
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

UYDU PANELİ VE İNSERTLERİNİN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİNE YÖNELİK PARAMETRELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE TASARIM OPTİMİZASYONU

Buket ÇAM

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2025

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

Buket ÇAM
29/01/2025

UYDU PANELİ VE İNSERTLERİNİN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİNE YÖNELİK PARAMETRELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE TASARIM OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Buket ÇAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Bu çalışma, eklemeli imalat yönteminin uydu mekanik mimarisine sağladığı tasarım özgürlüğü, kütle azaltma, dayanım artırma ve üretim süreçlerini basitleştirme katkılarını incelemiştir. Geleneksel alüminyum sandviç panellerle eklemeli imalat yöntemine uygun optimize edilen uydu modelleri karşılaştırılmış ve %25 oranında kütle azalımı sağlanarak sistem verimliliği artırılmıştır. Optimizasyon modeli, CAD tabanlı boyut optimizasyonuna dayanmış, gerilim enerji dağılımı üzerinden izotropik bir yapı korunmuş ve rastgele titreşim koşullarında daha güvenli bir tasarım elde edilmiştir. Değer analizi çerçevesinde, tasarım parçaları gözden geçirilmiş ve entegrasyon sürelerinin iyileştirileceği tasarım alternatifleri sunulmuştur. Eklemeli imalatla bağlantı noktalarının tek parça üretilmesi üretim hatalarını önlemiş, yapısal güvenilirliği artırmıştır. Ayrıca, karmaşık geometrilerin üretimi mümkün hale gelmiş, dolgu malzemesi kullanımının olmaması üretim sonrası işlemleri sadeleştirerek kalite kontrol süreçlerini hızlandırmıştır. Bu tasarım yaklaşımı, uydu üzerindeki panelleri bir bütün olarak değerlendirerek, yük iletimini minimize etmiş, titreşim dayanıklılığını artırmış ve maliyet etkinliğini iyileştirmiştir. Literatürde sadece panellerin incelendiği diğer çalışmalara kıyasla daha kapsamlı bir çözüm sunulmuştur. Eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğü, üretim süreçlerini ve sistemin genel güvenilirliğini iyileştirerek uzay endüstrisinde verimliliği artırmakta ve özellikle 100 kg altındaki mikro uydu sistemlerinin tasarımında yeni bakış açılarının gelişmesine olanak sağlamaktadır.

Bilim Kodu	:	91428
Anahtar Kelimeler	:	Mikro uydu; uydu birincil yapısı, kütle azatlımı; eklemeli imalata yönelik tasarım, yapısal güvenilirlik; modal gerilim dayanımı
Sayfa Adedi	:	121
Danışman	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

DEVELOPMENT OF PARAMETERS FOR THE MANUFACTURING OF SATELLITE PANELS AND INSERTS THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING AND DESIGN OPTIMIZATION

(Ph. D. Thesis)

Buket ÇAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

This study examined the contributions of additive manufacturing methods to satellite mechanical architecture in terms of design freedom, mass reduction, strength enhancement, and the simplification of manufacturing processes. Optimized satellite models, suitable for additive manufacturing, were compared with conventional aluminum sandwich panels, resulting in a 25% reduction in mass and increased system efficiency. The optimization model relied on CAD-based dimensional optimization, maintaining an isotropic structure through stress energy distribution, and achieving a safer design under random vibration conditions. In the context of value analysis, design components were reviewed, and alternative designs were proposed to improve integration times. The additive manufacturing of connection points as a single part prevented manufacturing errors and increased structural reliability. Additionally, the production of complex geometries became feasible, and the absence of filler material simplified post-production processes, accelerating quality control procedures. This design approach, by considering the panels on the satellite as a whole, minimized load transfer, enhanced vibration resistance, and improved cost-effectiveness. A more comprehensive solution has been presented compared to other studies in the literature that only examined panels. The design freedom offered by additive manufacturing enhances production processes and overall system reliability, increasing efficiency in the space industry and enabling the development of new perspectives in the design of micro-satellite systems under 100 kg.

Science Code : 91428

Key Words : Microsatellite; satellite primary structure; mass reduction; design for additive manufacturing; structural reliability; modal stress resistance

Page Number : 121

Supervisor : Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasının planlanmasında ve gerçekleştirilmesinde, değerli zamanını ayırıp ilgi, öneri, hoşgörü, fikir ve bilimsel katkılarını esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca sabır, ilgi, sevgi ve anlayışlarıyla yanımda olan annem Zeynep ÇAM'a, babam Ramazan ÇAM'a ve kardeşim Burak ÇAM'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların koşulsuz desteği ve fedakarlıkları, bu süreci başarıyla tamamlamamda en önemli motivasyon kaynağı olmuştur.

Sağladığı imkanlar ve desteklerden dolayı başta yöneticilerim Atayıl KOYUNCU ve Hasan AKÇE olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım

Son olarak, doktora sürecimin her aşamasında yanımda oldukları pozitif bakış açılarıyla bana destek verdikleri için arkadaşlarım Sibel VELİOĞLU, Melike İrem KODAL, Özge MADEN ve Ceren DEMİRBAŞ'a ayrı ayrı teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ……..… iv

ABSTRACT..... v

TEŞEKKÜR..... vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELER LİSTESİ..... x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... xi

SİMGELER VE KISALTMALAR..... xiv

1. GİRİŞ..... 1

2. UYDU TEKNOLOJİSİNE GENEL BİR BAKIŞ..... 7

2.1. Mikro Uydu Yaklaşımları 10

3. LİTERATUR TARAMASI 13

3.1. Mikro Uydu Projeleri Ve Başarı Örnekleri 13

3.1.1. Chamran-1 uydusu..... 13

3.1.2. Indian mini satellite -1 (ıms-1) ve youthsat uyduları 14

3.1.3. Alsat-2a ve alsat-2b uyduları..... 15

3.1.4. Vnredsat-1 uydusu..... 16

3.1.5. Fasat-charlie uydusu 16

3.1.6. Blacksky pathfinder-1 uydusu 16

3.1.7. Iceye-x2 uydusu..... 17

3.1.8. Zond-pp (mka-pn 1) uydusu 17

3.1.9. Kompas-1 uydusu..... 18

3.1.10. Mikro uydu projeleri..... 18

Sayfa

3.2. Uyduların Mekanik Mimarisi Ve Ekipman Yerleşimleri 19
3.3. Uydularda Fırlatıcı Yüklerine Dayanım ve Tasarım Doğrulama 26
3.4. Uydu Yapılarında Kütle Azaltımı ve Optimizasyon 33
3.5. Uydu Yapılarında Eklemeli İmalat Çalışmaları 34
3.6. Panellerde Katılık Gereksinimi Optimizasyonları 39
3.7. Gerinim Enerji Bazlı Optimizasyon 45
3.8. Literatür Çalışmaları Tez Çalışmasına Etkisi 46
4. KÜTLE AZALTIMI İÇİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI 49
4.1. Sandviç Panelli Örnek Uydu Platformunun Tasarımı 49
4.2. Uydu Fırlatıcısının Seçimi 49
4.3. Alt Sistemler Ve Uyduya Yerleştirilmesi 51
4.4. Uydu Yapısal Alt Sistemi Ve Ölçüleri 53
4.5. Örnek Uydu Tasarımın Doğrulanması 55
4.5.1. Katılık gereksinimi 55
4.5.2. Gerilme ve dayanım analizi (GDA) 58
4.6. Optimizasyon Çalışması Adımları 63
4.6.1. Katılık gereksinimlerinin belirlenmesi 65
4.6.2. Panel optimizasyon çalışmaları 67
4.6.3. Cad tabanlı optimizasyon yöntemi 68
4.6.4. Panel geometrisinin oluşturulması 70
4.6.5. Baz tasarım tasarımının tamamlanması ve onaylanması 72
4.7. Optimize Edilmiş Tasarımının Tamamlanması ve Onaylanması 73
4.7.1. Optimize edilmiş uydu için gerilme ve dayanım analizi 75
4.8. Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması 76

Sayfa

4.9. Rastgele Titreşim Yükleri İncelenmesi 78
4.9.1. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması 80
5. EKLEMELİ İMALATIN ÜRETİM YÖNÜNDEN AVANTAJLARI. 83
5.1. Hızlı Tasarım Optimizasyonu 83
5.2. Sandviç Panel Üretimindeki Sıkıntılar 85
5.3. Bağlayı Yapılarındaki Sıkıntılar 90
5.4. Temizlik ve Kontaminatasyon 89
6. EKLEMELİ İMALAT İLE MONTAJ İÇİN TASARIM 91
6.1. Örnek Tasarım İçin Değer Analizi ve Tasarım 1 91
6.2. Tasarım Detayları 93
6.3. Tasarım 1 için Değer Analizi ve Tasarım 2 96
6.4. Tasarım Detayları 97
7. SONUÇ 101
KAYNAKLAR 103
EKLER 109
EK-1. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması kamera ekipmanı 110
EK-2. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması manyetik tork çubuğu 112
EK-3. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması pil ekipmanı 114
EK-4. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması S-band ekipmanı 116
EK-5. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması güç birimi ekipmanı 118
ÖZGEÇMİŞ 120

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Uyduların Sınıflandırılması 7

Çizelge 4.1. Alt sistem kütle dağılımları 52

Çizelge 4.2. Ekipmanların paneller üzerine kütlesel dağılımı 54

Çizelge 4.3. Panel fiziksel ölçüleri 55

Çizelge 4.4. Panel ve bağlantı bölgesi ağırlıkları 58

Çizelge 4.5. Yarı statik yükler 59

Çizelge 4.6. Çekirdek malzemesinin mekanik özellikleri 60

Çizelge 4.7. İzotropik davranış gösteren malzemelerin mekanik özellikleri 61

Çizelge 4.8. Sandviç panel kütleleri 61

Çizelge 4.9. Balpeteği şeklindeki çekirdek malzeme için GP değeri 62

Çizelge 4.10. Dayanım analizi sonrası kütle değişimi 63

Çizelge 4.11. Federlerin Kesit Geometrisi 70

Çizelge 4.12. Panellerin son tasarımlarına ait panel kütle dağılımı 76

Çizelge 4.13. Kütle azaltımı optimizasyon analizi 78

Çizelge 4.14. Rastgele titreşim yük zarfı 79

Çizelge 4.15. Kütle (K) bazlı ekipman dayanım limitleri K<50 kg 80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Küçük uyduların yıllara göre fırlatımı 11

Şekil 3.1. Chamran-1 uydusu 13

Şekil 3.2. Carbonite 1 (a) ve Carbonite 2 (b) uyduları 14

Şekil 3.3. SSTL 50 mekanik yapısı 14

Şekil 3.4. Youthsat uydusu 15

Şekil 3.5. AstroSat-100 ekipman yerleşim (a) ve AlSat uydusu (b) 15

Şekil 3.6. FASat Charlie uydusu 16

Şekil 3.7. ICEYE-X2 uydusu 17

Şekil 3.8. Zond-PP (MKA-PN 1) uydusu 17

Şekil 3.9. Kompas-1 uydusu 18

Şekil 3.10. Modüler olarak yeniden yapılanabilen küp uydu birliği 20

Şekil 3.11. Merkezi silindir bir yapısala sahip uydu mekanik mimarisi 21

Şekil 3.12. CONTOUR uydusu mekanik yapısı 21

Şekil 3.13. CROPIS uydusu 22

Şekil 3.14. Bilsat (a) ve RASAT (b) uyduları 24

Şekil 3.15. LAPAN uyduları ekipman yerleşimi 25

Şekil 4.1. 2018-2022 arasında tercih edilen fırlatıcılar 50

Şekil 4.2. Örnek uydunun patlatılmış resmi 53

Şekil 4.3. Sandviç panele entegre edilmiş gömülü bağlantı elemanı modeli 55

Şekil 4.4. FEM modeli 56

Şekil 4.5. Konsept uydu modal analiz sonuçları 57

Şekil 4.6. Alt panel için yapılmış topoloji (a) ve gerinim enerji dağılımları (b) 65

Şekil 4.7. Katılık gereksinimlerinin belirlenmesi 66

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. Konsept uydu ekipmansız FEM modeli (a) ekipmanlı (b) ekipmansız 66

Şekil 4.9. Ekipmansız uydu modal analiz sonucu..... 67

Şekil 4.10. Alt panel gerinim enerji dağılımı..... 68

Şekil 4.11. Feder Dağılımı Geometrik Optimizasyon 68

Şekil 4.12. Plaka üzerinde feder dağılımı 70

Şekil 4.13. Geometrik optimizasyon parametreleri 71

Şekil 4.14. Gerinim enerji dağılımına göre tasarım parametrelerinin belirlenmesi..... 71

Şekil 4.15. Panel seviyesi tasarım adımları 72

Şekil 4.16. Baz tasarımın geliştirilmesi 73

Şekil 4.17. Metot uydu modellemesi 73

Şekil 4.18. Modal analizi sonuçları..... 74

Şekil 4.19. Son tasarım doğal frekans değerleri 74

Şekil 4.20. Optimize edilmiş panel için GP dağılımı 75

Şekil 4.21. Panel üzerindeki GP dağılımları..... 77

Şekil 4.22. Kamera ekipmanı için X yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması 81

Şekil 5.1. Pil ekipmanı için PSD değerleri 83

Şekil 5.2. Pil Paneli için optimizasyon 84

Şekil 5.3. Optimizasyon sonucu PSD yük değerleri..... 84

Şekil 5.4. Gömülü bağlantı elemanının üretim süreci..... 87

Şekil 5.5. Panelin bir parçası olarak üretilen bağlantı bölgeleri 89

Şekil 5.6. Eklemeli imalat teknolojisinde üretilen kafes sistemleri 90

Şekil 6.1. Optimize edilmiş uydunun patlatılmış görüntüsü..... 92

Şekil 6.2. Optimize edilmiş uydunun değer analizi adımları..... 93

Şekil 6.3. Uydu mekanik mimarisi görüntüleri..... 94

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.4. Panel montaj aşamaları 94

Şekil 6.5. Kilitleme mekanizmasının montaj adımları..... 95

Şekil 6.6. Tasarım 1 için katılık değerlerinin belirlenmesi 95

Şekil 6.7. Tasarım 1'in değer analizi adımları..... 96

Şekil 6.8. Tasarım 2'nin yan panellerin montajı 97

Şekil 6.9. Tasarım 2'nin alt panelin montajı 98

Şekil 6.10. Tasarım 2 için optimizasyon adımlarının gerçekleştirimesi 98

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AM	Additive Manufacture (EI: Eklemeli İmalat)
ASAL	Algerian Space Agency (Cezayir Uzay Ajansı)
ASD	Acceleration Spectral Density (İvme Spektral Yoğunluğu)
BESO	Bi-Directional Evolutionary Structural Optimisation (Çift Yönlü Evrimsel Yapısal Optimizasyon)
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CMG	Control Moment Gyroscopes (Kontrol Moment Jiroskopları)
DMC	Disaster Monitoring Constellation (Afet İzleme Takımyıldızı)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)
DMO	Discrete Material Optimization (Ayrık Malzeme Optimizasyonu)
DSA	Design Sensitivity Analysis (Tasarım Duyarlılık Analizi)
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company (Avrupa Havacılık Savunma ve Uzay Şirketi) (Şu anki adıyla Airbus Defence and Space)
EBM	Electron Beam Melting (Elektron Işınının Erimesi)
ECSS	European Cooperation for Space Standardization (Uzay Standardizasyonu için Avrupa İşbirliği)
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Eleman Analizi)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Modeli)
FNF	Fundamental Natural Frequency (Temel Doğal Frekans)
GDA	Gerilme ve Dayanım Analizi
GP	Güvenlik Payı

Kısaltmalar	Açıklamalar
GPS	Global Konumlandırma Sistemi
IR	Infrared (Kızılötesi)
ISRO	Indian Space Research Organization (Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu)
LEO	Low Earth Orbit (Alçak Yörünge Uyduları)
MFS	Multifunctional Structures (Çok Fonksiyonlu Yapılar)
MEO	Medium Earth Orbit (Orta Yörünge Uyduları)
MLI	Multilayer Insulation (Çok Katmanlı Yalıtım)
MUFS	Roketsan Mikro Uydu Fırlatma Sistemi
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PCB	Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
PDU	Power Distfederution Unit (Güç Dağıtım Ünitesi)
PEEK	Polietereterketon
PSD	Power Spectral Density (Üç Spektral Yoğunluğu)
SAR	Sentetik Açıklıklı Radar
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalty (Cezalandırmalı Katı İzotropik Malzeme Yöntemi)
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Eritme)
SMS	Strain Mode Shapes (Gerinim Mod Şekilleri)
SPSW	Steel Plate Shear Walls (Çelik Levha Makaslama Duvarları)
SSTL	Surrey Satellite Technology Limited (Surrey Uydu Teknolojisi)
SVM	Service Module (Servis Modülü)
SXS	Solar X-ray Spectrometer
TAI	Turkish Aerospace Industries (Türk Havacılık ve Uzay Sanayii)
TCS	Thermal Control System (Termal Kontrol Sistemi)
TO	Topoloji Optimizasyonu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

Uydular, havacılık ve uzay endüstrisinde kritik bir rol oynayan teknolojik sistemlerdir. İletişim, hava durumu tahminleri, jeo-uzay gözlemleri, askeri keşifler gibi birçok alanda geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır. Geleneksel uydu sistemlerinin geliştirilmesi ve üretimi yüksek maliyet oluşturmaktadır. Bu maliyetler uydu parçalarını oluşturan bileşenlerin büyük olması, karmaşık geometriye sahip olması ve üretim süreçlerinin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Teknolojinin hızlı gelişimi ve artan performans gereksinimleri, uydu maliyetlerinin düşürülmesine yönelik çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle mikro uydu teknolojisinin gelişmesi, daha düşük maliyetlerle hızlı üretilebilen ve yüksek verimlilik sunan uydu sistemlerinin önünü açmaktadır. Bu sayede, uzay araştırmaları ve veri iletimi gibi alanlarda daha fazla uydu fırlatılabilmekte ve daha geniş bir kapsama alanı sağlanmaktadır.

Bu bağlamda, uydu bileşenlerinin ağırlığı, üretim süreleri ve süreçleri, uydu maliyetlerini doğrudan etkileyen kritik faktörler arasında yer almaktadır. Geleneksel uydu tasarımlarında, yaygın olarak alüminyum petekli sandviç paneller veya talaşlı imalat yöntemleri ile üretilen bileşenler kullanılmaktadır. Alüminyum sandviç paneller, düşük yoğunlukları nedeniyle hafiflik avantajı sağlamakla birlikte, üretim süreçlerinin karmaşıklığı, tedarik zinciri ve tedarik yönetiminin zorlukları, üretim süresini uzatmaktadır. Malzemelerin uzun tedarik süreçleri, özel depolama gereksinimleri, panellerin üretim verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer taraftan, talaşlı imalat ile üretilen panellerin ağırlığı, uydu yapılarındaki itki sistemleri, tepki tekerlekleri gibi alt sistemlerden talep edilen performans yükümlülüğünü artırmaktadır.

Geleneksel üretim yöntemlerinin çözüm getiremediği bahsi geçen sorunlara çözüm sunan, özgür tasarım ve üretim yaklaşımlarına yönelim artmaktadır. Eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri; tasarım özgürlüğü, ağırlık kazancı ve verimli üretim süreçleri sağladığı için dikkat çekmektedir. Bu teknoloji, üretim sürelerini kısaltırken, aynı zamanda uydu performansını artırma potansiyeli sunmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte, yenilikçi üretim yöntemlerinin mikro uydu endüstrisindeki etkinliği artmakta ve sektördeki tasarım ve üretim süreçleri değişmektedir.

Araştırmanın amacı hedefleri ve özgünlüğü

Tezin amacı, mikro uydu sınıfı uydularda geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen uydu birincil yapısını, eklemeli imalatın sunduğu avantajlardan yararlanarak daha hafif, daha dayanıklı ve daha hızlı bir üretim süreci sağlamaktır. Geleneksel üretim yöntemleri, karmaşık süreçler ve yüksek maliyetler gerektirirken, eklemeli imalat teknolojisi, özelleştirilmiş yapıları daha hızlı üretme imkânı sunmaktadır. Tezde mikro uydu yapısal performansının artırılması, üretim süresi ve maliyetlerin optimize edilmesi hedeflenmiştir.

Kütle azaltımı ve optimizasyon yönteminin geliştirilmesi

Araştırmanın temel amacı, eklemeli imalat teknikleriyle üretilen alüminyum petekli sandviç panellerin yapısal bütünlüğünü emniyetli sınırlar içinde koruyarak kütle azaltımının sağlanabileceğini göstermektir. Bu doğrultuda yapılan literatür araştırmaları, mevcut süreçlerin, karmaşık mühendislik işlemlerini ve optimizasyon yöntemlerini gerektirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle bu tezde yapılan çalışmalarda topoloji optimizasyonunda sınır şartlarının ürün özelinde net bir şekilde belirlenmediği tespit edilmiş, bu belirsizlik nedeniyle uydu panellerinde istenilen verimlilik sağlanamamıştır. Tezde geliştirilen metod ile bu sorunun aşılabileceği görülmüştür.

Literatür çalışmalarında, genellikle büyük uydu sınıflarındaki ikincil yapısal bileşenlerin veya küp uydu sınıfı bileşenlerin eklemeli imalat ile üretimine uygun optimizasyon süreçlerine odaklanıldığı görülmüştür. Tez çalışması, mikro uydu sınıfında yer alan birincil yapısal bileşenler, özellikle yük taşıyıcı ana gövde yapıların optimizasyonuna odaklanarak literatürdeki mevcut yaklaşımlardan ayrılmaktadır.

Dayanım ve güvenilirlik

Uydu fırlatma süreci, yapısal bileşenler üzerinde ciddi gerilmeler ve kuvvetler oluşturmaktadır. Bu yükler, uydunun yapısal dayanıklılığını doğrudan etkiler ve yapısal elemanların güvenilirliğini belirlemede kritik bir rol oynar. Yeni mikro uydu tasarımının, kütle azalması ile birlikte geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen panellere kıyasla daha güvenli ve verimli olması hedeflenmiştir.

Literatürde, özellikle rastgele titreşim yüklerinin ekipmanlar üzerindeki etkilerini inceleyen ve bu konuda optimizasyon yapan kaynaklar sınırlıdır. Tez çalışmasında hem sandviç paneller hem de eklemeli imalat yöntemiyle tasarlanmış uydu platformlarında bulunan alt sistem ekipmanlarına gelen yükler incelenmiş ve eklemeli imalatla üretilen paneller için yüklerin azaltılmasına yönelik tasarım önerileri sunulmuştur.

Böylece, uydu fırlatmaları sırasında karşılaşılan yüksek dinamik ve statik yükler altında panellerin güvenilirliği artırılmış, uydu sistemlerinin genel performansı ve güvenliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Üretim süreçlerinin iyileştirilmesi

Tez çalışmasında, alüminyum petekli sandviç panellerin geleneksel üretim yöntemleri ile eklemeli imalat teknikleri karşılaştırılmış ve eklemeli imalatın öne çıkan avantajları ortaya konulmuştur.

Alüminyum sandviç paneller geleneksel olarak çeşitli adımlar takip ederek üretilir. Bu adımlar arasında yüzey tabakaların hazırlanması, bal peteği çekirdeğinin kesilmesi ve bu tabakaların yüksek mukavemetli yapıştırıcılarla birleştirilmesi, ardından vakum torbalama veya otoklav işlemiyle kürleme yapılması bulunmaktadır. Uygulanan adımlar arasında bazı üretim hataları ortaya çıkmaktadır. Yaygın hatalar arasında küllenme, reçine dolum hataları, delaminasyon ve dalgalanma bulunmaktadır. Bu hataları önlemek için doğru reçine oranları, vakum kürleme ve tahribatsız test yöntemleri kullanılması gerekmektedir.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanıldığında, tasarlanan parçanın doğrudan üretim makinesinde belirlenen parametrelerle üretilebilmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, sandviç panel teknolojisine göre daha az iş gücü gerektirmiş ve daha az hata ile karşılaşılmıştır.

Geleneksel yöntemde panmellerin ve ekipmanların montaj edildiği bağlantı noktalarında kullanılan kullanılan reçine dolgu (potting) sürecinde yaşanan zorluklar, hatalar literatür çalışmalarında incelenmiştir. Tasarlanan uydu panelinin bu hataları yok etmesi amaçlanmıştır. Eklemeli imalat yöntemi kullanıldığında, bağlantı arayüzleri panel ile birlikte bir bütün olarak ürettiğinden, bu tür hataların önüne geçilmiştir.

Sonuç olarak mikro uydu bileşenlerinin üretiminde, eklemeli imalat yönteminin geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli, maliyet etkin ve hata oranı düşük bir üretim süreci sunduğu görülmüştür.

Araştırma planı

Bölüm 1'de araştırmanın konusu, amacı ve hedefleri açıklanmıştır. Literatürde mevcut çalışmalar incelenerek tez çalışmasının özgün yönleri ve araştırma planı detaylandırılmıştır.

Bölüm 2'de tez konusu olan uydu teknolojisi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Özellikle mikro uydu teknolojisine olan yönelim ve bu alandaki gelişmeler ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

Bölüm 3'te kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür incelemeleri yedi başlık altında toplanmış ve tez çalışmasının literatüre katkıları, mevcut çalışmalardan ayrılan özgün yönleri vurgulanmıştır.

Bölüm 4 dört alt başlıktan oluşmaktadır. İlk alt başlıkta tezde izlenen yöntem ve metodoloji anlatılmıştır. Öncelikle bir konsept uydu tasarımı yapılmış ve doğrulanmıştır. Ardından bu tasarım, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilebilecek şekilde optimize edilerek tekrar doğrulanmıştır. İkinci alt başlıkta uydu içerisinde yer alan ekipmanların rastgele titreşim yükleri altındaki güvenilirliği incelenmiştir. Üçüncü alt başlıkta optimize edilmiş tasarımın üretim açısından sağladığı avantajlar ele alınmıştır.

Bölüm 5 ‘de eklemeli imalatta yönelik tasarım ve üretimin mevcut durumda karşılaşılan üretim sorunlarına çözüm bulduğu noktalar detaylı olarak örnekler ve literatür çalışmaları ile verilmiştir.

Bölüm 6 ‘da eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğünden yararlanılarak uydu mimarisinde fark yaratan yenilikçi çözümler sunulmuştur.

Bölüm 7’de ise tezin genel değerlendirmesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Sınırlılıklar

Çalışma, yalnızca alüminyum malzeme kullanımı üzerinden değerlendirilmiştir, farklı malzeme kullanımı ele alınmamıştır. Eİ üretim sürecinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği, maliyet analizleri tez çalışmasının kapsamı dışında bırakılmıştır. Çalışmada, yalnızca bilgisayar ortamında yapılan sayısal analiz yöntemleri kullanılmış olup üretim ve çevresel testler yapılmamıştır.

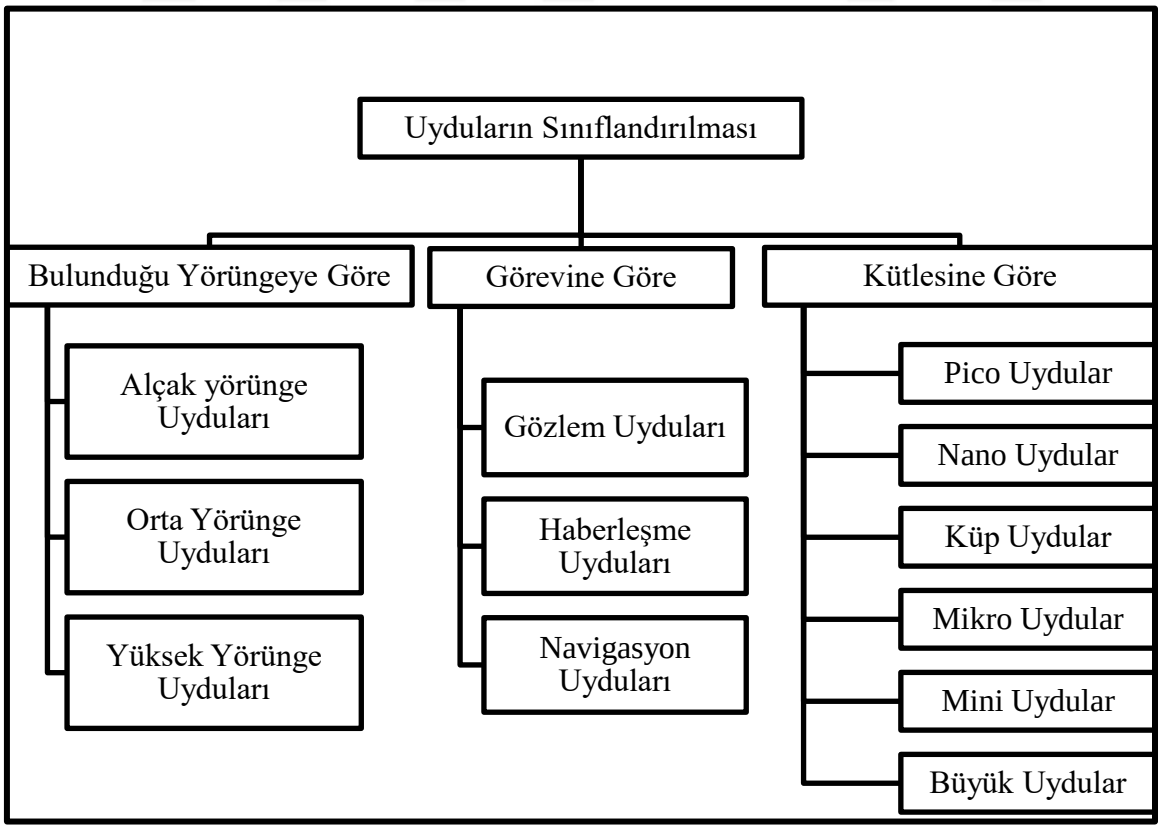
2. UYDU TEKNOLOJİSİNE GENEL BİR BAKIŞ

Uydular, modern toplumların iletişim, güvenlik, bilimsel araştırma, ekonomik kalkınma ve ulusal prestij gibi birçok alandaki ihtiyaçlarını karşılamada kritik bir role sahiptir. İletişim uyduları, küresel haberleşmeyi sağlayarak internet, telefon, televizyon ve veri transferi gibi hizmetlerin kesintisiz bir şekilde sunulmasını mümkün kılar.

Bir ülkenin uyduya sahip olmasının stratejik önemi de büyüktür. Yabancı uydulara bağımlı kalmamak, kritik verilere erişimde güvenliği sağlar ve ulusal çıkarları korur. Bu nedenlerle, birçok ülke uydu teknolojisine yatırım yaparak hem sivil hem de askeri alanlarda küresel rekabet gücünü artırmayı hedeflemektedir.

Yapay uyduların sınıflandırılması, bulundukları yörünge yüksekliklerine, görevlerine ve boyutlarına göre farklılık gösterir. Çizelge 2.1'de yapay uyduların sınıflandırılması verilmiş sonraki bölümlerde de açıklamalar yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Uyduların Sınıflandırılması



Yörüngeye uydu çeşitleri alçak yörünge uyduları; orta yörünge uyduları ve yüksek yörünge uyduları olarak üçe ayrılır.

Alçak yörünge uyduları (Low earth orbit- LEO)

Dünya'nın yüzeyine en yakın yörüngede bulunan uydulardır. Genellikle 160 km ile 2 000 km arasında değişen yüksekliklerde hareket ederler. LEO uyduları, daha düşük yörüngelerde bulundukları için daha kısa sürede Dünya'nın etrafını dönerler (yaklaşık 90-120 dakika). Bu dönüş hızı, düşük yörüngelerdeki uyduların iletişim gecikmesini en aza indirmelerini sağlar. Bu tür uydular, özellikle uzay araştırmaları, Dünya gözlemleri, hava durumu izleme ve askeri gözlem görevlerinde kullanılır. LEO uyduları, alçak yörüngede bulunmalarının bir sonucu olarak atmosferin daha yoğun katmanlarına yakın oldukları için, bu uyduların ömürleri genellikle daha kısadır. Bu uyduların avantajları ise, düşük maliyetle uzaya fırlatılabilmeleri ve daha hızlı veri iletimi yapabilmeleridir. Örnek olarak, SpaceX'in Starlink projesi LEO uydularını kullanarak küresel internet erişimi sağlamayı hedeflemiştir. Türkiye'nin LEO yörüngesinde bulunan uyduları GOKTURK 1; GOKTURK 2; Rasat, İmece; 3USAT, İTÜpSAT1, ASELSAT ve UBAKUSAT'dır.

Orta yörünge uyduları (Medium earth orbit- MEO)

LEO ve GEO arasında bulunan bir yörüngede yer alır. Genellikle 2000 km ile 35786 km arasında bir yüksekliğe sahiptirler. MEO uyduları, genellikle 6-12 saatlik bir periyotla Dünya'nın etrafında dönerler. Bu tür uydular, özellikle küresel konumlandırma sistemleri (GPS) ve navigasyon hizmetlerinde önemli bir rol oynarlar. MEO uyduları, LEO uydularına göre daha uzun ömürlüdür, çünkü atmosferle etkileşimleri daha azdır. Ayrıca, çok geniş bir coğrafi alanı kapsayacak şekilde tasarlanabilirler. GPS, Galileo ve GLONASS gibi küresel konumlandırma sistemleri bu yörüngede bulunan uydulara dayanır. Türkiye'nin MEO bölgesinde uydusu yoktur.

Yüksek Yörünge Uyduları (Geostationary earth orbit- GEO)

Dünya'nın yüzeyine en uzak yörüngelerde bulunan uydulardır ve yaklaşık olarak 35786 km yükseklikte yer alırlar. GEO uyduları, Dünya'nın dönüş hızına eşit hızda hareket ederler, bu nedenle Dünya üzerindeki sabit bir noktaya odaklanarak sürekli aynı bölgeyi

gözlemleyebilirler. Bu özellikleri, özellikle iletişim gibi sabit bir kapsama alanı gerektiren görevler için son derece uygundur. GEO uyduları, sürekli ve kararlı iletişim sağlamak amacıyla televizyon yayınları, telefon iletişimi ve internet bağlantıları gibi uygulamalarda kullanılır. GEO uydularının ömrü genellikle daha uzun olup, enerji verimliliği açısından da avantajlıdırlar, çünkü güneş enerjisinden daha verimli yararlanabilirler. Bununla birlikte, yüksek yörüngelerdeki bu uyduların fırlatılması daha pahalıdır. Türkiye'nin GEO' da bulunan uyduları TÜRKSAT 3A, TÜRKSAT 4A, TÜRKSAT 4B, TÜRKSAT 5A, TÜRKSAT 5B ve Türkiye'nin ilk yerli haberleşme uydusu olan TÜRKSAT 6A'dır.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, uydular günümüzde birçok farklı alanda kullanılarak küresel hizmetler ve gözlemler için kritik bir rol oynamaktadır. Uydular Çizelge 2.1 de gösterildiği gibi yörüngelerinden bağımsız görevlerine göre de sınıflandırılırlar. Uyduların görevleri, temel olarak iletişim, navigasyon ve gözlem olarak sınıflandırılabilir. Her bir görev türü, belirli ihtiyaçlara göre şekillenir ve teknolojik gelişmelerle daha da çeşitlendirilmiştir.

İletişim uyduları

Dünyanın farklı bölgelerindeki verilerin ve sinyallerin iletilmesinde kullanılan uydulardır. Bu uydular, televizyon yayınları, radyo sinyalleri, telefon görüşmeleri, internet erişimi ve diğer veri iletim hizmetleri için kritik öneme sahiptir. Bu uydular, elektromanyetik dalgalarla veri iletimi yaparlar ve özellikle kıtalar arası iletişimde önemli bir rol oynar. Dünya üzerindeki kablo altyapısının ulaşamadığı yerlerde, iletişim uyduları, uzak bölgelerde internet ve telefon hizmetlerini mümkün kılar. Örneğin, televizyon yayınları için kullanılan uydular, milyonlarca izleyiciye yüksek kaliteli video içerikleri iletme görevini üstlenir.

Navigasyon uyduları

Küresel konumlandırma sistemlerini (GPS) oluşturan uydulardır. Bu uydular, kullanıcıların Dünya üzerindeki konumlarını, hızlarını ve zaman bilgisini belirlemelerine olanak tanır. En bilinen navigasyon uydusu sistemi, ABD tarafından işletilen GPS'dir. Bunun dışında Avrupa'nın Galileo, Rusya'nın GLONASS ve Çin'in BeiDou sistemleri de küresel navigasyon hizmeti sağlamaktadır.

Keşif ve gözlem uyduları

Dünya yüzeyinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve haritalanması amacıyla kullanılan uydulardır. Bu uydular, görüntüleme sensörleri ve radarlar kullanarak Dünya'nın yüzeyini, okyanusları, dağları, ormanları ve diğer doğal kaynakları gözlemlemek için tasarlanmıştır. Keşif uyduları, tarım, orman yönetimi, su kaynakları yönetimi, şehir planlaması ve çevresel izleme gibi bir dizi uygulamada kullanılır. Bu uydular, yüksek çözünürlüklü görseller sağlamak için optik görüntüleme, kızılötesi ve radar sistemlerini kullanarak yüzeydeki değişimleri takip ederler. Ayrıca, çevresel değişiklikleri izlemek ve doğal afetlerin etkilerini gözlemlemek için de kullanılırlar. Bu tür uydular, birçok bilimsel araştırma ve gözlem projelerinde de önemli bir araçtır. Dünya'nın atmosferini gözlemlemek ve hava durumu tahminleri yapmak için de kullanılan uydulardır.

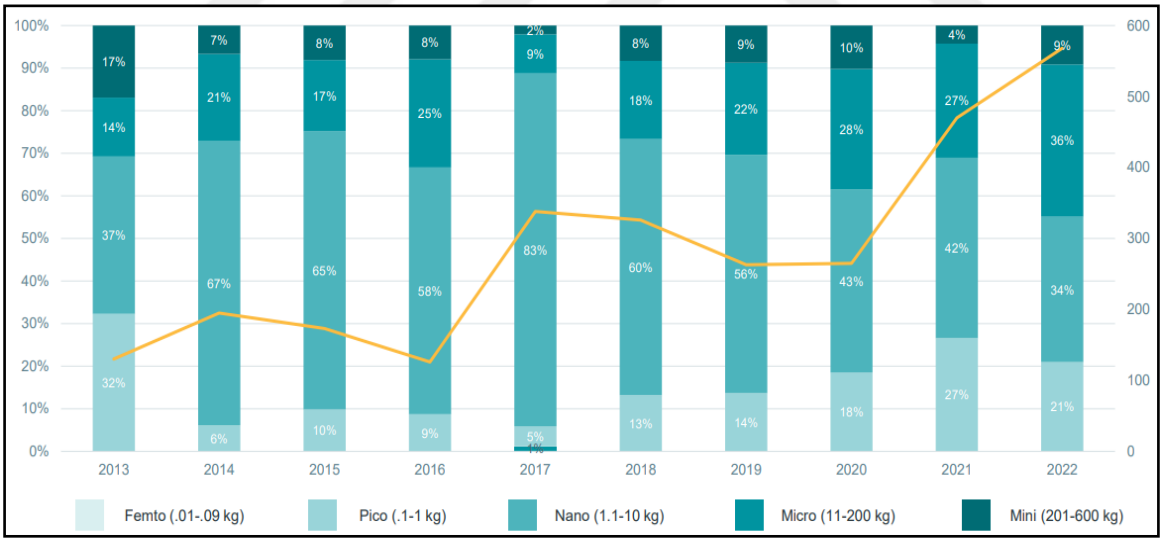
Çizelge 2.1 de gösterildiği gibi uydular, farklı görevlerin gerektirdiği tasarım, maliyet ve taşıma ihtiyaçlarını optimize etmek için kütlelerine göre de sınıflandırılmaktadır. NASA ve diğer uzay ajansları, uydu teknolojilerinin hızla gelişmesiyle birlikte, özellikle küçük boyutlu uyduların (nano, mikro ve mini uydular) artan talebine uyum sağlayacak şekilde sınıflandırma sistemlerini güncellemiştir. Uydu boyutlarına göre yapılan bu kategorileştirme hem bilimsel hem de ticari görevlerin daha verimli bir şekilde planlanmasına ve yürütülmesine olanak tanır. Piko uydular, genellikle 0,1 ila 1 kg arasında bir kütleye sahiptir ve boyutları birkaç santimetre ile sınırlıdır; düşük maliyetli testler ve teknolojik deneyler için kullanılır. Nano uydular ise 1 ila 10 kg arasındaki kütleye sahiptir ve genellikle Küp uydu formatında tasarlanır; bu uydular üniversite projelerinde ve küçük bilimsel deneylerde tercih edilir. Mikro uydular 10 ila 100 kg arasında olup, çamaşır makinesi boyutuna yakın olabilir; yer gözlemi, iletişim ve daha karmaşık bilimsel görevlerde kullanılır. Mini uydular ise 100 ila 500 kg arasında değişen bir kütleye sahiptir ve daha büyük bilimsel veya ticari görevler için uygundur.

