



**UYDU EKİPMANLARINA YÖNELİK TOPOLOJİ OPTİMİZASYON
METODU İLE PARÇA GEOMETRİSİ TASARIMI, MODELLENMESİ,
SEÇİCİ LAZERLE ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZİ**

Mehmet Emin BADIR

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2019

Mehmet Emin BADIR tarafından hazırlanan “UYDU EKİPMANLARINA YÖNELİK TOPOLOJİ OPTİMİZASYON METODU İLE PARÇA GEOMETRİSİ TASARIMI, MODELLENMESİ, SEÇİCİ LAZERLE ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Yusuf USTA

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 12/09/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

İmza

Mehmet Emin BADIR

12/09/2019

UYDU EKİPMANLARINA YÖNELİK TOPOLOJİ OPTİMİZASYON METODU İLE
PARÇA GEOMETRİSİ TASARIMI, MODELLENMESİ, SEÇİCİ LAZERLE ERGİTME
YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Emin BADIR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2019

ÖZET

Bu çalışmada, bir uyduda kullanılmak üzere geleneksel imalat metotlarına göre tasarlanmış örnek bir braketin hafifletilmesi için bir organik geometrik modelleme yaklaşımı ve bir topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Tüm tasarım yaklaşımları, eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu yenilikçi imkân ve kabiliyetler göz önünde bulundurularak ele alınmıştır. Öncelikle sonlu elemanlar yöntemine göre sınır koşulları ve hedefler tanımlanarak kaba bir optimizasyon modeli elde edilmiştir. Ardından elde edilen kaba modelde mühendislik öngörülerine göre bazı alanlar tamamen atılmış, geri kalan model ise olabildiğince organik forma getirilerek gereksinimleri karşılayabilme durumuna bakılmıştır. Hedeflenen gereksinimleri karşılamada yetersiz kalan ilk model üzerinde organik ve biyomimetik yaklaşımlar iteratif çalışılarak sınanmıştır. Yük akışının ve yapının ana hattını oluşturan kısımlar belirlenmiş, bu hatlarda oluşan gerilme yüklemelerinin birbirini sönmüleyebilmesini sağlayabilmek, dolayısıyla gerilme miktarını azaltmak, doğal frekans modlarını ise yükseltmek için ağaç dalı geometrileri kullanılmıştır. Toplam katılığı artırmak ve salınımları en aza indirmek için zemine temas eden yüzeylerde bir fil ayağı şekli kullanılmıştır. İterasyonlar sonucu elde edilen model eklemeli imalat metotlarından seçici lazer ergitme yöntemi ile imal edilecek şekilde ele alındığında kütlece %38 daha hafif, Von-mises gerilmeleri bakımından da %57,7 daha düşük gerilmeye sahip bir model ortaya çıkmıştır. Uydü parçalarının organik modelleme yaklaşımı ile topolojik optimizasyonu yapılarak eklemeli imalata uygun tasarım yaklaşımları geliştirilmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, seçici lazer ergitme, uzay teknolojileri
Sayfa Adedi : 96
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

PART GEOMETRY DESIGN, MODELING, MANUFACTURING AND ANALYSIS
VIA SELECTIVE LASER MELTING METHOD FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION
OF SATELLITE PARTS

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Emin BADIR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

In this study, an organic geometric modeling approach and a topology optimization are applied to lighten a sample bracket designed according to traditional manufacturing methods for use on a satellite. All design approaches are considered with the innovative possibilities and capabilities offered by additive manufacturing technologies. Firstly, a rough optimization model is obtained by defining boundary conditions and targets according to the finite element method. Then, in the rough model obtained, some areas are completely discarded according to engineering predictions, and the remaining model is brought into organic form as much as possible to meet the requirements. Organic and biomimetic approaches are tested by iterative study on the first model which failed to meet the targeted requirements. The sections forming the main line of the load flow and structure are determined, and tree branch geometries are used in order to enable the stress loads in these lines to damp each other, thus reducing the amount of stress and increasing the natural frequency modes. In order to increase total rigidity and minimize oscillations, an elephant foot shape is used on surface contact planes. The model obtained after iterations is 38% lighter and has 57.7 % lower Von-mises stresses than the traditional design when considered to be manufactured by selective laser melting method. Design approaches suitable for additive manufacturing are developed by topological optimization of satellite parts with organic modeling approach.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, selective laser melting, satellite technologies

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda bilgi ve tecrübeleri ile beni her ihtiyaç duyduğumda yönlendiren, karşılaştırdığım zorlukları aşmamda benden desteklerini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın fikirden uygulama aşamasına geçebilmesinde bana gerekli her türlü maddi ve manevi desteği sunan sayın enstitü müdürüm Doç. Dr. Lokman KUZU ve Dr. Mesut GÖKTEN başta olmak üzere TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü' ne teşekkür ederim. Beni bugünler için yetiştiren sevgili babam merhum Nevzat BADIR'a, ağabeylikle birlikte bana babalık da yapan sevgili ağabeyim Yasin BADIR'a, hiçbir menfaat gözetmeksizin eşsiz bir sevgi ve muhabbetle beni büyüten annem Fatma BADIR'a, kız kardeşim Hümeysra EROL ile eşi Mehmet Akif EROL'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Sevgili eşim, hayat öğretmenim Esra BADIR'a, laboratuvarındaki çalışmalarında zorluklar ile karşılaştığımda aklıma gelerek yalnızlığımı unutturan çocuklarım Âmine Ayşe BADIR ve Mahmut Nevzat BADIR'a sevgilerimi sunarım. Laboratuvar arkadaşlarım ve İleri İmalat Teknolojileri Araştırma Grubu AMTRG ekibine, ayrıca son olarak imalat süreçlerinde sahip oldukları deneyim ve samimi yaklaşımları ile gereken her türlü teknik desteği esirgemeyen ALUTEAM ailesine katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Eklemeli İmalat için Tasarım ve Topoloji Optimizasyonu	5
2.2. Literatür Tarama Sonuçları: Neden Eklemeli İmalat?	14
2.2.1. Tasarım serbestliği	14
2.2.2. Hammadde tasarrufu	14
2.2.3. Hafiflik	15
2.2.4. Sonuç	15
2.3. Uzay Koşulları.....	17
2.3.1. Atmosfer	17
2.3.2. Dış uzay / uzay	19
2.3.3. Uzay araçları	19
3. MALZEME, METOT, TASARIM VE NUMUNE İMALATI	23
3.1. Giriş	23

	Sayfa
3.2. Gereksinimler	23
3.2.1. Görev gereksinimleri	24
3.2.2. Çevresel gereksinimler	25
3.2.3. Özel gereksinimler	28
3.3. Model Belirleme.....	29
3.4. Malzeme Belirleme	31
3.4.1. Sıcaklık.....	31
3.4.2. Vakum.....	32
3.4.3. Korozyon.....	32
3.4.4. Atomik oksijen	32
3.4.5. Ömür	33
3.4.6. AlSi10Mg.....	33
3.5. İmalat Metodu	33
3.6. Eklemeli İmalat İçin Tasarım Yaklaşımı.....	34
3.6.1. AI: Adaptasyon göstergesi	34
3.6.2. DI: Diskriminasyon göstergesi	35
3.6.3. OI: Oryantasyon göstergesi	35
3.6.4. GI: Geometri göstergesi	36
3.7. Metot, Malzeme ve Altyapı Seçimi.....	36
4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ANALİZ	37
4.1. Parça/Malzeme Seviyesi Testler	38
4.2. Arşimet Yoğunluk Ölçümleri.....	39
4.3. Topoloji Optimizasyonu.....	42
4.4. Analizler	48

	Sayfa
4.4.1. Yapısal analiz	49
4.4.2. Modal analiz.....	53
4.5. Hızlı Prototipleme	56
5. SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE İMALAT	59
5.1. EOS M290: SLE Cihazı	59
5.2. Destek Yapıları.....	59
5.3. İmalat.....	61
5.4. Desteklerin Sökülmesi ve Muayene.....	62
5.5. Kumlama	64
5.6. Optik Ölçüm ve Doğrulama	64
5.7. Yüzey İşleme ve Parlatma.....	68
6. TEST VE TASARIM DOĞRULAMA	71
6.1. Test Planlama ve Akışı.....	71
6.2. Rezonans Tarama	71
6.3. Yüksek Seviye Sinüs Titreşim Testi	74
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
7.1. Sonuçlar.....	77
7.2. İleride Yapılacak Çalışmalar	78
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	83
EK-1: AlSi10Mg Teknik Özellikler Tablosu.....	84
EK-2: Çekme Testleri Sonuç Raporu.....	89
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tepki tekeri braketı geleneksel ve eklemeli imalat karşılaştırması	17
Çizelge 3.1. Space Shuttle aracına ait hız ve ivme değerleri	27
Çizelge 3.2. Braket-01 satın al ve uç oranı	30
Çizelge 3.3. Braket-02 satın al ve uç oranı	30
Çizelge 3.4. Metal eklemeli imalat alanında kullanılan malzeme türleri	34
Çizelge 4.1. Çekme testi sonuçları	39
Çizelge 4.2. Arşimet ölçüm sonuçları	41
Çizelge 4.3. Geleneksel model statik analiz gerilmeleri ve emniyet katsayıları	51
Çizelge 4.4. Model 1 statik analiz gerilmeleri ve emniyet katsayıları	51
Çizelge 4.5. Model 7 statik analiz gerilmeleri ve emniyet katsayıları	52
Çizelge 4.6. Tüm modeller için statik analiz gerilme değerleri karşılaştırması	52
Çizelge 4.7. Geleneksel model modal analiz	54
Çizelge 4.8. Model 1 modal analiz ilk 3 mod değeri	54
Çizelge 4.9. Model 2 modal analiz ilk 3 mod değeri	55
Çizelge 4.10. Tüm modeller için modal analiz ve kütle değerleri	55
Çizelge 5.1. İmalat parametreleri	61
Çizelge 5.2. Yük arayüzü nominal ve ölçülen model karşılaştırması	66
Çizelge 5.3. Sabitleme arayüzü nominal ve ölçülen değer karşılaştırması	67
Çizelge 6.1. Rezonans tarama profili	72
Çizelge 6.2. Doğal frekans modları analiz ve test karşılaştırması	74
Çizelge 6.3. Yüksek seviye sinüs titreşim test profili	75
Çizelge 6.4. Geleneksel ve Eklemeli İmalat Kapsamlı Karşılaştırması	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Talaşlı ve eklemeli imalat hurda malzeme karşılaştırması	15
Şekil 3.1. Gereksinim türleri.....	24
Şekil 3.2. Space Shuttle aracının kalkış ve sonrası aşamaları.....	27
Şekil 4.1. Problem tanımı, imkansız, optimal ve kapsam dışı çözüm	42
Şekil 4.2. Optimizasyon akış şeması.....	43
Şekil 4.3. Optimizasyon bitiş şeması	48
Şekil 5.1.SLE imalatı akış şekli	59
Şekil 5.2. Magics destek ayarları ekranı	60
Şekil 5.3. Yük bağlantı arayüzü ölçüm sonuçları	66
Şekil 5.4. Sabitleme arayüzü ölçüm sonuçları.....	67
Şekil 6.1. Test akışı.....	71
Şekil 6.2. FRF braket, yüksüz, z eksenı.....	73
Şekil 6.3. FRF braket, yüklü, z eksenı	73
Şekil 6.4. FRF braket, yüklü, y eksenı yüksek seviye sinüs titreşim sonrası.....	75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Eklemeli imalat anten braketleri.....	5
Resim 2.2. Metal eklemeli imalat ile imal edilmiş uydu parçaları	6
Resim 2.3. Unsur tabanlı topoloji optimizasyon uygulaması	6
Resim 2.4. Hücresel malzeme tasarımı.....	7
Resim 2.5. Destek sınırlamaları dikkate alınarak yapılan topoloji optimizasyonu.....	7
Resim 2.6. SLE parçalarının yeniden tasarım süreç basamakları uygulaması	7
Resim 2.7. Topoloji optimizasyonu yapılarak imal edilen bir braket.....	8
Resim 2.8. Eklemeli imalat süreçleri için önerilen bir tasarım yaklaşımı	8
Resim 2.9. Parça tasarımlarına eklemeli imalat ile farklı yaklaşım.....	9
Resim 2.10. ANSYS ortamında test numunesi modellemesi	9
Resim 2.11. Geleneksel ve eklemeli imalat numunelerinde mikro yapı karşılaştırması	9
Resim 2.12. Nano uydular için eklemeli imalat malzeme ve tasarım çalışması.....	10
Resim 2.13. Windform XT 2.0 malzemesi ile imal edilmiş KY-Sat 2 küp uydusu.....	10
Resim 2.14. Eklemeli imalat Ku-Bant transdüseri.....	11
Resim 2.15. Besleme antenleri yansız oda RF testleri	11
Resim 2.16. Eklemeli imalat yıldız izler braketi, AlSi10Mg.....	12
Resim 2.17. Yatay imal edilmiş kırılma numunesinin mikro yapısı	12
Resim 2.18. Dikey imal edilmiş kırılma numunesinin mikro yapısı	12
Resim 2.19. EBM modelleri, standart ve termoelastik analiz sonuç karşılaştırması.....	13
Resim 2.20. Tepki tekeri braketi eklemeli imalat çalışması, DMRC	16
Resim 2.21. Atmosfer katmanları, ESA.....	18
Resim 2.22. Atmosfer katmanları, NASA	18
Resim 3.1. Braket-01 CAD modeli ve FFF yazıcı baskısı.....	29

Resim	Sayfa
Resim 3.2. Braket-02 CAD modeli ve FFF yazıcı baskısı.....	30
Resim 3.3. Braket CAD modeli, zarf hacmi ve FFF yazıcı baskısı.....	31
Resim 3.4. Geleneksel model üzerindeki eklemeli imalat unsurları.....	36
Resim 4.1. Çekme numunesi boyutu ve çekme test cihazı.....	38
Resim 4.2. Yatay ve dikey çekme numuneleri	39
Resim 4.3. Arşimet yoğunluk ölçüm cihazı.....	41
Resim 4.4. İlk optimizasyon sonrası kaba model	44
Resim 4.5. Model 1.....	45
Resim 4.6. Model 2.....	45
Resim 4.7. Model 3.....	46
Resim 4.8. Model 4.....	46
Resim 4.9 Model 5.....	46
Resim 4.10. Model 6.....	47
Resim 4.11. Model 7.....	47
Resim 4.12. Fil ayağı ve ağaç dallanma yapısı.....	47
Resim 4.13. Sabitleme noktalarının tanımlanması	49
Resim 4.14. Taşınacak yük için bağlantı noktaları ve noktasal kütlelerin tanımlanması .	50
Resim 4.15. İvmelenmenin atanması.....	50
Resim 4.16. Geleneksel model statik analiz sonucu.....	50
Resim 4.17. Model 1 için statik analiz gradyanı.....	51
Resim 4.18. Model 7 statik analiz gradyanı.....	52
Resim 4.19. Geleneksel model modal analiz gradyanı	53
Resim 4.20. Model 1 modal analiz gradyanı	54
Resim 4.21. Model 2 modal analiz gradyanı	54

Resim	Sayfa
Resim 4.22. Model 7 modal analiz gradyanı	55
Resim 4.23. Ultimaker S5 iki kafalı hızlı prototipleme cihazı	57
Resim 4.24. Hızlı prototipleme ile iterasyonların baskısı.....	57
Resim 4.25. Geleneksel ve eklemeli imalat modelleri hızlı prototipleme	58
Resim 4.26. Hızlı prototipleme baskısı model 7 montaj kontrolleri.....	58
Resim 5.1. Magics ile destek yapılarının oluşturulması ön ve arka görünüş.....	60
Resim 5.2. Magics ile destek yapılarının oluşturulması alt görünüş	61
Resim 5.3. Braket, baskı tablası ve destek yapıları.....	63
Resim 5.4. Braketin baskı tablasından sökülmesi.....	63
Resim 5.5. Kumlama işlemi sonrası braket yüzeyleri.....	64
Resim 5.6. Optik ölçüm düzeneği.....	65
Resim 5.7. Optik tarama aşaması.....	65
Resim 5.8. Optik ölçüm sonuçları gradyanı.....	68
Resim 5.9. Lazer parlatma denemesi	69
Resim 5.10. Braket ayakları düzlemsellik kontrolü.....	69
Resim 6.1. TÜBİTAK Uzay titreşim test altyapısı	72
Resim 6.2. Braket, yük bağlanmış hali ve ivmeölçer	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

cm	Santimetre
cm³	Santimetreküp
dk	Dakika
g	Gram
G	Yerçekimi ivmesi
Hz	Hertz
kg	Kilogram
m²	Metrekare
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
Oct	Oktav
s	Saat
sn	Saniye
stl	Stereolitografi

Kısaltmalar

Açıklamalar

ALUTEAM	Alüminyum Eğitim, Test ve Araştırma Merkezi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
DfAM	Design for additive manufacturing
DMLS	Direct metal laser sintering
DMRC	Direct Manufacturing Research Center
EBM	Elektron ışın ergitme
EOS	Electro Optical Systems
ESA	Avrupa Uzay Ajansı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

FDM	Fused deposition modelling
FFF	Fused filament fabrication
FRF	Frequency response function
FSM	Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi
GE	General Elektrik
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
İHA	İnsansız Hava Aracı
KARI	Kore Havacılık ve Uzay Araştırmaları Enstitüsü
LENS	Laser engineered net shaping
NASA	Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
RF	Radyo frekansı
SLE	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme

1. GİRİŞ

Uydular, dış uzayda başlıca haberleşme, konum belirleme, meteorolojik ve çevresel olaylar, gözlem gibi görevlerine göre tespit edilen yörüngelerine yerleştirilerek görev yapan, genellikle insansız uzay araçlarıdır. Dış uzayın getirdiği ve dünya ortamından çok farklı, zorlu çevresel koşulları altında, herhangi bir arıza veya bakım ihtiyacı durumunda yalnızca uzaktan erişim sağlanabilen, fiziksel erişim imkânının olmadığı uydular; yüksek güvenilirlik gerektiren, özel malzemeler kullanılan maliyetli araçlardır. Ender bir örnek olarak Hubble uzay teleskobu, görev yörüngesinde astronotlar tarafından bakım-onarımı yapılacak şekilde tasarlanan tek uzay teleskobudur [1]. Yüksek maliyetlerine ek olarak uydular, yeryüzünden fırlatıcı roketler ile uzaya taşınarak yörüngelerine kendi başlarına gidebilecekleri mesafeye kadar taşınma ihtiyacı duyarlar. Fırlatıcı roketler, yörüngeye ve çeşitli diğer parametrelere bağlı olarak taşıdıkları uydular için kilogram başına 5 bin ile 30 bin dolar arasında maliyet doğurur [2]. Bu bilgiler göz önüne alındığında uyduların tasarım ve görev gereksinimlerini sağlamak şartıyla hafifletilmesi, uzay araştırmaları için en önemli alanlardan birisidir. Bu doğrultuda, gereksinimleri ve sınır koşulları belirlenen mekanik uydu parçalarının olabildiğince optimize tasarlanması gerekmektedir. Aynı şekilde, daha önce optimize edilmemiş parçaların da yapısal optimizasyon ile hafifletilmeleri mümkündür. Yalnızca gerek duyulan yerde ve yalnızca gerektiği kadar malzeme kullanılarak yapısal optimize edilmiş parçalar; daha hafif olmanın getirdiği üretim ve kullanım ekonomikliğinin yanında, üzerlerine etki eden dış kuvvetleri daha homojen dağıtarak toplam gerilmeleri azaltırken, gerekli yerlerde daha rijit davranarak daha yüksek doğal frekans modlarına da sahip olabilmektedir.

Topoloji optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, yapısal optimizasyon metotları arasında en popüler yöntemlerden biridir; çünkü verilen tasarımın sadece boyutunu ve şeklini değiştirmez, aynı zamanda sınır koşullarını yerine getirirken malzeme dağılımını da değiştirir. Topolojik olarak optimize edilmediği sürece, gerekli güvenlik faktörlerini karşılayan bir montajdaki her parça muhtemelen gerekenden daha ağırdır. Güvenlik katsayısının gereğinden büyük olması durumunda çeşitli yaklaşım ve analizler ile aşırı yüksek olan değer daha makul seviyelere indirilebilir. Ekstra ağırlık, fazla malzemelerin kullanıldığı, hareketli parçaların üzerindeki

yüklerin gerekenden daha yüksek olduğu, enerji verimliliğinin tehlikeye atıldığı ve parça nakil maliyetlerinin daha fazla olduğu anlamına gelir [3]. Güvenlik katsayısının uygun olması durumunda bile, optimizasyon ile aynı güvenlik düzeyini, daha düşük kütleli tasarım ile sağlamak mümkün olabilmektedir. Diğer yandan topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen ham geometriler çoğunlukla geleneksel imalat metotlarının fiziksel sınırlarını aşmaktadır ve bu şekilde tasarımları ne kadar optimal görünse de, imalatları ya imkânsız, ya da yüksek zaman, risk ve maliyetli olmaktadır.

Eklemeli imalat, 2 boyutlu oluşturulan katmanların üst üste bindirilerek 3 boyutlu hale getirilmesi prensibi sayesinde geleneksel imalat metotlarının sahip olduğu kısıtlamaları aşmaktadır. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilmiş geometriler girift ve organik yapıya sahip olduklarından geleneksel imalat metotları ile imal edilemeyecek durumda veya imalatları yüksek maliyet, uzun süre gibi dezavantajlara sahip iken; eklemeli imalat ile elde edilmeleri daha uygun olabilmektedir. Doludan boşaltmak yerine geometriyi üst üste yığarak oluşturan eklemeli imalat metotlarında geleneksel imalat metotlarına göre daha az talaş ortaya çıkmakta, bu da özellikle uzay alanında kullanılan pahalı hammaddelerin daha az harcanarak üretim maliyetinin düşürülmesini sağlamaktadır. Üretim planlama kapsamında imalat süresinin kısılması müşteriler için hızlı tedarik imkânı sağlarken, bütüncül üretim sistemleri daha kısa süre çalıştığı için dolaylı olarak CO₂ emisyonunun azalmasına da katkıda bulunarak metodun çevreye daha duyarlı olmasını sağlamaktadır. İstenmeyen ağırlığın yüksek üretim ve işletme maliyetlerine yol açtığı uzay ve havacılık sektöründe, geleneksel imalat metotlarına göre tasarlanmış yapay geometrili parçaların öncelikle topolojik optimizasyon ile bilgisayar ortamında organikleştirilmesi ve hafifletilmesi, ardından eklemeli imalat metotları ile üretimi önemli bir yenilik olarak ön plana çıkmaktadır.

Uzay koşulları

Kapsadığı vakum, atomik oksijen, radyasyon, uzaya fırlatılan faydalı yükün arıza durumunda onarım imkânının olmaması veya onarım maliyetinin proje maliyetine neredeyse eşdeğer olması gibi parametreler sonucunda uzay araçları ile diğer havacılık araçları (uçak, helikopter, İHA, vb.) birbirinden ayrılmaktadır. Uydu, uzay istasyonu, uzay taksisi (İng. Space Shuttle) gibi araçlar başta olmak üzere uzay araçlarının sistem, alt sistem ve ekipmanları yüksek güvenilirliğe sahip olmanın yanında mümkün olduğunca onarım gerektirmeden uzun süreli çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Dünya çapında NASA,

ESA, GE, KARI, RUAG Airbus, Boeing, Lockheed Martin gibi kurum ve kuruluşların havacılık ve uzay alanına yönelik eklemeli imalat çalışmaları devam etmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinin bu tür özel koşullarda uyduların faydalı ve yapısal yük kısımlarında kullanımının tarihçe kazanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Tarihçe kazanmış her parametre, eklemeli imalatın uzay alanındaki kullanımı için literatüre bir katkı sağlayacak olup, alınacak riskleri ise asgari düzeylere indirebilmek için önemli katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada amaç, geleneksel imalata göre tasarlanmış bir uydu braketinin topoloji optimizasyonunu doğadan esinlenerek organik yaklaşımlar ile yaparak, elde edilen modelin uzay koşullarına uygun ve bir uyduda görev yapabilecek şekilde eklemeli imalat teknolojileri ile imal edilebilirliğinin araştırılmasıdır. Çalışma ile hedeflenen unsurlar şu şekilde maddeler ile verilmiştir:

- Uydu parçalarının eklemeli imalata uygun tasarımlarının topoloji optimizasyon ile yapılması,
- Uydu parçalarının eklemeli imalat ile üretilebilirliğinin araştırılması,
- Eklemeli imalata göre tasarımlarda organik (biyomimetik) yaklaşımların kullanılması,
- Karmaşık geometrilili tasarımların eklemeli imalat ile üretilebilirliğinin araştırılması,
- Parça hafifletmeye yönelik yenilikçi tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesi ve eklemeli imalat ile üretilebilirliğinin araştırılması.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde öncelikle eklemeli imalat teknolojileri hakkında bilgi edinme, uzay ve havacılık alanına odaklanmış çalışmaları inceleme amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Ardından okuyucunun uzay kavramı ve koşulları hakkında fikir sahibi olmasına katkı sağlayacak bazı kavramlar ele alınmış ve bölüm sonunda, uzay ile ilgili tasarım kıstaslarına etki eden bazı senaryo ve parametrelerin açıklamasına yer verilmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat için Tasarım ve Topoloji Optimizasyonu

Bu kısımda küresel çapta uzay ve havacılık sektörüne ait ve uzay alanına odaklanmış veya uzay alanını hedefleyen eklemeli imalat çalışmaları ve uygulamaları araştırılmıştır. Araştırma aracı olarak bilimsel dergilerin elektronik yayınları, arama motorları, üniversitelerin web siteleri, 3 boyutlu yazıcı, eklemeli imalat sektöründe faaliyet yürüten ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların web siteleri, internet medyası kullanılmıştır.

Ön araştırmalar neticesinde, Resim 2.1 ve 2.2’ de örnekleri verilen uydu parçalarının (braket, anten tutucu vb.) eklemeli imalat ile üretilerek kullanılabilirliği konusunda çalışmaların NASA, ESA, Airbus, KARI ve diğer ülkelere ait araştırma merkezleri ve uzay ajansları tarafından yoğun bir şekilde yürütüldüğü ve onay süreçleri konusunda ilerlemeler sağlandığı görülmüştür.

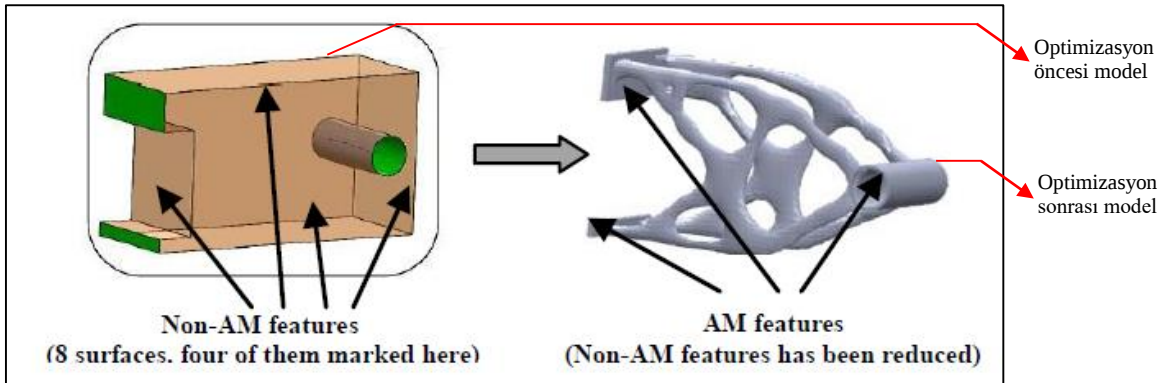


Resim 2.1. Eklemeli imalat anten braketleri Airbus (solda), KARI (sağda) [4,5]



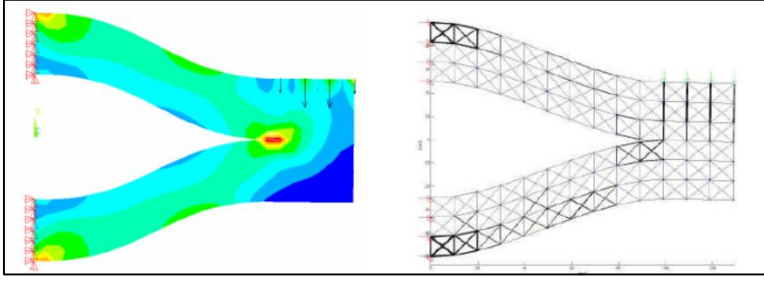
Resim 2.2. Metal eklemeli imalat ile imal edilmiş uydu parçaları, Thales Alenia [6,7]

Zhanga ve arkadaşları (2014), eklemeli imalatın tasarım süreç planlama perspektifinden değerlendirilmesi için iki seviyeli bir değerlendirme çerçevesi önermiştir. Önerilen değerlendirme çerçevesi, eklemeli imalat için iki seviyeli bir süreç planlama çerçevesi ile ilişkilidir ve her bir düzeyde, değerlendirmenin tasarlanması için süreç planlamasından bilgi aktarımı için çeşitli göstergeler tanımlanmış ve kullanılmıştır. Bu göstergeler ile çalışılarak eklemeli imalat dışı unsurlar olarak tanımlanan düzlemsel yüzeylerin optimizasyon ile organik yapılara dönüşümü yapılmıştır. Sınır koşulları olarak belirlenen kısımlar ise Resim 2.3' te sol tarafta yeşil renk ile gösterilmiş ve bu kısımların topolojisinde değişiklik yapılmaması sağlanmıştır. Aynı resmin sağ tarafında ise eklemeli imalat unsurları barındıran alternatif bir optimizasyon modeli verilmiştir.



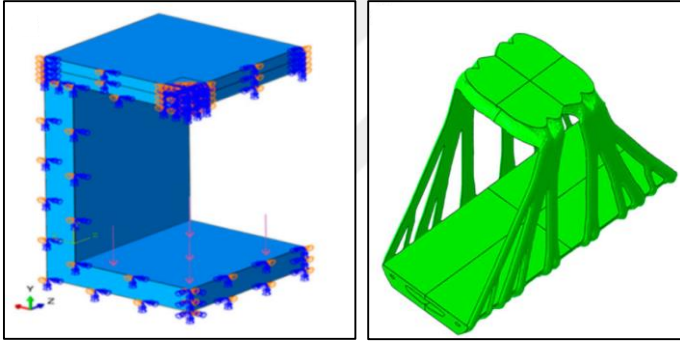
Resim 2.3. Unsur tabanlı topoloji optimizasyonu uygulaması [8]

Chu ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada ise DfAM (Eklemeli imalat için tasarım) fırsat ve zorlukları anlatılmıştır. Malzememe tasarım topluluğunda yaygın olan süreç-yapı-özellik-davranış modeline göre, eklemeli imalat için tasarım yöntemi bilgisayar destekli yeni bir tasarım ile sunulmuştur. Hücresel malzeme tasarım ve imalatı örnekleri (Bkz. Resim 2.4.), eklemeli imalat için tasarım yöntemini göstermek için kullanılmıştır.



