



**METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Tİ-6AL-4V
HUMERUS PLAĞININ EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Kamuran Kamil YEŞİLKAYA

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

ETİK BEYAN

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

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

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

Kamuran Kamil YEŞİLKAYA

13/12/2021

**METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Tİ-6AL-4V HUMERUS
PLAĞININ EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**
(Doktora Tezi)

Kamuran Kamil YEŞİLKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2021

ÖZET

Bu çalışmada metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş mekanik parçaların eğilmeye karşı dayanıklı olacak şekilde daha düşük maliyetle üretilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Ti-6Al-4V malzemeden imal edilen test numunelerinin ve bunun yanı sıra bir de humerus kemik plağının, eklemeli imalat değişkenlerinden olan lazer gücü ve tarama aralığının farklı değerleri için eğilmeye karşı olan davranışları incelenmiştir. Eklemeli imalat sonrasında parçalara iki farklı ısıtma işlemi uygulanarak eğilme dayanımına etkileri araştırılmıştır. Isıtma işlemi farklılığı sebebiyle oluşan eğilme dayanımı farkı, standart imalat değişkenleri temel alınarak üretilen numunelerin mikro yapı incelemeleriyle açıklanmıştır. Malzeme karakterizasyonu, pürüzlülük ve yoğunluk ölçümleriyle eklemeli imalatların karşılaştırması yapılmıştır. Yapısal eniyileme çalışması yapılarak eklemeli imalatla üretilen humerus kemik plağının daha yüksek eğilme dayanımını sağlayan ve daha düşük maliyetli bir muadili elde edilmiştir. Sonuç olarak, eklemeli imalat tezgâhının standart değişkenleri yerine daha kısa imalat süresi sonunda aynı seviyede eğilme dayanımı elde edilebilen değişken takımları bulunmuştur. Farklı ısıtma süreçlerinin sonuçlarına göre daha düşük maliyetli olan ısıtma işlemi de belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla test gereksinimleri azaltılarak benzetim ortamında doğrulama ve geçirme çalışmaları mümkün kılınmıştır. Humerus kemik plağı için gerçekleştirilen eniyileme çalışması sonucunda referans alınan kemik plağına nazaran daha hafif ve eğilmeye karşı daha dayanıklı bir kemik plağı tasarım, eklemeli üretim, analiz ve test çalışmalarıyla ortaya konulmuştur. Başarım testleri, kurulan sonlu elemanlar modelinin yeni tasarım ve üretim şeklinin daha iyi sonuçlar verdiğini doğrulamış ve ağırlıkça %21,6 azalma, dayanım olarak da %23,3'e varan artışların olduğunu göstermiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, Eğilme dayanımı, Üç nokta eğme testi, Isıtma işlemi, Mikro yapı incelemesi, Sonlu elemanlar analizi, Yapısal eniyileme
Sayfa Adedi : 117
Danışman : Prof. Dr. Yusuf USTA
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih AYCAN

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BENDING
BEHAVIOR OF TI-6AL-4V HUMERUS PLATES PRODUCED BY METAL
ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(Ph. D. Thesis)

Kamuran Kamil YEŞİLKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

In this study a lower cost manufacturing of bending resistant mechanical parts produced by metal additive method was aimed. Accordingly, bending strength characteristics of Ti-6Al-4V test specimens and also a humerus bone plate were investigated for different values of laser power and hatch spacing which are among the additive manufacturing parameters. The effect of two different heat treatment types on bending strength was also researched. The difference in bending strength resulting from the different heat treatment processes was explained by microstructural examinations of the specimens produced based on a standard manufacturing parameters set. The comparison of additive manufactures was made by the material characterization, roughness and density measurements. A lower cost equivalent of the humerus bone plate which would provide higher bending strength was obtained through a structural optimization study. As a result, instead of the standard parameters of the additive machine, parameter sets which can achieve the same level of bending strength at the end of a shorter manufacturing period were found. The lower cost heat treatment method was determined according to the results of different heat treatment procedures. With the help of the finite element method, testing requirements were reduced and verification and validation studies in the simulation environment were made possible. As a conclusion of the optimization study carried out for the humerus plate, a lighter and more bending resistant plate compared to the reference plate has been demonstrated by design, additive manufacturing, analysis and testing studies. Performance tests verified new design and manufacturing type of the finite element model with better results and showed 21,6% reduction in weight and 23,3% increase in strength.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, Bending strength, Three point bending, Heat treatment, Microstructural examination, Finite element analysis, Structural optimization

Page Number : 117

Supervisor : Prof. Dr. Yusuf USTA

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Mehmet Fatih AYCAN

TEŞEKKÜR

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından 06 / 2018 - 19 nolu proje olarak desteklenmiştir.

Tez çalışması sürecinde beni yönlendiren, bilgi ve tecrübeleriyle karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımcı olan kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. Yusuf USTA ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih AYCAN 'a şükranlarımı sunarım.

Değerli görüş ve tavsiyeleriyle tez çalışmamın kalitesinin artırılmasında çok önemli katkıları bulunan tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Rahmi ÜNAL ve Prof. Dr. Teyfik DEMİR 'e saygılarımı sunarım.

Doktora çalışmam boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ailemin bütün fertlerine, özellikle, varlıklarıyla göz aydınlığım olan sevgili eşim ve kızıma, gösterdikleri fedakârlık ve sabır sebebiyle müteşekkirim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında sağladıkları destek ve önemli katkılarından dolayı TÜBİTAK SAGE yönetimi ve çalışanlarına teşekkür ediyorum. Çalışma kapsamında üretim ve testlerin gerçekleştirildiği G.Ö.R. GRUP MEDİKAL, FSMVÜ ALUTEAM, TOBB ETÜ Biyomekanik Laboratuvarı ve Gazi Üniversitesi EKTAM'ın değerli yönetici ve ekiplerine şükranlarımı iletiyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Eklemeli İmalat İşlem Değişkenleri.....	6
2.2. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme Eklemeli İmalat Yöntemi	9
2.3. Seçici Lazer Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemi	12
2.4. Eklemeli İmalat Sonrası İkincil İşlemler.....	14
2.5. Eklemeli İmalatta Sayısal Modelleme	16
2.6. Eklemeli İmalatın Biyomedikal Uygulamaları	18
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1. Toz Özellikleri	23
3.2. Eklemeli İmalat Değişkenleri.....	23
3.3. Isıl İşlem Yöntemi.....	25
3.4. Test ve Ölçüm Yöntemleri	27
3.4.1. Üç nokta eğme testleri.....	27
3.4.2. Malzeme karakterizasyonu.....	28

	Sayfa
3.4.3. Yoğunluk ölçümleri	28
3.4.4. Pürüzlülük ölçümleri.....	29
3.4.5. Mikro yapı incelemeleri	29
3.4.6. Sertlik ölçümleri.....	30
3.4.7. Çekme testleri.....	30
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	33
4.1. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	33
4.1.1. Malzeme karakterizasyonu sonuçları.....	36
4.1.2. Yoğunluk ölçümlerinin sonuçları.....	36
4.1.3. Pürüzlülük ölçümlerinin sonuçları	40
4.2. Mikro Yapı İncelemesinin Sonuçları	41
4.3. Sertlik Ölçümü Sonuçları	48
4.4. Çekme Testleri Sonuçları.....	48
5. EĞME TESTİ NUMUNELERİ İÇİN SEA MODELİNİN TASARIMI	51
5.1. Test Numunelerinin Sonlu Elemanlar Modeli	51
5.2. Test Numunelerinin Analiz Sonuçları.....	57
6. KEMİK PLAĞI İÇİN SEA VE ENİYİLEME ÇALIŞMALARI	61
6.1. Kemik Plağı Üretimleri	61
6.2. Kemik Plağı Eğme Testleri	62
6.3. Kemik Plağı Sonlu Elemanlar Modeli	63
6.4. Kemik Plaklarının Analiz Sonuçları	72
6.5. Kemik Plağının Eniyileme Çalışması	73
6.6. Eniyilenen Kemik Plağının Sonlu Elemanlar Analizi.....	79
6.7. Eniyilenen Plakların Üretimleri ve Testleri	83

	Sayfa
6.8. Kemik Plaklarının Mikro Yapı İncelemeleri.....	93
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	105
EKLER.....	111
EK-1 İki fazlı titanyum alaşımı için kalıcı şekil değişiminin derecesine bağlı olarak $\alpha + \beta \rightarrow \alpha$ faz dönüşümünün gösterimi	112
EK-2 Farklı kemik plağı çeşitleri.....	113
EK-3 Metalik kemik plaklarının tek çevrim eğilme testi için test düzeneği.....	114
EK-4 150T180 için çekme testi gerilme-gerinim grafikleri	115
ÖZGEÇMİŞ	116

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Eklemeli imalat değişkenleri	24
Çizelge 3.2. Isıl işlem değişkenleri	26
Çizelge 3.3. Numune kodlama sistemi	27
Çizelge 3.4. Eğme testi numunelerinin değişkenleri	28
Çizelge 4.1. Eğme numunelerinin element yüzdeleri	36
Çizelge 4.2. Eğme numunelerinin pürüzlülük değerleri	40
Çizelge 4.3. Sertlik ölçümlerinin sonuçları.....	48
Çizelge 5.1. Eğme testi sonuçları sonlu elemanlar analiziyle kıyaslanan numunelerin değişkenleri ve numunelerin kodları	56
Çizelge 5.2. Analizler ve testlerden elde edilen eğilme dayanımı değerleri.....	59
Çizelge 6.1. Kemik plağı eklemeli imalat değişkenleri	61
Çizelge 6.2. Kemik plakları eğme testi sonuçları	62
Çizelge 6.3. Analiz ve testin eğilme dayanımı karşılaştırması	72
Çizelge 6.4. Kemik plakları için SEA eğilme dayanımı sonuçları	81
Çizelge 6.5. Eniyilenen plak için eklemeli imalat ve ısıtıl işlem değişkenleri	84
Çizelge 6.6. Kemik plaklarının ortalama ağırlık ve dayanım karşılaştırması.....	88
Çizelge 6.7. Eniyilenen plaknın tekrarlanan üretimleri için eklemeli imalat ve tavlama ısıtıl işlemi değişkenleri	88
Çizelge 6.8. Kemik plaklarının ortalama ağırlık ve dayanım karşılaştırması.....	92
Çizelge 6.9. Eklemeli imalat kemik plaklarının ağırlık ve dayanım karşılaştırması	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Tavlamaalı numunelerin eğilme gerilmesi değeri.....	33
Şekil 4.2. Yeniden kristalizasyon tavlamaalı numunelerin eğilme gerilmesi değeri ...	34
Şekil 4.3. Tavlamaalı ve yeniden kristalizasyon tavlamaalı numunelerin ortalama eğilme gerilmesi değeri.....	35
Şekil 4.4. Tavlamaalı numunelerin bağıl yoğunluk değeri.....	37
Şekil 4.5. Yeniden kristalizasyon tavlamaalı numunelerin bağıl yoğunluk değeri	37
Şekil 4.6. Tavlamaalı numunelerin enerji yoğunluğuna bağıl olarak bağıl yoğunluk ve eğilme gerilmesi değeri.....	38
Şekil 4.7. Yeniden kristalizasyon tavlamaalı numunelerin enerji yoğunluğuna bağıl olarak bağıl yoğunluk ve eğilme gerilmesi değeri.....	39
Şekil 4.8. Enerji yoğunluğuna göre ortalama çekme ve akma gerilmesinin değeri. (a) 150T numuneleri, (b) 360YKT numuneleri	50
Şekil 5.1. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan gerçek gerilme-gerinim eğrii	57
Şekil 6.1. Kemik plaklarının çekme testleri sonucundaki gerilme-plastik gerinim eğrii.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Eklemeli imalat tablasındaki eğme testi numuneleri	25
Resim 3.2. Eğme testi deney düzeneği (test öncesi)	27
Resim 3.3. Mikro yapı değerlendirmesinde kullanılan numune kesiti yönleri ve parça konumlandırması [58]	30
Resim 3.4. Çekme testi numuneleri (test öncesi)	31
Resim 4.1. Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin üretim yönüne dik kesitleri için mikro yapı görüntüleri ve faz oranları (□ α -fazı, ■ β -fazı)	41
Resim 4.2. Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin üretim yönündeki kesitleri için mikro yapı görüntüleri ve faz oranları (□ α -fazı, ■ β -fazı)	42
Resim 4.3. Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin üretim yönüne dik kesitleri için makro yapı görüntüleri: (a) tavlama (100X), (b) yeniden kristalizasyon tavlama (50X)	44
Resim 4.4. Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin üretim yönündeki kesitleri için makro yapı görüntüleri: (a) tavlama (100X), (b) yeniden kristalizasyon tavlama (50X)	45
Resim 4.5. Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin birim alandaki ortalama tane sayıları	47
Resim 4.6. Çekme testi numuneleri (test sonrası)	49
Resim 5.1. Test numunesinin çeyrek sonlu elemanlar modeli	51
Resim 5.2. Test numunesi SEA modelinin sınır şartları	52
Resim 5.3. SEA malzeme modeli için program girdileri. (a) esneklik modülü ve poisson oranı, (b) plastik özelliğin tanımlanması, (c) gerilme-gerinim eğrisinin tabloyla tanımlanması, (d) gerilme-gerinim eğrisinin grafiği	53
Resim 5.4. Malzeme modelinin hasar kıstası ve değişkenleri	54
Resim 5.5. SEA modelinde tanımlanan temas özellikleri. (a) temastaki bileşenler, (b) bileşenlerin temas gövde tipleri, (c) temas sürtünme katsayısı	55
Resim 5.6. 360YKT180 için en yüksek asal gerilme. (a) kırılmadan önce, (b) kırılma anı	58

Resim	Sayfa
Resim 5.7. 360YKT180 için z yönündeki yer değiştirme. (a) analiz sonucu, (b) test sonucu.....	58
Resim 6.1. Kemik plağı dört nokta eğme testi (test öncesi)	62
Resim 6.2. Kemik plağı dört nokta eğme testi (test sonrası)	62
Resim 6.3. Kemik plağının üç boyutlu olarak taranması.....	63
Resim 6.4. Kemik plağının katı modeli	64
Resim 6.5. Kemik plağının çeyrek sonlu elemanlar modeli	65
Resim 6.6. Kemik plağı analiz modelinin sınır koşulları.....	66
Resim 6.7. Kemik plağı SEA modelinde tanımlanan temas özellikleri. (a) temastaki bileşenler, (b) bileşenlerin temas gövde tipleri, (c) temas sürtünme katsayısı, (d) kalıcı yapışmanın tanımlanması.....	67
Resim 6.8. Kemik plaklarının çekme testi numuneleri. (a) eklemeli imalat sonrası, (b) çekme testi öncesi, (c) çekme testi sonrası	69
Resim 6.9. Başlangıç kemik plağı SEA malzeme modeli için program girdileri. (a) esneklik modülü ve poisson oranı, (b) plastik özelliğin tanımlanması, (c) gerilme-gerinim eğrisinin tabloyla tanımlanması, (d) gerilme-gerinim eğrisinin grafiği	71
Resim 6.10. Malzeme modelinin hasar kıstası ve değişkenleri	72
Resim 6.11. Test parçasının ve analiz modelinin yer değiştirmesi.....	73
Resim 6.12. Dört nokta eğme analizleri ve testinin yer değiştirme sonuçları. (a) MSC Nastran sonucu (mm), (b) MSC Marc sonucu (mm), (c) test sonucu.....	75
Resim 6.13. Eniyilemede kullanılan msc patran modeli.....	76
Resim 6.14. Sabitleme ve yer değiştirme sınır koşulu.....	77
Resim 6.15. Eniyileme sonrasında elde edilen geometri	77
Resim 6.16. Eniyileme sonrasında elde edilen stl geometrisi.....	78
Resim 6.17. Yüzey modelleme programında kullanılan stl geometrisi	78
Resim 6.18. Yüzey modellemesi gerçekleştirilen çeyrek model	79
Resim 6.19. Eniyilenen plağın çeyrek sonlu elemanlar modeli genel görünümü.....	80

Resim	Sayfa
Resim 6.20. Eniyilenen plağın MSC Marc'ta elde edilen yer değiştirme (mm).....	81
Resim 6.21. Yüzey modellemesi gerçekleştirilen eniyilenen plağın bütün modeli.....	82
Resim 6.22. Başlangıç ve eniyilenen kemik plaklarının izometrik görünüşleri	82
Resim 6.23. Başlangıç ve eniyilenen kemik plaklarının düzlemsel görünüşleri. (a) x-y düzlemindeki görünüşleri-1, (b) x-y düzlemindeki görünüşleri-2, (c) x-z düzlemindeki kesit görünüşleri	83
Resim 6.24. Eniyilenen kemik plağının destek yapıları oluşturulmuş imalat modeli	84
Resim 6.25. Eniyilenen kemik plaklarının üretim tablasındaki görünüşleri (eklemeli imalat sonrası)	85
Resim 6.26. Eniyilenen kemik plaklarının müstakil görünüşleri (eklemeli imalat sonrası)	85
Resim 6.27. Eniyilenen kemik plağının dört nokta eğme testleri	86
Resim 6.28. Dört nokta eğme testi sonrasında kırılan eniyilenen kemik plakları	87
Resim 6.29. Eniyilenen kemik plaklarının kırılma yüzeyleri	87
Resim 6.30. Eniyilenen kemik plaklarının üretim tablasındaki görünüşleri (eklemeli imalat sonrası)	89
Resim 6.31. Eniyilenen tavlmalı kemik plaklarının müstakil görünüşleri (eklemeli imalat sonrası)	90
Resim 6.32. Eniyilenen tavlmalı kemik plaklarının dört nokta eğme testleri.....	91
Resim 6.33. Dört nokta eğme testi sonrasında kırılan eniyilenen tavlmalı kemik plakları.....	91
Resim 6.34. Eniyilenen tavlmalı kemik plaklarının kırılma yüzeyleri	92
Resim 6.35. Mikro yapı incelemesi öncesinde bakalit içerisindeki numuneler.....	94
Resim 6.36. Mikro yapı incelemesi yapılan numuneler	94
Resim 6.37. Kemik plaklarının 50X büyütme makro yapıları. (a) başlangıç plağı, üretim yönünde, (b) başlangıç plağı, üretim yönüne dik, (c) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönünde, (d) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönüne dik, (e) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönünde, (f) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönüne dik	96

Resim**Sayfa**

- Resim 6.38. Kemik plaklarının 100X büyütmeli makro yapıları. (a) başlangıç plağı, üretim yönünde, (b) başlangıç plağı, üretim yönüne dik, (c) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönünde, (d) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönüne dik, (e) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönünde, (f) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönüne dik 97
- Resim 6.39. Kemik plaklarının 1000X büyütmeli mikro yapıları. (a) başlangıç plağı, üretim yönünde, (b) başlangıç plağı, üretim yönüne dik, (c) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönünde, (d) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönüne dik, (e) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönünde, (f) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönüne dik 99



KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	American Society for Testing and Materials
CL	Concept Laser
CNC	Computerized numerical control
DMLS	Direct metal laser sintering
EKTAM	Eklemeli İmalat Teknolojileri Uyg. ve Arş. Merkezi
ELI	Extra low interstitial
EOS	Electro Optical Systems
HIP	Hot isostatic pressing
SLM	Selective laser melting
SS	Standart sapma
stl	Standard tessellation language

1. GİRİŞ

ASTM (ing. American Society for Testing and Materials) F2792-12a [1] uluslararası standardına göre eklemeli imalat (ing. additive manufacturing), üç boyutlu veriden katmanlar halinde birleştirme işlemi gerçekleştirerek parçalar oluşturmaktır. İleri üretim teknolojileri arasında sayılan eklemeli imalat, geometrinin kişiye özel tasarlanıp üretiminin yapılabilmesi, sarf kısmın azaltılarak malzemenin etkin kullanılabilmesi ve yeni bir kurulum gerektirmeden farklı üretimlere olanak sağlayan üretim esnekliğine sahip olması gibi başlıca üstünlükleri sayesinde son yıllarda tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Diğer taraftan, eklemeli ürünlerin boşluk, çatlak gibi üretim kusurları içermesi, üretim sonrası artık gerilmeler (ing. residual stresses) oluşturmaları, ısıtma işlemi, yüzey işlemi ve HIP (ing. Hot Isostatic Pressing) gibi ikincil işlemlere (ing. post processes) ihtiyaç duyması, yatırım ve kullanım maliyetinin yüksek olması ve ürün boyutlarının sınırlı olması dezavantajları olarak belirtilebilmektedir.

Plastik esaslı malzemelerle yapılan ilk çalışmalar zaman içinde metal esaslı malzemelerin üretimine de olanak verecek şekilde geliştirilmiştir. Metal tozlarının lazer veya elektron ışını gibi bir enerji kaynağı kullanılarak ergitilmesi, metalik malzemelerin eklemeli olarak imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. “EOS (Electro Optical Systems) GmbH” firmasının tescilli markası olan DMLS (ing. Direct Metal Laser Sintering) yöntemi metal esaslı lazerli sinterleme sistemlerinin bir çeşididir [1] ve ASTM F42 komitesine göre toz yataklı ergitme kategorisinde yer almaktadır. Bu yöntemde metal tozları ergitme sıcaklığının altında ve argon veya azot koruyucu gaz ortamında birbirine bağlanmaktadır. DMLS yöntemine benzer başka bir yöntem ise Seçici Lazer Ergitme (ing. Selective Laser Melting, SLM) yöntemidir ve SLM Solutions GmbH firmasının tescilli markasıdır. Her iki yöntemde de, bir kalıp ve sıcaklık ve/veya basınç kullanılan geleneksel toz metal sinterleme yönteminin aksine, tam veya kısmi ergitme söz konusudur [1].

Metal tozu kullanarak gerçekleştirilen eklemeli imalat uygulamalarında birçok işlem değişkeninin (ing. process parameters) bulunması ve bu işlem değişkenlerinin parçanın dayanım özelliklerine etkisinin tam olarak bilinmemesi bu yöntemin yaygın kullanımını sınırlayan bir husustur. Bu çalışmada, metal eklemeli imalat yöntemi kullanılarak oluşturulacak parçaların eğilme dayanımları (ing. bending strengths) arttırılmaya

çalışılmıştır. Bu yöntemle imal edilmiş test numunelerinin eğilme dayanımı değerleri, farklı üretim değişkenleri ve üretim işlemi sonrası ısıtılma işlem süreçleri için eğme testleriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için uygun üretim işlemi değişkenlerinin belirlenmesi ve üretim işlemi sonrası ısıtılma işlem süreci tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen eğme testleri sonlu elemanlar analizi yöntemiyle doğrulanarak eklemeli imalatla üretilecek farklı parçalar için test gereksinimlerinin azaltılması amaçlanmıştır.

Eklemeli imalat sonrasındaki uygun ısıtılma işlem sürecinin belirlenerek istenilen dayanımın elde edilmesiyle, zaman ve maliyet açısından etkin olmayan ısıtılma işlem süreçlerinin yerine özelleşmiş donanım gerektirmeyen, kısa zamanda daha ucuza tamamlanabilecek süreçlerin yerleştirilmesi sağlanmak istenmiştir. Eklemeli imalat için üretim değişkenlerinin ve üretim sonrası ısıtılma işlem sürecinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında, literatürde derinlemesine çalışıldığı görülmemiş olan, metal eklemeli imalat işlem değişkenlerinin ve ısıtılma işlem süreçlerinin, gerçekleştirilen birçok çalışmada incelenen eklemeli imalat ürünlerinin sadece boyutsal özelliklerine etkisinden farklı olarak eğilme dayanımı özelliklerine etkisi ortaya konulmuştur. Üretilen parçaların seri üretimini mümkün kılacak şekilde, eğilme dayanımlarının ASTM E290-14 (Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility) [2] standardına uygun olarak artırılmasına çalışılmıştır.

Bu doktora çalışmasıyla yurt içindeki cihazları kullanarak eklemeli imalat sırasında kullanılacak en uygun üretim değişkenlerinin belirlenmesi ve yurt dışı kaynaklardan ihtiyaç duyulan üretim değişkenleri gereksiniminin ortadan kalkması sağlanmış, eklemeli imalat yöntemine yönelik bilgi birikimi artmıştır. Yöntemin üretim değişkenleri ve üretim sonrası ikincil işlemleri hakkında tecrübe kazanılmıştır. Test ve değerlendirme aşamasıyla üretimlerin doğrulanması yurt içinde yapılmıştır.

Tezdeki bulguların sonucunda eklemeli imalata ait yurt dışı bağımlılığından gelen maliyetler önlenabilmektedir. Bu tür maliyetlere örnek olarak; cihaz üreticisi firmanın üretim değişkenlerini kullanabilmek için firmadan alınması gereken eğitimin maliyeti, değişkenlerin üretici firmanın başka bir cihazına ihtiyaç duyması (örneğin, ısıtılma işlem değişkenleri özel bir ısıtılma işlem fırınına göre oluşturulmuş ise o fırına ihtiyaç duyulması) sebebiyle söz konusu cihazın satın alma maliyeti sayılabilmektedir.

Bu tez çalışmasındaki işlem sırası aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir;

- Eklemeli imalat işlemine ilişkin ilgili üretim değişkenlerinin belirlenmesi,
- İmalat işlemi sonrasındaki uygun ısı işlem sürecinin belirlenmesi,
- Eklemeli imalat yöntemiyle test numunelerinin üretimlerinin gerçekleştirilmesi,
- Ürünlerin eğme testleriyle karşılaştırılması,
- Üretim ve test aşamalarının sonlu elemanlar analizi yöntemiyle doğrulanması,
- Aynı yöntemle üretilecek bir humerus kemik plağı için yöntem geçerlemesi yapılması.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat yöntemi, geleneksel işleme, döküm ve dövme gibi imalat yöntemlerine alternatif görülmektedir. Bu imalat yönteminin geleneksel imalat yöntemlerine göre üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Üstün yönleri, kişiye özel tasarım, malzeme ve imalat etkinliği, imalat esnekliği (ilk kurulum esnekliği, az sayıdaki toplu imalatlar için uygunluk) [3] olarak belirtilmektedir. Zayıf yönleri ise imal edilmiş ürünlerdeki boşluk, çatlak gibi kusurlar, artık gerilme oluşumu, ısıl işlem, HIP, yüzey işlemi gibi ikincil işlemler gerekebilmesi, yatırım ve işletme maliyeti ve imal edilebilir ürün boyutundaki sınırlamalar olarak sıralanabilmektedir.

Farklı eklemeli imalat işlemleri, katmanların oluşturulmasını ve sağlamlaştırılmasını birbirinden farklı yöntemlerle gerçekleştirmektedir. Bazı işlemler metal veya plastik tozları ergitmek veya sinterlemek için optikler tarafından yönlendirilen lazer veya elektron ışınından gelen ısı enerjisi kullanılmaktadır. Diğer bazı işlemler ise seramik veya polimer tozunun üzerine hassas bir şekilde bağlayıcıyı (ing. binder) veya çözücüyü (ing. solvent) püskürtmek için püskürtmeli çeşit yazdırma başlıklarıyla işlemi gerçekleştirmektedir [3].

Huang, Liu, Mokasdar ve Hou'ya göre eklemeli imalat üç temel adımdan oluşmaktadır [3]:

1. Üç boyutlu katı model oluşturulur ve stl (standard tessellation language) formatı gibi standart eklemeli imalat dosya formatına [4] veya son zamanda geliştirilen eklemeli imalat dosya formatına [5] dönüştürülür.
2. Eklemeli imalat girdi dosyası, konumlandırılmanın değiştirildiği veya ölçeklendirmenin yapıldığı eklemeli imalat cihazına gönderilir.
3. Parça, eklemeli imalat cihazında katmanlar halinde imal edilir. Katı model 30 µm gibi ince katman kalınlıklarına bölünür. İşlem, sünekliliği azaltan iğnemsî (ing. acicular) mikro yapıya sebep olan yüksek soğuma oranları içerir [6].

Bu tez çalışması kapsamındaki eklemeli imalatlar sırasında kusurlu parça üretimlerinin önüne geçebilmek için literatürde daha önce yöntemle dair ortaya konulmuş zayıf yönler incelenmiştir. Wycisk ve diğerlerine göre eklemeli imalatla imal edilmiş ürünlerde oluşan ve çatlak başlangıcına neden olan kusurlar aşağıda belirtilen sebeplerden dolayı oluşan iç

hacim noksanlıklarından doğmaktadır [7];

- Eklemeli imalat işlemi sırasında katmanların yetersiz ergitilmesi (ing. insufficient fusion of layers) sonucunda oluşan birbirine tutunma hataları (ing. bonding defects).
- Eklemeli ürünün kenar kısımlarında oluşan yüzey noksanlıkları.

Monzón, Ortega, Martínez ve Ortega, eklemeli imalata yönelik standartların eksikliğini, eklemeli imalatın yaygın kullanımına engel olarak görmüştür. Standartlaşma çalışmaları ISO (International Organization for Standardization) ve ASTM gibi uluslararası kurumlar tarafından yürütülmektedir. Standartlaşmayı gerekli kılan hususlar özetle aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [8];

- Malzemeye ait mikro yapı ölçütlerinin eksikliği.
- Toz kimyası ve boyut dağılımı için sınırlı sayıdaki ölçüm yöntemi.
- Eklemeli imalat işlemlerinin ölçümünü ve sınıflandırmasını belirleyen kıstasların yetersizliği.
- Farklı cihazlarda gerçekleştirilen aynı işlemin tutarsızlığı.
- Yetkinlik ve belgelendirmedeki standart dışı yönergeler.
- Boyutsal tamlik, işlem yetenekleri, üretim yönünün belirlenmesi, tamlik ayarı, cihaz başarımının kıyaslanması gibi modelleme ve benzetim için tutarlı olmayan veri girdileri.
- Model ve benzetim araçları için geçerleme ve doğrulama yöntemlerinin eksikliği.

Bu tez çalışması kapsamında eklemeli imalata istinaden yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak imalatla kullanılan malzeme ve ürün kalitesi, malzeme karakterizasyonu, sertlik ölçümleri, pürüzlülük ölçümleri, yoğunluk ölçümleri ve mikro yapı incelemeleri gibi test ve ölçüm yöntemleri kullanılarak kontrol edilmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat İşlem Değişkenleri

Eklemeli imalat sürecinde lazer gücü (ing. laser power), tarama hızı (ing. scanning velocity), tarama aralığı (ing. hatch spacing), katman kalınlığı (ing. layer thickness), tabla üzerine parça konumlandırması (ing. part orientation), toz tipi, boyutu ve şekli (ing. powder type, size, and shape) ve lazer odak çapı (ing. laser focus diameter) gibi birçok değişken

bulunmaktadır. İşlem değişkenleri, eklemeli imalat yöntemiyle imal edilen parçalarda istenilen son özelliklere etkisine göre seçilmektedir. Bazı işlem değişkenleri aşağıda belirtilmiştir;

- **Lazer Gücü:** Toz yataklı ergitmeyle eklemeli imalat sırasında toz malzemenin ergitilmesi lazer kaynağıyla gerçekleşmektedir. Lazer gücü, tozları ergiterek birbirine tutunmasını sağlayan ısı kaynağı olarak enerji girdisini belirleyen önemli bir işlem değişkeni olarak ifade edilmektedir. Eklemeli imalat sırasında diğer işlem değişkenleriyle uyum içerisinde yüksek veya düşük yoğunluklu olarak seçilerek istenilen parça kalitesi elde edilmeye çalışılmaktadır.
- **Tarama Aralığı:** Toz yataklı ergitme sırasında toz parçacıklarının ürün kalitesi ve imalat süresi gözetilerek bir güzergâh boyunca ergitilmektedir. Güzergâh üzerinde hareketi sırasında lazer ışının yönlendirildiği hatlar arasındaki mesafe tarama aralığını ifade etmektedir. Bu mesafenin az veya çok seçilmesi hatların birbiriyle tutunmasını değiştireceği için tarama aralığı etken bir işlem değişkeni olarak ele alınmaktadır.
- **Tarama Hızı:** Lazer ışınının toz parçacıkları üzerinde güzergâh boyunca tarama yaptığı sıradaki ilerleme hızı olarak tanımlanmaktadır. Hızın düşük veya yüksek olması ergitmenin hızını değiştirdiği için eklemeli imal ürünün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Ticari ürünlerde elde edilmeye çalışılan kaliteli ve hızlı üretimler için özenle seçilmesi gereken bir değişken olarak öne çıkmaktadır.
- **Katman Kalınlığı:** Toz yataklı eklemeli imalat sistemlerinde katman kalınlığı, lazer ışınının ayarlanan değişkenler ve güzergâh boyunca yeni ergitmeye başlayacağı toz katmanının kalınlığını belirtmektedir. İmalat sonrasında elde edilmek istenen malzeme ve boyutsal özelliklere etkisi sebebiyle önemli bir eklemeli imalat değişkeni olarak değerlendirilmektedir.
- **Sıcaklık:** SLM eklemeli imalat yöntemi kullanılarak herhangi bir metalik tozdan imal edilen parçaların başarımı değerlendirilirken sıcaklık değişimleri (ing. temperature gradients) ve yüksek soğuma oranlarından kaynaklanan artık gerilmelerin dikkate alınması gerekmektedir [9].
- **Parça Konumlandırması:** Eklemeli imalatı gerçekleştirilen parçanın cihazın imalat tablası üzerindeki konumu ve yönlendirmesi parçanın malzeme ve dolayısıyla mekanik özelliklerini etkilemektedir. Eklemeli imalat süreci sonrasında, işlemin doğası gereği yöne bağlı malzeme özellikleri oluşmaktadır. Parçanın işlevsel kullanımı göz önüne

alınarak belirlenen gereksinimlere bağılı olarak uygun bir parça konumlandırılmasının seçimine ihtiyaç duyulmaktadır.

Vock, Klöden, Kirchner, Weißgärber ve Kieback'e göre, toz yataklı ergitme yöntemini kullanan eklemeli imalatlarda toz kalitesi, işlem başarımını ve ürün özelliklerini yakından etkilemektedir. Bu durum genel kabul görse de, toz ve parça özellikleri arasındaki ilişkinin derinlemesine anlaşılmasında hala eksiklikler bulunmaktadır ve belirlenmiş bir süreç başarımına ilişkin toz gereksinimlerinin genelleştirilmiş tanımı elde edilememiştir. Bu tanımın ortaya konulabilmesi için eklemeli imalat işleminde seçilen tozun uygulanabilirliğinin işlem öncesinde belirlenmesi, işlem sırasındaki davranışının ve ürün kalitesi üzerindeki etkisinin hesap edilmesi ve işlem değişkenleri zarfına (ing. process parameters windows) göre seçilmesi gerekmektedir. Hâlihazırda uygulanan görünür yoğunluk (ing. apparent density), vurgu yoğunluğu (ing. tapped density), toz boyut dağılımı (ing. powder size distribution, PSD), akıcılık (ing. flowability) gibi ölçümlerle toz niteliğinin tam olarak belirlenmesi mümkün görülmemiştir. Kullanılan işlem değişkenleri için farklı özellik belirleme yöntemleri bir arada kullanılarak veya kullanılan toz yataklı ergitme işlemi için tasarlanan daha karmaşık bir toz özelliği belirleme yöntemiyle toz niteliği daha hassas tanımlanabilecektir [10].

Spierings, Voegtlin, Bauer ve Wegener'e göre, toz yataklı eklemeli imalat işleminin koşullarına uygun toz malzemesi kullanımı elde edilecek ürünün kalitesini etkileyen önemli bir unsurdur. Spierings ve diğerleri, SLM işlemi sırasında iyi kalitede toz katmanları oluşturmak için bir kıstas olan toz akıcılığı üzerine çalışmıştır. Bu değerlendirme, ölçülen toz yığıcı açısı (ing. powder avalanche angle) ve toz yığıcı yüzey şekillenmesinin (ing. powder surface fractal) istatistiksel analiziyle gerçekleştirilmiştir. Analizle elde edilen veriler, Fe ve Ni esaslı tozların alışkanlıkları ölçülerek doğrulanmıştır. Böylelikle, SLM işleminde kullanılacak tozların uygunluğu işlem öncesinde değerlendirilebilmiştir [11].

Eklemeli imalattan elde edilen ürünlerin, işlenmiş (ing. wrought) ürünler kadar yüksek dayanım değerlerine sahip olabilmesi için işlem değişkenleri üzerine olan çalışmalar devam etmektedir. Kruth, Vandenbroucke, Van Vaerenbergh ve Naert, eklemeli imalatın karmaşık bir ısı-fiziksel işlem olduğunu ve yüksek üretim kalitesi için imalat değişkenlerinin belirlenmesinin elzem olduğunu ifade etmişler, uygun değişken takımlarının (ing. parameter sets) deneysel çalışmalar ve sayısal çözümlemelerle bulunabileceğini belirtmişlerdir. Öte

yandan, enerji yoğunluğunu (ing. energy density) önemli bir işlem değişkeni olarak görmüşlerdir. Burada enerji yoğunluğuyla birim hacimdeki toz malzeme üzerine lazer ışınıyla aktarılan enerji kastedilmiştir. Buradan hareketle, toz yataklı lazerle ergitme eklemeli imalat yönteminde birim hacim toz malzemeye etkileyen üç boyutlu enerji yoğunluğu aşağıdaki Eş. (2.1) ile ifade edilmektedir [12]:

$$E = \frac{P}{v \cdot s \cdot t} \quad (2.1)$$

Eş. (2.1) 'deki, E ; birim hacimdeki enerji yoğunluğu (J/mm^3), P ; lazer gücü (W), v ; tarama hızı (mm/s), s ; tarama aralığı (mm), t ; katman kalınlığı (mm)'ni ifade etmektedir.