2.1. Mikro Uydu Yaklaşımları

Tez kapsamında uydu sınıflarında mikro uydular hedef alınmış ve çalışma mikro uydu sınıfları için geçerli çıkarımlarda bulunulmuştur. Mikro uydular, düşük maliyetleri, esnek tasarımları ve hızlı üretim süreçleri sayesinde son yıllarda uzay teknolojilerinde büyük bir öneme sahip olmuştur. Bu uydular, genellikle 10 ile 200 kilogram arasında değişen küçük

boyutlarıyla, özellikle haberleşme, gözlem, bilimsel araştırmalar ve savunma gibi alanlarda kullanılmaktadır. Mikro uyduların yükselişindeki temel nedenlerden biri, klasik büyük uyduların geliştirilmesi ve fırlatılmasının oldukça maliyetli ve zaman alıcı olmasıdır. Mikro uydular, bu süreci daha erişilebilir hale getirerek daha fazla ülkenin ve özel sektörün uzay yarışına katılmasını sağlamaktadır. Özellikle uydu takımyıldızları oluşturmak için kullanılan mikro uydular, geniş bant internet hizmetleri, küresel veri toplama ve çevresel izleme gibi alanlarda devrim yaratmıştır. SpaceX'in Starlink projesi ve OneWeb gibi girişimler, mikro uydu teknolojisinin ticari potansiyelini göstermektedir.

Bryce Smallsats 2023 Raporu [1], 2013-2022 yılları arasında fırlatılan küçük uydulara dair kapsamlı istatistiksel veriler sunmuştur. Küçük uydular, 600 kg ve altındaki uydular olarak tanımlanmış ve piko, nano, mikro, mini gibi farklı kütle sınıflarına ayrılmıştır. 2022'de tüm fırlatılan uyduların %96'sını küçük uydular oluşturmuş, bu oran son on yılda %87 olarak gerçekleşmiştir. Küçük uydular, toplam kütlenin yalnızca %25'ini temsil etse de görev ve uygulama çeşitliliğiyle dikkat çekmiştir.



Şekil 2.1. Küçük uyduların yıllara göre fırlatımı

Şekil 2.1, 2013-2022 yılları arasında Starlink ve OneWeb hariç tutulmak üzere, küçük uyduların (smallsats) kütle sınıflarına göre dağılımını göstermiştir. Raporda küçük uydular 5 gruba ayrılmıştır. Bunlar; Femto (0,01-0,09 kg), Piko (0,1-1 kg), Nano (1,1-10 kg), Mikro (11-200 kg) ve Mini (201-600 kg) uydulardır. 2013'ten 2021'e kadar nano uydular, küçük uydu pazarında en büyük paya sahip olmuştur. Ancak, 2022 yılında mikro uydular ilk kez nano uyduları geçerek en büyük kütle sınıfı haline gelmiştir. 2022'de mikro uydular

%36'lık bir paya sahip olurken, nano uydular %34 ile ikinci sırada yer almıştır. Aynı dönemde mini uyduların oranı da %27'ye yükselmiştir. Bu değişim, toplam küçük uydu fırlatma sayısındaki artışla paralel olarak ilerlemiş ve 2022'de yaklaşık 600 küçük uydu fırlatılmıştır.

Gelecekte küçük uydu teknolojilerinin uzay endüstrisinde daha fazla tercih edileceği gözlenmiştir. Ticari operatörlerin ve iletişim mega takımyıldızlarının bu sektöre katkısı, küçük uydu ekosistemini daha da büyütecek potansiyele sahip olacağı vurgulanmıştır. Bu eğilimler, küçük uyduların uzay mimarisinde kritik bir rol oynayacağını göstermiştir. Bu sebeple tez çalışmasının hedef aldığı yapısal optimizasyon çalışmasında mikro uydu sınıfı uyduların optimizasyon çalışması yapılmıştır.

3. LİTERATUR TARAMASI

3.1. Mikro Uydu Projeleri ve Başarı Örnekleri

3.1.1. Chamran-1 uydusu

İran tarafından geliştirilen Chamran-1 uydusu 2024'te Qaem-100 roketiyle fırlatılmıştır. Şekil 3-1 de laboratuardaki görseli gösterilen uydu 60 kilogramağırlığındadır ve 550 kilometre yüksekliğe başarıyla ulaşmıştır. Uydu, soğuk gaz itki sistemi ve navigasyon alt sistemlerini test etmek amacıyla gönderilmiştir [2].

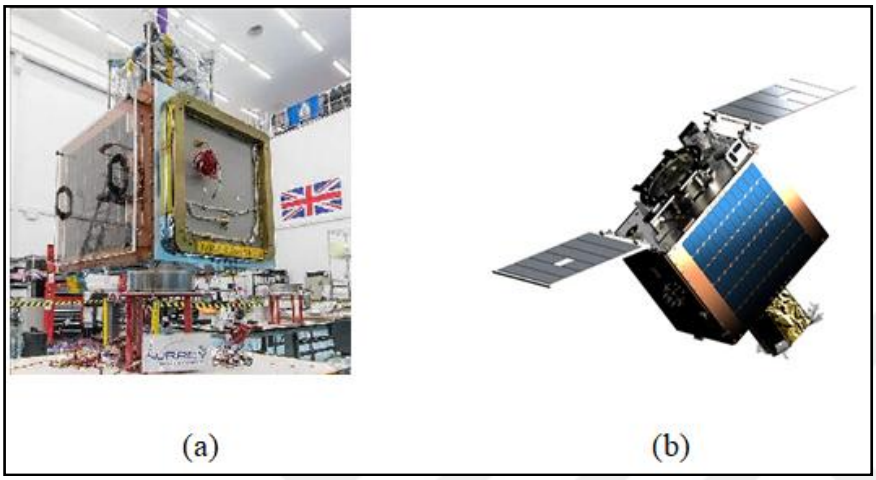


Şekil 3.1. Chamran-1 uydusu [2]

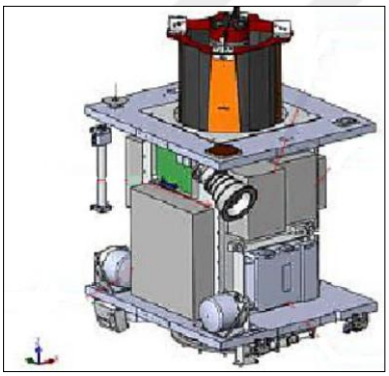
Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) tarafından geliştirilen, düşük maliyetli ve yüksek çözünürlüklü görüntüleme yeteneklerini göstermek için tasarlanmış uydulardır. Carbonite-1, 10 Temmuz 2015 tarihinde fırlatılan bir teknoloji gösterim uydusudur. Bu uydu, ticari olarak temin edilebilen bileşenler kullanarak 1 metre çözünürlükte görüntüler ve 1,5 metre çözünürlükte videolar elde etmeyi başarmıştır [3]. Carbonite-2, 12 Ocak 2018 tarihinde fırlatılan ve Carbonite-1'in geliştirilmiş bir versiyonudur. Bu uydu, 1 metre çözünürlükte tam renkli video klipler ve 5 km'lik bir görüntüleme genişliği ile görüntüler sunmaktadır [4].

Her iki uydu da SSTL-X50 platformunu kullanmaktadır. SSTL-X50 uydu platformu, SSTL'nin, Dünya Gözlem ve Alçak Dünya Yörüngesi iletişim operatörlerinin ömür gereksinimlerini karşılayan, geniş bir görev yelpazesi için düşük maliyetli bir uydu altyapısı sunmak üzere tasarlanmıştır. Şekil 3.3 de tasarımı gösterilen SSTL-X50 platformunun temel boyutları 65 x 65 x 72 cm'dir. SSTL-X50 platformu, talaşlı imalat

yöntemi ile üretilmiş alüminyumdan yapılır ve toplam ağırlığı yaklaşık 100 kg'dır [5]. Şekil 3.2'de gösterilen 5 yıllık bir tasarım ömrüne sahip olan Carbonite-2, Carbonite-1 tasarımına bazı iyileştirmeler eklenmiştir. Bu iyileştirmeler arasında evrimsel tasarım teknikleri ve 3D baskı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar bulunduğu bildirilmiştir. [3]. Fakat bu detaylar gizlilik sebebi ile yayınlanmamıştır.



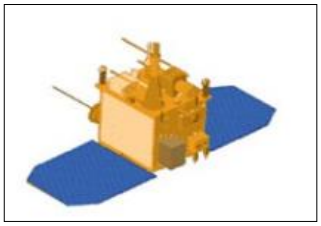
Şekil 3.2. Carbonite 1 (a) ve Carbonite 2 (b) uyduları [2]



Şekil 3.3. SSTL 50 mekanik yapısı [4]

3.1.2. Indian mini satellite -1 (ıms-1) ve youthsat uyduları

Indian Mini Satellite-1 (IMS-1), Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu (ISRO) tarafından geliştirilen ve 28 Nisan 2008'de fırlatılan bir mikro uydu projesidir. Bu uydu, düşük maliyetli ve hızlı yanıt veren bir uzaktan algılama platformu olarak tasarlandı. IMS-1, 83 kg kütleye sahip olup, bir gözlem uydusudur. Uydu platformu, yaklaşık 30 kg faydalı yük kapasitesine sahiptir.

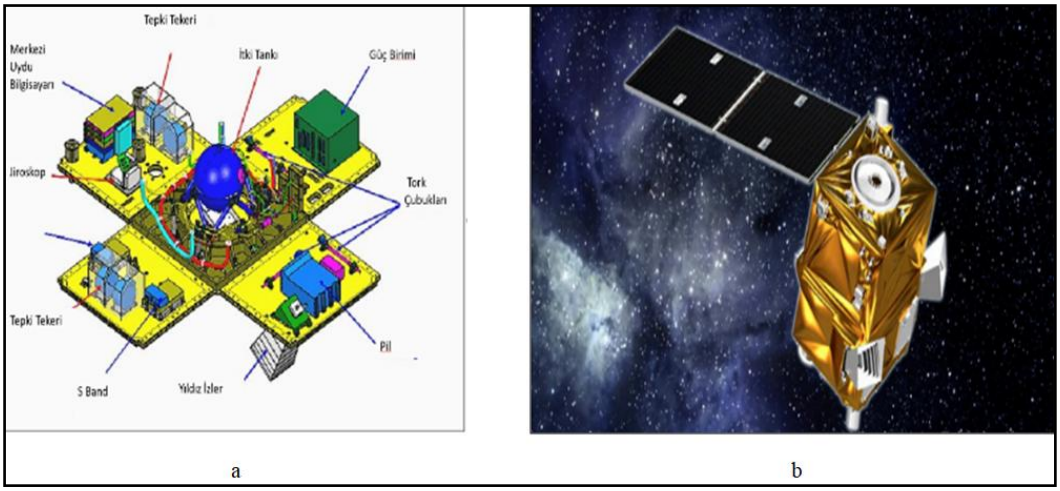


Şekil 3.4. Youthsat uydusu [4]

Bu serinin ikinci görevi olan Şekil 3.4'de görseli bulunan Youthsat, Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu (ISRO) tarafından geliştirilen ve 20 Nisan 2011'de Resourcesat-2 ile birlikte fırlatılan bilimsel bir uydudur. IMS-1 platformu temel alınarak tasarlanan bu uydu, yaklaşık 92 kg ağırlığındadır. Uydu, Solar X-ray Spectrometer (SXS) gibi bilimsel enstrümanlar taşımaktadır [4].

3.1.3. Alsat-2a ve Alsat-2b uyduları

Şekil 3.5 de görseli bulunan AstroSat-100 platformunun kullanıldığı AlSat-2A ve AlSat-2B, Cezayir Uzay Ajansı (ASAL) tarafından geliştirilen optik Dünya gözlem uydularıdır. İki uydu, Astrium (şimdi Airbus Defence and Space) ile iş birliği içinde tasarlanmıştır. 116 kg ağırlığındaki her uydu, AstroSat-100 platformunu kullanır. Faydalı yük 18,5 kg'lik toplam ağırlıktadır. Kameranın ağırlığı ise 13 kg'dır. Şekil 3.5 de görseli verilen uydu, PSLV roketleriyle Hindistan'dan fırlatılmıştır. Her iki uydu da Cezayir'in doğal kaynaklarının izlenmesi, şehir planlaması ve çevresel gözlem gibi alanlarda önemli katkılar sağlamaktadır [2,5].



Şekil 3.5. AstroSat-100 ekipman yerleşim (a) ve AlSat uydusu (b) [4]

3.1.4. Vnredsat-1 uydusu

Vietnam'ın ilk optik Dünya gözlem uydusu olup, doğal kaynakların izlenmesi, çevresel değişimlerin takibi ve afet yönetimi gibi amaçlarla geliştirilmiştir. EADS Astrium tarafından Toulouse'da üretilen uydu, 7 Mayıs 2013 tarihinde Vega VV02 roketiyle Fransız Guyanası'ndaki Kourou Uzay Merkezi'nden başarıyla fırlatılmıştır. VNREDSat-1 yaklaşık 120 kg ağırlığındadır [3,5]

3.1.5. Fasat-charlie uydusu

SSOT (Sistema Satelital para Observación de la Tierra), diğer adıyla FASat-Charlie, Şili'nin ilk yüksek çözünürlüklü Dünya gözlem uydusudur. Airbus Defence and Space tarafından geliştirilen Şekil 3.6'da görseli bulunan bu uydu, 117 kg ağırlığındadır. SSOT, 17 Aralık 2011 tarihinde Fransız Guyanası'ndaki Kourou Uzay Merkezi'nden Soyuz-STA/Fregat roketiyle fırlatılmıştır [3,5].



Şekil 3.6. FASat Charlie uydusu [4]

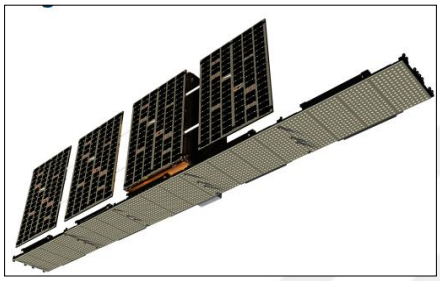
3.1.6. Blacksky pathfinder-1 uydusu

Seattle merkezli BlackSky Global şirketi tarafından geliştirilen ve 26 Eylül 2016'da Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu (ISRO) tarafından PSLV-C35 roketiyle fırlatılan bir Dünya gözlem uydusudur. Yaklaşık 44 kg ağırlığındaki bu uydu, 50 cm x 50 cm x 50 cm boyutlarında olup, 24 cm açıklığa sahip SpaceView-24 görüntüleme sistemiyle donatılmıştır. Bu sistem, 450 km irtifadan yaklaşık 1 metre çözünürlükte görüntüler elde edebilme kapasitesine sahiptir. Pathfinder-1, BlackSky'ın planladığı 60 uyduluk

takımyıldızının ilk uydusu olarak, hızlı ve düşük maliyetli görüntüleme hizmetleri sunmayı hedeflemiştir [2,3].

3.1.7. Iceye-x2 uydusu

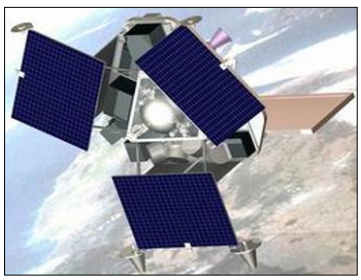
Finlandiya merkezli ICEYE şirketi tarafından geliştirilen ve 3 Aralık 2018'de SpaceX'in Falcon 9 roketiyle Vandenberg Hava Kuvvetleri Üssü'nden fırlatılan bir Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) uydusudur. Yaklaşık 85 kg ağırlığında ve 70 cm x 60 cm boyutlarında olan Şekil 3 7'de görseli bulunan bu uydu, X-bandında çalışan SAR sensörüyle donatılmıştır.



Şekil 3.7. ICEYE-X2 uydusu [3]

3.1.8. Zond-pp (mka-pn 1) uydusu

Rusya tarafından Dünya yüzeyinin özelliklerini incelemek amacıyla geliştirilmiş bir mikro uydudur. Temmuz 2012 tarihinde fırlatılan bu uydu, Lavochkin tarafından Roskosmos için üretilmiştir. Karat-Bus platformunu kullanan Şekil 3.8 de gösterilen Zond-PP, toplamda 156 kilogram ağırlığındadır. Zond-PP (MKA-PN 1) uydusu, Rokot-KM fırlatma aracı ile uzaya gönderilmiştir [2,3].



Şekil 3.8. Zond-PP (MKA-PN 1) uydusu [2,3]

3.1.9. Kompas-1 uydusu

Şekil 3.9 ‘da görseli bulunan Aralık 2001 tarihinde fırlatılan bu mikro uydu, Rusya'nın Dnipropetrovsk'taki Yuzhnoye tasarım bürosu tarafından geliştirilmiştir. Uydu, iyonosferdeki elektromanyetik dalgaları ve enerji yoğunluğunu ölçmek için çeşitli algılayıcılarla donatılmıştır. Toplam ağırlığı yaklaşık 77 kilogramdır ve boyutları yaklaşık 80 cm x 80 cm x 80 cm civarındadır. Düşük Dünya yörüngesinde (LEO), yaklaşık 500-600 kilometre yükseklikte faaliyet göstermiştir [2,3].



Şekil 3.9. Kompas-1 uydusu [3]

3.1.1. Mikro uydu projeleri ve başarı örnekleri literatür çalışması değerlendirilmesi

Bu tezde ele alınacak mikro uydu sınıfının, 100 kg altında ve ortalama 30 kg faydalı yük taşıyabilecek bir yapıda olmasının, incelenen mevcut uydularla paralellik gösterdiği değerlendirilmiştir. Ayrıca, Carbonite-1 ve Carbonite-2 uyduları ile AlSat-2A ve AlSat-2B uydularının aynı platformu kullandığı belirtilmiştir. Aynı platformların kullanılması, maliyet, üretim ve mühendislik süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle, platformların farklı faydalı yüklere uyumlu olması kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Diğer yandan, ICEYE-X2 uydusunun görev yükündeki değişiklik, SAR (Sentetik Açıklık Radarı) görev yükünün mikro uydularda kullanılabileceğine dair önemli bir örnek teşkil etmektedir. Bu durum, mikro uyduların görev esnekliği ve çok yönlülüğü açısından kayda değer bulunmaktadır.

ICEYE-X2 uydusunun görev yükündeki değişiklik, SAR (Sentetik Açıklık Radarı) görev yükünün mikro uydularda kullanılabileceğine dair önemli bir örnek teşkil etmektedir. Bu

durum, mikro uyduların görev esnekliği ve çok yönlülüğü açısından kayda değer bir gelişme olarak bulunmuştur.

3.2. Uyduların Mekanik Mimarisi ve Ekipman Yerleşimleri

Uzay görevlerinde kullanılan uyduların yapısal tasarımı, yalnızca mekanik gereksinimleri karşılamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel koruma, termal yönetim ve dayanıklılık gibi çok işlevli özellikler de sunar. Uydu yapısı, roketle uyumlu olacak şekilde tasarlanır ve uzaya çıkarken karşılaşacağı kuvvetlere dayanacak şekilde yapılandırılır.

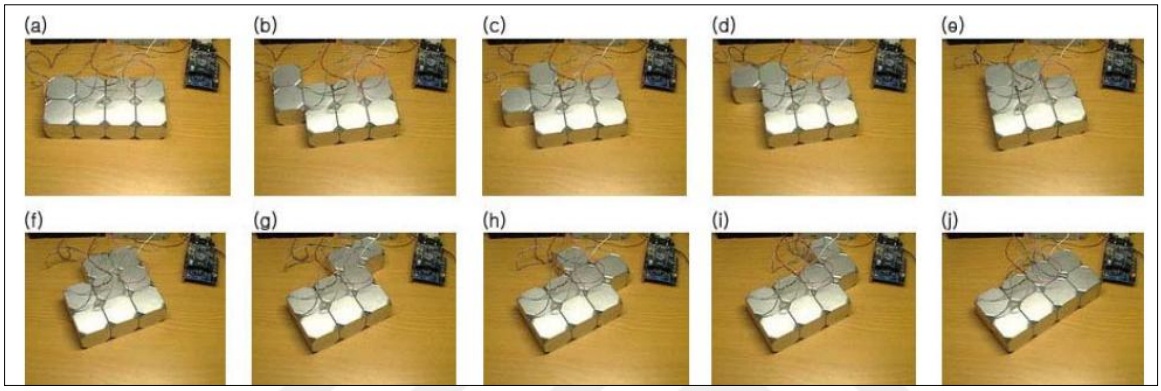
Uydu hacmi ve geometrisinin önemi

Uydunun gerçekleştireceği görev, uydu yapısal tasarımının ve şeklinin en önemli kıriterlerinden biridir. Örneğin, Madey vd. uydu yapısal tasarımları üzerinde yapmış oldukları çalışmada uyduların görevlerine ve bulundukları yörüngelere göre farklı tasarımlarlar belirlendinden bahsetmişlerdir. Çalışmaya göre gözlem uyduları, optik ekipmanların yerleşimini optimize edecek bir tasarıma sahip olurken, haberleşme uyduları, antenlerini doğru yönlendirebilecek bir yapı ile tasarlandığı vurgulanmıştır. Diğer taraftan alçak dünya yörüngesindeki uydular atmosferik sürtünme nedeniyle daha aerodinamik olabilirken, jeostasyoner uydular, sabit bir konumda duracak şekilde geniş antenlere ve güneş panellerine sahip olduklarını gözlemlemişlerdir. Yapısal formun, güç ve yörünge gereksinimlerinden de doğrudan etkilendiği belirtilmiştir. Örneğin, uydunun tek başına güneş pilleri tarafından sağlanabileceğinden daha fazla güce ihtiyacı olması durumunda, güneş panelleri gerekli olabileceği bu sebeplede daha geniş dış yüzey ihtiyacı doğacağını belirtmişlerdir [6].

Uyduların geometrik şekilleri üzerine yaptıkları çalışmada Manohar vd uydular küpler, dikdörtgenler, altıgenler ve silindirler dahil olmak üzere farklı şekillerde tasarlanacağı belirtilmiştir. Kübik şekilli küp uydular, fırlatma maliyetlerini düşüren hafif yapıları ve modülerlikleri nedeniyle özellikle popüler olmuştur [7].

Küp uydular kompakt ve modüler tasarımlarıyla modern uydu teknolojisinde önemli bir yer edinmiştir. An ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, EM-Cube adlı modüler bir robotik sistemin tasarımını, uygulamasını ve hareket algoritmalarını detaylandırmıştır. Bu

sistem, küp şeklindeki kendi kendine yeniden yapılandırılabilen modüllerden oluşmakta ve yüzeyler üzerinde kayarak hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında doğrusal yürüme, dışbükey ve içbükey geçişler gibi hareket türleri geliştirilmiş ve bu hareketler için algoritmalar tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar, EM-Cube modüllerinin farklı yüzeylerde başarılı bir şekilde hareket edebildiğini ve kendini yeniden yapılandırma yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 3.10' de görev bilincine göre yeniden modüler olarak yapılanabilen uydu kümesi gösterilmiştir [8].

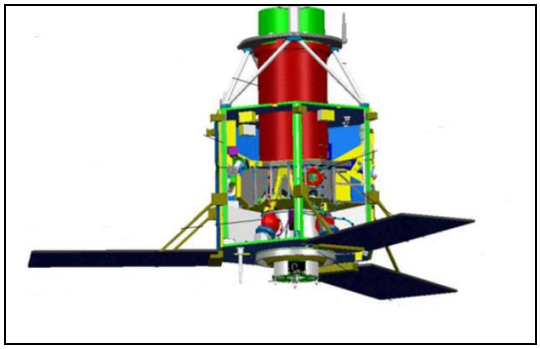


Şekil 3.10. Modüler olarak yeniden yapılanabilen küp uydu birliği [10]

Manohar ve ekibinin çalışmasında, altıgen uyduların birleştirilmesini kolaylaştırdığı ve dağıtım sırasında parçalarının daha düzenli bir şekilde sökülebildiği vurgulanmıştır. Uydunun silindirik bir hacme veya şekle sahip olması ise hava durumu uyduları gibi 360 derecelik kapsama alanı gerektiren uydular için ideal olduğu belirtilmiştir. Çalışmada büyük uydu yapısal tasarımlarında tercih edilen merkezi silindirin ana yapısının avantajlarınada değinilmiştir. Merkezi silindirin bulunduğu tasarımların uzun eksen boyunca düzenlenmiş bir yapıya sahip olmuştur. Daha büyük uydularda yaygın olan bu tasarımlarda, iç donanımları, yakıt tankları uzun eksene paralel yerleştirildiği ve genellikle iletişim uyduları için kullanıldığı vurgulanmıştır [7].

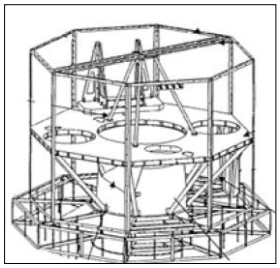
Pleiades uydularında kullanılan ve Gleyzes vd.'nin çalışmasında da bahsedilen uydu platformu, yüksek manevra kabiliyeti ve ağırlık optimizasyonu sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Çalışmalarında Şekil 3.11'de görseli bulunan uydu yapısal formu incelenmiş ve merkezde bulunan silindirik formun, yük dayanımı, ağırlık merkezi kontrolü gibi tasarım avantajları oluşturduğu belirtilmiştir. Silindirik tasarımın kontrol moment jiroskoplarını (CMG) verimli çalıştırarak hassas yönlendirme ve görüntüleme görevlerini

kolaylaştırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, fırlatma sırasında oluşan titreşim ve dış kuvvetlere karşı dayanıklılığı artırdığı ve yüklerin eşit dağılmasını sağladığı vurgulanmıştır [9].



Şekil 3.11. Merkezi silindir bir yapısala sahip uydu mekanik mimarisi [9]

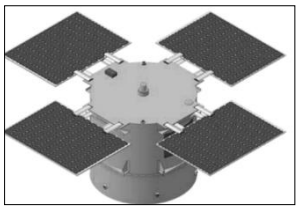
CONTOUR, kuyruklu yıldızların çekirdeklerine yakın geçişler yapmayı hedefleyen bir derin uzay sondası olarak hem dönme stabilizasyonu hem de üç eksenli kontrol yeteneklerine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Yasaka vd. yapmış oldukları çalışmada uydu, alüminyum konik bir merkezi kabuk kullanımının öneminden bahsetmişlerdir. Şekil 3.12 de gösterimi bulunan uydu yapısında birincil yapı, merkezi kabuk, ana güverte ve destek çubuklarından oluşturulmuş, ikincil yapı güneş paneli destek çerçevesi gibi bileşenleri içermiş ve birincil yapıya bağlanmıştır. Silindirik yapı fırlatma sırasında oluşan yükleri eşit şekilde dağıtarak yapısal bütünlüğü sağlamıştır. Tankların ve elektronik bileşenlerin merkezi eksene simetrik olarak yerleştirilmesinin, yük dengesini koruduğu ve fırlatma sırasında aşırı bükülme momentlerini engellediği gösterilmiştir [10].



Şekil 3.12. CONTOUR uydusu mekanik yapısı [10]

CROPIS uydusu, Alman Uzay Ajansı (DLR) tarafından biyolojik deneylerin gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilmiş ve tasarımın merkezinde Şekil 3.13 de görseli verilen silindirik bir yapı konumlandırılmıştır. Uydu, yaklaşık 1,1 metre yüksekliğe ve 1,0 metre çapa sahip kompakt bir formda tasarlanmış; mekanik dayanıklılığın artırılmasını

sağlamak için boyutlar optimize edilmiştir. Güneş panelleri ve diğer sistemler, uydunun dış yüzeyine yerleştirilmiş ve düşük ağırlıkta dayanıklı malzemelerle kullanılmıştır [11].



Şekil 3.13. CROPIS uydusu [11]

Risquez vd. yapmış olduğu çalışmada Gaia uydusunun yapısal mimarisini, 'Payload Modülü' (PLM) ve 'Servis Modülü' (SVM) olarak iki ana modülden oluşturulmuştur. Merkezi silindirik yapı, iki modülü destekleyerek ve uydunun ağırlık merkezini optimize ederek, fırlatma sırasında meydana gelen kuvvetlere dayanıklılık sağlamıştır. Ayrıca merkezi silindirik yapının uydunun enerji ve termal yönetim sistemleri ile uyumlu bir şekilde çalışarak operasyonel verimliliğini artırdığı gösterilmiştir [12].

Alt sistem ekipmanlarının uyduya yerleştirilmesi

Uyduların mekanik mimarisi ve yapısal tasarımı, alt sistem ekipmanlarının yerleşim düzenine göe şekillenmektedir. Bu süreçte, alt sistem ekipmanlarının özel gereksinimleri ön planda tutulur. Her bir ekipmanın boyutları, ağırlığı, termal ve elektromanyetik özellikleri gibi teknik özellikleri, uydunun içerisine yerleştirilirken dikkate alınmalıdır. Alt sistemlerin yerleşimi, sadece mekanik uyumu değil, aynı zamanda enerji akışı, ısı kontrolü ve iletişim verimliliği gibi önemli işlevleri de etkiler.

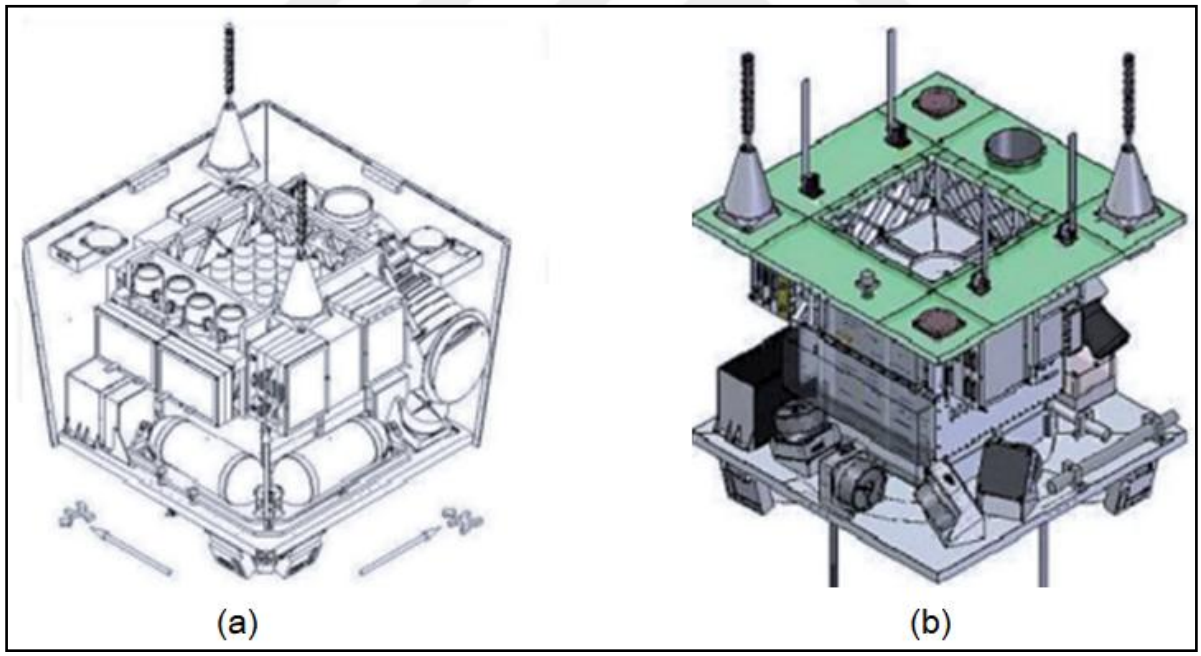
Ori ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, uydu içerisindeki ekipmanların yerleşimi, modüler tasarım yaklaşımı temel alınarak düzenlenmiştir. Uydu, gövde modülü, yük modülü ve itki modülü olmak üzere üç ana bileşene ayrılmıştır. Yük modülü, gövde modülünün üst kısmına yerleştirilmiş ve mekanik, elektriksel ve termal ara yüzlerle diğer modüllerle birleştirilmiştir. Bu yapı, görev yükü ekipmanlarının kolayca değişmesine ve görev gereksinimlerine göre adapte edilmesine olanak tanımıştır. Gövde modülünde ekipmanların yerleşimi kompakt bir şekilde tasarlanmış, gerektiğinde yükseklik artırılarak ek ekipmanların entegrasyonu sağlanmıştır [13].

Zeigler vd. üniversite düzeyinde bir mikro uydu tasarım, üretim, montaj ve entegrasyon süreci çalışmışlardır. Çalışma, özellikle UMR SAT adlı mikro uydunun bileşen yerleşimi, yapı tasarımı ve entegrasyon süreçlerini kapsamıştır. Uydu ekipmanlarının yerleşimi, yapı tasarımı, görev gereksinimleri ve sınırlamaları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Güneş panellerinin etkin kullanımı ve bileşenlerin erişilebilirliği tasarım mimarisinde göz önünde bulundurulmuştur. Uydu içindeki ekipmanların yerleşimi sırasında, termal sensörlerin yerleşimi, manyetik bobinlerin düzenlenmesi, itki sistemi tankının konumu ve GPS antenlerinin görüş alanı gibi çok özel gereksinimler dikkate alınmıştır. İtki sistemi ve diğer kritik bileşenlerin merkez ağırlık noktasına göre düzenlenmesiyle uydu denge ve performansı optimize edilmiştir [14].

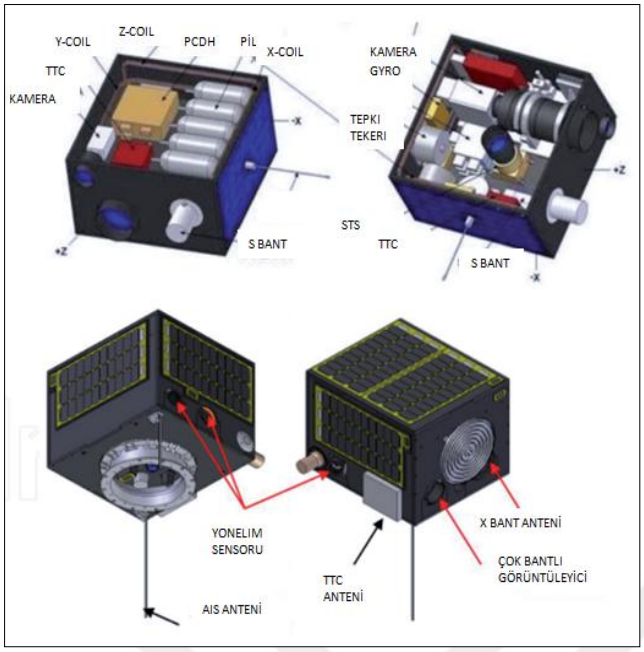
Ravanbakhsh vd. yapmış olduğu çalışmada, uydu ekipmanlarının yerleşimi modüler bir yapı kullanılarak optimize edilmiştir. Uydu, dört ana tepsiden oluşan bir konfigürasyona sahiptir: Tepsi A, bataryalar ve enerji yönetim elektroniğini barındırmış, Tepsi B komuta ve veri işleme ile iletişim alt sistemlerini içermiştir. Tepsi C, görev yükleri için ayrılmıştır ve tepsi D, dış sensörler ile iletişim antenlerini barındırmıştır. Yapının toplam boyutları ve kütlesi, fırlatma gereksinimlerine uyacak şekilde optimize edilmiş, 50×50×50 cm boyutları ve maksimum 50 kg kütle seçilmiştir. Bu yapılandırma, görev yüküne daha fazla hacim ve kütle sağlarken yapısal dayanımı korumak açısından ideal bulunmuştur [15].

Triharjanto vd. yapmış olduğu çalışmada, mikro uydu ekipmanlarının yerleşimi ve sistem tasarımı iki farklı yaklaşım üzerinden incelenmiştir. Her iki yaklaşımda da ekipman yerleşimi, görev yükü hacmi, kütle dağılımı ve dinamik gereksinimler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Her iki yaklaşımda da uydu ekipmanlarının yerleşimi ve yapı tasarımı, misyon gereksinimlerine ve mevcut teknolojilere göre farklılık göstermiştir. Surrey üniversitesinin yaklaşımında, uydu elektronik sistemleri genellikle alüminyumdan yapılmış elektronik tepsilere yerleştirilmiştir. Bu tepsiler, hem yük taşıyıcı yapı olarak görev yapmakta hem de diğer bileşenlerin (tepkime tekerlekleri, tutum kontrol sensörleri vb.) düzenlenmesine olanak tanımıştır. Ekipman yerleşimi sonrası, uydu bileşenleri güneş panelleri veya daha hafif dış panellerle kaplanmıştır. Güneş panelleri için maksimum alan kullanılmış ve genellikle maksimum hacim kullanımını hedeflemiştir. Enerji gereksinimleri yüksek olan Dünya gözlemi gibi görevlerde tercih edilmiştir. Türkiye'nin ilk yerli üretim mikro uydusu olan Şekil 3.14 de görseli verilen RASAT, Surrey üniversitesinin tasarım yaklaşımına dayalı olarak geliştirilmiştir. Berlin teknik

üniversitesinin yaklaşımında ise, ekipmanlar modüler kutular içinde yerleştirilmiştir. Bu kutular, genellikle alüminyum plakalardan yapılmış ve yük taşıyıcı yapı olarak kullanılmıştır. LAPAN-TUBSAT gibi uydularda, kutular alt ve üst bölmelerde entegre edilmiştir. Bu yapı, uyduya yüksek yoğunluklu bir tasarım sunmuş ve ekipmanların düzgün bir şekilde korunmasını sağlamıştır. Solar paneller, doğrudan kutuların dışına monte edilmiştir. Detaylı görselleri Şekil 3.15'de verilen LAPAN-IPB ve LAPAN-TUBSAT gibi uydularında, düşük çözünürlüklü video görüntüleme için bu yaklaşım tercih edilmiştir. Uzun süreli ve enerji gereksinimi yüksek görevler için Surrey üniversitesi yaklaşımının daha uygun olduğu, kompaktlığın ön planda olduğu görevlerde TU Berlin yaklaşımının tercih edilmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Düşük bütçeli ve basit görevlerde ise her iki yaklaşımın da esnek bir şekilde uygulanabileceği, ancak TU Berlin'in modüler kutu tasarımının bütçe dostu bir çözüm sunduğu gösterilmiştir. Görev yükü, enerji gereksinimleri, bütçe ve fırlatma yöntemi gibi faktörlerin, bu iki yaklaşım arasında seçim yapılırken belirleyici unsurlar olduğu belirtilmiştir [16].



Şekil 3.14. Bilsat (a) ve RASAT (b) uyduları [16]



Şekil 3.15. LAPAN uyduları ekipman yerleşimi [16]

Lura vd yapmış oldukları çalışmada, BIRD mikro uydusunun termal kontrol sistemi (TCS) ve ekipman yerleşimi detaylandırılmıştır. Uydu, kızılötesi (IR) algılama için tasarlanmış ve toplam 92 kg ağırlığında, 550x610x620 mm boyutlarında bir yapıdadır. Uydu içindeki ekipmanların yerleşimi ve termal kontrol gereksinimleri hem görev yükü platformunun hem de uydu sisteminin yapısal ve termal bütünlüğünü koruyacak şekilde üç ana bölüme ayrılarak planlanmıştır: yük platformu (bilimsel cihazlar için temel), elektronik segment (görev yükü ve uydu elektroniği) ve hizmet segmenti (bataryalar ve tutum kontrol sistemi bileşenleri). Görev yükü platformu, sabit bir yapıya sahip sandviç bir yapı olarak geliştirilerek, yüksek termal iletkenlik ve dayanım sağlandığı gösterilmiştir [17].

Özetle, bir uydunun tasarımı; yörünge gereksinimleri, termal yönetim, alt sistem entegrasyonu, yapısal bütünlük ve bilimsel görev gereksinimlerinin uyumluluğu gibi birden fazla parametrenin etkileşimiyle şekillenir. Bu parametrelerin her biri, optimum performans ve verimlilik sağlayan bir uydu tasarımı için titizlikle analiz edilmelidir.

