath, S. Shankar, I. S. Jawahir, S. Dixit ve D. Buddhi, “A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties,” *Journal of Materials Research and Technology*, cilt 18, s. 4641–4661, 2022.
- [4] A. Agapovichev, A. Sotov, V. Kokareva ve V. Smelov, “Possibilities and limitations of titanium alloy additive manufacturing,” %1 içinde *MATEC Web of Conferences*, 2018.
- [5] S. Singh, H. Pungotra ve N. S. Kalsi, “On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications,” *Materials today: proceedings*, cilt 4, s. 8971–8982, 2017.
- [6] H. K. Sürmen, “EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, cilt 24, s. 373–392, 2019.
- [7] R. Leach ve S. Carmignato, *Precision metal additive manufacturing*, CRC Press, 2020.
- [8] B. Dutta ve F. S. Froes, “The additive manufacturing (AM) of titanium alloys,” *Metal powder report*, cilt 72, s. 96–106, 2017.
- [9] M. Leary, *Design for additive manufacturing*, Elsevier, 2019.

- [10] A. S. T. M. Standard ve others, “Standard terminology for additive manufacturing technologies,” *ASTM International F2792-12a*, s. 1–9, 2012.
- [11] W. S. W. Harun, N. S. Manam, M. S. I. N. Kamariah, S. Sharif, A. H. Zulkifly, I. Ahmad ve H. Miura, “A review of powdered additive manufacturing techniques for Ti-6Al-4V biomedical applications,” *Powder Technology*, cilt 331, s. 74–97, 2018.
- [12] S. Liu ve Y. C. Shin, “Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review,” *Materials & Design*, cilt 164, s. 107552, 2019.
- [13] F. R. Kaschel, M. Celikin ve D. S. Dowling, “Effects of laser power on geometry, microstructure and mechanical properties of printed Ti-6Al-4V parts,” *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 278, s. 116539, 2020.
- [14] A. H. Maamoun, Y. F. Xue, M. A. Elbestawi ve S. C. Veldhuis, “Effect of selective laser melting process parameters on the quality of Al alloy parts: Powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy,” *Materials*, cilt 11, s. 2343, 2018.
- [15] S. Das, K. Mhapsekar, S. Chowdhury, R. Samant ve S. Anand, “Selection of build orientation for optimal support structures and minimum part errors in additive manufacturing,” *Computer-Aided Design and Applications*, cilt 14, s. 1–13, 2017.
- [16] R. K. Shah ve S. S. Dey, “Process parameter optimization of DMLS process to produce AlSi10Mg components,” *%1 içinde Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
- [17] M. C. Kayacan, Y. E. DELİKANLI, B. Duman ve K. Özsoy, “Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak SLS ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 33, 2018.

- [18] S. Gorsse, C. Hutchinson, M. Gouné ve R. Banerjee, “Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys,” *Science and Technology of advanced MaTerialS*, cilt 18, s. 584–610, 2017.
- [19] D. Greitemeier, F. Palm, F. Syassen ve T. Melz, “Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting,” *International Journal of Fatigue*, cilt 94, s. 211–217, 2017.
- [20] G. Nicoletto, R. Konečná, M. Frkán ve E. Riva, “Surface roughness and directional fatigue behavior of as-built EBM and DMLS Ti6Al4V,” *International journal of fatigue*, cilt 116, s. 140–148, 2018.
- [21] Z. Jiao, R. Kang, Z. Dong ve J. Guo, “Microstructure characterization of W-Ni-Fe heavy alloys with optimized metallographic preparation method,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, cilt 80, s. 114–122, 2019.
- [22] J. C. Williams ve R. R. Boyer, “Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components,” *Metals*, cilt 10, s. 705, 2020.
- [23] T. H. Becker, C. Scheffer ve M. Beck, “Microstructure and mechanical properties of direct metal laser sintered Ti-6Al-4V d article,” *South African Journal of Industrial Engineering*, cilt 26, s. 1–10, 2015.
- [24] R. E. Śliwa, J. Bernaczek ve G. Budzik, “The application of direct metal laser sintering (DMLS) of titanium alloy powder in fabricating components of aircraft structures,” *Key Engineering Materials*, cilt 687, s. 199–205, 2016.
- [25] K. Karolewska, B. Ligaj, M. Wirwicki ve G. Szala, “Strength analysis of Ti6Al4V titanium alloy produced by the use of additive manufacturing method under static load conditions,” *Journal of Materials Research and Technology*, cilt 9, s. 1365–1379, 2020.