2.2. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme Eklemeli İmalat Yöntemi

Ishfaq, Abdullah ve Mahmood, DMLS yöntemindeki enerji yoğunluğu, tarama hızı ve diğer değişkenlerin, Ti-6Al-4V ve AlSi10Mg alaşımlarının dayanımı ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak, belirtilen işlem değişkenleri ve ikincil işlemlerin ürünün mikro yapısını, sertliğini ve yorulma dayanımını çok fazla etkilediği belirtilmiştir. Eklemeli imalat sırasında oluşan boşluk vb. hataların parçaların hasarına sebep olduğu bulunmuştur. Eklemeli imalat sırasındaki işlem değişkenleri ve yüksek soğuma oranları mikro yapı içerisinde iğnemsî α' -martenzit fazların oluşmasına sebep gösterilmiştir. İmalat sonrasında uygulanacak ısıtma işlemi veya ikincil işlemlerle mikro yapıda β -tanelerinin görüldüğü belirtilmiştir. Isıtma işlemi sonrasında eklemeli imalat parçasının uzama ve sünekliliğinin arttığı ifade edilmiştir. İşlem değişkenlerinden tarama aralığı arttıkça gerininin azaldığı, enerji yoğunluğu arttıkça çekme dayanımının da arttığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, yüksek enerji yoğunluğunun parça yoğunluğunu oldukça arttırdığı belirtilmiştir [13].

Chandramohan, Bhero, Obadele, Olubambi ve Ravisankar, 45 μm toz boyutu, 170 W lazer gücü, 1400 mm/s tarama hızı, 140 μm lazer ışını odak çapı ve 30 μm katman kalınlığı işlem değişkenleri kullanılarak EOSINT M270 (EOS GmbH, Almanya) cihazı ve DMLS yöntemiyle eklemeli imal edilen Ti-6Al-4V malzeme için parça konumlandırmasının mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Mikro yapı incelemesi sonucunda yatay konumlandırmayla üretilen parçaların sünekliliği (yüzde uzama değeri

%6,5) dikey konumlandırmayla üretilen parçaların sünekliliğinden (yüzde uzama değeri %4,9) yüksek bulunmuştur. Eklemeli imalat sonrasında herhangi bir ısıtıl işlem uygulanmadığı için mikro yapılar martenzit yapıda elde edilmiştir. Parçaların yüzeylerinde boşluklar ve kısmi ergimiş parçacıklara rastlanmıştır [14].

Keresztes ve Pammer, DMLS yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin mekanik özelliklerinin bulunması ve mikro yapı incelemesinin gerçekleştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve üç nokta eğme testleri kullanılmıştır. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen numunelerin özellikleri, geleneksel üretim yöntemiyle imal edilen malzemelerin özellikleriyle kıyaslanmıştır. Çekme testleri ASTM E8M standardına göre 5 adet numune için yapılmıştır ve en yüksek esneklik modülü (ing. elastic modulus) 43,3 GPa bulunmuştur. Bu değer geleneksel Ti-6Al-4V için ölçülen 113,8 GPa değerinden oldukça uzak bulunmuştur. Bu noktada, çalışmada gerçekleştirilen çekme testlerine ve sonuçlarına şüpheli yaklaşılmıştır. Öte yandan, gerçekleştirilen üç nokta eğme testleri için herhangi bir standarda uygunluk belirtilmemiş olmakla birlikte, elde edilen sonuçların geleneksel yöntemle üretilmiş numunelerin referans alınabilecek bir eğme testi sonucuyla karşılaştırma yapılmamıştır. Çalışmada Keller dağılayıcısıyla (ing. Keller's reagent) (190 ml H₂O, 5 ml HNO₃, 3 ml HCL, 2 ml HF) dağılama yapılarak mikro yapı incelemesi gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Ancak incelemenin sonucu olarak mikro yapıda elde edilen tane ve faz yapılarından bahsedilmemiş, sadece tanelerin görünürlülüğü değerlendirilmiştir [15].

Karolewska, Ligaj, Wirwicki ve Szala, titanyum alaşımı Ti-6Al-4V malzemeden DMLS eklemeli imalat yöntemiyle EOS M280W (EOS GmbH, Almanya) cihazı kullanılarak üretilmiş numunelerin ve çekilmiş silindirik (ing. drawn bar) ham malzemelerin tornalama işlemi uygulanarak istenilen boyuta getirilen aynı malzemeden numunelerin mekanik özelliklerini gösteren test sonuçlarını sunan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde makro yapı incelemesi gerçekleştirilerek hasar öncesi ve sonrası için bulgular belirtilmiştir. Eklemeli imalat, 200 W lazer gücü, 7 m/s'ye kadar tarama hızı ve 30 µm en ince katman kalınlığına göre gerçekleştirilmiştir. Eklemeli imalat sonrasında tavlama ısıtıl işlemi uygulanmıştır. Çekme testleri PN-EN ISO 6892-1: 2016 standardına göre yapılmıştır. Çekme testlerinin sonuçlarına göre eklemeli imalatla üretilen numuneler daha yüksek çekme (1127 MPa>1010 MPa) ve akma dayanımı (1052 MPa>947 MPa) göstermiştir. Her iki numune grubunun esneklik modülleri çok benzer (114,5 GPa≈113,1 GPa) çıkmıştır. Öte

yandan eklemeli imal numunelerin uzaması tornalanmış numunelerin uzama değerinin neredeyse yarısı kadar ($15,5 < 29,7$) bulunmuştur. Çekme testlerinin sonucunda, eklemeli imalatla üretilmiş numunelerin daha az uzayarak daha gevrek bir kopma gerçekleştirdiği belirtilmiştir. PN-EN ISO 6507-1: 2018-05 standardına göre gerçekleştirilen sertlik (özellikle mikro sertlik) ölçümleriyle kalıcı şekil değişimi hataları, yöne bağımlılık (ing. anisotrophy) ve tane sınırı olgusu (ing. phenomena near grain boundary) gibi ürün ve malzeme özellikleri çalışılmıştır. Sertlik ölçümleri sonucunda farklı kesit alanlarında farklı sertlik değerlerinin elde edilmesiyle imalat yönüne bağlı olarak oluşan malzeme tanelerinin olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca DMLS yöntemiyle üretilen numunelerin sertliği ölçülmüş ve tornalanmış numunelerin sertliğinden yüksek bulunmuştur. Ek olarak, 96 ml H₂O + 2 ml HNO₃ + 2 ml HF çözeltisiyle dağlanmış numuneler üzerinde makro yapı incelemesi yapılmıştır. Neticede, çekme yükünün eklemeli numunelerin yapısında kayda değer değişikliklere yol açtığı bulunmuştur [16]. Ayrıca, çekme kuvvetinin etkisiyle oluşan şekil değişikliği sırasında $\alpha + \beta$ faz yapısı EK-1’de gösterildiği gibi sadece α fazından oluşan yapıya dönüşmüştür [17].

Larosa ve diğerleri tarafından DMLS eklemeli imalat yöntemiyle EOSINTM270 (EOS GmbH, Almanya) cihazı kullanılarak Ti-6Al-4V malzemeden üretilen numunelerin mikro yapı incelemeleri ve mekanik özellikleri çalışılmıştır. Bunun için optik ve taramalı elektron mikroskopu (ing. scanning electron microscopy), X-ışınları kırınımı (ing. X-ray diffraction), mikro sertlik ve çekme testleri kullanılmıştır. Eklemeli imalat sırasında 170 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 100 μ m tarama aralığı ve 30 μ m katman kalınlığı işlem değişkenleri seçilmiştir. Eklemeli numuneler hızlı soğumayla yakından ilgili olarak iğnemsiz yapıya sahip martenzit (hexagonal α') yapıda bulunmuştur. Numuneler için elde edilen yoğunluk 4,3785 g/cm³, bağıl yoğunluk %98 olarak ölçülmüştür. Ortalama mikro sertlik 370 HV, çekme ve akma dayanımı sırasıyla 1172 MPa ve 957 MPa ve kopmadaki uzama değeri ise %11 olarak elde edilmiştir [18].

Rhein, Shi, Tekalur, Jones ve Carroll’ın çalışmasında, DMLS işlem değişkenlerinin (lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı, tarama aralığı, parça konumlandırması) EOSINT M290 (EOS GmbH, Almanya) cihazında üretilen AlSi10Mg alaşımı içerisindeki hata boyutu ve dağılımına etkisi araştırılmıştır. Yüksek tarama hızları birleşme yetersizliği (ing. lack of fusion) hata tipinin oluşmasına sebep olurken, düşük tarama hızları anahtar deliği yapısındaki (ing. keyhole formation) hata tipine sebep olmuştur. Lazer gücü ve katman

kalınlığının hata boyutu ve yorulma başarımı üzerindeki etkisi, parça konumlandırması ve tarama hızından daha fazla olmuştur. Murakami etkin alanının kareköküne göre, 30 μm değerindeki katman kalınlığıyla elde edilen hata boyutu (100 μm), 60 μm değerindeki katman kalınlığıyla elde edilen hata boyutundan (440 μm) daha düşük olmuştur. Bu durum yorulma ömrünü pozitif etkilemiştir. DMLS değişkenlerinden lazer gücü ve tarama hızı, eklemeli olarak üretilen parçalardaki hata özelliklerini değiştirerek parçaların statik ve dinamik olarak mekanik davranışlarını etkilemiştir [19].

2.3. Seçici Lazer Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemi

SLM eklemeli imalat yöntemi, yüksek yüzey kalitesi ve yoğunluğa sahip istenilen ölçülerde parça imalatına olanak sağlaması sebebiyle oldukça ümit vadeden bir yöntemdir. Diğer taraftan, işlem sonrasında artık gerilmelerin oluşması muhtemel görülmektedir. SLM eklemeli imalat yöntemi, orta derecede üretilebilirlik, iyi derecede tekrarlanabilirlik ve neredeyse iyi derecede yüzey kalitesi sunabilmektedir [20]. ASTM F42 heyeti SLM'i toz yataklı ergitme (ing. powder bed fusion) alanında sınıflandırmaktadır.

Vrancken, Kruth ve Humbeeck, SLM ile imal edilmiş Ti-6Al-4V ürünlerin farklı ısıtma işlemleriyle eniyilenen mekanik özelliklerinin geleneksel yöntemlerden elde edilen özelliklerden oldukça farklı olduğunu bildirmiştir. SLM işlemi sonrasında oluşan mikro yapı nedeniyle belirli ısıtma işlemleri uygulanarak istenilen mekanik özellikler elde edilebilmiştir. SLM işlemindeki kısa lazer-toz etkileşimi sonucunda oluşan anlık ve yerel yüksek ısı girdileri sıcaklık değişimlerine ve hızlı soğumalara yol açmaktadır. Çalışma kapsamında, birkaç ısıtma işleminin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. SLM işlemi sonrasında oluşan martenzit mikro yapısı lamelli (ing. lamellar) α ve β fazlarından oluşan mikro yapıya dönüştürülerek süneklilik arttırılmıştır. Isıtma işlemi uygulanmamış parçaların süneklilikleri $7,36 \pm 1,32$ iken, 2 saat boyunca 850°C sıcaklıkta tutulan ve fırında soğumayla gerçekleştirilen ısıtma işlemi sonucunda SLM ile imal edilen parçaların süneklilikleri $12,84 \pm 1,36$ değerine arttırılmıştır [21].

Pattanayak ve diğerleri, SLM işlem değişkenlerinin titanyum malzemeden imal edilen parçaların mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Çeşitli boşluk içeren parçalar üretmek için işlem değişkenleri olarak lazer gücü, tarama hızı ve tarama güzergâhı üzerinde eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, tarama aralığı lazer ışınının

çapından az seçildiğinde ve lazer gücünün tarama hızına oranı 0,5'ten büyük olduğunda 1,8 mm'den daha ince plaklar tam yoğunluklu olarak elde edilmiştir. Böylelikle, insan kemiğinin yapısına benzer titanyum yapılar üretilmiştir [22].

Du, Qian, Zheng ve Hong tarafından yapılan çalışmada, lazer gücü (120 W, 160 W, 200 W), tarama hızı (800 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s), katman kalınlığı (30 μm , 45 μm , 60 μm) ve tarama aralığı (70 μm , 100 μm , 130 μm) gibi SLM işlem değişkenlerinin farklı değerleri çalışılmış ve düşük boşluk ve yüksek yorulma özelliklerine sahip Ti-6Al-4V eklemeli imalat ürünleri için 10 farklı yapılandırma (ing. configuration) içinden en uygun işlem değişken takımı araştırılmıştır. Test numuneleri HDB-200 SLM cihazıyla dikey konumlandırılmayla üretilmiş ve artık gerilmeleri gidermek için 600°C'de 2 saat ısıtılarak ve sonrasında vakum fırınında soğutularak tavlama ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonuçlarına göre, boşluk oluşumu, işlem değişkenlerinden çoktan aza doğru lazer gücü > tarama aralığı > katman kalınlığı > tarama hızı sırasına göre etkilenmiştir. Düşük miktardaki boşluk veya hatanın enerji yoğunluğunun 65 ile 85 J/mm³ değerleri arasında iken oluştuğu, en düşük boşluğun ise 76,2 J/mm³ enerji yoğunluğu için elde edildiği bulunmuştur. Ayrıca, çekme dayanımı enerji yoğunluğunun 65 J/mm³'nin üzerindeki değerleri için azalmış ve en yüksek uzama 76,2 J/mm³ enerji yoğunluğu değeri için elde edilmiştir. Ek olarak, boşluk oranındaki değişim, toplam uzamadan belirgin olarak etkilenirken, akma ve çekme dayanımından daha az etkilenmiştir [23].

Saunders'a göre, yetersiz lazer gücü seçilmesi halinde ürün içerisinde boşluk oluşma ihtimali artmaktadır. Lazer gücünün düşük gelmesi halinde küçük bir ergiyik havuzu oluşarak soğumanın hızlı olacağı ve mikro yapının daha ince (ing. finer) faz yapısına sahip bir morfolojiden oluşacağı belirtilmiştir. Böylece ergiyik altında ergimemiş toz, boşluk oluşumu ve katmanların birbirinden ayrılması (ing. delamination) gibi risklerin bulunacağından söz edilmiştir. Öte yandan, yüksek lazer gücü seçilmesi durumunda ergimenin fazla olmasıyla anahtar deliği biçiminde boşluk oluşacağı bildirilmiştir. Bu durumun üretim yönünde uzunlamasına tane oluşumlarına yol açarak tane sınırı kırılmalarına sebebiyet verebileceği belirtilmiştir [24].

Hooper'a göre, lazerli toz yataklı ergitme yönteminde ergiyik havuzunun dinamikleri ve dengesi havuzdaki sıcaklık dağılımı tarafından belirlenmektedir. Sıcaklık dağılımının istenildiği seviyede düzgün oluşmaması yapı içerisinde hatalara sebep olabilmektedir.

Eklemeli imalat işlemi sırasındaki hızlı ısınma ve soğuma sıcaklığın deneysel olarak ölçümünü zorlaştırmaktadır. Bu kapsamda, yüksek hızlı kameralar yardımıyla SLM yöntemiyle üretilmiş bir Ti-6Al-4V parçanın ergiyik havuzunun yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. Sonuç olarak, sıcaklık değişimleri 5-20 K/ μm aralığında, soğuma hızları ise 1-40 K/ μs aralığında ölçülmüştür. Bu sonuçlar, işlem değişkenlerinin, geometrinin ve tarama güzergâhının ergiyik havuzu sıcaklığına ve soğuma hızlarına olan etkisi için yeni bulgular oluşturmuştur [25].

Saunders'a göre, ideal tarama aralığı, yaklaşık odak çapı kadar veya ergiyik hattının genişliği kadar olmalıdır [24]. Yüksek tarama aralığı, yığma oranının yüksek olması için seçilmektedir. Yığma oranı, katman kalınlığı, tarama aralığı ve tarama hızının çarpımı olarak ifade edilmektedir. Ancak, Clymer, Beuth ve Cagan'a göre, çok yüksek tarama aralığı yetersiz ergime ve boşluk miktarının fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda ürünleri bağıl yoğunlukları ve mekanik özellikleri azalacaktır [26]. Promoppatum, Onler ve Yao, 150 W lazer gücü için 30 μm katman derinliğindeki ergiyik genişliğini 124 μm olarak belirtmiştir. Aynı referansta 280 W lazer gücü için 30 μm katman derinliğindeki interpolasyonla bulunan ergiyik genişliğinin 167 μm olduğu ifade edilmiştir [27].

2.4. Eklemeli İmalat Sonrası İkincil İşlemler

Eklemeli imalat işlemi sonrasında, genellikle, ısıl işlem ve yüzey işlemleri gibi imalat sonrası süreçlere ihtiyaç duyulmaktadır. Üretim haznesi içerisinde oluşan yüksek sıcaklıklar sebebiyle soğuma sırasında artık gerilmeler veya çarpılmalar meydana gelebilmektedir. Şimdiye kadar, artık gerilmelerden kaçınılması için sadece iki yol önerilmiştir. Birincisi, eklemeli imalat işleminin gerçekleştiği hazne (ing. processing chamber) içerisindeki sıcaklık, ergitmesi yapılan metalin ergime sıcaklığına mümkün olduğunca yakın olmalıdır [28, 29]. İkincisi, ikincil işlem olarak imalatı gerçekleştiren metale uygun ısıl işlemin parçalara uygulanmasıdır. İmalat sonrasında uygulanan gerilme giderme (ing. stress relief) ısıl işlemle artık gerilmeler giderilirken, yeniden kristalizasyon tavlama gibi bazı özel ısıl işlemlerle de eğilme dayanımı ve katılık (ing. rigidity) gibi hedeflenen mekanik özellikler iyileştirilmektedir [29, 30, 31].

Bartlett ve Li'ye göre, toz yataklı ergitme işleminde meydana gelen artık gerilmeler ürünün şekil değişikliğine sebep olmakla beraber mekanik özelliklerini oldukça etkilemektedir.

Eklemeli imalat sırasında, işlem değişkenlerine, malzeme özelliklerine ve parça geometrisine bağlı olarak oluşan artık gerilmelerin öngörülmesi oldukça zordur. Artık gerilmeler işlem sırasında oluşan yöne bağlı gerilme alanlarının doğal bir sonucu olarak görülmüştür. Gerilme alanlarının modellenmesi ve işlem sırasındaki deneysel ölçümler artık gerilmelerin anlaşılmasını kolaylaştırmıştır. Gerilme giderme ısıtma işlemi artık gerilmelerin azaltılmasında en etkin yol olarak belirtilmiştir. Ancak bu tür ikincil bir işlem, ilave zaman ihtiyacına ve maliyete sebep olmaktadır. Bu kapsamda, toz yataklı ergitme işleminde artık gerilme oluşumunun kontrol edilmesinde malzeme dışında etkili olan unsurlar olarak üretim tablasının ısıtılması, ışın gücü (ing. beam power) ve ışın tarama hızı belirlenmiştir. Tarama işlemi sırasında seçilen güzergâhın yuvarlak hatlar halinde olması ve ada tarama yöntemi olarak seçilmesi parçalardaki yöne bağımlılığın azalması eğilimini oluşturmuştur. Ayrıca, malzemenin mekanik özelliklerinden ziyade ısıtma özelliklerinin, artık gerilmelerin oluşumunda baskın bir unsur olduğu önerilmiştir [32].

Haddelme gibi geleneksel yöntemlerle üretilmiş ürünlerle kıyaslanabilecek dayanım değerlerinin yakalanabilmesi için imalat değişkenleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Mower ve Long tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ti-6Al-4V üretimleri EOSINT M280 (EOS GmbH, Almanya) cihazıyla yapılmıştır. Numunelerin bir kısmına 650°C'de 2 saat gerilme giderme ısıtma işlemi uygulanırken, diğer bir kısmına 900°C ve 102 MPa ile 2 saat boyunca HIP işlemi uygulanmıştır. Dağlama Kroll dağlayıcısı kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen mikro yapılar dövme ürünle karşılaştırılmıştır. Dövme ürünün mikro yapısı içerisinde yaklaşık küre biçimindeki (ing. equiaxed) α taneleri barındıran, ayrı lamel şeklinde $\alpha+\beta$ kolonileri bulunmaktadır. DMLS ile üretilenlerde ise uzun, ince ve iğne şeklindeki (ing. acicular) tanelerden oluşan bir mikro yapı gözlenmiştir. Bunun sebebinin hızlı soğuma oranları olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çalışmada HIP uygulanmış ürünün mikro yapısı da gösterilmiştir. Bu mikro yapıda, α faz yapısı, diğer DMLS ürünlerdekilere göre daha geniş bulunmuştur [33].

Thöne, Leuders, Riemer, Tröster ve Richard'ın gerçekleştirdikleri çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen numuneler dokuz farklı ısıtma işlemine maruz bırakılmıştır. Sonrasında numunelerin çekme dayanımları ve kopma uzamaları ölçülmüş, mikro yapıdaki değişimler sebebiyle sıcaklık arttıkça çekme dayanımlarının 1080 MPa'dan 945 MPa'ya %12,5 azaldığı, artık gerilmelerin giderilmesi sonucunda da kopma uzamalarının %1,6'dan %11,6'ya %625 arttığı sonucuna ulaşılmıştır [34].

2.5. Eklemeli İmalatta Sayısal Modelleme

Promoppatum ve diğerleri, EOSINT M290 (EOS GmbH, Almanya) cihazı kullanılarak DMLS yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V malzemenin ısı, mekanik ve malzeme davranışını açıklayabilmek için sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Isıl sayısal modelleme ve analitik denklemler yardımıyla bu malzeme için işlem zarfı (ing. processing window) ortaya konulmuştur. Sayısal öngörülerini doğrulamak ve istenilen malzeme özelliklerinin bu işlem düzlemiyle elde edilip edilmediğini görebilmek için numune üretimleri odak çapı 100 μm , katman kalınlığı 30 μm , tarama hızı 1357 mm/s ve farklı lazer gücü değerleri (100, 200 ve 300 W) kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, enerji yoğunluğu, birçok değişkenin eklemeli imalata etkisinin değerlendirilmesine olanak sağlayan oldukça faydalı bir etken olarak belirtilmiştir. Sinterlemenin tam olarak gerçekleşebilmesi için enerji yoğunluğunu oluşturan lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı değerlerinin işlem düzlemi içerisinde kalacak şekilde belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yapılan mikro yapı incelemesinde, kolon şeklindeki (ing. columnar) tanelerin olduğu gözlenmiş ve tane boyutunun lazer gücü ve tarama hızından ziyade odak çapı ve tarama aralığıyla kontrol edildiği belirtilmiştir [27].

AlMangour, Grzesiak, Cheng ve Ertas, enerji yoğunluğunun ısı özellikleri üzerindeki etkisinin sayısal benzetim yöntemleriyle tanımlanabildiğini belirtmiştir. Bu çalışmada, SLM değişkenleri olarak, 100 W lazer gücü, 120 μm tarama aralığı, 50 μm katman kalınlığı ve 180 μm odak çapı sabit olarak alınırken, farklı tarama hızları (250 mm/s, 133 mm/s, 83 mm/s, ve 55,6 mm/s) ve enerji yoğunlukları (67 J/mm^3 , 125 J/mm^3 , 200 J/mm^3 , ve 300 J/mm^3) kullanılmıştır. Sonuç olarak, yetersiz lazer enerji yoğunluklarının ergiyik havuzu özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Yüksek tarama hızları yüksek soğuma oranlarına sebep olmuştur; böylece ergiyik havuzu içerisinde yüksek sıcaklık değişimleri (ing. temperature gradients) meydana gelmiştir. En yüksek tarama hızı (aynı zamanda en düşük enerji yoğunluğu) kullanıldığında daha yüksek sertlik ve daha düşük ortalama bağıl yoğunluk (ing. relative density) elde edilmiştir [35].

Soylemez, Koç ve Coşkun, SLM işleminin benzetimlerinin, süreci eniyilemek ve ürün geliştirme süresini kısaltılmak için önemli olduğunu belirtmiştir. EOSINT M290 (EOS GmbH, Almanya) eklemeli imalat cihazıyla AlSi10Mg malzemedan imal edilen parçaların şekil değiştirmelerini (ing. deformation) tam olarak tahmin edebilmek için SLM yönteminin

ısıl-mekanik (ing. thermo-mechanical) benzetimleri NetFabb (Autodesk Inc., ABD) yazılımıyla yapılmıştır. Sonuçta elde edilen benzetim modelinin, malzeme özellikleri bilinen döküm AlSi10Mg alaşımının benzetim sonuçlarının test sonuçlarıyla oldukça yakın benzerlik göstermesiyle birlikte, tasarım mühendislerine parçaları daha yüksek bir tutarlılıkla üretebilmek için yardımcı bir araç olacağı umulmuştur. Ortaya konulan benzetim yönteminin benzer sonlu elemanlar yazılımlarıyla da kullanılabileceği belirtilmiştir. Bunun için ilk olarak, kullanılması düşünülen sonlu elemanlar yazılımının, ısıl genleşmeleri içerecek şekilde ergiyik havuzu geometrisini tahmin etmesi gerektiği vurgulanmıştır. Daha sonra, buradan elde edilen verinin katman tabanlı imalat için parça ölçeğindeki ısıl-mekanik modele aktarılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir [36].

Novotný, Béreš, Abreu, Zajaca ve Bleck tarafından yapılan çalışmada, Ti-6Al-4V malzemenin çoklu katman şeklindeki eklemeli (ing. multi-layer deposition) imalatı sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve ısı akısı davranışı deneysel ve sonlu elemanlar analizleriyle sayısal olarak sunulmuştur. Farklı toz yığma zaman aralıklarının mikro yapı üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir. $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki numuneler, EOSINT M270 DMLS cihazıyla 170 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 100 μm tarama aralığı, 30 μm katman kalınlığı ve 100 μm lazer ışını çapı işlem değişkenleri kullanılarak, ısıl işlemsiz ve 1 saat 1040°C sıcaklıkta tutularak kademeli olarak fırında ve suda soğutulan tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin tanımlanarak zamana bağlı gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucuna göre düşük toz yığma zaman aralığı kullanıldığında ısı transferi için süre azaldığı için sinterlenen numune üzerinde daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir. XRD (X-Ray Diffraction) faz analizi sonuçlarına göre, ısıl işlemsiz numunelerde hcp (hexagonal closed packed) kristal yapısındaki α fazı bulunmuştur. Bunun sebebi, her bir katmanın sinterlenmesi aralığında sıcaklığın β dönüşüm sıcaklığının (975°C) altına düşerek $\beta \rightarrow \alpha'$ dönüşümünün gerçekleşmesidir. β dönüşüm sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen ısıl işlemin ve sonrasındaki yavaş soğutmanın sonucunda ise hcp kristal yapısındaki α fazına ek olarak bcc (body centered cubic) kristal yapısındaki β fazı oluşmuştur. Fırında soğutulan ısıl işlemlili numunelerde ise β fazıyla çevrelenen α fazı görüntülenmiştir. Suda soğutulan ısıl işlemlili numunelerde ise çokgen (ing. polygonal) taneler içerisinde ince martenzit grupları gözlenmiştir [37].

2.6. Eklemeli İmalatın Biyomedikal Uygulamaları

Attaran'a göre eklemeli imalat, kişiselleştirilebilen ürünlerin seri üretimini mümkün kılmaktadır. Bu yeni imalat teknolojisiyle kişiye özel ürünlerin imalat süreleri kayda değer oranlarda azalmakta, yeni tasarımlar daha kısa sürelerde piyasaya sürülebilmekte ve müşteri istekleri çok daha hızlı bir şekilde karşılanabilmektedir. Eklemeli imalatın hızlı gelişmesinin önündeki engeller olarak ise imal edilecek ürün boyutunun cihazın üretim haznesinin boyutuyla sınırlı olması, geleneksel seri üretim cihazlarına kıyasla eklemeli imalatla seri üretimin daha yavaş kalması, eklemeli imalat cihazlarının ve kullanılan malzemelerin hala pahalı olması ve eklemeli imal ürünler için belirlenmiş yasal bir düzenlemenin (ing. regulation) olmaması belirtilmiştir. Sağlık ve medikal sektöründe ihtiyaç duyulan kişiye özel ve karmaşık şekilli ürünler bu imalat yöntemi için yüksek potansiyel barındırmaktadır. Sağlık ve medikal uygulamalardaki cerrahi müdahalenin zamanını ve maliyetini, müdahale sonrasındaki istenmeyen şartların oluşma riskini en aza indirerek azaltmaktadır [38].

Eklemeli imalat biyomedikal sektöründe ihtiyaç duyulan karmaşık şekilli metalik parçaların üretimi için uygulanabilirliği yüksek bir teknolojidir. Harun ve diğerlerine göre, eklemeli imalatla uygun bir şekilde üretilen metalik parçaların statik dayanımı geleneksel imalat yöntemleriyle üretilenlerle kıyaslanabilir mertebelerdedir. Statik dayanım, eklemeli imal edilen parçaların yoğunluğu ve mikro yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Eklemeli imalattan çıkan parçaların mikro yapıları döküm gibi geleneksel imalat yöntemlerinden elde edilen parçaların mikro yapılarına nispeten daha ince bir yapıdadır. Bu yüzden, daha yüksek statik dayanım gösterirler. Eklemeli imalatla kullanılan metalik malzemelerden titanyum alaşımları biyouyumluluğu (ing. biocompatibility) ve üstün mekanik özellikleri sayesinde özellikle ortopedi alanında yaygın bir kullanıma sahiptir. Ayrıca, döküm veya dövmeyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek çekme dayanımı değerlerine sahip olmuştur [39]. Ancak, Herzog, Seyda, Wycisk ve Emmelmann'a göre, mikro yapı şekline bağlı olarak kopma uzamasının düşmesi eklemeli imal edilen Ti-6Al-4V parçalar için ana bir sorun olmuştur [40]. Harun ve diğerlerine göre, SLM ile üretilen Ti-6Al-4V parçalar da düşük süneklilik göstermekle beraber yüksek kırılma dayanımı sağlamaktadır. Öte yandan, DMLS ile imal edilen Ti-6Al-4V parçalar yüksek süneklilik ve kırılma dayanımı için ısıtılma işlemi gibi ikincil işlemlere ihtiyaç duymaktadır [39].

Bertol, Júnior, Silva ve Aumund-Kopp tarafından gerçekleştirilmiş akademik çalışmada, lazer gücü sabit tutularak (195 W), değişen tarama hızı (50 mm/s, 100 mm/s) ve tarama aralığı (50 μ m, 75 μ m, 100 μ m) değerleri incelenerek alt çene kemiği protezi imalatı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca destek malzemesi yapısı ve modelin eğimi ve konumlandırılması üzerine de çalışılmıştır. Üretilen protezlerin dayanım özelliklerine bakılmaksızın sadece boyutsal özellikleri değerlendirilerek DMLS eklemeli imalat yönteminin implant üretimi için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır [41].

Shi ve diğerleri, SLM ile Argon gazı ortamında 250 W lazer gücü, 1600 mm/s tarama hızı, 60 μ m tarama aralığı ve 30 μ m katman kalınlığı kullanılarak, Ti-6Al-4V ELI malzemedan üretilmiş ve 5 saat 670°C sıcaklıkta tutularak kademeli olarak fırında soğutulan çene kemiği protezinin sonlu elemanlar analizi ve malzeme karakterizasyonu yöntemleriyle biyomedikal uygulamadaki kırılma davranışı üzerine çalışmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen gerilme değerleri ve protez üzerindeki oluşan gerilme bölgeleri, kullanım sırasında kırılma oluşma ihtimali yüksek olan hatların başarılı bir şekilde belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Malzeme karakterizasyonu da imalat sonrasında protezin mikro yapısında oluşan fazların tanımlanmasında ve kırılma davranışında etkili boşluk vb. kusurların görüntülenmesinde kullanılmıştır. Sonuç olarak, kırılmanın, imalat sırasında oluşan yüzey ve yüzey altı hatalarından ve gerilme yığılmasına sebep olan protez tasarımından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca protezin bulunduğu biyolojik çevre kaynaklı kalsiyum/potasyum/oksijen birikmesi ve hidrojen kırılganlığı da protez başarımını etkilemiştir. Sonlu elemanlar analizi ve malzeme karakterizasyonu ile gerilme durumunun öngörülmesine imkân tanıyan bu yöntemin başka protez çeşitlerinin tasarımı ve imalatı için de uygulanabileceği belirtilmiştir [42].

Aziz, Gabbitas ve Stanford, DMLS eklemeli imalat yöntemiyle Ti-6Al-4V malzemedan kişiye özel çene kemiği protezinin üretilebilirliği üzerine çalışmıştır. İmalat aşamaları titanyum tozunun hazırlanması, işlem değişkenlerinin belirlenmesi, destek yapılarının oluşturulması, parça konumlandırması, ikincil işlemlerin gerçekleştirilmesi ve maliyetlerin çıkartılmasını içermektedir. İlk olarak hastanın hasarlı çene kemiğinin bilgisayarlı kesit röntgeni (ing. computed tomography) MIMICS programıyla görüntülenmiş, bölümlere ayrılmış (ing. segmentation) ve üç boyutlu işlenmiştir (ing. rendered). Metal tozu olarak parçacık boyutu ortalama 40 μ m olan “EOS titanium Ti64” kullanılmıştır. EOSINT M270 (EOS GmbH, Almanya) eklemeli imalat cihazında 170 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama

hızı, 100 µm tarama aralığı, 30 µm katman kalınlığı ve 80-800 µm aralığındaki lazer ışını çapı işlem değişkenleriyle üretim yapılmıştır. Sonuç olarak, karmaşık şekilli kişiye özel bir çene kemiği protezi istenen ayrıntıları içerecek şekilde lazer ergitme işlemiyle imalatının mümkün olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, metal sinterleme yönteminin iki çok önemli özelliği; birincisi metal tozlarının işlenebilmesi, ikincisi karmaşık şekilli yapıların hızlı, düşük maliyetli ve çok fazla teknik uzmanlık gerektirmeden yapılabilme kabiliyeti olarak belirtilmiştir [43].

Kemik plağı kırık bir kemiğin parçalarını bir arada tutmaya yarayan bir implant çeşididir. Uygulandığı kemik ve kırık çeşidine göre farklı geometrilerde üretilmektedir (EK-2) [44]. Bir kemik plağı tasarımındaki üç önemli husus, yapısal tasarım, malzeme seçimi ve biyolojik uygunluktur. Kemik plağı kırık iyileşene üzerine kadar üzerine takıldığı kemiğe gelen yükleri karşılayabilecek şekilde yeterince dayanıklı olmalıdır. Aynı zamanda plağın direngenliği kemiğin direngenliğiyle benzer olmalıdır. Plağın malzemesi ise herhangi bir zehirleyici etki göstermeyecek halde vücuda uyumlu olmalıdır [45].

Kemik plağının direngenliği önemlidir; çünkü kemik ile plağın direngenlikleri arasındaki fark, gerilme kalkanı etkisini (ing. stress shielding) arttırmaktadır. Gerilme kalkanı, plağın kemiğin üzerine gelen yüklerin çoğunu taşıması durumunda ortaya çıkmaktadır. Kemiğin zayıf olduğu durumlarda iyileşip tekrar dayanımını geri kazanması için gerilme kalkanı etkisi istenen bir durum olsa da, kemik iyileşip yük taşıyabilecek hale geldiğinde plak buna izin vermeyecek derecede yüksek direngenliğe sahip olursa, kemiğin kütleinde ve geri kazanılmış dayanımda azalma oluşmaktadır. Bu yüzden, plağın kullanımının başından itibaren malzeme seçimi başarıyı sınırlayan bir etmen olmaktadır [45].

ASTM F382-99 (2008), metalik kemik plaklarının mekanik davranışının ölçümüne dayalı test yöntemini belirten bir standarttır. Bu standart kemik plaklarının eğilme direngenliğini (ing. bending stiffness), eğilme yapısal direngenliğini (ing. bending structural stiffness) ve eğilme dayanımını (ing. bending strength) ölçmektedir. Böylece, EK-3'te gösterilen test düzeneği yardımıyla, kemik plağı üzerinde belirli bir miktar (%0,2) kalıcı şekil değişimi oluşturabilmek için uygulanması gereken eğilme momenti belirlenmektedir. Testin yük kontrollü yerine yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmesi tercih edilmektedir. Bu test yöntemi farklı kemik plağı tasarımlarının eğilme davranışlarını kıyaslamak için kullanılmaktadır. Öte yandan, bu test yöntemi kullanılarak kemik plağı için elde edilen

dayanım durumu plağın kullanım şartlarında göstereceği dayanımı tam olarak temsil etmeyebilmektedir [46].

Joshi'nin çalışmasında, kişiye özel kemik plaklarının belirli yüzey özellikleriyle üretimlerinin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi için bir süreç planlama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle, kemik plağıyla sabitlenmiş kırık kemiklerin iyileşme ve eski dayanımlarını geri kazanma sürecini hızlandıracak şekildeki yüzeylere sahip plakların CNC (Computerized Numerical Control) işlemeyle imalatı, en az sayıda bağlamayla mümkün kılınmıştır [47]. Bu tez çalışmasında ise eklemeli imalat yöntemi kullanılarak Joshi'nin çalışmasındakine [47] benzer iyileşmeyi hızlandıran yüzeyler tek bağlamada elde edilmiştir. Ayrıca, eklemeli imalat, kişiye özel kemik yüzeyleri için farklı yüzey biçimindeki kemik plaklarını tek seferde imal edebilecek yeteneğe de sahip bulunmaktadır.