Literatür incelemeleri, tez kapsamında geliştirilmesi planlanan, 100 kg altında ve 30 kg'a kadar optik görüntüleme ekipmanı taşıyacak bir mikro uydunun mekanik mimarisi hakkında önemli bilgiler sunmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda, kamera sistemine entegrasyon sağlayacak gerekli uydu alt sistemleri tespit edilmiştir.

Büyük ölçekli uydularda silindirik yapılar, yapısal dayanım ve yük dağılımı için tercih edilirken, mikro uydu tasarımlarında bu yapıların etkin bir şekilde kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, çalışma kapsamında geliştirilecek mikro uydu yapısında silindirik tasarımdan kaçınılacak, bunun yerine dörtgen prizmalar gibi daha modüler ve optimize edilmiş geometriye sahip yapılar tercih edilmiştir.

Literatür incelemelerinde, alt sistem ekipmanlarının uydu gövdesinin merkezine entegre edilebileceği gibi, yapısal paneller üzerine de yerleştirilebileceği gösterilmiştir. Uydu panelleri üzerine entegre edilen ekipmanların, modülerlik ve bakım kolaylığı sağladığı için tercih edildiği belirlenmiştir. Ek olarak, incelemeler, uyduların katmanlı bir yapıya sahip olduğunu ve bu yapının modüler tasarımları desteklediğini ortaya koymuştur. Bu çerçevede, geliştirilecek uydu yapısının iki ana bileşene ayrılması planlanmıştır. Aviyonik bölüm (güç yönetimi, haberleşme ve kontrol sistemleri) ve faydalı yük bölümü (optik kamera ve ilgili sensör sistemleri) olarak iki bölüm planlanmıştır.

3.3. Uydularda Fırlatıcı Yüklerine Dayanım ve Tasarım Doğrulama

Uydu, kullanım ömrü boyunca zorlu koşullarla karşı karşıya kalır. Uydu yapısal malzemesi, sertlik, tokluk, süneklik ve yorulma dayanımı gereksinimlerini karşılamalıdır. Fırlatma, dağıtım ve hizmet sırasında ortaya çıkan statik, dinamik ve termal gerilmelere dayanabilmesi için yapı ve destek mekanizmaları bu gereklilikleri karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. Uçuş boyunca yapı, uyduda bulunan hassas elektronik bileşenleri istenmeyen hasarlardan korumalıdır. Bu kısıtlamaların tamamı, yapısal tasarımın erken aşamalarında dikkate alınmalıdır.

Reda vd. uydu mekanik yapısını üç kategoriye ayırmışlardır: birincil yapı veya ana yapı; ikincil yapı ve esnek uzantılar. Ana yük ve ona eşlik eden ekipmanlar, birincil yapıya birkaç noktadan bağlanabilir olduğunu ve ana yapı başarısız olduğunda, uydunun tamamen yok olduğunu belirtmişlerdir. İkincil yapıyı, güneş panelleri, termal battaniyeler ve ekipman yönelimlerini destekleyen parçalar olarak nitelendirmişlerdir. İkincil yapının arızalanması uydu yapısının bütünlüğünü etkilemediği, ancak termal kontrolü etkilerse veya optik bir yolu keserse görev üzerinde önemli etkiler yaratabileceği vurgulanmıştır [18].

Ravanbakhsh vd. yapmış olduğu çalışmada, tasarım sürecinde, fırlatma sırasında oluşabilecek statik yükler ve dinamik titreşimler göz önünde bulundurulmuş, Ariane ASAP5 fırlatma sistemi için belirlenen gereksinimler temel alınmıştır. Statik analizlerde burkulma direnci kritik tasarım kriteri olarak ele alınmış ve tüm elemanlar için %50 güvenlik marjı sağlanmıştır. Dinamik analizlerde, uydu uzunlamasına eksende minimum 90 Hz, yanal eksende ise minimum 45 Hz doğal frekansa ulaşacak şekilde tasarlanmıştır [15].

SRMSAT-2 mikro uydusu üzerine Gupta vd. yapmış olduğu çalışmada, yapısal tasarımı ve dayanıklılığı incelenmiştir. Yapısal analizlerde, mikro uydunun fırlatma sırasındaki sanki-statik yükler ve dinamik titreşimlere karşı dayanıklılığı test edilmiştir. Tasarımda, alüminyum-6061 T6 isogrid plakalarla kullanılmıştır. 70 kg ağırlığındaki uydu yapısına sanki-statik yük analizlerinde, ISRO'nun fırlatıcı sistemi gereksinimleri göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre ±13,75g eksensel ve ±7,5g yanal ivme yükleri uygulanmıştır. Analiz sonuçlarında panellerde en yüksek gerilme değeri 4.48 MPa görülmüş, yapının elastik sınırlar içinde kaldığını gösterilmiştir. Modal analizde, uydunun temel doğal frekansları belirlenmiş (yatay: 159 Hz, eksensel: 364 Hz) ve fırlatma aracının titreşim frekanslarıyla rezonans oluşturmadığı belirlenmiştir. Dinamik testlerde, rastgele titreşim analizleri 20-2000 Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve şok yükleme testlerinde yapı 1000 g'ye kadar çıkan ivmelere dayanım göstermiştir. Yapı, bu yükler altında herhangi bir plastik deformasyon belirtisi göstermemiş ve deneysel test sonuçları, sonlu elemanlar analizleriyle uyumlu bulunmuştur [19].

Mongkolves vd. yapmış olduğu çalışmada TSC-1 mikro uydusunun Falcon 9 fırlatma aracı titreşim profiline dayalı olarak yapısal dayanımı analiz edilmiştir. TSC-1 mikro uydusu, 730 mm × 700 mm × 600 mm boyutlarında tasarlanmış olup, yaklaşık 50 kg ağırlığındadır. Tasarım, yatay ve modüler olmak üzere iki farklı yerleşim düzeni üzerine kurulmuş ve bunların statik, dinamik ve rastgele titreşim yükleri altındaki performansları karşılaştırılmıştır. Analizler, alüminyum 7075 malzemesi (akma dayanımı: 505 MPa) ile yapılan yapının sonlu elemanlar (FEA) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Statik yükleme analizinde, ±7g yanal ve ±13,75g eksensel ivme yükleri uygulanmıştır. Yatay yerleşimde maksimum Von-Mises gerilmesi 59,512 MPa ve maksimum sapma 1,437 mm olarak ölçülürken, modüler yerleşimde bu değerler sırasıyla 13,631 MPa ve 0,5789 mm olmuştur. Rastgele titreşim testlerinde 20-2000 Hz aralığında yükleme yapılmış ve yatay

yerleşimde maksimum 41,25 MPa Von-Mises gerilmesi, modüler yerleşimde ise 19,42 MPa gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Modal analiz sonuçları, yatay tasarımın ilk üç modunda rezonans riski taşıdığını gösterirken, modüler tasarımda tüm doğal frekansların 35 Hz limitinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Şok testlerinde, yapılar 1000 g'ye kadar ivme yükleri altında değerlendirilmiş ve modüler tasarımda daha düşük gerilme ve deformasyon oranları elde edilmiştir. Modüler tasarım, rezonans risklerini en aza indirirken, daha düşük gerilme ve deformasyon seviyeleri ile öne çıkarttığı gözlenmiştir [20].

Lima vd. yapmış olduğu çalışmada araştırmacılar, bir 2U küp uydunun sanki-statik yükler altındaki dinamik yapısal davranışını incelemek amacıyla kapsamlı bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Küp uydunun tasarımı sırasında, yüklerin ve malzeme seçimlerinin yapısal özellikler üzerindeki etkilerini anlamak için bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemlerinden yararlanmışlardır. Modal analizlerle, küp uydunun baskılı devre kartı (PCB) içermesi durumunda yapısal mod frekanslarında meydana gelen değişiklikler gözlemlenmiştir. Ayrıca, farklı alüminyum alaşımlarının (5083-O ve 6061-T6) kullanımı durumunda titreşim davranışı ve deformasyon özelliklerini incelemişlerdir [21].Araştırmacılar, PCB'nin varlığının doğal frekanslar üzerinde önemli etkiler yarattığını ve bu durumun titreşim modlarının dağılımını değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Malzeme seçimleri, özellikle 5083-O ve 6061-T6 alaşımlarının kullanımı karşılaştırılmış ve 5083-O alaşımının uydu yapılarında yaygın kullanılan 6061-T6'ya benzer mekanik özellikler sunduğu doğrulanmıştır. Simülasyonlar, yapının farklı yükleme koşullarında %2'yi aşmayan bir hata payı ile dayanıklılık sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, küp uydunun titreşim şekillerinin çoğunlukla elektronik devre kartları tarafından kontrol edildiği ve bu bileşenlerin yapının en az katılık kısmını oluşturduğu ortaya konmuştur [21].

Abdelal vd. yapmış olduğu çalışmada, mikro-uydu yapısının fırlatma sırasında maruz kaldığı dinamik yükler altındaki dayanımı analiz edilmiştir. Çalışma, özellikle temel birim yapısındaki çatlakların tespiti ve çözümüne odaklanmıştır. Fırlatma sırasında, uydu yapısında meydana gelen titreşimlerin, belirli bölgelerde çatlaklara yol açtığı gözlemlenmiştir. Dinamik testler sırasında, uydu bileşenlerinin montaj noktalarındaki titreşim transfer katsayıları belirlenmiş ve bu titreşimlerin temel birim plakalarında yorgunluğa sebep olduğu anlaşılmıştır [22].

Harmonik analiz sonuçları, titreşim yüklerinin yapıda plastik deformasyonlara neden olmadığını, ancak yüksek gerilme konsantrasyonlarının çatlak oluşumuna yol açabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular üzerine, temel birim plakalarının kalınlıkları artırılmış ve gerilme konsantrasyonlarının azaltılması amacıyla yapısal iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Yeniden yapılan testler, geliştirilmiş tasarımın titreşim yüklerine karşı dayanıklılığını kanıtlamıştır. Çalışma, ayrıca düşük döngülü yorgunluk analizi ile malzeme deformasyonunun sınır değerler içinde kaldığını ve çatlak büyümesinin durdurulduğunu göstermiştir [22].

MYSAT-1 isimli bir 1U Küp uydu üzerinde Alhammadi vd. yaptığı çalışmada uydunun fırlatıcı yüklerine dayanımı detaylı olarak analiz edilmiştir. Küp uydu yapısının, fırlatma sırasında karşılaşacağı sanki-statik ve dinamik yükler (rastgele titreşim, şok yükleri) altında yapısal bütünlüğünü koruyup koruyamayacağı değerlendirilmiştir. Analizler, ABAQUS yazılımıyla sonlu elemanlar analizleri (FEA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sanki-statik yükleme analizinde, X, Y ve Z eksenlerinde 13g'lik ivmelenme uygulanmış ve maksimum gerilme değerleri sırasıyla 24,05 MPa, 11,29 MPa ve 29,01 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu gerilmeler, yapının elastik sınırlarının altında kalmış ve plastik deformasyon riskinin olmadığını göstermiştir. Maksimum sapmalar ise 0,008 mm ile 0,1 mm arasında değişmiştir [23].

Dinamik testlerde, rastgele titreşim analizleri 20-2000 Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve yapının ilk doğal frekansı 204 Hz olarak belirlenmiştir. Bu frekans değeri, fırlatma sırasında meydana gelen 100 Hz civarındaki rezonanslardan kaçınmak için yeterli bir mesafeye sahip olduğu belirlenmiştir. Rastgele titreşim testinde, genel RMS (gRMS) değeri 9,47 g olarak uygulanmış ve bu yükleme altında yapı herhangi bir mekanik hasar belirtisi göstermemiştir. Şok testlerinde ise 1100 g'ye kadar tepe şok yükleri uygulanmış ve yapı bütünlüğü korunmuştur. Deneysel testlerle simülasyon sonuçları kıyaslandığında, doğal frekanslar ve titreşim tepkileri arasında yüksek bir uyum tespit edilmiştir. Ayrıca, titreşim ve şok testlerinden önce ve sonra yapılan düşük seviyeli sine tarama testleri, küp uydunun yapısal bütünlüğünün korunduğunu doğrulamıştır [23].

Fraile vd. yapmış olduğu çalışmada, bir küp şekilli mikro uydunun fırlatma sırasında maruz kaldığı titreşimlere dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Uydu, 30 cm x 30 cm x 30 cm boyutlarında ve toplamda 12 kg ağırlığında tasarlanmıştır. Fırlatıcı

yükleri altında yapının mekanik dayanıklılığını sağlamak için hem statik hem de dinamik analizler yapılmıştır. Yapı, CATIA kullanılarak modellenmiş ve ANSYS ile sonlu elemanlar analizi (FEA) gerçekleştirilmiştir. Statik analizlerde ±7,5g yanal ve ±13,75g eksensel ivme yükleri uygulanmıştır. Maksimum Von Mises gerilmesi 25 MPa olarak hesaplanmış ve bu değer, kullanılan alüminyum alaşımın akma gerilmesinin altında kalmıştır. Maksimum deformasyon ise 0,15 mm olarak tespit edilmiştir [24].

Modal analizde, yapının temel doğal frekansı 115 Hz olarak belirlenmiş ve bu frekans, fırlatıcı sistemlerin gereksinimlerini karşılamıştır. Dinamik analizlerde, rastgele titreşim testleri 20-2000 Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve yapı, 9,47 gRMS yük altında rezonans davranışı göstermemiştir. Bu analiz sırasında, yapıya uygulanan dinamik yükler altında gerilme ve deformasyon dağılımları incelenmiş, özellikle bağlantı noktalarındaki yüksek gerilme bölgeleri belirlenmiştir. Kritik bileşenlerin bu bölgelerden etkilenmemesi için yük transfer yolları optimize edilmiştir. Yük aktarımında, yüklerin kritik bileşenlere ulaşmadan yapısal elemanlar arasında etkin bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla destek elemanları eklenmiş ve malzeme kalınlıkları yeniden düzenlenmiştir. Bunun yanı sıra, titreşim enerjisinin bir kısmını sönümleme eden sönümleyici bağlantı elemanları kritik bağlantı noktalarına eklenerek titreşimlerin bileşenlere doğrudan aktarılması engellenmiştir. Harmonik analizler, yapının belirli frekanslarda deformasyon davranışlarını ortaya koyarak, yüksek frekanslı titreşimlere karşı optimizasyon çalışmalarına yön vermiştir. Bu yaklaşım, yapısal dayanıklılığı artırarak hem rezonans riskini minimize etmiş hem de kritik bileşenlerin güvenliğini sağlamıştır. Bu detaylı analiz ve optimizasyon süreçleri, uydu yapısının fırlatma sırasında karşılaşacağı koşullara dayanıklılığını artırmıştır [24].

San Jose State Üniversitesi'ndeki lisans öğrencileri tarafından geliştirilen Spartnik mikro uydu, yaklaşık 37 kg ağırlığında ve 50 cm çapında, 17,11 inç yüksekliğinde bir yapıya sahiptir. Bu çalışma, uyduyu destekleyen yapının fırlatma sırasındaki dinamik yükler (rastgele titreşim ve şok yükleri) ve sanki-statik yükler altındaki dayanıklılığını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Uydunun tüm yapısal elemanları, 6061-T6 alüminyumdan üretilmiş bal peteği panellerle güçlendirilmiştir. Rastgele titreşim analizlerinde, 20-2000 Hz frekans aralığında güç spektral yoğunluğu (PSD) ölçümleri yapılmış ve maksimum 50 MPa gerilme değerleri kaydedilmiştir. Şok yükleme testlerinde, yapı 1000 g'ye kadar çıkan tepe ivmeleri tolere etmiş ve kritik bölgelerde hiçbir plastik

deformasyon gözlemlenmemiştir. Sanki-statik yüklemelerde ±12 g eksensel ve ±6 g yanal ivmeler uygulanmış, maksimum deformasyon 0,5 mm olarak hesaplanmıştır. Tüm testler, fırlatma sırasında yapısal bütünlüğün korunduğunu göstermiştir [25].

Yılmaz ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, uyduların fırlatma sırasında maruz kaldıkları sanki-statik yükler altında yapısal dayanıklılıklarını değerlendirmek için kullanılan test yöntemleri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında statik ve dinamik yüklerin birleştirilmesiyle oluşturulan eşdeğer statik yükler (sanki-statik yükler), fırlatma sırasında uydunun karşılaşabileceği aerodinamik ve mekanik ivmelenmelerin etkilerini simüle etmek için uygulanmıştır. Mikro uyduların yapısal bütünlüğünü sağlamak amacıyla üç temel test yöntemi incelenmiştir. Sanki-statik testlerde, fırlatma aracının titreşim ve ivme profilleri göz önünde bulundurularak, düşük frekansta sinus titreşimler oluşturulmuş ve bu yükler hem eksensel hem de yanal yönde uygulanmıştır. Test sonuçlarında, yapısal yüklerin uydu bileşenleri üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiş ve maksimum deformasyon değerlerinin kritik sınırların altında olduğu görülmüştür. Özellikle titreşim adaptörlerine monte edilen gerilme ölçerler ve ivmeölçerler sayesinde hassas ölçümler yapılmış ve simülasyon verileriyle yüksek uyum sağlanmıştır. Şok ve rastgele titreşim yükleri altında, fırlatma sırasında uydunun yapısal bütünlüğünün korunduğu doğrulanmıştır [26].

Ontaç tez çalışmasında, TÜBİTAK UZAY tarafından geliştirilen RASAT mikro uydunun fırlatma sırasında maruz kalabileceği titreşim kaynaklı yükler altındaki yapısal dayanımı FEA kullanılarak incelenmiştir. Mikro uydu, yaklaşık 105 kg ağırlığında ve 685 km irtifada kutupsal güneş eşzamanlı yörüngeye yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Yapının analizinde, fırlatıcı sistemlerden kaynaklanan düşük frekanslı sinüzoidal titreşimler, yüksek frekanslı rastgele titreşimler ve şok yükleri gibi kritik yükleme senaryoları dikkate alınmıştır. Rastgele titreşim analizlerinde, 20-2000 Hz frekans aralığında uygulanan güç spektral yoğunluğu (PSD) ve 6,5 gRMS yükleme kullanılarak mikro uydunun yapısal deformasyonları ve gerilme davranışları değerlendirilmiştir. Yapısal analiz sonuçları, en yüksek Von Mises gerilmesinin 180 MPa değerinde olduğunu ve bu değerin alüminyum 7075-T6 malzemesinin akma dayanımı altında kaldığını göstermiştir. Ayrıca, modal analiz sonuçları, uydunun temel doğal frekansının (yatay: 45 Hz, eksensel: 90 Hz) fırlatıcı sistemlerin titreşim frekanslarından uzak olduğunu ve rezonans riskinin minimize edildiğini ortaya koymuştur [27].

Çekiç hazırlamış olduğu tez çalışmasında, bir iletişim uydusunun titreşim testleri ve sonlu elemanlar modeli (FEM) arasındaki korelasyon incelenmiş ve modelin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Uydu yapısı, MSC/PATRAN ve MSC/NASTRAN yazılımları kullanılarak modellenmiş ve doğal frekanslar ile frekans tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Titreşim test sonuçları, HYPERGRAPH yazılımı aracılığıyla analiz edilmiş ve elde edilen veriler, FORTRAN programlama dili ile geliştirilmiş modal güvence kriterleri ile kıyaslanmıştır. Bu süreçte, hata duyarlılık değerlendirmesi yapılarak modelin ilgili frekanslarda iyileştirilmesi sağlanmıştır [28].

Tezde, sine titreşim testleri sırasında 5-100 Hz frekans aralığında uydunun farklı bileşenlerindeki ivmeölçer tepkileri ölçülmüş ve test sonuçları ile FEM arasında güçlü bir korelasyon sağlanmıştır. En yüksek doğal frekansların 48,26 Hz ve 77,33 Hz değerlerinde olduğu ve bu değerlerin fırlatma sırasında rezonans riskini en aza indirecek şekilde optimize edildiği gösterilmiştir. Yapı üzerindeki titreşim transfer fonksiyonları analiz edilerek, test ve analiz sonuçları arasındaki uyum doğrulanmıştır. İlgili parametrelerin değişimi ile model iyileştirme süreçleri birkaç iterasyonda gerçekleştirilmiştir [28].

Literatür incelemeleri sonucunda, uyduların fırlatma sırasında maruz kaldıkları statik ve dinamik yapısal tasarımın temel gereksinimlerini belirlediği tespit edilmiştir. Bu gereksinimlerin karşılanıp karşılanmadığını doğrulamak amacıyla; sanki-statik yükleme, dinamik titreşim analizleri, modal analiz, rastgele titreşim analizleri ve şok testleri gibi yapısal doğrulama yöntemleri kullanılmış ve bu analizler testlerle doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar, uydu yapılarının burkulma, gerilme, deformasyon ve rezonans gibi kritik yapısal risklere karşı test edilmesi yoluyla yapısal bütünlüğün korunduğunu ve güvenlik marjlarının sağlandığını göstermiştir.

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile desteklenen bu testler, malzeme seçimleri, bileşen yerleşim düzenleri ve yapısal konfigürasyonlar gibi faktörlerin, uydu yapısının dayanıklılığı üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuş ve tasarımların fırlatma sırasında karşılaşılacak yük koşullarına karşı optimize edildiğini doğrulamıştır. Tez çalışmasında, hem geleneksel üretim yöntemleriyle imal edilen hem de yapısal olarak optimize edilmiş uydu tasarımlarının söz konusu gereksinimleri karşılayıp karşılamadığı değerlendirilmiştir.

3.4. Uydu Yapılarında Yapılan Kütle Azaltımı ve Optimizasyon

Baiomy ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, mikro uydu yapısının kütlesini azaltırken yapısal dayanıklılığı koruma amacıyla farklı delik desenlerinin temel doğal frekans (FNF) üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırmacılar, Al-Azhar Üniversitesi mikro uydu modeli üzerinde, çeşitli perforasyon desenlerinin (üçgen, dikdörtgen, altıgen, elmas ve izogrit) kütle ve modal sertlik performanslarını incelemişlerdir. Yapı hem statik hem de dinamik yükler altında test edilerek, delik desenlerinin yapısal davranışı nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. Çalışma, delik desenlerinin kütleyi %39 oranında azaltırken, temel doğal frekansı koruma veya artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [29].

Ravanbakhsh tez çalışmasında, UPMSat-2 mikrosatellitinin fırlatıcı yüklerine dayanımı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Çalışma, statik ve dinamik modellerin birleştirilmesiyle mikrosatellit yapısal tasarımı için bir boyutlandırma aracı geliştirilmesine odaklanmıştır. Statik analizlerde, mikrosatellit yapı elemanlarının maksimum gerilme, deformasyon ve burkulma dayanımları değerlendirilmiş; dinamik analizlerde ise doğal frekanslar tahmin edilmiştir. Analizlerde, ASAP5 yardımcı yük taşıma platformunun sertlik ve dayanım gereksinimlerine uyum sağlanmıştır. Çalışma, hem en düşük toplam uydu kütlesi hem de bilinmeyen görev yükü için maksimum kütle tahsisatı arasındaki çelişkili hedefleri optimize etmeyi amaçlamış, genetik algoritmalarla çok amaçlı optimizasyon uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, toplam uydu kütlesinin artmasıyla doğal frekansların düştüğünü ve yapı kütle bütçesinin azaldığını göstermiştir. Bu durum, görev yükü için daha fazla kütle tahsisatı sağlarken, aynı zamanda fırlatma maliyetlerini artırabilecek bir tasarım zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, mikrosatellit projeleri için çok disiplinli tasarım optimizasyonunun erken tasarım aşamalarında bile ne kadar güçlü bir araç olabileceğini ortaya koymuştur [30].

Anklesaria çalışmasında, MR SAT ve MRS SAT mikro uydularının yapısal analiz ve çevresel testleri ele alınmış, FEA ve fiziksel testlerle modelleme doğrulanmıştır. FEA, statik analizler ile yapının yükleme durumlarındaki maksimum gerilme ve deformasyonlarını öngörmek için kullanılmış ve bu sonuçlar fiziksel testlerle kıyaslanmıştır. Analizler, yapının kritik bölgelerinde FEA ile öngörülen yük sınırlarının, fiziksel testlerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Modal analizler ile doğal frekanslar belirlenmiş ve lansman aracının titreşim frekanslarıyla karşılaştırılmıştır; sonuçlar,

rezonans davranışlarının güvenilir şekilde analiz edildiğini ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca izogrit plakaların yapısal dayanıklılık ve maliyet avantajları değerlendirilmiştir. Monokok yapılarla kıyaslandığında, izogrit plakalar daha düşük kütle ve maliyetle benzer dayanıklılık sağlamıştır [31].

Mikro uydu yapılarında kütle optimizasyonuna yönelik çalışmalar, farklı perforasyon desenlerinin yapısal dayanım ve doğal frekans üzerindeki etkilerini incelemiş ve belirli desenlerin doğal frekansı koruyarak kütle azaltımı sağladığını ortaya koymuştur. Statik ve dinamik analizlerin çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle birleştirilmesi sonucunda, minimum yapı kütlesi ile maksimum görev yükü tahsisi arasında optimal bir denge sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi (FEM) ile desteklenen bu çalışmalar, fiziksel testlerle doğrulanarak izogrit yapıların düşük kütle ve maliyetle yüksek yapısal dayanıklılık sunduğunu göstermiştir.

Tez çalışmasında literatürde yaygın olarak tercih edilen yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip sandviç panel teknolojisinden farklı olarak, daha düşük kütleye sahip alternatif bir yapısal tasarım geliştirilmesi hedeflenmiştir. Önceki çalışmalarda izogrit yapıların optimizasyonu sırasında panel üzerindeki gerilim veya enerji dağılımı göz ardı edilmiştir. Bu araştırmada, panellerin yüksek gerilim veya enerji yoğunluğuna maruz kalan kritik bölgelerinde malzeme yoğunluğu artırılmış, yapısal bütünlüğü koruyan ve kütle performansını iyileştiren optimize edilmiş bir tasarım elde edilmiştir.

3.5. Uydu Yapılarında Eklemeli İmalat Çalışmaları

Gaudenzi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma, EI teknolojilerinin uydu sistemlerinde tasarım özgürlüğü, maliyet etkinliği ve üretim basitleştirilmesi açısından dönüştürücü bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır. Küçük uyduların yapısal tasarımı ve üretimi için eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu fırsatları incelemekte ve bu teknolojilerin geleneksel uydu tasarım süreçlerine nasıl devrimsel bir değişim getirdiğini vurgulamıştır. Özellikle, küp uydu sınıfı uydular için, sistem karmaşıklığını azaltan ve alt sistemlerin entegrasyonunu kolaylaştıran yenilikçi bir yapısal konfigürasyon önerilmiştir. Küp uydu için topoloji optimizasyonu (TO) yöntemleriyle yapılan analizlerin sonuçlarını paylaşılmış ve yeni bir montaj stratejisi önerisi sunulmuştur. Bu strateji, uydu yapısının iki ana parçaya indirgenmesiyle, entegrasyon ve test süreçlerini hızlandırmıştır. Makalede, bu tasarım

yaklaşımlarının sadece küçük uydular için değil, aynı zamanda daha büyük uydu sınıflarına da uygulanabileceği ifade etmiştir [32].

Zhang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, çok işlevli yapıların (MFS-Multifunctional Structures) tasarımı ve yerinde katkı üretimi (in situ additive manufacturing) üzerine odaklanılmıştır. Araştırmada, mekanik yük taşıma, elektrik iletimi, ısı iletimi ve radyasyon koruma gibi birden fazla işlevi entegre eden tipik bir panel yapısı geliştirilmiştir. Bu yapı, yüksek sıcaklıkta katmanlı üretim yöntemi kullanılarak, polietereterketon (PEEK) bazlı kompozitlerle alüminyum, bakır teller ve karbon fiberlerin birleştirilmesiyle üretilmiştir. Deneyler, tasarlanan panelin PEEK versiyonuna kıyasla %21,5 daha yüksek rijitlik sağladığını ve maksimum yük kapasitesinin azalmasına rağmen daha iyi enerji absorpsiyon özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Isı iletim testleri, panelin PEEK'e göre %568 daha yüksek bir termal iletkenlik sergilediğini ortaya koymuştur. Bu panel yapısı, uydu prototipinde kullanılmış ve modüllerin hızlı bir şekilde monte edilip veri toplama ve iletim işlevlerini başarıyla gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Çalışma, bu yenilikçi tasarım ve üretim yaklaşımının uzay uygulamalarında maliyet azaltma, performans artırma ve bakım kolaylığı sağlama açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir [33].

Hurtado-Perez vd. yapmış oldukları çalışmada, uydu yapılarında topoloji optimizasyonu (TO) yöntemleri ile eklemeli imalat (EI) teknolojilerinin entegrasyonunu kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, özellikle uydu yapılarının kütlesini azaltmak ve mekanik dayanıklılığını artırmak amacıyla TO yöntemlerinin nasıl kullanıldığı detaylandırılmıştır. İnceleme, sürekli, ayrık ve çeşitli TO yöntemlerini ele alarak, her bir yöntemin optimizasyon hedeflerini nasıl gerçekleştirdiğini ve EI ile nasıl uyum sağladığını açıklamaktadır. Özellikle, SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty), BESO (Bi-Directional Evolutionary Structural Optimisation) ve seviyeset (Level-Set) yöntemleri gibi popüler yaklaşımlar değerlendirilmiştir. EI'nin uydu yapıları için uygulanabilirliğini desteklemek adına, SLM (Selective Laser Melting) ve EBM (Electron Beam Melting) gibi teknolojilerin, TO ile optimize edilmiş tasarımları üretmekte nasıl kullanıldığı örnekler üzerinden gösterilmiştir. Bu yöntemler, kompleks geometriler ve hafif yapılar üretmek için ideal olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, uydu yapılarında TO ve EI'nin birleştirilmesiyle %50'ye varan kütle tasarrufu sağlandığı ve mekanik özelliklerin iyileştirildiği vurgulanmıştır. Ayrıca, EI'nin, malzeme atıklarını önemli ölçüde azaltarak ve

parçaları tek bir birim halinde üretip montaj sürecini kolaylaştırarak üretim maliyetlerini düşürdüğü belirtilmiştir [34].

Kief vd. yapmış oldukları çalışmada, küp uydu yapılarında çok işlevsellik sağlamak için eklemeli imalat yöntemlerinin uygulanmasını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Araştırmada, uydu sistemlerindeki bileşenlerin miniaturizasyonunu hedefleyerek elektronik devrelerin, antenlerin, sensörlerin ve diğer yapıların uydu duvarlarına gömülmesi üzerinde yoğunlaşmışlardır. Kullanılan Multi3D sistemi, çok malzemeli ve çok işlevli cihazlar üretmek için çoklu teknolojilerin entegrasyonunu sağlamaktadır. Metodoloji, termoplastik malzemelerin radyasyon kalkanı ve mekanik dayanıklılık açısından test edilmesiyle başlamıştır. Eklemeli imalat yöntemleri, entegre devreleri ve kablolamayı uydu duvarlarına yerleştirmek için kullanılmış ve bu süreç, yüksek tekrarlanabilirlik sağlayan otomatikleştirilmiş üretim süreçleri ile desteklenmiştir. Isıl yönetim sistemleri, yerleşik termal borular ve artırılmış yüzey alanı tasarımları ile optimize edilmiştir. Ayrıca, radyasyon koruma yeteneğini artırmak için özel malzemeler geliştirmişlerdir [35].

Ferrari yapmış olduğu çalışma ile uzay endüstrisi için kullanılan sandviç panellerdeki yapısal bağlantı elemanlarının (insert) topolojik optimizasyon ve eklemeli imalat teknikleri ile optimize edilmesini incelemiştir. Araştırma, Altair OptiStruct yazılımı kullanılarak optimize edilmiş ek elemanların, mevcut tasarımlarla karşılaştırıldığında kütle azaltımı ve yük taşıma performansını artırmayı hedeflemiştir. Çalışmada, bir sandviç paneldeki çekme yüklerini karşılamak üzere tekli ve çoklu bağlantı elemanları üzerinde iki aşamalı bir optimizasyon süreci uygulanmıştır. Metodoloji, başlangıçta geleneksel bağlantı tasarımlarının analiz edilmesi ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile doğrulama yapılmasını içermektedir. Daha sonra, topoloji ve şekil optimizasyon teknikleriyle, yük yollarını en iyi şekilde yönlendiren, malzeme yoğunluğunu azaltan ve çekme yük kapasitelerini koruyan yeni tasarımlar geliştirilmiştir. Üretim süreci, seçici lazer eritme (SLM) yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve tasarımların fiziksel prototipleri test edilmiştir. Sonuçlar, optimize edilen bağlantı elemanlarının mevcut tasarımlarla kıyaslandığında %30'a kadar kütle tasarrufu sağladığını ve yük taşıma kapasitesini koruduğunu göstermiştir. Ayrıca, testler, simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini doğrulamış ve modelleme sürecindeki iyileştirme alanlarını ortaya çıkarmıştır [36].

EWI organizasyonunun yapmış olduğu araştırmada, geometrik olarak karmaşık ve özelleştirilmiş bileşenlerin hızlı, maliyet etkin üretimini sağlamanın yanı sıra, EI'nin mevcut tasarımları optimize etmek, yakıt verimliliğini artırmak ve malzeme kullanımını azaltmak için sunduğu avantajlar vurgulanmıştır. Çalışmada, EI'nin havacılık uygulamalarındaki ağırlık tasarrufu, yapısal optimizasyon ve birleşim süreçlerini azaltma gibi sektör ihtiyaçlarını karşılamadaki etkinliği ele alınmıştır. Kullanılan yöntemler arasında, metal katkı üretimi için lazer toz yatağı füzyonu (LPBF) gibi gelişmiş süreçlerin geliştirilmesi ve optimizasyonu bulunmaktadır. EWI'nin projelerinde, katmanlı üretim süreçleri sırasında katman bazlı hata tespiti için sensör geliştirilmesi ve doğrulama algoritmaları üzerinde çalışılmıştır. Ek olarak, EI bileşenlerinin ısıl işlem geliştirmeleri ile malzeme özelliklerinde anizotropiyi azaltmak için uygun yöntemler araştırılmıştır. Araştırmada, nikel ve alüminyum alaşımlarında malzeme özelliklerini belirleme ve standartlaştırma üzerine yoğunlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, EI'nin, karmaşık tasarımların geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek kadar detaylı üretilmesini mümkün kıldığını ve havacılıkta üretim süreçlerini önemli ölçüde hızlandırarak maliyetleri düşürdüğünü göstermektedir. EI'nin yalnızca prototipleme için değil, aynı zamanda tam ölçekli üretim için de uygun hale gelmesiyle sektörün gelecekteki büyümesine yön verecek potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir [37].

Kellett'in patentinde, uydu ve uzay aracı uygulamaları için eklemeli imalat (additive manufacturing) teknikleri kullanılarak üretilen hafif ve dayanıklı panellerin tasarım ve üretim süreci detaylandırılmıştır. Paneller, yüksek dayanım ve hafiflik sağlayan bir kafes yapısı ve iki yüzey levhasından oluşmaktadır. Bu yapılar, geleneksel bağlantı yöntemleri olmadan monolitik bir şekilde üretilerek üretim sürecini hızlandırmış ve maliyetleri düşürmüştür. Üretimde, alüminyum alaşımlarını katman katman işleyen "Direct Metal Laser Sintering" (DMLS) tekniği kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, geleneksel petek yapılara kıyasla yenilikçi bir tasarım sunarak hafiflik, dayanım ve maliyet avantajları sağlamıştır [38].

Aston vd. yazmış oldukları patentte, uydu ekipmanlarının yerleşiminde eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı esneklikle birincil yapının tasarımını detaylandırmışlardır. Uydunun ana gövdesi, monolitik duvar panellerinden oluşan modüler bir yapıdadır ve bu paneller, ekipman desteği, yapısal yük taşıma, termal yönetim, radyasyon kalkanı ve mikrometeoroid koruması gibi işlevleri bir arada sağlamaktadır. Radyatör panelleri, ısı

yönetimini optimize ederken, ekipman panelleri montaj noktaları ve koruma işlevleri sunmaktadır. Taban paneli, itki sistemi ve yakıt deposu gibi ağır bileşenler için güçlendirilmiş yapılar içermektedir. Eklemeli imalat yöntemi, malzeme israfını azaltırken üretim süresini ve tasarım esnekliğini artırarak, hızlı ve maliyet etkin çözümler sunmuştur. Bu yaklaşım, gelecekteki uydu tasarımlarında yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilmiştir [39].

Samal vd. yapmış oldukları çalışmada, uydularda kullanılan bağlantı elemanlarının eklemeli imalat teknolojileri ile üretimini incelemişlerdir. Bu ikincil yapıların, uydu gövdesi, reflektör parçaları ve diğer destekleyici unsurlar arasında yapısal bağlantıyı sağlamayı amaçladıkları belirtilmiştir. Eklemeli imalat sayesinde, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip, optimize edilmiş yapılar tasarlanabilmiştir. Ayrıca, ileri yazılım araçları ile topoloji optimizasyonu yapılarak gereksiz malzeme kullanımı azaltılmış ve yapısal bütünlük korunmuştur. Çalışmada, bu yöntemin üretim maliyetlerini düşürmek ve malzeme israfını minimize etmek açısından önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir [40].

Becedas vd. yapmış olduğu çalışmada, eklemeli imalat teknolojilerinin küçük uydu yapılarına entegrasyonu ile uzay enkazını azaltmayı hedeflemiştir. Özellikle, uydularda kullanılan metal bağlantı elemanlarının ve yakıt tanklarının optimize edilmesiyle, uzay enkazı riski azaltılmıştır. İsviçre merkezli RUAG, Sentinel-1A uydusunun anten braketini optimize etmek için bu teknolojiyi kullanmış, Lockheed Martin ise titanyum yakıt tanklarının prototip üretiminde eklemeli imalattan faydalanmıştır. Bu çalışmada, üretim sürecini hızlandırıldığı belirtilmiştir [41].

Hümbert vd. yapmış olduğu çalışmada uydu yapılarında kullanılmak üzere eklemeli imalatla üretilen Polyamide 12 (PA12) malzemesinin özelliklerini incelemişlerdir. PA12'nin mekanik ve termal vakum özellikleri test edilerek, çok işlevli uydu yapılarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. 3D baskıda soğutma kanallarının yeniden tasarlanabilmesi, daha homojen ısı transferi sağlayarak soğutma performansını artırmıştır. Ayrıca, destek yapılarının minimize edilmesiyle üretim maliyetleri düşürülmüş ve malzeme israfı azaltılmıştır. Bu yaklaşım, uydu üretiminde maliyet etkinliği ve yapı optimizasyonu sağlamıştır [42].

Araştırılan literatür çalışmalarında, eklemeli imalat (EI) ve topoloji optimizasyonu (TO) teknolojilerinin uydu yapılarında sunduğu avantajlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. EI'nin sağladığı tasarım esnekliği sayesinde daha hafif, dayanıklı ve maliyet etkin yapılar geliştirilmiş, üretim süreçleri hızlandırılmış ve malzeme israfı azaltılmıştır. TO yöntemleriyle optimize edilen yapılar, kütle tasarrufu sağlarken yapısal bütünlüğünü korumuştur. Çalışmalar, özellikle küçük uydu sistemlerinde çok işlevli ve modüler yapıları öne çıkararak entegrasyon ve test süreçlerini kolaylaştırmıştır. Bazı araştırmalar, panellerin termal, elektriksel ve radyasyon koruma özelliklerini geliştirirken, diğerleri yapısal bağlantı elemanları ve montaj stratejilerine odaklanmıştır. EI yöntemleri arasında SLM, EBM ve DMLS gibi teknikler kullanılarak kompleks geometriler ve monolitik yapılar üretilmiştir. Ayrıca, EI'nin uzay enkazını azaltma potansiyeli ve malzeme karakterizasyonu gibi konular da araştırılmıştır.

Mevcut literatürde gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmaları, genellikle mikro uydu ve daha büyük uydu sınıflarındaki ikincil yapısal bileşenler üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalar, bağlantı elemanları, braketler ve alt sistem montaj parçaları gibi yapısal olmayan unsurların optimizasyonu ile sınırlı kalmıştır. Tez çalışmasının odak noktası, uyduyu oluşturan birincil yapısal bileşenlerin, özellikle de yük taşıyıcı ana gövde yapılarının optimizasyonudur. Bu çalışma, birincil yapıların hem kütle azaltımı hem de yapısal dayanım artırımı açısından değerlendirilmesini hedeflemiştir. Bu bağlamda, topoloji optimizasyonu ile elde edilen yapıların, geleneksel sandviç panel teknolojileriyle kıyaslanarak performans, üretim maliyetleri ve entegrasyon süreçlerine etkisi analiz edilmiştir.