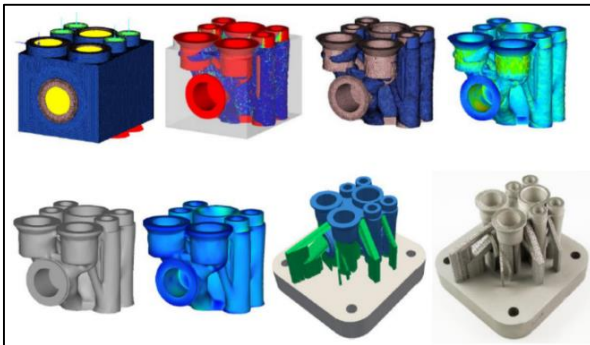
Resim 2.4. Hücresel malzeme tasarımı [9]

David W. Rosen (2013) tarafından sunulan çalışmada eklemeli imalat için tasarım ilkeleri, mevcut cihaz ve malzemelerin sınırları, malzeme mikro yapılarıyla ilgili mikro ölçekli sorunları ve sonuçta ortaya çıkan süreç çeşitliliğini kavramak için geleneksel imalat ile elde edilemeyen tasarımların imalatı ile ilgili fikirleri içeren ilkelerden bahsedilmiştir. ASTM ve ISO tarafından yürütülen standardizasyon süreçleri hakkında yorumlara yer verilmiştir.



Resim 2.5. İlk model (solda) ve sınırlamalara göre yapılan optimizasyon (sağda) [10]

Erin Komi (2014) tarafından hazırlanan raporda, SLE teknolojisi ile üretilen metal parçaların tasarımında dikkat edilmesi gereken parametrelere değinilmiştir. Tasarım yaklaşımı ve kazanılan faydaların gösterilmesi için tekrar tasarlama süreci önerilmiştir.



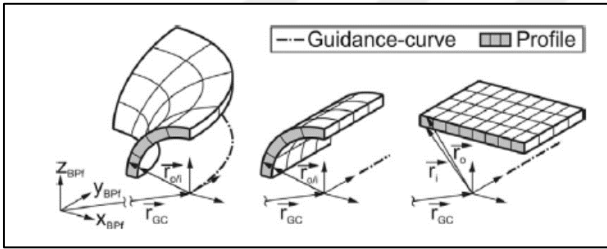
Resim 2.6. SLE parçalarının yeniden tasarım süreç basamakları uygulaması [11]

Mary K. ve arkadaşları (2016) tarafından sunulan çalışmada, eklemeli imalat için tasarımın başlıca fırsatları, kısıtlamaları ve ekonomik hususlarına değinilmiştir. Doğrudan ve dolaylı eklemeli imalat için tasarım ve yeniden tasarım konuları araştırılmıştır. Eklemeli imalat teknolojisinin umut vaat eden yönleri, potansiyeli ve gelecekteki zorlukları özetlenmiştir.



Resim 2.7. Topoloji optimizasyonu yapılarak imal edilen bir braket [12]

Guido A.O. ve arkadaşlarının (2013) çalışmasında, süreçten bağımsız bir yöntem tanımlanmış ve SLS, SLE, FDM için tasarım kuralları geliştirilmiştir. Sonuçlar bir tasarım kural kataloğunda özetlenmiş ve eklemeli imalat için uygun bir tasarım desteklenmiştir.



Resim 2.8. Eklemeli imalat süreçleri için önerilen bir tasarım yaklaşımı [13]

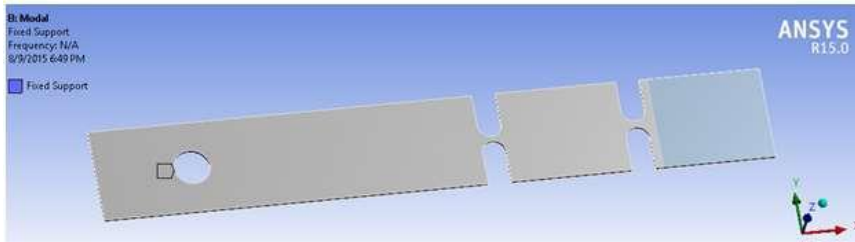
Wessel W. ve arkadaşları (2013), yüksek basınç mikro pompanın metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesine yönelik çalışmıştır. Bu çalışmada, uydu uygulamalarına yönelik küçük çaplı, güvenilir, sızdırmaz, düşük ve yüksek basınçlı bir mikro pompanın tasarımı incelenmiştir. Geliştirilen mikro-pompa bir basınç kafası oluşturmak ve çalışma akışkanını hareket ettirmek için bir piezo-elektrik disk kullanmaktadır [14].

Christian Lindemann ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmada, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak son kullanıcıların eklemeli imalat kullanımı için uygun adayları bulmalarına yardımcı olacak bir yöntem geliştirilmiştir. Bu kavram ayrıca akımın yeniden tasarlanması için yaklaşımları ve mevcut parçalar ve teknolojinin kullanımının ekonomik etkilerini tahmin etmeye yardımcı olacak bir yaklaşımları içermektedir, Resim 2.9 ile çalışmadan bir örnek verilmiştir.

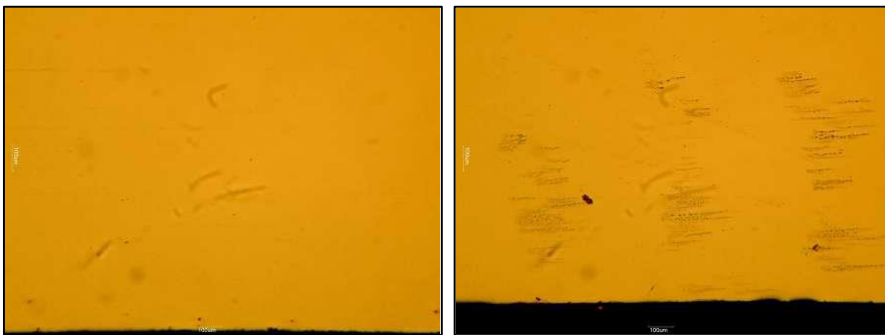


Resim 2.9. Parça tasarımlarına eklemeli imalat ile farklı yaklaşım [15]

Shravya Sree Potluri, 2015 yılında yayınlanan yüksek lisans tezinde eklemeli imalat ile imal edilen numunelerin hızlandırılmış titreşim testlerine dair çalışmalar yapmıştır. Paslanmaz çelik 316 malzemeden LENS metodu ile imal edilen numunelerin ANSYS ile analizleri yapılmış, mikro yapıları incelenmiştir. Testlerde talaşlı imalat ile elde edilen numunelerin eklemeli imal edilen numunelerden daha yüksek sertliğe sahip olduğu belirtilmiştir. (75 ve 68 H Rockwell “B”). Ayrıca eklemeli imalat modelinin ömür bakımından daha geride olduğu testler ile ortaya çıkmış, yazar bunun sebebini eklemeli imalat eklemeli imalat modelinin mikro yapısındaki hataların daha fazla olması olarak yorumlamış, öte yandan eklemeli imalatın parametreleri üzerinde çalışılarak modellerin mikro yapılarında iyileştirmeler elde edilebileceği öngörüsünde bulunmuştur.

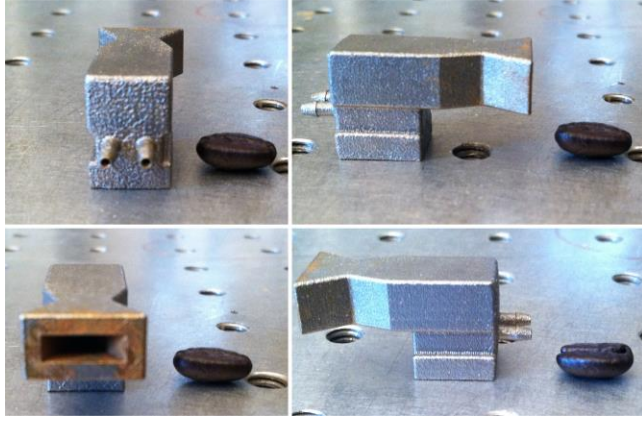


Resim 2.10. ANSYS ortamında test numunesi modellemesi [16]



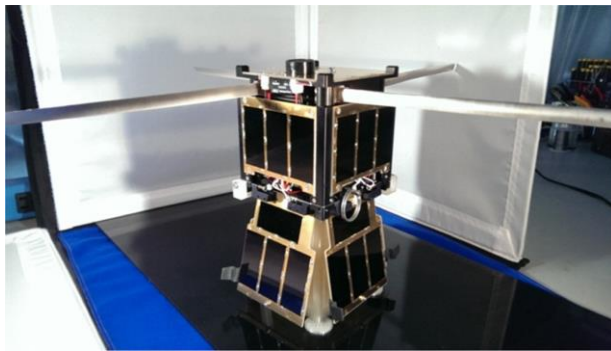
Resim 2.11. Geleneksel (solda) ve eklemeli imalat (sağda) mikro yapı karşılaştırması [16]

Kevin R. G. tarafından yapılan tez çalışmasında nano uydu uygulamaları için eklemeli imalat ile geliştirilen mikro iticiler ele alınmıştır. Malzeme seçimi aşamasında, polimer ve benzeri malzemelerin uzaydaki değişken sıcaklık koşulları sebebiyle elendiği çalışmada, yine yüksek ısı yükü sebebiyle ısıl iletkenliği ve dolayısıyla ısı altında form değişimi yüksek Alüminyum alaşımları yerine ısıl olarak oldukça yalıtkan ve farklı sıcaklıklar altında geometrik kararlılığını daha iyi muhafaza eden Titanyum alaşımı seçilmiştir. Bu tez içerisinde atıfta bulunulan bir başka kaynakta ise eklemeli imal edilen Titanyum alaşımlarının geleneksel imalat ile elde edilen muadillerine göre benzer veya daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğundan bahsedilmiştir.



Resim 2.12. Nano uydular için eklemeli imalat malzeme ve tasarım çalışması [17]

Güçlendirilmiş plastikler isimli derginin 60. Sayısında Francesca Coughi tarafından ele alınan yazıda 2013 yılında NASA tarafından fırlatılan küçük uyduların arasında yer alan KY-Sat2 isimli bir Küp uydudan bahsedilmektedir. Bu küp uydu, Windform XT 2.0 isimli polyamid matriksli karbon fiber malzeme ile imal edilmiş 10 parçanın birleşiminden oluşmaktadır.



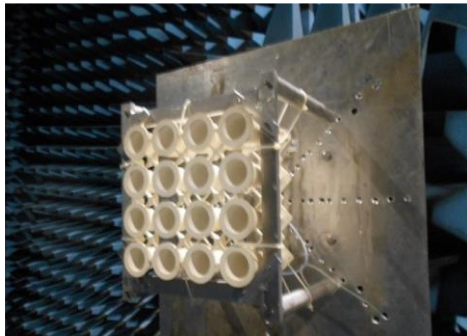
Resim 2.13. Windform XT 2.0 malzemesi ile imal edilmiş KY-Sat 2 küp uydusu [18]

Michael S. ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Ku-Bant transdüserlerinin ALM ile üretilerek uydularda kullanılması konusu ele alınmıştır. Üretilen parçaların RF testlerinde geleneksel imalat modellerine göre benzer sonuçlar verdiği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca ALM sayesinde transdüser çok sayıda parçanın birleşiminden imal edilmek yerine tek parça halinde, daha ucuza ve daha kısa sürede imal edilmiştir.



Resim 2.14. Eklemeli imalat Ku-Bant transdüseri [19]

S.S. Gill ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada uzay uygulamaları için eklemeli imalat metotları kullanılarak besleme anteni geliştirilmesinden bahsedilmiştir. Çalışma SLE metodu ile AlSi10Mg malzemesi kullanılarak yapılmıştır. Denemeler sonucu imal edilen modellerin kalifikasyon seviyesi çevresel uzay testlerinden ve RF testlerinden başarı ile geçtiği bilgisi paylaşılmıştır.



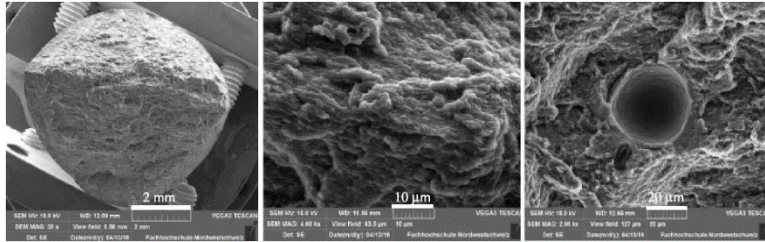
Resim 2.15. Besleme antenleri yansız oda RF testleri, S.S. Gill ve arkadaşları [20]

Melissa E. O. ve arkadaşları tarafından “Hafifletilmiş, Optimize Edilmiş Uzay Uçuşları için Uyumlu Metalik Parçaların Eklemeli İmalat ile Üretimi” konusu çalışılmıştır [21]. Bu konu kapsam bakımından bu çalışma ile en büyük benzerliğe sahip olmasıyla ön plana çıkmaktadır. EOS M290 toz yataklı SLE tezgâhı kullanılarak AlSi10Mg tozu ile uydularda çalışabilecek şekilde yıldız izler braketleri ve bir adet de yapısal mafsalları topoloji optimizasyonu, imalatı, test ve muayeneleri yapılmıştır. İmalat sonrası ısıtma işlemi

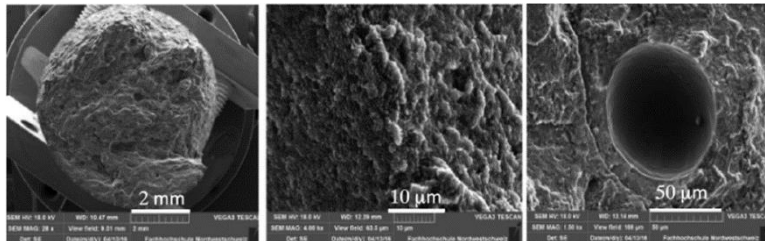
uygulanmamıştır. Yazarlar “Bütünsel Süreç Akışı” şeklinde parça seçiminden imalat sonrası doğrulamaya dek uzanan bir süreç tanımlamışlardır. Analiz programı olarak Altair Inspire veya Optistruct kullanmışlardır. Yerleşim oryantasyonunda bir önceki katmana temas ederek ergitilen toz ile, altında katman olmayıp ergitilmemiş toza temas ederek ergitilen tozun, farklı ısı iletim katsayısı sebebiyle ısı gerilme değerlerinin de farklılık içereceği bilgisini paylaşmışlardır. Ayrıca testler ile analizler arasındaki doğal frekans farklarının; analizin birebir gerçek senaryoyu temsil edememesi, katılık tahminleri ve malzemenin tanımlanan Young’s modülü (65 MPa) ile, ölçülen Young’s modülünün (70 MPa) farklı olması ve testler sırasında cıvata ve bağlantı elemanları ile yapılan torklamanın yapının katılığını artırması olarak açıklanmıştır. Ancak imalat parametreleri (lazer gücü, hızı, tarama stratejisi, vb.) hakkında bilgiye rastlanmamıştır.



Resim 2.16. Eklemeli imalat yıldız izler braketi, AlSi10Mg [21]



Resim 2.17. Yatay imal edilmiş kırılma numunesinin mikro yapısı [21]

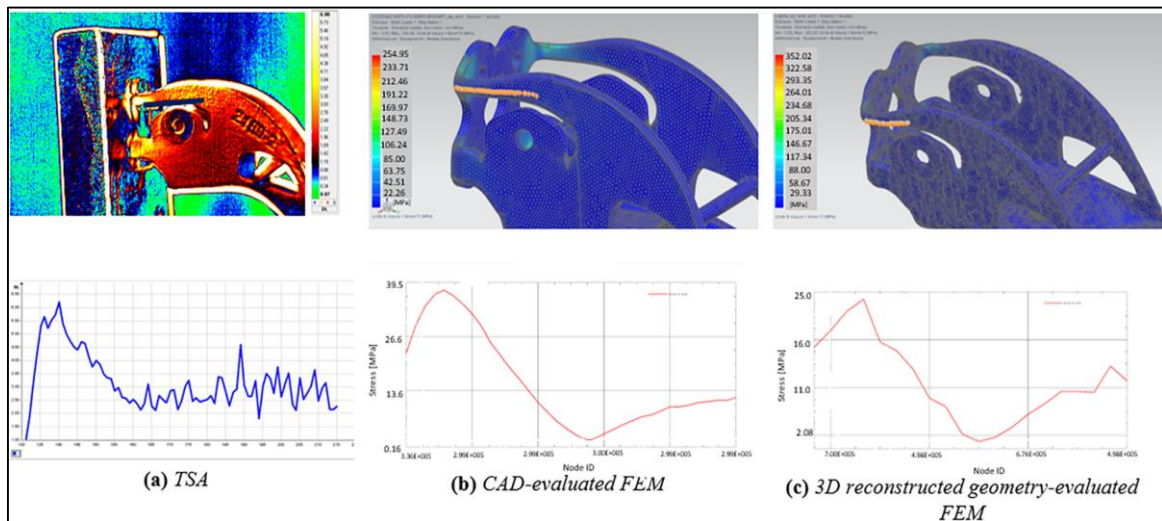


Resim 2.18. Dikey imal edilmiş kırılma numunesinin mikro yapısı [21]

G.J. Schiller tarafından yapılan çalışmada eklemeli imalatın havacılık ve uzay teknolojileri alanında tercih edilme sebepleri ele alınarak bazı örnek çalışmalara yer verilmiştir [22].

Karmaşık tasarım ve çok sayıda birleştirme, bağlantı elemanı, montaj gibi unsura sahip olan ancak sayı olarak oldukça az ihtiyaç duyulan parçaların, eklemeli imalat ile daha düşük maliyete, daha hafif, daha kompleks olarak imal edilebilmesine dair örnekler gösterilmiştir. Metal malzemelerin uzay kullanımı konusunda uygunluğu varken, polimer malzemelerin yüksek ısı dayanımı gibi kısıtlar sebebiyle henüz uzay kullanımları konusunda mücadele etmesi gerektiğini belirtmiştir. Metal malzeme olarak paslanmaz çelik, nikel bazlı süper alaşımlar (örn. inconel 625 ve 718), Titanyum ve alaşımları, Kobalt-Krom alaşımları listelenmiştir. Polimer malzemelerin ise yer destek süreçlerinde kullanılarak hafiflik, ucuzluk, daha az işçi ile daha düşük işlem süresi elde etmek gibi avantajlarından söz edilmiştir.

Gloria Allevi ve arkadaşları Titanyum malzemeden EBM metodu ile imal edilen havacılık ve uzay alanına yönelik braketlerin ısı gerilme analizleri hakkında çalışmışlardır [23]. -180 derece ile +150 derece arasında çalışması gereken ve kompozit malzemelere doğrudan bağlantısı olan braket için, titanyum malzemenin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Boyutsal karakterizasyon, hata tespiti, mikro ve makro incelemeler yapmak için görsel muayene, bilgisayarlı tomografi, dijital X-Ray, akustik metotlar, infrared testler, lazer profilometreler, mikroskop, vb. tahribatsız muayene metot ve araçlarından bahsetmişlerdir. Ancak bu metotların gerilme analizler hakkında bilgi vermediğini belirtmişlerdir. Termoelastik gerilme analizinin eklemeli imalat parçalarına uygulanması ve parça üzerinden yapılan teorik hesaplamaların karşılaştırmaları yapılmış, bazı parametre değişiklikleri yapılarak güvenilir bir analiz seti elde edilebileceği öngörüsünde bulunulmuştur.



Resim 2.19. EBM modelleri, standart ve termoelastik analiz sonuç karşılaştırması [23]

2.2. Literatür Tarama Sonuçları: Neden Eklemeli İmalat?

Bu bölümde literatür taraması sonucu edinilen bilgiler ışığında değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmeler tasarım, hammadde ve hafiflik olarak 3 başlık altında toplanmıştır.

2.2.1. Tasarım serbestliği

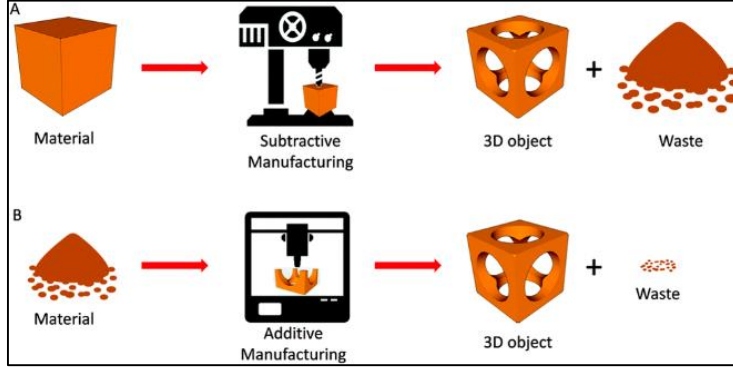
Bazı uydu ekipmanları karmaşık tasarımlara ve/veya çok hassas montaj gereksinimlerine sahiptir. Geleneksel imalat metotları tasarımcıların modelleme yaparken imal edilebilirlik kısıtları sebebiyle tasarımlarında birçok kısıtlama yapmalarına sebep olmaktadır. “İmalat için Tasarım” kriterleri kapsamında bu kısıtlamalara uyulmak zorunda kalınmaktadır. Örneğin tek parça üretilemediğinden parçalara ayrılarak üretim sonrası monte edilen bileşenlerin montaj arayüzlerindeki toleranslar gereksinimleri karşılamada zorluk çekmekte veya çok hassas tolerans koşulları sebebiyle üretim maliyetleri artmaktadır.

Eklemeli imalat teknolojileri geleneksel imalat ile metotları ile elde edilemeyen karmaşık/girift yapıların imal edilebilmesine imkân sunmaktadır. Bu sayede üretim kısıtlarından dolayı çok fazla alt bileşen halinde üretilip montaj edilerek bir araya getirilmek zorunda kalınan ekipmanların daha az bileşen / daha az montaj arayüzü ile imalatı sağlanmaktadır. Böylece üretimden sonraki montaj, entegrasyon ve test aşamalarında hata ihtimali daha düşük ekipmanlar elde edilmekte, daha az yüzeyde / özellikte hassas yüzey ihtiyacı kaldığından üretim maliyetleri azalmaktadır. Eklemeli imalat için tasarım, geleneksel imalat için tasarım kriterlerine göre daha yeni bir kavram olup günümüzde hızlı biçimde geliştirilmektedir. Destek yapılarının oluşturulması, modelin tablaya / toz yatağına yerleşim oryantasyonu, oluşuyorsa artık ısı gerilmelerinin önlenmesi gibi aşamalar eklemeli imalat ile literatürde yeni ve zorlayıcı araştırma alanları olarak yerini alırken, tasarım serbestisinin sunduğu kolaylık ile tasarımcılar önemli avantajlar elde etmektedir. Bu konuda L. Jyothish Kumar ve C.G. Krishnadas Nair’ in “Havacılık ve Uzay Alanında Günümüz Eklemeli İmalat Eğilimleri” [24] çalışmasından faydalı bilgiler edinilebilir.

2.2.2. Hammadde tasarrufu

Talaşlı imalat ile doludan malzeme işlenerek nihai parçanın şekillendirilmesi prensibinin aksine, eklemeli imalat ile hammaddenin üst üste yığılması parça şeklinin oluşturulması söz

konusu olduğundan, hurdaya çıkan malzeme oranında ciddi farklar görülmektedir. Şekil 2.1’de bu durum ifade edilmektedir.



Şekil 2.1. Talaşlı (A) ve eklemeli imalat (B) hurda malzeme karşılaştırması [25]

2.2.3. Hafiflik

Havacılık ve uzay endüstrisinde hafiflik olmazsa olmazlardandır. Hammaddenin, tasarımın, parçanın ve sistemlerin daha hafif olmasıyla ilgili sürekli çalışmalar yapılmakta ve gelişmeler yaşanmaktadır. Geçtiğimiz yıl yayımlanan bir çalışma ile Space-X'in Falcon 9 roketi ile uzaya kilogram başına yük taşıma maliyetinin 2 720 Amerikan dolarına düşürdüğü ifade edilmiştir [26].

2.2.4. Sonuç

Tasarım serbestliği, hammadde tasarrufu ve hafiflik gibi önemli parametrelere dayandırıldığında literatürde çok sayıda çalışmanın yapıldığı veya devam ettiği görülmüştür. Uzay ve havacılık alanında özellikle kullanıma yönelik parça imalatlarına bakıldığında en yaygın kullanılan yöntemlerin başında toz yataklı metal eklemeli imalat yöntemlerinin geldiği görülmüştür. Bu yöntemler ile hammadde olarak diğer mühendislik metallerine göre hafiflik ve fiyat avantajı ile ön sıralarda yer alan, işleme kolaylığına sahip alüminyum alaşımı malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Örneğin AlSi10Mg malzemesi, çok yaygın kullanılan Al 6061 T6 malzemesi ile neredeyse aynı mekanik özelliklere sahip olduğundan tercih edilmektedir. Isıl iletim katsayısının da yüksek olması ile özellikle ısı transferi ihtiyacının olduğu çalışmalarda bu malzeme ön plana çıkmaktadır. Diğer yaygın kullanılan malzemelerden birisi de Titanyum alaşımıdır. Biyolojik uyumu sayesinde biyomedikal alanında yaygın kullanılan titanyum alaşımları, düşük yoğunluğuna karşın özgül mukavemet

değerinin iyi olması, ısı yalıtkanlık istenen alanlar için yalıtım kabiliyetinin iyi olması ile havacılık ve uzay endüstrisinde metal eklemeli imalat ile çalışılan yaygın malzeme türlerindendir. Havacılık ve uzay alanında metallere ek olarak kompozit ve polimer malzemelerin de çalışıldığı görülmüş, örneğin ISS'te polimer bileşenli malzemelerin uzay koşullarına göre uyarlanan bir FDM cihazı ile çalışıldığı bilgisine ulaşılmıştır.

Eklemeli imalat için tasarım konusunda sürekli yeni çalışmaların yapıldığı, çeşitli hipotez ve metotların geliştirildiği görülmüştür. ALM ile imal edilen test parçasının mikro yapı ve dolayısıyla yorulma dayanımı bakımından geleneksel imalat modeline göre geride kaldığı çalışmanın yanında, EBM ile imal edilerek en az geleneksel imalat muadili kadar mukavemetli parçaların da elde edilebildiği bilgilerine ulaşılmıştır. Genel olarak eklemeli imalat parçalarının henüz mikro yapı seviyesinde geliştirilmesine ihtiyaç olduğu ve özellikle yorulma veya dinamik yüklemeler için yeterli güvenilirlikte olmadığı görülmüştür.

Yüzey pürüzlülüğü, mikro seviyede katmanlar arası bağ kuvvetinin anizotropik yapısı, imalatın yapıldığı cihazın parametreleri, tozun tanecik yapısı gibi faktörlerden dolayı henüz sonlu elemanlar modelleme yazılımlarının ve dolayısıyla metal eklemeli imalat parçalarının sonlu elemanlar analizlerinin yeterli olgunluğa erişmesi için zamana ihtiyaç duyduğu anlaşılmıştır.

Literatür özeti ve bu çalışma kapsamına en uygun örneklerden birisi olarak, Resim 2.20 ve Çizelge 2.1'de ESA tarafından Exomars uydusuna monte edilen ve topoloji optimizasyonu sonrasında eklemeli imalat metotları ile üretilen bir tepki tekeri braketinin geleneksel imalat metotları ve eklemeli imalat ile üretim senaryosuna göre tasarımların resmi ve karşılaştırma çizelgesi yer almaktadır.



Resim 2.20. Tepki tekeri braketinin eklemeli imalat çalışması, DMRC [27]

Çizelge 2.1. Tepki tekeri braketleri geleneksel ve eklemeli imalat karşılaştırması

No	Parametre	Geleneksel	Eklemeli	Kazanç %
1	Kütle	1,10 kg	0,45 kg	-60
2	Talaş	56 kg	0,8 kg	-98
3	Maliyet	8000 Euro	3800 Euro	-53
4	Zaman	59 saat	40 saat	-32
5	Maksimum Deplasman			-37
6	1. Doğal Frekans			+20

2.3. Uzay Koşulları

Bu kısımda, braketin planlama sürecinden başlayarak gereksinim, tasarım ve imalat gibi üretim planlama süreçlerine etki eden çevre koşulu, yani dış uzay ortamı hakkında bilgi verilmektedir. Bir araştırmacı tarafından iyi bilinen bir husustur ki, bir problemin tüm unsurlarıyla beraber açık ve net şekilde tanımlanması, o problemin çözümündeki doğruluğu direkt olarak etkilemektedir. Atmosfer tabakaları, dış uzay ve dış uzayda kullanılan uzay araçları hakkında kısa ve öz bilgi sahibi olmak bu çalışmanın tam ve doğru kavranabilmesi kapsamında önemli katkı sağlayacaktır.

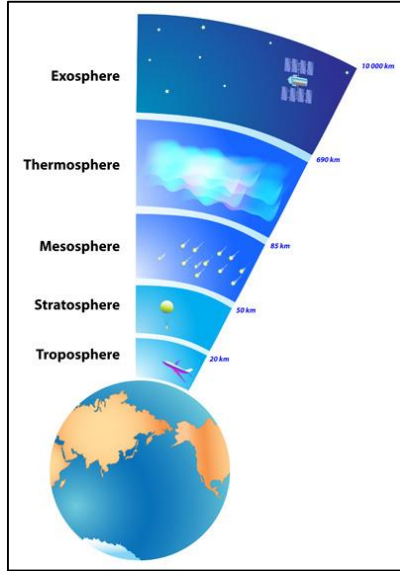
2.3.1. Atmosfer

Diğer gezegenlerden farklı olarak dünya, gezegenin etrafını çevreleyen ve yerçekimi tarafından korunan, genellikle hava olarak bilinen gaz tabakasına (atmosfer) sahiptir. Atmosfer beş katmandan oluşmaktadır ve dünya üzerinde canlı yaşamı için uygun koşullara sahiptir. Atmosfer katmanları en yakından uzağa doğru şu şekilde sıralanabilir:

- Troposfer
- Stratosfer
- Mezosfer
- Termosfer
- Egzosfer

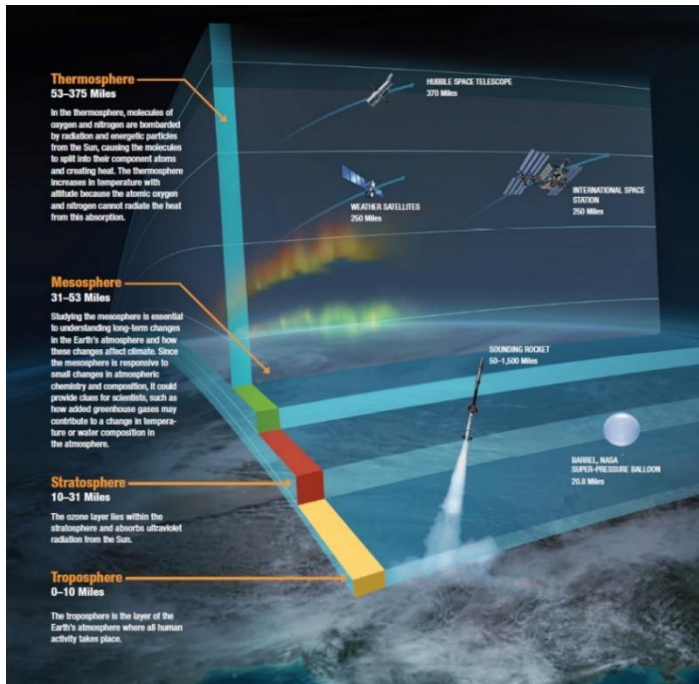
Uçaklar atmosferin yere temas eden en alt katı troposfer içerisinde uçar. Ancak örneğin uluslararası uzay istasyonu ISS egzosferden dışarı çıkan yörüngelerde dolaşır [28]. Atmosfer, şu özellikleri ile dünya hayatının korunmasını sağlar:

- Atmosferin oluşturduğu basınç ile su, dünya yüzeyinde sıvı fazda bulunmak,
- Ultraviyole ışınları süzmek,
- Isı tutulması (sera etkisi) yoluyla yüzeyi ısınmasını sağlamak ve gündüz ile gece arasındaki aşırı sıcaklık farkı oluşumunu engellemek.