Xie ve diğerleri çalışmasında, DMLS eklemeli üretim yöntemiyle imal edilmiş ve sonrasında parlatılmış kemik plaklarının mekanik özelliklerini geleneksel yöntemle üretilmiş olanların özellikleriyle karşılaştırarak, DMLS ürünlerin gereksinimleri karşılayıp karşılamadıklarını araştırmıştır. Bu çalışmada 17'şer adet plak bir EOSINT M290 (EOS GmbH, Almanya) cihazıyla DMLS ve bir CNC cihazıyla talaşlı işleme yöntemleri kullanılarak üretildikten sonra parlatılarak yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, malzeme karakterizasyonu ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir [48]. Ek olarak, Cesarone ve Disegi'nin çalışmasında kullandıkları ISO 9585'e [49] göre 5'er numune için eğme ve burulma testleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 4 numune için ve farklı moment değerlerinde yorulma testleri ve kırık yüzey analizi icra edilmiştir. Ancak test numunesi sayısının az olması çalışmanın eksikliği olarak belirtilmiştir. Ayrıca, kullanılan üretim değişkenleri, ısıtma işlem değişkenleri ve toz özellikleri çalışmanın içeriğinde belirtilmemiştir. Sonuç olarak, plaklar arasında parlatma sonrası yüzey pürüzlülüğü ve malzeme bileşen oranları açısından bir farklılık bulunmamıştır. DMLS plakların sertliği %7,42 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, DMLS plakların eğme ve burulma dayanımı daha yüksek bulunmuştur. Buradan hareketle, klinik testleriyle doğrulanması gerekmeyle birlikte, DMLS yöntemiyle üretilmiş plakların tıbbi uygulamalarda kullanımı muhtemel görülmüştür [48].



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Eklemeli imalat işlemine ilişkin imalat değişkenlerinden lazer gücü ve tarama aralığının üçer farklı değeri kullanılarak Ti-6Al-4V malzemeden eğme testi numuneleri üretilmiştir. Eklemeli imalat sonrasında, üretilmiş numunelere uygun olarak üç farklı ısıtma işlem süreci uygulanmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı özelliklerinin karşılaştırılması ASTM E290-14 [2] standardına uygun olarak yapılan eğme testlerinin sonuçlarına göre yapılmıştır. Aynı zamanda, eğme testi sonuçlarının yorumlanmasına katkı sağlayacağı düşünülerek çeşitli ölçüm yöntemleri de kullanılmıştır. Tüm eğme testi numunelerinin malzeme karakterizasyonu ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, EOSINT M290 (EOS GmbH, Almanya) eklemeli imalat cihazı için üreticisi tarafından belirlenen standart imalat değişkenleriyle üretilmiş eğme numunelerinin mikro yapı incelemesi ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, eğme testleri, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak, farklı eklemeli imalat değişkenlerinin etkilerini fazla sayıda eğme testi yapmadan veya test sayısını azaltarak belirleyebilmek için bilgisayar ortamında sayısal olarak doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi için malzeme modelini oluşturabilmek adına altı farklı parametreyle üretilen numunelere çekme testleri yapılmıştır.

3.1. Toz Özellikleri

İmalatta tane boyutu 63 μm 'den büyük toz oranı %0,3 olan Ti-6Al-4V Grade 5 alaşımı metal tozu kullanılmıştır. Tozun kimyasal kompozisyonunun, ASTM F1472-14 [50] ve ASTM F2924-14 [51] standartlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Eklemeli imalatlar, tozun özelliklerine uygun olarak, 30 μm katman kalınlığıyla gerçekleştirilmiştir.

3.2. Eklemeli İmalat Değişkenleri

Bu çalışmada, eklemeli imalatlar EOSINT M290 (EOS GmbH, Almanya) marka eklemeli imalat tezgâhında yapılmıştır. Tezgâh 400 W gücünde Yb (Ytterbium) fiber lazere sahiptir. İmalat tablası 250 mm x 250 mm x 325 mm'lik hacimsel boyuta kadar parça üretebilme kabiliyetindedir.

Test numuneleri üçer farklı lazer gücü ve tarama aralığı kullanılarak üretilmiştir. Bu iki değişken, Du ve diğerlerinin çalışmasında [23] farklı değerler kullanılarak sonuçlarının araştırmaya değer bulunduğu başlıca değişkenler olarak tavsiye edilmiştir. Tezgâhın standart olarak kullandığı lazer gücü ve tarama aralığı değerleri sırasıyla 280 W ve 140 μm 'dir. Tezgâhın etkin olarak uygulayabildiği en az ve en fazla lazer gücü sırasıyla 150 W ve 360 W değerleridir. Tezgâhın standart lazer gücü ve tarama aralığı değerleriyle meydana gelen standart enerji yoğunluğunu (56 J/mm^3) sağlayabilmek için 150 W ve 360 W lazer gücü değerlerine karşılık gelen tarama aralığı değerleri, Eş. (2.1'e göre sırasıyla 75 μm ve 180 μm olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan lazer gücü, tarama aralığı, tarama hızı ve katman kalınlığı değişkenleri ve oluşan enerji yoğunluğu Çizelge 3.1'de belirtilmektedir.

Çizelge 3.1. Eklemeli imalat değişkenleri

Eklemeli İmalat Değişkeni	Lazer Gücü (W)	Tarama Aralığı (μm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)	Tarama Hızı (mm/sn)	Katman Kalınlığı (μm)
1	150	75	56	1200	30
2	150	140	30		
3	150	180	23		
4	280	75	104		
5	280	140	56		
6	280	180	43		
7	360	75	133		
8	360	140	71		
9	360	180	56		

54 adet eğme testi numunesi, 27'şer adet olarak iki ayrı eklemeli imalat işlemiyle üretilmiştir (Resim 3.1).



Resim 3.1. Eklemeli imalat tablasındaki eğme testi numuneleri

3.3. Isıl İşlem Yöntemi

Isıl işlem, istenilen mekanik özelliklere göre yapı içerisindeki faz oranını (ing. phase ratio), dağılımını (ing. distribution), tane şeklini ve boyutunu değiştirmek için uygulanmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısı esas olarak ısıl işlem sırasındaki en yüksek sıcaklık ve soğuma hızı tarafından şekillenmektedir [52]. Ti-6Al-4V ısıl işlemi, 450°C civarındaki sıcaklıklarda malzemenin içeriğinde oluşan oksijen miktarındaki artıştan (ing. oxygen contamination) kaçınmak için asal gaz (ing. inert gas) (Ti-6Al-4V için argon) ortamında yapılmaktadır [52].

Eklemeli imalatla üretilen parçalar üretim sonrasında rutin bir işlem olarak gerilme giderme ısıl işlemine tabi tutulmaktadır. Bunun sebebi yapı içerisinde oluşan artık gerilmelerin yok edilmesidir. Artık gerilmeler, eklemeli imalat sırasında, toz parçacıkları lazer ışınıyla hızlıca ısınıp sinterlendikten sonra aynı bölgenin hızlı bir şekilde soğumasıyla oluşmaktadır. Bu çalışmada, bütün eğme testi numuneleri, 650°C’de 1 saat argon gazı ortamında fırınlandıktan sonra havada ortam sıcaklığına soğutularak gerilme giderme ısıl işlemine tabi tutulmuştur.

Gerilme gidermenin ardından toplam sayıdaki eğme testi numunesinin (54 adet) bir yarısına tavlama (ing. annealing), diğer yarısına ise yeniden kristalizasyon tavlaması (ing. recrystallization annealing) ısıtma işlemi uygulanmıştır. Belirtilen ısıtma işlem türlerinin yapılmasının sebebi, yapı içerisindeki fazların oranını, dağılımını, şeklini ve boyutunu istenilen mekanik özelliklere göre değiştirmektir. Tavlama ısıtma işlemi, eklemeli imalat sonrası eğilme dayanımını arttırmak için uygulanırken, yeniden kristalizasyon tavlaması yapının eğilme sırasındaki kırılma tokluğunu arttırmak için uygulanmaktadır [53].

Bu çalışmada uygulanan ısıtma işlemlerin uygulama sıcaklıkları, süreleri, soğuma hızları ve yapıya kattığı özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Isıtma işlem değişkenleri

Isıtma İşlem Tipi	Isıtma İşlem Çevrimi	Isıtma İşlem Özelliği
Gerilme Giderme (GG)	650°C 1 saat, Havada Soğutma	Artık Gerilmelerin Azaltılması
Tavlama (T)	790°C 1 saat, Havada Soğutma	Dayanımın Arttırılması
Yeniden Kristalizasyon Tavlaması (YKT)	925°C 1 saat, 760°C’ye <56°C/saat ile Soğutma, 480°C’ye >370°C/saat ile Soğutma, Havada Soğutma	Kırılma Tokluğunun Arttırılması

Numunelerin imal edildiği değişken takımlarını kısaca belirtebilmek amacıyla, eklemeli imalat değişkenlerine ve ısıtma işlem süreçlerine göre oluşturulmuş bir kodlama sistemi kullanılmıştır (Çizelge 3.3). Bu kodlama sisteminde, örnek olarak, 280T140 kodu 280 W lazer gücü ve 140 µm tarama aralığı değişkenleriyle üretilmiş ve sonrasında tavlama ısıtma işlemi uygulanmış numuneleri, 150YKT140 kodu ise 150 W lazer gücü ve 140 µm tarama aralığı değişkenleriyle üretilmiş ve sonrasında yeniden kristalizasyon tavlaması ısıtma işlemi uygulanmış numuneleri ifade etmektedir.

Çizelge 3.3. Numune kodlama sistemi

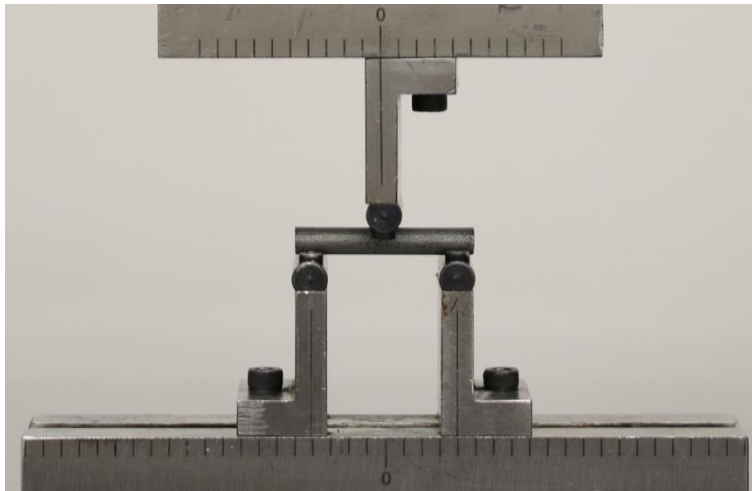
Lazer Gücü/Isıl İşlem/Tarama Aralığı		
Lazer Gücü (W)	Isıl İşlem	Tarama Aralığı (μm)
150	T (Tavlama) YKT (Yeniden Kristalizasyon Tavlaması)	75
280		140
360		180

3.4. Test ve Ölçüm Yöntemleri

Tüm eğme testi numuneleri için üç nokta eğme testleri, malzeme karakterizasyonu ve yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 280T140 ve 280YKT140 değişkenleriyle üretilmiş eğme testi numuneleri için mikro yapı incelemesi ve sertlik ölçümleri yapılmıştır.

3.4.1. Üç nokta eğme testleri

Üç nokta eğme testleri ASTM E290-14 [2] standardına uygun olarak Resim 3.2’de gösterilen düzenekte Instron 3369 (ITW, ABD) basma test cihazıyla yapılmıştır. Bu testle eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir.



Resim 3.2. Eğme testi deney düzeneği (test öncesi)

Üç nokta eğme testlerinde 8 mm çapında ve 50 mm boyunda 54 adet eğme testi numunesi kullanılmıştır. Testler 2 mm/dakika basma hızı ve yük kontrollü metot kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Eğme testi numunelerinin imalat ve ısıtma işlem değişkenleri Çizelge 3.4’te belirtilmektedir.

Çizelge 3.4. Eğme testi numunelerinin değişkenleri

9 farklı imalat değişkeni (Lazer Gücü (W) - Tarama Aralığı (µm))	2 farklı ısıtma işlem yöntemi	3 tekrarlı testler
150 - 75		
150 - 140		
150 - 180	Her bir numuneye “tavlama” ve “yeniden kristalizasyon tavlama” ısıtma işlemleri uygulanmıştır.	Her bir değişken takımı için üçer numune üretilmiştir.
280 - 75		
280 - 140		
280 - 180		
360 - 75		
360 - 140		
360 - 180		

3.4.2. Malzeme karakterizasyonu

Her bir eğme testi numunesinin yüzde element içeriği, ASTM F2924-14 [51] standardında belirtilen en düşük ve en yüksek element oranlarına göre kontrol edilmiştir. Ölçümler Thermo Scientific Niton XL3t XRF Analyzer (Thermo Fisher Scientific, ABD) cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

3.4.3. Yoğunluk ölçümleri

Eğme testi numunelerinin yoğunluk değerleri ASTM D2638-10 [54] ve ASTM D4892-89 [55] standartları referans alınarak ölçülmüştür. Ölçümler Micromeritics Accupyc II 1340 (MIC, ABD) yoğunluk ölçüm cihazıyla (ing. gas pycnometry) gerçekleştirilmiştir.

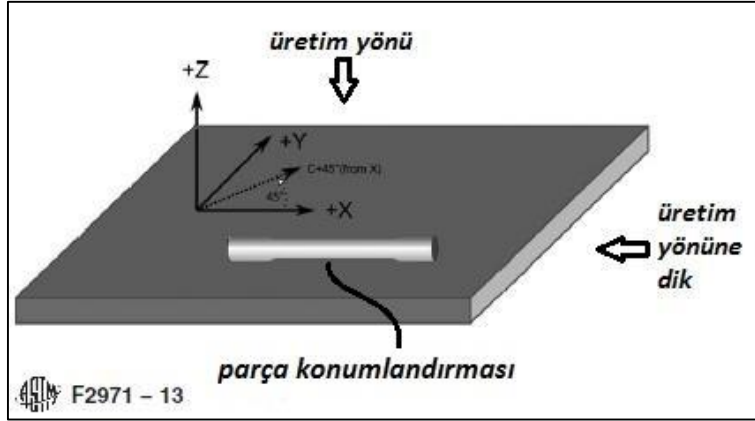
3.4.4. Pürüzlülük ölçümleri

Her bir eğme testi numunesinin pürüzlülük ölçümleri SJ-310 (Mitutoyo, Japonya) yüzey pürüzlülük cihazıyla ISO 4288 [56] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune üzerinden üçer ölçüm alınmıştır.

3.4.5. Mikro yapı incelemeleri

Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama numuneleri için elde edilecek ortalama eğilme dayanımı farkının sebeplerini mikro yapı incelemeleri üzerinden değerlendirebilmek için numunelerin mikro yapıları Axioskop 2 Mat (Zeiss, Almanya) metalürji mikroskopuyla incelenmiştir. Mikro yapı incelemeleri, eklemeli imalat tezgâhının tavsiye edilen standart değerleri olan 280 W ve 140 µm değişkenleriyle üretilmiş ve farklı ısı işlemleri uygulanmış numuneler (280T140 ve 280YKT140) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu değişken takımları iki farklı ısı işlem grubu (tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlama) arasındaki mikro yapı farklılıklarını araştırmak için yeterli bulunmuştur. Numunelerin eğilme dayanımlarının farkı, mikro yapı içerisindeki faz oranları, tane boyutu ve tane yönelmesi incelenerek açıklanmıştır.

Mikro yapı değerlendirmelerinde fazların ve tanelerin ortaya konulabilmesi için ASM Handbook Volume 9 [57] el kitabında önerilen dağlayıcı (ing. etchant) 192 (82 ml H₂O, 10 ml HNO₃, 8 ml HF ile 6 dakika dağlama yapılmıştır. Tane yönelmesini değerlendirebilmek için numunelerin “üretim yönünde” ve “üretim yönüne dik” olarak isimlendirilen iki farklı yöndeki kesitinde incelemelerde bulunulmuştur. Kesit yönleri, numunelerin üretim sırasında tezgah tablası üzerindeki konumlandırmasını temsil eden görsel üzerinde Resim 3.3’te gösterilmektedir.



Resim 3.3. Mikro yapı değerlendirmesinde kullanılan numune kesiti yönleri ve parça konumlandırması [57]

Mikro yapı değerlendirmesi için dört sınıfa ayrılan numuneler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Tavlama - Üretim yönünde
- Tavlama - Üretim yönüne dik
- Yeniden kristalizasyon tavlama - Üretim yönünde
- Yeniden kristalizasyon tavlama - Üretim yönüne dik

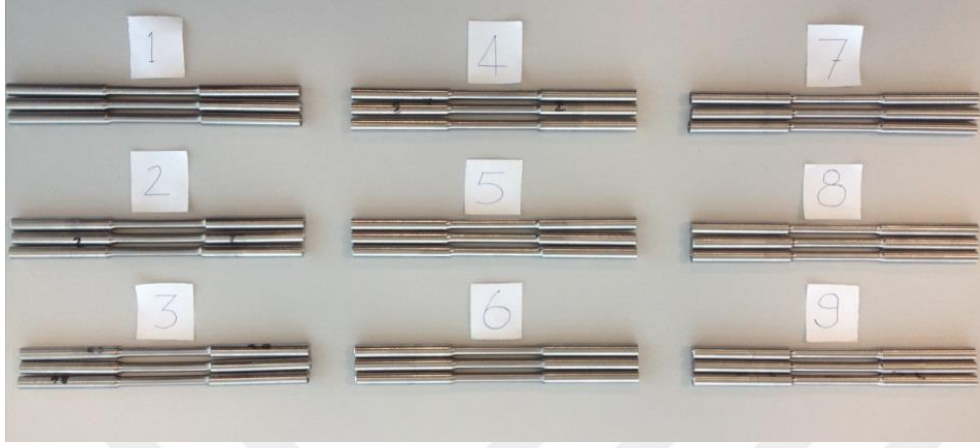
3.4.6. Sertlik ölçümleri

280T140 ve 280YKT140 değişken takımlarıyla üretilmiş eğme testi numunelerinin sertlik ölçümleri, ASTM E18-19 [59] standardına göre Goko Seiki (Burton, Japonya) sertlik ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı incelemeleri sırasında uygulanan yöntem kullanılarak, sertlik ölçülerinde de 280T140 ve 280YKT140 değişken takımları, iki farklı ısıtım işlem grubu (tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama) arasındaki farklılıkları araştırmak için yeterli kabul edilmiştir.

3.4.7. Çekme testleri

Çekme testleri, sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere malzeme modellerinin oluşturulabilmesi amacıyla ASTM E8-16a [60] standardına göre Instron 5982 (ITW, ABD) çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 27 adet çekme testi numunesi, 10 mm çapında ve 175 mm boyunda olacak şekilde, eğme testi numuneleri için kullanılan eklemeli imalat ve ısıtım işlem değişkenleriyle üretilmiştir. Numuneler eklemeli imalat sonrasında CNC torna

tezhahıyla standardın belirttiği 6 mm anma çapı ve 30 mm ölçüm uzunluğu olan geometrik boyuta getirilmiştir (Resim 3.4).



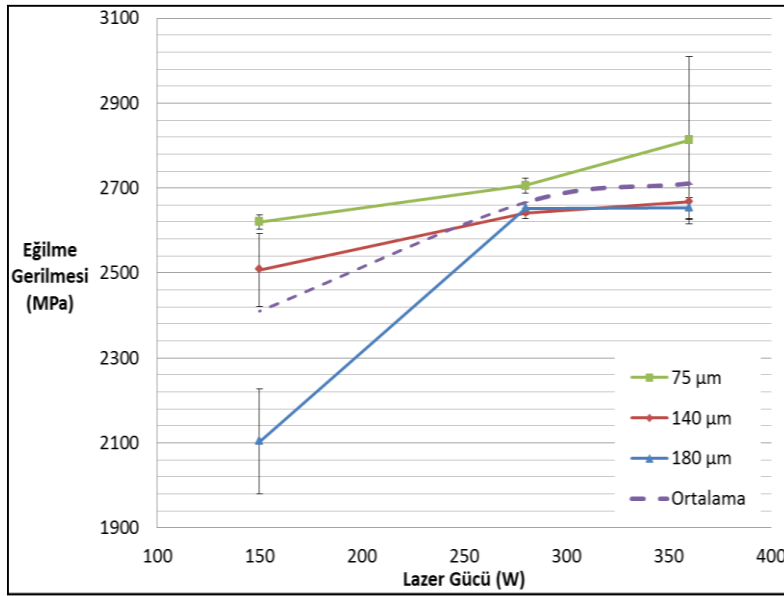
Resim 3.4. Çekme testi numuneleri (test ncesi)



4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Tavlamalı numuneler için elde edilen eğilme gerilmesi değerlerinin lazer gücü ve tarama aralığına göre değişimi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Grafik üzerinde, ayrıca, ortalama eğilme gerilmesi değerlerini belirten bir eğri de çizdirilmiştir.



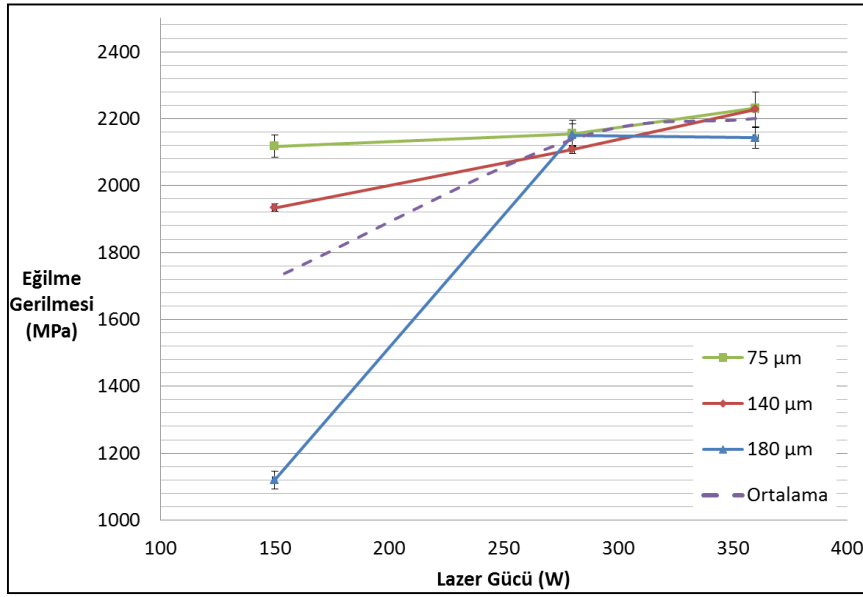
Şekil 4.1. Tavlamalı numunelerin eğilme gerilmesi değerleri

150 W için tarama aralığı azaldıkça eğilme gerilmesi artmıştır. Çünkü tarama aralığı azaldıkça katmanlar arasındaki sinterleme işlemi iyileşmiştir. Böylece katmanlar birbirine daha iyi tutunmuş ve dayanım artmıştır. Lazer gücü 280 W ve 360 W değerlerine yükseltildiğinde testler tarama aralığından bağımsız olarak benzer eğilme gerilmesi sonuçları vermiştir. Bu durumun yüksek lazer gücü değerlerinden dolayı oluşan yeterli ergitme sayesinde olduğu düşünülmüştür. Ortalama olarak en düşük eğilme gerilmesi (2103 MPa), 150T180 değişken takımından elde edilmiştir. Öte yandan, ortalama olarak en yüksek eğilme gerilmesi (2813 MPa), 360T75 değişken takımından elde edilmiştir.

Lazer gücü 280 W değerinden 360 W değerine yükseltildiğinde ortalama eğilme gerilmesi değerlerinde kayda değer bir artış olmamıştır. Yüksek enerji seviyesi fazla ergitmeye ve bunun sonucu buharlaşmaya sebep olabilmektedir ve dayanımı düşürebilmektedir [61].

Ayrıca, yüksek enerji seviyesi lazer ışını sıçramaları ve bunun sonucu yüksek yüzey pürüzlülüğüne sebep olarak dayanım özelliklerini düşürebilmektedir.

Yeniden kristalizasyon tavlama numuneleri için elde edilen eğilme gerilmesi değerlerinin lazer gücü ve tarama aralığına göre değişimi Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Grafik üzerinde, ayrıca, ortalama değerleri belirten bir eğri de çizdirilmiştir.

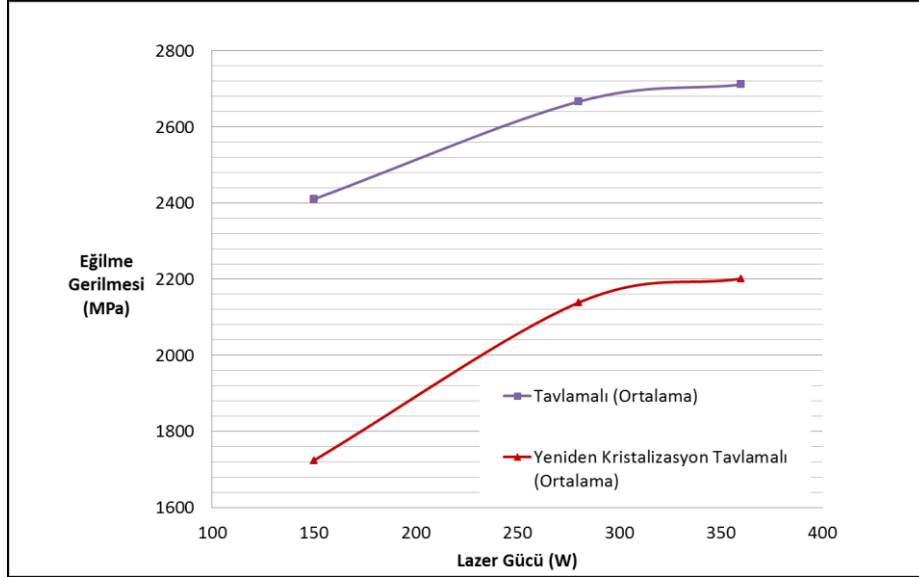


Şekil 4.2. Yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin eğilme gerilmesi değerleri

Tavlama numuneleri için elde edilene benzer şekilde, yeniden kristalizasyon tavlama numuneleri için de, 150 W için tarama aralığı azaldıkça eğilme gerilmesi artmıştır. Bunun sebebi olarak yine tarama aralığının azalmasıyla katmanlar arasındaki sinterlemenin iyileşmesi gösterilebilir. Böylelikle katmanların birbirine daha iyi tutunmasıyla dayanım artmıştır. Ortalama olarak en düşük eğilme gerilmesi (1120 MPa), 150YKT180 değişken takımından elde edilirken, en yüksek eğilme gerilmesi (2232 MPa) ise 360YKT75 değişken takımından elde edilmiştir.

Lazer gücü 280 W değerinden 360 W değerine yükseltildiğinde ortalama eğilme gerilmesi değerlerinde kayda değer bir artış olmamıştır. Yüksek enerji seviyesi fazla ısıtmaya ve bunun sonucu buharlaşmaya sebep olarak veya lazer ışını sıçramaları ve bunun sonucu yüksek yüzey pürüzlülüğüne sebep olarak dayanım özelliklerini düşürebilmektedir [61].

Tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin ortalama eğilme gerilmesi değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin ortalama eğilme gerilmesi değerleri

Yeniden kristalizasyon tavlama numuneler tavlama numunelere göre ortalama eğilme gerilmesi bazında en az 510 MPa düşük değer vermiştir. Bölüm 4.2'de inceleneceği üzere, yeniden kristalizasyon ısı işlemine tabi tutulan numunelerin soğuma hızı, tavlama numunelerinkine göre daha düşük olduğu için daha kaba faz yapısı (genişlemiş α lamelleri) oluşmuştur. Ayrıca yeniden kristalizasyon tavlama ısı işlemi yapılmış numunelerde ısı işlemin amacıyla uygun olarak lamelli faz yapısı bazı bölgelerde daha yuvarlak şekilli faz yapısına dönüşmüştür. Thöne ve diğerlerinin [34] çalışmasındaki bulgulara benzer şekilde, ısı işlem sıcaklığı yükselince numunelerin eğilme dayanımı düşmüştür. Bu sebeplerden dolayı, yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin eğilme dayanımı ve sertlik değeri, daha iğnemsiz faz yapısına sahip tavlama numunelerinden daha düşük bulunmuştur.

Eğilme dayanımı farkının sebebi tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama eğme testi numunelerinin mikro yapı farklılıklarına bakılarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Diğer taraftan, Xie ve diğerlerinin çalışmasında [48] belirtildiği üzere, DMLS ile üretilen numunelerin geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen numunelerden daha yüksek eğilme dayanımı göstermesi beklenmektedir. Talaşlı işlemeyle üretilen numunelerin üretim sırasında yüksek sıcaklık girdisi yaşamayacak olmaları ve dolayısıyla yüksek soğumaya

maruz kalmayacak olmaları sebebiyle, mikro yapıları iğnemsî yapıdan oluşmayacağı için eğilme dayanımlarının daha düşük olması öngörülmektedir.

4.1.1. Malzeme karakterizasyonu sonuçları

Bütün eğme numunelerinin element yüzdeleri ASTM F2924-14 [51] standardına uygun bulunmuştur. Numuneler için kritik görülen alüminyum kaybı durumuna (Al yüzdesinin %5,5 değerinin altında olması) ve oksijen kırılganlığına (ing. oxygen brittleness) sebep olan oksijen varlığı durumuna (O₂ yüzdesinin %0,2 değerinin üzerinde olması) ayrıca dikkat edilmiş olup, herhangi bir numune için istenmeyen bir içeriğe rastlanmamıştır. Bu durum eklemeli imalat işleminin uygun olarak gerçekleştirildiğini işaret etmiştir. Örnek olarak, mikro yapı incelemesi yapılan 280T140 ve 280YKT140 değişken takımları için malzeme karakterizasyonu ölçümleriyle elde edilen element yüzdeleri Çizelge 4.1’de belirtilmektedir.

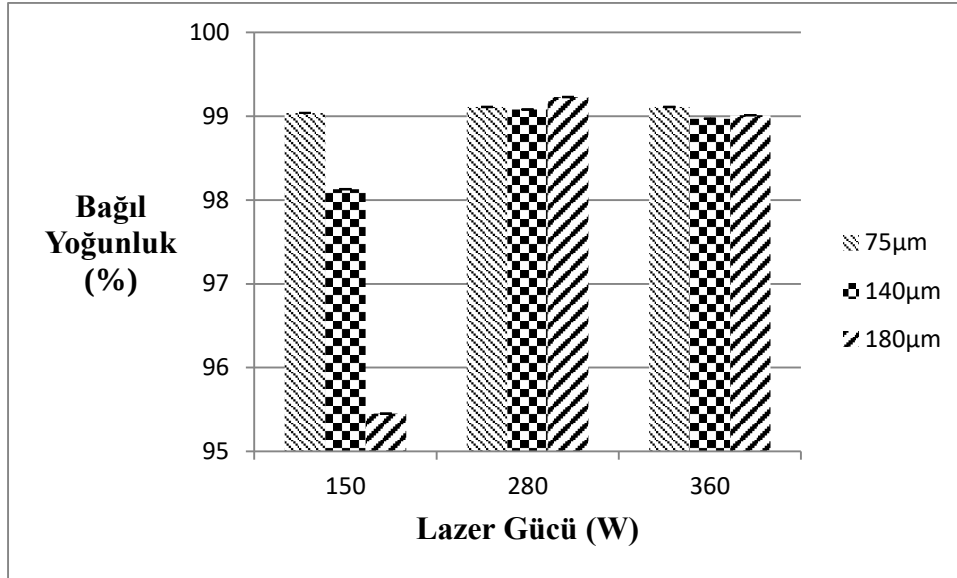
Çizelge 4.1. Eğme numunelerinin element yüzdeleri

Numune	Element Yüzdesi (%)					
	Alüminyum	Vanadyum	Demir	Nikel	Mangan	Titanyum
280T140	5,682	4,372	0,185	0,025	0,043	89,731
280YKT140	5,702	4,400	0,143	0,000	0,046	89,740
ASTM F2924-14	5,500-6,750	3,500-4,500	<0,300	<0,100	<0,100	Geri Kalan

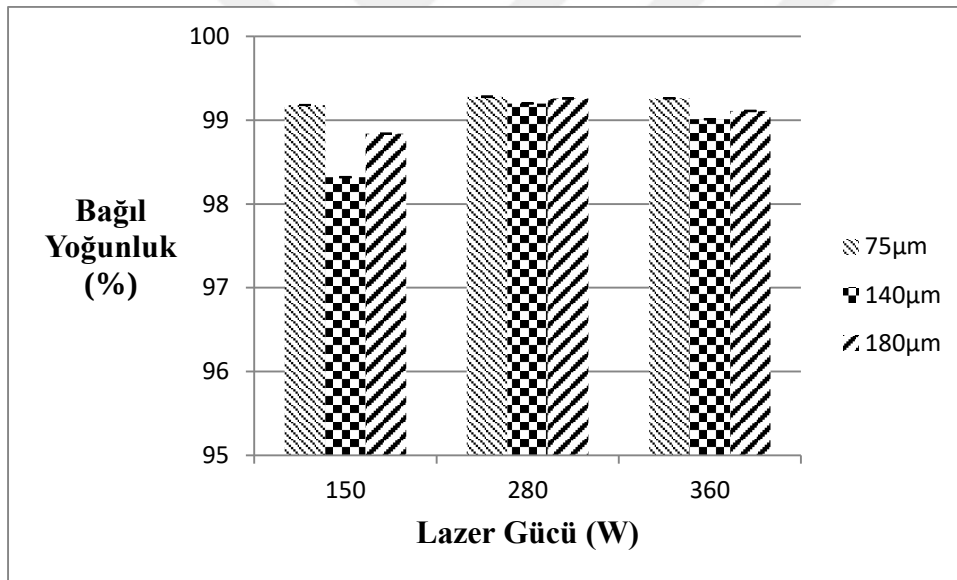
4.1.2. Yoğunluk ölçümlerinin sonuçları

Referans alınan yoğunluk değeri, ASTM F1472-14 [50] standardında belirtilen AMS 4928 standardına göre hadde ürünü ve tavlanmış Ti-6Al-4V için 4,42 g/cm³ olarak belirtilmektedir. Yoğunluk ölçümlerinin sonucunda, bütün eğme testi numuneleri için ortalama yoğunluk değeri 4,36 g/cm³, ortalama bağıl yoğunluk değeri ise %98,81 olarak bulunmuştur.

Ölçülen yoğunluk değerleri, bağıl yoğunluk olarak her iki ısıtım işlem grubuna ait farklı lazer gücü ve tarama aralığı değerleri için Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Tavlamaalı numunelerin bağıl yoğunluk değerleri



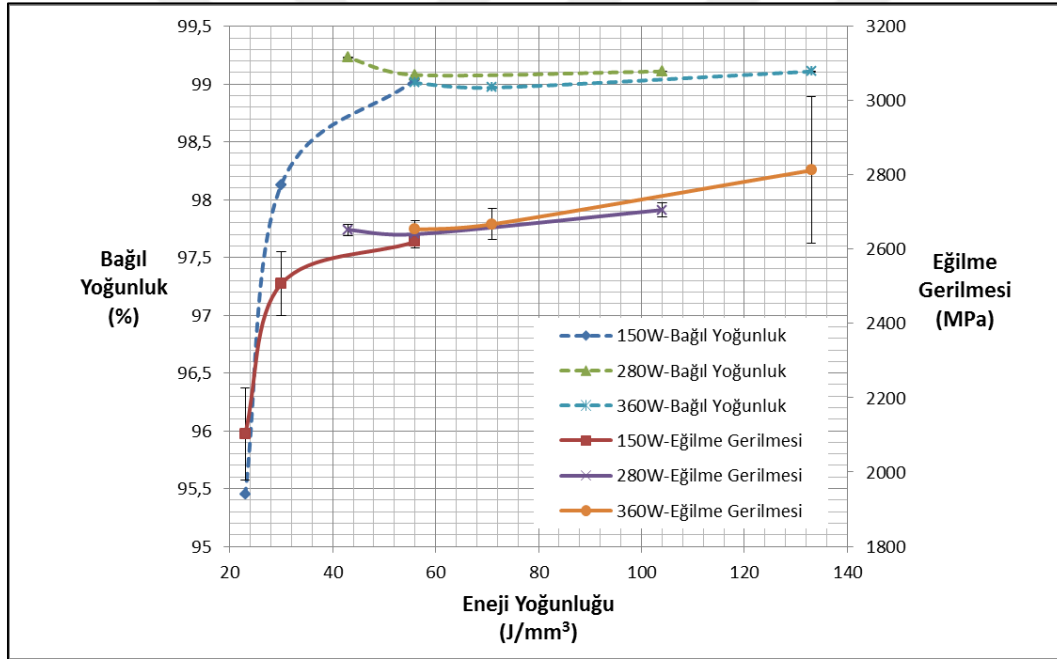
Şekil 4.5. Yeniden kristalizasyon tavlamaalı numunelerin bağıl yoğunluk değerleri

Tavlamaalı numuneler için, 150 W lazer gücü değerinde, tarama aralığı azaldıkça yüzde bağıl yoğunluk artmıştır. Bağıl yoğunluk arttıkça eğilme dayanımı değerleri yükselmiştir. 280 W ve 360 W lazer gücü değerleri için ise tarama aralığının değişimine bağlı olarak yüzde bağıl yoğunlukta kayda değer bir değişim olmamıştır.