3.6. Panellerde Katılık Gereksinimi Optimizasyonları İle İlgili Çalışmalar

Li ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, uydu panellerindeki katılığı artırmak için Hareketli Morfolojik Bileşenler (MMC - Moving Morphable Components) yaklaşımına dayalı bir topoloji optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, takviyeler (sertleştiriciler) kiriş elemanları olarak modellenirken, temel plaka ise levha elemanları olarak modellenmiştir. MMC yaklaşımı, sertleştiricilerin geometrilerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanıyarak, kapsamlı bir son işlem gerektirmeden verimli bir optimizasyon sağlamaktadır. Optimizasyon çerçevesi, Element-Free Galerkin (EFG) yöntemini kullanarak plaka ve kiriş elemanları arasındaki bağlantıları doğal bir şekilde

oluşturur. Bu yöntem sayesinde, üretim kısıtlamalarına uygun, yüksek katılığa sahip hafif tasarımlar elde edilmiş ve panellerin yapısal performansı önemli ölçüde artırılmıştır [43].

Ma ve diğerlerinin çalışmasında, panellerin katılığını artırmak için homojenleştirme yöntemine dayalı bir jeneratif tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, sertleştirici yerleşimlerinin optimize edilmesini sağlayarak mühendislik yapılarına yüksek performans kazandırmayı hedeflemiştir. Optimizasyon süreci üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, sertleştirici hücrelerin eşdeğer malzeme özellikleri, asimptotik homojenleştirme yöntemiyle hesaplanmış ve bu özellikler sertleştiricilerin ortotropik lamine malzemeler olarak modellenmesine olanak sağlamıştır. İkinci aşamada, sertleştirici yerleşimi, DMO (Discrete Material Optimization) yöntemiyle optimize edilmiştir. Bu yöntem, malzeme dağılımını optimize ederek sertleştirici yollarını belirlemiş ve tasarımı daha etkili hale getirmiştir. Son aşamada, elde edilen topoloji optimizasyon sonuçları detaylandırılmış, sertleştirici yolları belirlenmiş ve yapısal boyut parametreleri optimize edilerek nihai tasarım oluşturulmuştur. Çalışmada iki farklı senaryo incelenmiştir: Dikdörtgen bir plaka için yapılan optimizasyon sonucunda katılık %17 oranında artırılmıştır. Kare bir plaka üzerinde yapılan burkulma yükü optimizasyonunda ise burkulma yükü %35 oranında artırılmıştır. Bu yöntem, geleneksel tasarımlara kıyasla daha etkili bir sertleştirici yerleşimi sunmuş hem katılık hem de burkulma performansında önemli iyileştirmeler sağlamıştır [44].

Ji vd. çalışmasında ise elektrostatik bir temizleyicinin giriş yapısındaki panellerdeki katılığı artırmak için "Geliştirilmiş uyarlanabilir büyüme yöntemi" kullanılmıştır. Bu yöntem, doğal dallanma sistemlerinden esinlenerek, yapının sertleştirici düzenini optimize etmek için tasarlanmıştır. Optimizasyon sürecinde, minimum uyum (yük altında deformasyon) ve maksimum temel doğal frekansı hedefleyen çok amaçlı bir matematiksel model uygulanmıştır. Sertleştiricilerin tasarımı, tasarım parametrelerinin kademeli olarak güncellenmesiyle gerçekleştirilmiş ve iteratif bir süreçle optimize edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin, empirik tasarıma kıyasla %18,83 daha düşük gerinim enerjisi ve %4,66 daha yüksek birinci doğal frekans elde ettiğini göstermiştir. Ayrıca, yapı toplam ağırlığı %3 oranında azaltılmıştır. Bu yöntem, geleneksel tasarımlara kıyasla hem statik hem de dinamik performansın artırılmasında ve malzeme israfının azaltılmasında etkili olmuştur [45].

Li ve diğerleri, sertleştirilmiş plaka yapılarının katılığını artırmak için hareketli morfolojik bileşenler (MMC) yöntemine dayalı bir topoloji optimizasyon yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntemi, sertleştiricileri kiriş elemanları, temel plakayı ise levha elemanları olarak modelleyerek analiz yapmışlardır. Bu yaklaşımla, üç boyutlu katı modeller yerine kiriş ve levha modellerini kullanarak hesaplama maliyetini önemli ölçüde düşürmüşler ve yapısal yanıtları daha hassas bir şekilde yakalamışlardır. MMC yöntemiyle, sertleştiricilerin geometrisini açık bir şekilde tanımlayarak tasarımın kontrol edilmesine olanak sağlamışlardır. Örneklerle, optimizasyon sürecinin sertlik ve kütle azaltma açısından verimliliğini göstermişlerdir [46].

He ve diğerleri, çelik levha makaslama duvarlarının (SPSW) rijitliğini artırmak için çift yönlü ilerleyici yapısal optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde, SPSW'nin elastik-plastik davranışı analiz edilerek rijitlik ve enerji sönümleme performansı artırılmıştır. Finite element modeli Abaqus yazılımı ile oluşturulmuş ve SPSW'nin "sandviç" yapı modeliyle sertleştirici dağılımı optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, SPSW'nin burkulma taşıma kapasitesi 2,17 ila 2,61 kat artırılmış, rijitlik ve ilk rijitlikte belirgin iyileştirmeler sağlanmıştır. Ayrıca, optimize edilmiş SPSW'nin sismik performansı ve enerji sönümleme kapasitesinin arttığı, histeretik eğrilerinin daha dolgun olduğu ve yapı gürültüsünün azaldığı gözlemlenmiştir [47].

Li ve diğerleri, yaprak damarlarının doğal büyüme mekanizmalarından esinlenerek rijitliği artırılmış levha/kabuk yapıların tasarımı için biyomimetik bir topoloji optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, yaprak damarlarının dallanma desenlerini simüle ederek rijitlik, dayanım ve dinamik performansı artırmak için sertleştirici düzenini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel "çıkarma modu" yöntemlerinin aksine, bu "ekleme modu" yöntemi, daha açık ve etkin sertleştirici düzenlerini ortaya çıkarır. Önerilen yöntemle yapılan statik tasarım örneğinde, rijitliğin yaklaşık 19,27 kat artırıldığı; dinamik tasarım örneğinde, ilk doğal frekansın 12 kat artırıldığı ve çok disiplinli tasarımda rijitlik ile doğal frekans arasında dengeli bir iyileştirme sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu yöntem, mühendislik tasarımlarında yenilikçi ve etkili çözümler sunarak hem tasarım esnekliğini artırmış hem de hesaplama maliyetlerini düşürmüştür [48].

Chen ve diğerleri, panellerdeki yerel frekansın iyileştirilmesi için "Kısıt Dönüşüm Yöntemi"ni uygulamışlardır. Bu yöntemle, yerel frekans kısıtlarını nodal yer değiştirme

kısıtlarına dönüştürerek, geleneksel optimizasyon yöntemlerinde görülen mod sıralama sorunlarını ortadan kaldırmayı amaçlamışlardır. İlk olarak, başlangıç tasarımında yerel frekans mod şeklini ve buna karşılık gelen nodal kuvvetleri belirlemişlerdir. Daha sonra, elde edilen kuvvetlerle statik analiz yapmış ve yerel frekansla ilişkili nodal yer değiştirme kısıtlarını optimize etmişlerdir. Optimizasyon sonucunda, belirli bir plaka örneğinde yerel frekansı 22,504 Hz'den 60,77 Hz'e çıkarmışlar ve toplam ağırlığı yalnızca %0,07 oranında artırmışlardır. Bu yöntemle, yerel modların tasarım üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımış ve hesaplama maliyetlerini azaltarak etkili bir yapı optimizasyonu sağlamışlardır [49].

Feng ve diğerleri, kabuk yapıların rijitliğini artırmak amacıyla B-spline parametrizasyon yöntemine dayalı bir sertleştirici düzen optimizasyonu yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemle, sertleştiricilerin yükseklik dağılımını tanımlamak için B-spline kontrol parametrelerini tasarım değişkenleri olarak kullanmışlardır. Bu tasarım, pürüzsüz ve kesintisiz bir yükseklik alanı oluşturmuş ve sertleştirici düzenini kabuk yapısına parametre haritalama yoluyla uygulamışlardır. Modellemeyi, ince kabuk yapıları kabuk elemanlarıyla ve sertleştirici bölgeleri katı elemanlarla ayrıştırarak gerçekleştirmişlerdir. Yöntemle, özellikle kabuk yapıların kıvrımlı geometrileriyle uyumlu olarak tasarım esnekliği sunmuş ve ek filtreleme olmaksızın pürüzsüz sertleştirici düzenlerini elde etmişlerdir. Sayısal analizlerde, optimize edilmiş sertleştirici düzenleri daha yüksek rijitlik ve daha iyi mekanik performans sağlamışlardır [50].

Wang vd. katı-ızgara hibrit yapıların rijitliğini artırmak ve ağırlığını azaltmak için çok ölçekli bir tasarım ve optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, önce klasik topoloji optimizasyonu ile katı yapıların malzeme düzeni belirlenmiş ve temel yük taşıma yolları tanımlanmıştır. Daha sonra, düşük yoğunluklu bölgeler ızgara yapılarla dönüştürülerek katı-ızgara hibrit yapı oluşturulmuştur. Optimizasyon sürecinde, katı yapıların yüksek yoğunluklu bölgeleri korunurken, ızgara yapılarının çubuk elemanlarının çapları optimize edilmiştir. Sayısal analizler, önerilen yöntemin geleneksel katı veya ızgara tasarımlara kıyasla daha iyi mekanik performans ve ağırlık azaltma sağladığını göstermiştir. Örneğin, uydu yük adaptöründe, yapı ağırlığında %16 azalma sağlanırken rijitlik yalnızca %6,1 oranında düşmüştür [51].

Uçak yapılarında rijit panel tasarımlarını optimize etmek amacıyla Gamache ve diğerleri, karmaşıklık odaklı yerleşim keşfi yaklaşımı (Complexity-Driven Layout Exploration for Aircraft Structures - CD-LEAS) üzerinde yoğunlaşmışlardır. Yöntemle, topoloji optimizasyonunda ortaya çıkan aşırı karmaşık ve zor üretilebilir tasarımlar yerine, daha basit ve etkili çözümler sunmayı hedeflemişlerdir. Panel sertleştiricilerinin düzenini optimize etmek için karmaşıklık metriğini kullanarak tasarım uzayını etkin bir şekilde keşfetmişlerdir. CD-LEAS, iki seviyeli bir optimizasyon sürecine dayanmışlardır: Dış döngüde yerleşim/topoloji optimizasyonu yaparken, iç döngüde boyutlandırma optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu süreçle hem yapı rijitliğini artırmayı hem de ağırlığı azaltmayı amaçlamışlardır. Örnek çalışmalarla, bu yöntemin geleneksel yöntemlere kıyasla daha hafif, rijit ve burkulma direncine sahip tasarımlar elde edebildiğini göstermişlerdir. Ayrıca, karmaşıklık metriği sayesinde tasarımları daha kolay üretilebilir hale getirmişler ve mühendislik süreçlerinde disiplinler arası entegrasyonu kolaylaştırmışlardır [52].

Liu ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, gemi pruvasındaki sertleştirici yapıların rijitlik ve ağırlık optimizasyonu için iki aşamalı bir yöntem uygulanmıştır. İlk aşamada, malzeme yerleşimini belirlemek için topoloji optimizasyonu kullanılarak, gemi pruvasının yük taşıma yolları ve sertleştirici düzeni tanımlanmıştır. Üretim kısıtlarını göz önünde bulundurarak 3B bir modelde, minimum uyum ve maksimum doğal frekans hedeflenmiştir. Elde edilen malzeme dağılımına dayanarak, T-şekilli sertleştiriciler düzenlenmiştir. İkinci aşamada ise, parametre modeli üzerinden plaka kalınlığı ve sertleştirici boyutları optimize edilmiştir. Bu süreç, toplam ağırlığı azaltırken yapısal performansı iyileştirmiştir. Sonuçlar, optimize edilmiş yapının rijitliğini koruyarak toplam ağırlığın yaklaşık %6 oranında azaltıldığını göstermiştir [53].

Zhou vd. panel benzeri yapıların dinamik tasarımı için gerinim mod şekillerine (SMS-Strain Mode Shapes) dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, doğal frekansların hızlı bir şekilde optimize edilmesi için yüksek duyarlılığa sahip elemanların belirlenmesini sağlar. İlk olarak, modal gerinim analizinin temel teorisi incelenmiş ve gerinim mod şekillerinin, yapıların belirli bir modal frekansına karşı en hassas bölgelerini tespit etmek için kullanılabileceği gösterilmiştir. Sayısal simülasyonlarla, SMS'lerin sonuçları, geleneksel topoloji optimizasyonuyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve güçlü bir uyum sağladığı görülmüştür. Özellikle sertleştirilmiş bir panel üzerinde yapılan analizlerde,

SMS'lerin, sertleştiricilerin düzenlenmesindeki kritik bölgeleri açıkça ortaya koyduğu ve tasarımın performansını artırdığı doğrulanmıştır. Bu yöntem, dinamik tasarım süreçlerini hızlandırmak ve modal frekansların optimizasyonunda etkili bir araç olarak kullanılmak üzere geliştirilmiştir [54].

Stanford ve çalışma arkadaşları, bıçak takviyeli panellerin aeroelastik davranışını iyileştirmek amacıyla SIMP tabanlı bir topoloji optimizasyon yöntemi kullanmışlardır. Yöntemi, panellerin burkulma ve aeroelastik titreşim (flutter) davranışlarını optimize etmek için geliştirmişlerdir. SIMP yönteminde, her bir tasarım elemanına yoğunluk değişkeni atayarak 0 (boş) ile 1 (katı) arasında değişen değerler kullanmışlardır. Optimizasyon sürecinde, özdeğer göçü (eigenvalue migration) problemlerine neden olan mod değişimlerini önlemek için özdeğer ayırma kısıtlamalarını uygulamışlardır. Sonuçlarla, optimize edilmiş panellerin burkulma ve aeroelastik titreşim açısından hem hafif hem de yüksek performanslı tasarımlar sunduğunu göstermişlerdir. Özellikle, optimal topolojinin malzeme verimliliğini artırdığını ve yapıların kritik modlar altında stabilitesini sağladığını belirtmişlerdir [55].

Hardee ve çalışma arkadaşları, elastik katıların şekil optimizasyonu için CAD tabanlı bir tasarım parametreleştirme ve optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemle, tasarım değişkenlerini CAD modeli üzerinden parametrik olarak tanımlamışlar ve bu değişkenlerin yapısal performans ölçütlerine etkilerini analiz etmeye olanak tanımışlardır. Tasarım duyarlılık analizi (DSA) kapsamında, yapıdaki malzeme noktalarının hareketini tanımlamak için "tasarım hız alanı" hesaplamışlar ve bu alanı mevcut sonlu eleman analizi (FEA) araçları ile entegre etmişlerdir. Yöntemle, CAD tabanlı bir sonlu farklar yöntemi ve sınır yer değiştirme yöntemi kombinasyonunu kullanarak, iki versiyonunda FEA modellerinde şekil optimizasyonu yapmışlardır. Örnek bir türbin kanadı tasarımında, kütle azaltımı ve gerilme dağılımını optimize ederek yapısal performansta iyileşme sağlamışlardır. Çalışmayla, mühendislik tasarımlarında CAD tabanlı parametrik modellerin doğrudan şekil optimizasyonunda kullanılmasının potansiyelini göstermişlerdir [56].

Bu bölümde uydu panellerinde yapılacak iyileştirmeler için panel seviyesindeki literatür çalışmaları incelenmiştir. Literatürde, panel rijitliğini artırmak ve kütle azaltımı sağlamak amacıyla hareketli morfolojik bileşenler (MMC), SIMP ve homojenleştirme gibi topoloji optimizasyon (TO) yöntemleri geliştirilmiş, bu yaklaşımlar rijitlik, burkulma dayanımı ve

doğal frekanslarda iyileşme sağlamıştır. Ancak, bu çalışmalar genellikle sabit sınır şartlarına sahip idealize modeller üzerinde yapılmış olup, gerçek uydu yapılarında karşılaşılan değişken sınır koşulları bu karmaşık algoritmaların uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu nedenle, değişken sınır şartlarına uyum sağlayacak, basit ve etkili optimizasyon yöntemleriyle uydu seviyesinde yapısal iyileştirme yapılarak literatürdeki çalışmalardan ayrılmış bir çalışma oluşturulmuştur.

3.7. Gerinim Enerji Bazlı Optimizasyon Çalışmaları

Wang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bu çalışmada, uydu SAR anteni destek yapısının tasarımı ve optimizasyonu gerinim enerjisi teorisi temelinde gerçekleştirilmiştir. Gerinim enerjisi teorisi, bir yapının elastik potansiyel enerjisinin minimum olduğu durumlarda daha kararlı ve rijit bir yapı sunduğunu ifade ettiği söylenmiştir. Bu teoriye dayanarak, uydu SAR anteni destek yapısının geometrik parametreleri ve menteşe sertlikleri analiz edilmiş ve optimize edilmiştir. Optimize edilmiş modelde, temel doğal frekans değerinin artırılması ve toplam yapısal ağırlığın azaltılması hedeflenmiştir. Çalışma, çok adımlı bir optimizasyon sürecinde menteşe sertliklerinin uygun şekilde dağıtılmasını ve destek bağlantılarının kalınlıklarının optimize edilmesini içermektedir. Sonuç olarak, doğal frekansta kayda değer bir iyileşme sağlanmış ve toplam ağırlık %6 oranında azaltılmıştır [57].

Qiu ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, kompozit malzemelerin titreşim sırasında zayıf noktalarını belirlemek için modal gerinim enerjisi toplamına dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada, kompozit plaka ve I-şekilli kiriş üzerinde yapılan modal analizlerle ilk 20 modun gerinim enerjisi hesaplanmıştır. Modal katılım faktörleri, farklı modların önemini ağırlıklandırmada kullanılarak zayıf bölgelerin daha hassas bir şekilde tespit edilmesi sağlanmıştır. Analizler, zayıf bölgelerin modal gerinim enerjisi yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğunu ve bu bölgelerin dinamik tasarımda öncelikli olarak güçlendirilmesi gerektiğini göstermiştir [58].

Kim ve çalışma arkadaşları, bükülme titreşimlerini kontrol etmek amacıyla modal gerinim enerjisi temelli bir yöntem kullanılarak bağlantılı metamalzeme tasarımı yapılmıştır. Çalışmada, Floquet–Bloch sınır koşullarına dayalı stopband analizi gerçekleştirilmiş ve her bir modun modal gerinim enerjisi hesaplanmıştır. Bu yöntemle, rezonatörlerin etkili

olduğu modlar ayıklanarak, yalnızca ana yapının bükülme titreşimlerini azaltan Bloch modları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen metamalzeme, 764–1613 Hz frekans aralığında titreşimleri %22,9 ila %24,1 oranında azaltmıştır. Çalışma, metamalzemelerin düşük maliyetli üretim yöntemleriyle uygulanabilirliğini ve mühendislik yapılarında titreşim kontrolü için yenilikçi bir çözüm sunduğunu göstermiştir [59].

Bu bölümde incelenen literatürlerde, gerinim enerjisi teorisine dayalı optimizasyon yöntemleri, yapıların rijitliğini artırmak ve titreşim performansını iyileştirmek amacıyla yaygın şekilde kullanılmıştır. Bu çalışmalar, elastik potansiyel enerjinin minimize edilmesiyle daha hafif ve kararlı yapılar elde etmeyi hedeflemiştir. Gerinim enerjisi temelli yaklaşımlar, destek yapıları ve kompozit malzemelerde zayıf bölgeleri tespit ederek yerel güçlendirme stratejileri geliştirmiş, modal analizlerle doğal frekans optimizasyonu sağlamıştır. Bazı çalışmalar doğrudan yapısal parametreleri optimize ederken, diğerleri metamalzeme tasarımı ve titreşim kontrolüne odaklanmıştır. Bu yöntemler genel olarak hem yapısal hafiflik hem de dinamik performansta önemli iyileştirmeler sunmuştur. Elde edilen bilgiler doğrultusunda, sınır şartları belirlenmiş bir uydu yapısında, panel seviyesindeki gerinim enerjisi dağılımlarına bakılarak optimizasyon yapılabileceği öngörülmüştür. Tez çalışmasının kütle optimizasyonu da literatürdeki yöntemlerin senteziyle oluşturulmuştur.

3.8. Literatür Çalışmaları Tez Çalışmasına Etkisi

Literatür incelemeleri, uydu yapılarında statik ve dinamik yüklerin yapı üzerindeki etkilerini analiz ederek, yapıların rijitlik, burkulma dayanımı ve doğal frekanslarını optimize etmeye yönelik çeşitli yöntemlerin geliştirildiğini ortaya koymuştur.

Bu yöntemler arasında topoloji optimizasyonu, eklemeli imalat ve gerinim enerjisi temelli tasarım yaklaşımları öne çıkmıştır. EI'nin sunduğu tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı sayesinde, daha hafif ve dayanıklı yapılar geliştirilmiş; TO yöntemleri ise kütle azaltımı sağlarken yapısal bütünlüğü korumuştur. Ancak, mevcut çalışmalar genellikle ikincil yapısal bileşenlere ve sabit sınır şartlarına odaklanmış, birincil yapısal parçaların optimizasyonu ve değişken sınır koşulları altında gerçekleştirilen analizler sınırlı kalmıştır.

Çalışma kapsamında, panel seviyesinde gerinim enerjisi dağılımları ve modal analizlerle elde edilen veriler kullanılarak, optimize edilmiş tasarımlar oluşturulacaktır. Değişken sınır şartlarına uyum sağlayacak, basitleştirilmiş ve uygulanabilir optimizasyon yaklaşımları geliştirilecek, böylece literatürde yer alan karmaşık modellerden farklı bir mühendislik çözümü sunulmuştur.

Sonuç olarak, hem üretim süresi kısaltılmış hem de yapısal performans artırılarak daha hafif, dayanıklı ve ekonomik uydu yapıları elde edilmesi hedeflenmiştir. Geleneksel sandviç panel teknolojileriyle karşılaştırmalı analizler yapılarak, birincil yapısal parçaların hem üretim maliyetleri hem de performans açısından avantajları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme literatüre farklı bir katkı sağlamıştır.

4. KÜTLE AZALTIMI İÇİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Bu bölümde, uydu birincil yapısı için iki farklı model geliştirilmiş: birinci uydu yapısında, alüminyum sandviç paneller kullanılmış; ikincisinde ise eklemeli imalat yöntemi kullanılarak optimize edilmiş paneller kullanılmıştır. Her iki uydu modeli için aynı fırlatıcı gereksinimleri belirlenmiş ve bu gereksinimlere uygunluk için analizler gerçekleştirilmiştir. Ardından, bu iki model hacim ve kütle bakımından karşılaştırılarak bir optimizasyon yönteminin verimliliği ortaya konulmuştur.

4.1. Sandviç Panelli Örnek Uydu Platformunun Tasarımı

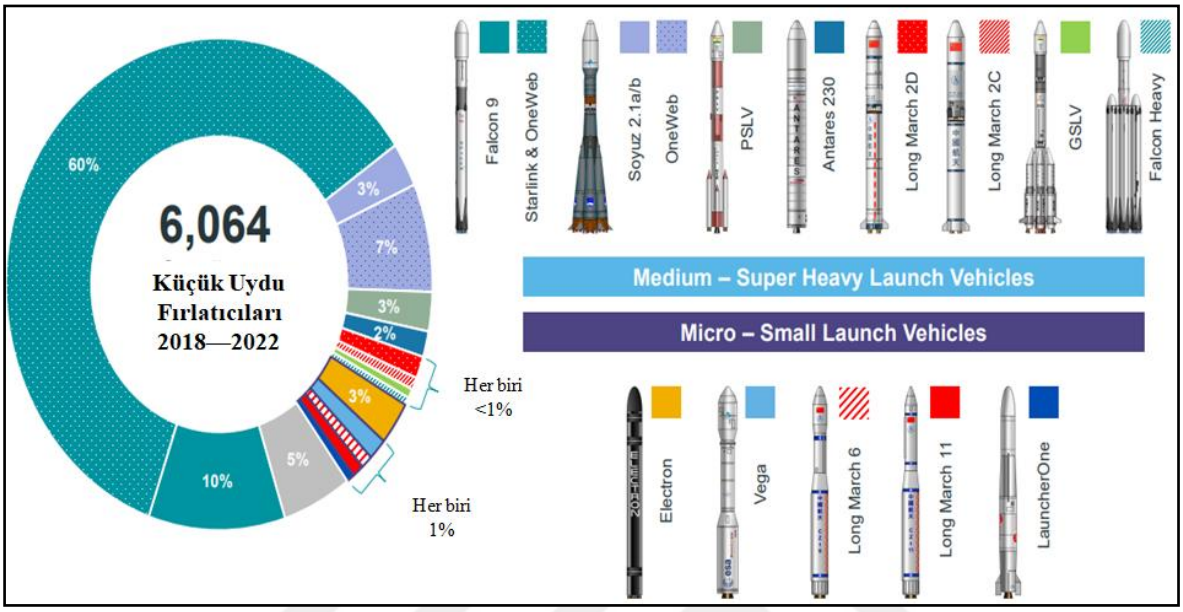
Uydu mekanik mimarisi için bölüm 3 de verilen literatürler incelenmiş ve mekanik mimarinin modüler yapıda olması hedeflenmiştir. Bu şekilde elde edilen mimari daha geniş görev yükü ile hizmet verebileceği düşünülmüştür. Tasarlanan konsept uydu iki ana platformdan oluşturulmuştur. Alt platforma uydunun görevini yerine getirebilmesi için gerekli ekipmanlar yerleştirilmiş, ikinci (üst) platforma ise uydunun görev yükü ve ilgili ekipmanları için ayrılmıştır. Bu çalışmada sadece alt kısım modellenecek üst kısım noktasal kütle olarak görev yükü modellenecektir.

4.2. Uydu Fırlatıcısının Seçimi

Yapılan uydu tasarımın için ilk olarak hedef uydu fırlatıcıları incelenmiştir. Mikro uydu fırlatıcıları, büyük uydu fırlatıcılarına kıyasla daha geniş bir çeşitlilik sunar. Bunun nedeni, mikro uyduların taşıma gereksinimlerinin daha küçük ve farklı şekillerde tasarlanmış fırlatıcılara uygun olmasıdır. Bryce Smallsats 2023 Raporu'nda küçük uyduların fırlatılmasında genellikle orta ve ağır taşıma kapasitesine sahip fırlatma araçlarının tercih edildiği belirtilmiştir.

Tez çalışmasında, Bryce Smallsats 2023 Raporu [1], ve mevcut literatür incelemeleri doğrultusunda, SpaceX Falcon 9 ve Soyuz fırlatıcıları fırlatıcı adayları olarak belirlenmiştir. Her iki fırlatıcı, sundukları rekabetçi fiyatlandırma, yüksek güvenilirlik ve küçük uydular için sağladıkları esnek fırlatma seçenekleri ile Şekil 4.1 de gösterildiği gibi küresel ölçekte en çok tercih edilen fırlatma araçları arasında yer almaktadır. Bu

doğrultuda, çalışmada geliştirilen mikro uydu yapısal tasarımının, Falcon 9 ve Soyuz fırlatıcılarının belirlediği statik ve dinamik yük gereksinimlerine uygun olacak şekilde optimize edilmiştir.



Şekil 4.1. 2018-2022 arasında tercih edilen fırlatıcılar

SpaceX'in paylaşımlı uyudu fırlatıcısı özellikle küp uydu, mikro uydu ve nano uydu gibi küçük uydu operatörleri için tasarlanmıştır. Fırlatıcı kullanıcıların büyük bir fırlatma aracında (genellikle Falcon 9) yer paylaştırarak, maliyetlerini düşürmelerine olanak tanır. Bu sayede farklı müşterilere ait birçok uyduyu aynı anda yörüngelerine yerleştirilebilir.

SpaceX'in fırlatıcılarının birden çok kez kullanılabilir olması SpaceX'i sektördeki en rekabetçi fiyatlardan biri haline dönüştürür. Bu sayede girişimciler, üniversiteler ve küçük uydu üreticileri, düşük bütçelerle uzaya erişim sağlayarak ticari ve bilimsel misyonlarını daha hızlı ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirebilir. Fırlatmalar genellikle Vandenberg Uzay Üssü veya Cape Canaveral'dan yapılır.

Rusya'nın Soyuz fırlatma aracı ise yine birden fazla uyduyu aynı anda yörüngeye taşıyan paylaşımlı fırlatma hizmeti sağlar. Bu fırlatmalar genellikle küçük uydular için maliyet etkin bir çözüm sunar. Fırlatmalar, genellikle Kazakistan'daki Baykonur Uzay Üssü veya Fransız Guyanası'ndaki Guyana Uzay Merkezi'nden gerçekleştirilir.

4.3. Alt Sistemler Ve Uyduya Yerleştirilmesi

Tezin odak noktası olan LEO (Alçak Dünya Yörüngesi) gözlem uyduları, yörüngedeki görevlerini yerine getirebilmek için çeşitli alt sistemlere ihtiyaç duyar. Bu alt sistemler, uydunun operasyonlarını sürdürmesini, görev verilerini toplamasını ve Dünya'ya iletmesini sağlar. Ele alınan alt sistemler ve görevleri aşağıdaki şekilde listelenmiştir

Güç sistemi

Uydunun tüm operasyonları için gerekli enerjiyi sağlar. Güneş panelleri, güneş ışığını elektriğe dönüştürerek uydunun enerji ihtiyacını karşılar. Güneş ışığı olmadığı durumlarda, özellikle Dünya'nın gölge tarafında, bataryalar devreye girerek enerji sağlar. Güç dağıtım birimi (GDB), üretilen enerjiyi uydunun çeşitli alt sistemlerine dağıtarak kesintisiz çalışma imkanı sunar. Tasarlanan uyduda güç sistemi pil ekipmanı ve güç dağıtım birimden oluşturulmuştur.

İletişim sistemi

İletişim sistemi, uydunun Dünya üzerindeki yer istasyonları ile veri alışverişini gerçekleştirir. Antenler, görev verilerini iletmek ve kontrol komutlarını almak için kullanılır. Radyo frekans modülleri, sinyalleri güçlendirir ve modüle eder. Transponder ise uydunun hem veri göndermesine hem de almasına olanak tanır, böylece iletişim sürekliliği sağlanır. Tasarlanan uyduda Sbant, Xbant gibi ekipmanları iletişim alt sistemi ekipmanlarıdır.

Yörünge kontrol ve itki sistemi

Uydunun yörüngesini ve yönelimini kontrol eder. Jiroskoplar, uydunun hareketini ve konumunu ölçerken, tepki tekerlekleri yönelim kontrolü sağlar. Manyetometreler kararlılık ve hassas yönelim ayarlarında kullanılır. İtki motorları ise yörünge düzeltmeleri ve manevralar için gerekli itkiyi sağlar. Ele alınan uydu platformunda GPS, itki sistemi ve tepki tekerleri bu alt sistemin ekipmanlarıdır.

Veri işleme ve depolama sistemi

Görev verilerini işler, depolar ve iletir. Merkezi işlemci, uydunun genel yönetimini ve alt sistemlerin koordinasyonunu sağlar. Bellek ve depolama birimleri, sensörlerden gelen verileri geçici olarak depolar ve Dünya'ya aktarılana kadar korur. Bu sistem, uydunun görev verimliliği için kritik öneme sahiptir. Merkezi uydu bilgisayarı bu alt sisteme aittir.

Görev yükü

Gözlem uydularının asıl amacı olan görev yükü, sensörler ve kameralar gibi veri toplama araçlarından oluşur. Optik, radar ya da hiperspektral sensörler, Dünya'nın yüzeyi hakkında yüksek çözünürlüklü görüntüler ve veriler sağlar. Bu yük, genellikle diğer alt sistemlere göre özel olarak korunur ve yerleştirilir. Ele alınan örnek uydu tasarımda görev yükü üst platformda üst plakaya 8 arayüz noktasıyla birleştirilmiş şekilde modellenmiştir.

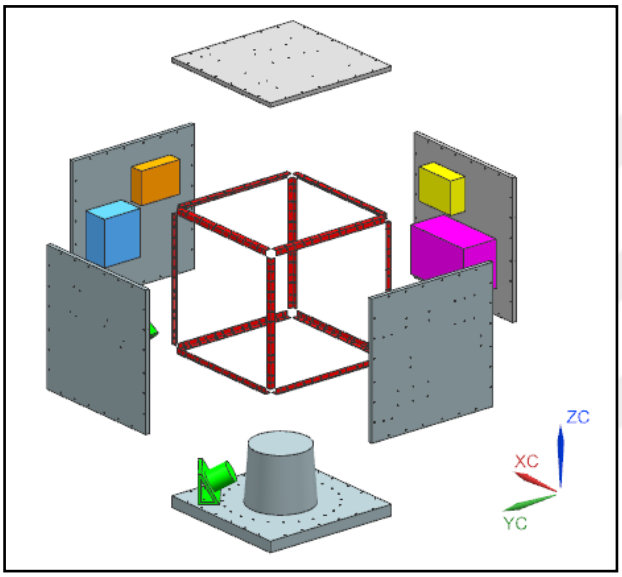
Alt sistemlerde yer alan ekipmanlarda ağırlık olarak sadece 0,4 kg ve üzerindeki ekipmanlar modellenmiş diğer ekipmanlara yerleşim olarak yer bırakılsa da modelleme ve analize dahil edilmemiştir. Çizelge 4.1 de detayı verildiği gibi toplam ekipman kütlesi 69 kg olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Alt sistem kütle dağılımları

Alt Sistem	Toplam Ağırlık (kg)
Yörünge Yönelim Alt Sistemi	6
Haberleşme Alt Sistemi	6
Güç Alt Sistemi	12
Veri Kotarma Alt Sistemi	5
İtki Alt Sistemi	10
Görev Yükü	30
Ekipman Toplamı	69

Ele alınan örnek uydunun yapısal tasarımı ve uydu içerindeki ekipman yerleşim düzeni Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu düzenleme, her bir alt sistemin işlevselliğini optimize ederken, termal ve mekanik etkileşimlerin olumsuz etkilerini önlemeyi hedeflemiştir. Örneğin pil ve güç aktarım birimi gibi termal olarak özel alana ihtiyaç duyan bileşenlerin aynı panel üzerinde bulunmaması sağlanmıştır. Bu düzenleme, ekipmanların termal dengesini koruyarak aşırı ısınmayı veya soğumayı önlemeye yöneliktir. Yine ekipmanların

yerleşimde dikkat edilen diğer bazı parametreleri mevcuttur. İtki sistemi, genellikle uydunun alt tarafına veya görev yükünden uzak bir konuma yerleştirilmiştir. Bu yerleşim, itki sırasında oluşan gaz çıkışlarının diğer hassas bileşenler üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek için tercih edilmiştir. Manyetik tork çubukları, Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşim yoluyla dönme momenti oluşturur. Dünya'nın manyetik alanı üç boyutlu olduğu için, tüm eksenlerde moment üretimi sağlamak amacıyla üç manyetik tork çubuğu üç farklı eksende konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, uydunun yönelim kontrol sisteminin verimli ve dengeli çalışmasını sağlar.



Şekil 4.2. Örnek uydunun patlatılmış resmi

4.4. Uydu Yapısal Alt Sistemi Ve Ölçüleri

Şekil 4.2'de patlatılmış resmi bulunan uydunun, uydu yapısal alt sistemi temel olarak bir yapısal çerçeve (kırmızı ile gözterilen parçalar) ve bu çerçeveye bağlı dış panellerden (gri ile gösterilen parçalardan) oluşmaktadır. Uydunun yapısal çerçevesi, ana iskelet olarak görev yapar. Çerçeve malzemesi olarak alüminyum kullanılmıştır.

Dış paneller, çerçeveye montaj edilerek uydunun dış yüzeyini oluşturur. Bu paneller, yapısal sağlamlığı artırmanın yanı sıra, uydunun alt sistem ekipmanlarını taşır. Paneller, ekipmanların yerleştirilmesine olanak tanıyacak şekilde deliklere veya montaj noktalarına sahiptir.

Çerçevenin bu çalışmada bir diğer önemi, uydu panellerinin tasarımı ve değiştirilmesinin daha kolay bir şekilde yapılmasını sağlamasıdır. Panellerin çerçeveye montak edilmesi ve birbirleri ile arayüzlerinin bulunmaması montaj ve bakım işlemlerini kolaylaştırır ve gerektiğinde bireysel panellerin veya bileşenlerin değiştirilmesine olanak tanır.

Benzer şekilde çalışmada da, optimize edilmemiş panellerin yerine optimize edilmiş panellerin montajlanması sağlanmıştır. Bağlantı bölgeleri aynı olan panellerde yük geçişlerinde de benzerlik sağlanmıştır. Her iki uydu yapısalında da panellere Çizelge 4.2 ‘de verilen kütleler entegre edilmiştir.

Çizelge 4.2. Ekipmanların paneller üzerine kütlesel dağılımı

Panel Adı	Taşıdığı Ekipman (kg)
-Z panel	11.6
Z panel	32.5
-X panel	3.2
X panel	4.3
-Y panel	9.5
X panel	8.3

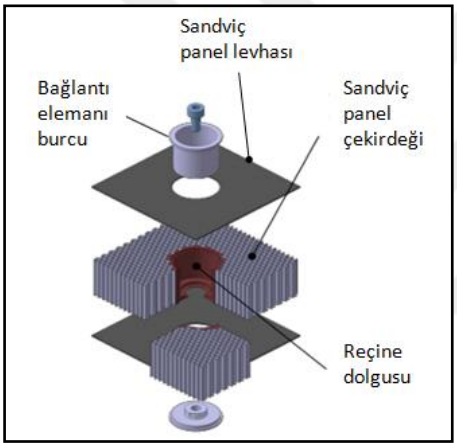
Ele alınan bu çalışma kapsamında, tüm ana alt sistem bileşenlerini içeren, tamamen yapılandırılmış bir uydu tasarımını içermediğini belirtmek gerekir; bunun yerine çalışma ölçeklenebilir uydu yapıları ailesinin temeli olarak mekanik alt sistemi geliştirmek için metodoloji oluşturmuştur.

Uydu mimarisi ölçüleri için 30kg faydalı yük taşıyan mikro uydu platformları incelenmiş ve fırlatıcı hacimleri göz inünde bulundurulmuştur. Bunlarla birlikte hedeflenen imalat yöntemei eklemeli imalat olması sebebi ile eklemeli imalat makineleri tablalarının ölçüleride değerlendirmeye katılmıştır. Sonuç olarak uydu mekanik boyutlarının 500*500*500 mm olması kararı alınmıştır. SLM®800 ve GE Additive Concept Laser X LINE 2000R, 500 mm x 500 mm boyutlarındaki bir paneli tek parça olarak üretebilecek uygun makinelerdir. Kalınlıklar fırlatıcıdan gelen gereksinimlere göre belirlenmiştir. Çizelge 4.3‘de sandviç panel için belirlenen kalınlık değerleri verilmiştir. Buna göre en kalın olan bölge fırlatıcı ile arayüzün bulunduğu –Z yani uydunun alt panelidir. Z paneli faydalı yükün montaj edildiği panel olarak en fazla kütleyi taşımaktadır. Bu sebeple kalınlık sıralamasında ikinci sıradadır. Yan panellerin taşıdıkları ekipman ağırlıkları da benzerdir bu nedenle birbirleri ile yakın kalınlığa sahiptir.

Çizelge 4.3. Panel fiziksel ölçüleri

Parça Adı	En (mm)	Boy (mm)	Toplam Kalınlık (mm)
-Z panel	500	500	42
Z panel	500	500	25
-X panel	500	500	21
X panel	500	500	21
-Y panel	500	500	22
X panel	500	500	21

Sandviç panelli uydu panellerinde montaj arayüzleri bölüm 3de de bahsedildiği gibi gömülü yapısal elemanların panelle entegre edilmesi ile oluşturulur. Şekil 4.3 sandviç panele entegre edilmiş gömülü bağlantı elemanı modeli görülebilir. Burada kullanılan inset malzemesi ve reçine malzemesi panelle fazladan bir kütle ekler.