Resim 2.21. Atmosfer katmanları, ESA [28]

NASA kaynaklarına göre ise atmosferin katman yapısı aşağıdaki gibidir.



Resim 2.22. Atmosfer katmanları, NASA [29]

2.3.2. Dış uzay / uzay

Dış uzay veya sadece uzay, dünyanın ötesinde ve gök cisimleri arasında var olan genişliktir. Dış uzay tamamen boş değildir; düşük miktarda parçacık yoğunluğu, ağırlıklı olarak bir hidrojen ve helyum plazması, ayrıca elektromanyetik radyasyon, manyetik alanlar, nötrinolar, toz ve kozmik ışınlar içeren sert bir vakumdur. Büyük patlama (Big-Bang) arka plan ışıınımı tarafından belirlenen taban sıcaklığı, 2.7 Kelvin'dir (70270.45°C ; -454.81°F) [30].

Dış uzay, dünya yüzeyinin üzerinde kesin bir irtifada başlamamaktadır, bununla beraber deniz seviyesinden 100 km (62 mil) yükseklikte olan Kármán hattı, geleneksel olarak uzay anlaşmalarında ve havacılık kayıtlarını tutmak için dış uzay başlangıcı olarak kullanılır [31].

Bilim insanları, 20. yüzyıl boyunca yüksek irtifa balon uçuşlarının ortaya çıkmasının ardından uzaylıların fiziki keşiflerine başlamış ve ardından insanlı roketlerin fırlatılması başlamıştır. Dünya yörüngesine ilk olarak 1961'de Sovyetler Birliği'nden Yuri Gagarin tarafından ulaşılmış ve insansız uzay aracı o zamandan beri güneş sisteminde bilinen tüm gezegenlere ulaşmıştır. Uzaya girme maliyetinin yüksek olmasından dolayı insanlı uzay uçuşu düşük dünya yörüngesi ve ay ile sınırlandırılmıştır.

Dış uzay, vakum ve radyasyon tehlikeleri nedeniyle bilim insanlarının araştırmaları için zorlu bir ortamı temsil etmektedir. Mikro çekim, hem kas atrofisine hem de kemik kaybına neden olan insan fizyolojisi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir [32]. Bu sağlık ve çevre sorunlarına ek olarak, insanlar da dâhil olmak üzere nesneleri uzaya göndermenin ekonomik açıdan maliyeti çok yüksektir.

2.3.3. Uzay araçları

Uzay araçları, koşulları yukarıda belirtilen dış uzay ortamındaki çevresel koşullar göz önüne alınarak özel malzemeler ile tasarlanarak üretilen ve görevlerine göre farklılıklar gösteren araçlardır. Bu araçlardan bazıları insanlı, bazıları da insansız çalışmaktadır. Bilimsel araştırmaların yapıldığı, düşük irtifalı (deniz seviyesinden itibaren 2 000 km veya daha az mesafedeki yörüngeler) yörüngede (Low Earth Orbit) uçan ISS insanlı bir uzay aracıdır. Yine düşük irtifa yörüngesinde uçan örneğin yer gözlem uyduları ise çoğunlukla insansız

uzay araçlarıdır. Aynı şekilde yeryüzü eşzamanlı yörüngede (Geostationary Orbit) deniz seviyesinden 35 786 km yüksekte görev yapan ve yeryüzünde bir noktaya göre bağlı hareketi olmayıp yeryüzünün bir parçasıymış gibi hareket eden haberleşme uyduları da insansız uydulardır. Uzay araçları genellikle roketler veya shuttle denilen özel uçaklar ile belirli irtifalara çıkarılır, ardından uzay aracı kendini taşıyan araçtan ayrılarak nihai görev yörüngesine yerleşmek üzere kendi itki motorlarını kullanır.

Fırlatıcı roketler, teknolojilerini ikinci dünya savaşından alan ve ilk etapta uzun menzilli karadan karaya füze şeklinde tasarlanmış araçlardır. Uzay teknolojilerine bu bilgi biriminin adapte edilmesiyle modifiye edilen roketlerin karadan uzaya fırlatılmaları ve taşıdıkları faydalı yükü belirlenen noktalara bırakmaları ile farklı bir aşamaya geçilmiştir.

Roket motorları, yerçekimi ivmesine karşı koyarak yüzlerce kilogramlık veya ton mertebesinde kütleye sahip yükleri uzaya çıkarabilmek için çok yüksek güç üretirler. Motorların fırlatmanın ilk anından itibaren belirli bir süre boyunca ürettiği çok yüksek G değerleri, taşıdıkları uydu vb. görev yüklerine de etkimektedir. Uyduların, roket motorunun ilk ateşlenmesi anından itibaren ortaya çıkan bu yüksek G yükleri altında yapısal bütünlüklerini koruyabilmesi gerekmektedir. Bu yüklerin uydu ekipmanlarındaki etkisini görmek ve analizler ile tasarımları uygun hale getirmek için TÜBİTAK Uzay bünyesinde, profili ECSS standartları ile verilen yüksek seviye sinüs titreşim testleri icra edilmektedir. Roketlerin uçuş esnasında taşıdıkları uyduya boşalan katı yakıt kapsüllerinin atılması ve uydunun roketten ayrılırken piroşok ünitelerinin patlaması sırasında çeşitli rastgele titreşim ve şok yükleri de meydana gelmektedir. Yine uluslararası standartlarca belirlenmiş formüller, taşıyıcı roket, ekipmanın uydudaki konumu ve kütlesine göre kullanılarak elde edilen rastgele titreşim yükleri de analiz ve testlerde uygulanmaktadır.

Tasarım aşamasında test seviyeleri analizler aracılığıyla modellere uygulanarak mümkün olduğunca deneme-yanılma sayısı azaltılmaya çalışılmakta, idealde tasarımların testlerden ilk seferde geçilmesi hedeflenmektedir. Ancak eklemeli imalat teknolojilerinin geleneksel imalat modellerine göre farklı imalat parametreleri ve yapısal özellikleri sebebiyle, analizlerinin daha detaylı ve dikkatli yapılması, ayrıca literatür bakımından analiz ve test sonuçları arasında yeni yorumlar yapılması gerekebilir. Literatür bilgileri ve mikro yapıdaki nispeten zayıflıklar göz önüne alındığında, geleneksel imalat modelleri sonuçlarına göre görülen ortalama % 10'luk sapmadan daha fazla bir sapma olacağı tahmin edilmektedir.

Literatür tarama sonuçlarından edinildiği üzere uzay alanında çeşitli metot ve malzemeler ile eklemeli imalat çalışmaları yapılmaktadır. Bu tez kapsamına en yakın çalışma Melissa E. Orme ve arkadaşları tarafından yapılan “Hafifletilmiş, Optimize Edilmiş Uzay Uçuşları için Uyumlu Metalik Parçaların Eklemeli İmalat ile Üretimi” konulu çalışmadır. Bu çalışmada aynı model cihaz ve cihaz üreticisi Elektro Optik Sistemlerin (EOS) sağladığı aynı AlSi10Mg tozu kullanılmıştır. Çekme numuneleri imalatı ise zarf boyutlarını kapsayacak şekilde düz modellenen parçaların, optimize edilen modeller ile aynı anda dolayısıyla aynı parametreler ile imal edilecek şekilde sağlanmıştır. Numuneler daha sonra işlenerek çekme numunesi formuna getirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ise numuneler yine aynı parametreler ile ancak direkt nihai formlarında imal edilmiştir. Topoloji optimizasyonu ve biyomimetik yaklaşımlar sonrası elde edilen geometrinin uzay koşulları kalifikasyon seviyesi testlerinde yüksek seviye sinüs titreşim 100 Hz, 20 G olarak uygulanmış, rezonans taraması 5 – 2000 Hz aralığında 0.5 G ile yapılmıştır. Biyomimetik tasarım süreci ve bu yaklaşımın kullanımı ile hedef parametrelerdeki iyileşmeler anlatılmış, imalat parametreleri çizelgeler halinde verilmiştir



3. MALZEME, METOT, TASARIM VE NUMUNE İMALATI

3.1. Giriş

Bu bölümde, daha önceki bölümlerde belirtilen tasarım gereksinimleri ve çevre koşulları göz önüne alınarak, hedef çalışma parçasının tespiti ve ardından seçilen çalışma parçasının karakteristik özelliklerini belirleyecek seçimler yapılacaktır. Malzeme seçimi bu sürecin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Gereksinimler doğrultusunda belirlenen malzeme ile tasarım doğrulamasında yapılacak analizler için mekanik özellik girdileri elde edilecektir. Malzemenin ve kullanılacak eklemeli imalat metodunun belirlenmesi birbiriyle bağımlı ve önemli bir adımdır. Polimerden kompozite, seramikten metal alaşımlarına kadar çok çeşitli malzemeler ile eklemeli imalat metodlarının uygulanıyor veya araştırılıyor olmasına karşın, her malzeme ve imalat metodunun da birbiri ile uyumlu olmaması sebebiyle ortak seçimin önemi anlaşılabılır.

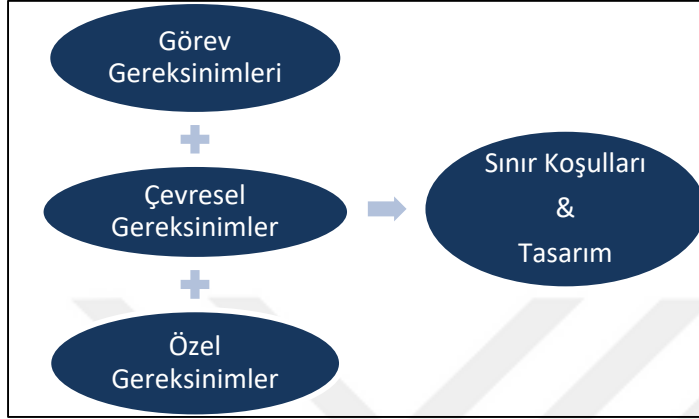
Eklemeli imalat metodlarında kullanılan malzemelere ait veri tabanları incelenerek, bu malzeme havuzundan çalışma için en uygun malzeme veya malzemelerin belirlenme imkânı ortaya çıkmaktadır. Malzeme ve metot bilgilerine göre tasarım yapılarak, analizler ile gereksinimlerin karşılanabilme durumu mümkün olacaktır.

Literatür araştırmalarından edinilen bilgiler ışığında, herhangi elektrik-elektronik, optik bileşene doğrudan sahip olmayan, mümkün olduğunca yorulma gerilmelerinden uzak, statik çalışma koşulları olan bir parça üzerinden çalışılması uygun görülmüştür. Bu koşulları sağlayan parçaların başında, ekipmanların uydu panellerine sabitlenmesini sağlayan braketler gelmektedir.

3.2. Gereksinimler

Bir tasarımcı için olmazsa olmaz konu, tasarımı yapılması istenen sistemin / alt sistemin / ekipmanın gereksinimlerinin bilinmesidir. Tasarım çerçevesi, yani sınır koşulları tüm bu gereksinimler doğrultusunda belirlenir ve sınır koşulları referans alınarak geometrik formun inşasına başlanır. Yine sınır koşulları tasarımcıya sağlaması veya aşmaması gereken geometrik boyutları vererek nihai modelin zarf hacmi hakkında tahminde bulunabilmeye

yardımcı olur. Zarf hacminin tahmin edilmesi özellikle modelin varsa birlikte kullanılacağı diğer bileşenlerin ve modelin montaj edileceği platform parametrelerinin hesaplanması hakkında da ipuçları barındırır. Bu çalışma kapsamında gereksinimler Şekil 3.1’de görüldüğü üzere görev, çevresel ve özel olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.



Şekil 3.1. Gereksinim türleri

3.2.1. Görev gereksinimleri

Görevi boyunca braketin aşağıdaki gereksinimleri yerine getirmesi beklenmektedir.

Montaj arayüzü

Kütlece ve boyutça kendisinden büyük bir yüzeye yeterli sayıdaki noktadan bağlanması gerekmektedir. Ayaklar / bağlantı arayüzleri fiziksel olarak aynı düzlemde olabilir veya aynı hayali düzlem üzerinde birbirinden ayrı olabilir. Eklemeli imalat metotlarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri geleneksel imalat sonuçlarına göre daha bozuk olduğundan, bu gereksinim imalat sonrası bir yüzey işleme ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Tutma ve sabitleme

Braket, belirli bir kütleye sahip herhangi bir başka ekipmanı bağlantı arayüzünden tutarak, kendisi de sabitleme ayaklarındaki montaj arayüzünden bir zemine (kendisinden kütlece büyüklüğü sebebiyle zemin gibi davranan yüzey) bağlanacaktır. Tüm görev süresi boyunca taşıyacağı ekipmanı tutma ve sabitleme görevini yerine getirecek, çevresel yük koşulları altında plastik deformasyona uğramayacak derecede mukavim olacaktır.

Doğal frekans

Roket ile ilk fırlatma ve uçuş sırasında, uydunun roketten ayrılmasından sonra da uydunun içerisinde sinüs ve rastgele titreşim yükleri oluşmaktadır. Bu yükler ekipmanlara etkideğinde uygun tasarımda olmaları halinde yeterli mukavemet ile görev ve ömür performansından kayıp yaşanmaksızın işlevselliklerini sürdürebilmektedirler. Braketin, kendisinin bu yüklere dayanımına ek olarak taşıyacağı yükün doğal frekansından da uzak kalarak onun için amplifikatör gibi olumsuz bir etki oluşturmaması gerekmektedir. Bunun için tecrübelerle dayanarak elde edilen veriler ışığında braket için ilk doğal frekans modunun 250 Hz.'den yüksek olma hedefi belirlenmiştir.

3.2.2. Çevresel gereksinimler

Vakum ortamı

Uzay, vakum ortamıdır. Vakum ortamında teorik olarak herhangi bir gaz olmadığı varsayılır. Bu kabule göre, vakum ortamı hakkında önemli bir konu öne çıkmaktadır: Basınç veya daha doğru ifade ile basınçsızlık. İdeal gaz yasasına göre, ideal gaz denklemi:

$$P.V = n. R.T \quad (3.1)$$

P = Basınç

V = Hacim

n = Mol sayısı

R = Raydberg sabiti, tüm gazlar için yaklaşık 0,082 (litre*atm / mol*°K)

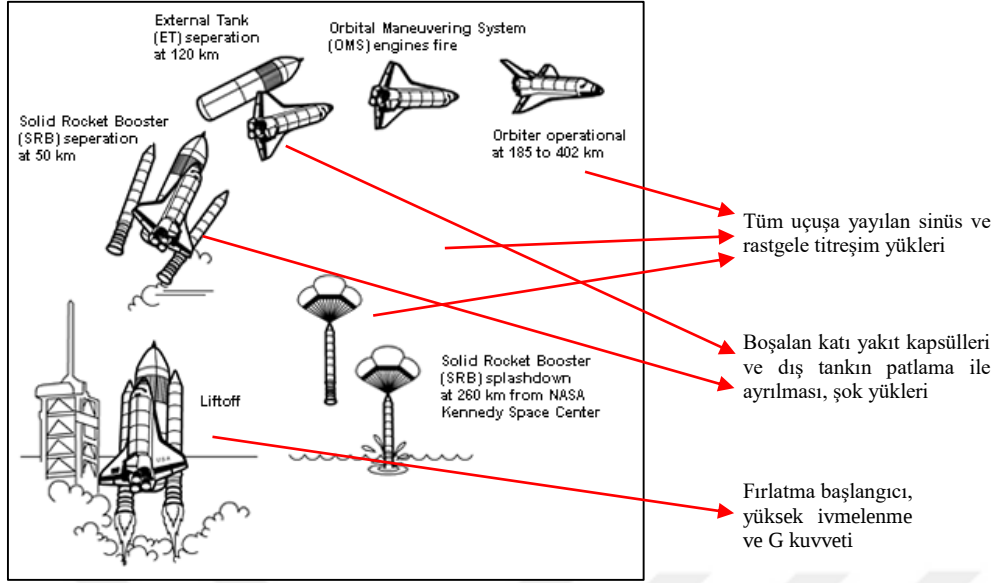
T = Sıcaklık

Vakum ortamında herhangi bir gazın mühendislik hesabı yapılacak miktarda varlığı söz konusu olmadığından, yani teorik olarak gaz bulunmadığından bu denklemin kullanılabileceği değerler de yoktur. Yani uzayda ortam basıncı yoktur, vakum vardır. Vakum ortamına dünyadan fırlatılan herhangi bir nesnenin içerisinde tasarımından veya moleküler yapısından dolayı bulunan herhangi bir gaz hacmi var ise, ona ait bir iç basınç da vardır. Bu iç basınç dünya koşullarında, atmosfer basıncı yani dış basınç ile dengelenirken, uzayda böyle bir imkân yoktur. İç basıncın kaçabileceği kaçış delikleri yok ise, dengeleyicisi

olmayan iç basınçtan doğan kuvvet ile gaz molekülleri bulundukları hacmin çeperine basınç uygulayarak nesnelerde mekanik gerilmeye yol açar. Eğer malzeme veya tasarım bu mekanik gerilmeye dayanamayacak kadar zayıf veya iç basınç malzeme veya tasarımın bütünlüğünü bozacak denli kuvvetli ise mikro çatlak oluşumu ve zamanla, oluşan mikro çatlakların ilerleyerek fiziksel bütünlüğün korunamaması söz konusu olabilir. Diğer bir risk ise fiziksel bütünlük korunsun bile mikro boşluklardan ilerleyerek malzemenin veya tasarımın hacminden dışarı çıkan gazların örneğin uydu kamerasının lensine yapışarak kirlenmeye, dolayısıyla görüntü bozukluklarına ve görevin kısmen veya tamamen yapılamamasına yol açma riskidir. Bu bilgiler ışığında, uzaya gönderilecek malzeme ve tasarımlarda vakum uyumluluğu aranır, örneğin bazı özel olanları haricinde standart polimer malzemeler vakuma uygun olmadığı için uzay koşullarında kullanılmazlar. Metallerin ise her ne kadar malzeme boyutunda vakuma uyumlulukları söz konusu olsa da, tasarımsal boşlukların mutlaka kapalı hacim oluşturmayacak şekilde dışarıya erişim imkânı veren gaz kaçış boşlukları ile donatılması veya uydu uzay ortamına çıkmadan önce laboratuvar koşullarında oluşturulan vakum ile gaz kaçışının sağlanması temin edilir. Malzemelerin vakum uyumluluğu ve gaz salınımları hakkında NASA'nın "Outgassing" [33] başlıklı web sayfasından faydalanılabilir, ayrıca internetten de bazı da genel bilgilere ulaşılabilir [34]. Sonuç olarak, vakum uyumluluğunu sağlayabilmek için eklemeli imalat ile imal edilecek braketin malzeme olarak uzay uyumlu olmasının yanında, tasarım veya imalat süreci olarak da iç yapısının mümkün olduğunca boşluksuz olması gerekmektedir.

Ani ivmelenme

Roket motorlarının fırlatma rampasından ilk ateşlenme ile fırlatmanın başlaması sırasında oluşan yüksek G kuvveti, roket ile beraber taşıdığı uydunun da yapısına etki etmektedir. Fırlatıcı roketlere göre seviyeler farklılık gösterebilmektedir. Şekil 3.2 ve Çizelge 3.1 ile NASA'nın "Space Shuttle" aracına ait uçuş aşamaları ve ivmelenme bilgileri verilmiştir.



Şekil 3.2. Space Shuttle aracının kalkış ve sonrası aşamaları [35]

Çizelge 3.1. Space Shuttle aracına ait kalkış hız ve ivme değerleri [35]

Zaman (sn)	İrtifa (m)	Hız (m/sn)	İvme (m/sn ²)	Zaman (sn)	İrtifa (m)	Hız (m/sn)	İvme (m/sn ²)
0	-8	0	2,45	340	108 942	3516	17,15
20	1244	139	18,62	360	108 543	3860	18,62
40	5377	298	16,37	380	107 690	4216	20,29
60	11 617	433	19,40	400	106 539	4630	22,34
80	19 872	685	24,50	420	105 142	5092	24,89
100	31 412	1026	24,01	440	103 775	5612	28,03
120	44 726	1279	8,72	460	102 807	6184	29,01
140	57 396	1373	9,70	480	102 552	6760	29,30
160	67 893	1490	10,19	500	103 297	7327	29,01
180	77 485	1634	10,68	520	105 069	7581	0,10
200	85 662	1800	11,17				
220	92 481	1986	11,86				
240	98 004	2191	12,45				
260	102 301	2417	13,23				
280	105 321	2651	13,92				
300	107 449	2915	14,90				
320	108 619	3203	15,97				

Uydunun hangi roket ile fırlatılacağı belli değil ise veya birden fazla roket ile uyumlu olması isteniyorsa fırlatıcılardan temin edilen yükler ortak bir grafikte birleştirilerek “en kötü durum” sağlanacak şekilde ortak bir yük eğrisi belirlenir. Tüm roketlerin en kötü durumlarını kapsayan bu ortak eğriye göre test ve kalifikasyonların yapılması sayesinde uydunun sistemselsel ve ekipman olarak belirlenen tüm roketler ile uyumlu olması sağlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında braketin kalifikasyon seviyesinde dayanması gereken anlık azami ivme

yükü 20 G olarak belirlenmiştir. Bu ivmelenme analizlerde eş zamanlı ve her 3 kartezyen ekseninden ayrı ayrı olacak şekilde verilmelidir.

Titreşim yükleri

Braket, sinüs titreşim yüklerine dayanıklı olabilmelidir. Bununla ilgili detaylı açıklama ve yönlendirme “ECSS-E-ST-10-03C – Testing” dokümanından elde edilebilir.

3.2.3. Özel gereksinimler

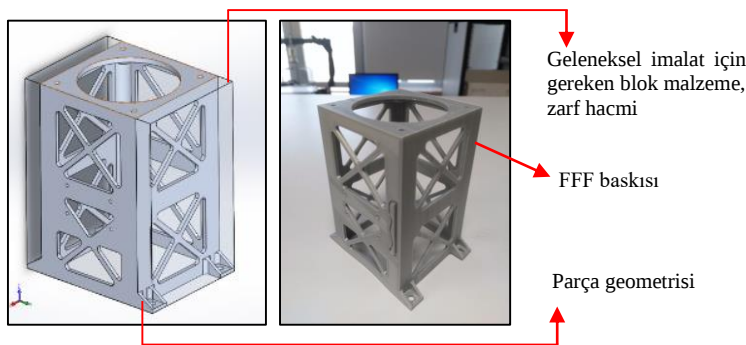
Eklemeli imalat, geleneksel imalat metotlarından farklı olarak 3 boyutlu modellerin dilimlenerek, üst üste yığılmış katmanlar haline getirilmesi ve ardından her bir katmanın ayrı ayrı ve üst üste üretilerek birleştirilmesi ile tekrardan 3 boyutlu modelin oluşturulması prensibine dayanmaktadır [36]. Eklemeli imalatın başlıca özellikleri geleneksel imalat metotlarının aksine neredeyse sıfır seviyesinde talaş oluşumu sayesinde hammaddenin hurdaya çıkmasını en aza indirmek ve geleneksel metotlarla imal edilemeyecek veya edilse bile çok zahmetli, riskli, zaman alıcı, maliyetli olacağından sürdürülebilir olmayacak karmaşık, gözenekli, girift modelleri üretebiliyor olmasıdır. Geleneksel imalat ile oldukça kolay ve hızlı üretilen, hammaddesi kıymetli olmadığından talaşın önemli olmadığı veya talaş miktarının düşük olmasıyla sarfiyatın az olduğu bir modelin eklemeli imalat ile elde edilmesi bir avantajı olmayabilir. Hatta böyle bir modelin eklemeli imalatı daha masraflı, zahmetli bile olabilir. Böyle bir durumda uzun yıllardır kullanılan teknolojisi ve yaygınlığı ile standart tasarımların geleneksel imalat ile üretimi daha uygun seçenek olabilmektedir. Dolayısıyla eklemeli imalat ile imal edilmek istenen modelin, eklemeli imalat teknolojilerinin avantaj ve kabiliyetlerini en iyi yansıtabilecek durumda olması, değil ise optimize edilerek o hale getirilmesi gerekmektedir.

Uzay ve havacılık sanayiinde belirli kalite süreç ve standartlarına sahip yüksek performanslı malzemeler tercih edilmektedir. Bu da hammaddelerin nispeten pahalı olması sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca uydular için uzaya fırlatma maliyetleri oldukça yüksektir ve kütle azaltılması maliyetin düşürülmesi için etkili yollardan biridir. Bu bilgiler ışığında bu çalışmaya özel, ancak birçok uzay ve havacılık ekipmanı için genel gereksinimler şu şekilde yazılabilir:

- Eklemeli imalat ile imal edilecek braket, geleneksel imalat muadiline göre daha hafif olmalıdır.
- Braket, düşük “satın al ve uç” değerine sahip olmalıdır. Böylece hurdaya çıkan (talaş) miktarı azaltılarak israf ve maliyet düşürülebilmelidir.
- Doğal frekans ve katılıkta en az geleneksel modeller kadar mukavim olabilmelidir.
- Tekrarlanabilir olmalıdır. Dolayısıyla, hammaddeden depolamaya, imalattan son işlemlere kadar özdeş braketler tekrar tekrar üretilebilmelidir.

3.3. Model Belirleme

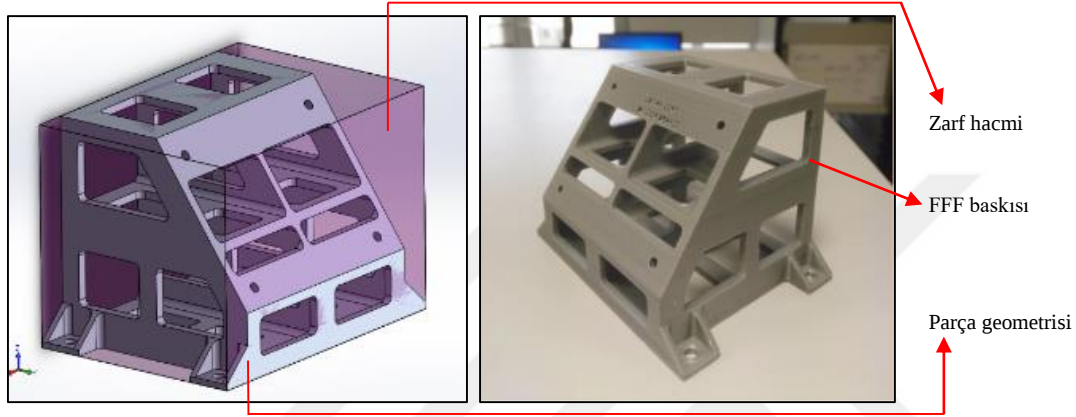
Model belirleme çalışmalarına öncelikle pratik yapmak amaçlı düşük gramaja sahip basit modeller ile başlanması uygun görülmüştür. Bu sebeple ilk olarak TÜBİTAK Uzay bünyesinde tasarlanan birkaç braket deneme amaçlı olarak ele alınmıştır. Bunlar, daha sonra karışıklık olmaması için Braket-01 ve Braket-02 şeklinde kodlanmıştır. Bu modeller üzerinde uluslararası literatürde “İng. buy-to-fly ratio” olarak anılan “satın al ve uç oranı” ile, geleneksel imalat senaryosuna göre son model hacmi ve o modelin imalat öncesi zarf boyutlarını içeren işlenmemiş hacmi arasında karşılaştırma yapılmıştır. Bu oranın artması, son modeli elde etmek için daha fazla malzemenin geleneksel imalat ile imalatı sırasında talaş (atık malzeme) haline gelmesi, dolayısıyla hurda miktarının artması anlamına gelmektedir. Eklemeli imalat metotları, doğası gereği bu oranı olabildiğince düşük tutabilmektedir. Resim 3.1 ve Çizelge 3.2’de Braket-01; Resim 3.2. ve Çizelge 3.3.’de ise Braket-02 modellerine ait CAD model görünüşleri zarf boyutları yarı-saydam olacak şekilde ve yanlarında FFF yazıcı ile basılmış örneklerinin görünüşlerine yer verilmiştir. Çizelgelerde yer alan bilgiler ışığında, her iki parça için de oldukça yüksek satın al ve uç değerleri olduğu anlaşılmaktadır.



Resim 3.1. Braket-01 CAD modeli (solda) ve FFF yazıcı baskısı (sağda)

Çizelge 3.2. Braket-01 satın al ve uç oranı

No	Parametre	Birim	Talaşlı imalat
1	Malzeme	-	Al 7075-T6
2	Zarf Boyutları	cm	12,0 x 9,2 x 15,0
3	Zarf Kütlesi	kg	4,7
4	Talaş Kütlesi	kg	4,36
5	Son Kütle	kg	0,34
6	Satın al ve uç oranı	-	13,7

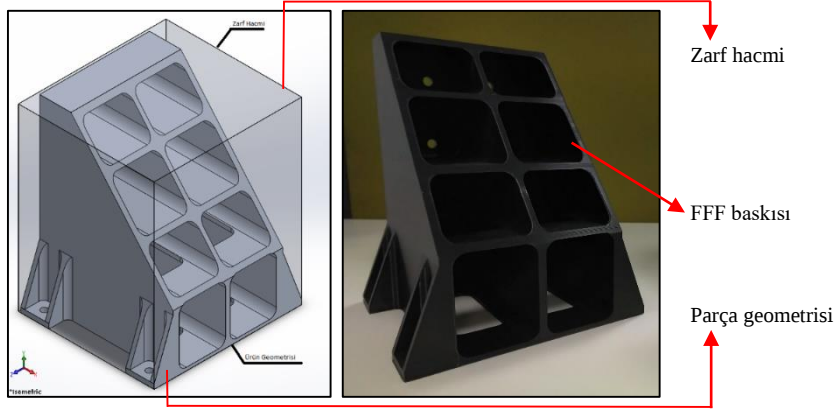


Resim 3.2. Braket-02 CAD modeli (solda) ve FFF yazısı baskısı (sağda)

Çizelge 3.3. Braket-02 satın al ve uç oranı

No	Parametre	Birim	Talaşlı imalat
1	Malzeme	-	Al 7075-T6
2	Zarf Boyutları	cm	15,2 x 1,1 x 1,1
3	Zarf Kütlesi	kg	5,2
4	Talaş Kütlesi	kg	4,58
5	Son Kütle	kg	0,62
6	Satın al ve uç oranı	-	8,4

Her iki örnekten de görüldüğü üzere yüksek satın al ve uç oranları sebebiyle Braket-01 ve Braket-02'nin talaşlı imalat yerine eklemeli imalat için yeniden tasarlanarak üretimi avantajlı olmaktadır. Öte yandan oldukça düşük kütleyle sahip bu modeller yerine, toplam kütlelerin dolayısıyla kazancın daha yüksek olabileceği başka braketler araştırılmıştır. Araştırma sonucunda aşağıda verilen braket, çalışma parçası olarak belirlenmiştir. Bundan sonra braket olarak yalnızca Resim 3.3'te verilen model ve onun optimizasyonu çalışmalarında elde edilen versiyonlar anlaşılabacaktır. Resim 3.3'te braketin CAD modeli (solda) ve tümleşik yarı-saydam zarf hacmi ile FFF baskısının görünüşü (sağda) yer almaktadır.