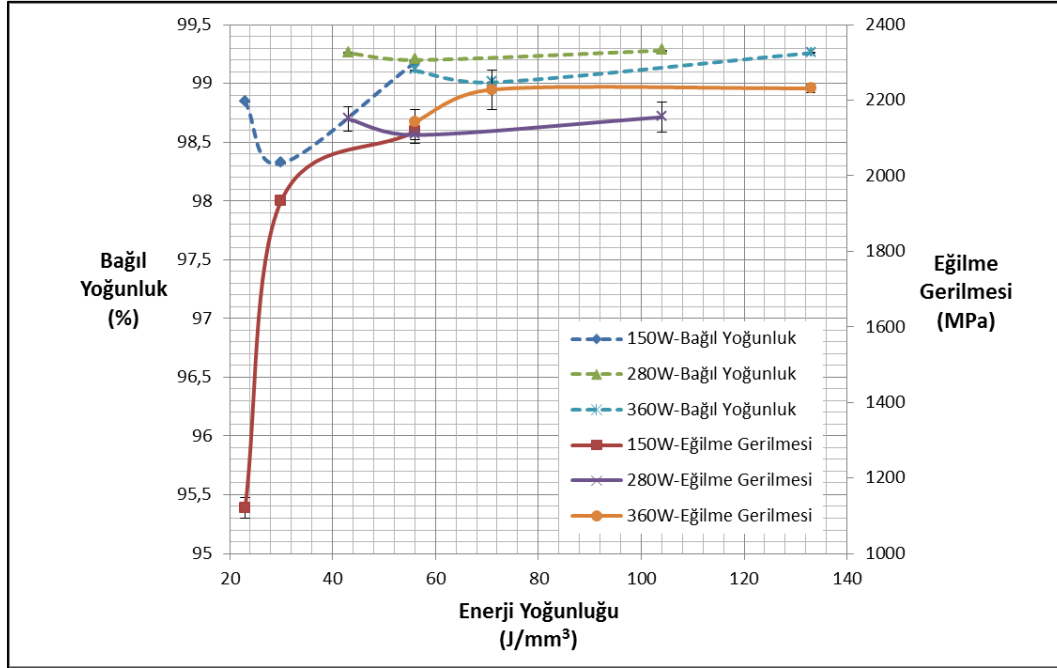
150 W - 180 μm değişken ikilisi için yeniden kristalizasyon tavlamaalı numunelerin bağıl yoğunluğu, tavlamaalı numunelerinkine göre oldukça yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi olarak,

en düşük enerji yoğunluğunun (23 J/mm^3) uygulandığı numunelerin üretim kararsızlıklarının yüksek olması gösterilebilir. Öte yandan $150 \text{ W} - 140 \text{ }\mu\text{m}$ ve $150 \text{ W} - 75 \text{ }\mu\text{m}$ değişken ikilileri için iki ısıtım işlemi arasında böyle bir farktan söz edilememiştir. Bunun sebebi, $180 \text{ }\mu\text{m}$ 'ye göre azalan tarama aralığıyla enerji yoğunluğunun artması ve yüksek bağıl yoğunluğa sahip numunelerin elde edilmesidir. Benzer şekilde, Bertol ve diğerlerinin çalışmasında [41] kullanılan tarama aralıkları olan $50 \text{ }\mu\text{m}$, $75 \text{ }\mu\text{m}$ ve $100 \text{ }\mu\text{m}$ değerleri arasından $50 \text{ }\mu\text{m}$ ile üretilen test numuneleri daha yüksek yoğunluk ve sertlik değerleri sağlamıştır.

Tavlamalı ve yeniden kristalizasyon tavlamalı numunelerin enerji yoğunluğuna bağlı olarak bağıl yoğunluk ve eğilme gerilmesi değerlerindeki değişimleri gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Tavlamalı numunelerin enerji yoğunluğuna bağlı olarak bağıl yoğunluk ve eğilme gerilmesi değişimleri



Şekil 4.7. Yeniden kristalizasyon tavlama enerjisi yoğunluğuna bağlı olarak bağıl yoğunluk ve eğilme gerilmesi değişimleri

Tavlama enerjisi için, 150 W lazer gücü değerinde, enerji yoğunluğu arttıkça bağıl yoğunluk artmıştır. 150T180 için oluşan düşük enerji yoğunluğu (23 J/mm^3), numunenin üretimi sırasındaki kararsızlıklar bağıl yoğunluğun ve eğilme dayanımının düşmesine sebep olmuştur. Diğer taraftan, 280 W ve 360 W lazer gücü değerleri için benzer bir düşüş söz konusu olmadığından, bu lazer gücü değerleriyle üretilmiş tavlama enerjisi yoğunlukları enerji yoğunluğunun değişiminden bağımsız bulunmuştur.

Ortalama bağıl yoğunluk değerleri, tavlama enerjisi için %98,57 (Standart Sapma (SS)= 0,0034), yeniden kristalizasyon tavlama enerjisi için %99,05 (SS= 0,0031) olarak bulunmuştur. Her iki ısıtma işlemi için de, enerji yoğunluğu yükseldikçe bağıl yoğunluk ve eğilme dayanımı artış eğilimi göstermiştir. AlMangour ve diğerlerinin çalışmasında [35] yüksek enerji yoğunlukları ergiyik havuzu boyutunun genişlemesine ve sıcaklık değişimlerinin ve gerilmelerin azalmasına ve böylece daha yüksek bağıl yoğunluklarının oluşmasına sebep olmuştur. Ancak 360A75 için eğilme dayanımının standart sapmasındaki artış gibi, yüksek enerji yoğunluğu (360A75 için 133 J/mm^3) eğilme dayanımı değerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Mierzejewska, Hudák ve Sidun, 188 J/mm^3 gibi yüksek enerji yoğunluklarının küçük taneleri buharlaştırıp boşluklar oluşturduğunu belirtmiştir [62].

Bu tez çalışmasında, her iki ısıtım işlemi için de 56 J/mm^3 enerji yoğunluğuna sahip numunelerin bağli yoğunluk ve eğilme dayanımı değeri örtüşmüştür.

4.1.3. Pürüzlülük ölçümlerinin sonuçları

Pürüzlülük ölçümleri sonucunda her bir eğme numunesi için elde edilen pürüzlülük sonuçları Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. Her bir numune üzerinden alınan üçer ölçümün sonuçları ve ısıtım işlemi tipine göre ortalama pürüzlülük (R_a) değeri listelenmiştir.

Çizelge 4.2. Eğme numunelerinin pürüzlülük değeri

Numune	Ölçüm-1	Ölçüm-2	Ölçüm-3	Ortalama	SS
(Ra, μm)					
360T180	3,48	4,81	7,41	5,23	1,99
360T140	6,08	6,45	4,79	5,77	0,87
360T75	3,04	5,10	4,57	4,24	1,07
280T180	7,23	8,98	9,86	8,70	1,34
280T140	5,97	4,19	5,90	5,35	1,01
280T75	8,52	3,23	3,17	4,98	3,08
150T180	3,79	5,78	5,08	4,88	1,01
150T140	6,06	3,22	4,72	4,67	1,42
150T75	7,70	4,29	3,40	5,13	2,27
Tavlamalı (Ortalama)				5,44	1,57
360YKT180	3,34	6,77	4,74	4,95	1,73
360YKT140	6,12	7,81	5,57	6,49	1,17
360YKT75	6,22	6,91	6,30	6,48	0,37
280YKT180	3,41	3,05	3,16	3,21	0,18
280YKT140	4,30	5,04	3,57	4,30	0,74
280YKT75	3,64	5,98	4,39	4,67	1,19
150YKT180	3,78	2,34	2,95	3,02	0,73
150YKT140	3,31	2,99	3,16	3,15	0,16
150YKT75	2,20	3,25	3,32	2,93	0,63
Yeniden Kristalleşme Tavlamalı (Ortalama)				4,36	0,77

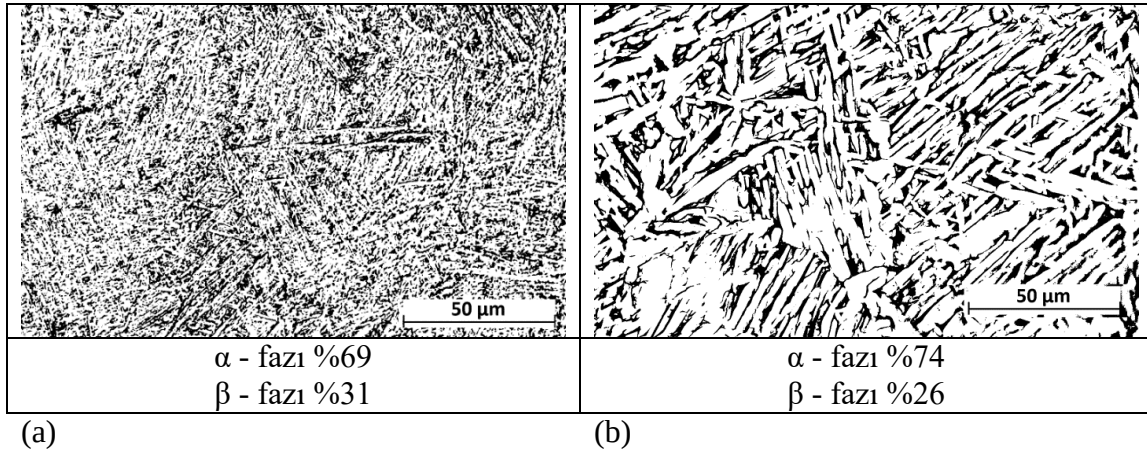
Bütün numunelerin R_a değeri $4,89 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Eklemeli imalat cihazının üretici firmasının (EOS GmbH, Almanya), üretimlerin yapıldığı cihaz (EOSINT M290) ve malzeme (Ti-6Al-4V) için referans gösterdiği R_a değeri ise $5-9 \mu\text{m}$ arasındadır [63]. Pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen R_a değeri, üretici firmanın referans aralığının

yakınında (hatta altında) kaldığı için eklemeli imalatların uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

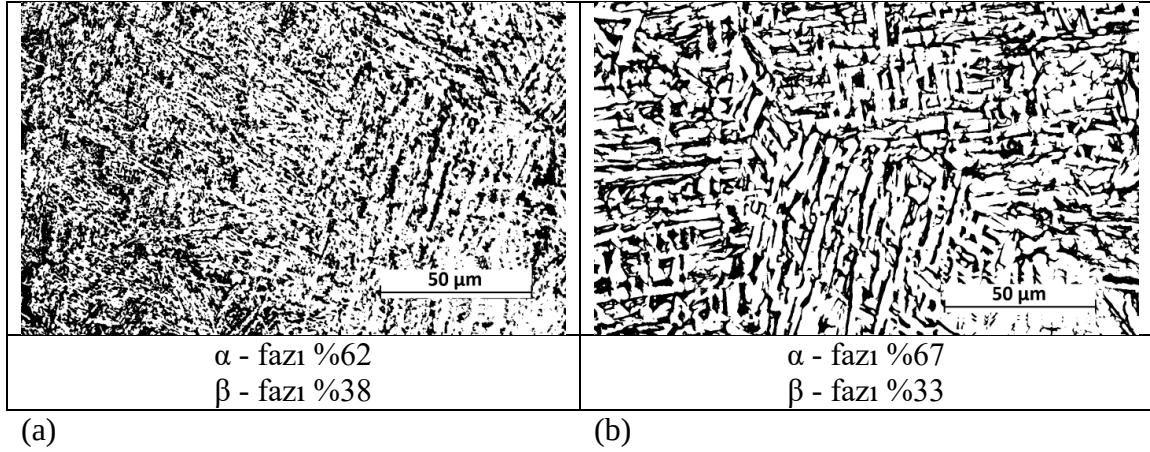
Tavlama numuneleri için R_a değeri, yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin R_a değerinden yüksek bulunmuştur ($5,44 \mu\text{m} > 4,36 \mu\text{m}$). Ancak SS değerlerinin (tavlama numuneleri için 1,57, yeniden kristalizasyon tavlama numuneleri için 0,77) yüksek olması sebebiyle pürüzlülük değerleriyle ısıtma işlem yöntemleri arasında belirgin bir bağ kurulamamıştır.

4.2. Mikro Yapı İncelemesinin Sonuçları

Farklı ısıtma işlemlerinin aynı kesitteki faz yapıları ve oranları Resim 4.1 ve Resim 4.2’de gösterilmektedir. Resimlerde, ilgili ısıtma işlem ve kesite ait mikro yapı görselinin altında belirtilen faz oranları, ImageJ görüntü işleme yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Burada eşit ölçekli olarak ele alınan mikro yapı görselleri, önce program içerisinde siyah ve beyaz resme dönüştürülmüş, sonrasında siyah ve beyaz alanlar (faz oranları) programa hesaplatılmıştır.



Resim 4.1. Numunelerin üretim yönüne dik kesitleri için mikro yapı görüntüleri ve faz oranları (□ α -fazı, ■ β - fazı): (a) tavlama, (b) yeniden kristalizasyon tavlama



Resim 4.2. Numunelerin üretim yönündeki kesitleri için mikro yapı görüntüleri ve faz oranları (□ α -fazı, ■ β - fazı): (a) tavlmalı, (b) yeniden kristalizasyon tavlmalı

Tavlmalı numunenin mikro yapıları ince ve iğnemsî faz yapılarından oluşmuştur. Fazlar yeniden kristalizasyon tavlmalı numunenin fazları kadar genişleyememiştir. Çünkü tavlmalı numunelerin soğuma hızı nispeten daha fazla olmuştur. Bu mikro yapı Mower ve diğerlerinin çalışmasında [33] ortaya konulan DMLS ile üretilen numunelerin mikro yapılarıyla benzerlik göstermiştir. Ayrıca, tavlama ısı işlem sıcaklığı (790 °C) yeniden kristalizasyon tavlaması sıcaklığına (925 °C) göre daha azdır. İğnemsî yapı morfolojisi sebebiyle tavlmalı numunelerin eğilme dayanımı ve sertliği, yeniden kristalizasyon tavlmalı numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Tavlmalı numuneler için eğilme dayanımının daha yüksek olmasında en etken sebebin iğnemsî faz yapısı olduğu düşünülmüştür. Tavlama ısı işlemi, daha yüksek eğilme dayanımına olanak sağlamakla birlikte, ısı işlem sırasındaki daha düşük sıcaklık ve süre gereksinimleri sebebiyle ısı işlem maliyeti daha az olmuştur.

Yeniden kristalizasyon tavlmalı numunelerin mikro yapıları daha uzun ve geniş, plaka şekilli faz yapılarından (ing. platelike) oluşmuştur. Bu yapının elde edilmesinde yüksek ısı işlem sıcaklığı (925 °C) ana etken olmuştur [10]. Ayrıca, ısı işlem sırasında uygulanan kontrollü ve kademeli sıcaklık düşüşleri sonucunda oluşan düşük soğuma hızı da faz yapılarının genişleyebilmesi için yeterli zamanı sağlamıştır. Yeniden kristalizasyon tavlmalı numuneler için birim hacimdeki daha kaba ve daha az sayıdaki faz yapısı sebebiyle eğilme dayanımı ve sertliği hadde tavlmalı numunelere göre daha düşük bulunmuştur.

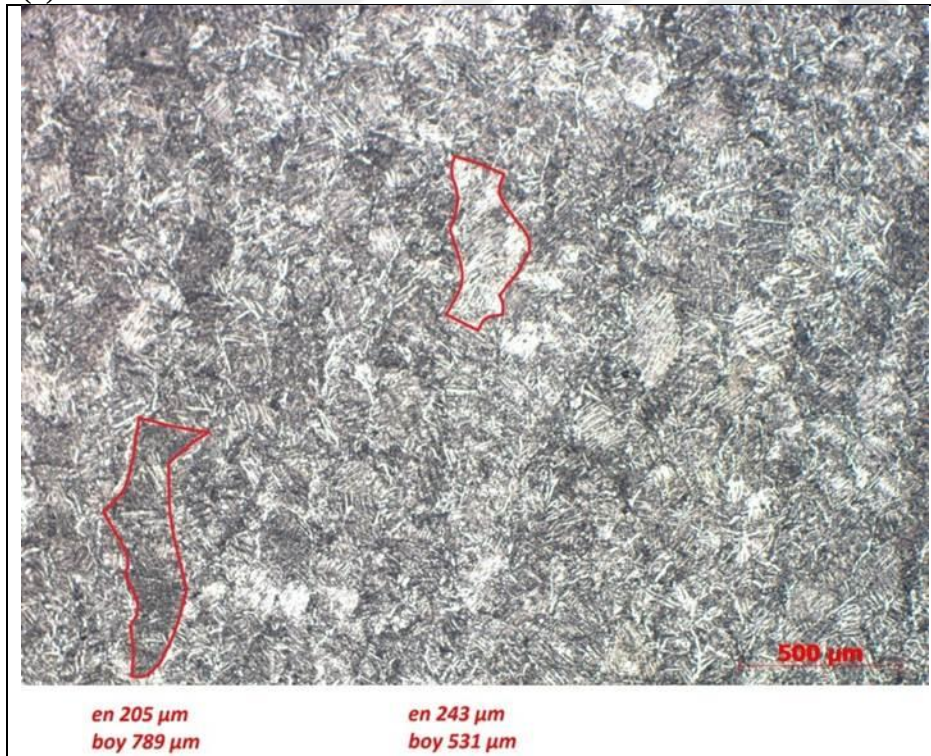
Resimler (Bkz. Resim 4.1 ve Resim 4.2) ile belirtilen mikro yapılara göre, ısıtıl işlem çeşidine istinaden faz oranları farklılık göstermiştir. Tüm mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, α -fazı oranı β - fazı oranından daha yüksek bulunmuştur. ASM Handbook Volume 2 [64] el kitabına göre de α - fazı oranının β - fazı oranından daha yüksek olması beklenmektedir. Belirtilen el kitabında oda sıcaklığındaki Ti-6Al-4V için β - fazı oranı %10-50 arasında değişebilmektedir. Mikro yapılar incelendiğinde %26-38 aralığında bulunan β -fazı oranı, el kitabında belirtilen aralık içerisinde kalmıştır.

Yeniden kristalizasyon tavlama numunelerin α -fazı oranı, tavlama numunelerinkine göre %5 daha yüksek bulunmuştur. Buna sebep olarak, yeniden kristalizasyon tavlama numunelerin ısıtıl işlem sırasında daha yavaş soğutulması ve bunun sonucunda α -lamellerinin genişleyerek daha fazla yüzey alanına sahip olması gösterilmiştir.

Farklı ısıtıl işlemlere göre tane boyutu ve yönlenmesinin nasıl oluşacağı da incelenmiştir. Resim 4.3'te belirtilen makro yapı görüntüleri incelendiğinde, her iki ısıtıl işlem çeşidi için de üretim yönüne dik kesitte tane yönlenmesi gözlenmiştir (Resim 4.3 üzerinde ikişer tane sınırı belirginleştirilmiştir). Eklemeli imalat sırasında lazerin üretim yönüne dik kesit boyunca ışın göndererek ertirme sağlanması bu kesitte tane yönlenmesi oluşturmuştur. Buradan hareketle, eklemeli imalat sırasında gerçekleşen yüksek enerji yoğunluklarının ve yüksek soğuma hızlarının makro yapıda yöne bağımlılık oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır. Üretim yönündeki kesitlerde ise tane yönlenmesi gözlenmemiştir (Resim 4.4).



(a)

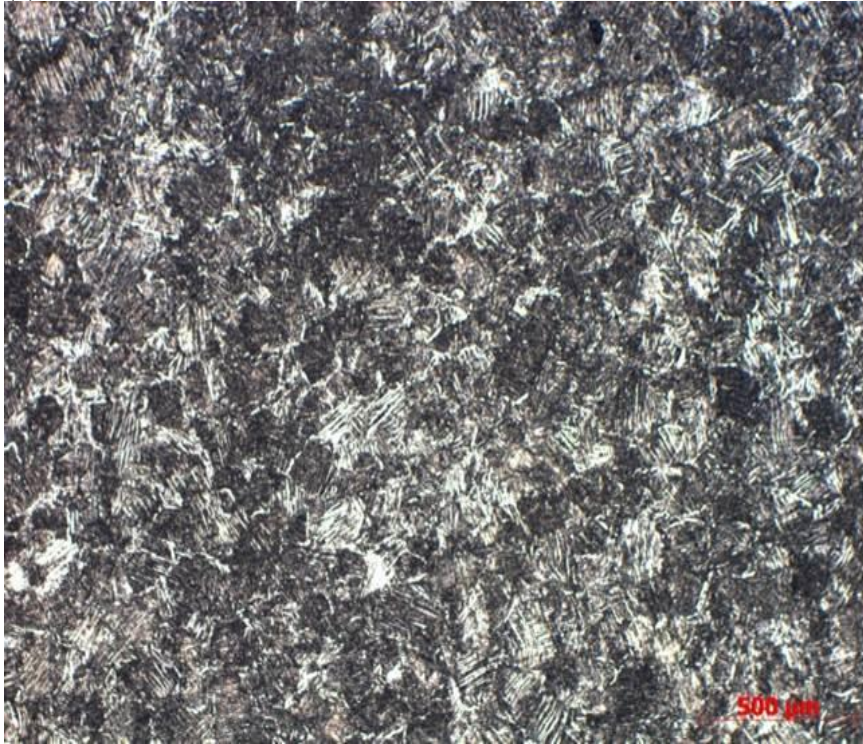


(b)

Resim 4.3. Numunelerin üretim yönüne dik kesitleri için makro yapı görüntüleri:
(a) tavlama (100X), (b) yeniden kristalizasyon tavlama (50X)



(a)



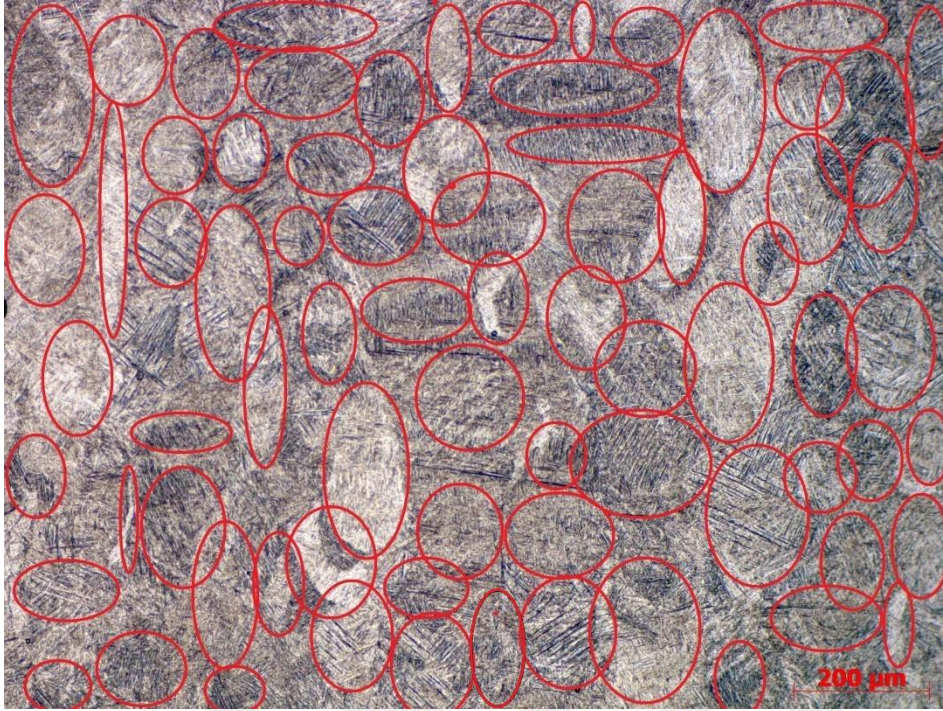
(b)

Resim 4.4. Numunelerin üretim yönündeki kesitleri için makro yapı görüntüleri:
(a) tavlama (100X), (b) yeniden kristalizasyon tavlama (50X)

Ek olarak, ASTM tane boyutu numaraları ASTM E112-13 [65] standardına göre belirlenmiştir. Bu standartla ortalama tane boyutu iki boyutlu makro yapı görselleri

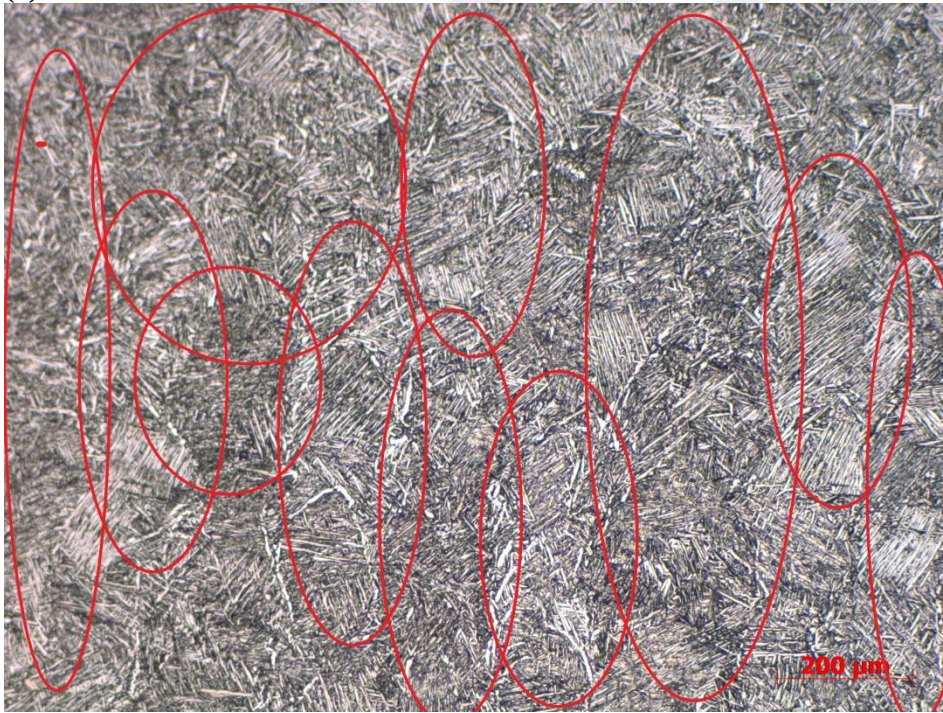
üzerinden çıkartılmıştır (Resim 4.5). Tane boyutu numaraları 100X büyütme mikroskoplarında inch^2 başına düşen ortalama tane sayısına göre hesaplanmıştır. Hesaplanan tane boyutu numaraları tavlama numuneleri için 7,25, yeniden kristalizasyon tavlama numuneleri için ise 4,46 olarak elde edilmiştir. Böylece, tavlama numunelerinin mikro yapıları daha fazla tane ve tane sınırı içerdiği için eğilme dayanımı yeniden kristalizasyon tavlama numunelerden daha yüksek bulunmuştur.





(Ortalama tane sayısı: 76)

(a)



(Ortalama tane sayısı: 11)

(b)

Resim 4.5. Numunelerin birim alandaki ortalama tane sayıları: (a) tavlama (100X), (b) yeniden kristalizasyon tavlama (100X)

4.3. Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ve eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere, tavlama numunelerin sertliği yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinkinden daha yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi, mikro yapı incelemesinden elde edildiği üzere, tavlama numunelerin daha ince ve iğnemsiz fazlardan oluşmasıdır. 280 W ve 140 µm değişken ikilisi için yapılan sertlik ölçümleri, sertlik ve eğilme dayanımının doğru orantılı olduklarını kanıtlamıştır.

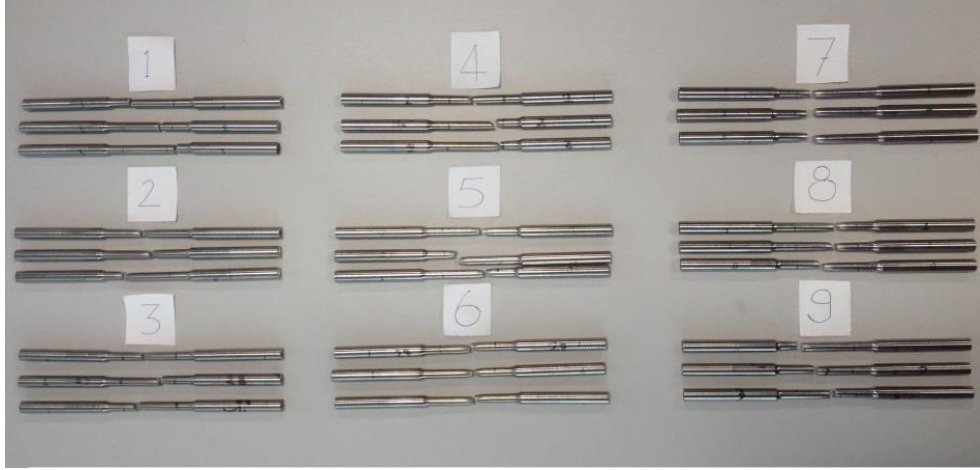
Çizelge 4.3. Sertlik ölçümlerinin sonuçları

Değişken Takımı	Sertlik (HRC)	Eğilme Dayanımı (MPa)
280T140	35,5 (SS=1,72)	2641 (SS=11,81)
280YKT140	33 (SS= 0,15)	2108 (SS=12,42)

Elde edilen sertlik sonuçları, Xie ve diğerlerinin eklemeli imalat ürünlerinin dayanımlarını araştırdıkları çalışmada [48] belirtilen sertlik değeriyle ($340,3 \text{ HV}_{10} \approx 35,7 \text{ HRC}$) tutarlı bulunmuştur. Mower ve diğerlerinin çalışmasındaki [33] iğnemsiz mikro yapısına sahip eklemeli ürünler yüksek dayanım göstermişlerdir. Sonuç olarak, sertlik ölçümleri, mikro yapı incelemeleri ve eğme testleriyle örtüşen sonuçlar veren bir gösterge olmuştur.

4.4. Çekme Testleri Sonuçları

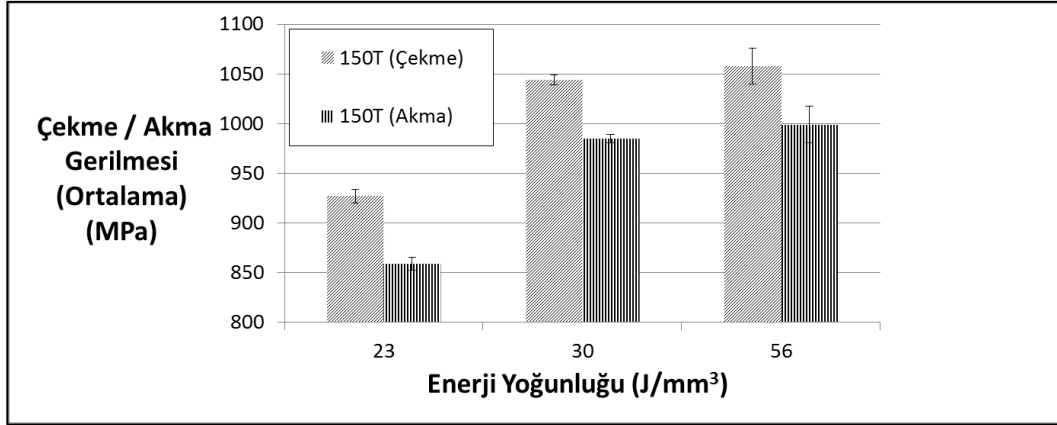
Çekme testleri başarıyla tamamlanmıştır. Çekme testi numunelerinin test sonrası görüntüsü Resim 4.6'da gösterilmektedir.



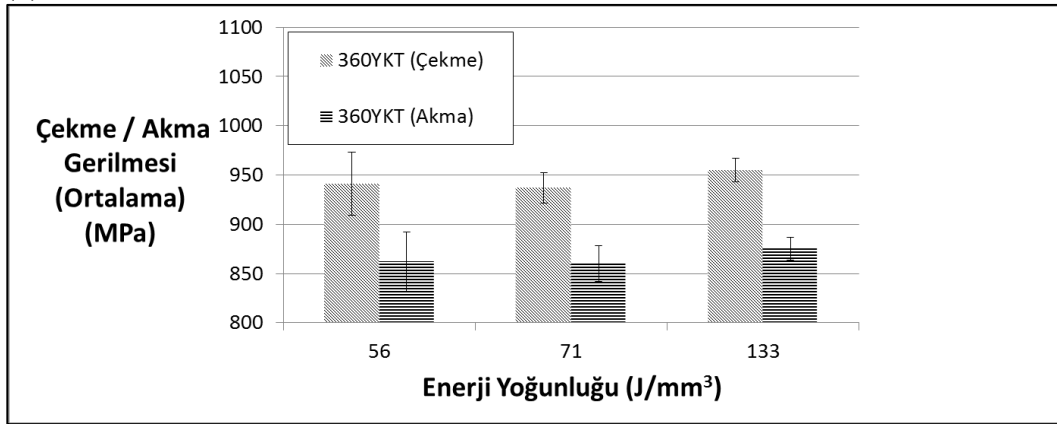
Resim 4.6. Çekme testi numuneleri (test sonrası)

Çekme testi sonuçları, uygun bir sonlu elemanlar malzeme modeli oluşturabilmek için elastik ve plastik malzeme özelliği girdileri olarak kullanılmıştır. 150T ve 360YKT numuneleri için enerji yoğunluklarına göre ortalama çekme gerilmesi ve akma gerilmesi değerlerindeki değişimler Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Örnek oluşturması açısından 150T180 test numunesi için çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim grafiği ve sonuçları EK-4 kısmında gösterilmektedir.

Çekme testlerinin sonuçlarına göre elde edilen dayanım değerleri ASTM F3001-14 [66] standardında belirtilen en az çekme ve akma gerilmesi değerlerini fazlasıyla sağlamıştır. Çekme testlerinden elde edilen en düşük çekme gerilmesi 904 MPa, en düşük akma gerilmesi 829 MPa bulunmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.8. Enerji yoğunluğuna göre ortalama çekme ve akma gerilmesinin değişimi: (a) 150T numuneleri, (b) 360YKT numuneleri

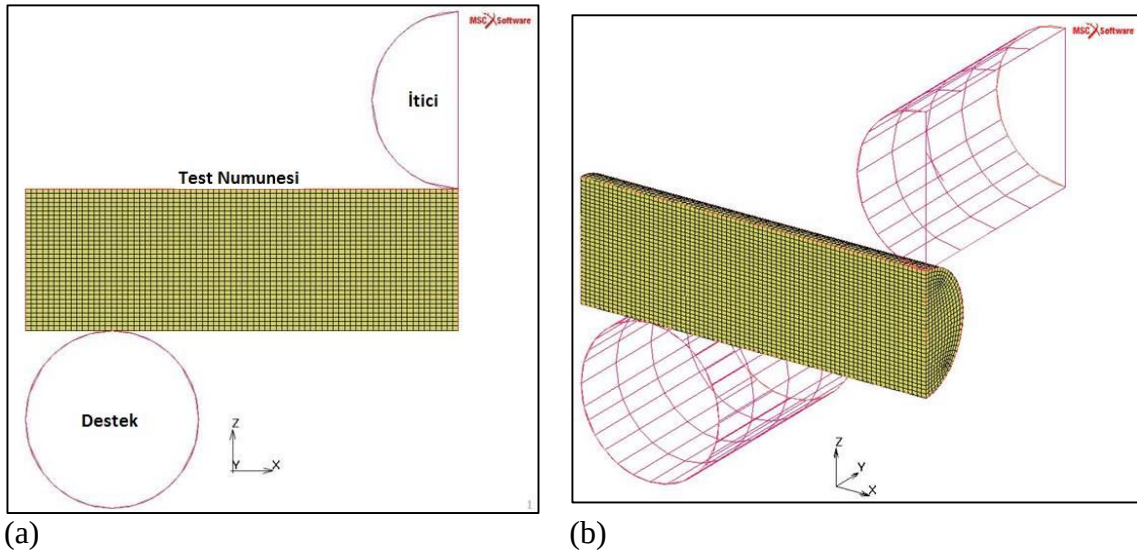
Şekil 4.8’de gösterilen grafikler incelendiğinde, 150T numuneleri için enerji yoğunluğu 23 J/mm³ değerinden 30 J/mm³ ve 56 J/mm³ değerine arttırıldığında, ortalama çekme ve akma gerilmesi değerlerinin arttığı görülmüştür. Düşük enerji yoğunluğunun (23 J/mm³) numunelerin daha çok boşluklu oluşmasına sebep olması sebebiyle ortalama çekme ve akma gerilmesi değerlerinin daha düşük elde edildiği düşünülmüştür. 360YKT numunelerinin ortalama çekme ve akma gerilmesi değerleri ise 56 J/mm³ ve üzerindeki enerji yoğunluğu değerleri (71 J/mm³ ve 133 J/mm³) için yaklaşık aynı çıkmıştır. Buradan hareketle enerji yoğunluğu değeri tezgâhın ideal değeri olan 56 J/mm³ değerine eşit veya bu değerin üzerinde kaldığı sürece numunelerin ortalama çekme ve akma gerilmesi değerlerinin yakın sonuçlar vereceği öngörülmüştür.