Şekil 4.3. Sandviç panele entegre edilmiş gömülü bağlantı elemanı modeli

Panel ağırlıkları hesaplanırken paneli oluşturan bileşenlerin ağırlıkları ayrı olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada her bir bağlantı arayüzü için ortalama bir değer hesaplanmış 0,008kg olarak belirlenmiştir.

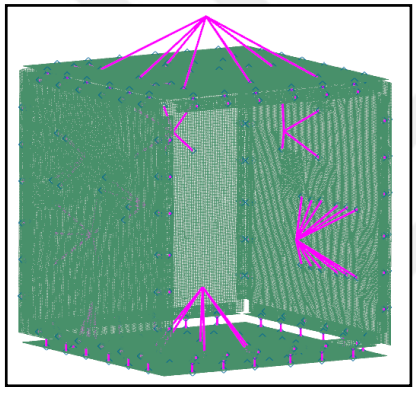
4.5. Örnek Uydu Tasarımın Doğrulanması

4.5.1. Katılık gereksinimi

Modal analizin kullanılması, bölüm 3'de literatürde belirtildiği gibi, başlangıcından bu yana uydu yapısal tasarımında temel dayanak noktalarından biri olmuştur. Yapılan bu çalışmada da ele alınan ilk tasarım gereksinimi katılık değeri olmuştur. Tasarım fırlatıcı tarafından gereklilik olarak verilen hedefe ulaştığında konsept tasarım katılık gereksinimi

sağlanmış olur. Katılık gereksinimi falcon fırlatıcısı için 40 Hz'dir.Bu gereksinimler fırlatıcıların kulanı klavuzlarından elde edilmiştir.

Şekil 4.4 'te uydu yapısının sonlu elemanlar modeli (FEM), Nastran NX formatında belirli kartlar ve eleman tipleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tüm uydu panelleri, 2D elemanlar olarak modellenmiş ve kompozit malzeme özelliklerini tanımlamak için PCOM (Property Composite) kartları atanmıştır. PCOM kartları, kompozit laminat yapılarının her bir katmanının kalınlığı ve malzeme özelliklerini belirleyerek, panelin hem düzlemsel (in-plane) hem de düzleme dik (out-of-plane) yönlerdeki mekanik davranışlarını doğru bir şekilde temsil eder.



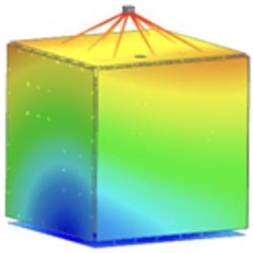
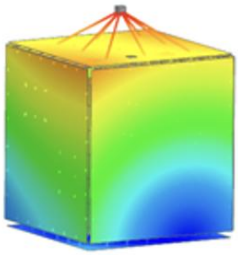
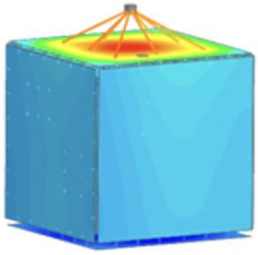
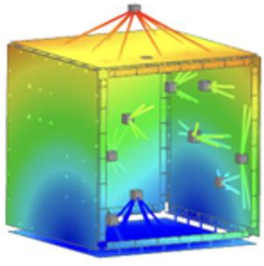
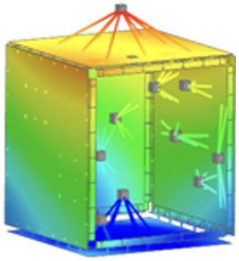
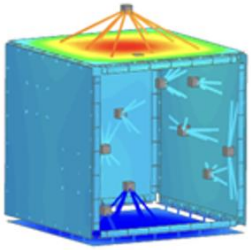
Şekil 4.4. FEM modeli

Uydu üzerindeki tüm alt sistem ekipmanlarının kütleleri, CONM2 (Concentrated Mass) elemanları kullanılarak tanımlanmıştır. CONM2 elemanları, belirli düğüm noktalarına yerleştirilen noktasal kütlelerdir ve bu sayede ekipmanların kütle etkileri modele dahil edilmiştir. Bu noktasal kütleler, ilgili panellere RB2 (Rigid Body) elemanları ile bağlanmıştır. RB2 elemanları, bir ana düğüm noktası ile diğer düğümler arasında rijit bağlantılar oluşturarak, bu noktaların birlikte hareket etmesini sağlar. Bu bağlantılar, ekipmanların kütle etkilerinin panellere rijit bir şekilde aktarılmasını sağlar ve yapının dinamik davranışını doğru şekilde yansıtır.

Uydu panelleri, yapısal dirseklere toplamda 6 noktadan RB2 elemanları ile bağlanmıştır. Bu rijit bağlantılar, paneller ve destek yapıları arasında yük transferini sağlar. Böylelikle yük altında panel davranışlarının ve titreşim modlarının doğru bir şekilde simüle edilmesine olanak tanır.

Sınır şartı olarak, uydu tabanında yer alan -Z panelindeki fırlatıcı arayüz montaj noktalarında hareket tüm yönlerde kısıtlanmıştır. Bu kısıtlamalar, SPC (Single Point Constraints) kartları ile tanımlanmış olup, bu noktaların hem translasyonel hem de rotasyonel tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır. Bu tanım, fırlatma koşulları altında uydu ile fırlatıcı arasındaki bağlantı noktalarının hareket etmeyeceğini, dolayısıyla yüklerin doğru bir şekilde modele aktarılacağını garanti eder.

Yapılan analizler sonucunda Şekil 4.5 de global modlar için yer değiştirme görselleri verilmiştir. Bu görseller, bir uydu yapısının katılık özelliklerini değerlendirmeye yardımcı olur. Yer değiştirme görsellerinde kırmızı bölgeler yerdeğişiminin fazla mavi bölgeler ise az olduğu bölgelerdir. Yatayda ilk (40,82 Hz) ve ikinci (41 Hz) doğal frekanslar, yapının X ve Y yönlerinde benzer katılık özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Bu frekansların birbirine yakın olması, yatay düzlemde dengeli bir yük taşıma kapasitesine işaret eder. Eksenel ilk doğal frekansın (78,7 Hz) daha yüksek olması ise yapının Z ekseninde, rijit olduğunu göstermiştir. Frekansların 40-80 Hz aralığında olması, yeterli katılığın ele alınan fırlatıcılar için sağlandığını göstermiştir.

	Yatayda İlk Doğal Frekans (40,82 Hz)	Yatayda İkinci Doğal Frekans (41 Hz)	Eksenel İlk Doğal Frekans (78,7 Hz)
Mod Şekli (Yer Değişikliği)			
Mod Şekli (Yer Değişikliği)			

Şekil 4.5. Konsept uydu modal analiz sonuçları

İstenilen katılık gereksinimini sağlayan alüminyum sandviç panellere sahip ve 30 kg'lık görev yükü ile birlikte 69 kg ekipman taşıyan mikro uydu panelleri tasarlanmıştır. Çizelge 4.4'te bu panellerin bağlantı sayıları ve panel kütleleri verilmiştir. Buna göre yapısal

anlamda en ağır panel uydu ile fırlatıcı arayüzlerinin bulunduğu –Z panelidir. Toplam panel kütlesi ise 12,1 kg olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. Panel ve bağlantı bölgesi ağırlıkları

Panel Adı	Panel (Levha+Çekirdek)	Bağlantı Bölge Sayısı	Bağlantı Bölgeleri ile Birlikte Toplam Kütlesi (kg)
-Z panel	0.48	58	2.8
Z panel	0.34	42	1.5
-X panel	0.27	32	1.9
X panel	0.29	36	1.9
-Y panel	0.34	40	2.0
X panel	0.39	48	2.0
			12.1

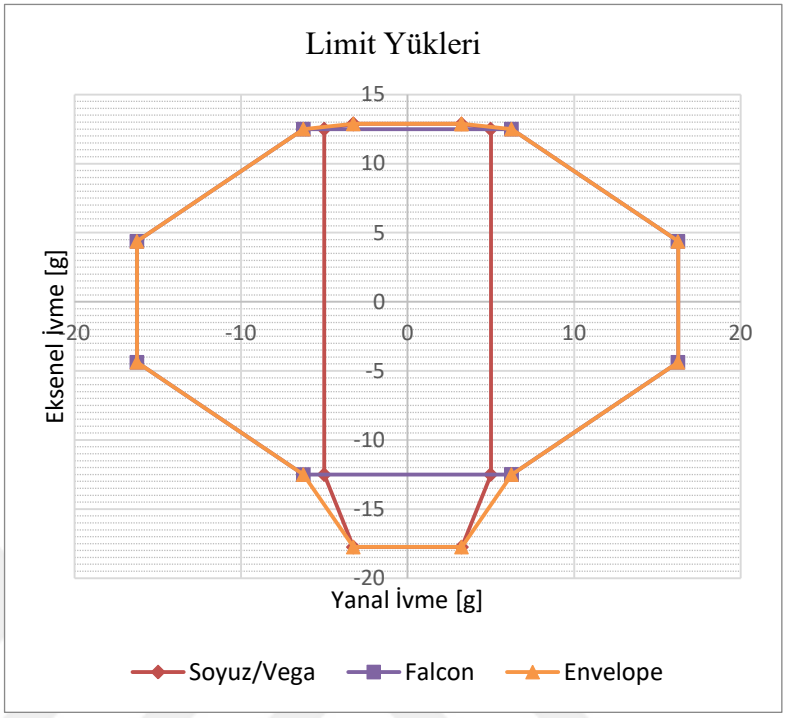
4.5.1. Gerilme ve dayanım analizi (GDA)

Gerilme ve dayanım analizi (GDA), statik veya yarı statik yükler altında uydu yapısal parçalarının güvenirliğini belirler. Uydu yapıları ve sistemleri fırlatma esnasında yarı statik olarak nitelendirilen kuvvetlere maruz kalırlar. Bu yükler genellikle sabit kalan veya çok yavaş değişen kuvvetler olarak kabul edilir. Mikro uyduların kütlesini azaltırken, yarı statik yükler altında yapısal bütünlüğü korumak, uydu tasarımlarında maliyet etkinliği ve performansı sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Bu bölümde ve katılık gereksinimi sağlayan sandviç panellerle tasarlanmış uydu yapısı analiz edilecektir. Uydu yapısına. Falcon X ve Soyuz kullanıcı kılavuzlarından alınmıştır. ECSS standartlarına göre görev için birden fazla fırlatma aracı belirlendiğinde, tüm fırlatma aracı kılavuzlarında sağlanan yarı-statik yük durumları, uzay aracının tasarımı ve doğrulaması için dikkate alınır [60]. Bu sebeple hem Falcon hemde Soyuz yüklerini kapsayacak bir yük zarfı Çizelge 4.5 de oluşturulmuştur. Oluşturulan bu zarf için toplamda 12 farklı yük durumu belirlenmiştir.

Çizelge 4.5. Yarı statik yükler

Yarı Statik Yeterlilik Yükü	
Yanal (g)	Eksenel (g)
3,25	12,88
6,25	12,5
16,25	4,38
16,25	-4,38
6,25	-12,5
3,25	-17,75
-3,25	-17,75
-6,25	-12,50
-16,25	-4,38
-16,25	4,38
-6,25	12,50
-3,25	12,88



Sandviç panellerin karmaşık yükleme koşulları altında nasıl davranacağını değerlendirmek için detaylı bir gerilme analizini gerekli kılar. Anazlileri değerlendirmek için öncelikle sandviç panel yapısının bileşen özellikleri ortaya çıkarılmalıdır. Sandviç paneller genellikle iki yüksek dayanımlı yüzey tabakası ve düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemeden oluşur.

Yüzey tabakalarında kullanılan Al2024 gibi alaşımlar, yüksek çekme ve basma mukavemeti sunarak panelin panel düzlemindeki (in-plane) yükler altındaki dayanımını artırır.

Ancak çekirdek malzemesi ortrotropik yapıda olduğundan, özellikle panel düzlemine dik (out-of-plane) yönlerde yeterli dayanımı sağlayamayabilir. Çizelge 4.6 da gösterildiği gibi panele dik yönlerde (G12) çekirdek yapısının dayanımı çok azdır. Bu sebeple anazliz sonuçlarında dayanım limitlerini belirlemek için VonMises gerilmeleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6.Çekirdek malzemesinin mekanik özellikleri

Çekirdek Yoğunluğu (kg/m³)	G12* (MPa)	G13* (MPa)	G23* (MPa)
50	1	310	138
72	1	483	193
130	1	986	352

Von Mises gerilmesi, bir malzemenin karmaşık üç eksenli gerilme durumlarında plastik deformasyona uğrayıp uğramayacağını belirlemek için kullanılan bir kriterdir. Üç ana gerilme bileşeni olan σ_1, σ_2, ve σ_3, dikkate alınarak hesaplanır ve Eş. 4.1 ile ifade edilir:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{4.1}$$

Tek eksenli yüklemede Von Mises gerilmesi doğrudan uygulanan gerilmeye eşitken, iki eksenli veya üç eksenli yükleme durumlarında bu değer, gerilme bileşenleri arasındaki farkların büyüklüğüne göre değişir. Bu eşdeğer gerilme değeri, malzemenin akma dayanımı ile karşılaştırılarak değerlendirilir; eğer Von Mises gerilmesi bu dayanımı aşarsa malzeme plastik deformasyona girer ve bu da yapısal bütünlüğü tehlikeye atar.

Çalışmada, VonMises gerilmelerinin birincil yapısal malzemenin akma dayanımını aşıp aşmadığını veya elastik sınırlar içinde kalıp kalmadığını değerlendirmek için güvenlik marjı (GP) kriteri kullanılmıştır. GP hesaplamaları, metal malzemeler için Eş. 4.2 bal peteği çekirdek malzemeler için ise Eş. 4.3 kullanılarak yapılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak, Çizelge 4,5'de verilen yük durumlarına karşın, FEM modelinde paneller için oluşturulan her bir örgü elemanı için GP hesaplanmış ve her yük durumu için minimum GP değeri belirlenmiştir. Pozitif GP değerleri, yapının yük altında güvenli olduğunu gösterir. Analiz ve GP hesaplamalarında kullanılan dayanım değerleri Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 de gösterilmiştir.

$$GP = \frac{Akma\ Gerilmesi}{Tasarım\ Geilmesi} - 1 \tag{4.2}$$

$$GP_{balpeteği} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Tasarım\ Kesme\ Gerilmesis_{xz}}{Akme\ Kesme\ Gerilmesi_L}\right)^2 + \left(\frac{Tasarım\ Kesme\ Gerilmesi_{yz}}{Akma\ Kesme\ Gerilmesi_W}\right)}} - 1 \tag{4.3}$$

Çizelge 4.7. İzotropik davranış gösteren malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Kopma Dayanım (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
Bal Peteği Levhası (Al2024)	455	393
Eklemeli İmalat (AlSi10Mg) (Isıl işlem görmüş)	345	207

Yapılan analiz sonuçlarında, birinci mod frekansı 40 Hz olan sandviç panel, yarı statik yükler altında çekirdek malzemelerinde negatif GP değerleri göstermiştir. Bunun sonucunda, sandviç panel yapısındaki çekirdek malzeme yoğunluğu artırılmıştır. Daha yoğun bir malzeme kullanılması, akma dayanımını artırarak (Bkz. Çizelge 4.7) GP'u yükseltmiştir; ancak bu durum toplam kütleyi de artırmıştır. Örnek uydya ait gerilme dayanım analizi sonrasında uydun panellerin ağırlıkları Çizelge 4.8 'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Sandviç panel kütleleri

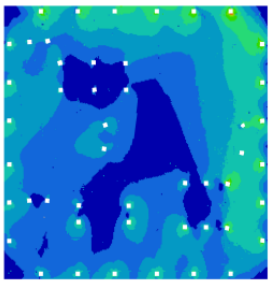
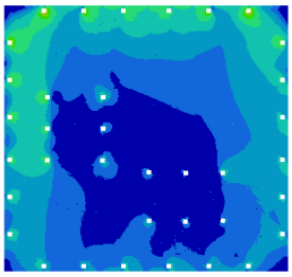
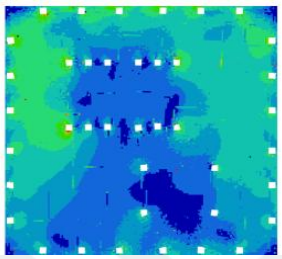
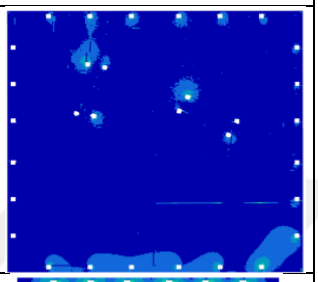
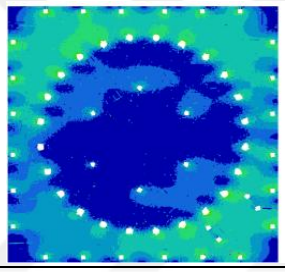
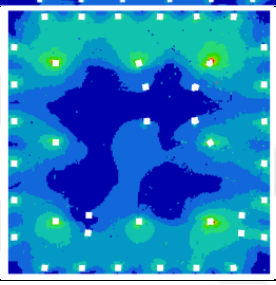
Panel	-Z Panel	Z Panel	-X Panel	X Panel	-Y Panel	Y Panel
Sandviç Panel Kütlesi (kg)	3,43	2,13	1,9	1,9	2	2

Uydu panelleri için GP değerleri görsel olarak dağılımı Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Bal peteği çekirdek malzemesi için GP değerlerinin 0,13 ile 0,36 arasında değiştiği görülmektedir.

Sandviç panelin plaka yüzeylerinde ise GP değerleri 0.36 ile 1.08 arasında değişmektedir ve bu da çekirdek malzemenin genel olarak daha düşük bir güvenlik payına sahip olduğunu göstermektedir.

Özellikle +Y ve +Z panellerinde yüksek GP değerlerinin olması, bu yüzeylerin daha güvenli bir yapısal performans sergilediğini işaret ederken, düşük GP değerlerine sahip bölgeler, güvenlik açısından daha fazla dikkat edilmesi gereken alanlar olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.9. Balpeteği şeklindeki çekirdek malzeme için GP değeri

Panel	GP Değeri	Panel	GP Değeri
-X Panel Güvenlik Payı 0,13		+X Panel Güvenlik Payı 0,36	
+Y Panel Güvenlik Payı 0,36		+Y Panel Güvenlik Payı 1,08	
-Z Panel Güvenlik Payı 0,36		+Z Panel Güvenlik Payı 0,56	

Sonuç olarak:

Modal analiz sonuçlarına göre, Falcon fırlatma aracı için frekans gereksinimleri karşılanmıştır. Yatay ve eksenel yönlerdeki ilk global doğal frekanslar için 40 Hz altındaki hiçbir doğal frekans gözlemlenmemiştir. Fakat dayanım analizi sonucunda panel dayanımları yeterli gelmemiş ve bu sebeple panellerde daha yoğun çekirdek malzemesi kullanılmıştır.Bu durumda son doğal frekans değeri 52 Hz'e yükseltilmiştir.

52 Hz doğal frekansa yükseltilen uydu yapısalında statik analizlerden elde edilen gerilme sonuçlarına göre, verilen tüm yükleme senaryolarında hesaplanan maksimum Von-Mises gerilmelerinin uydu malzemelerinin akma gerilmesinin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Böylelikle hem katılık gereksinimi hem de gerilme ve dayanım analizlerini sağlayan uydu panel ağırlıkları güncellenmiş güncellenen değerler Çizelge 4.8 verilmiştir.

Çizelge 4.10. Dayanım analizi sonrası kütle değişimi

Panel	Optimize Edilmiş Sandviç Kütlesi (52Hz) (kg)	İlk Tasarlanan Sandviç Kütlesi (40Hz) (kg)	Kütle Artımı (%kg)
-Z Panel	3,43	2,8	19
Z Panel	2,13	1,5	30
-X Panel	1,9	1,9	yok
X Panel	1,9	1,9	yok
-Y Panel	2	2	yok
Y Panel	2	2	yok

4.6. Optimizasyon Çalışması Adımları

Geliştirilen metot ile eklemeli imalat üretim tekniğine uygun, konsept uydu olarak belirttiğimiz uydudan daha hafif bir uydu tasarlanmıştır. Optimizasyon yöntemi belirlenirken mevcut yöntemlerde karşılaşılan sorunlar incelenmiş ve bunları ortadan kaldırabilecek tasarım çözümleri sunan bir metot amaçlanmıştır. Karşılaşılan sorunlar ve çözümleri aşağıda başlıklandırılmıştır.

Bölgesel güçlendirme

Sandviç yapılı panellere sahip uydu tasarımlarında uydu katılığını veya dayanımı artırabilecek için bölüm 4.6 da da görüldüğü gibi panel genelinde bir değişikliğe gidilmektedir. Bölgesel olarak dayanımın artırılması üretim süreçlerinin zorluğundan ve karmaşıklığından dolayı tercih edilmemektedir. Panel genelinde bir değişiklik ihtiyacı Çizelge 4.12 de de görüleceği için panel özelinde %30 oranında bir ağırlık artışına neden olabilmektedir. Bununla birlikte çoğu zaman gereksinimlerin sağlanabilmesi için daha major değişikler gerekli olur. Uydu panellerinin boyutlarını büyütmek, uydu mimarisine yeni paneller (kesme panelleri) eklemek veya mimariye güçlendirici çubuklar eklemek verilebilecek örnekler içerisindedir. Destek panellerin eklenmesi veya mekanik mimarinin değiştirilmesi;

- Ekipman yerleşimi kısıtlamakta;
- Uydu hacminde ve ağırlığında artmaya neden olmakta;
- Montaj ve üretim maliyetlerini artırmaktadır.

Buna karşın bu çalışmada geliştirilen metotla panel kalınlık ve malzeme yoğunluklarında bölgesel olarak değişiklik yapabileceğimiz için istenilen optimum uydu geometrisi elde edilebilmiştir. Uydu mekanik mimarisinde major bir değişiklik ihtiyacı olmamıştır.

Sınır şartlarının belirlenmesi

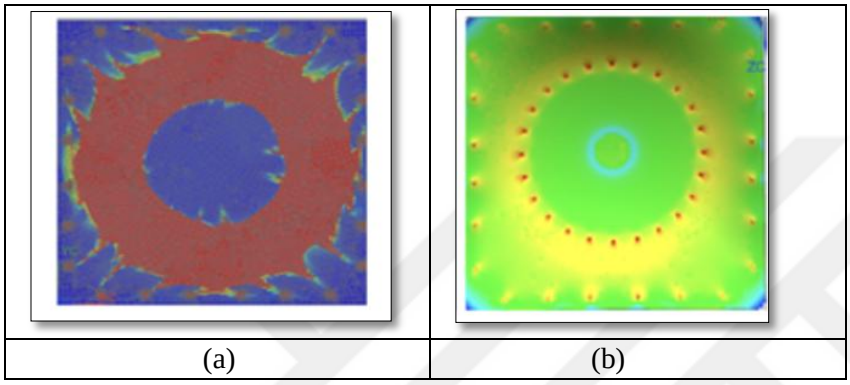
Mevcut literatür çalışmalarında uydu yapısallarının optimizasyon çalışmalarında topology optimizasyon metodu sıklıkla yer verilmiştir. Fakat bu çalışmalar küpsat uydu sınıfı gibi küçük boyuttaki uyduların birincil yapılarında veya büyük uyduların ikinci yapılarında kullanılmaktadır. Topoloji optimizasyonu, bir yapının belirli yükleme ve sınır koşulları altında maksimum performans göstermesi için malzeme dağılımını optimize eden bir mühendislik yöntemidir.

Optimizasyon yöntemi belirlenirken topoloji optimizasyonundan da yaralanılmıştır. Topoloji optimizasyonu sırasında doğal frekans kısıtı kullanılmış ve özellikle halkanın iç bölgesindeki hareket tüm yönlerde sınırlandırılmıştır. Topoloji optimizasyonu 2 boyutlu bir analiz olarak gerçekleştirilmiş panelin hangi bölgelerinde malzeme bırakılmasının yapısal bütünlük açısından kritik olduğunu belirlenmiştir. Şekil 4.11 de topoloji optimizasyon sonucu verilmiştir. Sol taraftaki görsele gore topoloji optimizasyonu sonucu kırmızı ile gösterilen alanlar, malzemenin yoğun olarak bulunması gereken bölgeler elde edilmiştir. Mavi alanlar malzemenin azaltılacağı veya tamamen kaldırılmasının uygun olacağını yerleri göstemiştir. Bu bilgiler doğrultusunda, belirlenen bölgelere takviye elemanları eklenerek yapısal dayanıklılık artırılmıştır.

Ancak, topoloji optimizasyonula uydunun diğer panelleri için belirlenecek feder yerleşimleri belirlenememiştir. Uydu seviyesinde topoloji optimizasyonu uygulandığında, uydu boyutlarının büyüklüğü sebebi ile analiz ve modelleme sürelerinde istenilen verimlilik elde edilememiştir. Diğer taraftan panellerin Şekil 4.11de olduğu gibi ayrı ayrı analiz edilmesi sınır şartlarının belirsizliğinden mümkün olmamıştır. Her bir panel kendine bağlı olan diğer parçalardan (destekler, ekipmanlar vb.) etkilenerek hareket etmekte buda sınır koşullarının belirsizliğine neden olmuştur.

Bu sebeple uydu seviyesi yapılan analizlerde daha hızlı sonuç alabilmek için gerinim enerji dağılımları incelenmiştir. Yüksek modal gerinimli bölgelerin katılığa daha fazla katkı

sağladığı bilinmektedir. İstenen modal frekansa ulaşmak için öncelikli olarak bu bölgeler ele alınmıştır. Topoloji optimizasyonu ile aynı sınır şartlarına sahip panellin modal analiz sonucu gerinim enerjisi dağılımları Şekil 4.11de karşılaştırılmıştır. Burada, gerinim enerjisinin en yoğun olduğu bölgeler (kırmızı alanlar) ile malzemenin yerleştirildiği alanların büyük oranda topoloji optimizasyonu ile örtüştüğü gözlemlenmektedir. Optimizasyon yönteminde gerinim enerji dağılımına başvurulmasının daha az karmaşık hale getirmiştir.



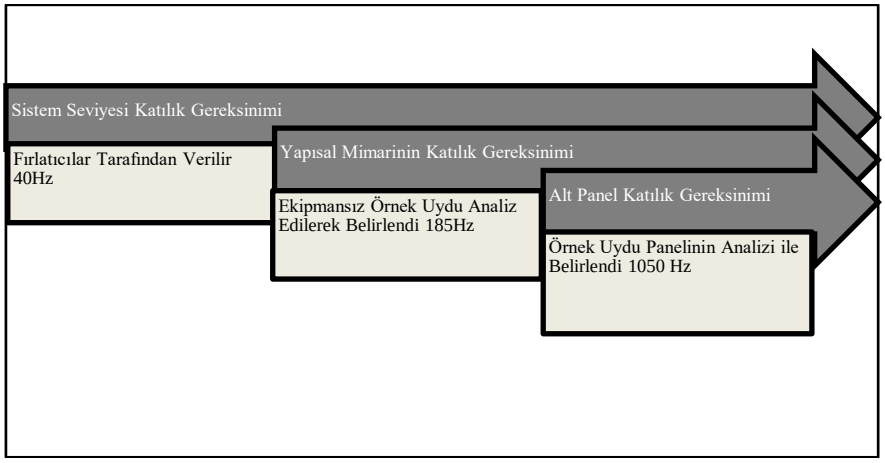
(a) (b)

Şekil 4.6. Alt panel için yapılmış topoloji (a) ve gerinim enerji dağılımları (b)

Gerinim enerji dağılımına dayanan bu yöntemde uydu bir bütün olarak ele alındığı için, uyduyu oluşturan paneller mevcut görev ve gereksinimleri ele alınarak tasarlanmıştır.

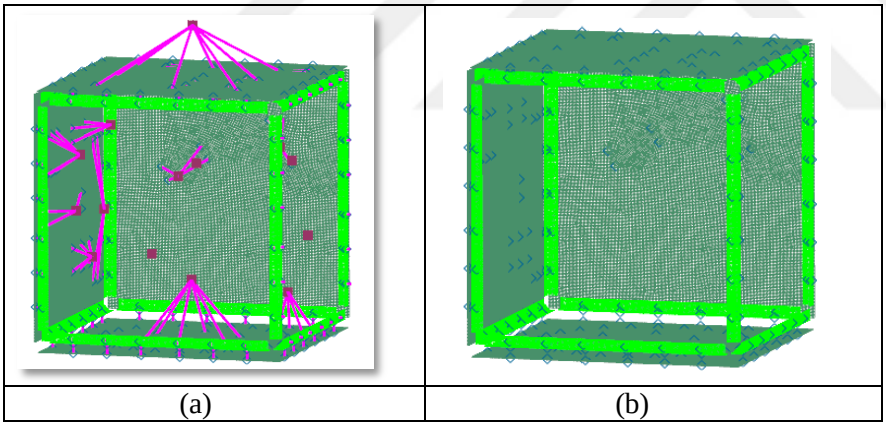
4.6.1. Katılık gereksinimlerinin belirlenmesi

Konsept uydu modelinde sistem seviyesinde gereksinimler belirlenmiş ve uydu yapısal alt sistemi sistem seviyesindeki gereksinimlere göre kabul edilmiştir. Optimizasyonu geliştirirken sistem seviyesi gereksinimler yapısal alt sistem gereksinimlerine buradan da panel gereksinimlerine kırılarak optimizasyon metodunu daha basit ve sistemli bir şekilde ilerlemesi sağlanmıştır.



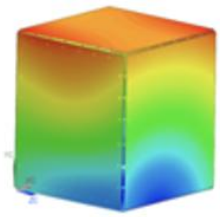
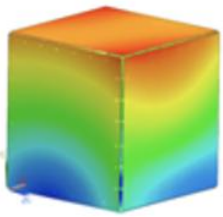
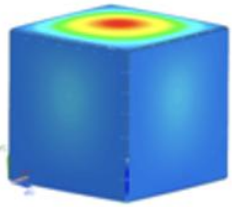
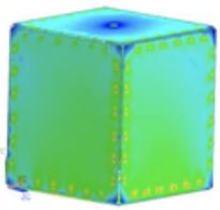
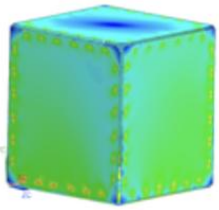
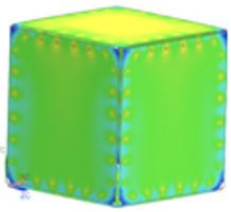
Şekil 4.7. Katılık gereksinimlerinin belirlenmesi

Şekil 4.24 de gereksinimlerin kırılımları ve detayları şema olarak verilmiştir. Burada sistem seviyesi gereksinimler fırlatıcı tarafından verilen gereksinimlerdir. Katılık gereksinimi sistem seviyesinde 40Hz'dir. Bu gereksinimi sağlayan alt sistemin katılığı tesbit etmek için yapısal alt sistem ekipmanlar olmadan analiz edilmiştir.



Şekil 4.8. Konsept uydu ekipmansız FEM modeli (a) ekipmanlı (b) ekipmansız

Sadece uydunun birincil yapısal elemanlarının bulunduğu tasarım için Şekil 4.7 de görüldüğü gibi FEM hazırlanmış ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8' de, ekipmansız uydunun yerdeğiştirme değerleri ve gerinim enerji dağılımı birlikte sunulmuştur. Görselde, kırmızı renk ile gösterilen bölgeler en yüksek yerdeğiştirme ve gerinim enerjisi yoğunluğuna sahip alanları, mavi renk ile belirtilen bölgeler ise en düşük yerdeğiştirme ve gerinim enerjisine sahip alanları temsil etmektedir. Uydunun yapısal alt sisteminin ilk doğal frekansı 182 Hz olarak belirlenmiştir. Şekil 4.24 ikinci adım olan gereksinim değeri bu şekilde belirlemiştir.

	Yatayda İlk Doğal Frekans (182 Hz)	Yatayda İkinci Doğal Frekans (183 Hz)	Eksenel İlk Doğal Frekans (390Hz)
Mod Şekli			
Gerinim Enerji Dağılımları			

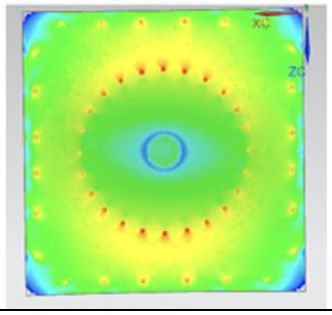
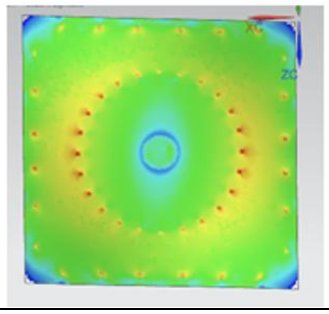
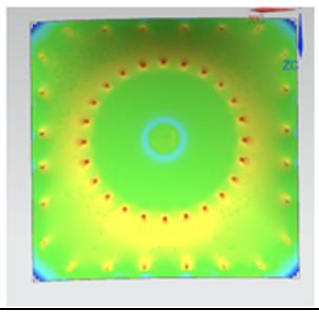
Şekil 4.9. Ekipmansız uydu modal analiz sonucu

Analizler sonucunda, panel bazında değerlendirildiğinde, en yüksek gerinim enerji yoğunluğunun alt panelde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, Şekil 4.7'deki bir sonraki kırılım olan panel katılık gereksinimi belirlenmiştir. Bunun için öncelikle sandviç panelli yapının doğal frekansı bulunmuştur. Yapılan analizler sonucu sandviç panelli yapının ilk doğal frekansı 1050 Hz olarak tesbit edilmiştir.

4.6.2. Panel optimizasyon çalışmaları

Mevcut literatür araştırmalarında düz bir plakanın katılık değerini artırabilmek için plaka, üzerine federlerin yerleştirilerek ağırlığın azaltılmasına karşın katılık değerinin korunduğu görülmüştür.

Yapının gereksinimleri sağlayabilmek için hangi bölgelerinin diğer bölgelere göre daha fazla yük taşıdığını yani hangi bölgelere feder yerleştirilmesi gerektiğini öğrenebilmek için uydu seviyesinde gerinim enerji dağılımı elde edilmiştir. Şekil 4.9 verilen görsellerde kırmızı alanlar gerinim enerjisinin en yoğun görülen bölgeleridir.

	Yatayda İlk Doğal Frekans (183Hz)	Yatayda İkinci Doğal Frekans (182 Hz)	Eksenel İlk Doğal Frekans (390Hz)
Gerinim Enerji Dağılımları			

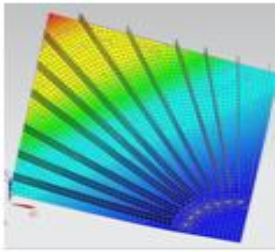
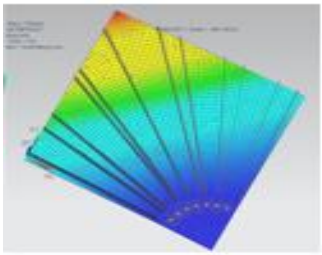
Şekil 4.10. Alt panel gerinim enerji dağılımı

Şekil 4.10 de gerinim enerji dağılımından çıkan sonuçlara bağlı olarak feder dağılımlarını merkezde bulunan arayüz bağlantı noktalarından panel bağlantı noktalarına doğru yerleştirilmesi gerektiği tesbir edilmiştir.

4.6.3. Cad tabanlı optimizasyon yöntemi

Federlerin panel üzerindeki dağılımını gerinim enerjisine bağlı olarak federlerin şekil ve boyut optimizasyonunu ise CAD tabanlı geometrik optimizasyonun avantajlarını kullanılan parametrik olarak yapılmıştır.

Gerinim enerji dağılımından elde edilen feder yönelimi CAD tabanlı bir optimizasyon ile desteklenmiştir. Cad optimizasyonu için hazırlanan Çizelge 4.12'de solda verilen geometride tasarlanan tüm federler sabit kalınlıkta alınmıştır. Bunun nedeni burada dikkatin feder tasarımına değil federlerin yerleşim optimizasyona odaklanmış olmasıdır.

Optimizasyon öncesi Feder Dağılımı	Optimizasyon sonrası Feder Dağılımı
	

Şekil 4.11. Feder Dağılımı Geometrik Optimizasyon

Şekil 4.11‘de, plakanın feder dağılımının optimizasyon öncesi ve sonrası durumlarını karşılaştırmaktadır. Optimizasyon öncesinde, federlerin panel kenarındaki mesafeleri 9° derecelik eşit aralıklarla düzenlenmiş, bu da üretim ve tasarım açısından basit ve simetrik bir yapı sağlasa da, doğal frekansı artırma açısından ideal bir çözüm sunmamaktadır. Geometrik optimizasyonda, feder dağılımı açısal olarak 4° ile 15° arasında dağılacak şekilde parametrik bir denklem kurulmuş ve bu parametreler NX Simcenter yazılımının Geometrik Optimizasyon modülü kullanılarak eş zamanlı çözülmüştür. Amaç fonksiyonu $\min m$ iken kısıtlarımız doğal frekans ve tasarım sınırlarıdır.

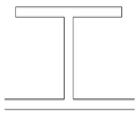
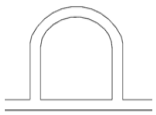
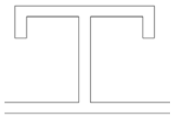
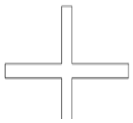
Optimizasyon sonrasında, federlerin belirli bölgelere yaklaştığı ve daha stratejik bir şekilde konumlandırıldığı gözlemlenmiştir. Federlerin bu şekilde yerleştirilmesi, plakanın dinamik performansını artırmış ve modal frekans değerlerini iyileştirmiştir. Bu yaklaşım, federlerin ağırlık, maliyet ve performans dengesi göz önüne alınarak optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Yapılan CAD tabanlı feder yerleşim analiz sonucuna dayanarak;

- Panel bağlantı noktaları konumlandırılabilir.
- Birbirine yakın olarak verilen feder bölgelerinde feder kalınlıkları artırılarak yapının katılık değeri artırılabilir.
- Optimum bir feder dağılımı sağlanarak kütle azaltımına katıda bulunulabilir.

Bu şekilde hem CAD tabanlı feder dağılım yöntemi hem de gerilim enerji dağılımından yararlanılarak feder dağılımı belirlenmiştir.

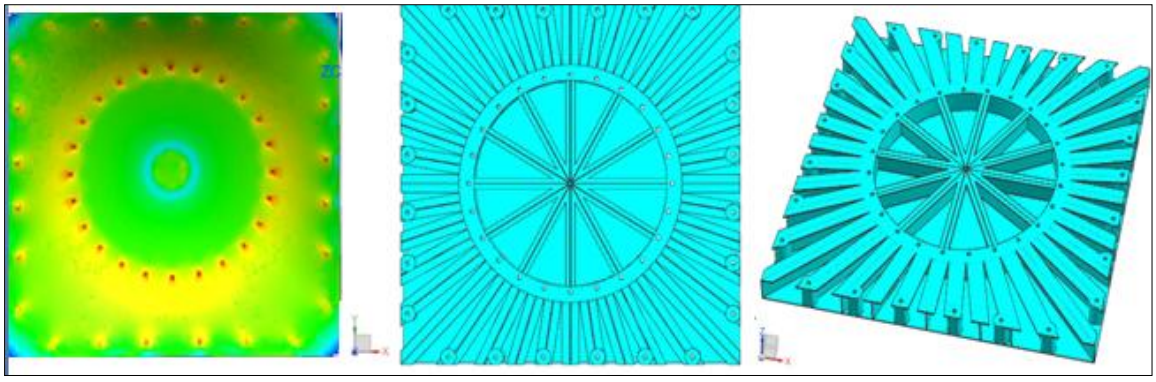
Feder dağılımı belirlendikten sonra federlerin geometrik özelliklerinin seçimi incelenmiştir. Çizelge 4.11’ de verilen, dört farklı kesit türünün doğal frekans, kütle ve yer değiştirme özelliklerini karşılaştırmaktadır. Kesit 1 ve Kesit 3, yüksek doğal frekans değerleri (160 Hz ve 162 Hz) ile daha dirençli yapılar olarak öne çıkarken, Kesit 4 en düşük doğal frekansa (95 Hz) sahip olup titreşimlere karşı daha hassas olduğu belirlenmiştir. Kütle açısından bakıldığında, Kesit 1 ve Kesit 4 (0,047 kg) diğer kesitlere göre daha hafif, Kesit 2 ve Kesit 3 ise 0,05 kg ağırlığa sahiptir. Sonuç olarak federlerde kullanılmak üzere Kesit 1 seçilmiştir.