- [26] W. Sun, W. Huang, W. Zhang, X. Qian ve others, “Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy,” *International Journal of Fatigue*, cilt 130, s. 105260, 2020.
- [27] S. Ren, Y. Chen, T. Liu ve X. Qu, “Effect of build orientation on mechanical properties and microstructure of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, cilt 50, s. 4388–4409, 2019.
- [28] B. E. Carroll, T. A. Palmer ve A. M. Beese, “Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing,” *Acta Materialia*, cilt 87, s. 309–320, 2015.
- [29] Ż. A. Mierzejewska, “Effect of laser energy density, internal porosity and heat treatment on mechanical behavior of biomedical Ti6Al4V alloy obtained with DMLS technology,” *Materials*, cilt 12, s. 2331, 2019.
- [30] A. Azarniya, X. G. Colera, M. J. Mirzaali, S. Sovizi, F. Bartolomeu, W. W. Wits, C. Y. Yap, J. Ahn, G. Miranda, F. S. Silva ve others, “Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties,” *Journal of Alloys and Compounds*, cilt 804, s. 163–191, 2019.
- [31] A. M. Khorasani, I. Gibson, A. Ghasemi ve A. Ghaderi, “Modelling of laser powder bed fusion process and analysing the effective parameters on surface characteristics of Ti-6Al-4V,” *International journal of mechanical sciences*, cilt 168, s. 105299, 2020.
- [32] Z. Xie, Y. Dai, X. Ou, S. Ni ve M. Song, “Effects of selective laser melting build orientations on the microstructure and tensile performance of Ti-6Al-4V alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, cilt 776, s. 139001, 2020.
- [33] W. Zhao, W. Su, L. Li, D. Fang ve N. Chen, “Evolution of Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy in the Temperature Range of 20 to- 196° C,” *Metals and Materials International*, cilt 27, s. 3214–3224, 2021.

- [34] S. Kumar, Additive manufacturing processes, Springer, 2020.
- [35] Y. Zhang, W. Jarosinski, Y.-G. Jung ve J. Zhang, “Additive manufacturing processes and equipment,” %1 içinde *Additive manufacturing*, Elsevier, 2018, s. 39–51.
- [36] B. Song, S. Dong, B. Zhang, H. Liao ve C. Coddet, “Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V,” *Materials & Design*, cilt 35, s. 120–125, 2012.
- [37] B. Sagbas, “Post-processing effects on surface properties of direct metal laser sintered AlSi10Mg parts,” *Metals and Materials International*, cilt 26, s. 143–153, 2020.
- [38] B. Vrancken, L. Thijs, J.-S. Kruth ve J. Van Humbeeck, “Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties,” *Journal of Alloys and Compounds*, cilt 541, s. 177–185, 2012.
- [39] A. B. Spierings, M. u. Schneider ve R. J. R. S. J. Eggenberger, “Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts,” *Rapid Prototyping Journal*, cilt 17, s. 380–386, 2011.
- [40] S. Jamshidi, M. Aristizabal, W. Kong, V. Villapun, S. C. Cox, L. M. Grover ve M. M. Attallah, “Selective laser melting of Ti-6Al-4V: the impact of post-processing on the tensile, fatigue and biological properties for medical implant applications,” *Materials*, cilt 13, s. 2813, 2020.
- [41] S. Zhang, S. Rauniar, S. Shrestha, A. Ward ve K. Chou, “An experimental study of tensile property variability in selective laser melting,” *Journal of Manufacturing Processes*, cilt 43, s. 26–35, 2019.
- [42] Ž. A. Mierzejewska, R. Hudák ve J. Sidun, “Mechanical properties and microstructure of DMLS Ti6Al4V alloy dedicated to biomedical applications,” *Materials*, cilt 12, s. 176, 2019.

- [43] Z. Liu, S. Li, L. Xiong, T. Liu ve L. He, “High-temperature tensile deformation behavior and microstructure evolution of Ti55 titanium alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, cilt 680, s. 259–269, 2017.
- [44] T. Wang, H. Guo, Y. Wang, X. Peng, Y. Zhao ve Z. Yao, “The effect of microstructure on tensile properties, deformation mechanisms and fracture models of TG6 high temperature titanium alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, cilt 528, s. 2370–2379, 2011.
- [45] F. Martina, S. A. Colegrove, S. W. Williams ve J. Meyer, “Microstructure of interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, cilt 46, s. 6103–6118, 2015.
- [46] E. Sallica-Leva, A. L. Jardini ve J. B. Fogagnolo, “Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting,” *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, cilt 26, s. 98–108, 2013.
- [47] H. K. Rafi, N. V. Karthik, H. Gong, T. L. Starr ve B. E. Stucker, “Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting,” *Journal of materials engineering and performance*, cilt 22, s. 3872–3883, 2013.
- [48] C. Qiu, N. J. E. Adkins ve M. M. Attallah, “Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V,” *Materials Science and Engineering: A*, cilt 578, s. 230–239, 2013.
- [49] S. Ivanov, M. Gushchina, A. Artinov, M. Khomutov ve E. Zemlyakov, “Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited Ti-6Al-4V,” *Materials*, cilt 14, s. 6432, 2021.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Taylan O., Sağbaş B., (2023). “Determining Mechanical Properties Of Ti6Al4V Additive Manufactured Parts At Different Test Conditions”, The 7th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2023, Abstract Proceedings, s. 60, İstanbul