5. EĞME TESTİ NUMUNELERİ İÇİN SEA MODELİNİN TASARIMI

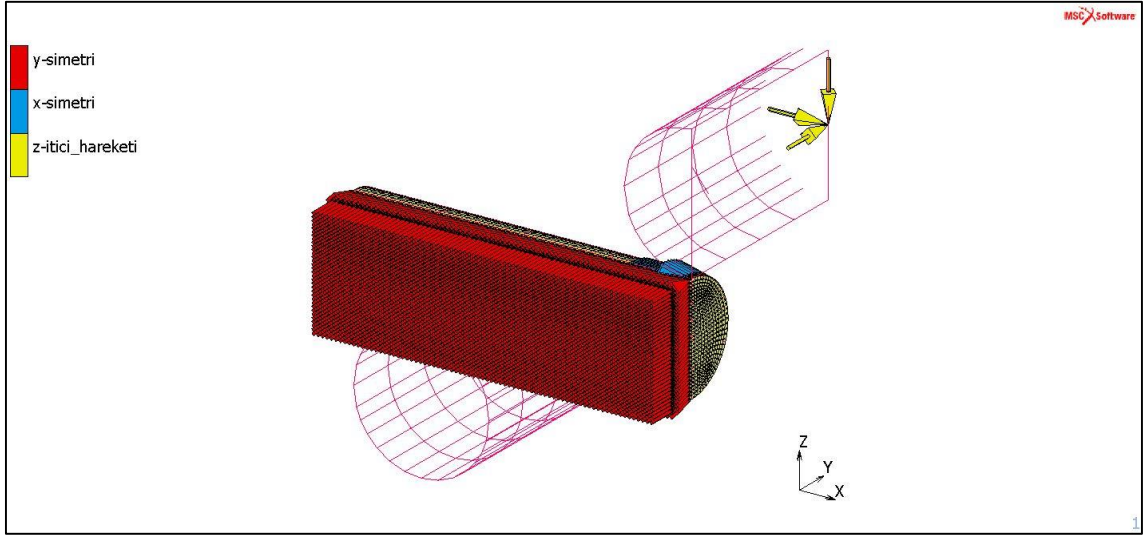
Sonlu elemanlar analizleri, eğme testleri tamamlanan test numunelerinin sonuçlarını bilgisayar tabanlı benzetim ortamında elde edebilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, çok sayıda eğme testleri gerçekleştirmeye ihtiyaç duymadan farklı eklemeli imalat değişkenlerinin dayanıma etkisinin araştırılmasına olanak sağlamak istenmiştir. Bu kapsamda, eklemeli imalata uygun üretim ve ısıtılma işlem değişkenleriyle imal edilmiş test numunelerinin üç nokta eğme testleri sonlu elemanlar analizleriyle doğrulanmıştır.

5.1. Test Numunelerinin Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli sırasıyla MSC Mentat ve Marc programları kullanılarak oluşturulmuş ve çözümlenmiştir. Düzlemsel simetri koşulları kullanılarak bütün model yerine çeyrek model kullanılmıştır (Resim 5.1). Simetri düzlemleri üzerinde bulunan düğüm noktalarında (ing. nodes) x ve y eksenleri boyunca uygulanan sabitleme sınır koşulu ve iticinin z eksenini boyunca hareketinin oluşturulduğu kontrol noktası Resim 5.2’de gösterilmektedir. Test numunelerinin boyutlarını çeyrek ölçekli bir modelle temsil ederek, sonlu elemanlar programının üzerinde işlem yapması gereken eleman sayısı azaltılmış, böylece çözümlemenin yaklaşık olarak dört kat hızlanması sağlanmıştır.

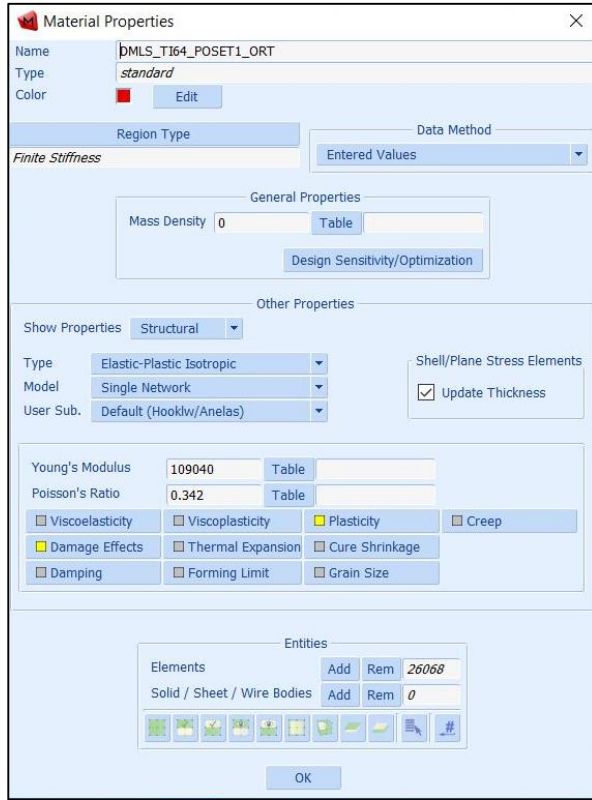


Resim 5.1. Test numunesinin çeyrek sonlu elemanlar modeli: (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş

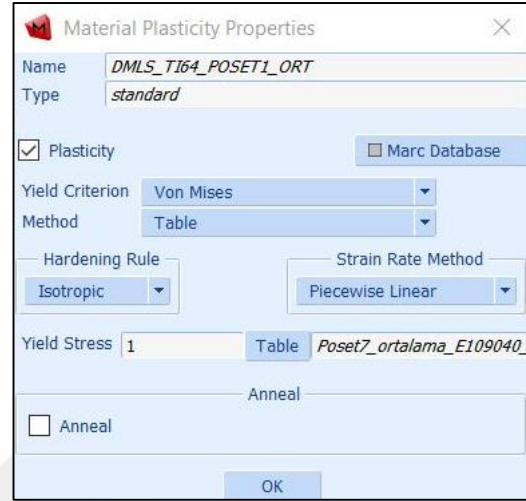


Resim 5.2. Test numunesi SEA modelinin sınır şartları

Modelde 26 068 sonlu eleman ile 29 184 düğüm noktası oluşturulmuştur. Eleman tipi olarak Eleman 117 (3 boyutlu 8 düğüm noktalı kübik eleman) kullanılmıştır. Yüksek şekil değiştirmeli eğilme problemine uygun olarak doğrusal olmayan yüksek gerinim yöntemi (ing. large strain nonlinear procedure) seçilerek, sürtünmeli temas ve elastik-plastik malzeme modeli uygulanmıştır. Elastik ve plastik özellikleri içeren doğrusal olmayan malzeme modeli, Bölüm 4.4'te belirtilen çekme testi sonuçlarına göre oluşturulmuştur (Resim 5.3).



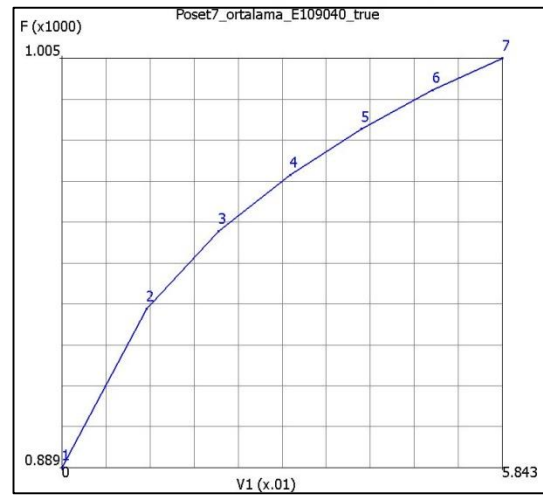
(a)



(b)



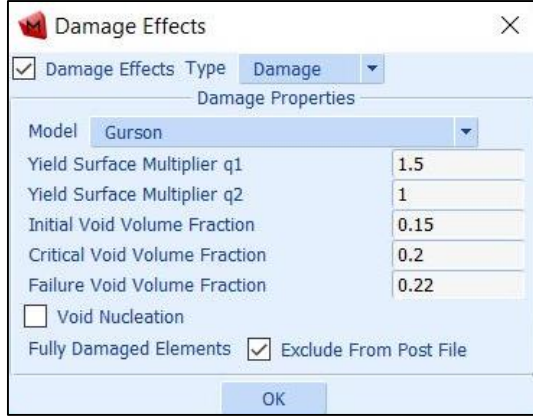
(c)



(d)

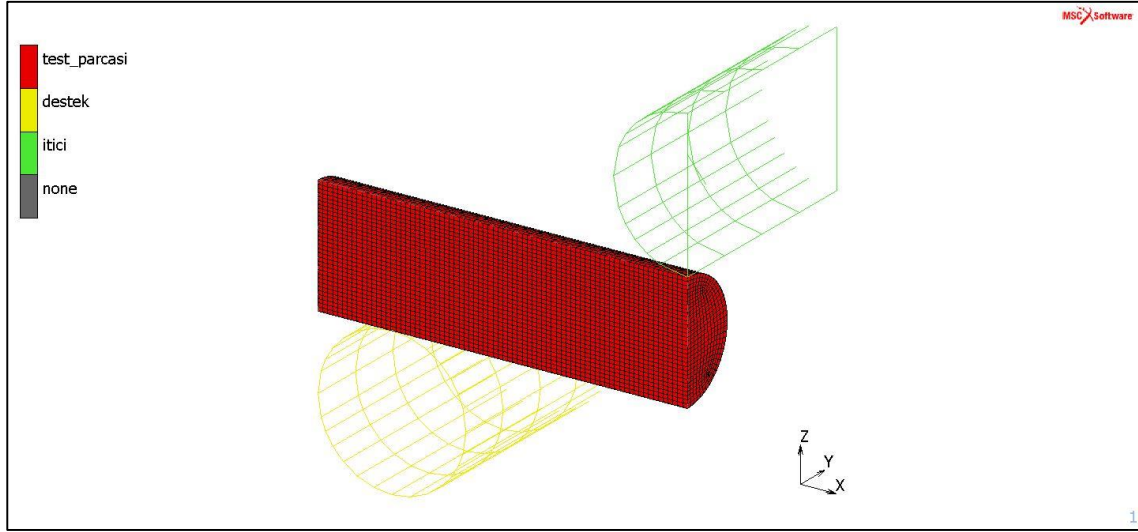
Resim 5.3. SEA malzeme modeli için program girdileri: (a) esneklik modülü ve poisson oranı, (b) plastik özelliğin tanımlanması, (c) gerilme-gerinim eğrisinin tabloyla tanımlanması, (d) gerilme-gerinim eğrisinin grafiği

Elastik-plastik malzeme özelliğine ek olarak, test sırasında numuneler üzerinde kırılma gerçekleştiği için malzeme modeline hasar (ing. damage) özellikleri de eklenmiştir. Hasar modeli ve değişkenleri MSC Marc programının Ti-6Al-4V malzemesi için önerdiği değişkenlerle tanımlanmıştır (Resim 5.4).

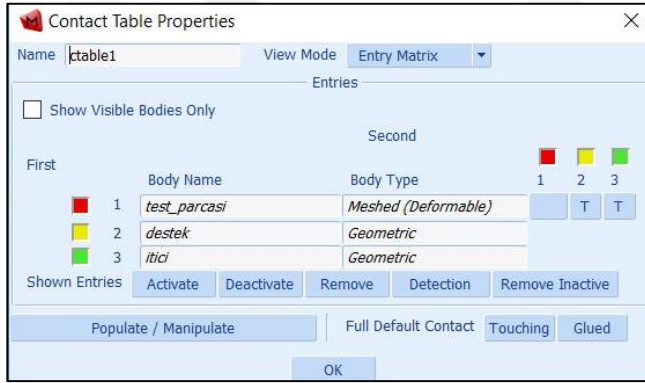


Resim 5.4. Malzeme modelinin hasar kısıtı ve değişkenleri

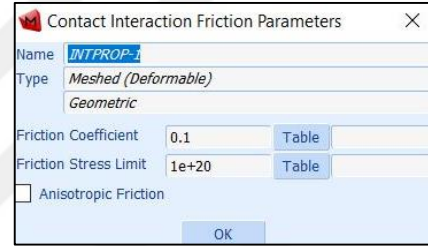
Test numuneleriyle itici ve destekler arasındaki sürtünmeli temas, test numuneleri esneyebilen parça (ing. deformable body), itici ve destekler esnemez parça (ing. rigid body) olarak tanımlanarak modellenmiştir (Resim 5.5). Test parçası üzerinde oluşabilecek aşırı ezilmenin önüne geçebilmek için temas düşük sürtünmeli kabul edilmiştir (Resim 5.5 (c)). Ayrıca temas toleransı değeri, kullanılan en küçük sonlu eleman uzunluğunun %5'i olarak tanımlanmıştır.



(a)



(b)



(c)

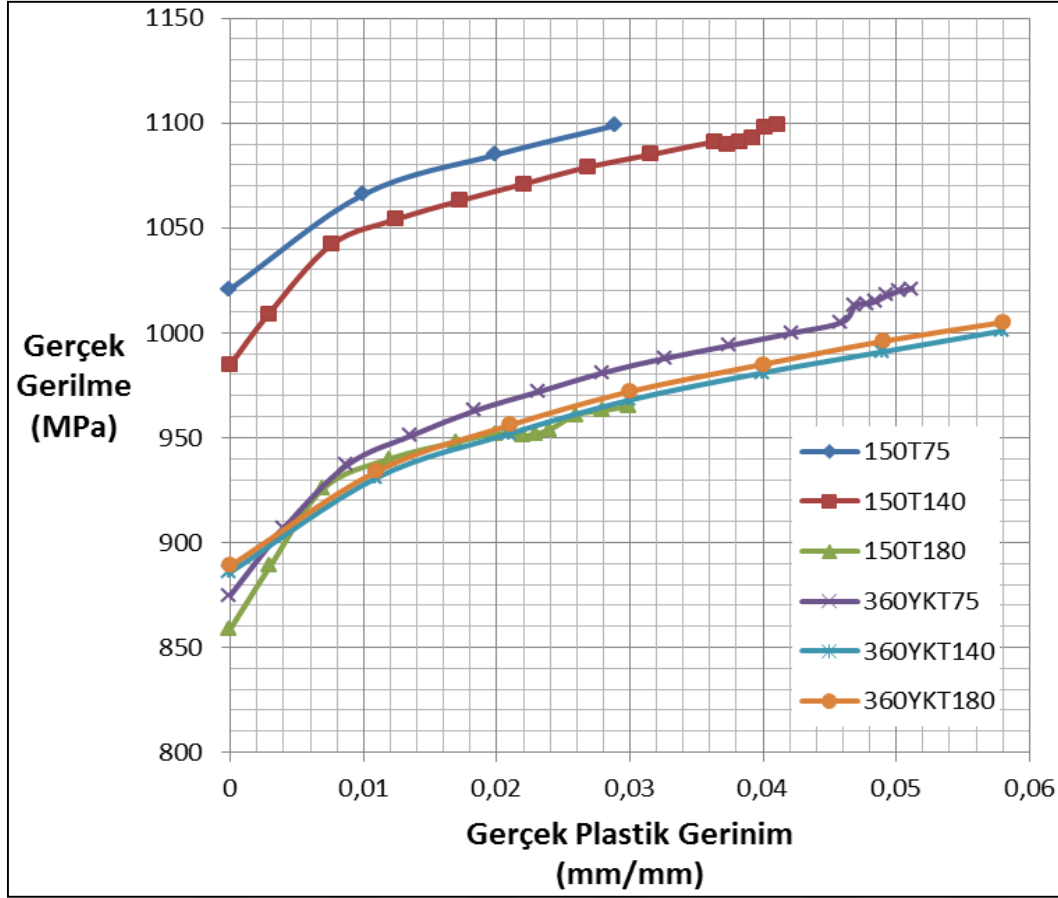
Resim 5.5. SEA modelinde tanımlanan temas özellikleri: (a) temastaki bileşenler, (b) bileşenlerin temas gövde tipleri, (c) temas sürtünme katsayısı

Eğme testi sonuçları sonlu elemanlar analiziyle kıyaslanan numunelerin imalat değişkenleri ve ısıtılma işlem türleri Çizelge 5.1’de belirtilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere, eğme testlerinin gerçekleştirildiği 9 farklı değişken takımı içerisinde 6 değişken takımının eğme testi sonuçları sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılabilmiştir. Bunun sebebi, bütçenin 54 adet yerine 27 adet çekme testi numunesinin üretilmesine olanak sağlayarak, tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama ısıtılma işlemlerinin sırasıyla 150 W ve 360 W lazer gücü değerleriyle üretilmiş test numunelerine uygulanabilmiş olmasıdır. Ancak, sonlu elemanlar analiziyle doğrulama çalışması için 6 değişken takımının kullanılması yeterli bulunmuştur.

Çizelge 5.1. Eğme testi sonuçları sonlu elemanlar analiziyle kıyaslanan numunelerin değişkenleri ve numunelerin kodları

İmalat Değişkenleri (Lazer Gücü (W) - Tarama Aralığı (μm))	Isıl İşlem	Numune Kodları
150 - 75	Tavlama	150T75
150 - 140		150T140
150 - 180		150T180
360 - 75	Yeniden Kristalizasyon Tavlama	360YKT75
360 - 140		360YKT140
360 - 180		360YKT180

SEA için oluşturulan malzeme modelinde, gerçek gerilme-gerçek gerinim (ing. true stress-true strain) eğrileri, çekme gerilmesi değerine kadar tanımlanmıştır. Çekme gerilmesinden sonraki düşüş yakınsama sorunlarına sebep olduğu için dâhil edilmemiştir. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre, sonlu elemanlar analizlerinde malzeme verisi olarak kullanılmak üzere hesaplanan gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan gerçek gerilme-gerinim eğrileri

5.2. Test Numunelerinin Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar modelinin çözümlemesinde doğrusal olmayan modellerin analizleri için geliştirilmiş MSC Marc çözücüsü kullanılmıştır. Analizlerin çözüm süresi incelendiğinde, bir analiz paralel işlemciyle 16 çekirdek kullanıldığı durumda yaklaşık 33 dakika sürmüştür.

Analizler sonucunda elde edilen eğilme gerilmesi değerleriyle testlerden elde edilen eğilme gerilmesi değerleri arasındaki fark ortalama olarak %11,6 bulunmuştur. Sonlu elemanlar analiziyle test sonuçları arasındaki %10-15 arasındaki bir fark modelleme açısından iyi bir uyum (ing. correlation) olarak değerlendirilmektedir [67]. Sonlu elemanlar modelinin yüksek deformasyon, temas ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri gibi doğrusallığı bozan unsurlar içermesi, analizle test arasındaki farkın başlıca sebepleri olarak görülmüştür. Bu tür doğrusal olmayan etkiler olmasına rağmen, analiz benzetimleri korunumlu tarafta kalacak şekilde test verileriyle oldukça tutarlı sonuçlar vermiştir.

Çizelge 5.2. Analizler ve testlerden elde edilen eğilme dayanımı değerleri

Değişken Takımı	Analiz (MPa)	Test (MPa)	Fark (%)
150T75	2254	2620 (SS= 17)	13,9
150T140	2143	2507 (SS= 85)	14,5
150T180	1931	2103 (SS= 124)	8,2
360YKT75	2009	2232 (SS= 11)	10,1
360YKT140	1954	2228 (SS= 52)	12,3
360YKT180	1919	2143 (SS= 21)	10,5
Ortalama			11,6



6. KEMİK PLAĞI İÇİN SEA VE ENİYİLEME ÇALIŞMALARI

Üç nokta eğme testleri ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak test numuneleri üzerinden eklemeli imalat değişkenlerinin eğilme davranışına etkilerinin belirlenmeye çalışıldığı yöntem, daha önceden DMLS eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş ve dört nokta eğme testleri tamamlanmış bir humerus kemik plağı üzerinde uygulanmıştır. Eğme testi numuneleri için hazırlanan sonlu elemanlar modeli yapısı kullanılarak, kemik plağının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve plak için gerçekleştirilen dört nokta eğme testleri sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır. Mevcut kemik plağının yapısal eniyileme (ing. structural optimization) yöntemiyle aynı yüklere dayanabilecek daha hafif ve geleneksel üretim yöntemlerinden ziyade eklemeli imalatla üretilebilecek boşaltmalara sahip daha hafif bir geometriye sahip modeli oluşturulmuştur. Eniyilenen modelin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulaması yapıldıktan sonra, eklemeli imalat yöntemiyle üretilerek dört nokta eğme testleriyle geçerlemesi (ing. validation) yapılmıştır.

6.1. Kemik Plağı Üretimleri

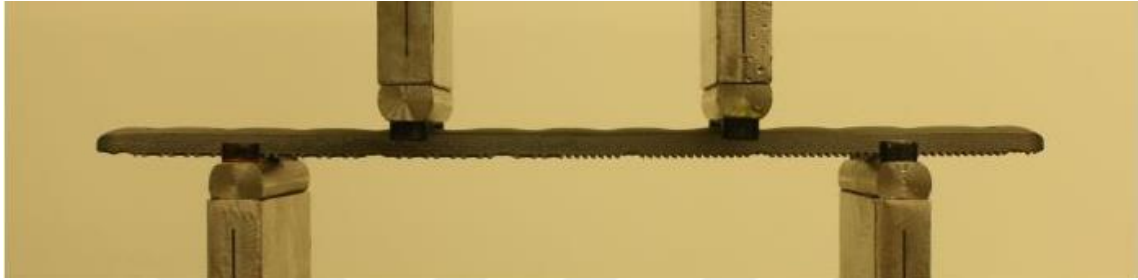
Dört adet kemik plağı, EOSINT M280 (EOS GmbH, Almanya) eklemeli imalat cihazında Çizelge 6.1’de gösterilen değişkenler kullanılarak üretilmiştir. Eş. (2.1)’e göre eklemeli imalat sırasında oluşan enerji yoğunluğu $44,4 \text{ J/mm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Isıl işlem argon koruyucu gaz atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Kemik plakları imalat tablası üzerinde yatay olarak konumlandırılmışlardır.

Çizelge 6.1. Kemik plağı eklemeli imalat değişkenleri

Üretim Değişkenleri	Isıl İşlem Değişkenleri	Tabla Üzerindeki Konumlandırma
Lazer Gücü: 200 W Tarama Aralığı: 120 μm Tarama Hızı: 1250 mm/sn Katman Kalınlığı: 30 μm	900°C 4 saat, Fırında Soğutma (argon atmosferi altında)	Yatay (kanallar yukarı bakacak şekilde)

6.2. Kemik Plağı Eğme Testleri

Kemik plaklarına ASTM F382-99 (2008) [46] standardına uygun olarak INSTRON 3369 (ITW, ABD) basma test cihazıyla dört nokta eğme testleri yapılmıştır. Testlerde dört ayrı plağa statik eğme testleri yapılmıştır. Test edilen bir kemik plağına ait test öncesi ve sonrası görseller Resim 6.1 ve Resim 6.2’de gösterilmektedir.



Resim 6.1. Kemik plağı dört nokta eğme testi (test öncesi)



Resim 6.2. Kemik plağı dört nokta eğme testi (test sonrası)

Kemik plaklarının dört nokta eğme testleri sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri Çizelge 6.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.2. Kemik plakları eğme testi sonuçları

Kemik Plağı	Eğilme Dayanımı (Nm)	Eğilme Yapısal Direngenliği (kNm ²)
1	21,93	5,85
2	22,79	5,55
3	21,03	5,46
4	22,62	6,00
Ortalama	22,09	5,71
SS	0,80	0,25

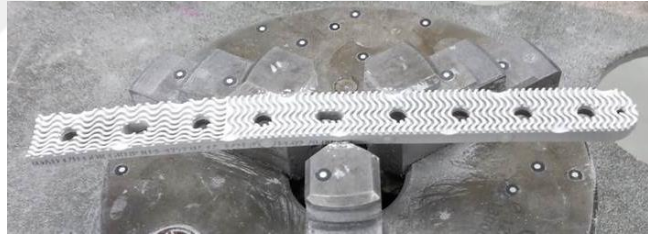
6.3. Kemik Plağı Sonlu Elemanlar Modeli

Eğme testleri tamamlanan kemik plaklarının eğilme dayanımı sonuçlarını bilgisayar tabanlı benzetim ortamında elde edebilmek amacıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Eğme testi numuneleri kullanılarak elde edilen sonlu elemanlar modeli güncellenerek kemik plaklarının dört nokta eğme testleri yine sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla bilgisayar ortamında doğrulanmıştır.

Dört nokta eğme testleri sırasında şekil değişimine uğramış bir kemik plağı üç boyutlu taranmıştır (Resim 6.3). Kemik plağının sonlu elemanlar modelini oluşturabilmek için kemik plağının katı modeli, tarama verileri ve Unigraphics NX programı kullanılarak katı modelleme yöntemiyle oluşturulmuştur.



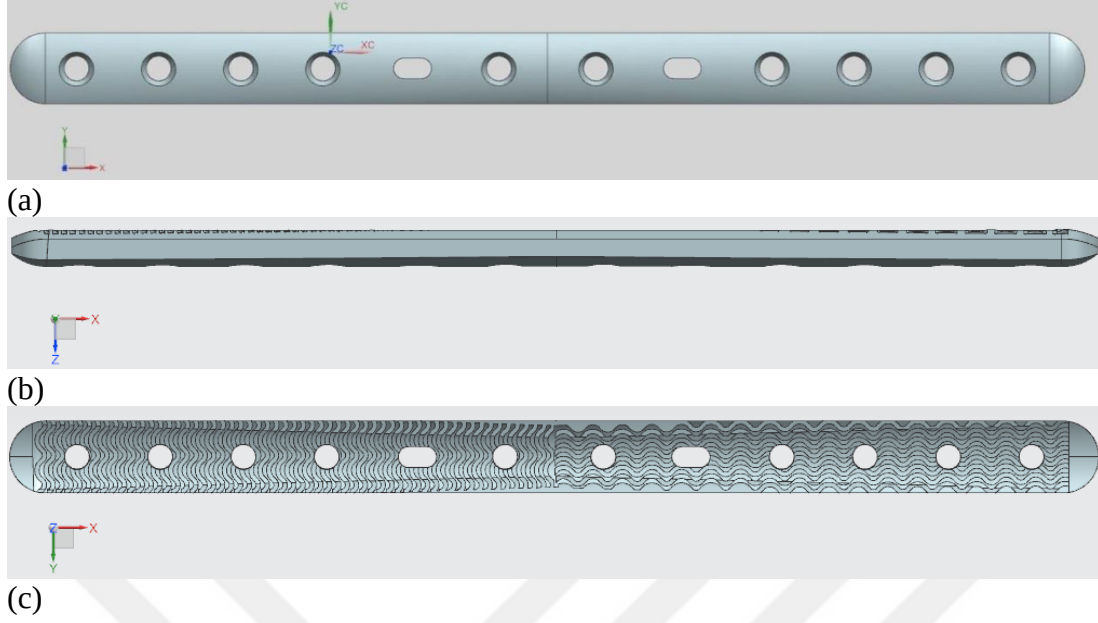
(a)



(b)

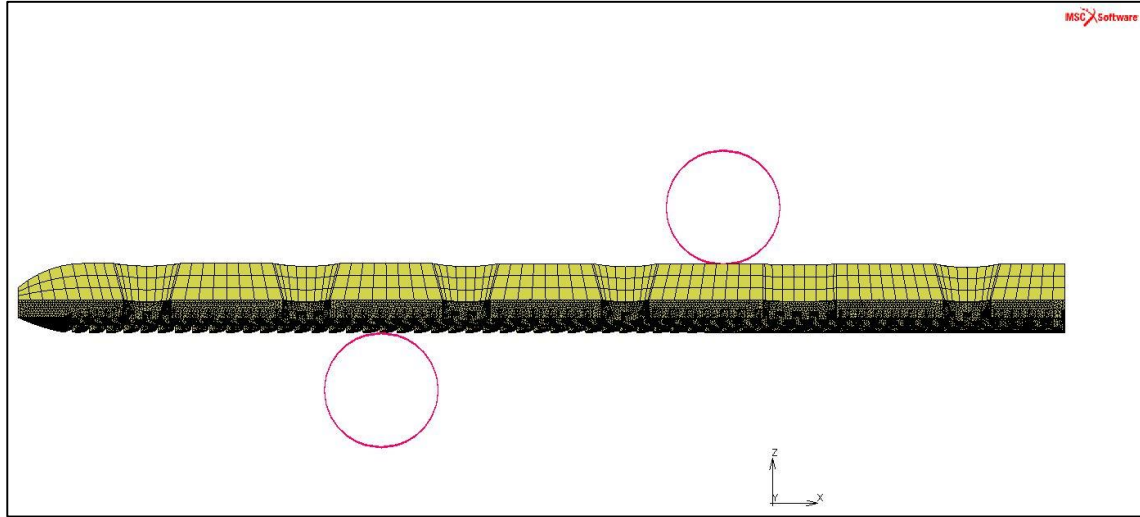
Resim 6.3. Kemik plağının üç boyutlu olarak taranması: (a) genel görünüş, (b) kemik plağı

Kemik plağı için oluşturulan katı model Resim 6.4'te gösterilmektedir.

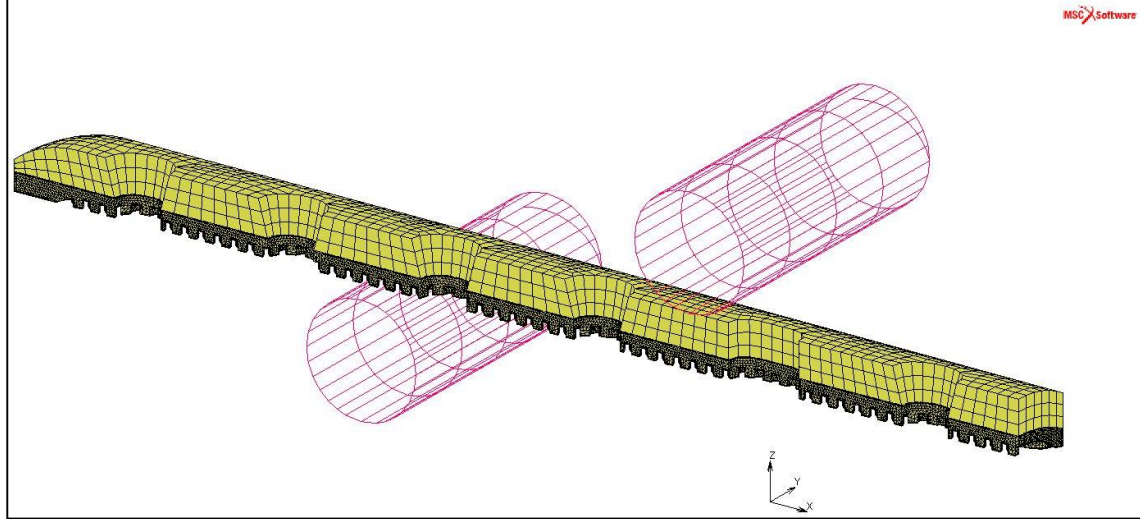


Resim 6.4. Kemik plağının katı modeli: (a) alttan görünüş, (b) yandan görünüş, (c) üstten görünüş

Kemik plağının sonlu elemanlar modeli MSC Mentat programı kullanılarak ve simetri koşullarına uygunluk kabulü yapılarak, bütün yerine çeyrek boyutlu olarak oluşturulmuştur (Resim 6.5). Testlerde uygulanan sınır koşulları, temas şartları ve malzeme özellikleri benzetim ortamında temsil edilmiştir. Model içerisinde 54 069 düğüm noktası ve 212 367 sonlu eleman oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar olarak MSC Marc Eleman 117 (3 boyutlu 8 düğüm noktalı kübik eleman) ve Eleman 134 (3 boyutlu 4 düğüm noktalı piramit eleman) eleman tipleri kullanılmıştır. Yüksek deformasyonlu eğilme problemine uygun analiz yöntemi seçilerek, sürtünmeli temas ve elastik, plastik ve hasar malzeme modelleri tanımlanmıştır.



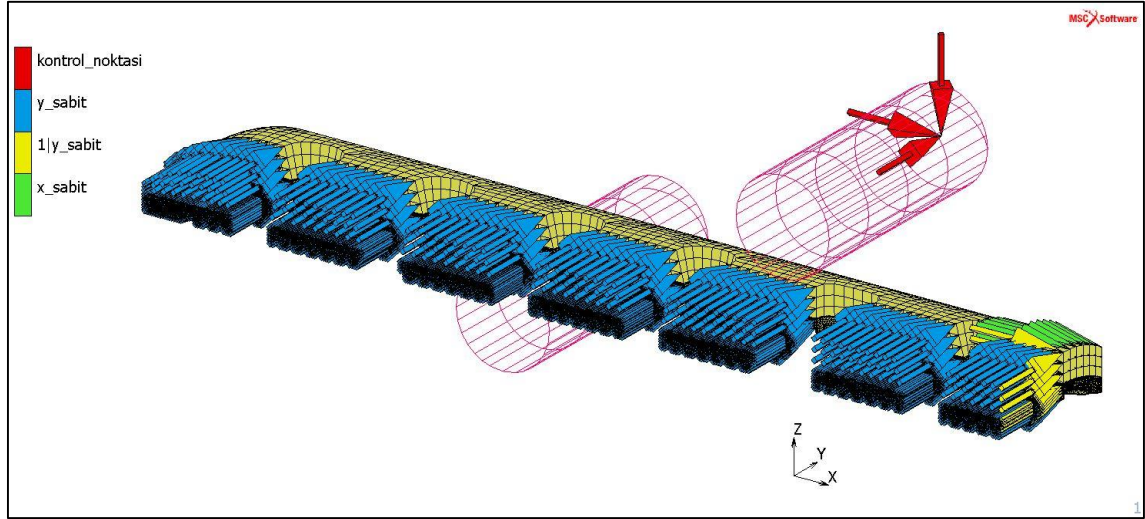
(a)



(b)

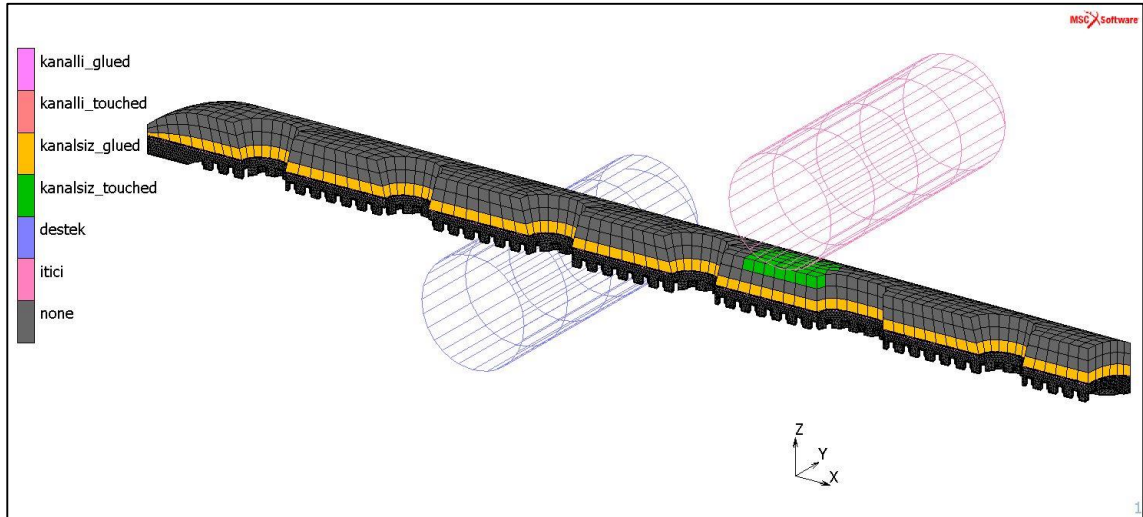
Resim 6.5. Kemik plağının çeyrek sonlu elemanlar modeli: (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş

Çeyrek analiz modelinin ara yüz düğüm noktalarının x ve y eksenleri boyunca sabitlenerek oluşturulduğu düzlemsel simetri sınır şartı ve itici hareketinin sağlandığı kontrol noktası sınır şartı Resim 6.6'da gösterilmektedir. Bütün modelleme yerine uygun sınır koşullarının programa girilmesiyle aynı sonuçları verebilecek çeyrek modelleme yapılmıştır. Böylece daha az eleman sayısı ile çözüm süresi kısalmıştır. Bir analiz paralel işlemciyle sekiz çekirdek kullanıldığı durumda yaklaşık 16 dakika sürmüştür. Çözümlemeler MSC Marc çözücüsüyle gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.6. Kemik plağı analiz modelinin sınır koşulları

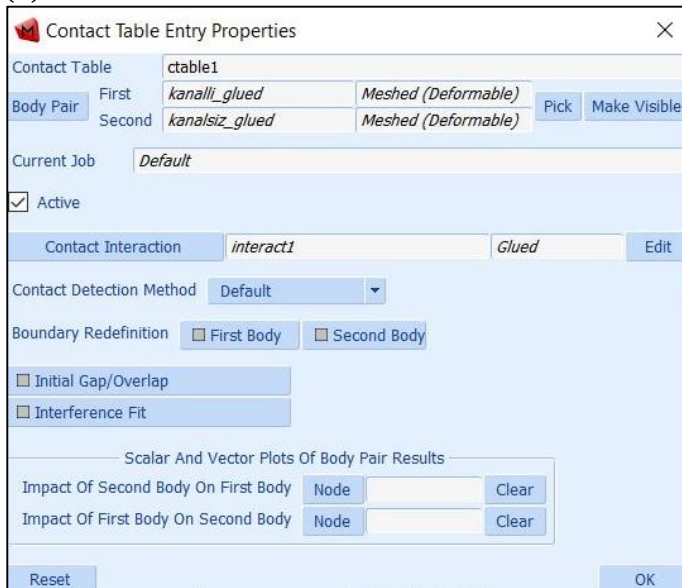
Dört nokta eğme testleri sırasında kemik plağıyla itici ve destekler arasında oluşan sürtünmeli temasın bileşenleri Resim 6.7’de gösterilmektedir. Kemik plağı esneyebilen parça, itici ve destekler esnemez parça olarak tanımlanarak modellenmiştir. Kemik plağı üzerinde oluşabilecek aşırı ezilmenin önüne geçebilmek için temas düşük sürtünmeli kabul edilmiştir (Resim 6.7(c)). İtici-kemik plağı ve kemik plağı-destek arasındaki sürtünme, yerel (ing. local) bir grup eleman üzerinden tanımlanarak çözüm süresi kısaltılmıştır. Ayrıca, kemik plağının üzerinde bulunan ince kanallı yüzeylerin sonlu elemanları Eleman 134 tipi piramit elemanlarla oluşturulabildiği için kemik plağı kanallı kısım ve kanalsız kısım olarak ikiye bölünerek aralarında kalıcı yapışma (ing. permanent glue) tanımlanmıştır (Resim 6.7 (d)).