Çizelge 4.11. Federlerin Kesit Geometrisi

	Kesit 1	Kesit 2	Kesit 3	Kesit 4
Şekil				
Doğal Frekans (Hz)	160	138	162	95
Kütle (kg)	0,047	0,05	0,05	0,047

4.6.4. Panel geometrisinin oluşturulması

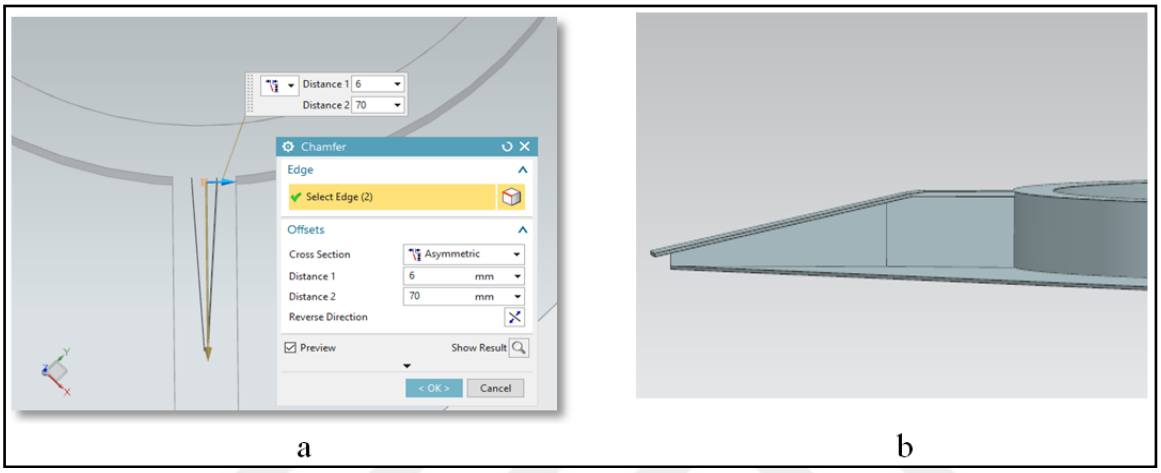
Feder dağılımları yapılırken gerilim enerjide görüldüğü gibi merkez noktasında az yoğunluklu ama çember dışından panel bağlı arayüzlerine daha sık dağılımlar yapılmıştır. Feder dağılımlarından elde edilen bilgiler ışığında panellerin bağlantı bölgeleri noktaları belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Plaka üzerinde feder dağılımı

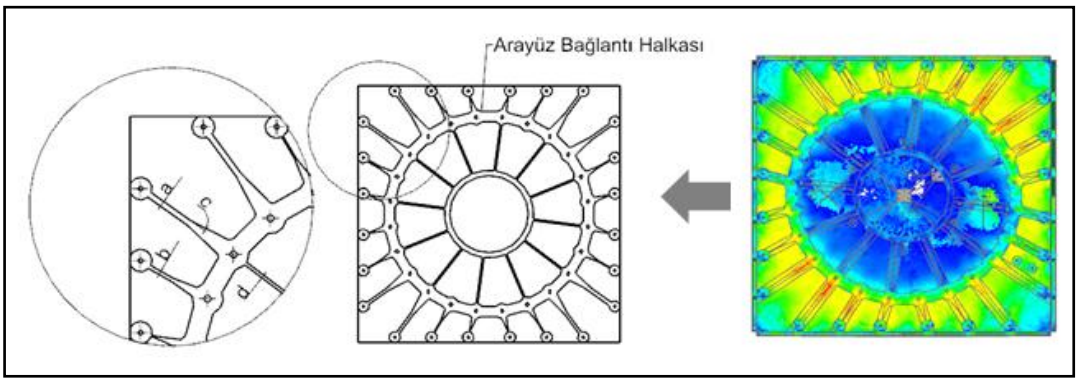
Tasarlanan panel, konsept uydu geometrisine montaj edilmiş ve yan panelleri sandviç panel olan uydu yapısalında modal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu sayede federler üzerindeki gerinim dağılımları incelenmiştir. Eklemli imalat yönteminin bize kazandırdığı tasarım özgürlüğü ile birlikte federler üzerinde istenilen geometrik değişiklik yapılmıştır.

Örneğin Şekil 4.12 da halka kısmın bulunduğu bölgede yoğun bir gerilim enerji olduğu fakat kenarlara gidildikçe bu yoğunluğun azaldığı görülmektedir. CAD geometrisi üzerinde federlerde Şekil 4.13 a'da gösterildiği gibi bir pah geometrisi tanımlanmıştır. Yani halkaya doğru feder kalınlığı bölgesel olarak artırılmıştır. Optimum kalınlık artışını bulmak için geometrik optimizasyon yapıldı. Şekil 4.16 da verilen c parametresi yaratılmış oldu.



Şekil 4.13. Geometrik optimizasyon parametreleri

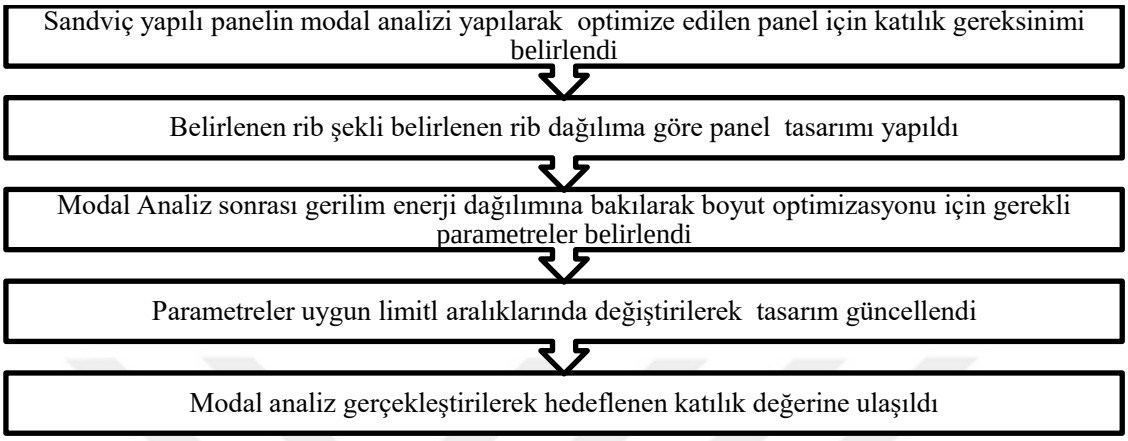
Kalınlık artışı ile birlikte istenilen doğal frekansa ulaşılırken hedeflenen kütleden uzaklaşılmıştır. Bu sebeple gerinim energisi düşük olan bölgelerden azaltma yapılmıştır. Örneğin Şekil 4.14 de çember arayüz bölgesinde feder yüksekliği sabit bırakılırken kenar bölgelere gittikçe feder yüksekliği bir pah şeklin de azaltılmıştır.



Şekil 4.14. Gerinim enerji dağılımına göre tasarım parametrelerinin belirlenmesi

Azaltma işlemi, geometrik optimizasyona yönelik parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzer örneklerle yapılan parametrik analizler sonucunda, nihai panel

tasarımı olarak feder şekli belirlenmiştir. Panel üzerindeki federlerin yerleşimi ve feder geometrilerinin oluşturulması süreçlerini kapsayan panel optimizasyon aşamaları, Şekil 4.15'de özetlenmiştir.

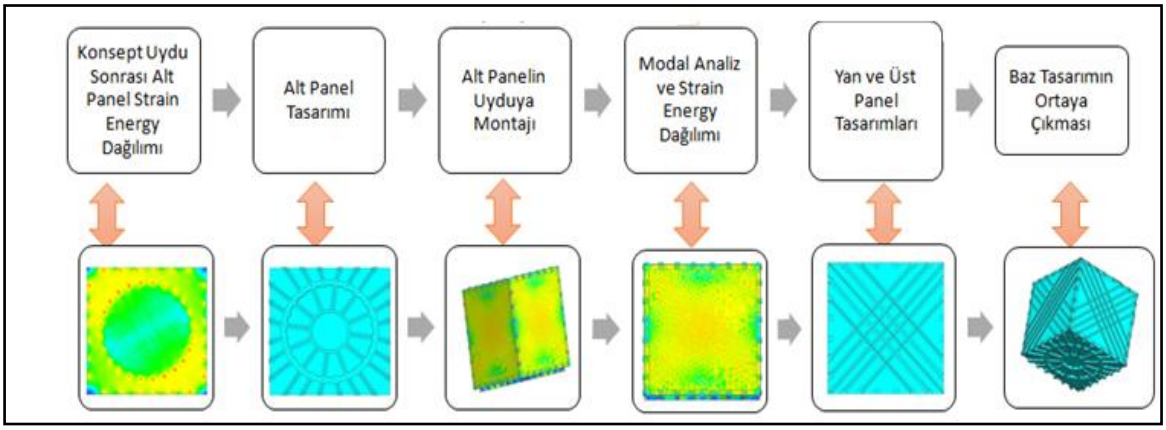


Şekil 4.15. Panel seviyesi tasarım adımları

4.6.5. Baz tasarım tasarımının tamamlanması ve onaylanması

Uydununun diğer panelleride bir önceki bölümde belirtildiği gibi tasarlanmıştır. Bunun için öncelikle tasarımı tamamlanan alt panelin etrafındaki yan paneller için federsiz paneller tasarlanmıştır. Baz tasarım olarak adlandırılan bu uydu alt sistem tasarımına yapılan modal analiz sonrası yan panellerin gerinim enerjisi dağılımı incelenmiştir. Şekil 4.16'de baz tasarıma ait tasarım geliştirme akış diyagramı verilmiştir.

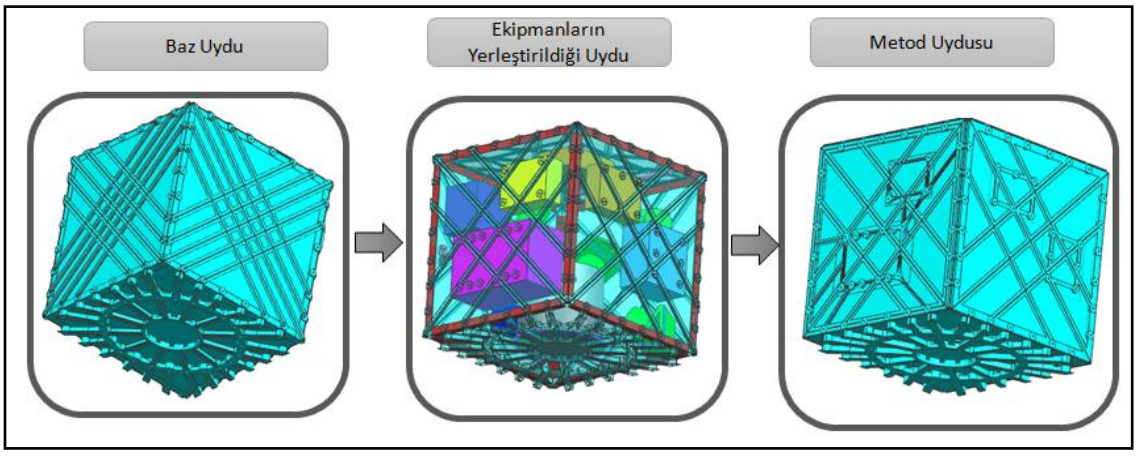
Baz tasarımda daha öncede belirtildiği gibi ekipmanlara yer verilmemiştir. Ekipmanlar yer verilmediği durumda uydunun yan panel tasarımları ortak bir tasarımda buluşmuştur. Konsept tasarımda da olduğu gibi baz tasarımda da paneller dirseklere montaj edilmiştir.



Şekil 4.16. Baz tasarımın geliştirilmesi

4.7. Optimize Edilmiş Tasarımının Tamamlanması ve Onaylanması

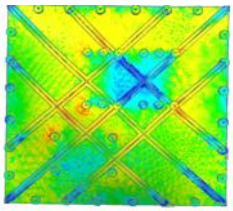
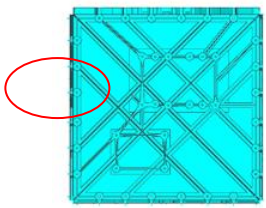
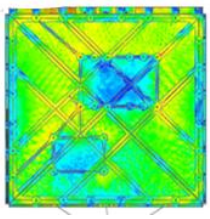
Baz tasarım ortaya çıkardıktan sonra ekipmanlar olması gereken yerlere yerleştirilerek metot uydusu modellenmiştir. Şekil 4.17 de metod uydunun son hali gösterilmiştir. Burada feder dağılımları belirlenen panellerin bulunduğu boş uydu yapısna daha önce yerleri belirlenmiş olan ekipmanlar yerleştirilmiştir. Ekipman ağırlıkları ile birlikte optimize edilmiş uydu baz tasarımda elde edilen panel tasarımları yeniden analiz edilmiştir.



Şekil 4.17. Metot uydu modellemesi

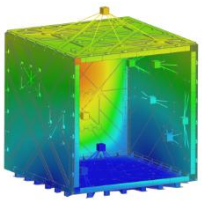
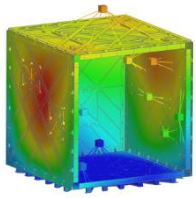
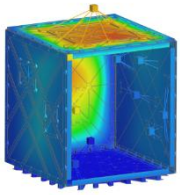
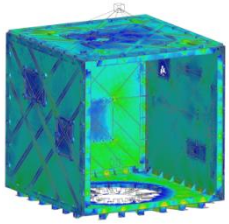
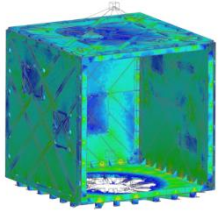
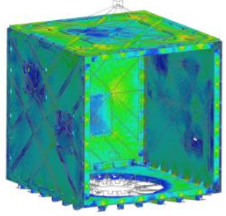
Ekipmanlardan kaynaklı panellerin gerinim enerjilerinde bölgesel yoğunluklar beklendiği gibi analiz sonuçlarında görülmüştür. Şekil 4.11 ‘de güç birimi arayüzlerinde gerilim enerji yoğunluğunun fazla olması nedeniyle bu bölgelere yapılan eklemeler gösterilmiştir. Eklemeler sonrasında gerilim enerji yoğunluğu bu bölgelerde azalmış ve daha homejen bir yapı elde edilmiştir.

Diğer taraftan gerinim enerjinin düşük olduğu bölümlerde panellerdeki feder oranları ve malzeme yoğunlukları azaltılmıştır.

Ekipman yerleşimi sonrası gerinim enerji değişimi	Elde edilen gerinim enerji değişimine göre güçlendirmelerin yapılması	Güçlendirme Sonrası Gerinim enerji Dağılımı
		

Şekil 4.18. Modal analizi sonuçları

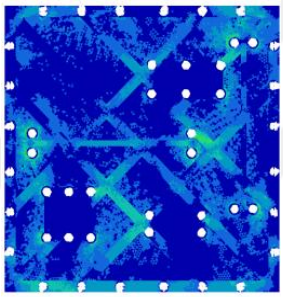
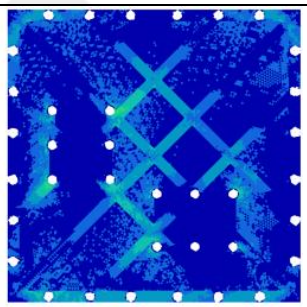
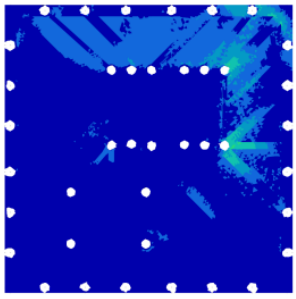
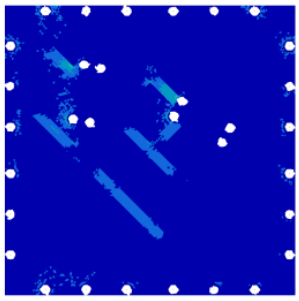
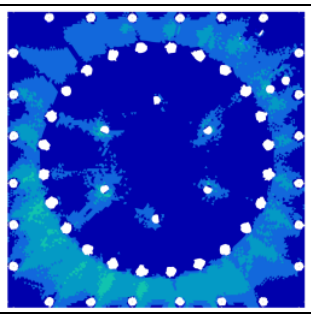
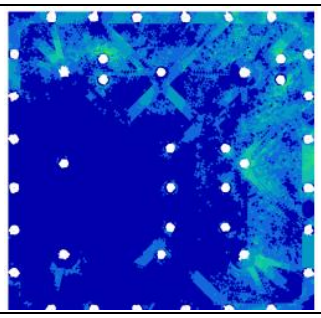
Feder yerleşimleri sonlandırıldıktan sonra elde edilen son tasarım doğal frekans değerleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Üç farklı doğal frekans (Birinci Yanal Doğal Frekans 41,13 Hz, İkinci Yanal Doğal Frekans 42,59 Hz ve Eksenel Doğal Frekans 57,75 Hz) için yapının davranışları şekilde verilmiştir. Üst sırada, frekanslara bağlı olarak yer değiştirme dağılımı gösterilmektedir. Kırmızı alanlar yer değiştirmenin en fazla olduğu bölgeleri, mavi alanlar ise en az olduğu bölgeleri temsil etmektedir. Alt sırada ise gerinim dağılımı yer almaktadır. Gerinim enerji dağılımının homojen yapıda olması uydunun optimizasyonun istenen düzeyde olduğunu göstermiştir.

	Birinci Yanal doğal Frekans 41.13Hz	İkinci Yanal doğal Frekans 42.59 Hz	Eksenel Doğal Frekans 57.75 Hz
Yer Değiştirme			
Gerinim Enerji Dağılımı			

Şekil 4.19. Son tasarım doğal frekans değerleri

4.7.1. Optimize edilmiş uydu için gerilme ve dayanım analizi

Bu bölümde Gerilme ve Dayanım Analizi (GDA) ile optimize edilmiş uydu platformunun verilen yükler altında yapının güvenirliğine bakılmıştır. Çalışmada, VonMises gerilmelerinin birincil yapısal malzemenin akma dayanımını aşıp aşmadığını veya elastik sınırlar içinde kalıp kalmadığını değerlendirmek için güvenlik marjı (GP) kriteri kullanılmıştır. GP hesaplamaları, metal malzemeler için bölüm 4.3.2'de verilen Eş.4.2 kullanılmıştır. Şekil 4.20'de, optimize edilmiş her bir panel için ayrı ayrı GP değerlerini ve bu değerlerin görselleştirilmiş dağılımlarını gösterilmiştir. +Y panelinde GP değeri 557 ile en yüksek performansı sergilerken, +Z yönünde 071 gibi oldukça düşük bir değer görülmüştür.

Panel	Optimize Edilmiş Panel için GP değeri	Panel	Optimize Edilmiş Panel için GP değeri
-X Panel GP Değeri 0,98		+X Panel GP Değeri 0,93	
-Y Panel GP Değeri 2,23		+Y Panel GP Değeri 5,57	
-Z Panel GP Değeri 3,67		+Z Panel GP Değeri 0,71	

Şekil 4.20. Optimize edilmiş panel için GP dağılımı

Sonuç olarak:

Modal analiz sonuçlarına göre, belirlenen fılatma araçları için frekans gereksinimleri karşılanmıştır. Yanal ve eksenel yönlerdeki ilk global doğal frekanslar için 40 Hz altındaki hiçbir doğal frekans gözlemlenmemiştir.

Statik analizlerden tüm yükleme senaryolarında GP değerinin sıfırdan büyük olması hesaplanan maksimum Von-Mises gerilmelerinin uydu malzemelerinin akma gerilmesinin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

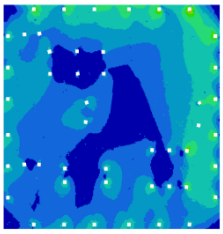
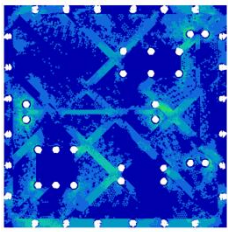
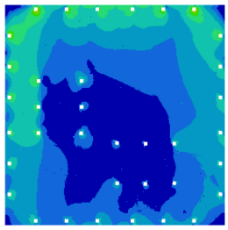
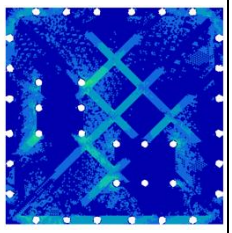
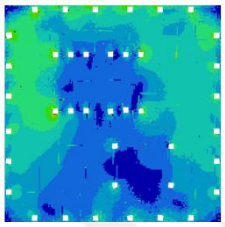
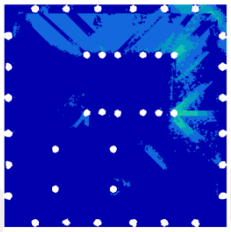
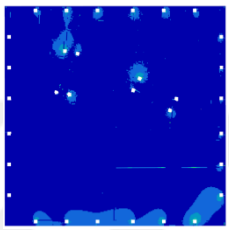
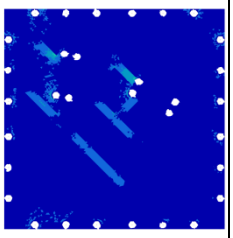
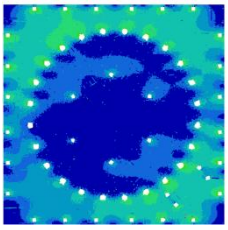
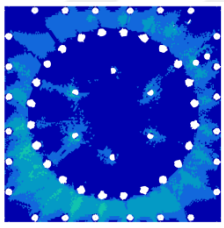
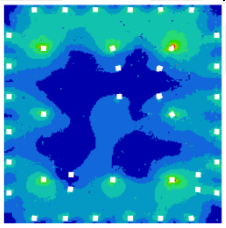
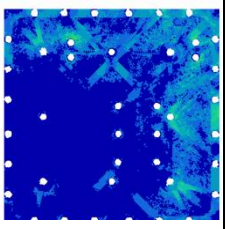
Çizelge 4.12'de optimize edilmiş ve analizlerle doğulanmış uydunun panel ağırlıkları verilmiştir. -Z panelinin diğer panellere göre daha ağır olması, bu panelin uydu ve fırlatıcı arayüzüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Z paneli ise görev yükü platformunu taşıdığı için diğer paneller göre daha fazla kütleye sahiptir.

Çizelge 4.12. Panellerin son tasarımlarına ait panel kütle dağılımı

Panel	-Z Panel	Z Panel	-X Panel	X Panel	-Y Panel	Y Panel
EI Kütle (kg)	2,9	1,98	1,2	1,3	1,3	1,3

4.8. Optimizasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.21'de maksimum VonMises gerilme sonuçlarını GP değerleri açısından listelenmiştir. Hem sandviç panelli yapının hem de eklemeli imalatta uygun olarak tasarlanmış yapının hesaplanan sonuçlarının özetini sunmaktadır.

Panel	Sandviç Panel Honeycopecore MoS Dağıtımı	Eklemeli İmalatlı Panel MOS Dağılımı	Panel	Sandviç Panel Honeycopecore MoS Dağıtımı	Eklemeli İmalatlı Panel MoS Dağılımı
-X Panel	0,13 	0,98 	+X Panel	0,36 	0,93 
-Y Panel	0,36 	2,23 	+Y Panel	1,08 	5,57 
-Z Panel	0,36 	3,67 	+Z Panel	0,56 	0,71 

Şekil 4.21. Panel üzerindeki GP dağılımları

Fırlatıcıların bileşkesinden oluşan 12 farklı yük kombinasyonunda her iki uydu platformda analiz edilmiştir. Elde edilen değerlendirme sonucunda, 40 Hz katılık gereksinimine sahip sandviç panel istenilen dayanımları sağlayamamıştır. Sandviç panelin yüzey malzemesi olan Al2024, gerekli güvenlik katsayısı (GP) değerlerini karşılarken, çekirdek bölgesinde özellikle panelin yatay kesitindeki kesme gerilmeleri malzemenin akma gerilmesini aşmış ve GP değerleri negatif sonuçlar vermiştir. Panel dayanımını artırmak için daha yoğun bir çekirdek malzeme kullanılmıştır. Çekirdek yoğunluğunun artması, panel kütlesinin de artmasına neden olmuştur.

Eklemeli imalatla üretilen panellerle oluşturulan uydu platformu ilk mod gereksinimini sağladığı hali ile 12 yük durumu içinde pozitif güvenlik marjlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, uydu panellerinin gerilme analizi gereksinimleri karşılayabilmek

için ekstra bir tasarım değişikliğine ihtiyaç duyulmamış. İlk doğal frekansı 41,13 Hz olarak kalmıştır.

Ağırlık karşılaştırması Çizelge 4.13 de listelenmiştir. Çizeldeki verilere göre, optimize edilmiş EI kütlesi sayesinde panellerde toplam %25'lik bir kütle azaltımı sağlanmıştır. En yüksek kütle azaltımı %37 ile -X Panelinde görülmüştür, onu %35 ile Y Panel ve %34 ile -Y Panel takip etmiştir.

Çizelge 4.13. Kütle azaltımı optimizasyon analizi

Panel	Sandviç Kütlesi (kg)	EI Kütle (kg)	Kütle Azaltımı (%kg)
-Z Panel	3,43	2,92	15
Z Panel	2,13	2	6
-X Panel	1,9	1,2	37
X Panel	1,9	1,3	33
-Y Panel	2	1,3	34
Y Panel	2	1,3	35

4.9. Rastgele Titreşim Yüklerinin İncelenmesi

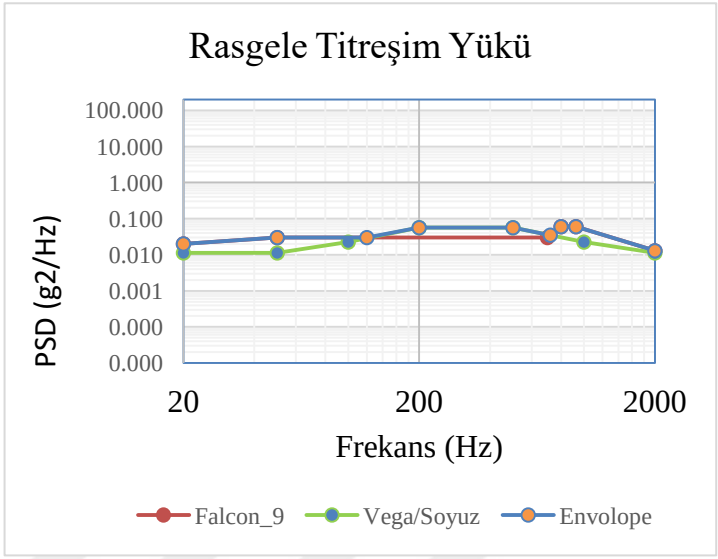
Rastgele dinamik analiz, uzay aracının fırlatma sırasında rastgele titreşimleri simüle etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Rastgele analiz, genellikle 20- 2000 Hz aralığındaki geniş bir frekans bandındaki titreşimleri yakalamakta ve bunları aynı anda rastgele genlik ve faz ile bir ivme olarak uygulamaktadır.

Fırlatma araçları kullanıcı kitapçıklarında 20- 2000 Hz frekans bandındaki her frekansta yoğunluğu belirten g^2/Hz birimlerinde bir İvme Spektral Yoğunluğu (ASD) olarak tanımlanan rastgele bir profil gereksinimi belirtilmektedir.

Bu çalışmada farklı fırlatıcılar ele alındığı için en güvenli durum profili, tüm fırlatma aracı adayları tarafından belirtilen profillerden her frekansta maksimum yoğunluğu alarak oluşturulmuştur. Çizelge 4.14 de iki farklı fırlatıcının (Falcon ve Soyuz) için rastgele titreşim yükleri verilmiş ve fırlatıcıların en yüksek yük değerlerini içerecek bir zarf (Envolope) oluşturulmuştur. Bu değer analizlerde kullanılan rastgele titreşim yük profilidir.

Çizelge 4.14. Rastgele titreşim yük zarfı

Frekans (Hz)	PSD (g2/Hz)
20	0,020
50	0,030
120	0,030
200	0,056
500	0,056
720	0,035
800	0,060
925	0,060
2000	0,013



Bileşik profil, arayüze girdi yapılmış ve ekipmanların arayüzünden ivme yanıtı PSD şeklinde hesaplanmıştır. Arayüze girdi yapılan profiller X, Y ve Z eksenlerinde her bir eksen için ayrı ayrı uygulanmıştır ve sonuçlar tüm eksenlerden yine ayrı ayrı okunmuştur.

Bu çalışmada uydu panellerinde rastgele titreşim yükleri sonucu oluşan gerilim dayanımına değinilmemiştir. Bunun yerine rastgele yüklerin ekipman arayüzlerine etkisi üzerine durulmuştur. Küçük uydularda sönümleme katsayısının az olması uydu içine yerleştirilen ekipmanların arayüzlerinde ekipmanların dayanmayacağı yüklerin meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle analiz modelinde modellenen tüm ekipmanların arayüzlerine gelen PSD dinamik analiz simülasyonu yoluyla hesaplanmış ve ekipmanların dayanım limitleri ile karşılaştırılmıştır.

Uydu platformu içine yerleştirilen ekipmanların her biri için ekipmanın dayanabileceği rastgele dayanım yük profili ECSS standartına göre belirlenmiştir. ECSS standartlarına göre kütlesi kg eşit veya düşük ekipmanların limit dayanım değerleri Çizelge 4.15 belirtildiği gibi hesaplamaktadır. Ele alınan tüm ekipmanların yerleri belirlenmiş ve hepsi yapısal panellerde yer almaktadır.

Çizelge 4.15. Kütle (K) bazlı ekipman dayanım limitleri K<50 kg

Yer	Süre	Seviye
Yapısal panelde bulunan veya konumu bilinmeyen ekipman	Dikey 2,5 dk/eksen	(20 -- 100) Hz +3 dB/octave (100 -- 300) Hz PSD(M) = 0,12 g2/Hz × (M + 20 kg)/(M + 1 kg) (300 -- 2 000) -5 dB/octave
	Yanal 2,5 dk/eksen	(20 -- 100) Hz +3 dB/octave (100 -- 300) Hz PSD(M) c = 0,05 g2/Hz × (M + 20 kg)/(M + 1 kg) (300 -- 2 000) Hz -5 dB/octave
Ekipman yapısal panelde yer almıyor	Tüm eksenler 2,5 dk/eksen	(20 -- 100) Hz +3 dB/octave (100 -- 300) Hz PSD(M) c = 0,05 g2/Hz × (M + 20 kg)/(M + 1 kg) (300 -- 2 000) Hz -5 dB/octave
a Yük akustik ortamı tarafından doğrudan uyarılan bir Panel. b Ekipmanın dikey ekseni = sabitleme düzlemine dik. Ekipman yan ekseni = sabitleme düzlemine paralel. c M = kg cinsinden ekipman kütlesi, PSD = g2/Hz cinsinden Güç Spektral Yoğunluğu		

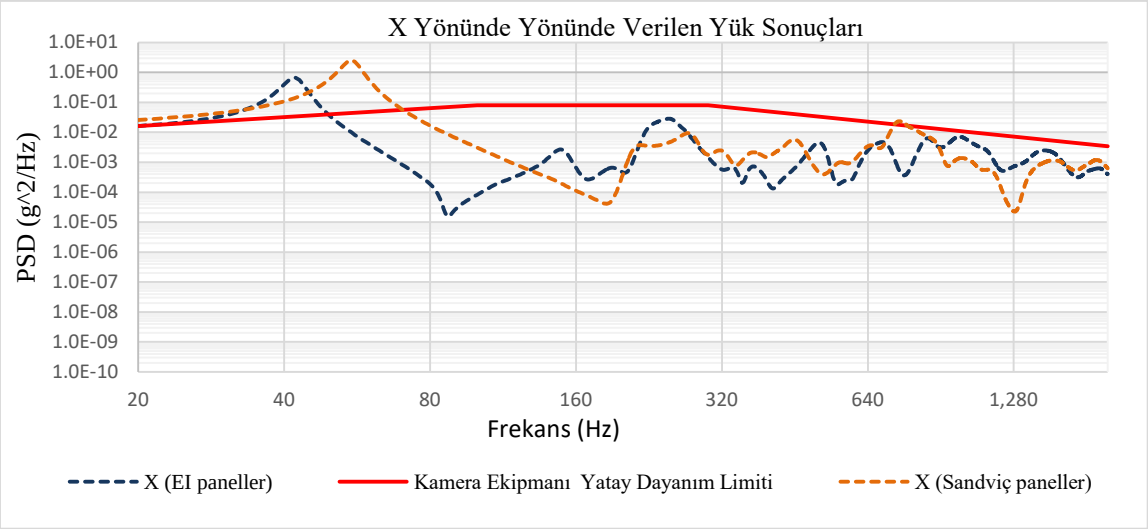
Uydu seviyesi rastgele analiz sonuçlarından alınan PSD değerlerinin hesaplanan limit değerlerinin altında olması gerekmektedir. Böylece ekipman istenilen görevi yapabilir fakat bu yüklerin üzerindeki yüklemelerde ekipmanda verimlilik kaybı veya bileşenlerin arızalanması gibi istenmeyen sonuçlar oluşabilir.

Kamera, pil, güç birimi, S-band ve manyatik tork çubuğu gibi ekipmanların dayanımları ayrı ayrı incelenmiş ve sandviç panelli yapı ile eklemeli imalatli yapının karşılaştırması yapılmıştır.

4.9.1. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.22'de uydu arayüzene sadece X yönünde yük verilmiş ve her yönlerde kamera arayüzünden PSD değerleri okunmuştur. Grafikte lacivert olarak belirtilen değerler optimize edilmiş uydunun değerleri iken turuncu ile belirtilen değerler ise sandviç panelli yapıdan okunan değerler olarak gösterişmiştir. Kırmızı ile belirtilen ise kamera ekipmanın güvenle çalışabilmesi için belirlenen limit değerdir. Buna göre;

Panelin ilk doğal frekansı, eklemeli imalatla yapılan yapının katılık gereksinimi nedeniyle 40 Hz civarındadır. Bu yüzden bu bölgede genlik artışı beklenen bir durum olmuştur. Benzer şekilde, sandviç panel yapısının ilk doğal frekansı dayanım gereksinimlerini karşılayabilmesi için 50 Hz'ye yükseltilmiştir, bu nedenle bu bölgede de genlik artışı görülmesi normaldir.



Şekil 4.22. Kamera ekipmanı için X yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

Eklemeli imalatla optimize edilmiş panellerdeki genlik artışı, sandviç panelli yapılara göre çok daha düşüktür. Eklemeli imalat panelindeki genlik artışı 0,56 g^2/Hz iken, sandviç panelde bu değer 2,27 g^2/Hz'ye çıkmaktadır. Falcon 9 fırlatıcı tarafından sağlanan indirgeme ile bu değerler sırasıyla 0,056 g^2/Hz ve 0,227 g^2/Hz'ye düşürülebilir. Bu durumda, eklemeli imalatlı yapıda kamera ekipmanı güvenle çalışırken, sandviç panelli yapıda bu değerler sınırları aşar, dolayısıyla güvenli çalışması mümkün değildir.

X yönünde yapılan yükleme nedeniyle, X yönündeki PSD (Güç Spektral Yoğunluğu) değerlerinin yüksek çıkması beklenen bir durumdur. Diğer yönlerde ise uyduların ilk doğal frekanslarına yakın bölgelerde genlik artışları gözlemlenmiştir, ancak bu bölgelerde aşım (genlik fazla artışı) söz konusu olmamıştır.

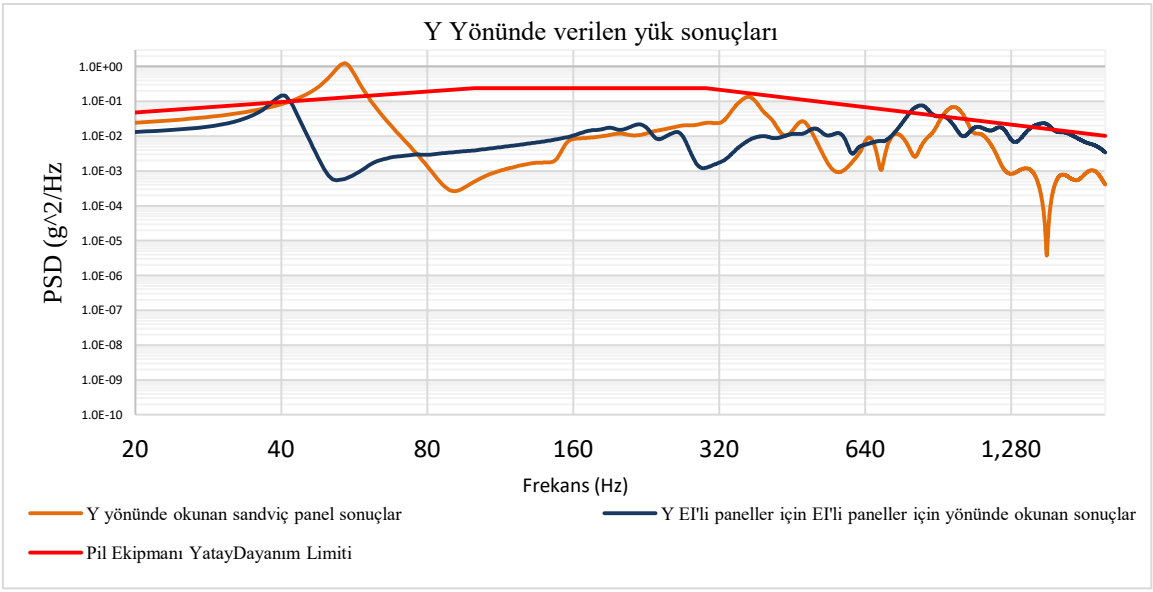
Yüksek frekanslarda optimize edilmiş panelde herhangi bir genlik artışı gözlemlenmezken, sandviç panelli yapının Y yönündeki ölçümlerde genlik artışı gözlemlenmiştir. Falcon 9 fırlatıcı, uydunun doğal frekanslarında bir indirgeme sağlar; ancak diğer frekanslarda indirgeme yapılmasına izin verilmemiştir. Bu nedenle, aşım olan bölgenin incelenmesi ve genlik değerlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Optimize edilmiş panelde ise bu tür bir değişiklik yapmaya gerek yoktur.

Diğer ekipmanlar için de grafik detayları her bir yükleme yönünden alınan değerler için grafiğe dökülmüş ve Ekler de verilmiştir.

5. EKLEMELİ İMALATIN ÜRETİM YÖNÜNDEN AVANTAJLARI

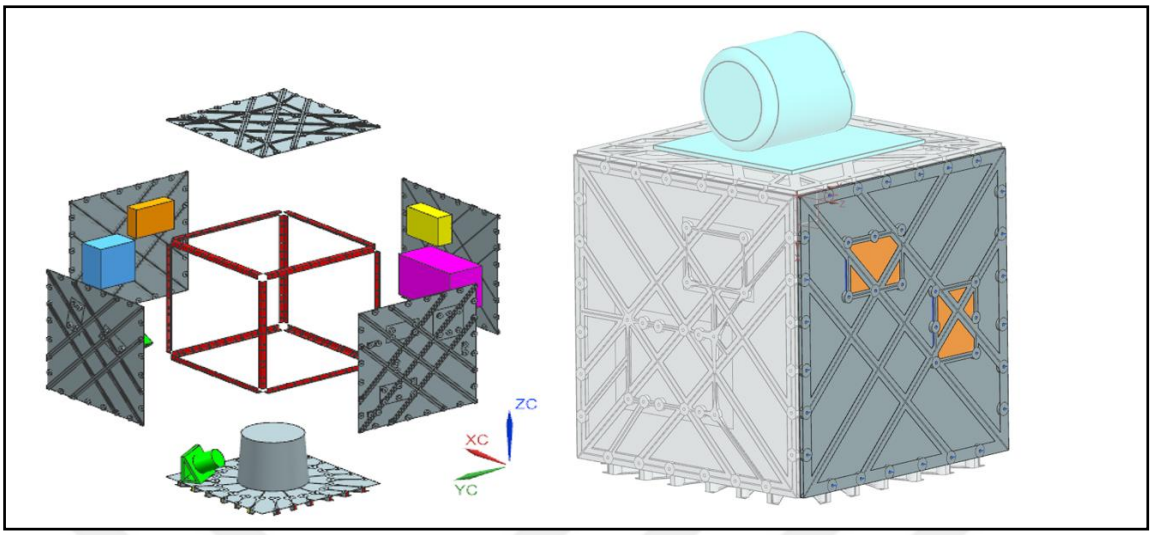
5.1. Hızlı Tasarım Optimizasyonu

Şekil 5.1'de, Y yönünde uygulanan titreşim yükleri altında sandviç panellerin ve eklemeli imalat (EI) panellerinin PSD değerleri, pil ekipmanının yatay dayanım limiti ile karşılaştırılmıştır. 640 Hz ile 1280 Hz frekans aralığında, hem sandviç panellerde hem de eklemeli imalat panellerinde PSD değerlerinin dayanım limitini aştığı gözlemlenmiştir.