Resim 3.3. Braket CAD modeli, zarf hacmi (solda) ve FFF yazıcı baskısı (sağda)

3.4. Malzeme Belirleme

Bölüm 3.2’ de belirtildiği üzere görev, çevresel ve özel gereksinimlerden yola çıkılarak braketin imal edilmesi gereken malzeme veya malzemeler için parametreler ortaya çıkmıştır. Parametreler doğrultusunda, eklemeli imalat metotları ile kullanılabilen hammaddeler arasından en uygun olanın seçilmesi gerekmektedir. Öte yandan, seçilecek bu malzemenin ESA’nın belirlediği ECSS-Q-ST-70C-Rev.1 standartlarını karşılaması hedeflenmektedir. Bu çalışma kapsamında ilgili standarttaki malzeme seçimi ve uzay uyumluluğu konusundaki maddelerin tamamının ele alınması ve analiz, ölçüm, test, doğrulama ve kalifikasyon sürecinin tamamlanması imkan ve kabiliyet bakımından mümkün olmadığından; yalnızca en kritik görülenlere yer verilmiştir. Bu kararın verilmesinde ilgili standartta yer alan;

“Not - Fıkra 5’in şartları, misyonun çevresel koşulları uygulanmasını gerektirdiğinde uygulanır. Özel şartlar, test yöntemleri ve kabul veya reddetme kriterleri ECSS-Q-ST-70 serisi belgelerde sunulmaktadır.” maddesi referans alınmıştır. İlgili standart kapsamında ele alınan maddeler şunlardır:

3.4.1. Sıcaklık

Malzeme özellikleri, maruz kalınan termal ortam ile uyumlu olmalıdır. Termal ortamlar için ise geçiş sıcaklıkları incelenmelidir (örneğin faz geçişleri, metaller için sünek-kırılgan geçiş sıcaklıkları, polimer malzemeler için cam geçişi (T_g) ve nem gibi bu özellikleri etkileyen çevresel faktörler).

Çalışma koşulları uydunun iç ortamında olması ve çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (İng. Multi Layer Insulation, MLI) sayesinde ortalama 0 °C ile 40 °C arasında değişeceğinden ve metal eklemeli imalat hammaddeleri için bu değerler faz veya mekanik özellik değişimi sınırlarından uzak olduğundan sıcaklık konusunda özel bir önlem alınmasına gerek yoktur.

3.4.2. Vakum

Uzay sistemlerinde kullanım için tüm organik malzemeler, gaz salınımı özelliklerini belirlemek için değerlendirilir. 50 °C'den yüksek bir sıcaklıkta uzun bir süre boyunca kullanılan malzemelerin tekrar test edilerek özellik değişiminin incelenmesi ihtiyacı konusunda, sistem mühendisliği kapsamında değerlendirme yapılarak karşılıklı mutabakata varılmalıdır.

Mümkün olan en yüksek doluluk oranı ile imalat yapılarak vakuma uyumluluk açısından uygunluk parametrelerinden birisi elde edilmeye çalışılacaktır. Vakum uyumluluğu konusunda doluluk ölçümleri yapılarak malzemenin içyapısında mevcut hava boşluğu yüzdesi tespit edilecektir.

3.4.3. Korozyon

Atmosferik gazlarla, temizlik sıvılarıyla veya diğer kimyasallarla temas eden tüm malzemeler için, beklenen servis aracı sırasında özelliklerin bozulmasının performans ve bütünlük gereksinimlerini karşılamadığı görülmemelidir. Yedek parçalar dâhil tüm mekanik parçalar, montajlar ve ekipmanlar korozyona karşı koruma sağlamak için kaplanmalıdır.

3.4.4. Atomik oksijen

LEO uyduları için, 200 km ila 700 km arasında kullanılmak üzere uzay aracının dış yüzeylerinde kullanım için tüm malzemeler, atomik oksijene (ATOX) karşı dirençleri açısından değerlendirilecektir.

Braket uydunun iç ortamında bulunacağından atomik oksijen etkisi için gerekli değerlendirmeden muaftır.

3.4.5. Ömür

Malzeme performans gereksinimlerini belirtilen tüm ömürleri boyunca karşılayacaklarından emin olmak için malzemeler seçilecektir.

Analizler ile emniyet katsayıları belirlenerek uydu ömrü boyunca performans gereksinimi karşılayabileceği belirlenecektir.

3.4.6. AlSi10Mg

İmalat kolaylığı, hafiflik, iyi mukavemet özellikleri, titreşim sönümleme kabiliyeti, iyi ısı ve elektriksel iletkenlik özellikleriyle ön plana çıkan AlSi10Mg'nin uzay koşullarında kullanılabilecek malzemelerden birisi olacağı düşünülmüştür. Uzay ve havacılık alanında yaygın olarak kullanılan ve tarihçe kazanmış Al 6061 T6 malzemesi ile kimyasal kompozisyon, yoğunluk ve mukavemet değerleri konusunda da çok benzer yapıda olması ve daha önce literatür taramasında da bahsedilen Melissa E. Orme ve arkadaşları tarafından yapılan “Hafifletilmiş, Optimize Edilmiş Uzay Uçuşları için Uyumlu Metalik Parçaların Eklemeli İmalat ile Üretimi” konulu çalışmada da kullanılan malzemenin AlSi10Mg olması bu seçimde cesaretlendirici bir etmen olmuştur. Öte yandan Al 6061, SLE metotlarıyla da parça imalatında kullanılabilen bir malzemedir. Ancak ısıtma işlem görmesine rağmen anizotropi etkisinin kaldırılamamasına karşın AlSi10Mg'nin ısıtma işlem sonrası neredeyse izotropik hale gelmesi, 6061 için önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir. 6061'in bu davranışının, döküm esnasında gösterdiği çatlama eğilimi (İng. hot tearing) eğilimi göz önüne alındığında sebebi daha iyi anlaşılabilir [37]. AlSi10Mg malzemesi hakkında “EK-1: EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en” üzerinden detaylı teknik verilere ulaşılması mümkündür.

3.5. İmalat Metodu

Malzeme seçiminden ve uzay koşulları gereksinimlerinden yola çıkılarak tercih edilebilecek en uygun metotlardan birinin DMLS (İng. Direct Metal Laser Sintering) / SLE (İng. Selective Laser Melting) olduğu belirlenmiştir. Bu metot ile çeşitli metal alaşımlarından eklemeli imalat yapılmaktadır. Çizelge 3.4' te 2014 yılına ait metal eklemeli imalat malzemelerine ait bir sınıflandırma yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Metal eklemeli imalat alanında kullanılan malzeme türleri [38]

Titanyum	Alüminyum	Takım Çelikleri	Süper Alaşımlar	Paslanmaz Çelik	Refrakter
Ti-6Al-4V	Al-Si-Mg	H13	IN 625	316 & 316L	MoRe
ELI Ti	6061	Sermetler	IN 718	420	Ta-W
CP-Ti			Stellite	347	CoCr
γ -TiAl				PH 17-4	Alumina

3.6. Eklemeli İmalat Tasarım Yaklaşımı

Model, metot ve malzeme belirleme çalışmalarının ardından braketle ait bazı geleneksel imalat parametreleri verilmiştir. Literatürden elde edilen bilgiler ışığında eklemeli imalat için kütle kazancının %40 ile %60 arasında olacağı, ancak asimetrik yüklemekten kaynaklanan gerilmeler sebebiyle ihtiyaç duyulan nispeten yüksek mukavemeti karşılayabilmek adına bu değerin %40'a daha yakın olacağı öngörülmektedir.

Literatür taramasında daha önce verilen kaynak çalışmada [8], gösterge yaklaşımı kullanılarak eklemeli imalat için tasarım yaklaşımı oluşturulmuştur. Bu yaklaşımda:

- AI = Adaptasyon göstergesi
- DI = Diskriminasyon göstergesi
- OI = Oryantasyon göstergesi
- GI = Geometri göstergesi

olacak şekilde tanımlamalar yapılarak çeşitli formüller oluşturulmuş ve süreç planlaması kapsamında eklemeli imalat için fizibilitenin yapılabileceği bir sistematik tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında ilgili göstergeler braket için uygulanarak değerlendirilmiştir.

3.6.1. AI: Adaptasyon göstergesi

Bu gösterge, belirli bir tasarımın eklemeli imal edilmesinin gereklilik derecesini ifade etmektedir. Maliyet, zaman ve kalite faktörlerinin ortak ele alınmasını kapsamaktadır. 0'dan büyük, 1'den ise küçüktür. 0 olamaz ancak azami 1 değerine ulaşabilir. Modele özel gereksinimler ve alternatif imalat metotlarına ait parametreler ele alınarak formüle uygulandığında adaptasyon göstergesi elde edilir. Ne kadar yüksek olursa, parametreleri kullanılan imalat metodu için model o denli uygundur. Şu şekilde formülize edilmektedir:

$$AI = \frac{1}{\exp\left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 w_i \left| \frac{(x_i - p_i)}{p_i} \right| \right)} \quad (3.2) [8]$$

- x_i = tasarım vektörü
- p_i = proses vektörü
- w_i = ağırlık katsayısı
- $i = 1, 2, 3, \dots, n$

3.6.2. DI: Diskriminasyon göstergesi

Bu gösterge, model geometri ve gereksinimleri göz önüne alınarak seçimi en uygun eklemeli imalat metodunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$DI = \exp\left(\sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{AI_{max} - AI_i}{AI_i} \right| \right) \quad (3.3) [8]$$

- AI_{maks} = Maksimum AI endeksi
- AI_i = Geri kalan endeksler
- $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

Adaptasyon ve diskriminasyon göstergeleri bu tez çalışması içinde gerek duyulmamıştır ancak örnek uygulama Yicha Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında mevcuttur. [8]

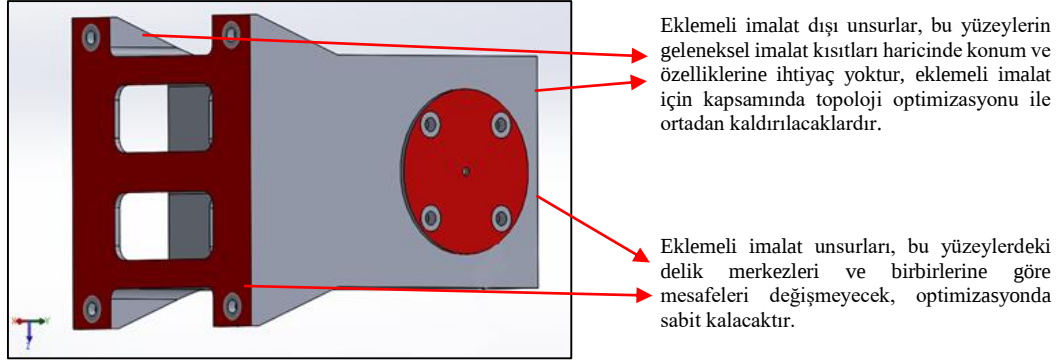
3.6.3. OI: Oryantasyon göstergesi

Bu gösterge sabit kalması ve değişmesi gereken kısımları tanımlamaktadır. Optimizasyon kısımları için parça oryantasyonu belirlenmekte ve gereksiz ağırlıklar, düzlemler vb. yerler optimize edilmektedir. Resim 3.4'te sabit kalacak ve değişecek yüzeyler görülmektedir.

$$OI = \left(\frac{1}{N_p + N_n} + \frac{N_p}{N_p + N_n} \right) \quad (3.4) [8]$$

- N_p = Eklemeli imalat unsurları (adet)
- N_n = Eklemeli imalat dışı unsurlar (adet)
- $N_p = 2$

- $N_n = 9$
- $OI = 1/(2+9) + 2/(2+9) = 0,27$



Resim 3.4. Geleneksel imalat modeli üzerindeki eklemeli imalat unsurları

3.6.4. GI: Geometri göstergesi

Bu gösterge, literatürde satın al ve uç olarak bilinen oran ile özdeşdir, talaş miktarını bulmak için kullanılır. Bu değer ne kadar yüksek ise, eklemeli imal edilerek hurdaya çıkan malzemeyi en aza indirmeye imkânı da o denli yüksek demektir.

- $V_b = \text{Zarf Hacmi (cm}^3\text{)}$
- $V_p = \text{Parça Hacmi (cm}^3\text{)}$
- $GI = V_b / V_p \rightarrow 7480,52 / 1090,82 = 6,86$

Elde edilen değer oldukça yüksek olduğu görülmektedir. $7480,52 \text{ cm}^3$ toplam hacimden yalnızca $1090,82 \text{ cm}^3$ 'lük bir hacim kullanılmaktadır. Dolayısıyla hammaddenin % 85'lik bir miktarı talaşa çıkmakta, yalnızca %15'i parça formunu oluşturmaktadır.

3.7. Metot, Malzeme ve Altyapı Seçimi

Bu bölümün sonucunda nihai olarak kararlaştırılan seçimler şu şekildedir:

- Eklemeli imalat metodu : SLE
- Malzeme : AlSi10Mg
- Altyapı : Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, EOS M290
- Doluluk : % 99,85

4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ANALİZ

İmalat süreçleri için tasarım yaklaşımı uzun yıllardır araştırmacıların üzerinde çalıştıkları konular arasında yer almaktadır. Bu tür tasarım yaklaşımları, imalat sürecinin özelliklerine, sınırlamalarına ve niteliğine göre şekillenmektedir. İmalata göre tasarım işlemlerin, literatürde optimizasyon olarak adlandırılmaktadır ve temel olarak aşağıdaki türlerde uygulanmaktadır:

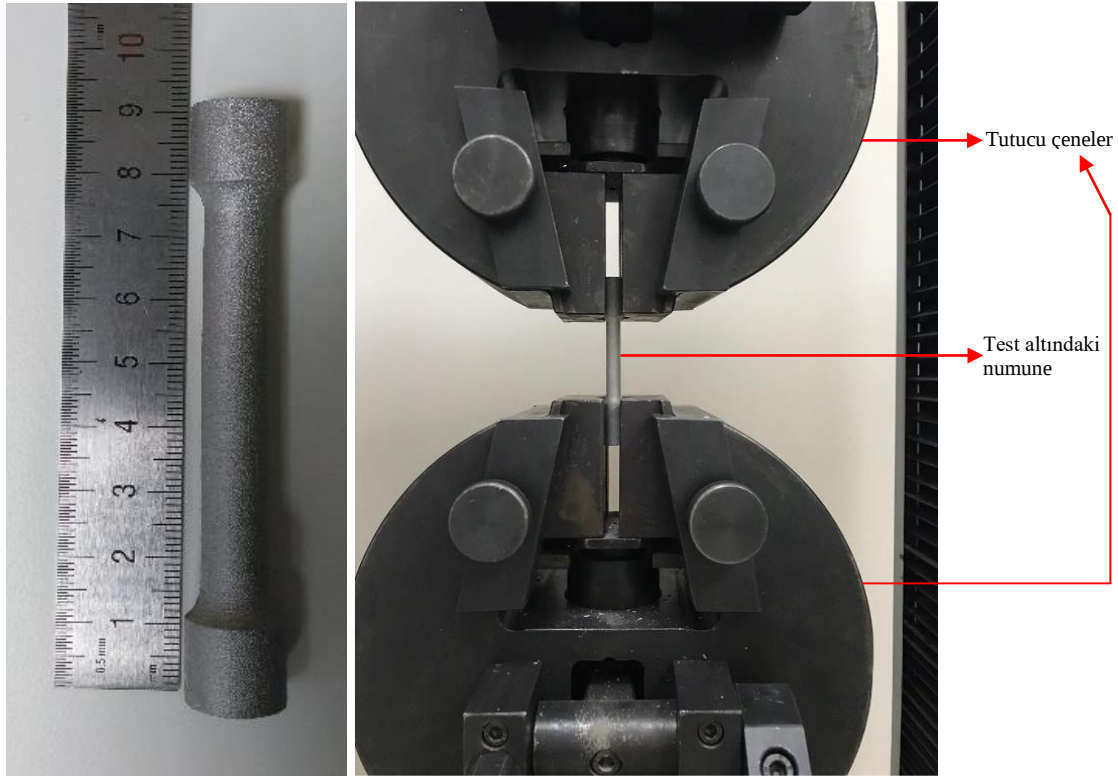
- Boyut Optimizasyonu
- Şekil Optimizasyonu
- Topoloji Optimizasyonu

Boyut optimizasyonunda en uygun tasarım, kafes kirişlerin ve çerçevelerin kesit boyutları veya plaka kalınlıkları gibi boyut değişkenleri değiştirilerek bulunur. Bu, yapısal performansı geliştirmek için en kolay ve en temel yaklaşımdır. Şekil optimizasyonu, en iyi tasarımları elde etmek için önceden belirlenmiş sınırları değiştirerek, temel olarak sürekli yapılar üzerinde gerçekleştirilir. Örneğin bir kafes için, düğümlerin yeri tasarım değişkenleri olarak tanımlanır. Kafesler ve çerçeveler gibi ayrı yapılar için topoloji optimizasyonu, çubukların optimal mekânsal düzenini ve bağlantısını araştırmaktır. Süreklilik yapılarının topoloji optimizasyonu, zorlayıcı olmasına karşın en yüksek verimin alındığı metottur [39].

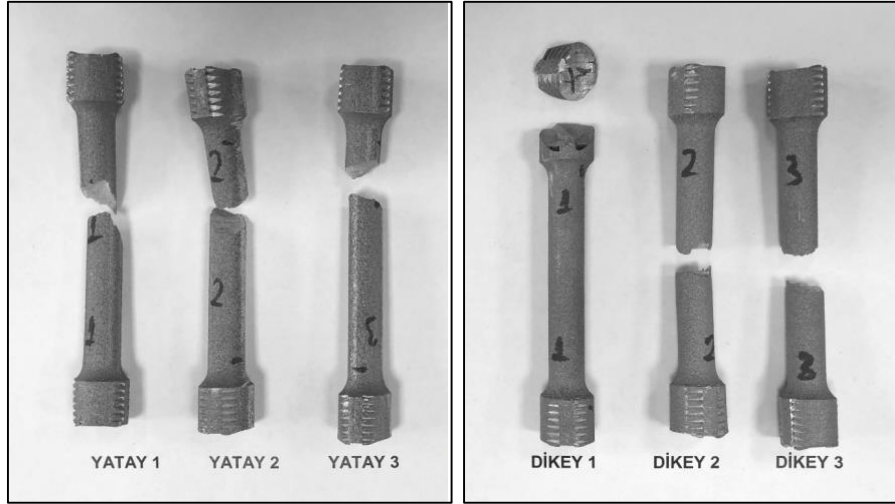
İmalat süreçlerinde uygulanan tasarım yaklaşımları, eklemeli imalat için de geliştirilmektedir. Eklemeli imalatın görece yeni nesil bir imalat teknolojisi olması ve içerisinde farklı yöntemler barındırması nedeniyle çeşitli sayıda farklı tasarım yaklaşımı literatürde yer almaktadır. Yukarıda bahsedilen optimizasyon yaklaşımlarından topoloji optimizasyonu ise, eklemeli imalat alanında en yaygın kullanılan, yeni tasarımlar ortaya çıkarırken toplam kütle ve toplam gerilmelerin düşürülmesi bakımından en verimli yöntem olarak bilinmektedir. Topoloji optimizasyonu yaklaşımının, eklemeli imalat alanında etkili olabilmesinde en önemli payın, eklemeli imalatın sağlamış olduğu tasarım esnekliğine ait olduğu ifade edilebilir. Bu veriler ışığında araştırıldığında eklemeli imalat için tasarım kapsamında yoğunluğun topolojik optimizasyon konusunda olduğu görülmüştür. CAE yazılımlarının da topoloji optimizasyonu modülleri çıkarma konusunda önemli bir rekabet halinde olduğu bu tespitin diğer bir dayanağıdır.

4.1. Parça / Malzeme Seviyesi Testler

Geleneksel imalat metotlarından olan talaşlı imalatla parçanın mekanik özellikleri blok malzemenin kendisine, ısıtım işlem durumuna ve kalitesine bağlı olup talaş kaldırma sırasında önemli değişiklikler göstermezken; toz parçacığı şeklindeki hammaddenin lazer ile yakılması esnasında eklemeli imalat parametreleri ve doluluk oranı gibi unsurlar eklemeli imalat parçalarının mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle EOS M290 model cihazın üreticisi tarafından verilen teknik verilerin doğrulanması önem arz etmektedir ve çekme numunelerinin imal edilerek test edilmesine karar verilmiştir. Tekrarlanabilirlik ve izotropi kontrolü amacıyla yatay (X-Y) yönde büyüyen 3 adet ve dikey (Z) yönünde büyüyen 3 adet olmak üzere toplam 6 adet çekme test numunesi oluşturulmuştur. Numuneler üretim sonrasında kumlama sürecine tabi tutularak dış yüzeydeki olası yabancı maddelerden arındırılmış ve dış yüzeylerdeki parçacıkların sıkışması sağlanmıştır. Üretim sürecinde oluşan ısıtım gerilme birikimlerini dağıtmak ve parçayı kırılma yapısından uzaklaştırarak sünek yapıya yaklaştırabilmek amacı ile ısıtım işlem uygulanmıştır. Isıtım işlemde numuneler, toz üreticisinin verdiği bilgiler doğrultusunda 2 saat boyunca 300 °C sıcaklık altında tavlansmıştır. Tüm bu aşamalar sonrasında ise çekme testleri başarı ile icra edilmiştir.



Resim 4.1. Çekme numunesi boyutu (solda) ve çekme testi cihazı (sağda)



Resim 4.2. Yatay (solda) ve dikey (sağda) çekme numuneleri

Çizelge 4.1. Çekme testi sonuçları

Numune	Kesit Alanı A mm ²	İlk Boy L ₀ mm	Son Boy L ₁ mm	Rp 0,2 N/mm ²	Ref. Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²	Ref. Rm N/mm ²	Uzama %
Yatay_1	78,525	50	54,97	228,00	230 ± 15	353,50	345 ± 10	9,94
Yatay_2			53,94	232,00		374,60		7,88
Yatay_3			54,43	224,00		351,60		8,86
Dikey_1			-	224,00		338,80	350 ± 10	-
Dikey_2			54,30	216,00		360,80		8,60
Dikey_3			53,48	228,00		383,70		6,96

EOS AlSi10Mg için referans değerler göz önüne alındığında, kopmaların belirtilen pozitif payların da üzerinde olma eğilimi gösterdiği, akmalara ise negatif payların içerisinde olduğu görülmüştür. Dikey_1 numunesi ölçüm bölgesi dışından kırıldığından uzama yüzdesi hesaplanamamıştır. Sonuç olarak çekme numunelerinde elde edilen değerler teknik doküman değerlerinde belirtilen payların içerisinde kalmaktadır ve imalat parametreleri bakımından uygunluk söz konusudur, katalog verileri analizlerde malzeme tanımlamasında kullanılabilir. EK-2’de çekme testine ait detaylı rapor yer almaktadır.

4.2. Arşimet Yoğunluk Ölçümleri

SLE ile imal edilecek braket için uzay şartlarına uygunluk kıstaslarından biri olan doluluk, parça yoğunluğunun ölçülmesi yoluyla tayin edilmiştir. Arşimet metodu ile numunenin daldırıldığı sıvı içerisinde ve hava ortamındaki ağırlıklarının karşılaştırılarak hacimsel doluluğu hesaplanmaktadır. Bu metodun uygulanmasında test edilecek numunelerin test düzeneğinde önce hava ortamında kuru olarak ağırlık ölçümleri yapılmış ve ölçümler W_a

olarak tablolaştırılmıştır. Daha sonra numuneler test düzeneğinin su haznesindeki ölçüm kafesine yerleştirilerek suya batmış haldeki ağırlıkları okunmuş ve bu ölçümler de W_l olarak tablolaştırılmıştır. Arşimet prensibine göre yoğunluk hesabı altta verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır:

$$\rho_{\text{parça}} = \frac{w_a}{w_a - w_l} \rho_{\text{su}} \quad (4.1)$$

Bağıntıda kullanılan su yoğunluğu ortam sıcaklığına bağlı olarak değiştiğinden, bu değerin doğru hesaplanması kritiktir. Bu yoğunluk değeri cihaz kullanma kılavuzunda tablolaştırılmış verilerden elde edilerek testte kullanılmıştır.

Daha sonra imal edilecek braket ile aynı imalat parametrelerine sahip olan dikdörtgen prizmatik geometriye sahip numuneler, test düzeneğinde kullanılabilecek yapıda olduğundan ölçümler bu numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

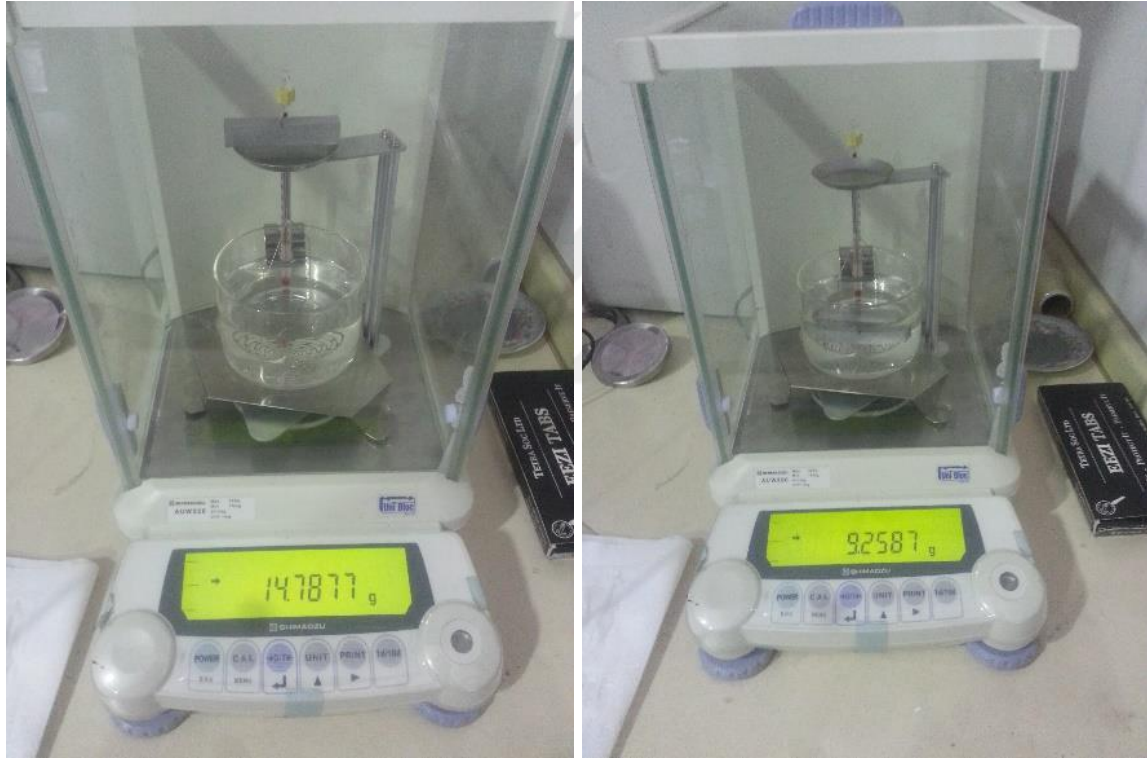
Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen yoğunluk ölçümleri “ASTM B962-17: Standard Test Methods for Density Compacted or Sintered Powder Metallurgy Products Using Archimedes' Principle” standardından edinilen bilgiler ışığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümde AlSi10Mg malzemeden üretilen 10x10x60 mm boyutlarında 9 adet numune kullanılmış ve sonuçlar tablolaştırılmıştır. Ortam sıcaklığı 23 °C'dir, kullanılan numuneler üçerli gruplar halinde imalat yönelimlerine göre sırasıyla şöyle sıralanmıştır:

- 1., 2., 3. Numune: Tablada dik olarak imal edilmiştir
- 4., 5., 6. Numune: Tablada yatay olarak çentik yüzeyi üstte imal edilmiştir
- 7., 8., 9. Numune: Tablada yatay olarak çentik yüzeyi yanda imal edilmiştir

Numunelerin farklı oryantasyon ile tablada konumlandırılarak imal edilmesi ile doluluk değerlerinin büyüme yönü ile bağımsız olması temin edilirken, çentik yapıları ve açıları ile destek yapısı kullanılmadan numunelerin imalatı sonrasında herhangi bir sorun olup olmadığı ve cihazın imalat kabiliyeti de görülmüştür. Çizelge 4.2.'de Arşimet ölçümleri yapılarak yoğunlukları bulunan ve dolayısıyla doluluk yüzdeleri hesaplanan numunelere ait bilgiler yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Arşimet ölçüm sonuçları

Numune	Büyüme Yönü	ρ_{su} g/cm ³	W _a g	W _l g	ρ_{numune} g/cm ³	İzafi Yoğunluk	ρ_{ort} g/cm ³
1	Dikey	0,9976	14,3583	8,9993	2,672856	0,997334	2,66995
2			14,3276	8,9703	2,667988	0,995518	
3			14,3270	8,9765	2,671267	0,996741	
4	Yatay (Çentik üstte)	AlSi10Mg döküm yoğunluğu (g/cm ³)	14,5444	9,1074	2,668657	0,995767	Ort. İzafi Yoğunluk 0,99625
5	Yatay (Çentik yanda)	2,68	14,7877	9,2587	2,668151	0,995578	
6			14,7288	9,2256	2,669983	0,996262	
7			14,7998	9,2668	2,668404	0,995673	
8			14,7224	9,2173	2,667901	0,995485	
9			14,5444	9,2023	2,674351	0,997892	



Resim 4.3. Arşimet yoğunluk ölçüm cihazı

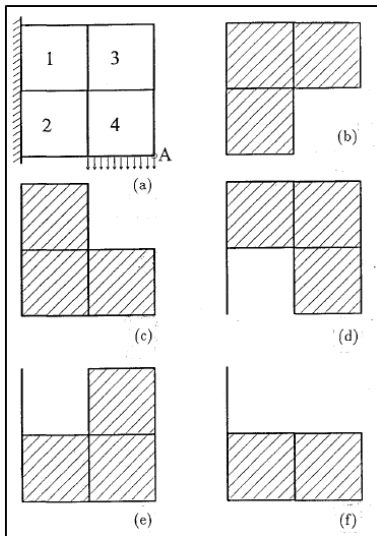
Yapılan ölçümlere göre numunelerin ortalama yoğunluğu 2,66995 g/cm³ olarak bulunmuş ve bu yoğunluk değeri AlSi10Mg malzemenin döküm yoğunluğu (%100 doluluk) ile karşılaştırıldığında ortalama doluluk oranı olarak %99.625 olarak tespit edilmiştir. Hesaplanan bu değerin, vakum uyumluluğu için gerek duyulan alt sınır değerinin (%70-%80) çok üzerinde olması ile SLE metodunun seçilen parametrelere göre gerekli doluluğu fazlasıyla sağlayabildiğini göstermiştir.