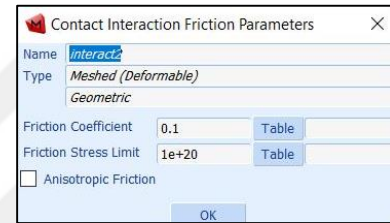
(a)



(b)



(d)



(c)

Resim 6.7. Kemik plağı SEA modelinde tanımlanan temas özellikleri: (a) temastaki bileşenler, (b) bileşenlerin temas gövde tipleri, (c) temas sürtünme katsayısı, (d) kalıcı yapışmanın tanımlanması

Kemik plağının SEA modeli içerisindeki malzeme özelliklerini tam olarak tanımlayabilmek için kemik plağının imalat değişkenleriyle aynı değişkenler kullanılarak çekme testi numuneleri üretilmiştir. Üç adet çekme testi numunesi EOSINT M280 (EOS GmbH, Almanya) cihazıyla 10 mm çapında ve 175 mm boyunda imal edildikten sonra ASTM E8-16a [60] standardına göre 6 mm ölçüm çapı ve 30 mm ölçüm uzunluğu olan geometrik boyuta tornalanıp Instron 5982 (ITW, ABD) çekme cihazıyla test edilmiştir (Resim 6.8).





(a)



(b)

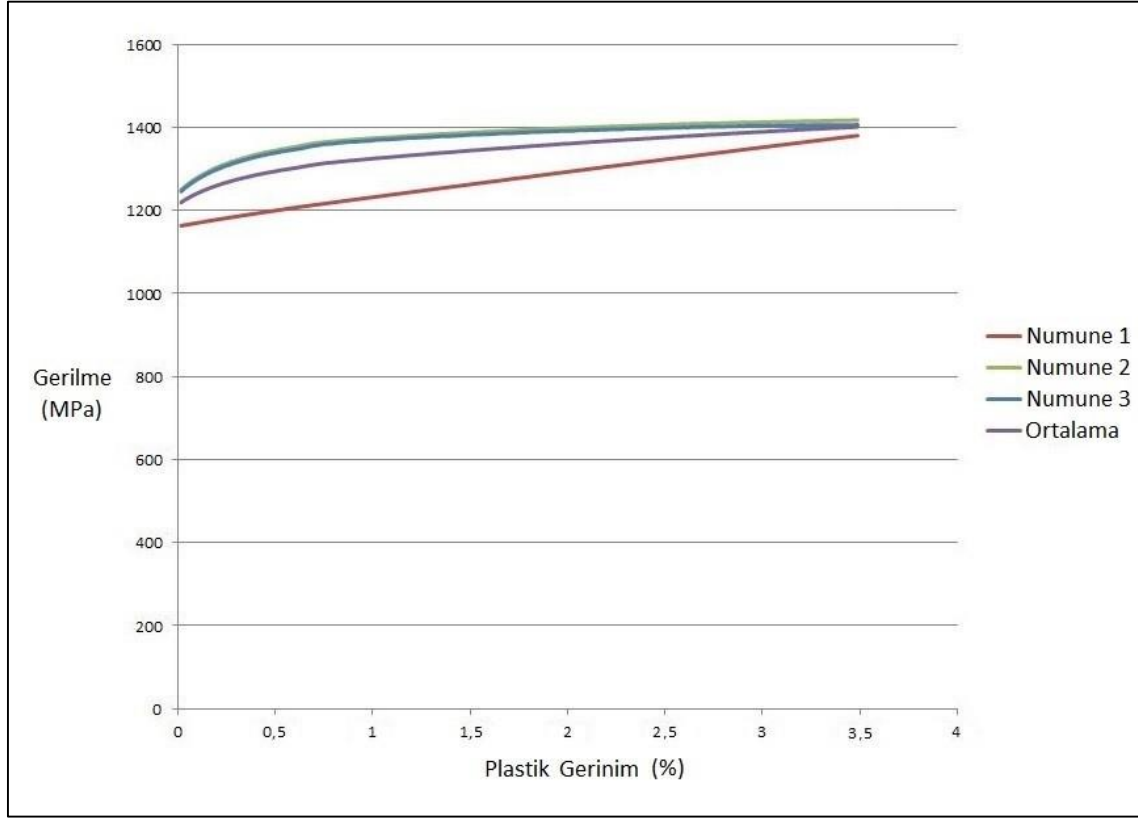


(c)

Resim 6.8. Kemik plaklarının çekme testi numuneleri: (a) eklemeli imalat sonrası, (b) çekme testi öncesi, (c) çekme testi sonrası

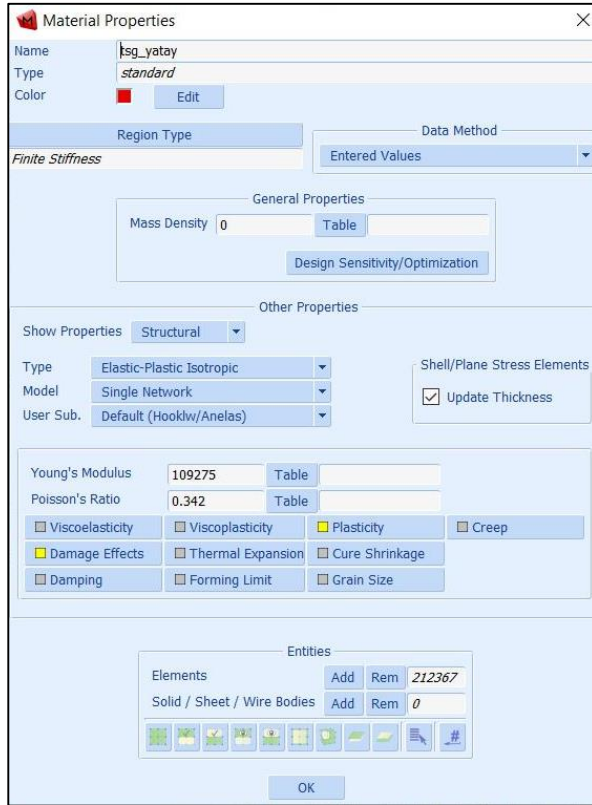
Kemik plaklarının çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinin plastik bölge davranışları ve bu eğrilerin analizlerde kullanılan ortalama eğrisi Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Bu eğrilerin elastik kısımlarının incelenmesi sonucunda ortalama esneklik modülü 109,2 GPa elde edilmiştir. Referans esneklik modülü değeri olarak, MIL-HDBK-5J

[68] standardında belirtilen AMS 4928 standardına göre hadde ürünü ve tavllanmış Ti-6Al-4V için 116,5 GPa değeri göz önünde bulundurulduğunda, test verilerinin hadde ürün standardına yakın sonuçlar verdiği bulunmuştur.

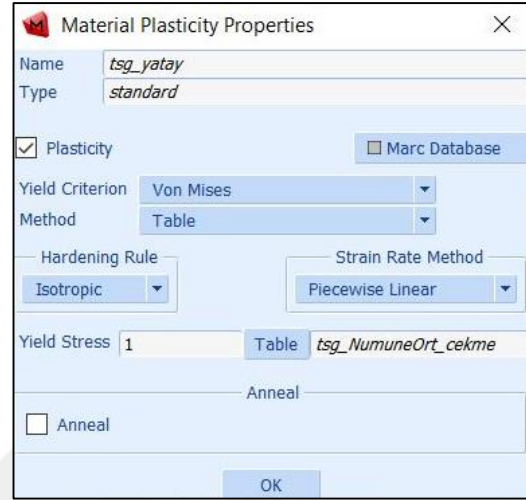


Şekil 6.1 Kemik plaklarının çekme testleri sonucundaki gerilme-plastik gerinim eğrileri

Elastik ve plastik özellikleri içeren doğrusal olmayan malzeme modeli, yukarıda belirtilen çekme testi sonuçlarına göre oluşturulmuştur (Resim 6.9).



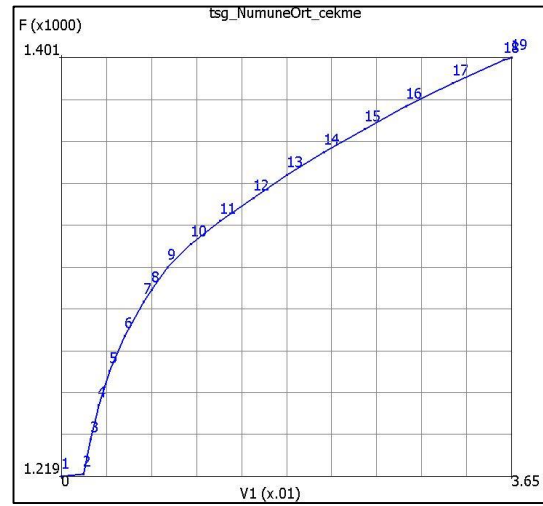
(a)



(b)



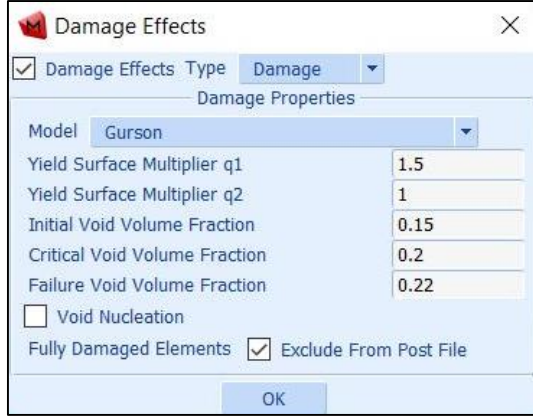
(c)



(d)

Resim 6.9. Başlangıç kemik plağı SEA malzeme modeli için program girdileri: (a) esneklik modülü ve poisson oranı, (b) plastik özelliğin tanımlanması, (c) gerilme-gerinim eğrisinin tabloyla tanımlanması, (d) gerilme-gerinim eğrisinin grafiği

Elastik-plastik malzeme özelliğine ek olarak, test sırasında numuneler üzerinde kırılma gerçekleştiği için malzeme modeline hasar özellikleri de eklenmiştir. Hasar modeli ve değişkenleri MSC Marc programının Ti-6Al-4V malzemesi için önerdiği değişkenlerle tanımlanmıştır (Resim 6.10).



Resim 6.10. Malzeme modelinin hasar kıstası ve değişkenleri

6.4. Kemik Plaklarının Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değeriyle testlerden elde edilen ortalama dayanım değeri arasındaki fark %9 olarak bulunmuştur. Test ve analiz sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri Çizelge 6.3'te belirtilmektedir.

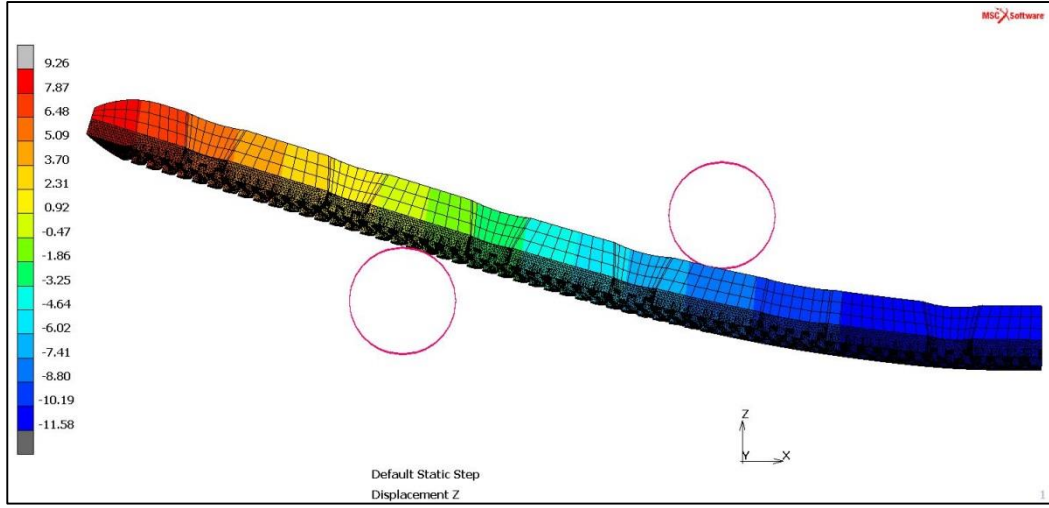
Çizelge 6.3. Analiz ve testin eğilme dayanımı karşılaştırması

Analiz (Nm)	Test (Ortalama) (Nm)	Fark (%)
20,08	22,09 (SS= 0,80)	9

Kemik plağının yer değiştirme şekliyle analiz sonucu elde edilen z yönündeki yer değiştirme görseli uyumlu bulunmuştur (Resim 6.11).



(a)



(b)

Resim 6.11. Yer değıştirme karakteristikleri: (a) test parçası, (b) analiz modeli

6.5. Kemik Plağının Eniyileme Çalışması

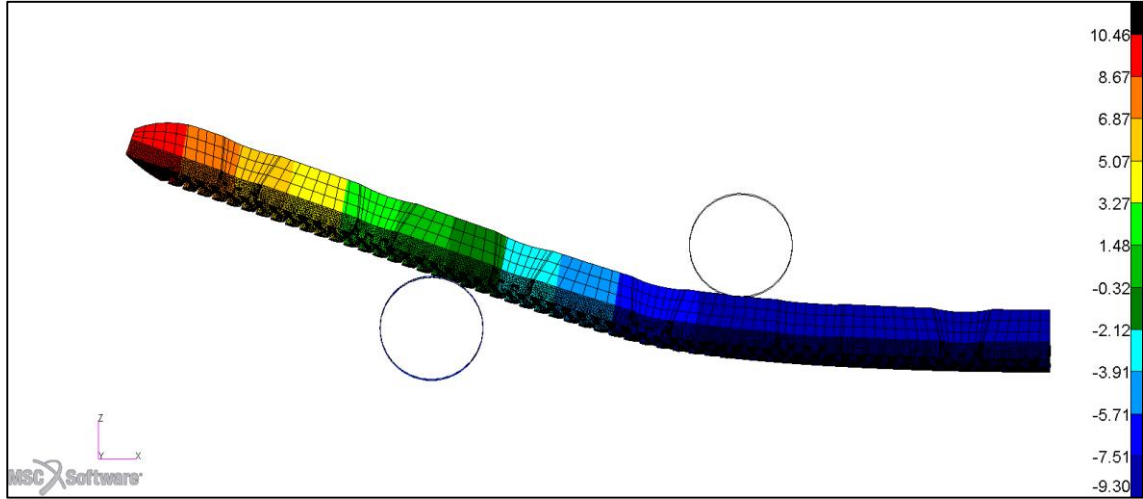
Kemik plağının eniyileme çalışması kapsamında öncelikle sonlu elemanlar modelinin üzerinde çalışılmıştır. Model, tüm doğrusal olmayan unsurları (ki bunlar; yük altındaki yüksek yer değıştirmeden ötürü *geometrik*, malzemenin plastik bölgeye geçmesi ve üzerinde hasar oluşmasından dolayı *malzeme* ve test parçasının itici ve destekler arasındaki temas nedeniyle oluşan hareket kısıtlaması kaynaklı *temas*) içermesi sebebiyle doğrusal olmayan sonlu elemanlar modellerine uygun eniyileme metotları kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamındaki sonlu elemanlar modelinin MSC Mentat programında oluşturulmuş ve MSC Marc çözücüsüyle çözümlenmiş olması sebebiyle, eniyileme

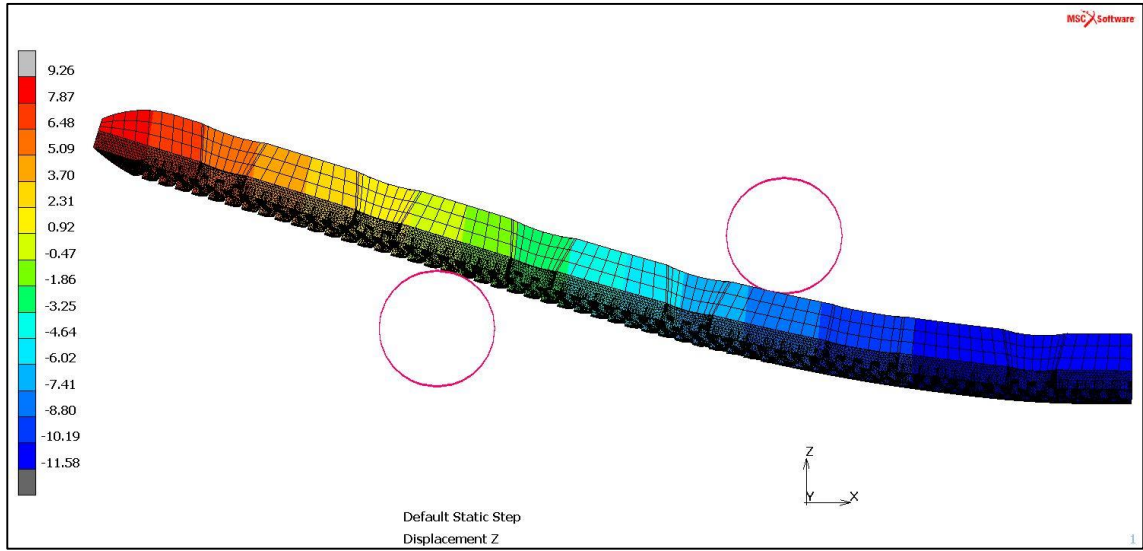
alışmasında yine MSC Software ürün grubu içerisindeki MSC Nastran SOL 200 eniyileme çözücüsünün kullanılmasına karar verilmiştir.

MSC Nastran eniyileme çözücüsünü kullanabilmek adına, MSC Marc özücüsü için MSC Mentat programında kurulan sonlu elemanlar modeli, MSC Patran ön işlemci (ing. pre-processor) arayüzünde yeniden oluşturulmuştur. MSC Mentat ön işlemci arayüzünde oluşturulan geometri, malzeme ve sınır koşulları, benzer çözümleri alabilmek için MSC Patran 'da birebir olarak tanımlanmıştır. Resim 6.12'de MSC Nastran çözücüsünden elde edilen yer değiştirme çözümü, daha önceki MSC Marc özümü ve gerçekleştirilen dört nokta eğme testinden elde edilen yer değiştirme karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.





(a)



(b)

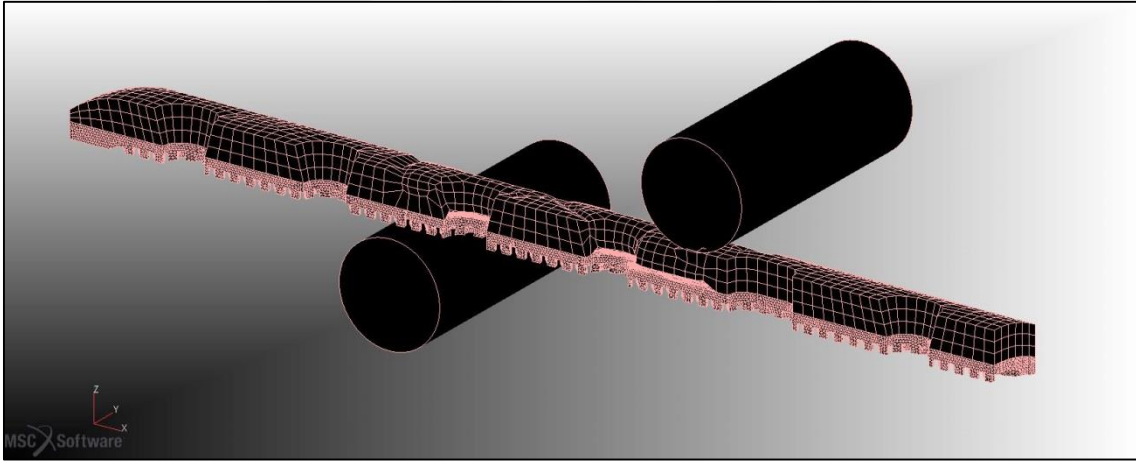


(c)

Resim 6.12. Dört nokta eğme analizleri ve testinin yer değiştirme sonuçları: (a) MSC Nastran sonucu (mm), (b) MSC Marc sonucu (mm), (c) test sonucu

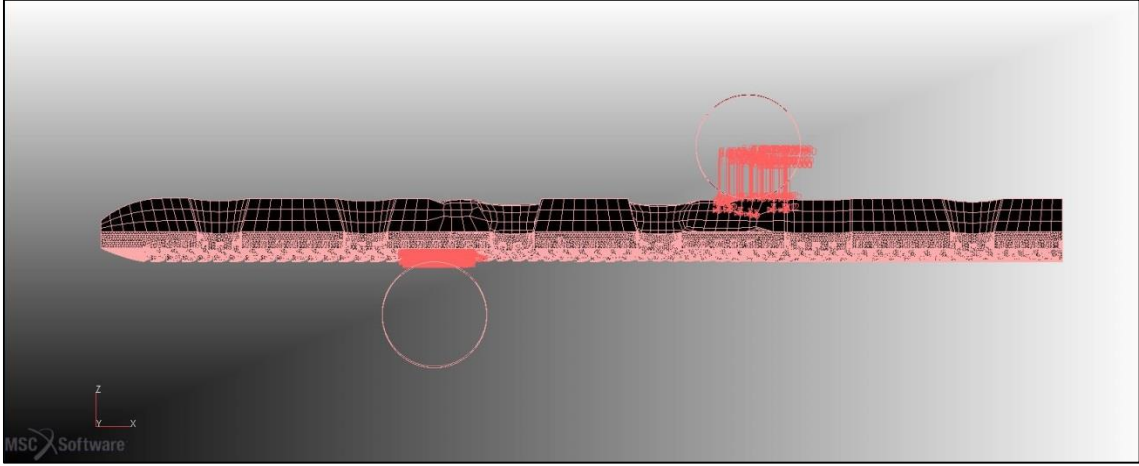
Sonlu elemanlar analizi çözümlmeleri karşılaştırıldığında yer değıştirme karakteristiklerinin oldukça benzer olduğu görölmüşür. En yüksek negatif yer değıştirme değeriindeki 2,28 mm'lik fark (Bkz. Resim 6.12) ayrı çözücüler kullanıldığı için oluşmuştur ve bu fark eniyileme sonucunda ortaya çıkacak geometri MSC Marc çözücüsüyle tekrar analiz edileceğı için göz ardı edilebilmiştir.

Doğrusal olmayan MSC Mentat modeli yine doğrusal olmayan MSC Patran modeli (Resim 6.13) olarak oluşturulduktan sonra MSC Nastran'da yapısal eniyileme çözücüsünün (MSC Nastran SOL 200) kullanımına geçilmiştir. Doğrusal sistemler için herhangi bir düzenleme yapılmadan eniyileme çalışması başlatılabilirken, doğrusal olmayan analiz modelleri için model kurgusunda değışiklikler gerekmiştir. Prosedür gereğı önce doğrusal olmayan sistemdeki sınır şartları doğrusal sisteme dönüştürölmüşür. Bu haliyle, verilen eniyileme sınır şartlarına göre doğrusal sistem eniyilemesi gerçekleştirilmiştir.



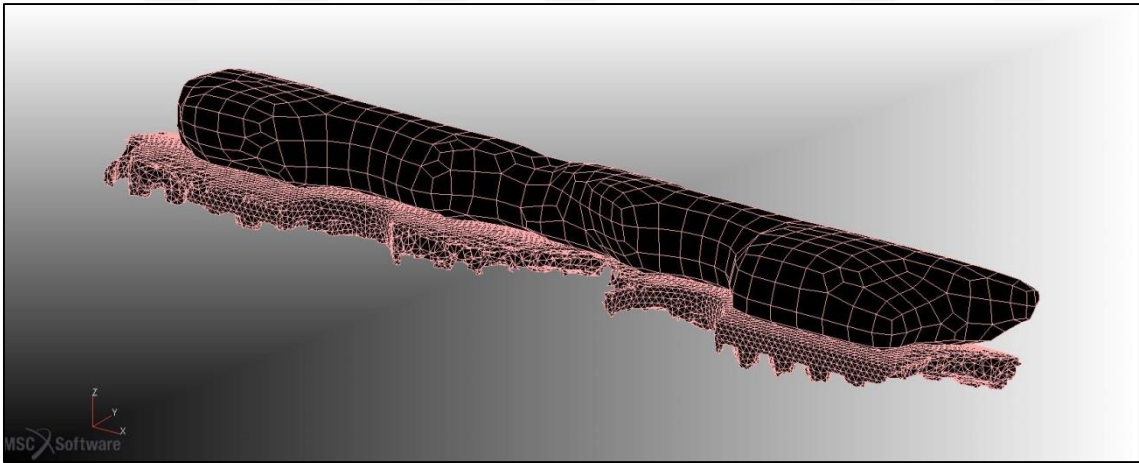
Resim 6.13. Eniyilemede kullanılan msc patran modeli

Burada, doğrusal olmayan sürtünmeli temas (ing. frictional contact) koşulu yerine kemik plağının destekle temas ettiğı bölgenin sabit olduğu, iticiyle temas ettiğı bölgenin ise doğrusal olmayan analizden elde edilen itici kuvvetiyle yer değıştirdiğı kabul edilmiştir (Resim 6.14). Testler sırasında, destek ve iticiyle teması oluşan plak bölgelerinin pürüzlü yüzeyi sebebiyle destek ve itici üzerinde kaymasının zorlaşarak plastik şekil değışimine uğraması, doğrusal olan sabitleme ve yer değıştirme sınır koşullarını uygulanabilir kılmıştır.



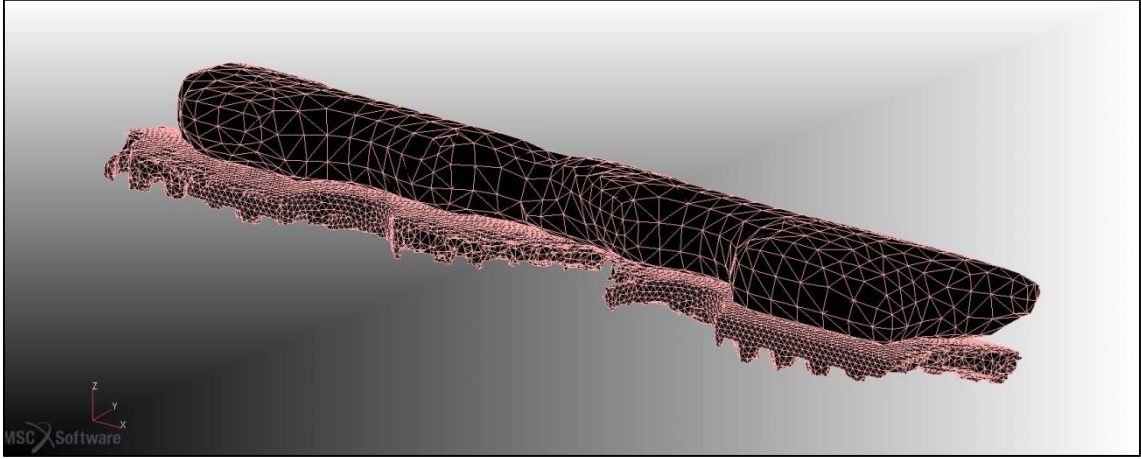
Resim 6.14. Sabitleme ve yer değiştirme sınır koşulu

MSC Nastran SOL 200 çözücüsüyle gerçekleştirilen eniyileme sırasında topoloji eniyilemesi yapılmıştır. Eniyileme tanımlaması sırasında hedef koşulu olarak en düşük uyarlık/uyumluluk (ing. minimum compliance), sınırlama (ing. constraint) koşulu olarak ise %70 ağırlık azaltılması tanımlanmıştır. Oluşturulan modelin elde edilen eniyileme sonucu Resim 6.15'te gösterilmektedir.

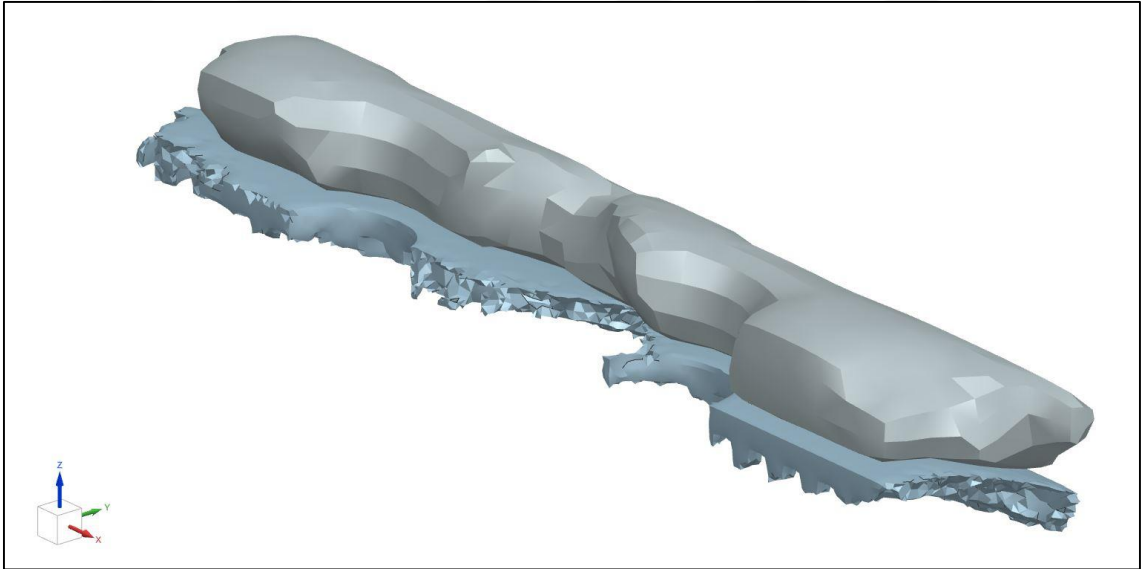


Resim 6.15. Eniyileme sonrasında elde edilen geometri

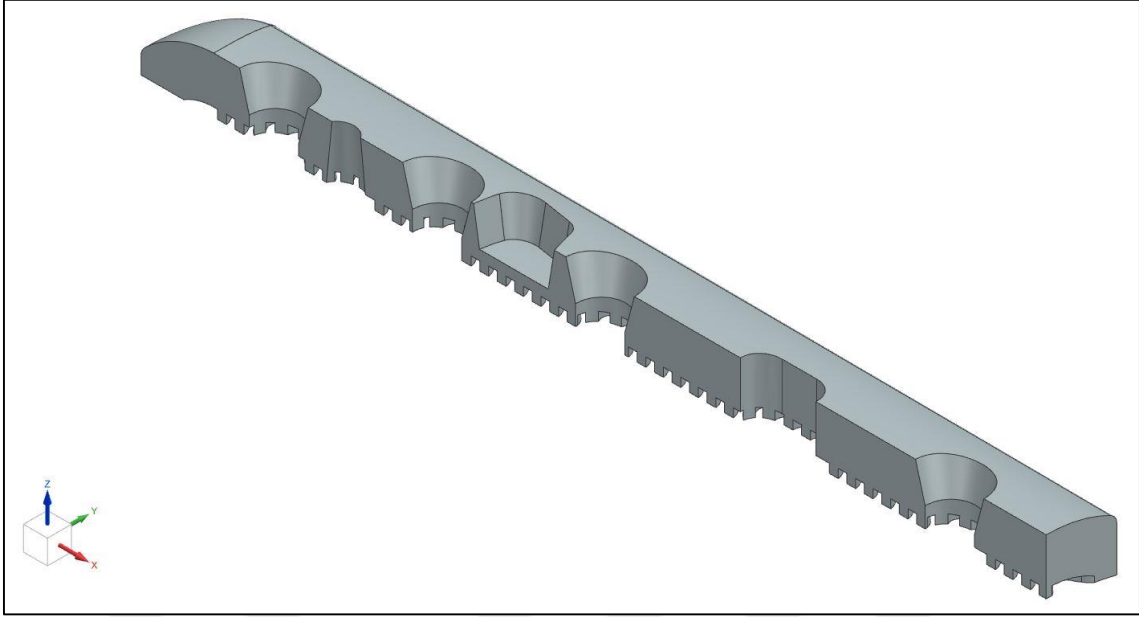
Eniyileme sonucunda elde edilen stl geometrisi (Resim 6.16), Unigraphics NX yüzey modelleme programında modellemeye uygun hale getirilmiştir (Resim 6.17). Yüzey modellemesi gerçekleştirilen modelin görseli Resim 6.18'de gösterilmektedir.



Resim 6.16. Eniyileme sonrasında elde edilen stl geometrisi



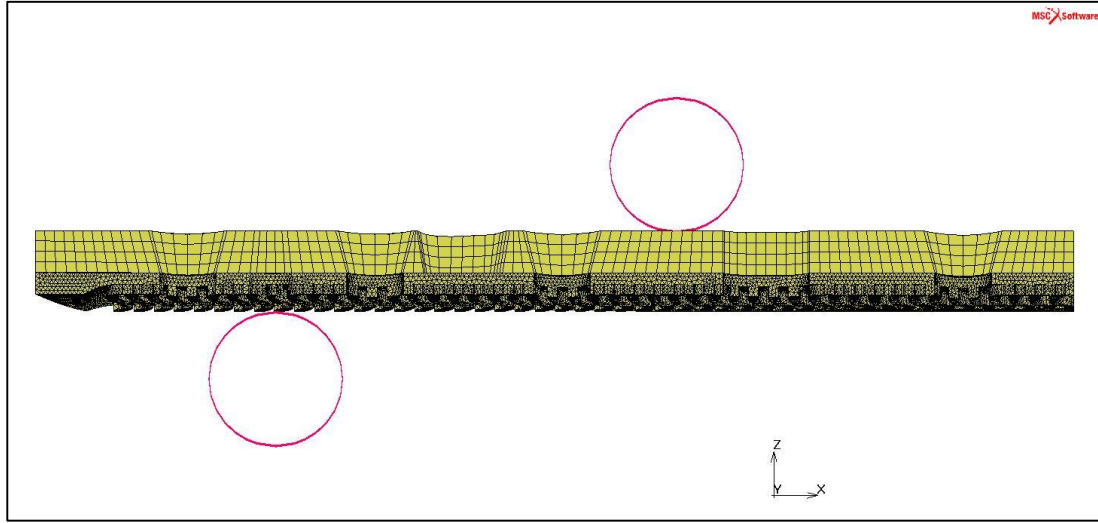
Resim 6.17. Yüzey modelleme programında kullanılan stl geometrisi



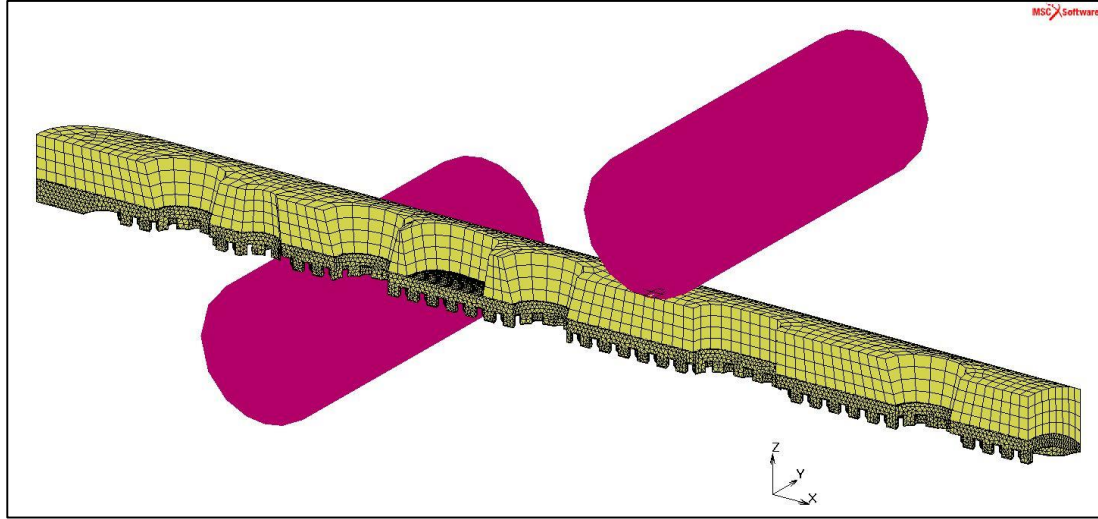
Resim 6.18. Yüzey modellemesi gerçekleştirilen çeyrek model

6.6. Eniyilenen Kemik Plağının Sonlu Elemanlar Analizi

Eniyileme çalışmasından elde edilen çeyrek kemik plağı modeli MSC Mentat ara yüzünde sonlu elemanlar modeli olarak yapısal analize hazırlanmıştır (Resim 6.19). Oluşturulan model MSC Marc çözücüsü kullanılarak analiz edildikten sonra elde edilen yer değiştirme şekli Resim 6.20’de gösterilmektedir. Bir analiz paralel işlemciyle sekiz çekirdek kullanıldığı durumda yaklaşık 16 dakika sürmüştür.