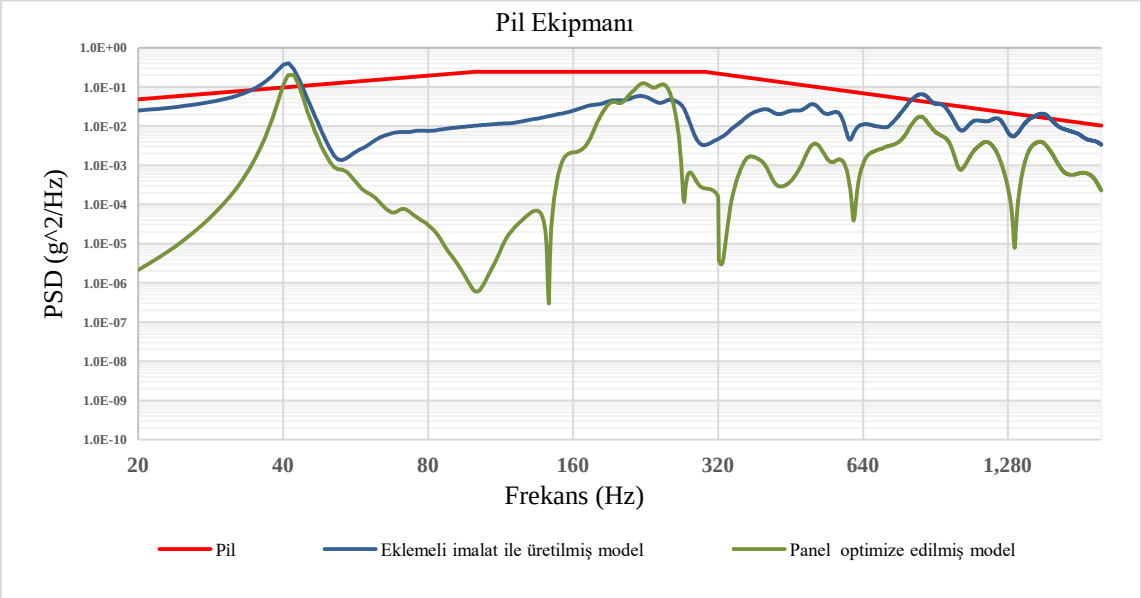
Şekil 5.1. Pil ekipmanı için PSD değerleri

Şekil 5.2 'de görüldüğü üzere, Y yönü pil ekipmanının yatay yönüdür. Bu nedenle, ekipmanın bulunduğu panelde yatay yüklere karşı yapılacak bir güçlendirme ile genlik değerlerinde azalma sağlanabilmektedir. Eklemeli imalata göre optimize edilmiş panelde, tasarımda Şekil 5.2'de gösterilen turuncu bölgelerde yapılacak küçük bir değişiklik ile üretim proseslerinde herhangi bir değişiklik yapmadan bu çözüm uygulanabilir. Bu doğrultuda, söz konusu bölgelerde 1 mm kalınlaştırma yapılmıştır. Sonrasında aynı yüklerle yeniden yapılmış ve arayüze gelen yükler karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.2. Pil Paneli için optimizasyon

Şekil 5.3'de, Y yönünde uygulanan titreşim yükleri altında optimize edilmiş (bölgesel kalınlık artırılmış) ve eklemeli imalat panellerinin PSD değerleri, pil ekipmanının yatay dayanım limiti ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon öncesi eklemeli imalat ile tasarlanmış uydu panelinde, 845 Hz bölgesinde pil ekipmanının limit değeri aşılmaktadır. Ancak, bölgesel kalınlaştırma ile optimize edilen panelde bu frekanstaki aşım giderilmiş ve limit değerinin altına indirilmiştir.



Şekil 5.3. Optimizasyon sonucu PSD yük değerleri

Eklemeli imalata göre optimize edilmiş panelde, tasarımda yapılacak küçük bir değişiklikle, kalınlaştırma işlemi gerçekleştirilerek üretim süreçlerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan çözüm uygulanabilirken, sandviç panelli yapıda üretim süreçlerinde değişiklikler gerekmektedir. Pil ekipmanının Y yani yatay yönde güçlendirilmesi gerektiğinden, çekirdek bölgesinde bir güçlendirme ihtiyacı doğacaktır. Çekirdek bölgesinde güçlendirme için, tıpkı bağlayıcı parçalarda olduğu gibi çekirdek bölgesinde boşaltma işlemi ile başlayacak ve ardından bu bölge, reçine malzemesi ile doldurması gerekecektir. Buda karmaşık olan üretim sürecini daha da karmaşık hale getirecektir. Fakat eklemeli imalatta böyle bir karmaşa olmadan sorun çözülmüştür.

5.2. Sandviç Panel Üretimindeki Sıkıntılar

Alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç panellerin üretim süreci birkaç temel adımdan oluşur. İlk olarak, yüzey tabakaları (genellikle karbon fiber veya alüminyum levhalar) hazırlanır ve ardından bal peteği çekirdek yapısı uygun ölçülerde kesilir. Bu iki bileşen, yüksek mukavemetli yapıştırıcılar veya reçinelerle birleştirilir. Yapıştırıcının eşit şekilde dağılması için vakum torbalama veya otoklav işlemi gibi yöntemler kullanılır.

Vakum torbalama, panelin vakum torbasına yerleştirilip içindeki havanın çekilmesiyle yapılır. Bu yöntem, yapıştırıcının yüzeylere eşit şekilde yayılmasını sağlar ve hava kabarcıklarını engeller. Otoklav işlemi ise vakum torbalamanın bir adım ötesine geçerek, yüksek sıcaklık ve basınç altında kürleme yapılmasını sağlar. Bu, reçinenin homojen bir şekilde sertleşmesini ve panelin mukavemetinin artmasını sağlar. Bu üretim süreçlerinde karşılaşılan yaygın hatalar arasında küllenme, reçine doldurma hataları, delaminasyon ve dalgalanma olarak sıralanabilir. Küllenme sırasında, hava kabarcıklarının kalması panelin dayanıklılığını zayıflatır. Reçine doldurma hataları, dolgu malzemesinin eksik veya düzensiz uygulanmasından kaynaklanır ve yapısal zayıflıklara yol açar. Delaminasyon, yüzey tabakaları ile bal peteği çekirdeği arasında yeterli yapışma sağlanamadığında meydana gelir ve katmanların ayrılmasına neden olur. Dalgalanma ise elyaf yönelimi veya yapıştırıcı uygulama sırasında oluşan gerilimlerden kaynaklanır ve yüzeyin bozulmasına yol açar.

Bu hataların önlenmesi için üretim, temiz oda koşullarında yapılmalı, doğru reçine oranları kullanılmalı ve vakum altında kürleme süreçleri dikkatlice uygulanmalıdır. Ayrıca,

ultrasonik inceleme gibi tahribatsız test yöntemleriyle potansiyel kusurlar tespit edilmelidir.

Goyal yapmış oldukları çalışmada sandviç panelli yapılarda özellikle deliksiz bal peteği çekirdeklerde basınç farklarının yapısal arızalara neden olduğunu göstermişlerdir. Uyduların fırlatma sırasında dış basıncın azalmasıyla hücrelerde hapsolan havanın yüzey tabakasında basınç farkı oluşturduğunu ve bu durumun üretim kusurları veya zayıf bağlarla birleşerek yüzey ayrılmasına yol açmış olabileceğini belirtmişlerdir. Yapıştırıcının yaşlanması, yüzey hazırlığının yetersiz yapılması ve kontaminasyon gibi faktörlerin zayıf bölgeler oluşturduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, delikli tasarımların bu tür arızaları önlemede etkili olduğunu, ancak üretim hataları nedeniyle yapıların kısmen deliksiz kalmış olabileceğini ifade etmişlerdir [61]. Bu çalışmada bahsedildiği gibi yapıltırıcıların yaşlanmaması için özel koşullarda belirli sürelerde tututlması ve bunun içinde özel bir takip süreci geliştirimesi gerekir. Eklemeli imalat prosesinde böyle bir ihtiyaca gerek yoktur.

Gillespie ve arkadaşları, havacılıkta kullanılan sandviç panelli yapılarda karşılaşılan temel problemleri incelemişlerdir. Çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) dış yüzeyler ve alüminyum bal peteği çekirdekten oluşan bu panellerin çeşitli mekanik arızalara yatkın olduğunu belirtmişlerdir. En yaygın sorunlar arasında, dış darbelere bağlı olarak oluşan yapışmama (çekirdek ile yüzey arasındaki yapışmanın bozulması), delaminasyon (CFRP katmanlarının birbirinden ayrılması) ve çekirdek ezilmesi yer almıştır. Bu tür kusurlar, özellikle görünür olmayan darbe hasarları şeklinde ortaya çıktığında tespit edilmesi zor olmuş ve yapısal bütünlüğü ciddi şekilde tehlikeye atmıştır. Ayrıca, bal peteği çekirdek hücrelerine yakıt ve yağ gibi sıvı kontaminantların sızmasının, zamanla malzeme içinde boşluklar oluşturduğu ve yapının dayanıklılığını azalttığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan onarım süreçlerinde, fark edilmeyen bu kusurların termal genleşme nedeniyle daha da büyüyerek yeni arızalara yol açabileceği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, sandviç panellerde meydana gelen bu tür yapısal sorunların tespiti ve onarımı için daha hassas tahribatsız muayene yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır [62].

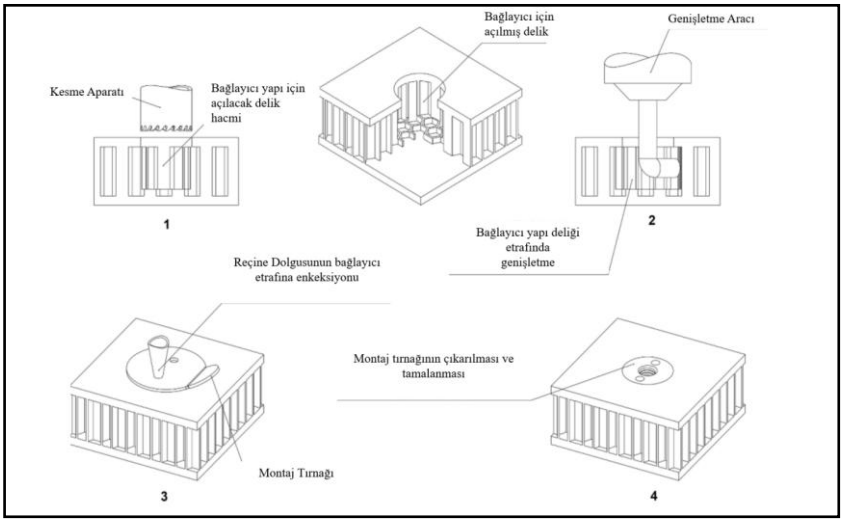
Bu çalışmada kullanılan eklemeli imalat teknolojisiyle üretilen federli yapılar, geleneksel sandviç panellerde geçerli olan bu yapısal sorunları ortadan kaldırma potansiyeline

sahiptir. Bu yapılar, katman katman üretildiği için bal peteği çekirdekli panellerde görülen boşluk oluşumu veya hapsolan hava gibi basınca bağlı problemlerle karşılaşılmaz. Federli yapılar, yekpare şekilde üretildiğinden, farklı malzemelerin birleştirilmesi veya yapıştırıcı kullanımı gerektirmemiş; bu da yüzey tabakası ayrılması riskini tamamen ortadan kaldırılmıştır.

5.3. Bağlayıcı Yapılarındaki Sıkıntılar

Sandviç panellerde gömülü bağlantı elemanları (insert), özellikle yüksek yük iletimi gereken bölgelerde, panelin yapısal dayanımını artırmak için kullanılır. Burç şeklindeki bu bağlantı elemanları panelin içyapısına gömülü olarak yerleştirilir ve dışarıdan gelen kuvvetlerin panellere ve ekipmanlara düzgün bir şekilde iletilmesini sağlar.

Şekil 5.4 ‘de gösterildiği gibi panellerine gömülü bağlantı elemanı yerleştirme süreci, birkaç adımdan oluşur. İlk olarak, çalışma malzemesine bağlantı elemanının çapına uygun bir delik açılır. Ardından, açılan delik, bir alt kesme aracı kullanılarak genişletilir ve bağlantı elemanının etrafında en az 1 mm'lik boşluk bırakılması sağlanır. Üçüncü adımda, montaj tırnağı üzerindeki deliklerden reçine bileşiği enjekte edilir ve bağlantı elemanının diğer ucundan taşana kadar doldurulmaya devam edilir. Son olarak, reçine kürlendikten sonra montaj tırnağı çıkarılır ve bağlantı elemanı, yüzeyle hizalanarak sabitlenir, böylece güvenilir ve sağlam bir montaj tamamlanmış olur. Bu üretim sürecinde istenmeyen ve tespit edilmesi kolay olmayan bazı hatalar meydana gelmektedir.



Şekil 5.4. Gömülü bağlantı elemanının üretim süreci

Ramírez, vd yapmış oldukları çalışmada sandviç yapılar içindeki gömülü bağlayıcı elemanların yapıştırıcı malzeme doldurma hatalarını incelemişlerdir. Yazarlar, özellikle sentetik köpük ile yapılan yapıştırıcı malzeme doldurma işlemlerinde karşılaşılan çeşitli kusurları ve bu kusurların yapısal bütünlük üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada, kompozit malzemelerin ve özellikle sandviç panellerin, çeşitli üretim ve tasarım kaynaklı kusurlara karşı oldukça hassas olduğu vurgulanmıştır [63].

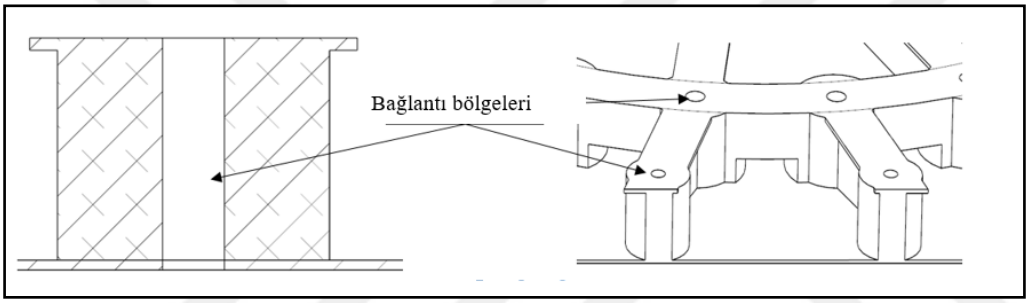
Doe ve Smith geliştirdikleri çalışmada, uydu bal peteği sandviç panellerinin gömülü bağlayıcı montaj sürecinde karşılaşılan düşük kalite ve verimlilik sorunlarını çözmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada sanal-gerçek füzyon destekli montaj sistemi oluşturulmuştur. Bu yöntem, montaj sürecini etkin bir şekilde destekleyerek yanlış parça kullanımı ve ters polarite montajı gibi düşük seviyeli kalite sorunlarını azaltmıştır [64].

Severson vd. geleneksel yöntemlerle üretilen sandviç kompozit panellerde kullanılan gömülü bağlayıcı yapısının karşılaştığı yaygın yapısal hataları incelemişlerdir. Çalışmada, alüminyum bal peteği çekirdek ve karbon fiber takviyeli yüzey katmanlarına sahip panellerde gömülü bağlayıcı yapısının yerleştirilmesi sırasında ortaya çıkan yüzey ayrılması, delaminasyon ve çekirdek ezilmesi *g*ibi arızalar detaylandırılmıştır. Bu tür hataların, üretim sürecinde delik açma ve yapıştırıcı malzeme doldurma işlemleri sırasında oluşan düzensizliklerden kaynaklandığı belirtilmiştir. Özellikle yapıştırıcı malzemenin yüzeyler arasında homojen dağılmaması ve çekirdek hücrelerine sızan yapıştırıcının oluşturduğu yerel gerilmeler, yapısal zayıflıklara neden olmuştur. Ayrıca, malzeme geçiş bölgelerinde meydana gelen ani sertlik değişimleri ve yanlış hizalama gibi sorunlar, gömülü bağlayıcı yapılsalların dayanıklılığını azaltmış ve panel bütünlüğünü tehlikeye atmıştır. Bu faktörler, hem üretim sürecini karmaşık hale getirmiş hem de panelin mekanik performansını olumsuz etkilemiştir [65].

Bunyawanichakul vd sandwich panellerdeki gömülü bağlayıcı yapısının üretimi sırasında karşılaşılan hatalar ve bu hataların yapısal performansa etkileri incelenmiştir. Üretim sürecinde özellikle reçine dolgu işlemi sırasında oluşan hatalar, yapının dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemiştir. Reçinenin bal peteği çekirdek hücrelerine düzgün dağılmaması veya hava kabarcıklarının kalması, reçine bölgesinde erken çatlak oluşumuna ve sıkışma kaynaklı hasarlara yol açmıştır. Ayrıca, gömülü bağlayıcı yapısı yerleştirme sırasında

yüzeyler arasında yeterli yapışma sağlanamaması, yüzey/çekirdek ayrılmalarına ve yerel fiber kırılmalarına neden olmuştur [66].

Bu çalışmada Şekil 5.5 'de gösterilen sandwich panel üretiminde kullanılan üretim süreçleri, literatürde bahsedilen çözülmeye ve tespit edilmeye çalışılan hatalar eklemeli imalatla yapılan panel tasarımında ortadan kaldırılmıştır. Şekil 5.5'de görüldüğü gibi, bağlantı alanları panel yapısının bir parçası haline getirilmiştir. Eklemeli imalat süreçleri, diğer teknolojilere kıyasla daha az iş gücü gerektirmiştir ve daha az hata ile karşılaşılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda reçine dolgu (potting) sürecindeki zorluklar ve hatalar ortadan kaldırılmıştır.

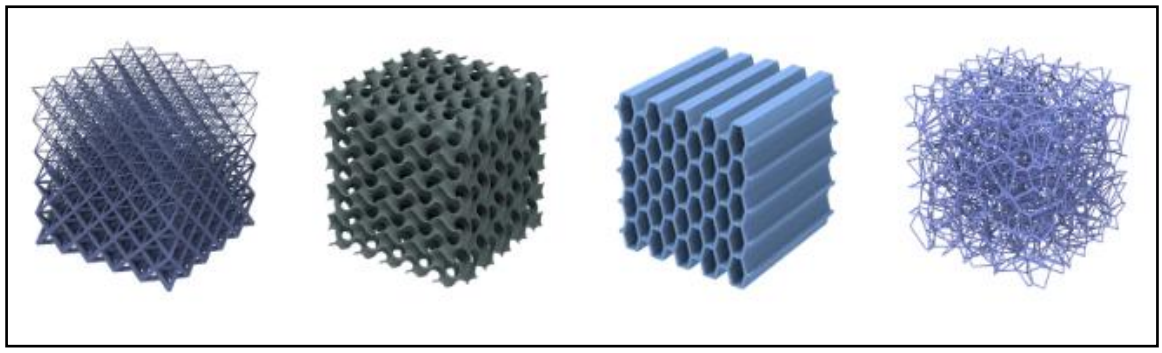


Şekil 5.5. Panelin bir parçası olarak üretilen bağlantı bölgeleri

5.4. Temizlik ve Kontaminatasyon

Uydu parçalarının temizliğiyle ilgili olarak, Avrupa Uzay Standartları İş birliği (ECSS) tarafından belirlenen standartlar arasında ECSS-Q-ST-70-01 standardı, uzay sistemleri için temizleme işlemlerini ve temiz oda gerekliliklerini tanımlar. Bu standart, malzemelerin, parçaların ve ekipmanların temizlenmesi, kontaminasyon kontrolü ve temiz oda operasyonlarıyla ilgili prosedürleri kapsar.

Şekil 5.6'da gösterilen ve literatürde tercih edilen kafes yapıları özelikle toz yatağı füzyonu işlemlerinde, kafes yapıların iç kısımlarında kalan tozların tamamen temizlenmesinde zorluklar yaratabilir. Bu nedenle, üretim sonrası temizlik ve kontaminasyon kontrolü, uzay sistemlerinde kullanılacak parçalar için eklemeli imalat süreçlerinde kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, eklemeli imalatla üretilen parçaların yüzey kalitesi ve pürüzlülüğü, kontaminasyon riskini artırabileceğinden, yüzey işlemleri ve kaplamalar gibi ek önlemler alınması gerekebilir.



Şekil 5.6. Eklemeli imalat teknolojisinde üretilen kafes sistemleri [67]

Akbay vd yapmış oldukları çalışmada, metal eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların yüzey temizliği ve kontaminasyon sorunları incelenmişlerdir. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen kafes yapılar, üretim sonrası yüzeylerinde toz partikülü yapışması, gözeneklilik ve pürüzlülük gibi sorunlarla karşılaşmıştır. Çalışmada, hidroflorik asit, nitrik asit ve sülfürik asit gibi kimyasal çözeltiler kullanılarak yapılan yıkama işlemleriyle bu partiküllerin temizlenmesi amaçlanmışlardır. Ancak, aşırı kimyasal temizlik işlemleri yüzeyde deformasyon ve kararma gibi olumsuz etkiler yaratmıştır. Bu bulgular, kafes yapılarında kontaminasyonun giderilmesi için dengeli temizlik süreçlerinin önemini ortaya koymuştur. [67].

Bu çalışmada incelenen federli yapı ve bu federlerin panel üzerindeki dağılımları, temizlik işlemlerinin basitleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu düzenleme, temizlik sürecinin daha az karmaşık ve maliyetli olmasına olanak tanıyarak, geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli bir çözüm sunmuştur. Bu sayede, temizlik işlemi için gerekli olan karmaşık süreçlerin ve yüksek maliyetlerin önüne geçilmiştir.

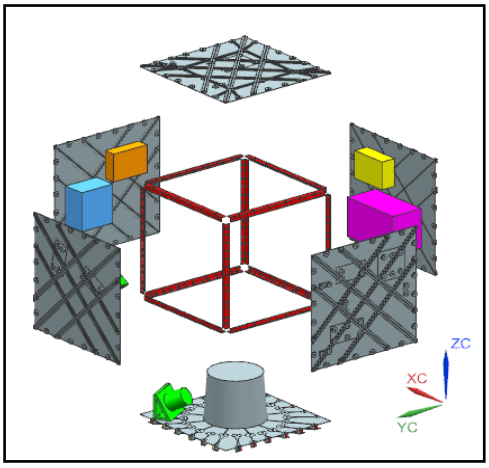
6. EKLEMELİ İMALAT İLE MONTAJ İÇİN TASARIM

Eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı avantajlar, özellikle uzay teknolojilerinde karmaşık yapıların üretiminde devrim niteliğinde değişikliklere olanak tanımıştır. Bu bağlamda, uydu platformları için yeniden tasarlanan yapısal mimari hem üretim hem de operasyonel süreçlerde birçok yeniliği bir araya getirmiştir. Tasarımın temel amacı, geleneksel imalat yöntemlerinin kısıtlamalarını aşarak uydu yapısal mimarisinde daha verimli, dayanıklı ve kolay monte edilebilen bir sistem oluşturmaktır. Bu doğrultuda, eklemeli imalatın esnekliği ve doğruluğu, yenilikçi bir mühendislik yaklaşımıyla birleştirilmiştir.

Bu yaklaşımla iki farklı tasarım uydu yapısal mimarisi için önerilmiştir. Her iki tasarımında ortak noktası mimaride panelleri birbirine entegre edilmesini sağlayan dirsek parçalarının olmaması ve montaj belgelerinin panellerin orta bölgelerine kaydırılmalarıdır. Ele alınan tasarım yöntemleri ile bölüm 4.4'te ortaya çıkarılan optimizasyon yönteminin daha verimli bir şekilde eklemeli imalat yönteminde kullanılması hedeflenmiştir. Bu tasarımlar mevcut analiz yöntemleri ile doğrulanabileceği gösterilmiş ve daha önce tasarlanmış geleneksel yöntemlere göre avantajları ortaya konulmuştur.

6.1. Örnek Tasarım İçin Değer Analizi ve Tasarım 1

Mevcut mekanik mimari için bir değer analizi yapılarak mekanik mimarinin yeniden tasarlanması ve tasarımla yeni bir bakış açısı oluşturulması hedeflenmiştir. Bunun için Şekil 6.1'de verilen değer analizi adımları Şekil 34'da gösterilen mekanik mimari için uygulanmıştır.



Şekil 6.1. Optimize edilmiş uydunun patlatılmış görüntüsü

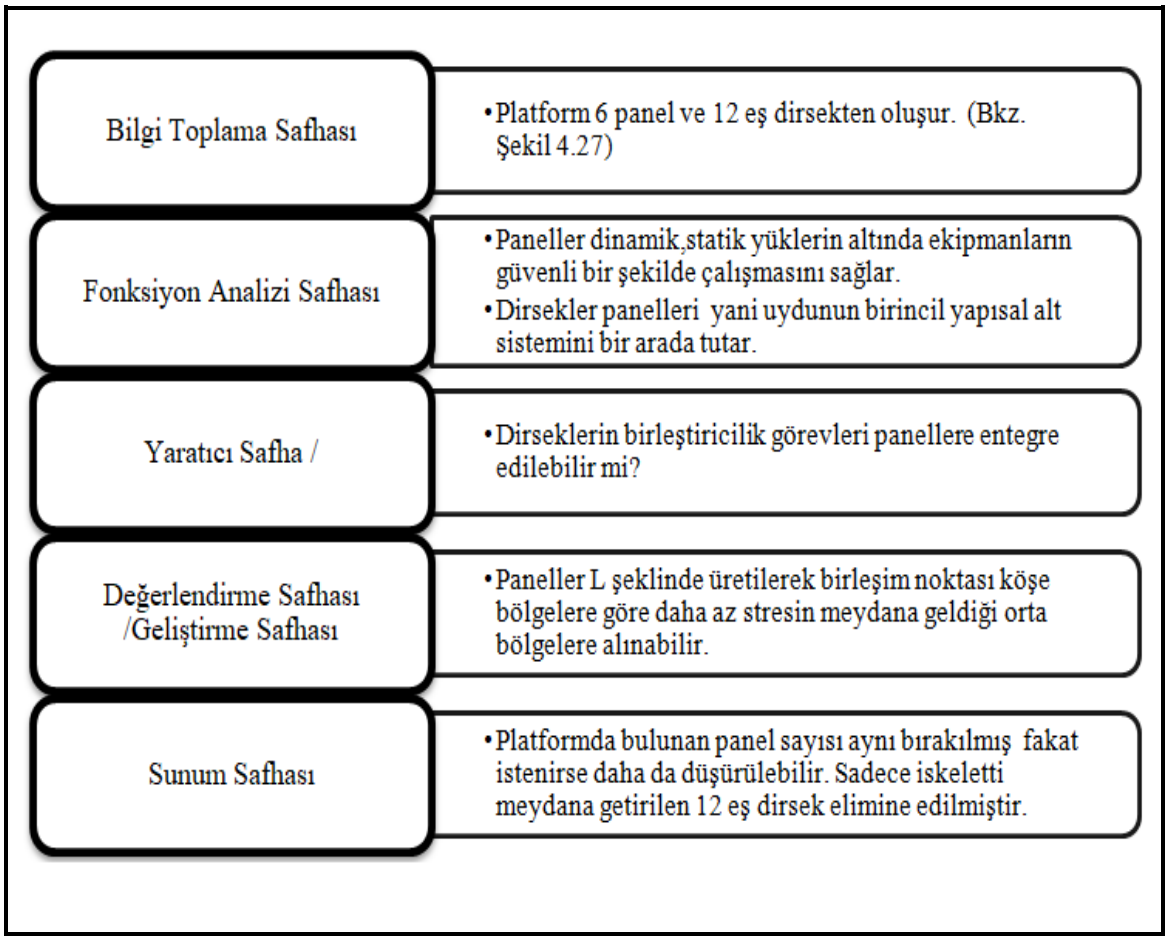
Şekil 6.2'de değer analizin ilk aşaması olan bilgi toplama aşamasında mekanik mimarinin bileşenlerine bakılmış ele alınan bileşenler listelenmiştir. İlk aşamada, yapının temel bileşenler platformun 6 panel ve 12 eşit uzunlukta dirsek olarak tanımlandı. Bu temel yapı, daha sonraki süreçlerde yapılacak analiz ve geliştirmeler için bir zemin oluşturmuştur.

İkinci aşama olan fonksiyonel analiz aşamasında ele alınan temel bileşenlerin görevleri belirlemiştir. Panellerin dinamik ve statik altında ekipmanların güvenli bir şekilde çalışmasını sağladığı vurgulanmış, dirseklerin ise panelleri bir arada tutarak platformun birincil yapısal alt sistemin iskeleti olduğu ifade edilmiştir. Bu analiz, her bir bileşenin sistemdeki görevini ve önemini ortaya koymuştur.

Üçüncü aşamada, tasarımın yenilikçi bir şekilde ele alınmıştır. Direklerin birleştiricilik görevlerinin panellere entegre edilip edilemeyeceği sorgulanarak sistemin daha verimli ve sade bir yapıya dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım hem maliyet hem de üretim süreci açısından önemli avantajlar sağlayabilecek bir fikir olarak öne çıkmaktadır.

Dördüncü aşamada, tasarımın dayanıklılığını artırmaya yönelik bir çözüm önerilmiştir. Panellerin L şeklinde üretilerek birleşim noktalarının köşe bölgelerinden daha az gerilme altında kalan orta bölgelere taşınması, yapının yük taşıma kapasitesini optimize etmeyi amaçlamıştır. Bu geliştirme, platformun uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamayı hedefleyen mühendislik çalışmaları arasında yer almıştır.

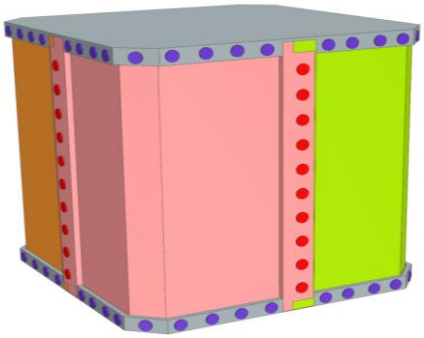
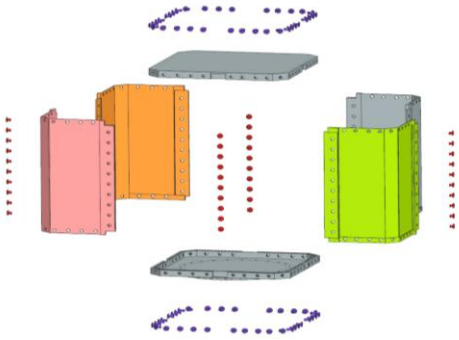
Son aşamada ise, platform tasarımının nihai hali sunulmuştur. Bu tasarımda panel sayısı sabit tutulurken, 12 eşit uzunluktaki direklerin elimine edildiği belirtilmiştir. Bu karar, platformun karmaşıklığını azaltarak daha ekonomik ve pratik bir yapı ortaya çıkarmıştır.



Şekil 6.2. Optimize edilmiş uydunun değer analizi adımları

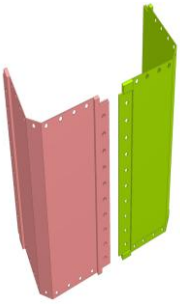
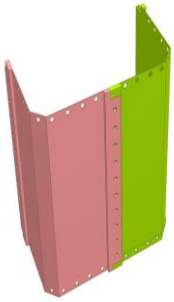
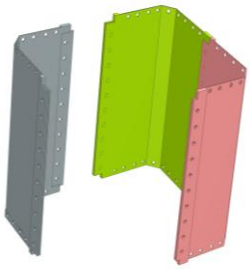
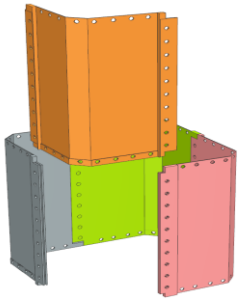
6.2. Tasarım Detayları

Ele Alınan ilk mimari tasarımda, değer analizi adımları Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Sonuçta uydu yapısındaki yan panellerin, üst ve alt panellerle birleştirilmesi süreçlerine odaklanılmıştır. Mekanik mimaride toplamda 6 adet panelden oluşturulmuştur. Bu paneller üretilecek tezgahın boyutuna göre birleştirilebilir durumdadır. Yani istenirse paneller eş zamanlı bağlantı kullanılmadan da üretilebilir. Burada anlatılırken paneller ayrı ayrı tasarlanmış şekilde anlatılmıştır. Panelleri birleştirmek için geleneksel yöntemlerde kullanılan cıvata – somun birleşimi yerine farklı ve daha pratik bir birleştirici tasarımı geliştirilmiştir.

Uydu Mekanik Mimarisi Genel Görünüşü	Uydu Mekanik Mimarisi Patlatılmış Görünüşü
	

Şekil 6.3. Uydu mekanik mimarisi görüntüleri

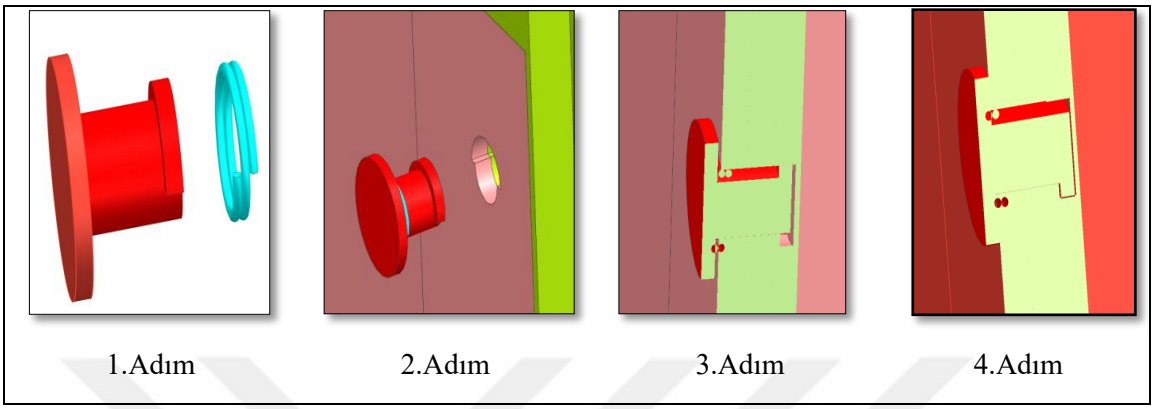
Montaj işlemi sırasında, birinci ve ikinci paneller bu bağlayıcı yuvaları üst üste gelecek şekilde birbiri üzerine entegre edilmiştir. Üçüncü panel de aynı şekilde monte edilmiş ve bu sayede birleştirici pim kilitleyebileceği bir yapı oluşturulmuştur. Son panel ise geometrik özellikleri nedeniyle farklı bir yöntemle, -Z ekseni boyunca hareket ettirilerek yerine yerleştirilir. Üst ve alt panellerin montajı sırasında ise yan paneller, alt panel üzerindeki özel kanallara yerleştirilmekte, ardından alt panel bağlantı parçaları monte edilmektedir.

1.Adım (1. ve 2. Panellerin Montajı)		2. Adım (3. Yan Panelin Montajı)	3. Adım (4. Yan Panelin Montajı)
			

Şekil 6.4. Panel montaj aşamaları

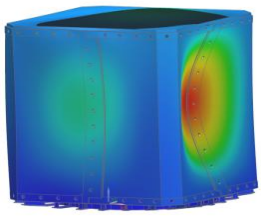
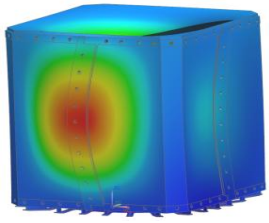
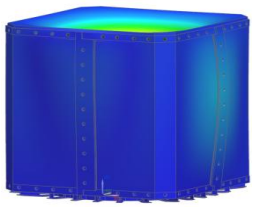
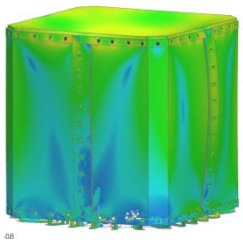
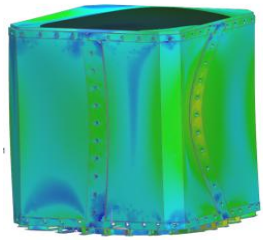
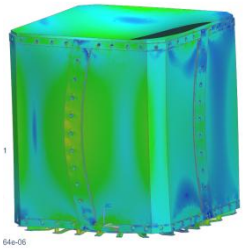
Modüler yapının her bir bileşeni, birbirine entegre olurken özel bir kilitleme sistemi kullanılmıştır. Bu kilitleme sistemi, Şekil 6.5 de görüldüğü gibi yaylı bir ön gerilme mekanizmasıyla çalışmaktadır ve titreşim gibi dinamik yükler altında çözülme riskini ortadan kaldırarak yapısal bütünlük sağlamıştır. Montaj sürecinde kilitleme elemanı, önce

yuvasına yerleştirilmekte, ardından yay sıkıştırılarak döndürme işlemiyle sabitlenmektedir. Bu yöntem, tüm yan paneller için standart bir montaj prosedürü sunmakta ve sistemin montaj sürecini hem güvenilir hem de hızlı hale getirmektedir.



Şekil 6.5. Kilitleme mekanizmasının montaj adımları

Tasarlanan modellin katılık değerine bakılmıştır. Ekipmanların ve federlerin olmadığı durumda ilk doğal frekans değeri 140 Hz gelmiştir.

	Birinci Yanal doğal Frekans 140 Hz	İkinci Yanal doğal Frekans 142 Hz	Eksenel Doğal Frekans 160 Hz
Yer Değiştirme			
Gerinim Enerji Dağılımı			

Şekil 6.6. Tasarım 1 için katılık değerlerinin belirlenmesi

Şekil l4.32 de, tasarlanan yapının yer değiştirme ve gerilme enerji dağılımını gösterilmiştir. Kırmızı bölgeler yüksek, mavi bölgeler düşük değerleri temsil ederken yeşil bölgeler geçiş alanlarını gösterir. Birinci ve ikinci doğal frekanslarda (140 Hz ve 142 Hz) yer değiştirme yan yüzeylerde yoğunlaşmış olup, kırmızı alanlar maksimum hareketi, mavi alanlar ise

minimum hareketi gösterir; Eksenel doğal frekansta (160 Hz) ise yer değiştirme ve enerji dağılımı üst panelde yoğunlaşmıştır. Yan panellerde ise homojen ve düşük seviyededir, bu da yan panellerin bu frekansta daha az zorlandığını gösterir.

Diğer taraftan yapının gerinim enerjisinde birinci yanal doğal frekansta (140 Hz), gerilme enerjisi özellikle köşe bölgelerde ve yan yüzeylerde yoğunlaşmıştır. Bu durum, yapının bu bölgelerde daha fazla zorlandığını ve stres biriktiğini gösterir.

Bu enerji yoğunluklarına göre feder yerleşimi yapılmalıdır. Birinci yanal frekansta federler, köşe bölgeler ve yan yüzeylerdeki yüksek gerilme alanlarına yerleştirilmelidir. İkinci yanal frekansta federler, yan yüzeylerin orta kısımlarına odaklanarak enerji yoğunluğunu azaltacak şekilde konumlandırılmalıdır.

6.3. Tasarım 1 için Değer Analizi ve Tasarım 2

Şekil 4.29 da patlatılmış resmi bulunan Tasarım 1 yeniden değer analizine alındığında daha önce sisteme dahil edilmeyen bağlayıcı parçaların entegrasyon sürecinde önemli bir süreç olduğu ortaya çıkmıştır.