4.3 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonunun amacı, parçanın hacmini azaltırken kompliansı minimum (rijitliği maksimum) yapan ya da doğal frekansı maksimum yapan en iyi malzeme dağılımını bulmaktır. Elastik yapıların optimizasyonunda birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunların en önemlileri aşağıda sıralanmıştır:

- Malzeme dağılımı yöntemi (İng. Material Distribution Method)
- Level set yöntemi (İng. Level Set Method)
- Evrimsel algoritma (İng. Evolutionary Algorithm)
- Malzeme bulutu yöntemi (İng. Material Cloud Method (MCM))
- Homojenleştirme yöntemi (İng. Homogenization method) [40]

Çalışmada, geleneksel tasarıma alternatif olarak, literatürde yaygın olarak kullanılan ve malzemenin parça geometrisi içerisinde optimum dağılımı prensibine dayanan topoloji optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonunun teorisini anlatan çalışmalardan birisinde George I.N. Rozvany, SIMP (İng. Solid Isotropic Microstructure with Penalization for Intermediate Densities) metodu hakkında detaylı değerlendirmelerde bulunmuştur. Şekil 4.1’de matematiksel eleme sırasında (a) problemin tanımı, (b) imkansız çözüm, (c) optimal çözüm, d, e ve f ise fizibilitesi olan ancak kapsam dışı çözümler ifade edilmektedir.



Şekil 4.1. (a) tanım, (b) imkânsız, (c) optimal. d, e ve f uygun olan ancak kapsam dışı [41]

Teorik olarak geliştirilen çalışmalar olgunlaştıkça, ticari yazılımlarda kullanılmaktadır. Bu amaçla yazılım olarak ANSYS® topoloji optimizasyon modülü kullanılmıştır. Programa geleneksel model step formatında eklenerek sabitleme noktaları tanımlanmış, roket ile kalkış esnasındaki ilk ivmelenmeyi benzetim yapmak için her 3 ekseninden de 20 G ivme verilmiş, ayrıca braketin taşıyacağı varsayılan yükün konum ve kütle bilgileri atanmıştır. Ağ yapısı ve sayısından bağımsız olabilmesi adına farklı ağ yapıları denenmiş ve kararlılığın görüldüğü bir değer referans ağ modellemesi ve sayısı olarak alınmıştır. Optimizasyon modülüne, hedeflerin de girilmesi gerekmektedir. Böylece program mevcut malzeme yapısı, tasarımı ve varsa tanımlanmış çevre koşulları altında optimize modelin ne tür özelliklere sahip olması gerektiğini bilerek optimizasyon seviyesini ayarlamıştır. Dolayısıyla 20 G yerine örneğin 10 G ivmelenme tanımlandığında kütle hafifletmesinin daha yüksek yüzdeye sahip olacağı şeklinde çeşitli tahminlerde bulunmak mümkündür. Hedefler bu çalışma için en düşük doğal frekansın 250 Hz. ve üzeri olması ve optimizasyon sonrası elastik deformasyon sınırlarının aşılmaması şeklinde tanımlanmıştır. İlk deneme sonrasında program ilk ve en kaba malzeme dağılımını ağ yapısı şeklinde ortaya çıkarmıştır. Bu aşamada elde edilen model çok kaba ve grift yüzeylere sahiptir bu nedenle yüzeylerin yumuşatılması, bağlama bölgelerinin yumuşatılması ve geometrinin yeniden modellenmesi gerekmiştir. Kaba modelin kütle attığı ve ana yükleme hatlarını göstererek ipucu verdiği kaba tasarımda mühendislik yaklaşımları ile iyileştirme ve organikleştirme çalışmaları yapılmıştır. Devam eden kısımlarda bu yaklaşımlardan bahsedilecektir. Aşağıda baştan sona optimizasyon süreci görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.2. Optimizasyon akış şeması

Optimizasyon hacminin belirlenmesi

İlk adımda eklemeli imalat unsurları sabit tutularak eklemeli imalat dışı unsurlar zarf ebatlarına göre dikdörtgen prizma geometrisi oluşturacak şekilde güncellenmiştir. Bu

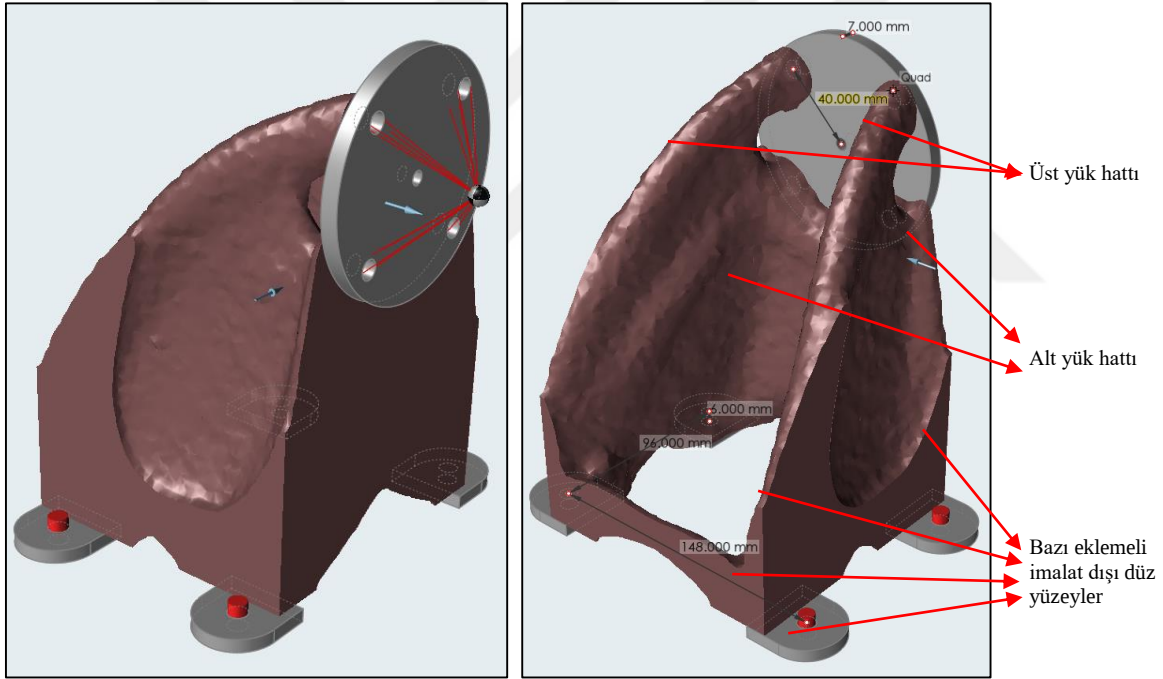
şekilde topolojik olarak yazılımın mevcut geleneksel imalat modelinden bağımsız olarak sınır koşulları içerisinde kalan hacmi en uygun şekilde kullanabilmesi amaçlanmıştır.

Yapısal ve modal analiz şartlarının uygulanması

Daha önceki bölümlerde yer alan gereksinimler doğrultusunda sınır koşulları ve çevresel yükler tanımlanmıştır.

İlk optimizasyon çıktısı

Yazılım ile ilk optimizasyon yapılarak Resim 4.4'te görülen ilk kaba model elde edilmiştir.



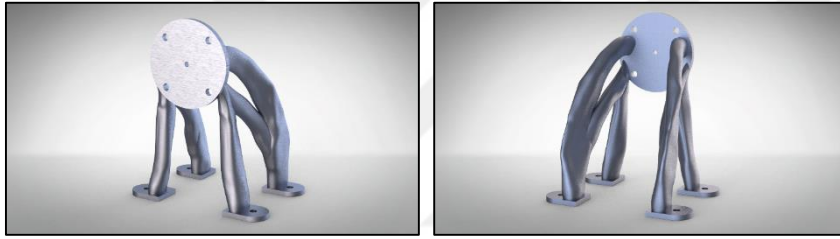
Resim 4.4. İlk optimizasyon sonrası kaba model

İlk deneme sonrası yorum ve yaklaşımlar

Elde edilen ilk kaba modelde eklemeli imalat dışı unsur olarak düz yüzeyler bulunmakta, ayrıca diğer yüzeylerde oldukça kötü görünen küçük ağ yapılarından oluşan yüzlerce ayrık yüzey görülmektedir. Resim 4.4'ten anlaşıldığı üzere, esas yükleme akışının silindirik yüzeye dokunan 4 ayrı hat üzerinden olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmaya özgünlük katabilmek amacıyla mühendislik yaklaşımı olarak bu 4 ana hattın dışında kalan alanlar

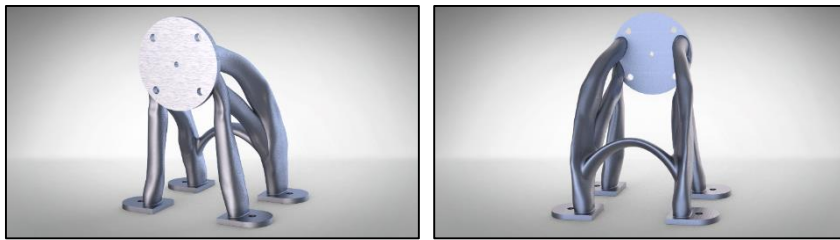
silinerek, el ile iteratif optimizasyon aşaması başlatılmıştır. Yaklaşımında, literatürden elde edilen bilgilere de dayanılarak organik (biyomimetik) tasarım elde edilmesi hedeflenerek, doğadan örnekler seçilmiştir.

Organik (biyomimetik) tasarım yaklaşımları, doğadan ilham alma prensibine dayanan ve doğadaki canlıların davranış biçimlerini kopyalayarak mevcut tasarımlara ilham vermesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada ön ayaklar için, benzer fonksiyonellikleri göstermesi nedeniyle ‘Fil Ayakları’ ilham kaynağı olarak alınmıştır. Arka ayaklar için ise ağaçların dal ve budak çıkıntı şekilleri esas alınmıştır. Yük taşıyıcı ana ayaklar arasında, iteratif çalışma esnasında gerekli görülen yerlere yine ağaçların dallanma yapılarına benzer şekilde destekler oluşturularak, analizler doğrultusunda yapılan her iyileştirme için yine bu prensip uygulanmaya çalışılmıştır.



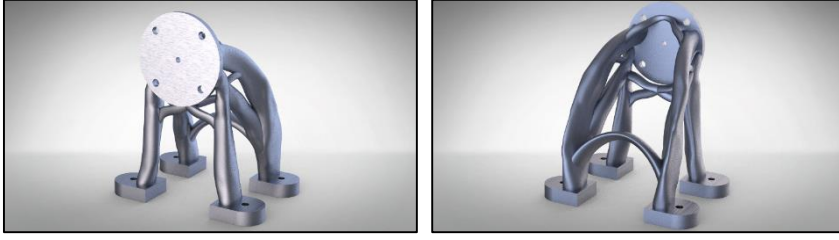
Resim 4.5. Model 1

Model 1 ile kaba optimizasyon sonrası ilk yaklaşım uygulanmış ve ana yük hatları arasında kalan kısımlar temizlenerek ayaklar birbirinden ayrılmıştır.



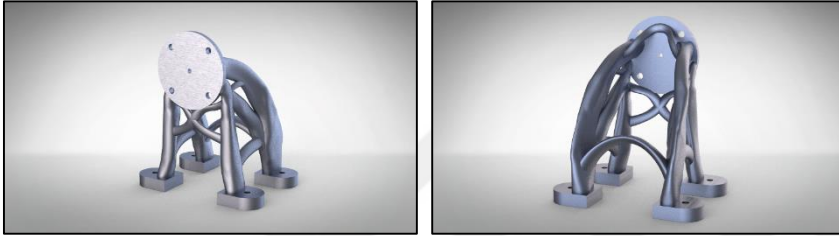
Resim 4.6. Model 2

Modal analiz sonucunda, birbirinden ayrıldığı için yüksek deplasman eğilimi gösteren arka ayaklar arasına atılan ilk destek yapısı model 2’de görünmektedir.



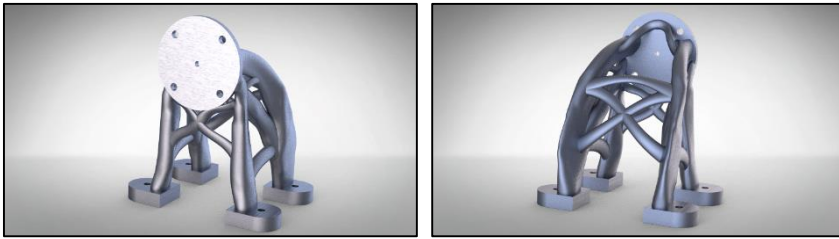
Resim 4.7. Model 3

Montaj arayüzündeki dairesel yüzeyin deplasmanını indirgeme ve ayak tabanlarının yüksek deformasyona direnmesi adına kalınlaştırılması model 3 ile görünmektedir.



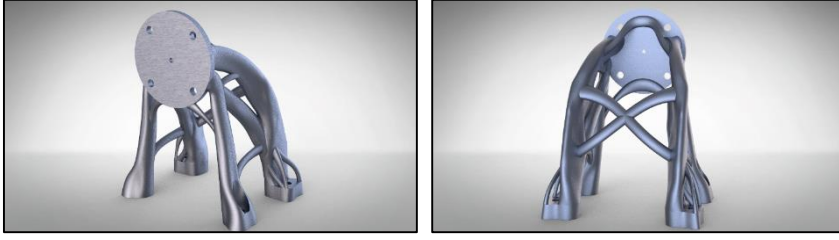
Resim 4.8. Model 4

Öne ve arkaya doğru deplasmanlara direnecek şekilde destek yapıları eklenmesi işlemine devam edilmiştir. Model 4 ile görünmektedir.



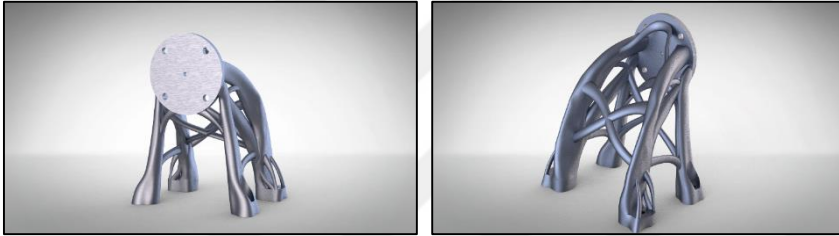
Resim 4.9. Model 5

Arka ayakların deplasmanını indirgeme amacıyla çapraz desteğin üzerine ek destek atılması denenmiştir. Ancak, Resim 4.9’da model 5 için verilen görselde sağda yer alan arka görünüşte, çapraz desteklerin üzerinde yer alan bu destekten herhangi bir fayda görülemeyince tekrar kaldırılmıştır.



Resim 4.10. Model 6

Bu aşamadan önce atılan destek yapılarının bir süre sonra iyileştirme yapamadığı tespit edildikten sonra organikleşme aşamasına geçilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Gerilme yığılmalarının azaltılması, keskin geçişlerin ortadan kaldırılması, tasarımın organikleştirilmesi çalışmaları model 6 ile uygulanmaya başlanmıştır.

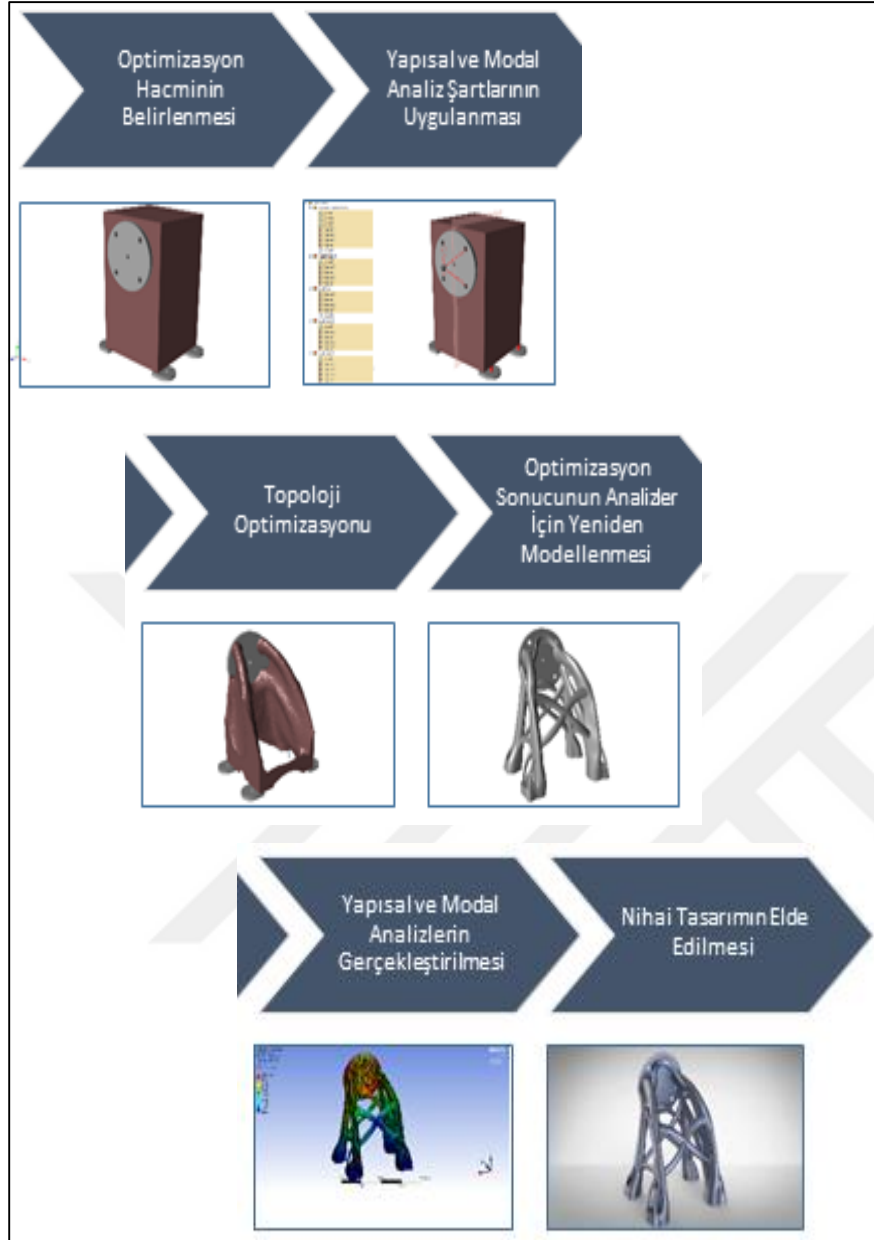


Resim 4.11. Model 7

Organikleşen modelde elde edilen oldukça hızlı iyileşme sonrasında bazı küçük değişimlerde organikleşen yapılar iyileştirilmiştir. Model 7, son model olarak elde edilmiştir. Aşağıdaki resimde ilham alınan fil ayakları ve bir ağacın kök, dal yapısı görülmekte, baştan sona aşamalar ise Şekil 4.3 ile özetlenmektedir.



Resim 4.12. Fil Ayağı ve Ağaç Dallanma Yapısı



Şekil 4.3. Optimizasyon bitiş şeması

4.4. Analizler

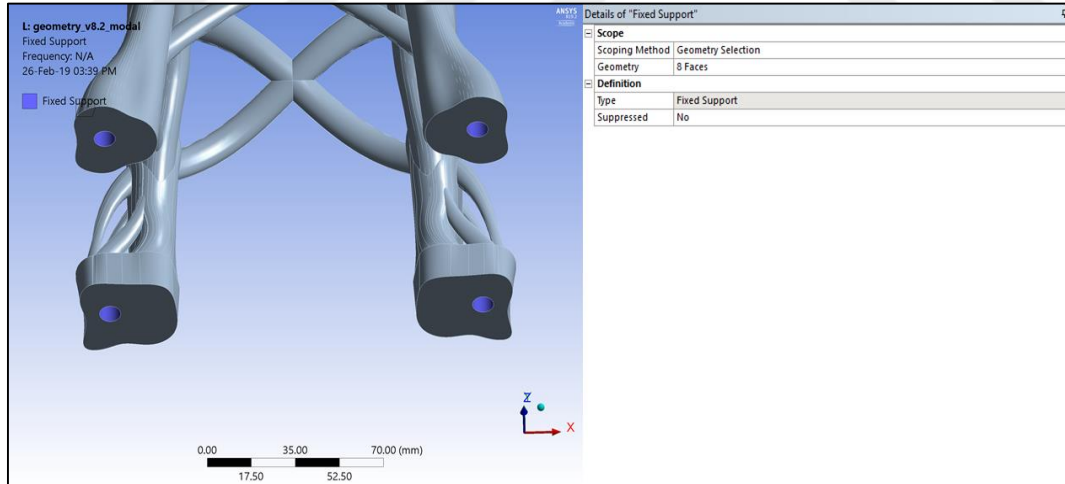
Bu kısımda topoloji optimizasyon yapılmış parçaların iteratif ilerlemesinde aşamalar arasında yapısal ve modal analizler anlatılmaktadır. Her yeni model, bir önceki analiz sonuçlarının referans alınmasıyla iyileştirilerek oluşturulmuştur. Bu analizlerin sonuçlarında elde edilen nihai modelin yapısal olarak akma mukavemetinin referans alındığı güvenli gerilme değerini sağlaması, titreşim konusunda da 250 Hz doğal frekansın üzerinde sonuçlar vermesi hedeflenmiştir.

4.4.1. Yapısal analiz

Çalışma kapsamında, tasarımı yapılan braketin taşıyacağı kütlenin, uydunun kalkış anında maruz kaldığı 20G'lik ivme sonucunda braketten oluşturduğu yükleme dikkate alınarak statik analizler yapılmıştır. Von Mises, azami gerilmeler (İng. maximum principal) ve gerilme yoğunluğu sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan braket modelleri üzerinde sonlu elemanlar analiz programı (ANSYS®) kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları ve iterasyonları aşağıda verilmektedir.

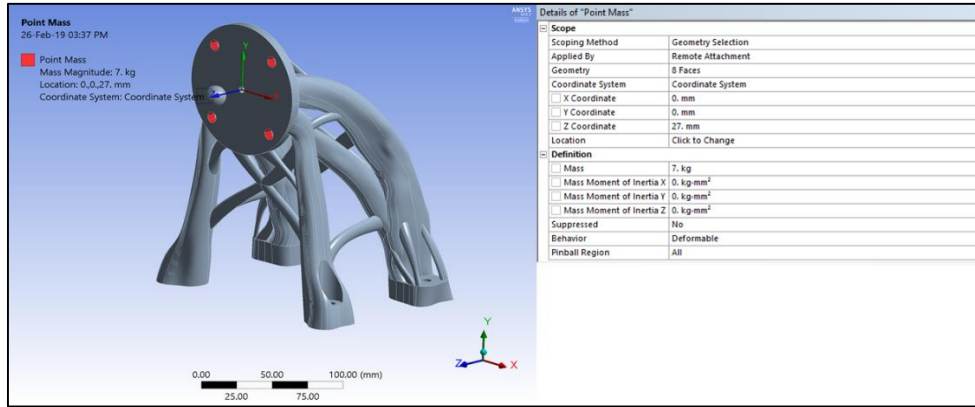
Geleneksel model için analizlerde akma mukavemeti 275 MPa (Al 6061 T6), eklemeli imalat için ise ısıtılmış ve anizotropi sebebiyle daha düşük olan ve teknik dokümanda verilen negatif marjın da eklenmesi ile en kötü senaryo kapsamında 230 MPa (AlSi10Mg) referans değerler olarak ele alınmış ve emniyet katsayıları bu değerlere göre belirlenmiştir.

Braket Resim 4.13 ile görülen, tabanındaki 4 adet delikten (uydu gövdesine bağlantı noktaları) sabit mesnetleme (İng. fixed support) ile sabitlenmiştir.



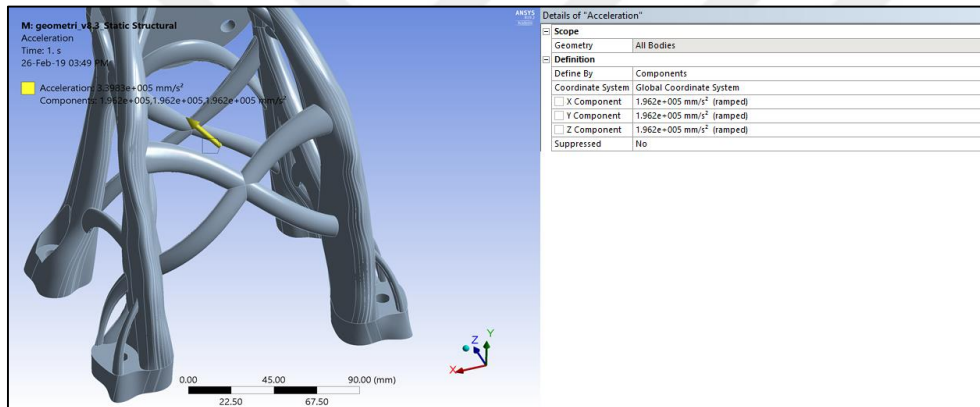
Resim 4.13. Sabitleme noktalarının tanımlanması

Braketin taşıyacağı tepki tekerini simüle eden noktasal kütle (İng. point mass) tepki tekeri bağlantı yüzeyindeki 4 adet delikten bağlı olarak ve bu yüzeyin normalinden 27 mm uzaklıkta etki edecek şekilde analize eklenmiştir ve Resim 4.14 ile gösterilmiştir.



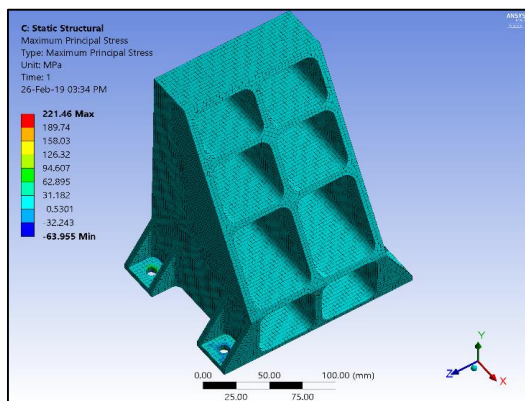
Resim 4.14. Taşınacak yük için bağlantı noktaları ve noktasal kütlelerin tanımlanması

Braket X, Y ve Z eksenlerinden 20'şer G birleştirilmiş ivmeye maruz kalmaktadır.



Resim 4.15. İvmelenmenin atanması

Gerçekleştirilen statik yapısal analizlerin seçilen 3 farklı model için sonuçları şu şekilde verilmiştir:

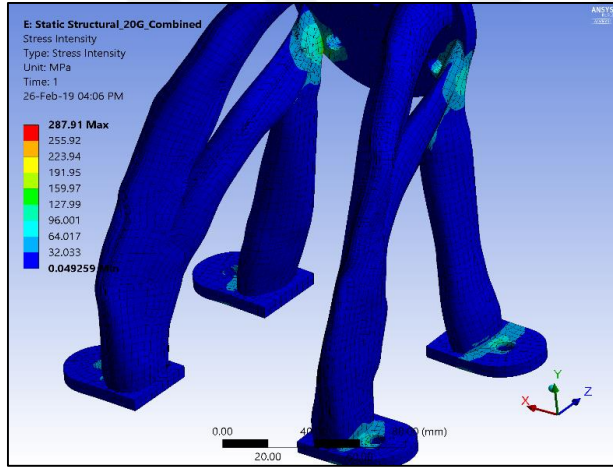


Resim 4.16. Geleneksel model statik analiz sonucu

Çizelge 4.3. Geleneksel model statik analiz gerilmeleri ve emniyet katsayıları

	Gerilme (MPa)		
	Von-Mises	Azami Gerilmeler	Gerilme Yoğunluğu
Geleneksel Model	185,34	221,46	203,69
Emniyet katsayısı	1,5	1,2	1,4

Geleneksel modelde en kritik yüklemeler, azami gerilmelerde (İng. maximum principal stress.) 221,46 MPa olarak görülmektedir. Sünek malzemeler için mühendislikte daha çok kullanılan Von-mises gerilmeleri ise 185,34 MPa olmaktadır. Bu modelin malzemesi Al 6061 T6 olduğundan basit emniyet hesabı için çentik, vb. faktörler ihmal edilerek direkt akma mukavemeti değeri olan 275 MPa referans alınmıştır.

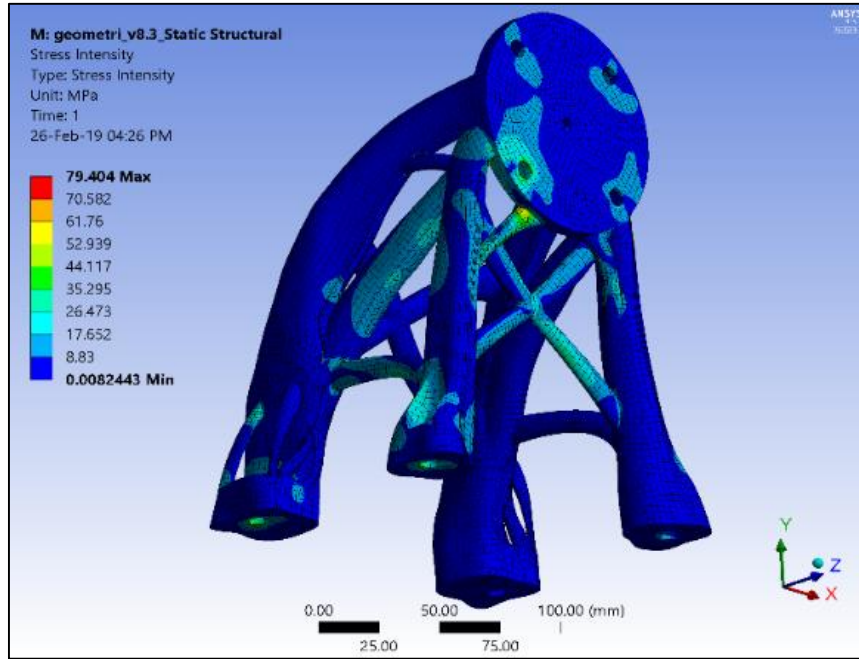


Resim 4.17. Model 1 statik analiz gradyanı

Çizelge 4.4. Model 1 statik analiz gerilmeleri ve emniyet katsayıları

	Gerilme (MPa)		
	Von-Mises	Azami Gerilmeler	Gerilme Yoğunluğu
Model 1	252,98	274,38	287,91
Emniyet katsayısı	0,9	0,84	0,8

Topoloji optimizasyonu sonucu ilk kaba modelden uyarlanan Model 1'in statik analiz sonuçlarına göre emniyet katsayısı 1'den küçük çıkmaktadır ve iterasyon ihtiyacı görülmektedir. AlSi10Mg için akma mukavemet değeri 230 MPa olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla, imalat metotlarını kıyaslarken SLE ile kullanılan malzemenin geleneksel ile kullanılan malzemedan nispeten düşük mukavemet değerlerine sahip olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.