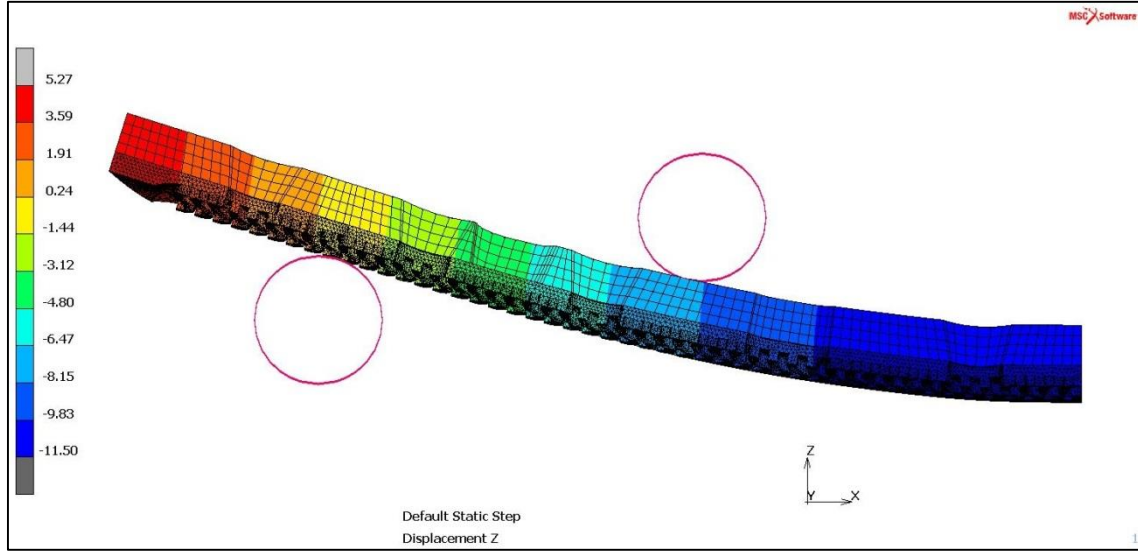


(a)



(b)

Resim 6.19. Eniyilenen plağın çeyrek sonlu elemanlar modeli: (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş



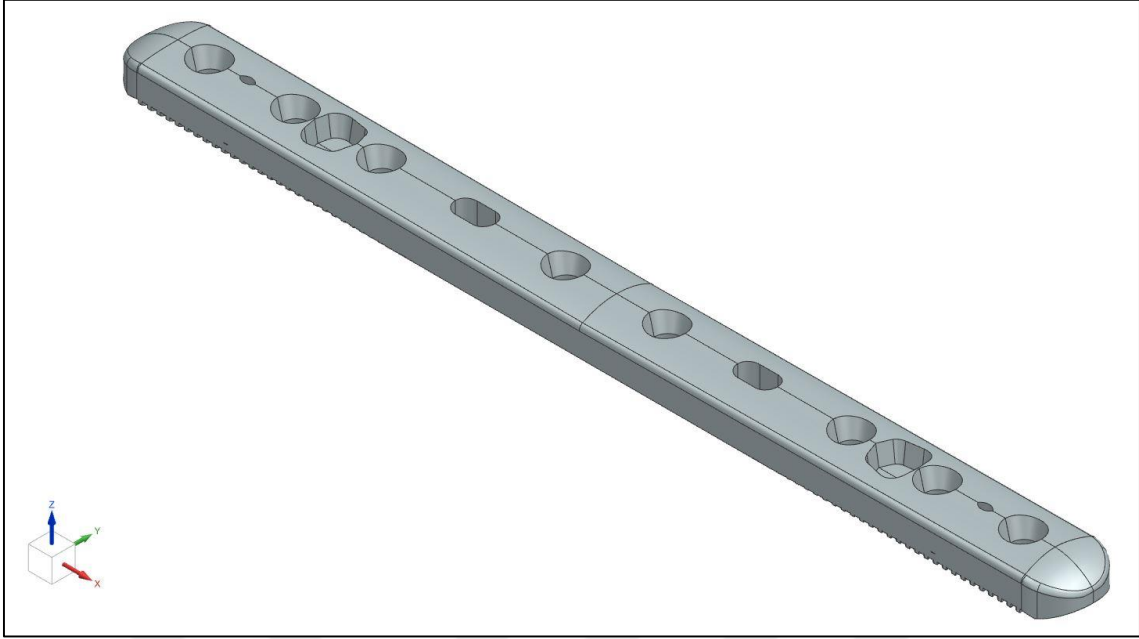
Resim 6.20. Eniyilenen plağın MSC Marc'ta elde edilen yer değiştirme (mm)

Eniyilenen kemik plağının analizi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerinin, başlangıç kemik plağının analizinden bulunan değerle karşılaştırması ve aralarındaki fark Çizelge 6.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.4. Kemik plakları için SEA eğilme dayanımı sonuçları

Eniyilenen Plak (Analiz) (Nm)	Başlangıç Plağı (Analiz) (Nm)	Fark (%)
19,2	20,1	4,4

Hızlı çözümleme alabilmek adına sonlu elemanlar modelleme tekniği olarak simetri koşullarından yararlanarak çeyrek olarak modellenen kemik plağı, eklemeli imalat yöntemiyle üretime hazır hale getirilmek için bütün model olarak modellenmiştir (Resim 6.21).

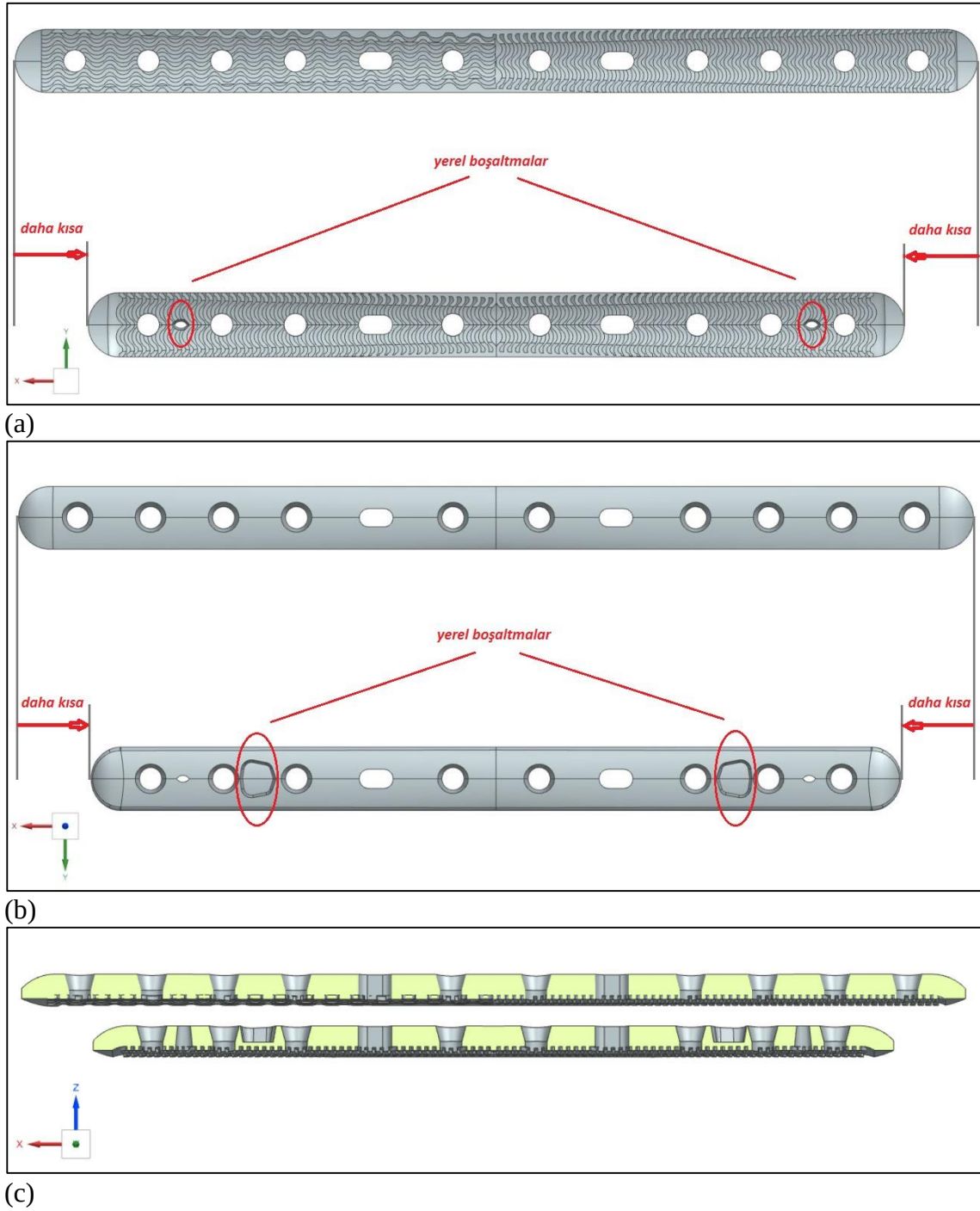


Resim 6.21. Yüzey modellemesi gerçekleştirilen eniyilenen plağın bütün modeli

Eniyileme öncesindeki başlangıç kemik plağıyla eniyilemesi yapılan kemik plağının birlikte olduğu görsel ve birbirleri arasındaki farkları belirten görseller sırasıyla Resim 6.22 ve Resim 6.23’de gösterilmektedir.



Resim 6.22. Başlangıç ve eniyilenen kemik plaklarının izometrik görünüşleri



Resim 6.23. Başlangıç ve eniyilenen kemik plaklarının düzlemsel görünüşleri: (a) x-y düzlemindeki görünüşleri-1, (b) x-y düzlemindeki görünüşleri-2, (c) x-z düzlemindeki kesit görünüşleri

6.7. Eniyilenen Plakların Üretimleri ve Testleri

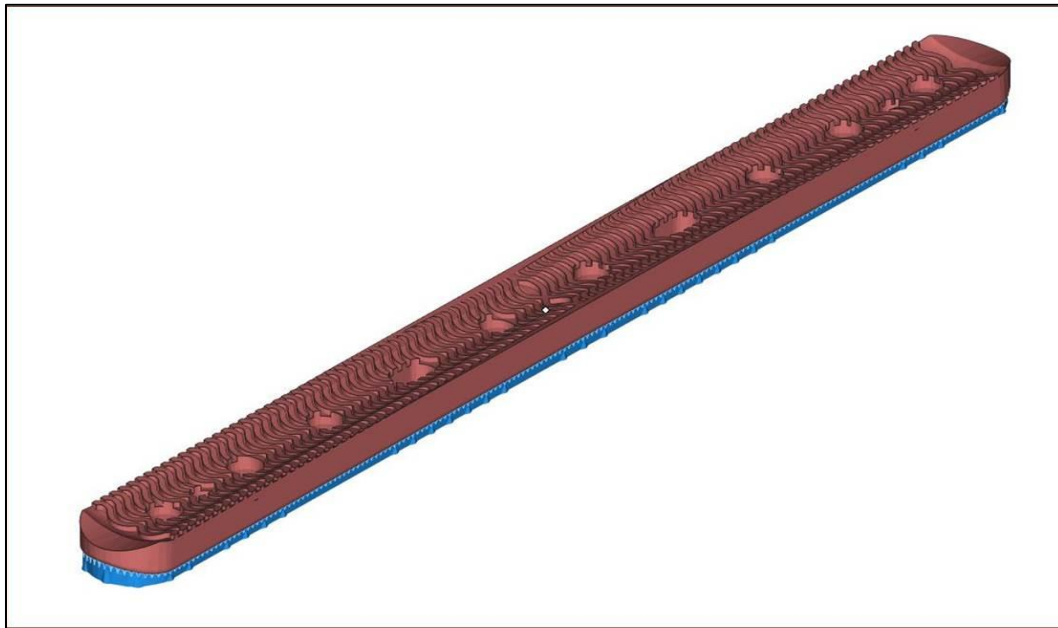
Eniyilenen plağın üretimleri Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM) bünyesinde ENA Vision 250 (ERMAKSAN, Türkiye) SLM

cihazı kullanılarak, başlangıç kemik plağının üretildiği imalat ve ısıtım işlem değişkenlerine sadık kalınarak Çizelge 6.5'te gösterilen imalat değişkenlerine göre gerçekleştirilmiştir. Üretimler sırasında 15-45 μm tane boyutu aralığındaki CL (Concept Laser) ELI (Extra Low Interstitial) (Grade 23) Ti-6Al-4V tozu kullanılmıştır.

Çizelge 6.5. Eniyilenen plak için eklemeli imalat ve ısıtım işlem değişkenleri

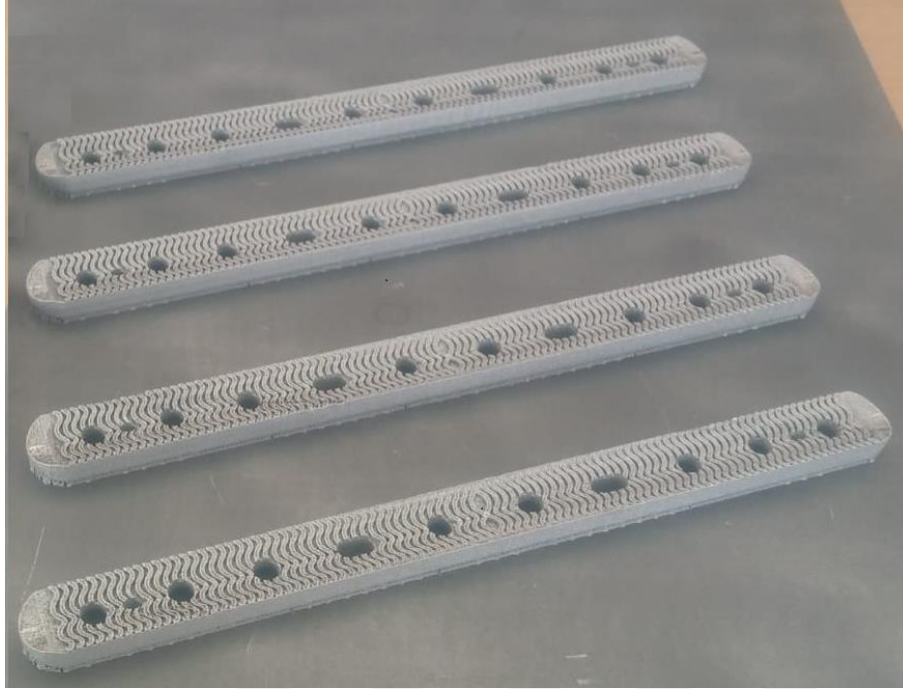
Eklemeli İmalat Değişkenleri				
Lazer Gücü (W)	Tarama Aralığı (μm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)	Tarama Hızı (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)
200	120	44	1250	30
Isıtım İşlem Değişkenleri				
900°C 4 saat ısıtım, fırında soğutma				

Eniyilenen kemik plağının eklemeli imalatı için önce oluşturulan katı model, stl dosya tipinde hazırlanarak imalat öncesinde ön işleme alınmıştır. Kemik plağının Materialise Magics programında destek (ing. support) yapıları oluşturulmuş modeli Resim 6.24'te gösterilmektedir.



Resim 6.24. Eniyilenen kemik plağının destek yapıları oluşturulmuş imalat modeli

Eniyilenen kemik plağının eklemeli imalat sonrasındaki tabla üzerindeki görünümüleri Resim 6.25, müstakil görünümüleri ise Resim 6.26’da gösterilmektedir.



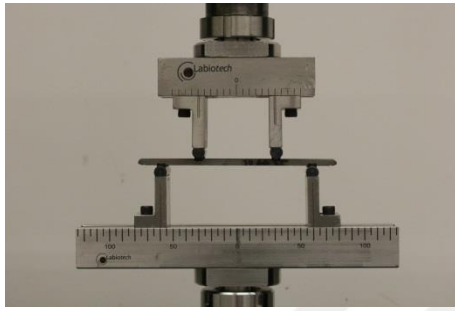
Resim 6.25. Eniyilenen kemik plaklarının üretim tablasındaki görünümüleri (eklemeli imalat sonrası)



Resim 6.26. Eniyilenen kemik plaklarının müstakil görünümüleri (eklemeli imalat sonrası)

Eklemeli imalatı tamamlanan ve ağırlıklarına göre isimlendirilen eniyilenen kemik plakları TOBB (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği) ETÜ (Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi)

Biyomekanik Laboratuvarında dört nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur (Resim 6.27). Testler başlangıç plaklarının testleriyle aynı olacak şekilde ASTM F382-99 (2008) [46] standardına uygun dört tekrarlı olarak icra edilmiştir. Eniyilenen kemik plaklarının her biri kırılana kadar test edilmiştir (Resim 6.28). Test edilen eniyilenen kemik plaklarının kırılan yüzeyleri incelendiğinde, yüzeylerin tepe ve çukurlar oluşturarak sünek bir kırılma gerçekleştirdikleri gözlenmiştir (Resim 6.29). Elde edilen sünek malzeme davranışının sebebinin eklemeli imalat sonrasında argon atmosferinde 900°C’de 4 saat boyunca tutularak ve sonrasında fırında soğutularak uygulanan ısıtılmasının olduğu değerlendirilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 6.27. Eniyilenen kemik plağının dört nokta eğme testleri: (a) numune 1 (30,45 g), (b) numune 2 (30,91 g), (c) numune 3 (30,93 g), (d) numune 4 (31,01 g)



(a)



(b)

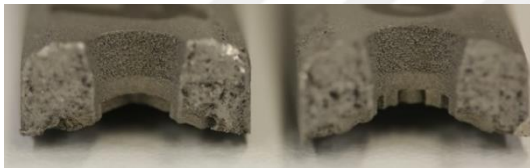


(c)

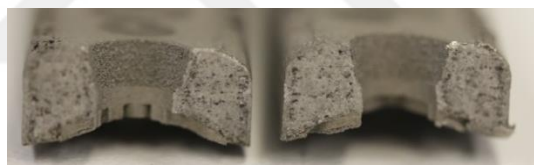


(d)

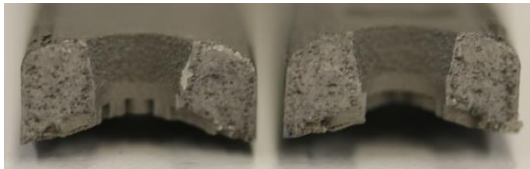
Resim 6.28. Dört nokta eğme testi sonrasında kırılan eniyilenen kemik plakları: (a) numune 1, (b) numune 2, (c) numune 3, (d) numune 4



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 6.29. Eniyilenen kemik plaklarının kırılma yüzeyleri: (a) numune 1, (b) numune 2, (c) numune 3, (d) numune 4

Eniyileme öncesindeki başlangıç kemik plağıyla eniyilemesi yapılan kemik plağının ağırlıklarının ve eğilme dayanımlarının karşılaştırması Çizelge 6.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6. Kemik plaklarının ortalama ağırlık ve dayanım karşılaştırması

	Başlangıç Kemik Plağı	Eniyilenen Kemik Plağı	Fark (%)
Ortalama Ağırlık (g)	39,3	30,8 (SS= 0,3)	21,6
Eğilme Dayanımı (Nm)	22,1 (SS= 0,8)	28,8 (SS= 3,3)	23,3
Eğilme Yapısal Direngenliği (Nm²)	5,7 (SS=0,3)	8,0 (SS=1,6)	28,4

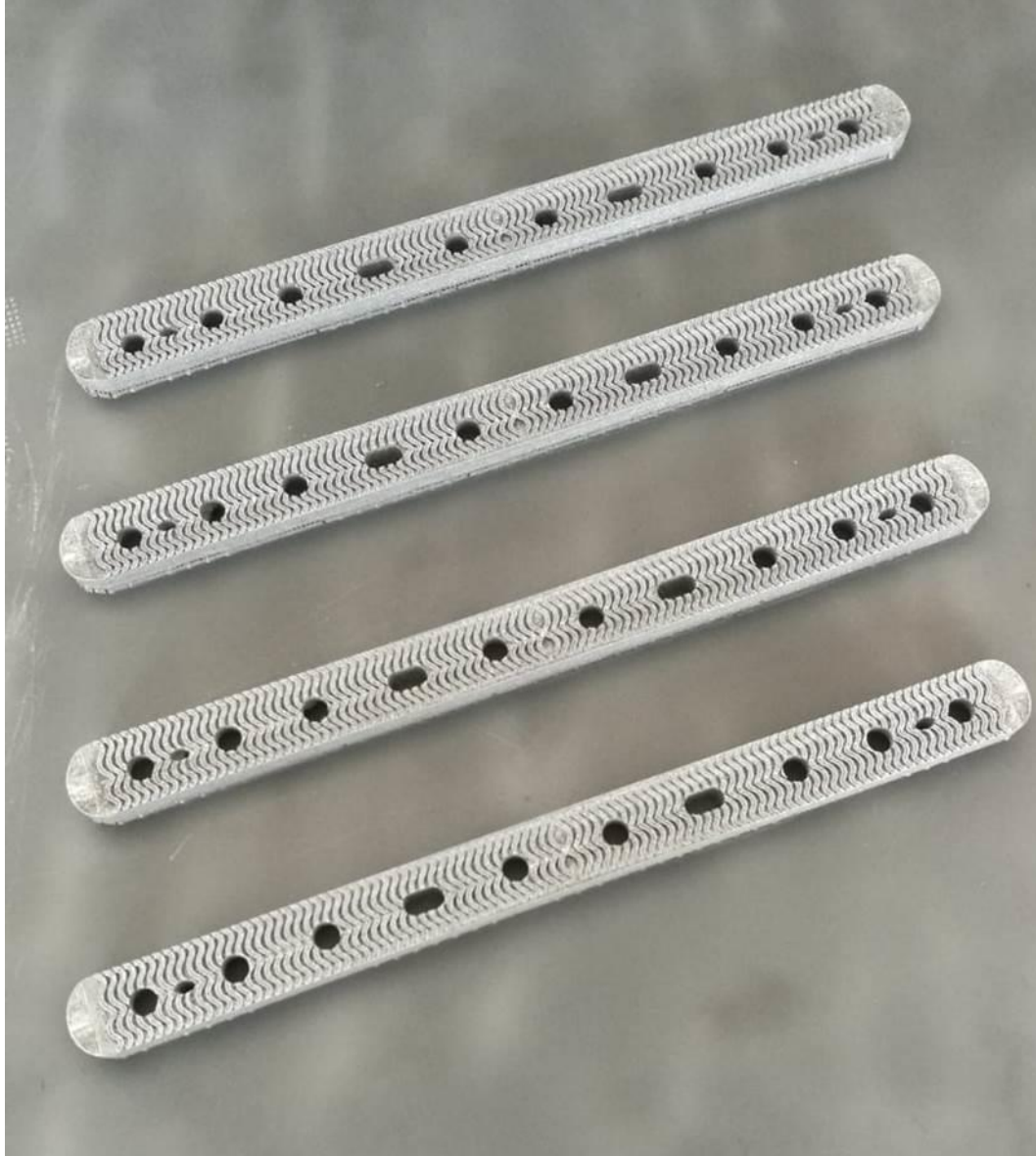
Sonuç olarak, eniyilenen plak %21,6 daha hafif olmasının yanında %23,3 daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. Burada, her iki plağın eklemeli imalatları aynı üretim değişkenleriyle gerçekleştirilmiştir. Eniyileme çalışması sonucunda ağırlığı azaltılarak yüksek direngenliğe sahip olacak şekilde elde edilen plağın, dayanım açısından daha etkin bir geometriye sahip olması, daha yüksek dayanım değerinin elde edilmesinde en önemli etken olarak görülmüştür.

Daha düşük maliyetle aynı seviyelerde hatta daha yüksek eğilme dayanımının amaçlanması doğrultusunda, bu tez çalışması kapsamında tavsiye edilen tavlama ısı işlemi (790°C’de 1 saat fırınlandıktan sonra havada soğutma) kullanılarak eniyilenen plağın üretimleri EKTAM bünyesinde ENA Vision 250 (ERMAKSAN, Türkiye) SLM cihazı kullanılarak, Çizelge 6.7’de gösterilen imalat değişkenlerine göre tekrarlanmıştır. Üretimler sırasında 15-45 µm tane boyutu aralığındaki CL ELI Ti-6Al-4V tozu kullanılmıştır.

Çizelge 6.7. Eniyilenen plağın tekrarlanan üretimleri için eklemeli imalat ve tavlama ısı işlemi değişkenleri

Eklemeli İmalat Değişkenleri				
Lazer Gücü (W)	Tarama Aralığı (µm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	Tarama Hızı (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)
200	120	44	1250	30
Isıl İşlem Değişkenleri				
Tavlama (790°C 1 saat, havada soğutma)				

Eniyilenen kemik plağının eklemeli imalat sonrasındaki tabla üzerindeki görünümüleri Resim 6.30, müstakil görünümüleri ise Resim 6.31’de gösterilmektedir.



Resim 6.30. Eniyilenen kemik plaklarının üretim tablasındaki görünümüleri (eklemeli imalat sonrası)



Resim 6.31. Eniyilenen tavlamaalı kemik plaklarının müstakıl görünümüleri (eklemeli imalat sonrası)

Eklemeli imalatı tamamlanan ve ağırlıklarına göre isimlendirilen eniyilenen kemik plakları ASTM F382-99 (2008) [46] standardına uygun dört tekrarlı olarak TOBB ETÜ Biyomekanik Laboratuvarında dört nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur (Resim 6.32). Eniyilenen kemik plaklarının her biri kırılana kadar test edilmiştir (Resim 6.33). Test edilen eniyilenen kemik plaklarının kırılan yüzeyleri incelendiğinde, yüzeylerin tepe ve çukurlar oluşturarak sünek bir kırılma gerçekleştirdikleri gözlenmiştir (Resim 6.34). Elde edilen sünek malzeme davranışının sebebinin eklemeli imalat sonrasında uygulanan tavlama ısıl işleminin olduğu değerlendirilmiştir.



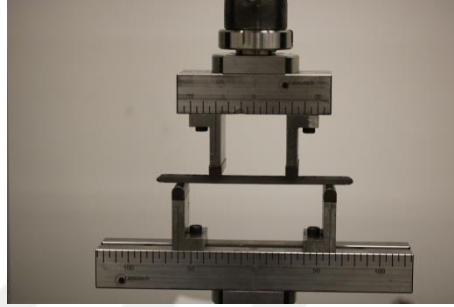
(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 6.32. Eniyilenen tavlamalı kemik plaklarının dört nokta eğme testleri: (a) numune 1 (31,03 g), (b) numune 2 (31,04 g), (c) numune 3 (31,10 g), (d) numune 4 (31,24 g)



(a)



(b)

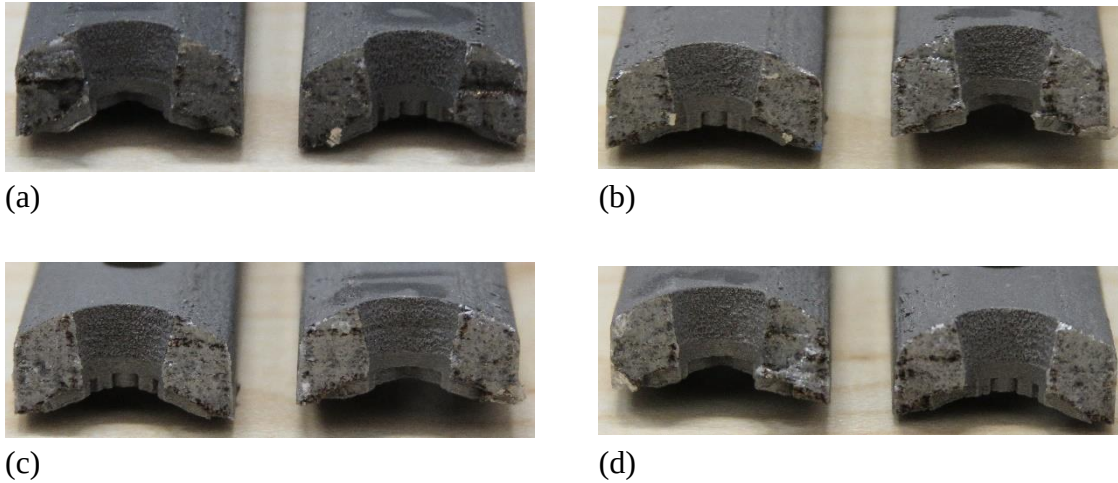


(c)



(d)

Resim 6.33. Dört nokta eğme testi sonrasında kırılan eniyilenen tavlamalı kemik plakları: (a) numune 1, (b) numune 2, (c) numune 3, (d) numune 4



Resim 6.34. Eniyilenen tavlama kemik plaklarının kırılma yüzeyleri: (a) numune 1, (b) numune 2, (c) numune 3, (d) numune 4

Eniyileme öncesindeki başlangıç kemik plaklarıyla 790°C’de 1 saat ısıtıldıktan sonra havada soğutularak eklemeli imalatla üretilen ve eniyilemesi yapılan kemik plaklarının ortalama ağırlıklarının ve eğilme dayanımlarının karşılaştırması Çizelge 6.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.8. Kemik plaklarının ortalama ağırlık ve dayanım karşılaştırması

	Başlangıç Kemik Placı	Tavlama Eniyilenen Kemik Placı	Fark (%)
Ortalama Ağırlık (g)	39,3	31,1 (SS= 0,1)	20,9
Eğilme Dayanımı (Nm)	22,1 (SS= 0,8)	29,4 (SS= 0,6)	24,8
Eğilme Yapısal Direngenliği (Nm²)	5,7 (SS=0,3)	8,1 (SS=0,5)	29,3

Sonuç olarak, tavlama ısı işlemi uygulanmış eniyilenen kemik plakları, başlangıç kemik plağına nispeten %20,9 daha hafif olmasının yanında %24,8 daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. Her iki kemik plağı grubu da aynı eklemeli imalat değişkenleriyle üretilmiştir. Başlangıç plağının ısı işleminden farklı olarak, eniyilenen plaklara, bu tez çalışması kapsamında düşük maliyetle yüksek dayanım sağlaması sebebiyle tavsiye edilen tavlama ısı işlemi uygulanmıştır. Hem eniyileme çalışması sayesinde ağırlığı azaltılarak dayanım açısından daha etkin bir geometriye sahip olması, hem de tavlama ısı işlemiyle daha yüksek dayanım değerinin elde edilmesi eniyilenen kemik plakları için başlangıç kemik plağına göre daha yüksek eğilme dayanımlarının elde edilmesine olanak sağlamıştır.

Başlangıç kemik plağıyla ısıt işlemleri farklı eniyilenen kemik plaklarının ortalama ağırlık ve eğilme dayanımı karşılaştırması Çizelge 6.9’da gösterilmektedir. Gerçekleştirilen eniyileme çalışmasıyla başlangıç kemik plağına kıyasla daha hafif ve daha yüksek eğilme dayanımına sahip kemik plakları üretilebilmiştir.

Çizelge 6.9. Eklemeli imalat kemik plaklarının ağırlık ve dayanım karşılaştırması

	Başlangıç Kemik Plağı	Eniyilenen Kemik Plağı (900°C 4 saat, Fırında soğutma)	Eniyilenen Kemik Plağı (790°C 1 saat, Havada soğutma)
Ortalama			
Ağırlık (g)	39,3	30,8 (SS= 0,3)	31,1 (SS= 0,1)
Eğilme	22,1	28,8	29,4
Dayanımı (Nm)	(SS= 0,8)	(SS= 3,3)	(SS= 0,6)
Eğilme Yapısal			
Direngenliği	5,7	8,0	8,1
(Nm²)	(SS=0,3)	(SS=1,6)	(SS=0,5)

6.8. Kemik Plaklarının Mikro Yapı İncelemeleri

Eklemeli imalatla üretilmiş başlangıç ve eniyilenen kemik plaklarının ağırlık ve dayanım kıyaslamalarını yapabilmek için mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kemik plakları üzerinden “üretim yönünde” ve “üretim yönüne dik” olmak üzere (Bkz. Bölüm 3.4.5) ikişer numune VC750 (Spinner, Almanya) dik işleme merkezi kullanılarak elde edilmiştir. Numuneler elde mevcut olan tek başlangıç kemik plağından, eniyilenen ve 900°C’de ısıt işleme tabi tutulan Numune 4’ten ve 790°C’de ısıt işlemi yapılan eniyilenen Numune 1’den çıkartılmıştır. Numunelerin çıkartılacağı eniyilemiş plaklar arasından seçim yaparken ortalama ağırlıkları ve eğilme dayanımları birbirine en yakın olan plaklar seçilmiştir. Mikro yapı incelemesi öncesindeki yüzey hazırlama ve dağlama işlemleri için numuneler LaboPress-1 (Struers, Danimarka) cihazıyla bakalit reçine içerisine yerleştirilmiştir (Resim 6.35).



Resim 6.35. Mikro yapı incelemesi öncesinde bakalit içerisindeki numuneler

Numunelerin yüzey hazırlama işlemleri Tegamin-25 (Struers, Danimarka) cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Yüzey hazırlama işlemleri kapsamında, sırasıyla MD-Piano 220, 1200 ve 2000'lik zımparalar (Struers, Danimarka) ile ikişer dakika kaba ve ince zımparalama, MD-Largo ("DiaPro Largo diamond suspension", Struers, Danimarka) ve MD-Chem ("OP-Suspension colloidal silica", Struers, Danimarka) ile beşer dakika parlatma yapılmıştır. Dağlama işlemi ASM Handbook Volume 9 [57] el kitabında önerilen Dağlayıcı 192 reçetesi (82 ml H₂O, 10 ml HNO₃, 8 ml HF ile 6 dakika daldırıp çıkarma (ing. swab)) ile gerçekleştirilmiştir. Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri tamamlanmış numuneler Resim 6.36'da gösterilmektedir.

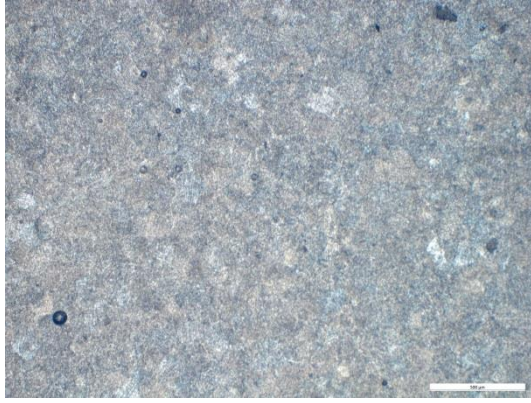


Resim 6.36. Mikro yapı incelemesi yapılan numuneler

Numunelerin mikro yapıları Axioskop 2 Mat (Zeiss, Almanya) metalürji mikroskobuyla incelenmiştir. 50X ve 100X büyütme görüntüleri (Resim 6.37 ve Resim 6.38) incelendiğinde, SLM yöntemiyle üretilmiş eniyilenen plaklarda yüksek oranda boşluk

oluşumu gözlenmiştir. Öte yandan DMLS yöntemiyle imal edilmiş başlangıç plağında çok düşük oranda boşluk oluşmuştur. Bu durum, eniyilenen plakların başlangıç plağına nispeten daha düşük ortalama ağırlıklara sahip olmasını da desteklemektedir. Ancak, eniyilenen plaklar daha çok boşluk içermesine rağmen, başlangıç plağına göre sırasıyla %23,3 ve %24,8 daha yüksek eğilme dayanımı sağlamışlardır. Bu noktada, eniyileme çalışmasının oldukça işe yaradığı ve çalışmadan elde edilen yüksek direngenlik sağlayan geometrinin kemik plaklarının eğilme davranışını iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

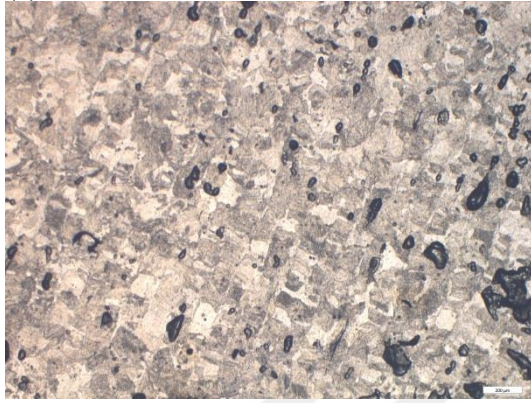




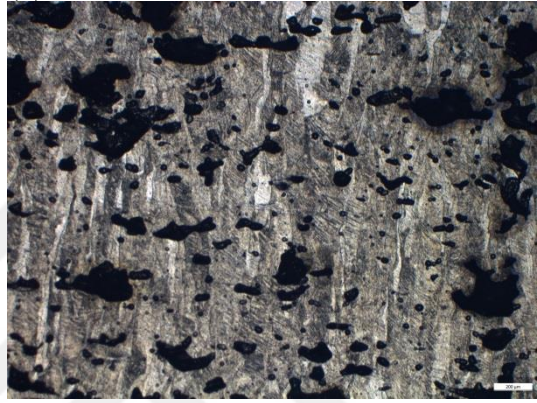
(a)



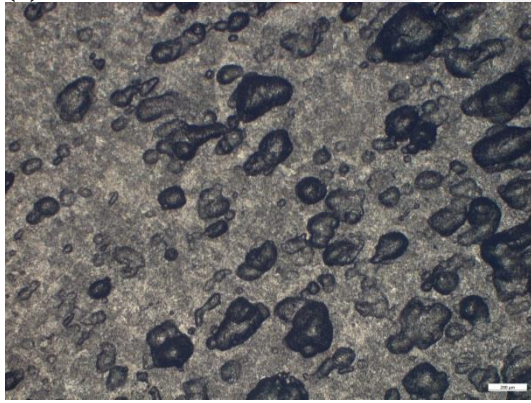
(b)



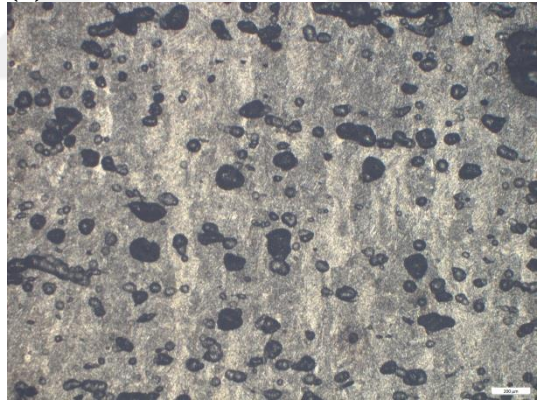
(c)



(d)

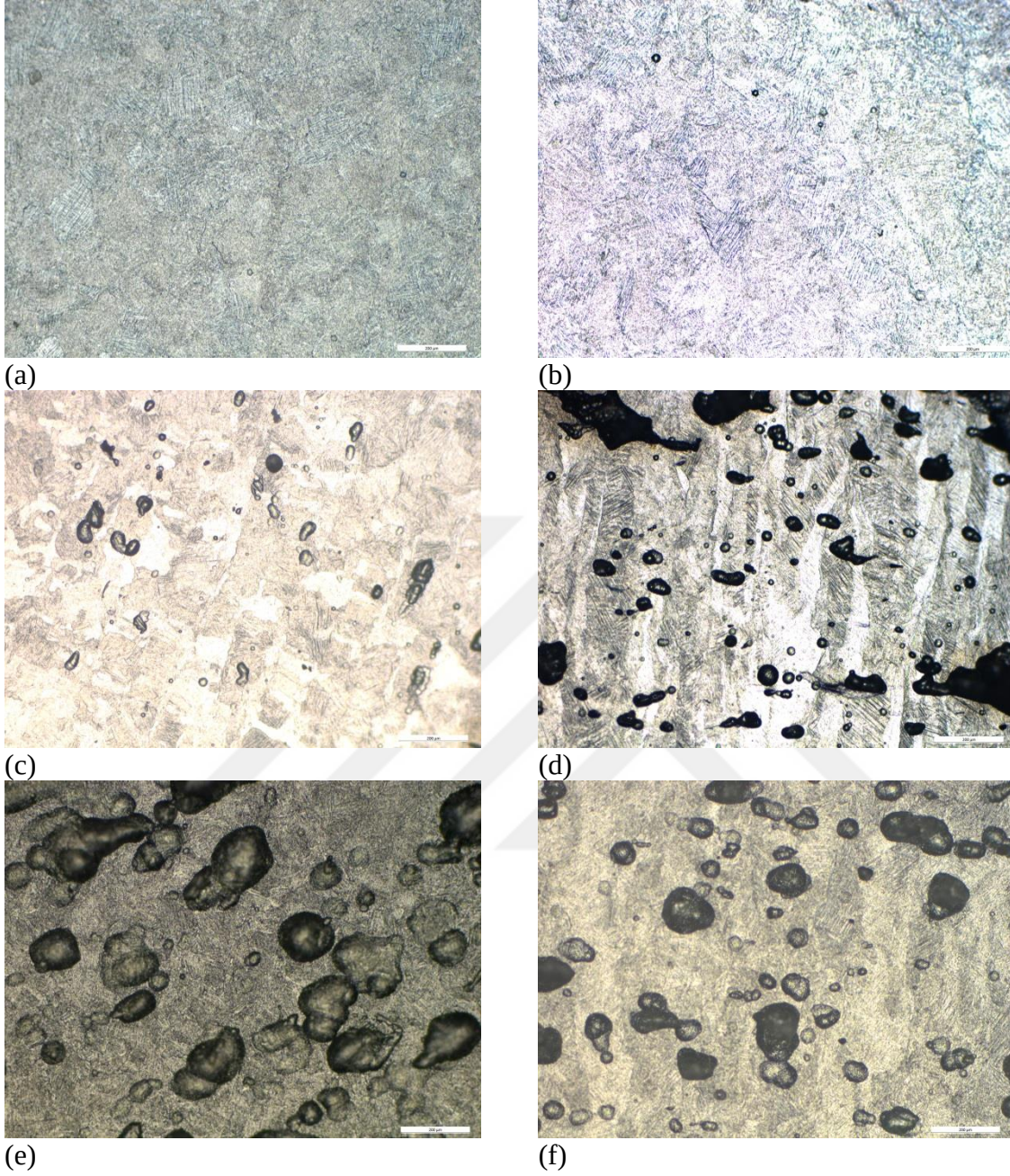


(e)



(f)

Resim 6.37. Kemik plaklarının 50X büyütmeli makro yapıları: (a) başlangıç plağı, üretim yönünde, (b) başlangıç plağı, üretim yönüne dik, (c) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönünde, (d) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönüne dik, (e) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönünde, (f) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönüne dik

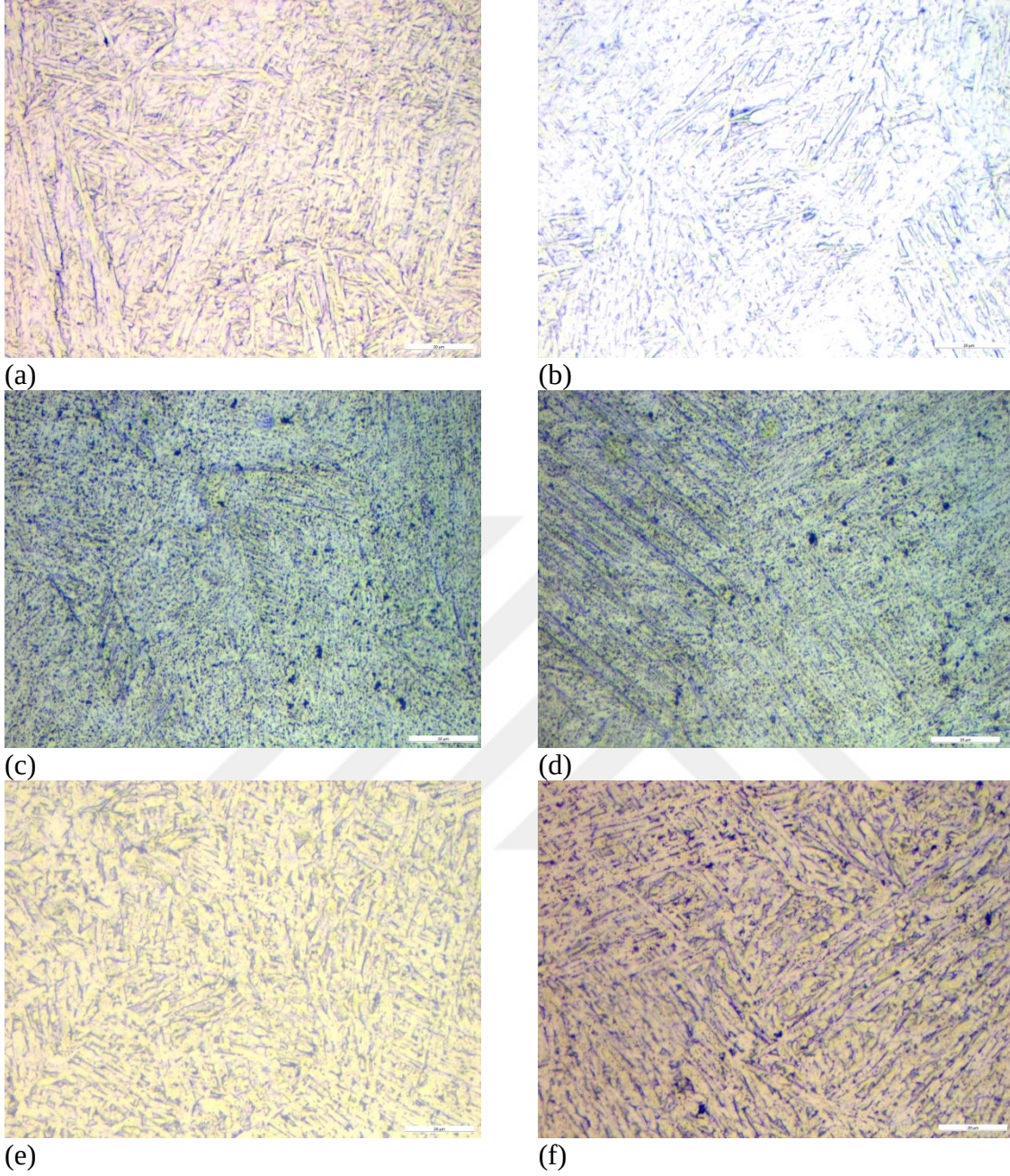


Resim 6.38. Kemik plaklarının 100X büyütmeli makro yapıları: (a) başlangıç plağı, üretim yönünde, (b) başlangıç plağı, üretim yönüne dik, (c) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönünde, (d) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönüne dik, (e) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönünde, (f) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönüne dik

Resimler (Bkz. Resim 6.37 ve Resim 6.38) incelendiğinde, üretim yönüne dik kesitlerde tane yönlenmesinin olduğu, üretim yönündeki kesitlerde ise benzer bir yönlenmeyle karşılaşılmadığı gözlenmiştir. Yöne bağımlılık, eklemeli imalat ürünler için beklenen bir sonuçtur ve eğme testi numuneleri için de gözlenmiştir. Eniyilenen plakların üretim yönüne dik kesitlerinin makro yapıları incelendiğinde yöne bağımlılık net bir şekilde görülmektedir.

Kemik plağı numunelerinin faz yapılarını incelemek için 1000X büyütmeli mikro yapı görselleri kullanılmıştır (Resim 6.39). Mikro yapı görselleri incelendiğinde, eniyileme çalışması sonrasında 790°C sıcaklıkta 1 saat ısıtıldıktan sonra havada soğutularak tavlama ısıtıl işlemine tabi tutulan kemik plağının ince ve iğnemsî faz yapılarından oluştuğı gözlenmiştir. Bu durum eğme numuneleri için de aynı şekilde bulunmuştur. Diğer yandan, 900°C’de 4 saat ısıtılan ve sonrasında fırında soğutulan hem başlangıç hem de eniyilenen kemik plaklarının mikro yapıları daha uzun ve geniş, plaka şekilli faz yapılarından oluşmuştur. Bu numunelerin daha yüksek sıcaklıkta ısıtılması ve daha uzun süre fırında soğutulması faz yapılarının genişlemesine sebep olmuştur.





Resim 6.39. Kemik plaklarının 1000X büyütmeli mikro yapıları: (a) başlangıç plağı, üretim yönünde, (b) başlangıç plağı, üretim yönüne dik, (c) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönünde, (d) eniyilenen plak, 790°C, üretim yönüne dik, (e) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönünde, (f) eniyilenen plak, 900°C, üretim yönüne dik

Çizelgeden (Bkz. Çizelge 6.9) görüleceği üzere eniyileme çalışmasıyla kemik plaklarının başlangıç plağına göre ağırlığı azalırken, eğilme dayanımı artmıştır. Eniyilenen kemik plakları arasında ise ince ve iğnemsiz faz yapısından oluşan kemik plağı (790°C 1 saat, havada soğutma), daha geniş faz yapısından oluşan kemik plağından (900°C 4 saat, fırında

soğutma) daha yüksek eğilme dayanımı sağlamıştır. Yapısal eniyileme ve ısıtıl işlem çeşidinin seçimi eğilme dayanımını etkileyen önemli değişkenler olarak değerlendirilmiştir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, DMLS eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların eğilme davranışı farklı eklemeli imalat değişkenleri için araştırılmıştır. Farklı test yöntemleri, sonlu elemanlar analizi ve eniyileme yöntemleri, üretimleri ve parçaların eğilme davranışlarını doğrulamak ve geçerlemek için uygulanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda belirtilmiştir.

Üç nokta eğme testleri sonuçlarına göre, sabit lazer gücü değeri için tarama aralığı değeri düşürüldükçe eğilme dayanımı artma eğiliminde olmuştur. Ancak, her iki ısıtma işlemi için de, 280 W ve 360 W lazer gücü değerleri için tarama aralığı değerlerinin 180 µm değerinden 140 µm değerine düşürülmesi, dayanım değerlerinde çok fazla iyileşmeye sebep olmamıştır. Dolayısıyla, örneğin, tezgâhın standart lazer gücü değeri olan 280 W için yine standart tarama aralığı değeri olan 140 µm yerine 180 µm değerinin tercih edilerek daha kısa üretim süresiyle benzer seviyedeki eğilme dayanımı değerlerini elde etmek mümkün görülmüştür.

Ortalama eğilme gerilmesi sonuçları incelendiğinde tavlama numuneleri yeniden kristalizasyon tavlama numunelerine göre en az 510 MPa daha yüksek sonuçlar vermiştir. Burada, ısıtma işlem çeşitlerine göre farklılık gösteren ısıtma işlem sıcaklıkları, soğuma hızları ve bunların sonucunda oluşan faz yapıları eğilme dayanımına doğrudan etkisi olan özellikler olarak bulunmuştur.

Mikro yapı incelemeleri sonucunda, tavlama numunelerinin mikro yapılarının ince ve iğnemsiz faz yapılarından oluştuğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu mikro yapı, numunelerin yüksek eğilme dayanımı, direngenlik ve sertlik özelliklerine sahip olmasını sağlamıştır. Diğer taraftan, yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin mikro yapılarının ise daha uzun ve geniş, plaka şekilli faz yapılarından meydana geldiği tespit edilmiştir. Yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin eğilme dayanımı ve sertliği tavlama numunelerine göre daha düşük bulunmuştur. Buradan hareketle, bu çalışmanın önemli bir sonucu olarak şu husus belirtilebilir; aynı eklemeli imalat değişkenleriyle imal edilmiş ürünler için daha yüksek eğilme dayanımı istendiği durumlarda yeniden kristalizasyon tavlama yerine

tavlama ısıl işleminin tercih edilmelidir. Ayrıca, böyle bir durumda tavlama ısıl işleminin maliyeti daha düşük olacaktır.

Eğme testlerinin sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak benzetim ortamında doğrulanması, deformasyon, temas ve malzeme özelliklerinin doğrusal olmayan etkilerine rağmen %11,6 gibi iyi bir uyumla gerçekleştirilmiştir.

Eğme numunelerinin yoğunluk ölçümleri göz önüne alındığında referans olarak alınan hadde ürünü ve tavllanmış Ti-6Al-4V malzemesine göre ortalama bağıl yoğunluk değeri %98,81 bulunmuştur. 280 W ve 360 W lazer gücü değerlerinin bağıl yoğunluk değerleri aynı seviyelerde bulunmasıyla bu lazer gücü seviyeleri için tarama aralığı değerlerinin sonuçlara etkisinin düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Mikro yapı görselleri üzerinden ASTM E112-13 [65] standardı kullanarak tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama numuneleri için belirlenen tane boyutu numaraları sırasıyla 7,25 ve 4,46 olarak hesaplanmıştır. Bunun sonucu olarak, daha fazla tane ve tane sınırı içermesi sebebiyle tavlama numunelerinin daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur.

Tavlama ve yeniden kristalizasyon tavlama numunelerinin mikro yapılarında α -fazı oranı β -fazı oranından yüksektir. ASM Handbook Volume 2 [64]'ye göre β -fazı oranının %10-50 arasında değişmesi beklenmektedir. Bu tez çalışmasında incelenen mikro yapılar için elde edilen β -fazı oranı %26-38 aralığında bulunmuştur. Ayrıca mikro yapı incelemesi gerçekleştirilen tüm numuneler için üretim yönüne dik kesitte tane yönelmesi olduğu sonucuna varılmıştır.

Bütün eğme numunelerinin malzeme karakterizasyonu sonucunda element yüzdelерinin uygun olmasının yanında, alüminyum oranının %5,5'in üzerinde kalarak alüminyum kaybı yaşanmaması ve oksijen oranının %0,2'nin altında kalarak oksijen kırılgenliğinin önüne geçilmesi sağlıklı bir eklemeli imalat sürecine işaret etmiştir.

Sertlik sonuçları incelendiğinde, daha ince ve iğnemsî faz yapısı içermesi sebebiyle tavlama numuneleri eğilme dayanımı özelliğinde olduğu gibi daha yüksek sertlik göstermişlerdir.

Dört nokta eğme testleri gerçekleştirilen bir humerus kemik plağı kullanılarak yapılan sonlu elemanlar yönteminin geçerlemesi çalışmasında, testlerden elde edilen eğilme dayanımı %9 farkla tutturulmuştur. Öte yandan, kemik plağı bir eniyileme çalışmasına tabi tutularak ağırlığının azaltılması hedeflenmiştir. Eniyileme çalışması sonucunda, başlangıç plağıyla aynı eklemeli imalat ve ısıtılma işlem değişkenlerinin kullanıldığı eniyilemeyle eniyilenen kemik plakları %21,6 daha hafif ve %23,3 daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. Ayrıca, başlangıç plağıyla aynı eklemeli imalat değişkenlerinin kullanıldığı ancak başlangıç plağının ısıtılma işleminden farklı olarak, bu tez çalışması kapsamında düşük maliyetle yüksek dayanım sağlaması sebebiyle tavsiye edilen tavlama ısıtılma işleminin uygulandığı eniyileme çalışmasıyla eniyilenen kemik plakları %20,9 daha hafif ve %24,8 daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir.

Eğme numunelerinin ve eniyilenen plakların üretim yönüne dik kesitlerinde gözlemlenen tane yönelmesinden hareketle, eğme yüklemesine dik olarak oluşturulacak tane yönelmeleriyle kemik plaklarının eğilme dayanımlarının artırılabilmesi öngörülmüştür. Buradan hareketle, eklemeli imalat cihazlarının dikey konumlandırmada üretebileceği parça boyutu dikkate alınarak, kemik plaklarının dikey olarak imal edilmesi sonucunda eğilme dayanımının artıp artmayacağına deneysel ve sayısal çalışmalarla araştırılması tavsiye edilmektedir.

Eniyilenen kemik plaklarının eğilme davranışını tam olarak belirleyebilmek için yorulma testleriyle yorulma ömrünün bulunması uygun olacaktır. Bunun için yorulma testinde kullanılmak üzere kemik plaklarının eklemeli imalatla üretilip testlerinin yapılması ve ek olarak dinamik sayısal modelleme yöntemi kullanılarak doğrulanması üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir. Ti-6Al-4V yerine Ti-6Al-7Nb malzeme kullanılarak kemik plaklarının yüksek çevrimli yorulma dayanımını araştırılabilir.

Sayısal modelleme yöntemiyle eğme testleri sırasında oluşan hasar durumu incelenirken, hasar değişkenleri olarak sonlu elemanlar programının tavsiye ettiği değerler kullanılmıştır. Yapılacak deneysel ve sayısal bir çalışmayla testi yapılan malzemeye özgü hasar değişkenleri belirlenebilir.



KAYNAKLAR

1. ASTM F2792-12a (2012) (Withdrawn 2015). Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. ASTM E290-14 (2014). Standard test methods for bend testing of material for ductility. ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. Huang S. H., Liu P., Mokasdar A., and Hou L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191-1203.
4. Kumar V., and Dutta D. (1997). An assessment of data formats for layered manufacturing. *Advances in Engineering Software*, 28, 151-164.
5. ASTM F2915-11 (2011). Standard specification for additive manufacturing file format. ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. Wycisk E., Emmelmann C., Siddique S., and Walther F. (2013). High cycle fatigue (hcf) performance of ti-6al-4v alloy processed by selective laser melting. *Advanced Materials Research*, 816-817, 134-139.
7. Wycisk E., Solbach A., Siddique S., Herzog D., Walther F., and Emmelmann C. (2014). Effects of defects in laser additive manufactured ti-6al-4v on fatigue properties. *Physics Procedia*, 56, 371-378.
8. Monzón M. D., Ortega Z., Martínez A., and Ortega F. (2014). Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-014-6334-1.
9. Shiomi M, Osakada K, Nakamura K, Yamashita T, and Abe F. (2004). Residual stress within metallic model made by selective laser melting process. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 53(1), 195-198.
10. Vock S., Klöden B., Kirchner A., Weißgärber T., and Kieback B. (2019). Powders for powder bed fusion: a review. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 383-397.
11. Spierings A. B., Voegtlin M., Bauer T., and Wegener K. (2016). Powder flowability characterisation methodology for powder-bed based metal additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 1, 9-20.
12. Kruth J.P., Vandenbroucke B., Van Vaerenbergh J., and Naert I. (2005, 28th September-1st October). *Rapid manufacturing of dental prostheses by means of selective laser sintering/melting*. Paper presented at the 2nd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal.
13. Ishfaq K., Abdullah M., and Mahmood M. A. (2021). A state-of-the-art direct metal laser sintering of ti6al4v and als10mg alloys: surface roughness, tensile strength, fatigue strength and microstructure. *Optics and Laser Technology*, 143, 107366.

14. Chandramohan P., Bhero S., Obadele B. A., Olubambi P. A., and Ravisankar B. (2018). Effect of built orientation on direct metal laser sintering of ti-6al-4v. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 25, 69-77.
15. Keresztes Z., and Pammer D. (2018). Mechanical properties of ti-6al-4v samples produced with additive technology. *Materials Today: Proceedings*, 5, 26558-26565.
16. Karolewska K., Ligaj B., Wirwicki M., and Szala G. (2020). Strength analysis of ti6al4v titanium alloy produced by the use of additive manufacturing method under static load conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1365-1379.
17. Loch, J. (2017). *Korozyjne zachowanie się biomedycznych stopów tytanu w symulowanych roztworach fizjologicznych* (Doctoral dissertation, AGH University of Science and Technology, 2017).
18. Larosa M. A., Jardini A. L., Zavaglia C. A. C., Kharmandayan P., Calderoni D. R., and Filho R. M. (2014). Microstructural and mechanical characterization of a custom-built implant manufactured in titanium alloy by direct metal laser sintering. *Advances in Mechanical Engineering*, DOI 10.1155/2014/945819.
19. Rhein R.K., Shi Q., Arjun Tekalur S., Wayne Jones J., and Carroll J.W. (2021). Effect of direct metal laser sintering build parameters on defects and ultrasonic fatigue performance of additively manufactured als10mg. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44, 295-305.
20. Leuders, S., Thöne M., Riemer A., Niendorf T., Tröster T., Richard H.A., and Maier H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy ti6v4 manufactured by selective laser melting: fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*, 48, 300-307.
21. Vrancken B., Kruth J.P., and Humbeeck J.V. (2012). Heat treatment of ti6al4v produced by selective laser melting: microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177-185.
22. Pattanayak D. K., Fukuda A., Matsushita T., Takemoto M., Fujibayashi S., Sasaki K., Nishida N., Nakamura T., and Kokubo T. (2011). Bioactive ti metal analogous to human cancellous bone: fabrication by selective laser melting and chemical treatments. *Acta Biomaterialia*, 7, 1398-1406.
23. Du L., Qian G., Zheng L., and Hong Y. (2021). Influence of processing parameters of selective laser melting on high-cycle and very-high-cycle fatigue behavior of ti-6al-4v. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 44, 240-256.
24. Saunders M. (2018). How process parameters drive successful metal am part production. *Metal Additive Manufacturing*, 4(2), 127.
25. Hooper P.A. (2018). Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 22, 548-559.
26. Clymer D., Beuth J., and Cagan J. (2016). Additive manufacturing process design. *Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1976-1984.

27. Promoppatum P., Onler R., and Yao S.C. (2017). Numerical and experimental investigations of micro and macrocharacteristics of direct metal laser sintered ti-6al-4v products. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 262-273.
28. Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., and Buchbinder D. (2012). Additive manufactured alsil0mg samples using selective laser melting (slm): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behaviour. *Materials and Design*, 34, 159-169.
29. Mercelis P., and Kruth J.P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), 254-265.
30. Gorny B., Niendorf T., Lackmann J., Thöne M., Tröster T., and Maier H. J. (2011). In situ characterization of the deformation and failure behaviour of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering*, A528(27), 7962-7967.
31. Vilaro T., Colin C., and Bartout J. D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the ti-6al-4v alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42A(10), 3190-3199.
32. Bartlett J. L., and Li X. (2019). An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 27, 131-149.
33. Mower T.M., and Long M.J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering*, A 651, 198-213.
34. Thöne M., Leuders S., Riemer A., Tröster T., and Richard H. A. (2012). *Influence of heat-treatment on selective laser melting products – e.g. ti-6al-4v*. Paper presented at the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX.
35. AlMangour B., Grzesiak D., Cheng J., and Ertas Y. (2018). Thermal behavior of the molten pool, microstructural evolution, and tribological performance during selective laser melting of tic/316l stainless steel nanocomposites: experimental and simulation methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 257, 288-301.
36. Soylemez E., Koç E., and Coşkun M. (2019). Thermo-mechanical simulations of selective laser melting for alsil0mg alloy to predict the part-scale deformations. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 465-478.
37. Novotný L., Béréš M., Abreu H. F. G., Zajaca J., and Bleck W. (2019). Thermal analysis and phase transformation behaviour during additive manufacturing of ti-6al-4v alloy. *Materials Science and Technology*, 35 (7), 846-855.
38. Attaran M. (2017). The rise of 3-d printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60, 677-688.
39. Harun W. S. W., Kamariah M. S. I. N., Muhamad N., Ghani S. A. C., Ahmad F., and Mohamed Z. (2018). A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. *Powder Technology*, 327, 128-151.
40. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., and Emmelmann C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.

41. Bertol L.S., Júnior W.K., da Silva F.P., and Aumund-Kopp C. (2010). Medical design: direct metal laser sintering of ti-6al-4v. *Materials and Design*, 31, 3982-3988.
42. Shi Q., Sun Y., Yang S., Dessel J. V., Lübbers H. T., Zhong S., Gu Y., Bila M., Dormaar T., Schoenaers J., and Politis C. (2021). Failure analysis of an in-vivo fractured patient-specific ti6al4v mandible reconstruction plate fabricated by selective laser melting. *Engineering Failure Analysis*, 124, 105353.
43. Aziz I.A., Gabbitas B., and Stanford M. (2012). Direct metal laser sintering of a ti6al4v mandible implant. *Key Engineering Materials*, 520, 220-225.
44. İnternet: <https://anarsmoreira.files.wordpress.com/2014/05/big-bone-plates.jpg>, Son Erişim Tarihi: 25.11.2014.
45. İnternet: <http://web.mit.edu/3.082/www/team1s/background/materials.html>, Son Erişim Tarihi: 25.11.2014.
46. ASTM F382-99 (2008). Standard specification and test method for metallic bone plates. ASTM International, West Conshohocken, PA.
47. Joshi A. M. (2011). *Process planning for the rapid machining of custom bone implants* (MSc dissertation, Iowa State University, 2011). ProQuest Dissertations Publishing, 1494682.
48. Xie P., Ouyang H., Deng Y., Yang Y., Xu J., and Huang W. (2017). Comparison of conventional reconstruction plate versus direct metal laser sintering plate: an in vitro mechanical characteristics study. *Journal of Orthopedic Surgery and Research*, 12 (1), 1-9.
49. Cesarone D.M., and Disegi J.A. (1994). Techniques in the application of iso 9585 test method for the determination of bone plate bending properties. *ASTM Special Technical Publication*, DOI 10.1520/STP12222S.
50. ASTM F1472-14 (2014). Standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium alloy for surgical implant applications (uns r56400). ASTM International, West Conshohocken, PA.
51. ASTM F2924-14 (2014). Standard specification for additive manufacturing titanium-6 aluminum-4 vanadium with powder bed fusion. ASTM International, West Conshohocken, PA.
52. Murgau, C. C. (2016). *Microstructure Model for Ti-6Al-4V used in Simulation of Additive Manufacturing* (Doctoral dissertation, Luleå University of Technology, 2016).
53. American Society for Metals (1991). *ASM handbook volume 4 heat treating*. (First edition). Ohio: ASM International, 2043.
54. ASTM D2638-10(2015)e1 (2015). Standard test method for real density of calcined petroleum coke by helium pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA.
55. ASTM D4892-89 (2009). Standard test method for density of solid pitch (helium pycnometer method). ASTM International, West Conshohocken, PA.

56. ISO 4288 (1996). Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method – Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture.
57. American Society for Metals (2004). *ASM handbook volume 9 metallography and microstructures*. (First edition). Ohio: ASM International, 971.
58. ASTM F2971-13 (2013). Standard practice for reporting data for test specimens prepared by additive manufacturing. ASTM International, West Conshohocken, PA.
59. ASTM E18-19 (2019). Standard test methods for rockwell hardness of metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
60. ASTM E8 / E8M-16a (2016). Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
61. Kobryn P.A., and Semiatin S.L. (2003). Microstructure and texture evolution during solidification processing of ti-6al-4v. *Journal of Materials Processing Technology*, 135, 330-339.
62. Mierzejewska Z'. A., Hudák S. L. and Sidun J. (2019). Mechanical properties and microstructure of dmls ti6al4v alloy dedicated to biomedical applications. *Materials*, 12 (1), 176-192.
63. Electro Optical Systems GmbH (2017). EOS titanium ti64 m290; EOS cr 326. Krailling, München, 11-17.
64. American Society for Metals (1990). *ASM handbook volume 2 properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. (Tenth edition). Ohio: ASM International, 1771.
65. ASTM E112-13 (2013). Standard test methods for determining average grain size. ASTM International, West Conshohocken, PA.
66. ASTM F3001-14 (2014). Standard specification for additive manufacturing titanium-6 aluminum-4 vanadium eli (extra low interstitial) with powder bed fusion. ASTM International, West Conshohocken, PA.
67. Gokhale N.S., Deshpande S.S., Bedekar S.V., and Thite A.N. (2008). *Practical Finite Element Analysis* (1st edition). India: Finite To Infinite, 377.
68. MIL-HDBK-5J (2003). Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures. Department of Defense Handbook, 5-54.





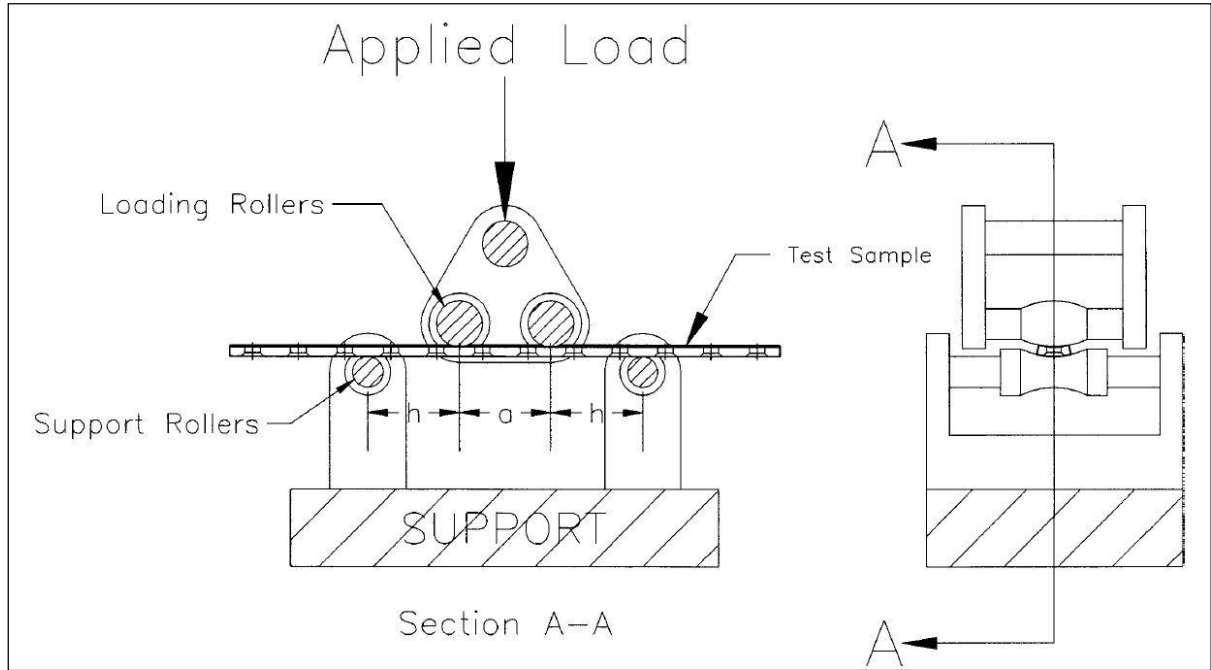
EK-1 İki fazlı titanyum alaşımı için kalıcı şekil değişiminin derecesine bağlı olarak $\alpha+\beta \rightarrow \alpha$ faz dönüşümünün gösterimi [17]



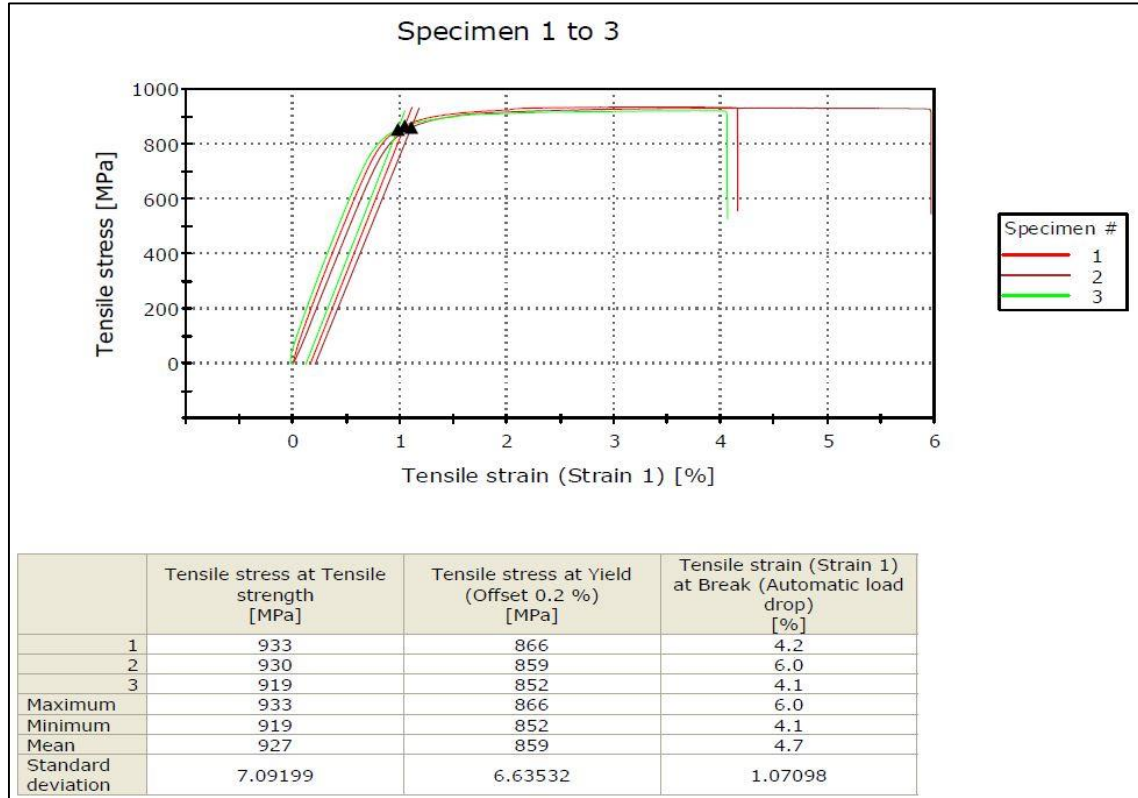
EK-2 Farklı kemik plağı çeşitleri [44]



EK-3 Metalik kemik plaklarının tek çevrim eğilme testi için test düzeneği [46]



EK-4 150T180 için çekme testi gerilme-gerinim grafikleri





GAZİ GELECEKTİR..