Resim 4.18. Model 7 statik analiz gradyanı

Çizelge 4.5. Model 7 statik analiz gerilmeleri ve emniyet katsayıları

Gerilme (MPa)			
	Von-Mises	Azami Gerilmeler	Gerilme Yoğunluğu
Model 7	75,893	76,906	79,404
Emniyet katsayısı	3	3	2,9

Modal analiz sonuçlarına göre güvenli kabul edilen son topoloji optimizasyonu iterasyonunun, yapısal analizlerde de geleneksel modeldeki mekanik gerilme değerlerinin çok altında sonuçlar çıkarması ile braketin güvenli bir tasarıma sahip olduğu yargısı elde edilmiştir. Emniyet katsayısı farklı gerilme teorileri için 2,9 – 3,0 arası çıkmıştır.

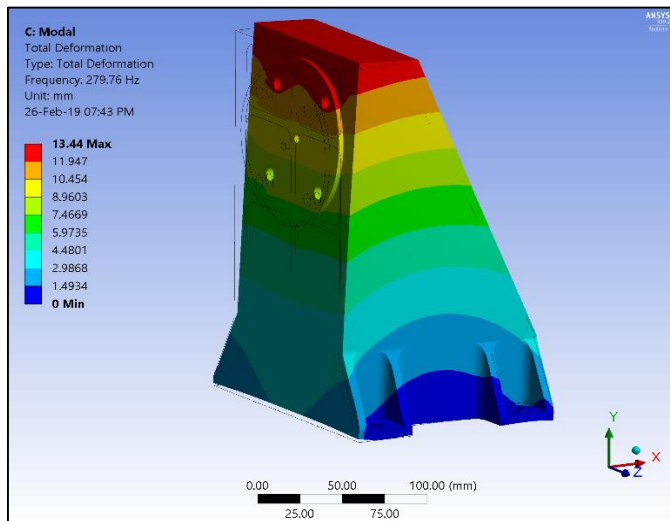
Çizelge 4.6. Tüm modeller için statik analiz gerilme değerleri karşılaştırması

Gerilme (MPa)			
	Von-Mises	Azami Gerilmeler	Gerilme Yoğunluğu
Geleneksel Model	185,34	221,46	203,69
Model 1	252,98	274,38	287,91
Model 2	467,07	326,37	476,24
Model 3	200,4	93,038	221,71
Model 4	184,57	68,887	216,17
Model 5	165,02	65,14	174,43
Model 6	88,722	103,95	101,95
Model 7	75,893	76,906	79,404

4.4.2. Modal analiz

Modal analiz; titreşen bir sistemin dinamik davranışını gösteren matematik modeli oluşturmak için ihtiyaç duyulan parametrelerin (doğal frekans, titreşim biçimi, iç sönüm gibi) belirlenmesi işlemidir. Bir yapıya statik denge konumunda iken geçici bir hareket girdisi verilirse, yapı doğal frekans adı verilen, kendi kütle ve direngenliğine bağlı olan belirli bir frekansla titreşmeye başlar. Yapının bu titreşimleri “serbest titreşimler” olarak adlandırılır. Her yapının serbestlik derecesi kadar doğal frekansı vardır. Buna göre, tek serbestlik dereceli olarak kabul edilen bir yapının tek bir doğal frekansı varken, çubuk gibi yayılı kütle ve sonsuz sayıda serbestliğe sahip yapıların sonsuz sayıda doğal frekansı vardır. Ancak, basit uygulamalar için bu doğal frekansların ilk birkaç tanesi önem taşır. Gerçekleştirilen analizlerde çıkan frekans değerleri için ilk 10 mod dikkate alınmakta ve bu değerlerin efektif kütlelerinin %10 oranından fazla değer aldığı veriler değerlendirmeye alınmaktadır.

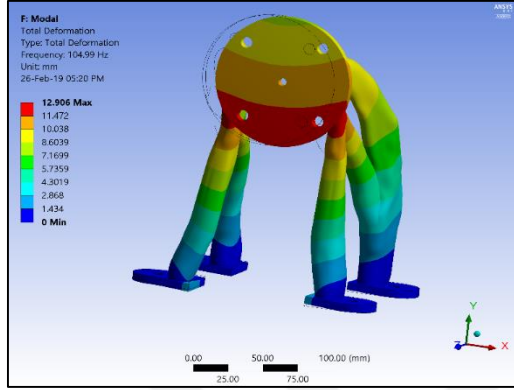
Çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilen braketin uydu fırlatma anında maruz kalacağı titreşim etkilerine göre doğal frekansının güvenli bölgede (250 Hz ve üzeri) kalması esasına göre modal analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizlere göre braketin iteratif bir şekilde optimizasyon süreci yürütülmüştür. Statik analiz ile aynı şekilde sabitleme ve yük taşıma noktalarının tanımlanması ve noktasal kütlelerin verilmesinin ardından modal analiz modülü kullanılarak modal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen modal analizler ANSYS® yazılımı ile yürütülmüş olup analiz şartları ve sonuçları aşağıda verilmiştir:



Resim 4.19. Geleneksel model modal analiz gradyanı

Çizelge 4.7. Geleneksel model modal analiz

	Doğal Frekans (Hz)			Kütle	
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	kg	% Azalma
Geleneksel Model	279,76	350,7	700,17	2,32	-

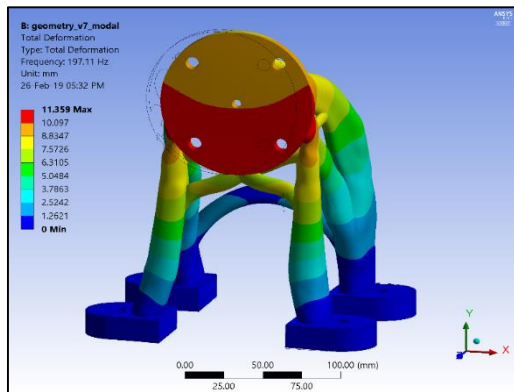


Resim 4.20. Model 1 modal analiz gradyanı

Çizelge 4.8. Model 1 modal analiz ilk 3 mod değeri

	Doğal Frekans (Hz)			Kütle	
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	kg	% Azalma
Geleneksel Model	279,76	350,7	700,17	2,32	-
Model 1	104,99	204,59	458,92	1,19	46,6

Topoloji optimizasyonuna göre çıkan ilk modelin modal analiz sonuçlarından da görüleceği üzere doğal frekansı istenilen değerlerin çok altındadır. Bu sonuçlara göre yanal hareketi (Z ekseninde dönme) önlemek amacıyla ön bacaklar arasına ve öne eğilme hareketini (X ekseninde dönme) engellemek amacıyla destek yapıları eklenmiştir.



Resim 4.21. Model 2 modal analiz gradyanı

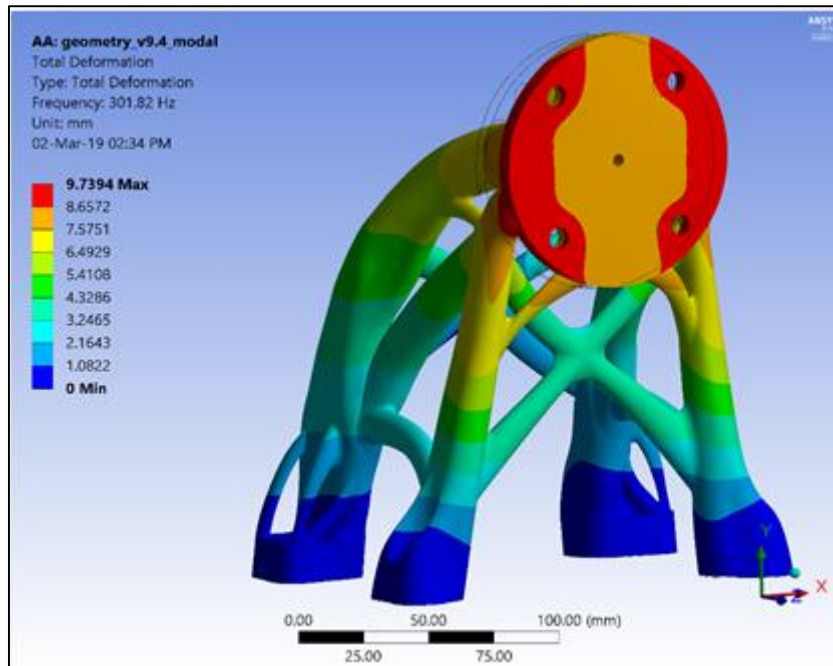
Çizelge 4.9. Model 2 modal analiz ilk 3 mod değeri

	Doğal Frekans (Hz)			Kütle	
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	kg	% Azalma
Geleneksel Model	279,76	350,7	700,17	2,32	-
Model 3	197,11	296,81	401,78	1,52	32

3. modeldeki iyileştirmeler ile yanal eğilme kritik frekansı 104,99 Hz'den 197,11 Hz'e, öne eğilme hareketinin kritik frekans değeri 204,59 Hz'den 296,81 Hz'e yükselmiştir.

Çizelge 4.10. Tüm modeller için modal analiz ve kütle değerleri

	Doğal Frekans (Hz)			Kütle	
	1. Mod	2. Mod	3. Mod	kg	% Azalma
Geleneksel Model	279,76	350,7	700,17	2,32	-
Model 1	104,99	350,70	458,92	1,19	46,6
Model 2	103,28	204,59	405,79	1,30	41,7
Model 3	197,11	199,50	401,78	1,52	32
Model 4	269,55	296,81	571,32	1,56	30
Model 5	208,29	325,64	473,67	1,19	46,6
Model 6	218,99	303,96	474,84	1,21	45,7
Model 7	301,82	304,11	500,67	1,44	38



Resim 4.22. Model 7 modal analiz gradyanı

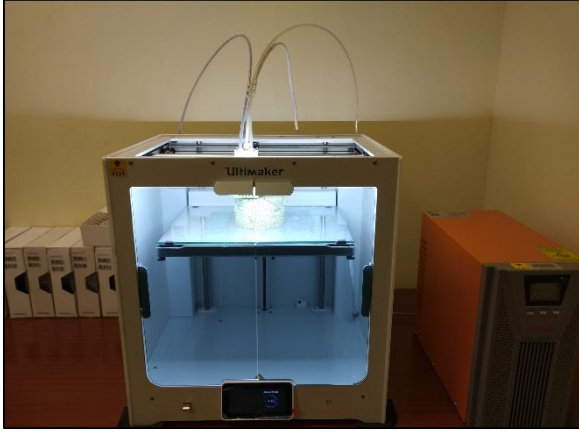
Resim 4.22’de görüldüğü üzere montaj arayüzünün alt tarafında yer alan ve yüksek amplifikasyon sebebiyle gereksinimlerin altında kalan modal hareket, Model 3 ile atılan destek ile ötelenmiş olsa da atılan desteğin geometrik yapısından dolayı bu etki istenilen düzeyde olmamıştır. Nihai modelde ise bu destek “ağaç dalları” yapısından esinlenilerek adeta büyük gövdeden açılı olarak ayrılan dal formuna benzetilmiştir. Ayrıca bu formun, inşaat mühendisliği alanında kubbe, köprü gibi yapılarda sıkça kullanılan kemerlere benzer şekilde merkezde birleşmesi sağlanmıştır. Montaj arayüzünün Z eksenindeki hareketlerine direnmesi planlanan bu destek yapısı kemerli yapısı ile yanal yüklerde de kendi kendini dengeleyebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Kafes sistemlerde yük dağılımını en verimli paylaşan yapı formunun üçgen olduğu bilinmektedir. Bu bilgiye dayanarak braketin ana yüklerini taşıyan ön ve arka ayaklar arasına yüklemenin merkezinden başlayarak sabitleme merkezine doğru kuvvet iletimi ve yük paylaşımı yapması amacıyla eklenen yapı, topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen ilk kaba modelde yer almıştır. Bu sonuçtan yola çıkılarak deplasmanın yükselme eğilimi gösterdiği noktalara birbiri ile çizgisel olarak üçgen kafes formu oluşturacak, alan ve hacimsel olarak ise ağaç dallarına benzeyecek şekilde destekler eklenmiştir. Desteklerin eklenme konumları için ise, bütüncül tasarımın zıt yönlerdeki dış gerilmeleri belirli noktalara ileterek birbirlerini sönmölemelerini sağlayacak şekilde olabildiğince ortak koordinatlar seçilmiştir.

Statik analiz ve modal analiz sonuçlarına göre topoloji optimizasyonu ile elde edilen nihai modelin geleneksel model ile çok yakın titreşim değerlerine sahip olduğu ve nihai modelin geleneksel modelden daha iyi mekanik dayanım sonuçları sergilediği görölmüştür. Bunun yanı sıra geleneksel modelde 2,32 kg olan kütle değerini 1,44 kg’a düşürerek %38 oranında hafifletme yapılmıştır.

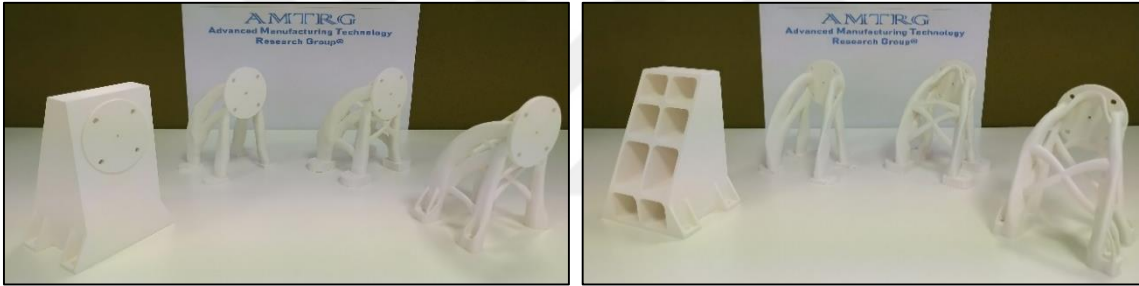
4.5. Hızlı Prototipleme

Yapısal ve modal analizleri yapılarak sinüzoidal yüklere dayanacak şekilde optimize edilen model, SLE ile imal edilmeden önce FFF prensipli, düşük maliyetli polimer filaman kullanan bir yazıcı ile hızlıca imal edilerek fiziksel olarak değerlendirilmiştir.



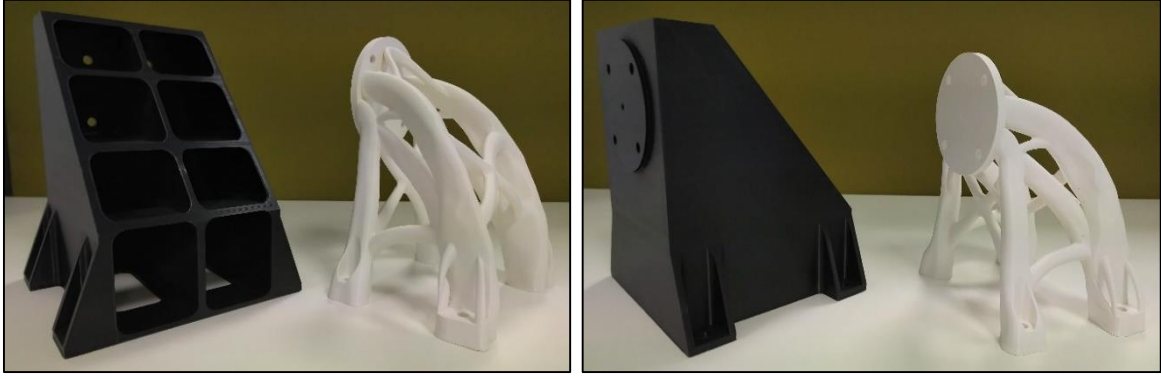
Resim 4.23. Ultimaker S5 iki kafalı hızlı prototipleme cihazı

Ultimaker S5 yazıcı ile iterasyonlar sırasında zaman zaman yarı ölçekli basılan modellerden birkaçı aşağıdaki resimde görülmektedir.



Resim 4.24. Hızlı prototipleme ile iterasyonların baskısı

Bu değerlendirmeler sırasında mesnetlerin, birleşme noktalarındaki gerilme yığılmalarını önlemek amacıyla daha organik olacak şekilde yuvarlatılması gerektiği analizlerden de, somut baskılardan da anlaşılmıştır. Ayrıca braketin her ne kadar CAD ortamında modellenmesi yapılmış olsa da cıvata, pul ve yaylı rondeladan oluşan bağlantı elemanları tork anahtarları kullanılarak denemeler yapılmıştır. FFF yazıcı ile basılan ve prototipleme için yeterli boyutsal doğruluğa sahip olan modeller ile tasarım geliştirme aşamalarının hızlandırılması sağlanırken, aynı zamanda SLE imalatı yapılacak esas modelde karşılaşılabilecek hataların en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Tork anahtarları ile yapılan denemelerde montaj kolaylığı ve ergonomi açısından bazı kısımlarda küçük çaplı düzenlemeler yapılmasının iyi olacağı anlaşılmış ve modelde bu doğrultuda güncelleme yapılmıştır. Resim 4.25 ve 4.26'da geleneksel ve eklemeli modellerine ait birebir ölçekte baskılar ve tork anahtarları kontrolleri yer almaktadır.



Resim 4.25. Geleneksel ve eklemeli imalat modeli hızlı prototipleme



Resim 4.26. Hızlı prototipleme baskısı Model 7 montaj kontrolleri

5. SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE İMALAT

5.1. EOS M290: SLE Cihazı

Optimizasyonu tamamlanan ve hızlı prototipleme sonrası montajı kolaylaştırma amacıyla son ölçülerinde güncellemeler yapılan braketin, metal prototip imalatı için FSM ALUTEAM ekibi ile görüşülerek planlama yapılmıştır.



Şekil 5.1. SLE imalatı akış şekli

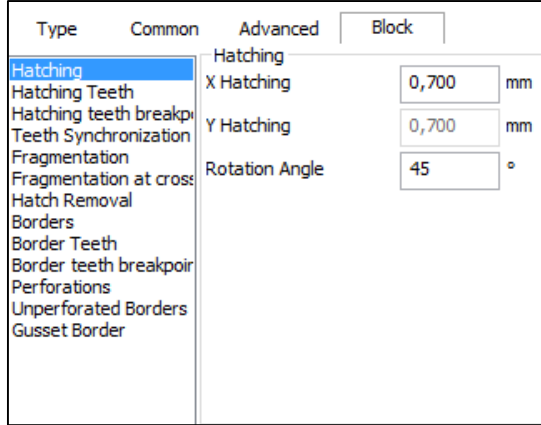
SLE metodunda hammadde toz halinde imalat haznesinde bulunur. Lazer güç kaynağı tarayıcı ve optik yönlendirme sistemi ile üretim haznesinde daha önce dilimlenmiş dosya formatında oluşturulan her bir katman için belirlenen yolu izleyerek tozları ergitir. Bir katman tamamen ergitildikten sonra yan tarafta bulunan toz besleme haznesinden yeni katman için malzeme alan toz serme bıçağı bu tozu, ilk katmanın tamamlanmasından sonra bir katman kalınlığı kadar aşağı inmiş üretim haznesi üzerine serer. Lazer her defasında yeni serilen tozları yakarak katmanları üst üste oluşturur.

5.2. Destek Yapıları

SLE ile imalatla destek yapılarının kullanılma zorunluluğu, parça geometrisine, parçanın dikeyle 45 derece ve üzerinde açı yapan yüzeylere sahip olup olmamasına bağlıdır. Parça üretiminde destek yapılarının modellenmesi de imalatın istenilen özelliklerde gerçekleşmesi için kritik öneme sahiptir. Braketin katı modeli “.stl” formatı ile dilimlenmiş model formuna çevrilerek Magics yazılımı ile açılmış, bu yazılım ile destek yapılarının gerektiği bölgeler belirlenerek destekleri oluşturulmuştur.

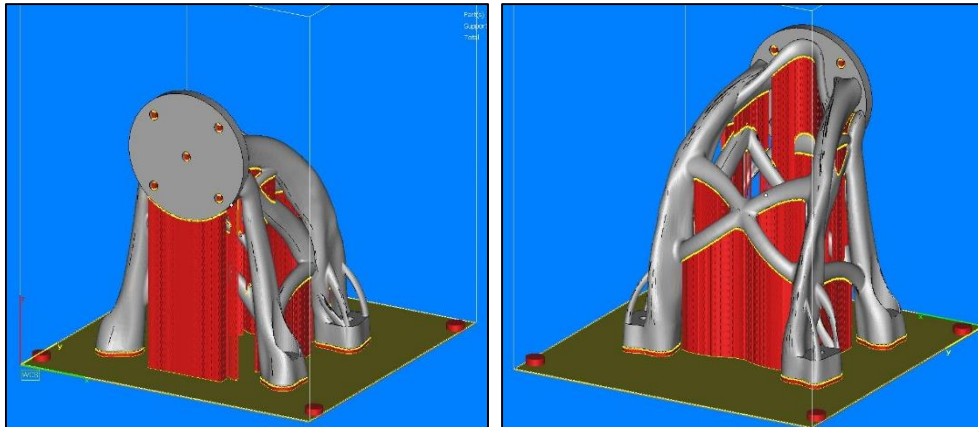
SLE metodu ile imalatla, parçanın tabla üzerindeki yönelime göre anizotropik etkisi sebebiyle mukavemet değerleri değişiklik gösterebilmektedir. Braket yönelimi sabitleme ayakları baskı tablasına oturacak şekilde ayarlanmıştır. Yazılımın otomatik oluşturduğu destek yapıları, ihtiyaç duyulması halinde manuel olarak eklenip çıkarılabilmektedir. Bu

çalışma için otomatik oluşturulan destek yapıları tercih edilmiştir. Destek yapılarının uç kısımları diş şeklinde braketle bağlanmaktadır. Trapez formu bu bağlantıların birbirine olan mesafeleri ve diğer parametrelerinin ayarlanabildiği menüye ait ekran görüntüsü Şekil 5.2 ile paylaşılmıştır.

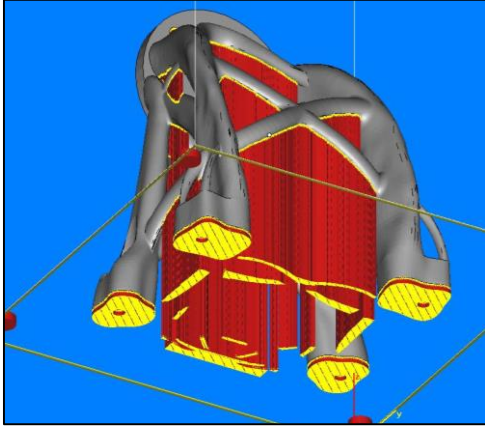


Şekil 5.2. Magics destek ayarları ekranı

Resim 5.1 ve 5.2’de farklı açılardan destek yapıları görülmektedir. Kırmızı renkli alanlar destekleri, sarı renkli alanlar ise braketle veya baskı tablasına temas eden alanları göstermektedir. Baskı tablasına direkt temas eden yüzeylerdeki kırmızı ve sarı alanlar ise imalat sonrası baskı tablasından braketin sökülmesi sırasında kesme yapılacak yüzeyleri göstermektedir.



Resim 5.1. Magics ile destek yapılarının oluşturulması, ön (solda) ve arka görünüş (sağda)



Resim 5.2. Magics ile destek yapılarının oluşturulması, alttan görünüş

5.3. İmalat

Magics yazılımı ile destekleri oluşturulan ve imalat parametreleri girilen dilimlenmiş model, imalat tezgâhına aktararak imalat süreci başlatılmıştır. İlk metal prototip imalatı 9 Mayıs 2019 tarihinde başlatılmıştır ve 47,5 saat süren bir işlemle tamamlanmıştır. Bazı imalat parametreleri Çizelge 5.1 ile verilmiştir.

Çizelge 5.1. İmalat parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Lazer gücü	370	Watt
Tarama hızı	1300	mm/sn
Tarama aralığı	0,19	mm
İmalat süresi	47,5	saat
Destek tipi	Blok	-
Katman kalınlığı	0,03	mm
Katman sayısı	7515	adet

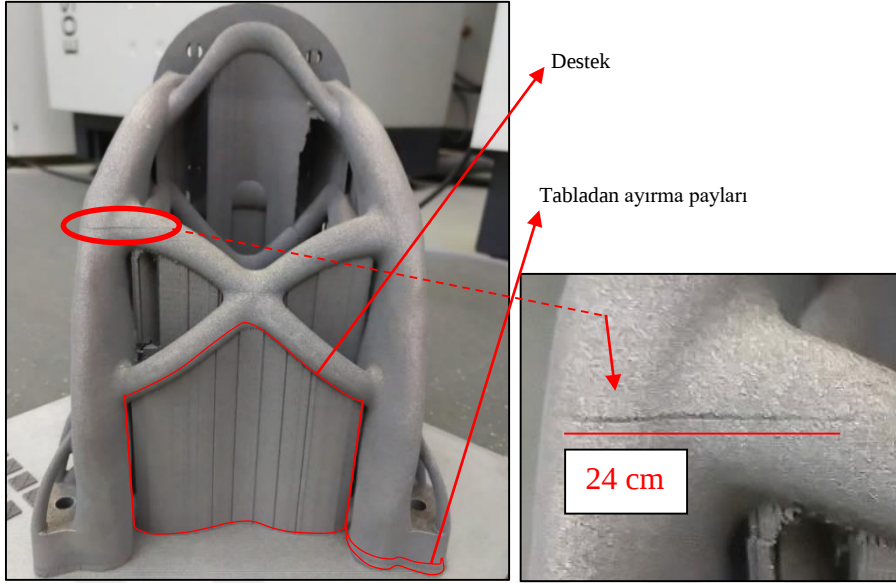
Cihazın imalat öncesi hazırlanması aşamasında serici bıçak kontrolü, platform düzlük kalibrasyon kontrolü, platformun ısıtılması ve lazer lensinin kontrolü yapılmıştır. Çevre birimlerinden imalat sırasında ortamda koruyucu olarak kullanılan Argon gazı ünitesi ve kompresör kontrolü de yapılarak sistemin tümleşik kalibrasyonu ve uygunluğu doğrulanmıştır. Belirlenen parametreler ile imalat başlatıldıktan sonra ilk katmanlar bir süre göz ile takip edilmiştir. Eklemeli imalat metotlarında ilk kontroller büyük öneme sahiptir. Geleneksel metotlarda olduğu gibi işlemler birbirinden bağımsız olmayıp, her katman bir sonraki katmanın doğruluğunu doğrudan etkilediği için, ilk katmanların oluşturulması

sırasında meydana gelebilecek bir hatanın modelin tamamına etki etme riski çok yüksektir ve hatalı başlayan imalatlara devam etmeyerek sorun tespiti ve giderilmesi işlemlerine geçmek daha uygun olmaktadır.

5.4. Desteklerin Sökülmesi ve Muayene

İmalat aşaması tamamlandıktan sonra braket, baskı tablası ile birlikte toz yatağından çıkarılmıştır. Bu aşamada göz ile kontroller yapılarak imalat hataları olup olmadığı gözlemlenmiştir.

Arkadan görünüşteki fotoğrafa bakıldığında destek yapılarında kısmi bozulmalar göze çarpmaktadır. Bundan kaynaklı olarak, Resim 5.3'te de görülebileceği üzere, en dış yüzeyde kalan çok az sayıda katmanın hatalı serildiği görülmektedir. Hatanın sebebi araştırıldığında destek yapılarının otomatik atılması sebebiyle braket ile birleşme olan bazı kısımların geometrik form ve açı sebebiyle çok küçük tutunma alanına sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yeterince yüzey alanı olmadığından ve sökmek üzere narin yapıda olduğundan destek yapıları birkaç yerel noktada ve katmanda tam yapışma sağlayamamış, ancak sonraki katmanlarda bunu telafi etmiştir. Yine de böyle hatalarla karşılaşmamak için destek yapılarının program tarafından otomatik atılmasından sonra her bir yüzey temasının detaylıca incelenmesi ve çok küçük tutunma alanına sahip olanların tespit edilmesi durumunda önlem alınması gerektiği tecrübe edilmiştir. Öte yandan bu hata iç kısımlara yansımadığından ve dış yüzeyde görece ince ve çok az sayıda katmanda yer aldığından genel yapısalı etkileyecek ölçüde olmadığı ve ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir. Bunun haricinde başka herhangi bir hata görülmemiştir.



Resim 5.3. Braket, baskı tablası ve destek yapıları

Destek yapılarının temizlenmesi esnasında birincil yapıda herhangi bir aşınma, çatlak, vb. deformasyon oluşmaması kritik seviyede önemlidir. Oluşabilecek bu gibi küçük hatalar, özellikle yorulma yüklemeleri altında çalışırken daha büyük hatalara, onlar da sonrasında tüm yapının görev kabiliyetinin kaybına kadar varabilecek olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu zorluktan dolayı braketin destek yapılarından temizlenmesi, üretim tablasından sökülmesi ve kumlama işlemleri, alanında uzman kişilerce yapılmıştır. Destek yapılarının temizlenmesi ve kumlama işlemi 12 Mayıs 2019 tarihinde tamamlanmıştır. Destek yapılarında kullanılan tozlar yeniden kullanılamamaktadır ancak ergitme havuzundaki tozlar, cüruf ve kalıntılarından arındırılarak tekrar tekrar kullanılabilir.

İlk kontrolden sonra braketin sabitleme plakasından sökülmesi aşamasına geçilmiştir. İlgili görseller Resim 5.4. ile verilmiştir.

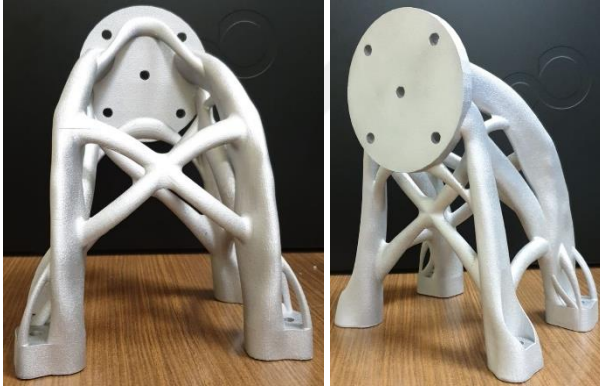


Resim 5.4. Braketin baskı tablasından sökülmesi

Ayakların sabitleme plakası ile bağlantısı kesildikten sonra destek yapılarının ayrılması için çekiç, vb. el aletleri kullanılmıştır. Sökme ve destek artıklarının temizlenmesinden sonra braket Resim 5.4'te görülen en sağdaki halini almıştır.

5.5. Kumlama

Yüzey pürüzlülüğü çatlak ilerlemesini etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Pürüzlülük değeri düşürüldükçe pürüzlerden kaynaklanan keskin köşe sayısı ve yüksekliği azaltıldığından, gerilmelerin daha geniş alanlara yayılması sağlanarak etkileri azaltılmaktadır. Kumlama işlemi ile hem SLE metotlarında görece yüksek olan yüzey pürüzlülüğü düşürülmekte ve mikro çatlaklar olabildiğince ortadan kaldırılmakta, hem de imalat sırasında atılan desteklerin ve tablaya bağlantı arayüzlerinin tabladan sökülmesi sonrasında kalan artıklar temizlenmektedir. Braketin kumlama sonrası yüzey yapısının makro seviyede iyileşmesi Resim 5.5 ile verilmiştir.



Resim 5.5. Kumlama işlemi sonrası braket yüzeyleri

5.6. Optik Ölçüm ve Doğrulama

Destek yapılarından temizlenmiş ve kumlanarak dış yüzey pürüzlülüğü azaltılmış braket, imalat sonrası geometrik doğrulamasının yapılması amacıyla optik ölçüm cihazı ile 3 boyutlu olarak taranmıştır. Bu işlem, 21 Mayıs 2019 tarihinde, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı'nda, ZEISS T-Track LV cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



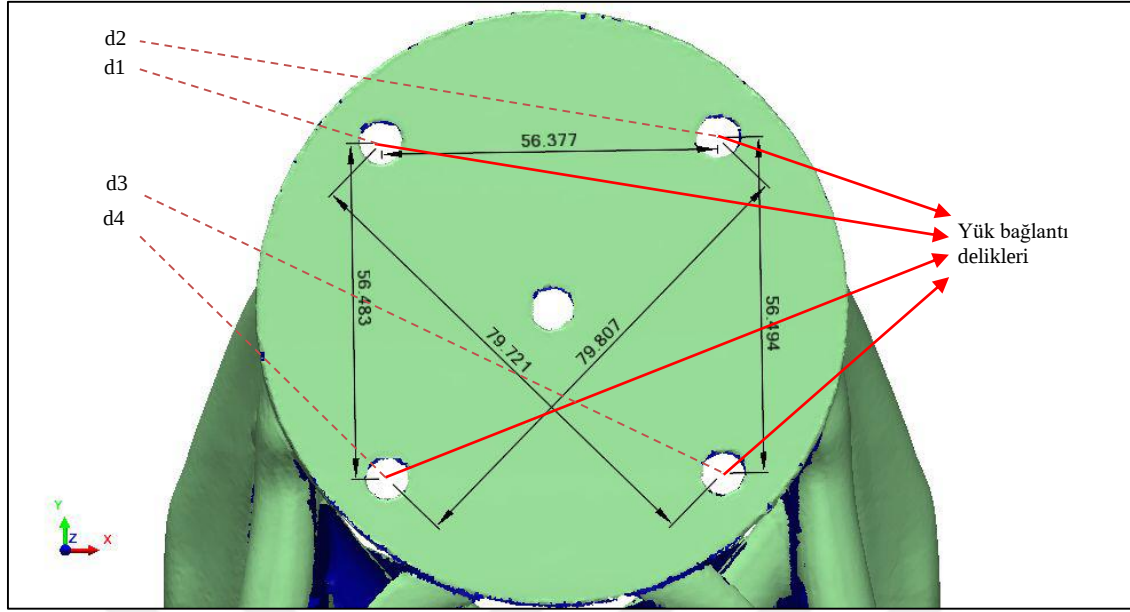
Resim 5.6. Optik ölçüm düzeneği

Montaj yüzeylerinde bırakılan son işleme payları göz önünde bulundurularak optik ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sonucunda yüzeylerde bırakılan toleranslar yeniden değerlendirilerek son işleme öncesi alınması gereken paylar kesinleştirilmiştir.



Resim 5.7. Optik tarama aşaması

Braketin 3 boyutlu taraması gerçekleştirildikten sonra elde edilen nokta bulutu Polyworks yazılımında, üretim için modellenen CAD verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma üst üste bindirilen nokta bulutu verilerinin arasındaki sapma miktarının, renk gradyanlarıyla gösterilmesi ile verilmiştir. Ayrıca braket üzerinde geometrik doğruluğu kritik öneme sahip noktaların da önceden hazırlanmış teknik resim dosyasındaki ölçüm verileriyle örtüşüp örtüşmediği belirlenen toleranslar kapsamında kontrol edilmiştir. Yük bağlantı arayüz deliklerinin ölçümü Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



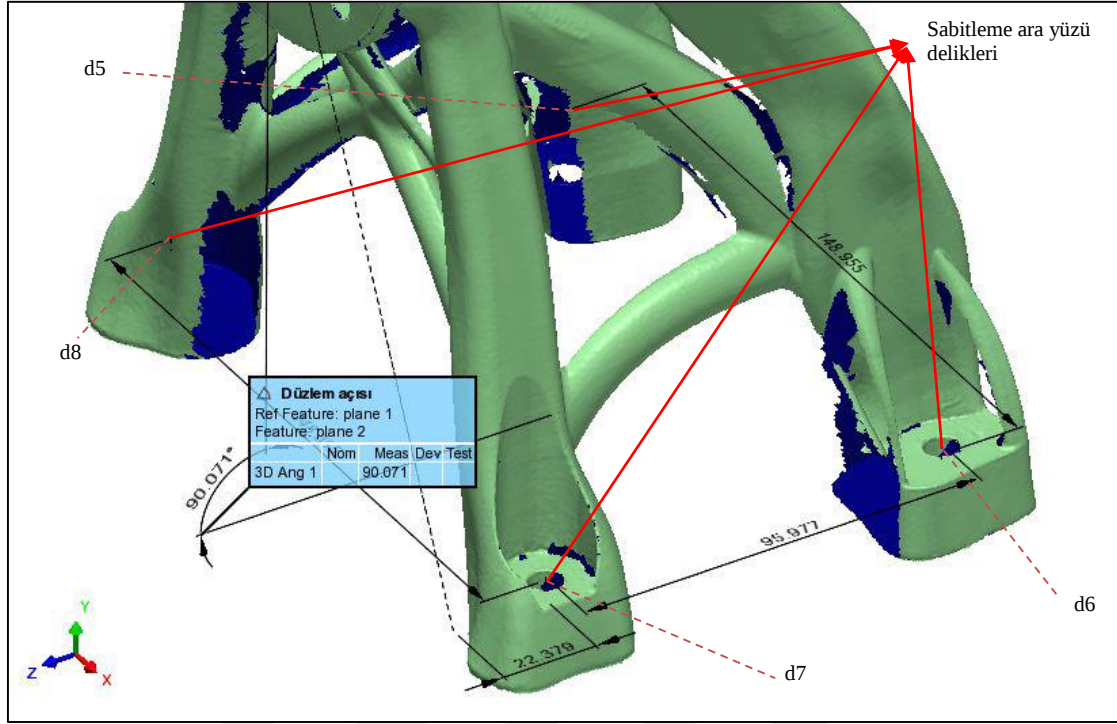
Şekil 5.3. Yük bağlantı arayüzü ölçüm sonuçları

Yük bağlantı arayüz deliklerinin birbirleri arasındaki mesafeleri, belirtilen tolerans değerlerinin çok altında sapmalarla ölçülmüştür. Şekil 5.3'te görünen delikler, sol üstteki d1, sağ üstteki d2, sağ alttaki d3 ve sol alttaki d4 olacak şekilde saat yönünde numaralandırılmıştır. Yük bağlantı arayüzü için ölçümler ve sapma miktarları Çizelge 5.2 ile verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yük arayüzü nominal ve ölçülen model karşılaştırması

Ölçü Adı	Kontrol	Nominal Değer mm	Ölçülen Değer mm	Tolerans	Sapma
Mesafe_d1_d2	X Mesafesi	56,569	56,377	± 1	-0,192
Mesafe_d1_d3	XY Mesafesi	80	79,721	± 1	-0,279
Mesafe_d1_d4	Y Mesafesi	56,569	56,483	± 1	-0,086
Mesafe_d2_d3	Y Mesafesi	56,569	56,494	± 1	-0,075
Mesafe_d2_d4	XY Mesafesi	80	79,807	± 1	-0,193

Braketin uydu gövdesine bağlanacağı sabitleme arayüzünde yer alan 4 adet delik merkezinin birbirlerine göre mesafelerinin ölçümü, ayrıca yük bağlantı arayüzü ile sabitleme arayüzü arasındaki dikliğin ölçümü Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bu delikler saat yönünde sırasıyla d5, d6, d7 ve d8 olarak tanımlanmıştır. Deliklerin oturduğu düzlem referans düzlem sayılmış ve p1 olarak tanımlanmışken; d1, d2, d3 ve d4 deliklerinin düzlemi karşılaştırma düzlemi sayılmış ve p2 olarak tanımlanmıştır.

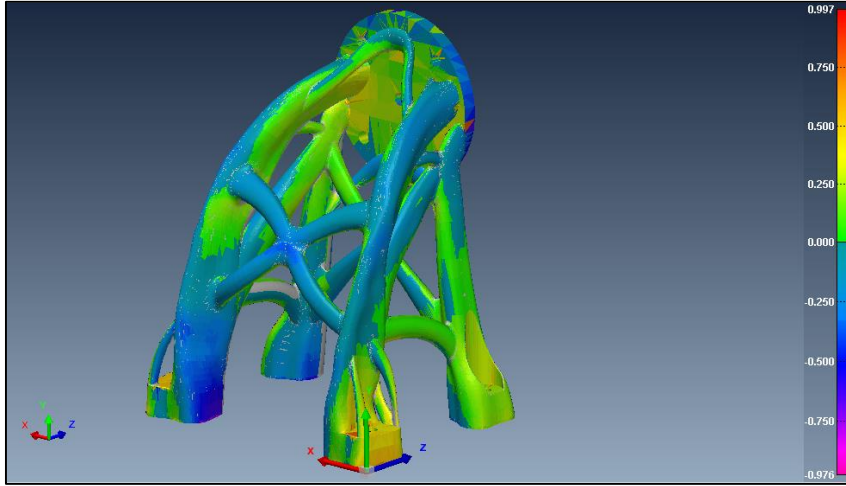


Şekil 5.4. Sabitleme arayüzü ölçüm sonuçları

Braketin sabitleme arayüz delikleri arasındaki mesafe ölçümlerinin geometrik toleransların altında çıkmış olduğu görülmüştür. Aynı zamanda braket geometrisinde çok kritik öneme sahip olan yük bağlantı arayüzü ve sabitleme arayüzünün birbirine dikliğinin de çok hassas tolerans ile sağlanmış olduğu görülmektedir. Ölçülen değerler ve sapma miktarları Çizelge 5.3 ile verilmiştir.

Çizelge 5.3. Sabitleme arayüzü nominal ve ölçülen değer karşılaştırması

Ölçü Adı	Nominal Değer mm	Ölçülen Değer mm	Tolerans	Sapma
Mesafe_p1_d7	22	22,379	±1	0,379
Mesafe_d6_d7	96	95,977	±1	-0,023
Mesafe_d5_d6	148	148,955	±1	0,955
Mesafe_d7_d8	148	148,385	±1	0,385
Açı_p1_p2	90°	90,071°	±1	0,071



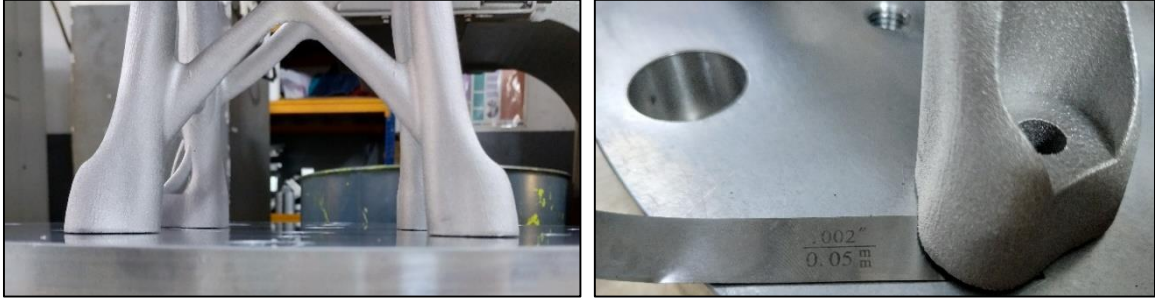
Resim 5.8. Optik ölçüm sonuçları renk gradyanı

Yapılan optik ölçümler sonucunda hassaslığı ve doğruluğu kritik olan geometrik değerlerin üretim sonrasında, önceden belirlenmiş tolerans sınırları içinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca renk gradyanı ile gösterilmiş nokta-nokta örtüşme ile yapılmış olan geometrik sapma analizi de braketteki maksimum geometrik farkların cihazla ölçülmesi en zor olan dar bölgelerde meydana geldiğini göstermiş olup bu maksimum sapma değerlerinin ölçüm ve cihaz hassasiyetinden kaynaklı olduğunu ortaya koymuştur.

5.7. Yüzey İşleme ve Parlatma

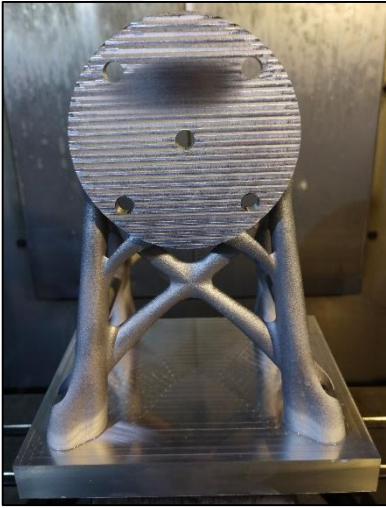
SLE metodu ile imal edilmiş parçaların yüzey pürüzlülük değerleri geleneksel imalat muadillerine göre daha yüksek ölçülmektedir. Ekipmanın genel ısı iletkenliğini olumsuz etkilememesi için ısı iletimini sağlayacak olan bağlantı yüzeylerinin bağlanacakları yüzeylerle olabilecek en pürüzsüz şekilde örtüşmesi gerekmektedir. Aynı zamanda cıvatalı bağlayıcılarla montajı yapılacak olan braketin bağlantı yüzeylerinde, bu bağlamalar esnasında cıvatalara uygulanan ön yüklemeler sonucunda aşınma olmaması için temas yüzeylerinin olabildiğince pürüzsüz olması istenmektedir. Bu sıralanan sebeplerden dolayı braketin bağlantı ara yüzeyi ve sabitleme ara yüzeylerine daha iyi toleranslar elde etmek amacıyla düzlemselleştirme uygulanması gerekmektedir.

Testlerden önce braket için son aşama bağlantı arayüzlerinin düzlemselliğinin bir işleme merkezi ile işlenerek gerekli tolerans aralığına indirgenmesidir. Resim 5.9'da işlem öncesi referans düzlem ile sabitleme arayüzleri arasındaki boşluk görülmektedir.



Resim 5.9. Braket sabitleme arayüzleri düzlemsellik kontrolü

İşleme merkezinde braketin yük bağlantı arayüzü ile sabitleme arayüzlerinin işlenmesi ile ilgili görsel Resim 5.10 ile verilmiştir.



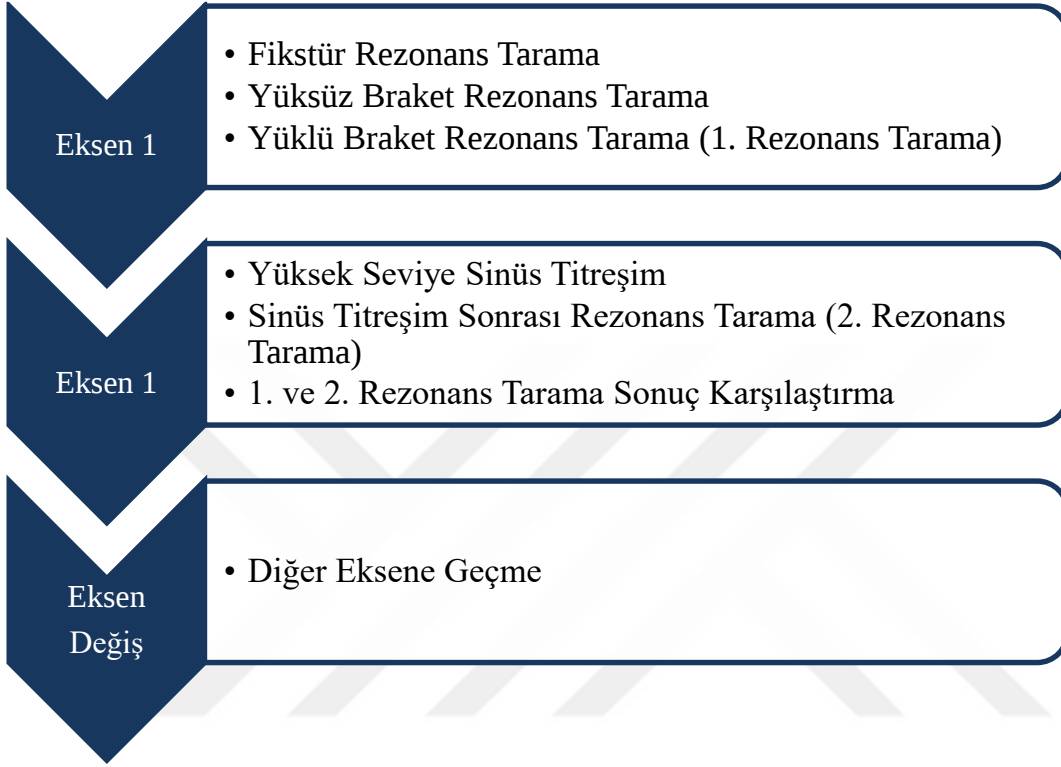
Resim 5.10. İşleme merkezinde yüzey düzlemselleştirme aşaması

Yüzey işleme işlemlerinin tamamlanmasından sonra CMM ile ölçümler yapılarak geometrik ve konum toleransları ile kıyaslama yapılmıştır. Karşılaştırmalarda hedeflenenlerden daha iyi toleransların elde edildiği görülmüştür.



6. TEST VE TASARIM DOĞRULAMA

6.1. Test Planlama ve Akışı



Şekil 6.1. Test akışı

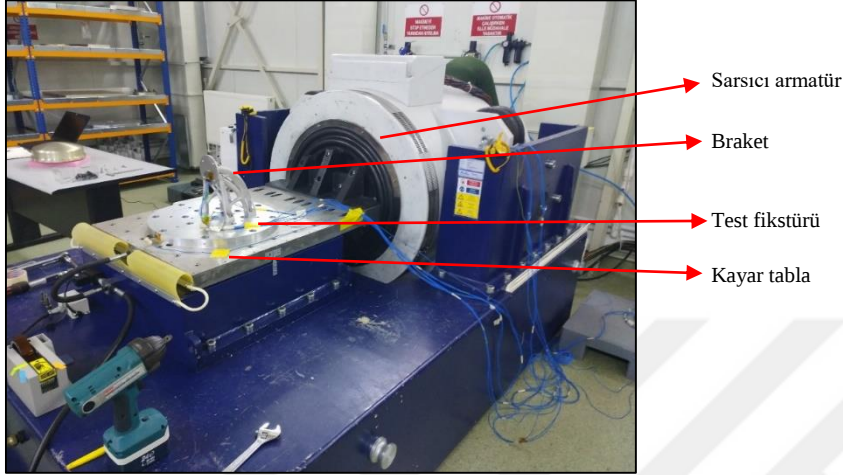
6.2. Rezonans Tarama

Yüksek seviyeli testlere hazırlık aşamasında önce ana rezonans modlarının karakterize edilmesi, sonra yüksek seviyeli testleri müteakip yinelenmesi ile taramalar arası karşılaştırmalar yapılarak işçilik hatalarının olup olmadığının tespiti için yapılmaktadır.

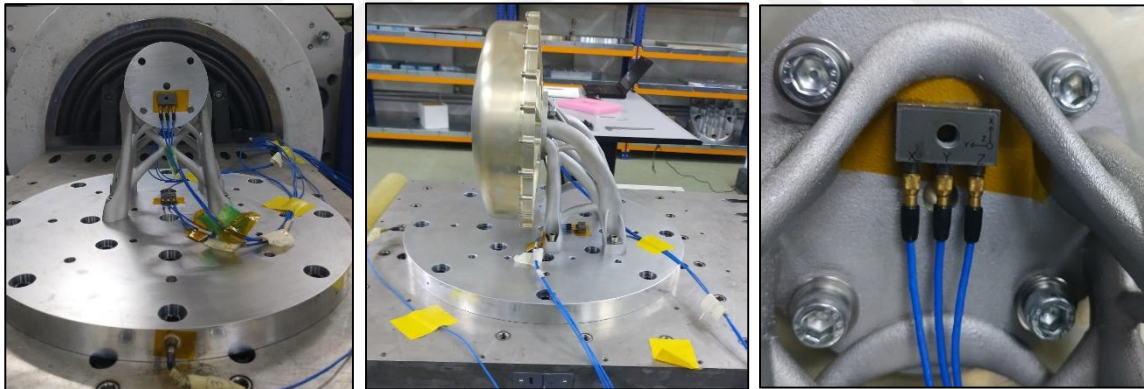
Rezonans Tarama aynı zamanda “Karakterizasyon Testi (İng. Signature Test), Düşük Seviyeli Sinüs Titreşim Testi (İng. Low Level Sinusoidal Vibration Test), Düşük Seviye Sinüs Tarama (İng. Low Level Sine Sweep), Düşük Seviye Tarama (İng. Low Level Sweep) veya Düşük Seviye Test (İng. Low Level Test) olarak da bilinmektedir. Çizelge 6.1’de ECSS-E-ST-10-03C standartlarına göre uydu ekipmanlarında uygulanması gereken rezonans tarama profili yer almaktadır.

Çizelge 6.1. Rezonans tarama profili

Eksen	Aralık Hz	Seviye G
X, Y, Z	5 - 2000	0.5



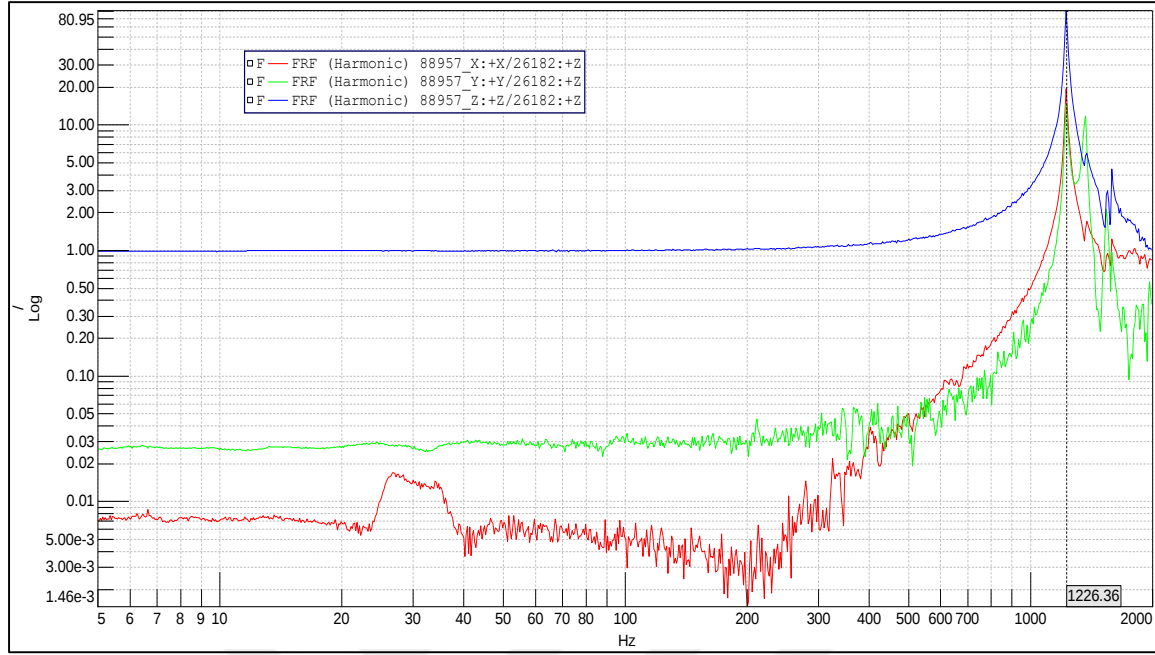
Resim 6.1. TÜBİTAK Uzay titreşim test altyapısı



Resim 6.2. Braket (solda) ve yük bağlanmış hali (ortada), ivmeölçer (sağda)

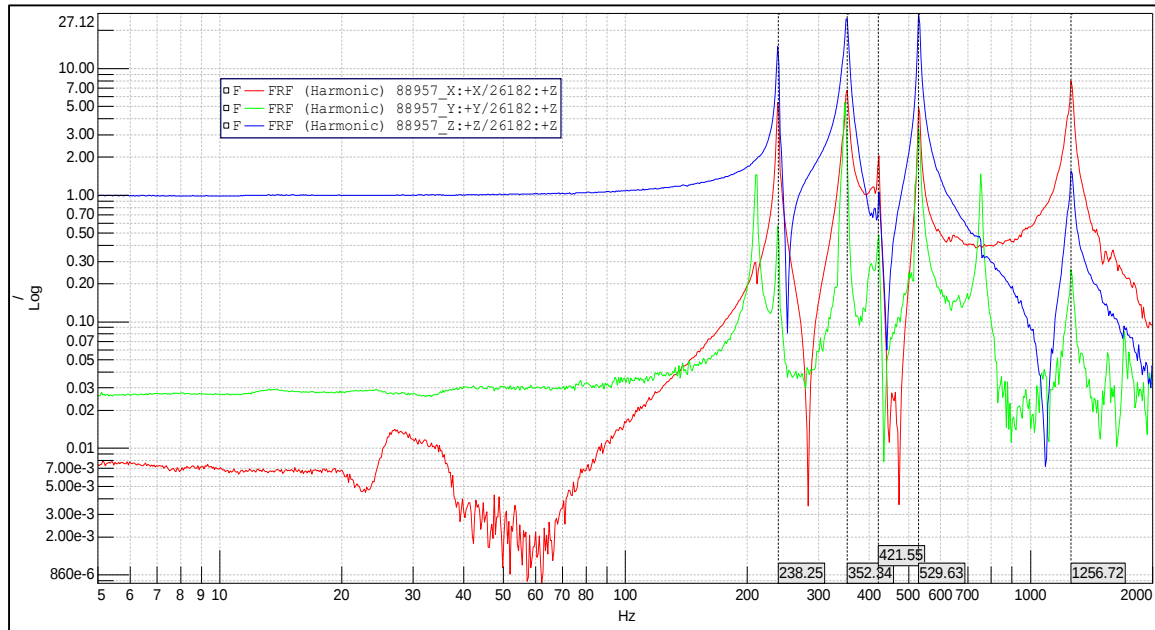
Braketin yüksüz halde, daha önce Resim 6.2 ile gösterilen konumundaki 3 eksenli ivmeölçer üzerinde yapılan rezonans tarama sonuç grafiği Şekil 6.2 ile verilmiştir. Mavi renkle gösterilen çizgi Z eksenini, yani tahrik doğrultusundaki frekans tepki fonksiyonunu (FRF) göstermektedir. Logaritmik ölçekteki eğriye bakıldığında okunan 1.0 değeri, verilen titreşime karşı ne kadar titreşim alındığının sayısal göstergesidir ve herhangi bir amplifikasyon olmadığını göstermektedir. 1226 Hz’de görülen tepe değeri, 80 kat amplifikasyon olduğunu göstermektedir. Yani braketin burada doğal frekansı vardır ve rezonans ile gelen yükü amplifiye etmiştir.

Şekil 6.2. FRF braket, yüksüz, Z eksen



Braketin optimizasyonunda ve analizlerinde yaklaşık 7 kg değerinde bir yük taşıyacağı varsayılmıştır. Dolayısıyla braket için yüklü testler yapılarak analiz ve test sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3 ile yüklü haldeki rezonans tarama sonuçları verilmektedir.

Şekil 6.3. FRF braket, yüklü, Z eksen



Şekil 6.3'ten görüldüğü üzere sırasıyla 238, 352 ve 421 Hz olarak ilk 3 doğal frekans modu tespit edilmiştir. Daha önce analiz ile elde edilen değerler ile karşılaştırması Çizelge 6.2 ile verilmiştir.

Çizelge 6.2. Doğal frekans modları analiz ve test karşılaştırması

Ölçü Adı	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Analiz	301,82	323,72	500,67
Test	238,25	352,34	421,55
% Fark	- 21	+ 8,5	- 15

Analiz ve test sonuçları karşılaştırıldığında, hedef alt sınırı olan 250 Hz doğal frekans değerinin altında 238,25 Hz ile ilk rezonans modunun test sonuçlarında çıktığı görülmüştür. Analiz ve test verileri arasında geleneksel imalat sonrasında tecrübelerle dayanılarak ortalama % 10 civarında pozitif veya negatif payların olması ve bu aralıkta farklılık çıkması normal karşılanmaktadır. Ancak, eklemeli imalat için bakıldığında elde edilen 3 farktan 2 tanesi % 10'dan daha büyüktür. Ağ yapısı farklılaştırılarak denemeler yapıldığında, analiz ortamındaki braketin ilk frekans modunun % 2-3'lük çok küçük değişimler gösterdiği, dolayısıyla ağ yapısının ve elemanının analizdeki etkisinin ortadan kaldırıldığı söylenebilir. Bu verilerden yola çıkılarak eklemeli imalat metotları ile imal edilecek parçaların modal analizleri için standart geleneksel imalat modal analiz parametrelerinin yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü de göz önünde bulundurularak daha güvenilir bir eklemeli imalat modal analiz parametre setine ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.

6.3. Yüksek Seviye Sinüs Titreşim Testi

ECSS-E-ST-10-03C standartlarında belirtilen yüksek seviye sinüs titreşim test profili Çizelge 6.3. ile verilmektedir. Bu teste maruz kalan ekipmanlar, test esnasında uzaktan ve sonrasında yakından göz ile muayene edilir. Test sırasında beklenmedik seslerin gelmesi ve/veya parçaların kopması, cıvata, vb. bağlantı elemanlarının gevşeme durumu olursa test durdurulur ve ekipman detaylıca gözden geçirilir. Yüksek seviye sinüs titreşim testi, ekipmanda ve bağlantı elemanlarında işçilik hatası olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılır. Teste maruz kalan ekipmanın varsa birden fazla bileşeni, bunlar arasındaki bağlantı elemanları ve ekipmanın sabitleneceği dış yapıya bağlantı için kullanılan bağlantı elemanlarında, kullanılan yardımcı ekipmanlara göre belirli miktar gevşeme olur. Dolayısıyla bu test öncesinde ve sonrasındaki rezonans tarama sonuçları birebir örtüşmez.

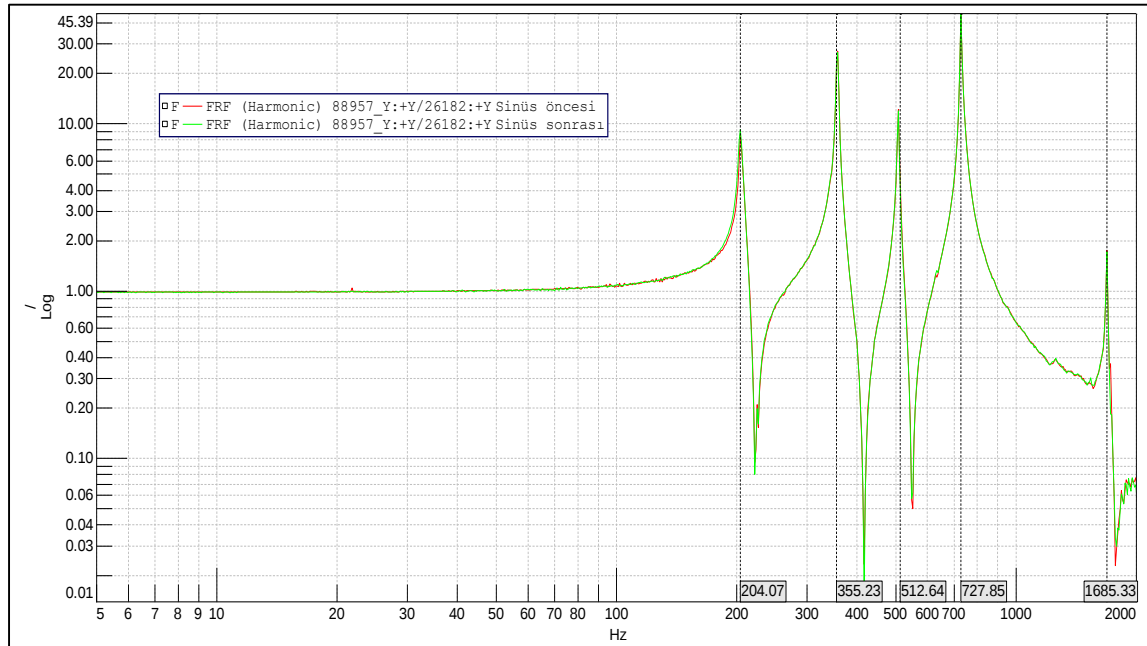
Ancak ECSS-E-ST-10-03C standartlarında bu durumlara göre sonuç karşılaştırması için belirlenen toleranslar vardır. Frekans kaymasının bu toleranslar dâhilinde olması durumunda ve başka gözle görülür uygunsuzluk olmaması durumunda ekipmanlar bu testten başarıyla geçmiş sayılır. Frekans kaymasının toleranslar dışında olması durumunda ise ekipmanın ve tasarımın daha detaylı incelenmesi gerekir. Brakete standartlara göre kalifikasyon seviyesi yüksek seviye sinüs titreşim testi uygulanmıştır, ve herhangi bir frekans kayması veya uygunsuzluk tespit edilmemiş olup, test başarılı şekilde tamamlanmıştır.

Çizelge 6.3. Yüksek seviye sinüs titreşim test profili

Frekans Hz	Seviye 0 - Tepe	Açıklama	Tarama Hızı Oct/dk
5 – 20	11 mm		
21 – 60	20 G	Çentikleme yok	2
61 – 100	6 G		

Z eksen testlerinin tamamlanmasının ardından braket kayar tablada bağlı olduğu fiktür üzerinde yan çevrilerek Y eksen testlerine geçilmiştir. Önce rezonans taraması yapılmış, ardından yüksek seviye sinüs testine geçilmiştir. Şekil 6.4'te yüksek seviye sinüs titreşim sonrası rezonans tarama sonuçları verilmiştir.

Şekil 6.4. FRF Braket, yüklü, Y, yüksek seviye sinüs titreşim sonrası



Daha önce anlatıldığı üzere yüksek seviye sinüs titreşim testleri, uyduların fırlatma esnasında roket motorunda oluşan şiddetli sarsıntıların düzenli ve sinüs profili oluşturan kısmının simülasyonunu yaparak fırlatma ve yörüngeye erişim sırasında uydunun sistem seviyesi yapısalının ve ekipman seviyesi yapısalının doğrulanması amacını gütmektedir. Daha önce Çizelge 6.3 ile verilen değerler ekipmanların kalifikasyon seviyesi değerler olup uydu tasarımında kalifikasyonu yapılan ekipmanların sonraki testlerinde düşmektedir, ayrıca sistem seviyesi yükler de farklı ve düşüktür.

Daha önce Şekil 6.4 ile verilen grafikte kırmızı renkli eğri braketin yüksek seviye sinüs titreşim testine maruz kalmadan önceki frekans tepki fonksiyonunu (İng. Frequency Response Function, FRF) ifade etmektedir. Yeşil renkli eğri ise braketin yüksek seviye sinüs titreşim yüklerine maruz kaldıktan sonraki rezonans taraması ile elde edilen FRF değerleri görülmektedir. İki sonuca ait eğri incelendiğinde sinüs öncesi ve sonrası tepkilerin neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir. Dolayısıyla braketin herhangi bir işçilik, montaj, vb. hata içermediği, cıvataların uygun şekilde takılarak torklandığı anlaşılmaktadır. Braket yüksek seviye sinüs yükleri altında herhangi bir gevşeme, kontrolsüz sallanma gibi istenmeyen bir davranış sergilememiştir.

Bu çalışma sonucu elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.4'te verilmiştir. Emniyet katsayıları statik, doğal frekans değerleri ise modal analiz sonuçlarına göre verilmiştir. Geleneksel modelin zaman ve maliyet hesabına gerekli ve parçaya özel ek aparat(lar)ın imalatı da dâhil edilmiştir. Her iki model için de son işlemler (tabla/aparattan modelin sökülmesi, kumlama, taşlama, çapak temizliği, vb.) zaman hesabına katılmamıştır. Son işlemler geleneksel imalat için yarım saat, eklemeli imalat için bir buçuk saat olarak yaklaşık tahmin edilmiştir.

Çizelge 6.4. Geleneksel ve Eklemeli İmalat Kapsamlı Karşılaştırması

No	Parametre	Geleneksel	Eklemeli	Fark
1	Kütle	2,32 kg	1,44 kg	% 38 hafif
2	Talaş	17,65 kg	0,2 kg	% 99 az talaş
3	Maliyet	5250 lira	5600 lira	% 6 pahalı
4	Zaman	44 saat	47,5 saat	% 8 yavaş
5	Emniyet katsayısı	1,5	3	2 kat daha emniyetli
6	1. Doğal Frekans	279 Hz	301 Hz	% 20 daha yüksek

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, geleneksel metotlar ile imal edilmek üzere tasarlanmış bir uydu braketinin topoloji optimizasyonu ve organik tasarım yaklaşımları sonucunda elde edilen modeline ait analiz, imalat ve test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Statik ve sinüs titreşim analizleri yapılan braket modelinin hızlı prototipleme yazıcısı ile plastik versiyonu basılarak montaj ve entegrasyon kontrolleri gerçekleştirilmiş, modelin nihai boyut ve arayüzleri kontrol edildikten sonra SLE metodu ile imalatı gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK Uzay altyapısında uzay standartlarında ekipmanlar için kalifikasyon seviyesi sinüs titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Rezonans tarama sonuçları ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında %21, %8,5 ve %15 şeklinde mod değerlerinde farklılıklar görülmüştür. Geleneksel metotlar ile imal edilen parçaların test ve analiz sonuçları arasında daha önceki tecrübeler kapsamında genellikle %10 civarında farklar olduğu bilinmekte iken, eklemeli imalatla bu değerlerden daha fazla fark oluştuğu görülmüştür. Yüksek seviye sinüs titreşim testlerinden sonra yapılan rezonans taramalar ile önceki rezonans taramalar üst üste bindirilerek kayma ve genlik farkı kontrol edildiğinde grafiklerin yaklaşık %1 fark ile örtüştüğü görülmüştür.

7.1. Sonuçlar

Statik ve yüksek seviye sinüs titreşim koşullarına göre optimizasyonu yapılan braket modeli ile geleneksel imalat modeline göre analiz sonuçlarına göre %7 daha katı, %38 daha hafif, Von-mises gerilmeleri bakımından %57,7 daha az gerilmeye maruz kalan bir geometri elde edilmiştir.

AlSi10Mg malzemesinin düşük yoğunluk ve nispeten yüksek mukavemet özelliğinin yanında iyi ısıl iletim ve titreşim sönümleme kabiliyetleri sayesinde SLE ile imalatla mevcut seçenekler arasında en uygun malzemelerden biri olduğu görülmüştür.

SLE ile imal edilerek ısıl işleme tabi tutulan çekme test numunelerinin her iki büyüme yönünde de birbirine benzer mukavemet değerleri sergilediği, ancak kopmanın gerçekleştiği yüzey formları karşılaştırıldığında yatay numunelerin daha açılı, dikey numunelerin daha dik şekilde koptuğu görülmüştür.

Biyomimetik fil ayağı ve ağaç dallanması yapılarının topoloji optimizasyonu sonrası detaylı optimizasyon süreçlerinde uygulanması ile, kütle sabit tutulurken doğal frekans ve Von-mises gerilmelerinin %57,7 oranında azaltılabildiği görülmüştür.

Akma mukavemet değeri 275 MPa olarak referans alınan geleneksel model için hesaplanan emniyet katsayısı 1,5 iken; akma mukavemet değeri analizlerde en kötü senaryoya göre 230 MPa olarak referans alınan eklemeli imalat modeli için emniyet katsayısı 3 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, daha çok sünek malzemeler için kullanılan Von-mises gerilme sonuçlarına göre elde edilmiştir.

7.2. İleride Yapılacak Çalışmalar

Uzay seviyesi rastgele titreşim analizleri yapılarak sonuçlarına göre daha ileri bir optimizasyon yapılabilir, çalışma sonuçları bu çalışmadaki aynı parametrelerle imal edilerek rastgele titreşim testleri uygulanabilir.

Yorulma gerilmelerine maruz kalacak SLE imalatı parçaların ısıtılma işlemi uygulanarak sünekliğinin artması konusunda detaylı çalışma ve karşılaştırmalar yapılabilir.

Isıl işlem sonrası benzer mukavemet değerlerinde kopmalarına rağmen dikey ve yatay numunelerinin kopma yüzeyi açıları ve süneklikleri hakkında detaylı araştırmalar yapılabilir.

Temas arayüzüne yanal gerilmelerin çok geldiği tasarımlarda optimizasyon aşamasında ağaç dalı benzeri kullanılarak yüklerin dağıtılması ve düşürülmesi yeni tasarımlar için kolaylık sunabilir.

Temas arayüzüne dik gelen gerilmeler için fil ayağı benzeri geniş basma yüzeyleri yapılarak yükün geniş bir alanına yayılması ve malzemenin elastik sınırlarının altında tutulabilmesi sağlanabilir.

AlSi10Mg malzemesinin farklı sıcaklıklar için mekanik özellikleri araştırılabilir, geçiş sıcaklığı konusunda çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Hubble uzay teleskobu hakkında genel bilgi içeren sayfa, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope. Son erişim tarihi: 20/08/2019
2. İnternet: Uzaya yük fırlatma maliyetleri hakkında bilgi, URL: <http://cannae.com/space-freighter/>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
3. İnternet: ANSYS analiz programının topoloji optimizasyonu kabiliyeti hakkında bilgi, URL: <https://www.ansys.com/products/structures/topology-optimization>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
4. İnternet: Eklemeli imalat ile elde edilen uydu braketleri görseli, URL: <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2017/10/A-satellite-bracket-3D-printed-on-the-EOS-M-400.-Photo-by-Michael-Petch.-1024x768.jpg>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
5. İnternet: Eklemeli imalat ile elde edilen uydu braketleri görseli, URL: https://additivemanufacturingtoday.com/components/com_rsmediagallery/assets/gallery/960x720/8eae209062f1718eb490e7ec68db6ff7.jpg. Son erişim tarihi: 20/08/2019
6. İnternet: Eklemeli imalat ile elde edilen uydu braketleri görseli, Thales, URL: <http://additivemanufacturing.com/2016/08/29/3d-systems-direct-metal-printing-at-the-tipping-point/>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
7. İnternet: Thales Alenia eklemeli imalat uydu braketleri görseli, URL: <https://additivemanufacturingtoday.com/thales-alenia-space-has-now-sent-79-3d-printed-metal-parts-into-orbit>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
8. Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R. K., and Harik, R. (2014). Evaluating the Design for Additive Manufacturing: A Process Planning Perspective. *Procedia CIRP*, 21, 144-150.
9. Chu, C., Graf, G., and Rosen, D. W. (2008). Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5), 686-696.
10. Rosen, D. W. (2014). Research supporting principles for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(4), 225-232.
11. Erin K. (2014). *Design for Additive Manufacturing Research Report*, (Report No. 16). Helsinki, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland.
12. Mary, K. T., Giovanni, M., Tom, V., Georges, F., R. Ian, C., Ian, G., Bernard, A., Joachim, S., Patricia, G., Bhargu, A., Filomeno, M. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP, Annals - Manufacturing Technology*, 65, 737-760.
13. Adam, G. A., and Zimmer, D. (2014). Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(1), 20-28.
14. Wits, W. W., Weitkamp, S. J., and Es, J. V. (2013). Metal Additive Manufacturing of a High-pressure Micro-pump. *Procedia CIRP*, 7, 252-257.

15. Lindemann, C., Reiher, T., Jahnke, U., and Koch, R. (2015). Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 216–227.
16. Shravya, S. P. (2015). *Accelerated Testing of Components Made By Additive Manufacturing*. MSc Thesis, Mechanical Engineering Department, Northern Illinois University.
17. Kevin, R. G. (2016). *Development of an Additively Manufactured Microthruster for Nanosatellite Applications*. MSc Thesis, Mechanical Engineering Department, The University of Vermont.
18. Cuoghi, F. (2015). From Racetrack to Orbit, An Additive Revolution, (2016). *Reinforced Plastics*, 60(4), 231-236.
19. Szymkiewicz, M., Konkel, Y., Hartwanger, C., and Schneider, M. (2016). *Ku-band sidearm orthomode transducer manufactured by additive layer manufacturing*. 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
20. Gill, S., Arora, H., Jidesh, and Sheth, V. (2017). On the development of Antenna feed array for space applications by additive manufacturing technique. *Journal of Additive Manufacturing*, 17, 39-46.
21. Orme, M. E., Gschweidl, M., Ferrari, M., Vernon, R., Madera, I. J., Yancey, R., and Mouriaux, F. (2017). Additive Manufacturing of Lightweight, Optimized, Metallic Components Suitable for Space Flight. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 54(5), 1050-1059.
22. Schiller, G. J. (2015). *Additive manufacturing for Aerospace*. 2015 IEEE Aerospace Conference, Centennial, CO.
23. Allevi, G., Cibeca, M., Fioretti, R., Marsili, R., Montanini, R., and Rossi, G. (2018). Qualification of additively manufactured aerospace brackets: A comparison between thermoelastic stress analysis and theoretical results. *Measurement*, 126, 252-258.
24. Kumar, L. J., and Nair, C. G. K. (2016). Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, 39-54.
25. İnternet: NX programının eklemeli imalat alanındaki kabiliyetleri, URL: <https://www.bct-technology.com/en/support/tips-tricks/additive-manufacturing-nx.html>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
26. Harry W. J., (2018). *The Recent Large Reduction In Space Launch Cost*, 48th International Conference On Environmental Systems. New Mexico, USA.
27. Thomas R., Rainer K. (2016). *AM for satellites: Reaction Wheel Bracket*, DMRC Annual Report, (Report No. 67). Paderborn, Germany: Direct Manufacturing Research Center.
28. İnternet: Dünya atmosferinin katmanları hakkında bilgilendirme görseli, URL: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/08/Layers_of_Earth_s_atmosphere. Son erişim tarihi: 20/08/2019

29. İnternet: Dünya atmosferinin katmanları hakkında bilgilendirme görseli, URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/mos-upper-atmosphere.html. Son erişim tarihi: 20/08/2019
30. İnternet: Big-bang, kozmik mikrodalga ve uzay radyasyonu hakkında bilgi, URL: <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
31. Darrin, A., O'Leary B. L. (2009). *Where does space begin? – Aerospace News, Salary, Jobs, and Museums*. London, UK: CRC Press.
32. İnternet: Mikro yerçekiminin astronotlar üzerindeki etkisi hakkında bilgi, URL: <https://www.scientificamerican.com/article/how-does-spending-prolong/>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
33. İnternet: Çeşitli malzemelere ait vakum ortamında gaz salınımı hakkında veri tabanı, NASA, URL: <https://outgassing.nasa.gov/>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
34. İnternet: Malzemelerin vakum uyumluluğu hakkında bilgi, URL: <https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvTWF0ZXJpYWxzX2Zvcl91c2VfaW5fdmFjdXVt>. Son erişim tarihi: 20/08/2019
35. İnternet: Space Shuttle aracına ait kalkış ivme ve hız değerleri, URL: https://www.nasa.gov/pdf/466711main_AP_ST_ShuttleAscent.pdf. Son erişim tarihi: 20/08/2019
36. Wong, K. V., and Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1-10.
37. Benjamin, A. F., David, K. L., Trevor, J. W. (2014). *Comparison of AlSi10Mg And Al 6061 Processed Through DMLS*. Austin, TX.
38. William, E. F. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
39. İnternet: Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu arasındaki farklar, URL: https://www.researchgate.net/post/Differences_among_Shape_Size_and_Topology_optimization. Son erişim tarihi: 10/08/2019
40. Göv, İ., Kütük, M. A. (2007). *Topoloji Optimizasyonunda Eleman Silme Metodunun Uygulanması*, XV Ulusal Mekanik Kongresi, Isparta, Türkiye.
41. Rozvany, G. (2000). *The SIMP method in topology optimization - Theoretical background, advantages and new applications*, 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, California, USA.





EK-1. AlSi10Mg teknik özellikler tablosu



Material data sheet

EOS Aluminium AlSi10Mg

EOS Aluminium AlSi10Mg is an aluminium alloy in fine powder form which has been specially optimised for processing on EOSINT M systems

This document provides information and data for parts built using EOS Aluminium AlSi10Mg powder (EOS art.-no. 9011-0024) on the following system specifications:

- EOSINT M 280
with PSW 3.6 and Original EOS Parameterset AlSi10Mg_Speed 1.0
- EOS M 290 400Watt
with EOSPRINT 1.0 and Original EOS Parameterset AlSi10Mg_Speed 1.0

Description

AlSi10Mg is a typical casting alloy with good casting properties and is typically used for cast parts with thin walls and complex geometry. It offers good strength, hardness and dynamic properties and is therefore also used for parts subject to high loads. Parts in EOS Aluminium AlSi10Mg are ideal for applications which require a combination of good thermal properties and low weight. They can be machined, spark-eroded, welded, micro shot-peened, polished and coated if required.

Conventionally cast components in this type of aluminium alloy are often heat treated to improve the mechanical properties, for example using the T6 cycle of solution annealing, quenching and age hardening. The laser-sintering process is characterized by extremely rapid melting and re-solidification. This produces a metallurgy and corresponding mechanical properties in the as-built condition which is similar to T6 heat-treated cast parts. Therefore such hardening heat treatments are not recommended for laser-sintered parts, but rather a stress relieving cycle of 2 hours at 300 °C (572 °F). Due to the layerwise building method, the parts have a certain anisotropy, which can be reduced or removed by appropriate heat treatment – see Technical Data for examples.

EK-1. (devam) AlSi10Mg teknik özellikler tablosu



Material data sheet

Technical data

General process and geometrical data

Typical achievable part accuracy [1] [2]	$\pm 100 \mu\text{m}$
Smallest wall thickness [1] [3]	approx. 0.3 – 0.4 mm approx. 0.012 – 0.016 inch
Surface roughness, as built, cleaned [1] [4]	R _a 6 – 10 μm , R _z 30 – 40 μm R _a 0.24 – 0.39 x 10 ⁻³ inch R _z 1.18 – 1.57 x 10 ⁻³ inch
- after micro shot-peening	R _a 7 – 10 μm , R _z 50 – 60 μm R _a 0.28 – 0.39 x 10 ⁻³ inch R _z 1.97 – 2.36 x 10 ⁻³ inch
Volume rate [5]	7.4 mm ³ /s (26.6 cm ³ /h) 1.6 in ³ /h

[1] These properties were determined on an EOSINT M 270.

[2] Based on users' experience of dimensional accuracy for typical geometries. Part accuracy is subject to appropriate data preparation and post-processing, in accordance with EOS training.

[3] Mechanical stability dependent on the geometry (wall height etc.) and application

[4] Due to the layerwise building, the surface structure depends strongly on the orientation of the surface, for example sloping and curved surfaces exhibit a stair-step effect. The values also depend on the measurement method used. The values quoted here given an indication of what can be expected for horizontal (up-facing) or vertical surfaces.

[5] The volume rate is a measure of the building speed during laser exposure. The overall building speed is dependent on the average volume rate, the time required for coating (depends on the number of layers) and other factors, e.g. DMLS settings.

EK-1. (devam) AlSi10Mg teknik özellikler tablosu



Material data sheet

Physical and chemical properties of the parts

Material composition	Al (balance)
	Si (9.0 - 11.0 wt-%)
	Fe (≤ 0.55 wt-%)
	Cu (≤ 0.05 wt-%)
	Mn (≤ 0.45 wt-%)
	Mg (0.2 - 0.45 wt-%)
	Ni (≤ 0.05 wt-%)
	Zn (≤ 0.10 wt-%)
	Pb (≤ 0.05 wt-%)
	Sn (≤ 0.05 wt-%)
	Ti (≤ 0.15 wt-%)
Relative density	approx. 99.85 %
Density	2.67 g/cm ³
	0.096 lb/in ³

EK-1. (devam) AlSi10Mg teknik özellikler tablosu



Material data sheet

Mechanical properties of the parts

	As built	Heat treated [9]
Tensile strength [6]		
- in horizontal direction (XY)	460 ± 20 MPa 66.7 ± 2.9 ksi	345 ± 10 MPa 50.0 ± 1.5 ksi
- in vertical direction (Z)	460 ± 20 MPa 66.7 ± 2.9 ksi	350 ± 10 MPa 50.8 ± 1.5 ksi
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]		
- in horizontal direction (XY)	270 ± 10 MPa 39.2 ± 1.5 ksi	230 ± 15 MPa 33.4 ± 2.2 ksi
- in vertical direction (Z)	240 ± 10 MPa 34.8 ± 1.5 ksi	230 ± 15 MPa 33.4 ± 2.2 ksi
Modulus of elasticity		
- in horizontal direction (XY)	75 ± 10 GPa 10.9 ± 0.7 Msi	70 ± 10 GPa 10.2 ± 0.7 Msi
- in vertical direction (Z)	70 ± 10 GPa 10.2 ± 0.7 Msi	60 ± 10 GPa 8.7 ± 0.7 Msi
Elongation at break [6]		
- in horizontal direction (XY)	(9 ± 2) %	12 ± 2%
- in vertical direction (Z)	(6 ± 2) %	11 ± 2%
Hardness [7]	approx. 119 ± 5 HBW	
Fatigue strength [1] [8]		
- in vertical direction (Z)	approx. 97 ± 7 MPa approx. 14.1 ± 1.0 ksi	

[6] Mechanical strength tested as per ISO 6892-1:2009 (B) annex D, proportional specimens, specimen diameter 5 mm, original gauge length 25 mm (1 inch).

[7] Hardness test in accordance with Brinell (HBW 2.5/62.5) as per DIN EN ISO 6506-1. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

[8] Fatigue test with test frequency of 50 Hz, R = -1, measurement stopped on reaching 5 million cycles without fracture.

[9] Stress relieve: anneal for 2 h at 300 °C (572 °F).

[10] These properties were determined on an EOSINT M 280-400W. Test parts from following machine type EOS M 290-400W correspond with these data.

EK-1. (devam) AlSi10Mg teknik özellikler tablosu



Material data sheet

Thermal properties of parts

	As built [1]	Heat treated [1] [9]
Thermal conductivity (at 20 °C)		
- in horizontal direction (XY)	approx. $103 \pm 5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	approx. $173 \pm 10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- in vertical direction (Z)	approx. $119 \pm 5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	approx. $173 \pm 10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Specific heat capacity		
- in horizontal direction (XY)	approx. $920 \pm 50 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	approx. $890 \pm 50 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- in vertical direction (Z)	approx. $910 \pm 50 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	approx. $890 \pm 50 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Abbreviations

approx. approximately
wt weight

Notes

The data are valid for the combinations of powder material, machine and parameter sets referred to on page 1, when used in accordance with the relevant Operating Instructions (including Installation Requirements and Maintenance) and Parameter Sheet. Part properties are measured using defined test procedures. Further details of the test procedures used by EOS are available on request.

The data correspond to our knowledge and experience at the time of publication. They do not on their own provide a sufficient basis for designing parts. Neither do they provide any agreement or guarantee about the specific properties of a part or the suitability of a part for a specific application. The producer or the purchaser of a part is responsible for checking the properties and the suitability of a part for a particular application. This also applies regarding any rights of protection as well as laws and regulations. The data are subject to change without notice as part of EOS' continuous development and improvement processes.

EOS®, EOSINT® and DMLS® are registered trademarks of EOS GmbH.

© 2014 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.

EK-2. Çekme testleri sonuç raporu

ALUTEAM Test Sonuç Raporu ALU/2019.02.002



ALUTEAM

Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

Test Sonuç Raporu

Raporu Talep Eden: UZAY TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ TÜBİTAK
Rapor Tarihi: 22/02/2019
Rapor No: ALU-TSR/2019.02.002



EK-2. (devam) Çekme testleri sonuç raporu



ÖN BİLGİLER

UZAY TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ TÜBİTAK tarafından Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi (FSMVU ALUTEAM) Malzeme Analiz Laboratuvarına gönderilen altı (6) adet numuncye Çekme Testi uygulanmıştır. Test sonuçları bu raporda verilmiştir.

Z. Ali

FATİH SULTAN MEHMET
VAKIF ÜNİVERSİTESİ
ALÜMİNYUM TEST EĞİTİM VE ARAŞTIRMA MERKEZİ
Sütlüce Mah. Kerasağ Cad.No:12
Beyoğlu / İSTANBUL

FSMVÜ Haliç Yerleşkesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

■ Sütlüce Mah. Kerasağ Cad. No:12/A Beyoğlu-İstanbul

☎ 0212 521 81 00-Dişi:4173

✉ aluteam@fsm.edu.tr

● aluteam.fsm.edu.tr

EK-2. (devam) Çekme testleri sonuç raporu

**YETKİLENDİRME**

TEST SORUMLUSU: Gürkan TARAKÇI
Metalurji ve Malzeme Müh.

Test Tarihi: 21/02/2019

RAPORU Zafer Çağatay ÖTER
HAZIRLAYAN: Yük. Malzeme Bilimi Müh.

Rapor Tarihi: 22/02/2019
Rapor Numarası: ALU-TSR/2019.02.002

RAPORU Dr. Ebubekir KOÇ
ONAYLAYAN: ALUTEAM MÜDÜRÜ

FATİH SULTAN MEHMET
VAKIF ÜNİVERSİTESİ
ALÜMİNYUM TEST ZEMİN VE ARAŞTIRMA MERKEZİ
Saitöce Mah. Karşıbağ Cad.No:12
Beyoğlu / İSTANBUL

Z.Ö.

EK-2. (devam) Çekme testleri sonuç raporu



DİZİN

ÖN BİLGİLER	1
YETKİLENDİRME	2
DİZİN	3
TEST DETAYLARI	4
TEST PROSEDÜRÜ	5
TEST SONUÇLARI	6

Z. İ. İ.

FATİH SULTAN MEHMET
VAKIF ÜNİVERSİTESİ
ALÜMİNYUM TEST EĞİTİM VE ARAŞTIRMA MERKEZİ
Sütlüce / Fatih / Beşiktaş / İstanbul
Beyoğlu / İSTANBUL

FSMVÜ Halis Yerleşkesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

📍 Sütlüce Mh. Keneşçi Cad. No:12/A Beyoğlu-İstanbul 📞 0212 521 81 00-Danış:4173 📧 aluteam@fsmvu.edu.tr 🌐 aluteam.fsmvu.edu.tr

EK-2. (devam) Çekme testleri sonuç raporu

**TEST DETAYLARI****TESTİ TALEP EDEN**

UZAY TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ TÜBİTAK

TALEP DETAYLARI

Talep Numarası: 2019.02-002

Talep Tarihi: 20/02/2019

NUMUNE BİLGİLERİ

Ürün: Çekme Test Numunesi

Malzeme: Alüminyum Alaşımı

Numune Adedi: 6

Ek Bilgiler: DMLS ile üretilmiş Isıl İşlemli

YAPILAN TESTLER

➤ Çekme Testi

FATİH SULTAN MEHMET
VAKIF ÜNİVERSİTESİ
ALÜMİNYUM TEST EĞİTİM VE ARAŞTIRMA MERKEZİ
Sütlüce Mah. Karaağaç Cad.No:12
Beyoğlu / İSTANBUL

FSMVÜ Halliç Yerleşkesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

Sütlüce Mah. Karaağaç Cad. No:12/A Beyoğlu-İstanbul

☎ 0212 521 81 00-Diğer 4173

✉ aluteam@fsm.edu.tr

● aluteam.istanbul.tr

EK-2. (devam) Çekme testleri sonuç raporu



TEST PROSEDÜRÜ

UZAY TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ TÜBİTAK tarafından Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi (FSMVU ALUTEAM) Malzeme Analiz Laboratuvarına gönderilen altı (6) adet çekme test numunesine koşulları TS EN ISO 6892 standardına uygun Çekme Testi uygulanmıştır.

FATİH SULTAN MEHMET
VAKIF ÜNİVERSİTESİ
ALÜMİNYUM TEST EĞİTİM VE ARAŞTIRMA MERKEZİ
Sütlüce Mah. Karabağaç Cad.No:12
Beyoğlu / İSTANBUL

Z. du

FSMVÜ Haliç Yodokesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

İzmir Mah. Karabağaç Cad. No:12/A Beyoğlu-İstanbul ☎ 0212 521 81 00-Dahili:4173 ✉ aluteam@fsmvu.edu.tr ● aluteam.fsmvu.edu.tr

EK-2. (devam) Çekme testleri sonuç raporu



TEST SONUÇLARI

Numunelere ait test sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Dikey_3 numunesi ölçüm bölgesi dışından kırıldığından %Uzama değeri hesaplanamamıştır.

Tablo 1. Çekme Testi Sonuçları

Numune Adı	Kesit Alanı A (mm ²)	İlk Boy L ₀ (mm)	Son Boy L ₁ (mm)	Rp 0,2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Uzama (%)
Yatay_1	78,525	50	54,97	228,00	353,50	9,94
Yatay_2	78,525	50	53,94	232,00	374,60	7,88
Yatay_3	78,525	50	54,43	224,00	351,60	8,86
Dikey_1	78,525	50	-	224,00	338,80	-
Dikey_2	78,525	50	54,30	216,00	360,80	8,60
Dikey_3	78,525	50	53,48	228,00	383,70	6,96

Z. Çel

FATİH SULTAN MEHMET
VAKIF ÜNİVERSİTESİ
ALÜMİNYUM TEST EĞİTİM VE ARAŞTIRMA MERKEZİ
Eğitöce Mah. Karasagun Cad.No:12
Beyoğlu / İSTANBUL

FSMÜO Haşık Yerkökü, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

8 Söğütöce Mah. Karasagun Cad. No:12/A Beyoğlu-İstanbul ☎ 0212 521 51 00-Dahili:4173 ✉ aluteam@fsmu.edu.tr ● aluteam.fsnu.edu.tr

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BADİR, Mehmet Emin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1990, Yerköy
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 210 13 10
 Faks : 0 (312) 210 13 15
 e-mail : mehmet.badir@tubitak.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2014
Lise	Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	TÜBİTAK Uzay	Uzman Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Badır, M. E., Söğütkıran, E., Dağkolu, A., Yılmaz, O. (2019). Geometrical Modelling and Topology Optimization of Satellite Bracket for Additive Manufacturing, *4th International Congress On 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*, ss 1463.

Hobiler

Yüzme, Bisiklet



GAZİ GELECEKTİR..