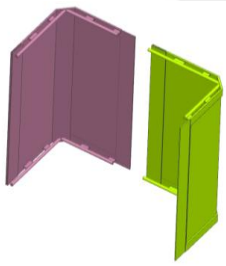
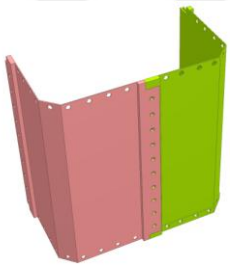
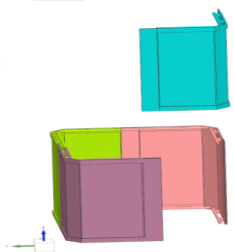
Bilgi toplama Safhası	• Platform 6 panel ve bağlayıcı parçalardan oluşur
Fonksiyon Analizi Safhası	• Paneller dinamik,statik yüklerin altında ekipmanların güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. • bağlayıcı parçalar daha önceki civata somun görevini üstlemişler ve panelleri bir arada tutar.
Yaratıcı Safha /	• Bağlayıcı parçaların görevi panellere entegre edilebilir mi?
Değerlendirme Safhası /Geliştirme Safhası	• Yan paneller birbiri içerisine montaj edildiği için yanal hareketleri kısırlanmıştır.Fakat eksenel yöndeki hareketleri kısıtlı değildir.Üst ve alt paneller bu kıstlamayı sağlayabilir.
Sunum Safhası	• Üst ve alt panellerin içerisinde bulunan kilitleme isistemi panller montaj edilrken açık fakat daha sonrasında kanacak ve panellerin eksenel yöndeki hareketini kısıtlayacaktır.

Şekil 6.7. Tasarım 1'in değer analizi adımları

Şekil 4.33 da adımları verilen ikinci değer analizi ile Panellerin bir arada tutmak için bu bağlayıcıların ortadan kaldırılması ve bu görevin panelin kendisine aktarılması için yeniden bir tasarım çalışması yapıldı.

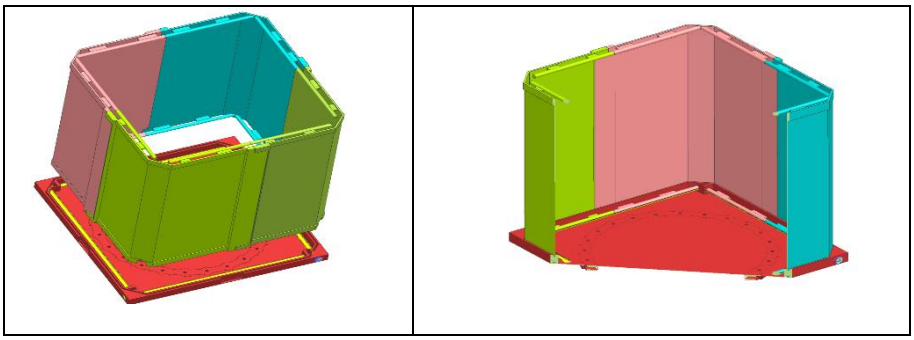
6.4. Tasarım Detayları

Şekil 4.34 de gösterilen panellerin girintileri ve çıkıntıları kullanılarak kenetlenmiştir. Bu bağlantı şekli, panellerin farklı doğrultularda kilitlenmesini sağlamış böylelikle paneller yatay yönlerde birbirinden ayrı hareket edemez hale getirilmiştir. Benzer şekilde 2. adımda 3. panel yatay yönden montaj edilerek diğer panellere kilitlenmiştir. 4. panel ise dikey yönden 3. Adımla diğer panellere kilitlenmiştir. Bu şekilde paneller yatay yönlerde hareket edemez iken dikey yönde hareket ederek montaj edildikleri gibi demontaj edilebilir halde tasarlanmıştır.

1.Adım (1. ve 2. Panellerin Montajı)		2. Adım (3. Yan Panelin Montajı)	3. Adım (4. Yan Panelin Montajı)
			

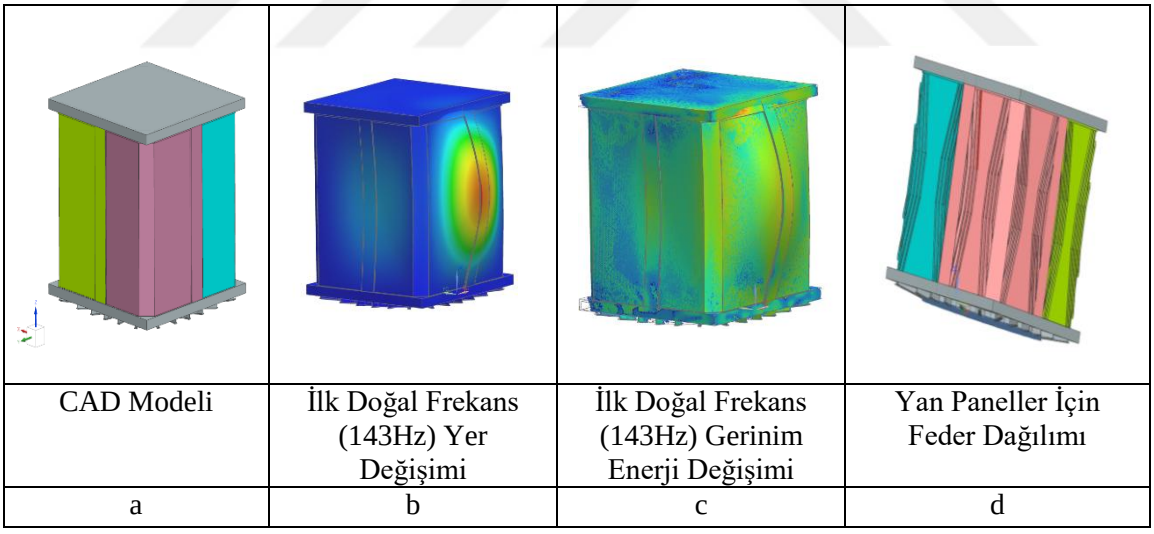
Şekil 6.8. Tasarım 2'nin yan panellerin montajı

Şekil 6.9’da alt panelde bulunan yuva ile yan panellerin kilitlenmesi sağlanmıştır. Bu durumda alt panel ve diğer paneller tüm yönlerde kilitlenmiş olur. Üst panel, alt panele aynı yöntemle monte edilmiştir. Bu montaj işlemi, panellerin birbirine sağlam bir şekilde birleştirilmesini ve gerekli durumlarda kolayca demonte edilmesini sağlamıştır.



Şekil 6.9. Tasarım 2'nin alt panelin montajı

Tasarlanan uyduya metot uyduda geliştirilen tasarım optimizasyonları adımı ile feder dağılımı belirlenmiştir. Şekil 4.36 da Tasarım 1 yapısının ilk doğal frekanstaki (143 Hz) davranışını ve buna bağlı olarak yan panellerde yapılan feder yerleşimini gösterilmiştir. İlk görselde (a), yapının CAD modeli yer almakta olup, farklı renklerle belirtilen paneller yapının yan yüzeylerini temsil edilmiştir. İkinci görselde (b), 143 Hz frekansta yapının yer değiştirme miktarları gösterilmiştir. Burada kırmızı bölgeler maksimum yer değiştirmeyi, mavi bölgeler ise minimum yer değiştirmeyi ifade edilmiştir.



CAD Modeli	İlk Doğal Frekans (143Hz) Yer Değişimi	İlk Doğal Frekans (143Hz) Gerinim Enerji Değişimi	Yan Paneller İçin Feder Dağılımı
a	b	c	d

Şekil 6.10. Tasarım 2 için optimizasyon adımlarının gerçekleştirilmesi

Yer değiştirme özellikle yan panellerin orta bölgelerinde yoğunlaşmış olduğu görülmüştür. Üçüncü görsel (c), aynı frekanstaki gerilme enerji dağılımını gösterilmiştir. Gerilme enerjisi, yan yüzeylerin orta kısımlarında yoğunlaşmış olup, kırmızı ve sarı bölgeler yüksek enerji birikimini, mavi ve yeşil bölgeler ise düşük enerji seviyelerini gösterilmiştir. Son görselde (d), bu analizlere dayanarak yapılan feder yerleşimi sunulmuştur. Federler, yer değiştirme ve gerilme enerjisinin en yoğun olduğu yan panellerin orta bölgelerine

yerleştirilmiştir. Bu feder dağılımı, yapının titreşimlere karşı dayanıklılığını artırarak yapısal katılığın sağlanmasına ve ekipmanlarla birlikte değerlendirildiğinde katılık gereksiniminin karşılanacağı öngörülmüştür.

7. SONUÇ

Bu çalışmada eklemeli imalatın tasarım esnekliği ve yalın bir mühendislik yaklaşımıyla birleştirilmiştir . Bu çalışmada, plakalarda kullanılan kütle azaltma yöntemleri ve optimizasyon çalışmaları incelenmiş ve bu çalışmalar doğrultusunda yeni bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen metot ile uydu mekanik alt yapısında kütle azaltılması sağlanmıştır.

Değişken sınır şartlarına uyum sağlayacak, basitleştirilmiş ve uygulanabilir optimizasyon yaklaşımları geliştirilmiştir. Literatürde yer alan karmaşık modellerden farklı bir mühendislik çözümü sunmuş ve bunun sonucunda aynı doğal frekansı sağlayan yapılarda %20 aynı dayanım gereklilikliği sağlayan yapılarda ise %25 kütle azaltımı sağlamıştır.Bu çalışma ayrıca doğal frekans gereksinimi sağlayaraka yapılan optimizasyon çalışmalarının dayanım gereksinimi sağlamayabileceğinide göstermiştir.

Gerinim enerjisi dağılımına dayalı boyut optimizasyonu, basit geometrilerle izotropik bir yapının korunmasını sağlamış ve karmaşık analitik yöntemlere ihtiyaç duyulmadan hesaplamaların yapılmasına olanak tanımıştır. Sandviç paneller veya kafes yapıları gibi yapılarda, düzgün geometrilerin olmaması nedeniyle uydu tasarımını doğrulayan analiz ve hesaplama süreçleri karmaşıklığı azaltılmıştır.

Yapılan rastgele titreşim analizleri sonucunda eklemeli imalatla optimize edilmiş panellerdeki genlik artışı, sandviç panelli yapılara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumda, eklemeli imalatlı yapıda kritik ekipmanıların daha güvenle çalışabileceğini göstermiştir.

Geliştirilen metotla panel kalınlık ve malzeme yoğunluklarında bölgesel olarak değişiklik yapabileceği vurgulanmış geleneksel üretim yöntemlerinde üretim süreçlerini azaltmak için tercih edilen panel yapısının yekpare olarak değiştirilmesinden kaynaklı ağırlık artışlarının önüne geçilmiştir.

Eklemeli imalat yönteminin seçimi ile üretim süresi kısaltılmıştır. Standart bir uydu sandviç panel üretiminde, levha, çekirdek malzemesi, levha-çekirdek yapıştırıcısı, dolgu

malzemesi ve bağlayıcı burcu gibi parçaların kullanılmadan üretimin gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır. Bu malzemelerin her birinin kendine özgü tedarik ve depolama şartları ile son kullanma tarihleri bulunduğu belirtilmiştir. Bu geresinimler sebebi ile ortaya çıkan özel tedarik ve saklama gereksinimleri eklemeli imalat yöntemi tercih edilerek ortadan kaldırılmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen geometride bağlantı noktaları panel ile tek parça halinde üretilmiştir. Bağlantı noktalarında eklemeli imalat yönteminde, özel bir proses veya dolgu malzemesi kullanılmaması, sandviç panellerde sıklıkla karşılaşılan reçine doldurma hataları bu tasarım bakış açısıyla ortadan kaldırılmıştır.

Eklemeli imalat uygun tasarımlarda literatürde rastlanan kafes yapılar yerine federli yapıların tercih edilmesi temizlik işlemlerinin basitleştirilmesini mümkün kılmıştır. Temizlik sürecinin daha az karmaşık ve maliyetli olmasına olanak tanınmış, kafes yöntemlerine kıyasla daha verimli bir çözüm sunulmuştur.

Çalışmada ayrıcı iki farklı tasarım yöntemi ile eklemli imalata yönelik tasarım bakış açısı geliştirilmiş ve uydu entegrasyon srelerinde üretim süresi ve parça azaltmının mümkün olacağı gösterilmiştir.

.

KAYNAKLAR

1. Internet: Bryce Space and Technology. (2023). Smallsats by the numbers 2023. *Bryce Space and Technology*. Web: https://brycetech.com/reports/smallsats2023 Erişim Tarihi 20.01.2025

2. Internet: EO Portal Directory. European Space Agency. (2025) Web:https//directory.Eoportal.org/ Erişim Tarihi 20.01.2025

3. Internet: Skyrocket Space Space Launch Report. Skyrocket Space. (2025) Web:https:// space.skyrocket.de/ Erişim Tarihi 20.01.2025

4. Internet: Surrey Satellite Technology Limited (SSTL). (2015). *SSTL-X50 brochure* SSTL. https://www.sstl.co.uk Erişim Tarihi 20.01.2025

5. Internet: EADS Astrium SAS. *Corporate Information. Astrium*. (2025) Web:https://www.astrium.eads.net Erişim Tarihi 20.01.2025

6. Internet: Madey, J. M., Baumann, R. C. (2025). *Design techniques for small scientific satellite structures* (NASA Technical Note). Web:https://ntrs.nasa.gov/citations/19690023854 Erişim Tarihi 20.01.2025

7. Manohar, N., Pranav, M. A., Akshay, S., Mytravarun, T. K. (2021). *Classification of satellite images*. In Smart Innovation Londra ISTE Group, 123–146.

8. An, B. (2008). EM-Cube: Designing and implementing a modular, self-reconfigurable robotic system. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(6), 1232–1245.

9. Gleyzes, M. A., Perret, L., Kubik, P. (2012). Pleiades system architecture and main performances. *ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1, 537–542.

10. Yasaka, T., Onoda, J. (2003). Spacecraft structures. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, San Diego, Academic Press, 691-704

11. Heidecker, A., Kato, T., Maibaum, O., Hölzel, M. (2014). *Attitude control system of the Eu: CROPIS Mission*. International Astronautical Congress (IAC) 2014, Canberra.

12. Risquez, D., Van Leeuwen, F., Brown, A. G. A. (2012). Dynamical attitude model for Gaia. *Experimental Astronomy*, 34(4), 669–703

13. Orii, T., Ono, T., Aoyama, J., Todome, K., Shibayama, Y. (2002). Development of versatile small satellite. *Acta Astronautica*, 50(6), 323–329.

14. Ziegler, L. A. (2007). *Configuration, manufacture, assembly, and integration of a university microsatellite.* Yüksel Lisans Tezi, Missouri University of Science and Technology, Missouri.

15. Ravanbakhsh, A., Franchini, S. (2010). *Preliminary structural sizing of a modular microsatellite based on system engineering considerations.* Third International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, Paris.

16. Triharjanto, R. (2020). System designs of microsatellites *Satellite Systems - Design, Modeling, Simulation and Analysis, Londra*. IntechOpen, 94–108

17. Lura, F., Biering, B., Lötzke, H.-G., Baturkin, V. (2005). *Thermal performance of BIRD microsatellite thermal control system – 3 years of operation in space*. SAE World Congress, Michigan.

18. Reda, R., Ahmed, Y., Magdy, I., Nabil, H., Khamis, M., Refaey, A., Eldabaa, N., Abo Elmagd, M., Abo Lila, M., Ergawy, H., Elgarf, A., Abed, G. (2023). Basic principles and mechanical considerations of satellites: A short review. *Transactions on Aerospace Research*, 272(3), 40–54.

19. Gupta, S. K., Puntambekar, P., Chaturvedi, S. (2016). *Design concept of the structural bus of microsatellites for lunar missions.* 2016 IEEE Aerospace Conference, Montana.

20. Mongkolves, S., Sangthon, A., Torteeka, P., Meemakand, P., Saisutjarit, P. (2021). *Structural Analysis of Thai Space Consortium-1 Satellite Based on Falcon 9 Launch Vehicle Vibration Profile.* 2nd Innovation Aviation & Aerospace Industry International Conference, Chiang Mai.

21. Lima, V. H. L. C., Rodrigues, R. N., Lamary, P. M. C., Bezerra, R. A. (2022). Dynamic structural analysis in a 2U Küp uydu considering quasi-static loads. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería,* 30(1), 94–108.

22. Abdelal, G. F., Elhady, A. B. M., Gad, A. H. (2009). *Micro-satellite structure fracture investigation techniques*. IEEE Aerospace Conference, Montana.

23. Alhammadi, A., Al-Shaibah, M., Almesmari, A., Vu, T., Tsoupos, A., Jarrar, F., Marpu, P. (2019). *Quasi-Static and Dynamic Response of a 1U Nano-Satellite During Launching.* 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Madrid.

24. Fraile Izquierdo, S., Vigalondo, A. P. (2014). *Dynamic Design of a Cube-Shaped Satellite Excited by Launch Vibrations.* Yüksek Lisans Tezi Politècnica de València Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gandia

25. Lin, J., Soriano, F., Schoenman, M. (1998). *Project Spartnik: Microsatellite Design, Construction, Testing, and Operation by Undergraduate Students at San Jose State University.* 12th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan.

26. Yılmaz, F., Haktanır, O. O., Uygur, A. B. (2015). *Quasi-Static Structural Test of Satellites.* Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Montana.

27. Ontaç, S. (2008). *Finite Element Analysis of a Micro Satellite Structure Under Vibration Induced Loads During Launch.* Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

28. Çekiç, A. (2021). *Improvement of Finite Element Model by Using Sine Vibration Test Results of a Communication Satellite.* Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

29. Baiomy, A. M., Kassab, M., El-Sehily, B. M., & El-Kady, R. M. (2023). Effect of perforation patterns on the fundamental natural frequency of microsatellite structure. *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, 10(3), 223-243.

30. Ravanbakhsh, A. (2014). *Multidisciplinary Design Optimization Application to Conceptual Design of University-Class Microsatellite Projects*. Doktora Tezi, Politécnica Universitesi, Madrid

31. Anklesaria I. (2012). *Structural analysis of microsatellites.* Yüksek Lisans Tezi, Missouri Universitesi, Rolla.

32. Gaudenzi, P., Atek, S., Cardini, V., Eugeni, M., Graterol Nisi, G., Lampani, L., Pasquali, M., Pollice, L. (2018). Revisiting the configuration of small satellites structures in the framework of 3D additive manufacturing. *Acta Astronautica*, 145, 196–203.

33. Zhang, Y., Zhang, G., Qiao, J., Li, L. (2023). Design and In Situ Additive Manufacturing of Multifunctional Structures. *Engineering*, 28, 58–68.

34. Hurtado-Pérez, A. B., Pablo-Sotelo, A. d. J., Ramírez-López, F., Hernández-Gómez, J. J., Mata-Rivera, M. F. (2023). On Topology Optimisation Methods and Additive Manufacture for Satellite Structures: A Review. *Aerospace*, 10(12), 1025.

35. Kief, C. J., Aarestad, J., MacDonald, E., Shemelya, C., Roberson, D., Wicker, R., Kwas, A. M., Zemba, M., Avery, K., Netzer, R., Kemp, W. (2014). *Printing Multi-Functionality: Additive Manufacturing for CubSat.* AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition, Kaliforniya.

36. Ferrari, M. (2015). *Structurally Optimized and Additively Manufactured Inserts for Sandwich Panels of Spacecraft Structures.* Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Universitesi, Zurih.

37. Internet: EWI. (2014). *Advancing Additive Manufacturing in Aerospace.* Web: https://ewi.org/ (20.01.2025)

38. Kellett, S. (2022). *Lightweight stiffened panels made using additive manufacturing techniques*. United States Patent Application Publication, US20220048109A1.

39. Aston, R. W., Joe, C. D., Hastings, N. M., Schoenborn, N. D., Zilz, R. E., Sharma, A. (2021). *Additively manufactured satellite.* United States Patent Application Publication, US20210354859A1.

40. Samal, S. K., Vishwanatha, H. M., Saxena, K. K., Behera, A., Nguyen, T. A., Behera, A., Prakash, C., Dixit, S., Mohammed, K. A. (2022). 3D-printed satellite brackets: Materials, manufacturing and applications. *Crystals*, 12(8), 1148.

41. Becedas, J. (2019). *Additive manufacturing applied to the design of small satellite structure for space debris reduction*. In Applications of Design for Manufacturing and Assembly. London, IntechOpen.

42. Hümbert, S., Gleixner, L., Arce, E., Springer, P., Lengowski, M., Sakraker, I. (2018). *Material characterization of additively manufactured PA12 and design of multifunctional satellite structures.* European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, Noordwijk.

43. Li, L., Liu, C., Zhang, W., Du, Z., & Guo, X. (2021). Combined model-based topology optimization of stiffened plate structures via MMC approach. *International Journal of Mechanical Sciences,* 208, 106682.

44. Ma, X., Wang, F., Aage, N., Tian, K., Hao, P., Wang, B. (2021). Generative design of stiffened plates based on homogenization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization,* 64, 3951–3969.

45. Ji, J., & Ding, X. (2014). Stiffener layout optimization of inlet structure for electrostatic precipitator by improved adaptive growth method. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 1-8.

46. Li, L., Liu, C., Zhang, W., Du, Z., Guo, X. (2021). Combined model-based topology optimization of stiffened plate structures via MMC approach. *International Journal of Mechanical Sciences,* 208, 106682.

47. He, J., Li, X., Chen, S., Xian, H. (2023). Topology optimization of stiffened steel plate shear wall based on the bidirectional progressive structural optimization method. *Buildings,* 13(831), 1-17.

48. Li, B., Hong, J., Yan, S., & Liu, Z. (2013). Multidiscipline topology optimization of stiffened plate/shell structures inspired by growth mechanisms of leaf veins in nature. *Mathematical Problems in Engineering,* 2013 (4) 653895.

49. Chen, S., Dai, Z., Shi, W., Liu, Y., Li, J. (2021). Local modal frequency improvement with optimal stiffener by constraints transformation method. *Applied Sciences,* 11(22), 11072.

50. Feng, S., Zhang, W., Meng, L., Xu, Z., Chen, L. (2021). Stiffener layout optimization of shell structures with B-spline parameterization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63, 987–1003.

51. Wang, C., Zhu, J., Wu, M., Hou, J., Zhou, H., Meng, L., Li, C., Zhang, W. (2021). Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components. *Chinese Journal of Aeronautics,* 34(5), 386–398.

52. Gamache, J. F., Vadean, A., Capo, M., Rochefort-Beaudoin, T., Dodane, N., Achiche, S. (2023). Complexity-driven layout exploration for aircraft structures. *Design Science*, 9, 13-21.

53. Liu, Z., Cho, S., Takezawa, A., Zhang, X., Kitamura, M. (2019). Two-stage layout–size optimization method for prow stiffeners. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11, 44–51.

54. Zhou, Y., Wu, S., Trisovic, N., Fei, Q., & Tan, Z. (2016). Modal strain based method for dynamic design of plate-like structures. *Shock and Vibration,* 2016(1), 2050627

55. Stanford, B., Beran, P., Bhatia, M. (2013). *Aeroelastic topology optimization of blade-stiffened panels.* 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Boston.

56. Hardee, E., Chang, K.-H., Tu, J., Choi, K. K., Grindeanu, I., Yu, X. (1999). A CAD-based design parameterization for shape optimization of elastic solids. *Advances in Engineering Software,* 30(3), 185–199.

57. Wang, Y., Liu, R. Q., Yang, H., & Wang, B. (2014). Optimization Design and Modal Analysis of Satellite SAR Deployable Support Structure. *Applied Mechanics and Materials,* 635(637), 185–189.

58. Qiu, J., Lian, W., Rao, H., Wang, C., Luo, T., Tang, J. (2022). Localization of vibration weak position of composites based on weighted modal strain energy summation. *Journal of Composites Science,* 6(11),324.

59. Kim, H.-G., Jeon, O., & Wang, S. (2021). A numerical and experimental study on an interconnected metamaterial for flexural vibration control based on modal strain energy. *Applied Sciences,* 11(10), 4530.

60. European Cooperation for Space Standardization. (2013, February 19). *ECSS-E-HB-32-26A: Mechanical requirements for space mechanisms*.

61. Goyal, V. K., Maghsoudy-Louyeh, S. (2022). Proof test methodology for reducing the risk of unvented honeycomb core failures in aerospace structures. *Journal of Sandwich Structures & Materials,* 25(1), 61–76.

62. Gillespie, D. I., Hamilton, A. W., Atkinson, R. C., Bellekens, X., Michie, C., Andonovic, I., Tachtatzis, C. (2020). Defect detection in aerospace sandwich composite panels using conductive thermography and contact sensors. *Sensors, 20*(22), 6689.

63. Rodríguez-Ramírez, J. D. D., Castanié, B., Bouvet, C. (2020). On the potting failure of inserts for sandwich panels: Review of defects and experimental analysis. *Mechanics of Advanced Materials and Structures,* 27(21), 2259–2270.

64. Doe, J., & Smith, J. (2023). Aided assembly technology of satellite honeycomb sandwich panel insert based on virtual and real fusion. *Journal of Aerospace Engineering*, 12(3), 45-60.

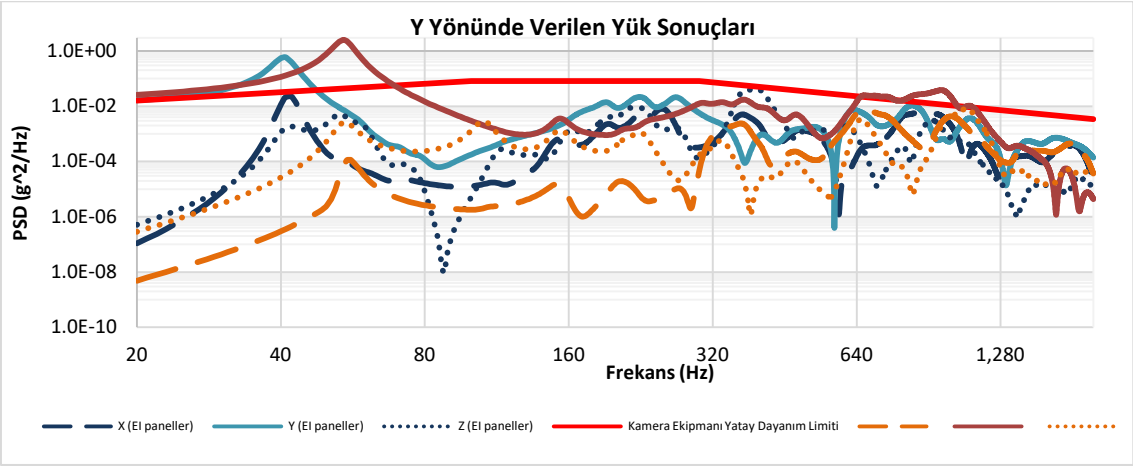
65. Severson, C., Lutz, T., Elhajjar, R. (2024). Tensile strength behavior of additively manufactured sandwich composite inserts. *Materials,* 17*(*7), 1884.

66. Bunyawanichakul, P., Castanié, B., Barrau, J.-J. (2005). Experimental and numerical analysis of inserts in sandwich structures. *Applied Composite Materials,* 12*(*4), 233-246.

67. Akbay, Ö. C., Bahçe, E., Uysal, A., Gezer, İ. (2022). Production and cleaning of lattice structures used in the space and aerospace industry with metal additive manufacturing method. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 31(8), 6310–6321.

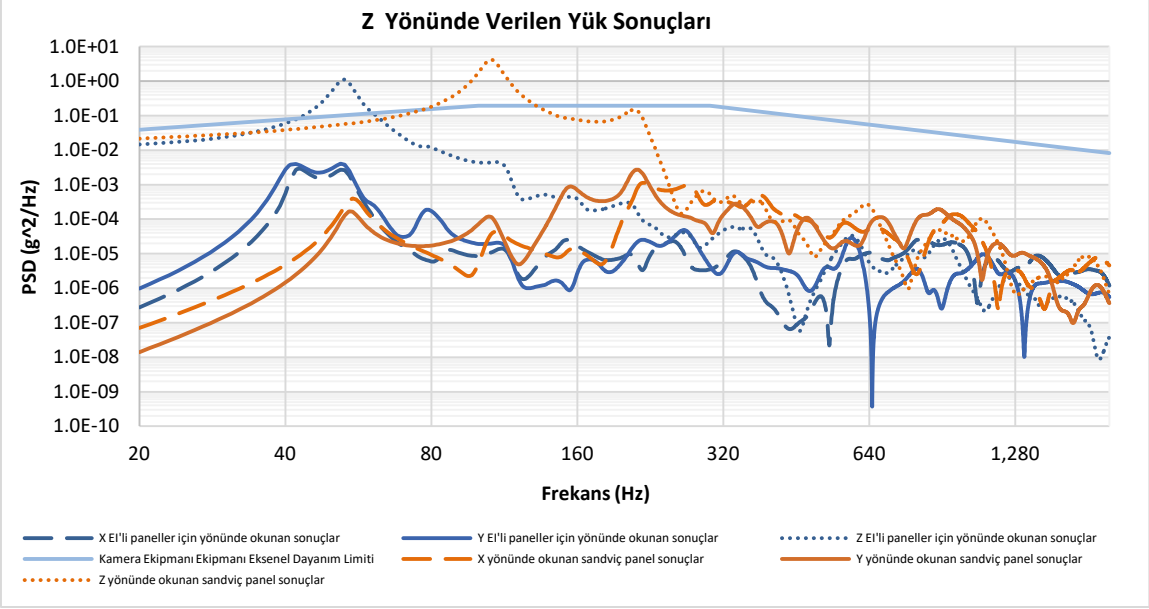
EKLER

EK-1. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması kamera ekipmanı



Şekil 1.1. Kamera ekipmanı için Y yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

Şekil 1.1'de, uyduların doğal frekans üzerindeki frekanslarda sandviç panellerin PSD değerlerinin kamera ekipmanının yatay dayanım limitini aştığı, bu durumun ekipman için risk oluşturduğu görülmüştür. Buna karşılık, eklemeli imalat (EI) panellerin PSD değerleri limitin altında kalarak daha güvenli bir performans sergilemiştir.



Şekil 1.2. Kamera ekipmanı için Z yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

Şekil 1.2'de, Z yönünde uygulanan yükler altında sandviç panellerin uyduların doğal frekansları üzerindeki frekanslarda kamera ekipmanının eksenel dayanım limitini çok

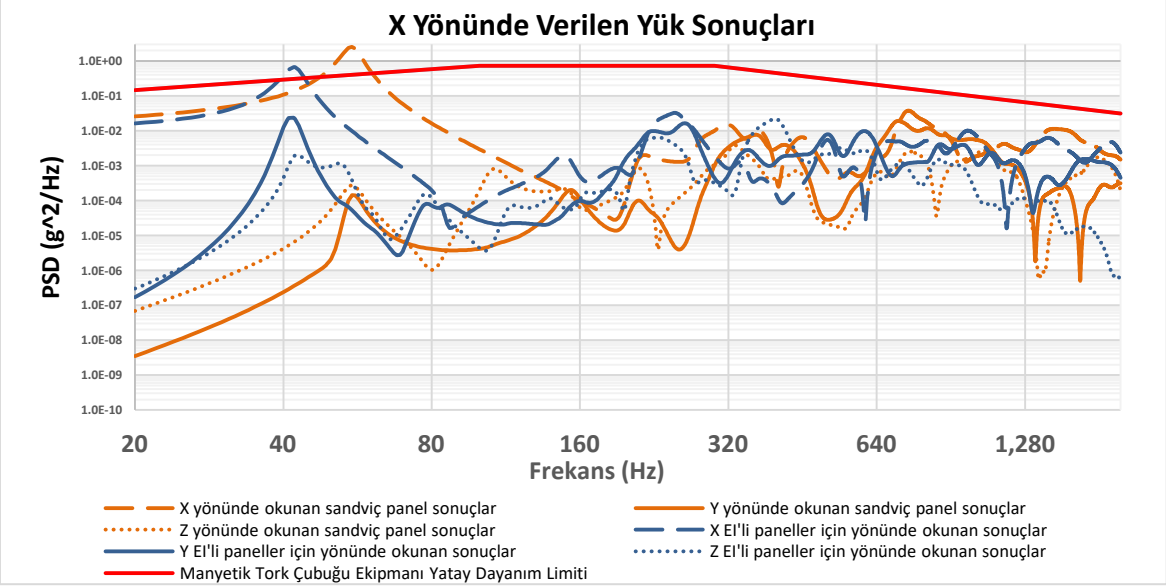
EK-1.(devam) Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması kamera ekipmanı

yaklaştığı, EI panellerin ise limitin altında kalarak daha güvenli bir davranış sergilediği görülmüştür. Özellikle 100-200 Hz aralığında sandviç panellerde gözlemlenen yüksek

pikler, kamera ekipmanı için risk oluştururken, EI panellerin bu bölgelerde daha düşük amplitüdlü tepki verdiği gözlemlenmiştir.

EK-2. Rastgele Analiz Sonuçları Karşılaştırılması Manyetik Tork Çubuğu

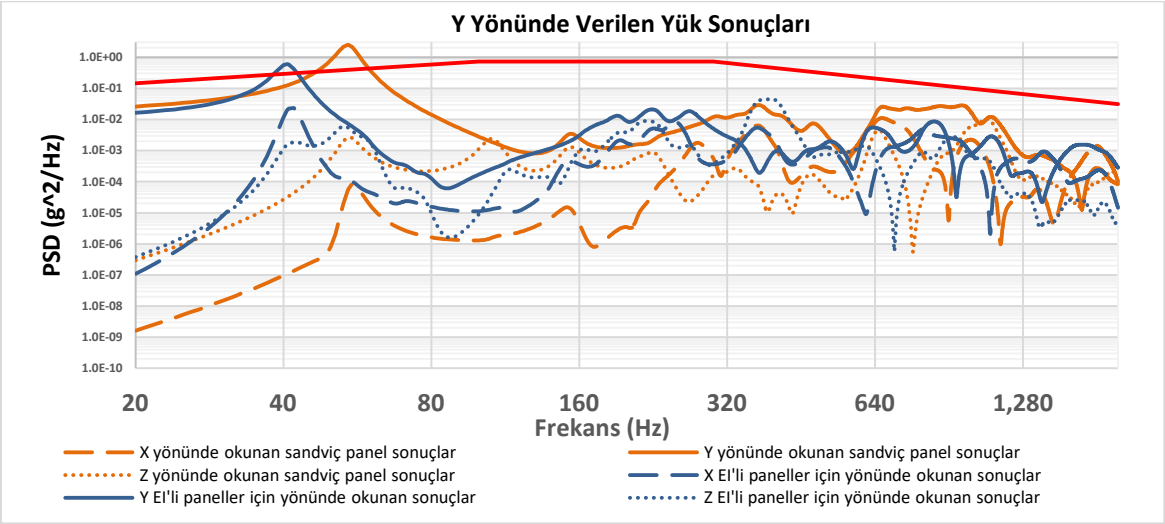
Şekil 2.1 ‘de de, hem sandviç hem de eklemeli imalat (EI) panellerin PSD değerlerinin tüm uydu doğal frekans değerlerinin üzerindeki tüm frekans aralıklarında dayanım limitin altında kaldığı görülmüştür. Her iki panel tipi de X yönündeki titreşim yükleri altında dayanım sınırlarını aşmamıştır.



Şekil 2.1. Manyetik tork çubuğu için X yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

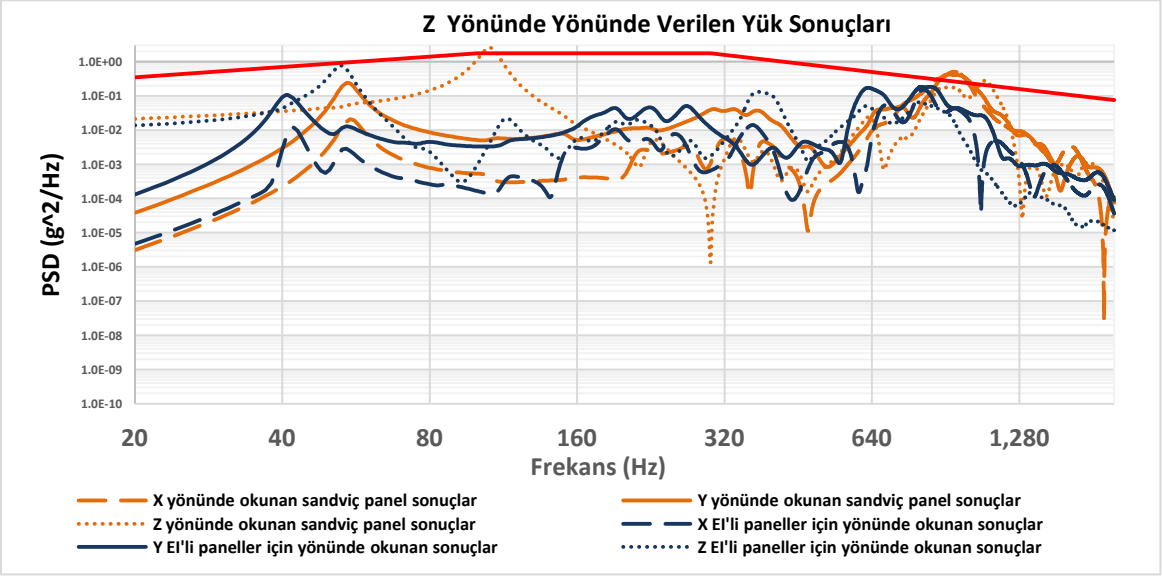
Şekil 2.1’de Y yönünde Manyetik Tork Çubuğu Ekipmanının Yatay Dayanım Limiti (kırmızı çizgi) ile sandviç ve eklemeli imalat (EI) panellerin PSD değerleri karşılaştırılmıştır. Her iki panel türü de tüm frekans aralıklarında dayanım limitinin altında kalmış ve güvenli bir dinamik performans sergilemiştir.

EK-2. (devam) Rastgele Analiz Sonuçları Karşılaştırılması Manyetik Tork Çubuğu



Şekil 2.2. Manyetik tork çubuğu için Y yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

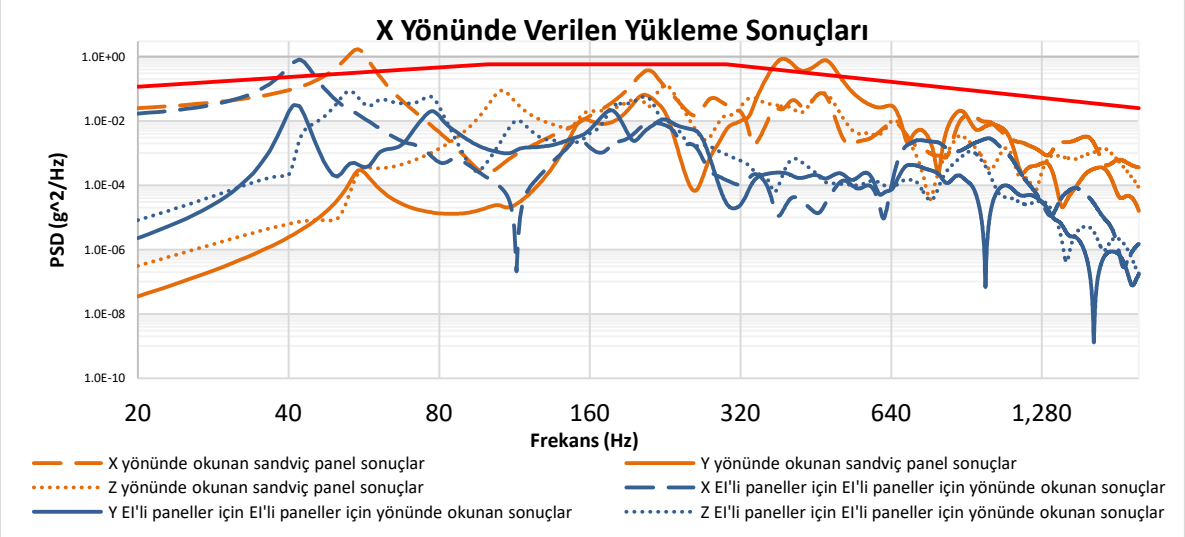
Şekil 2.2 ‘de, Z yönünde manyetik tork çubuğu ekipmanının eksenel dayanım limiti PSD değerleri ile karşılaştırılmıitır. 900-1000 Hz aralığında sandviç panellerin PSD değerlerinin ekipman limitinin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durum, bu frekans aralığında sandviç panellerin ekipman için risk oluşturduğunu göstermiştir. Eklemeli imalat (EI) paneller ise uydu doğal frekanslarının üzerindeki tüm frekans aralığında dayanım limitinin altında kalmış ve daha güvenli bir performans sergilemiştir.



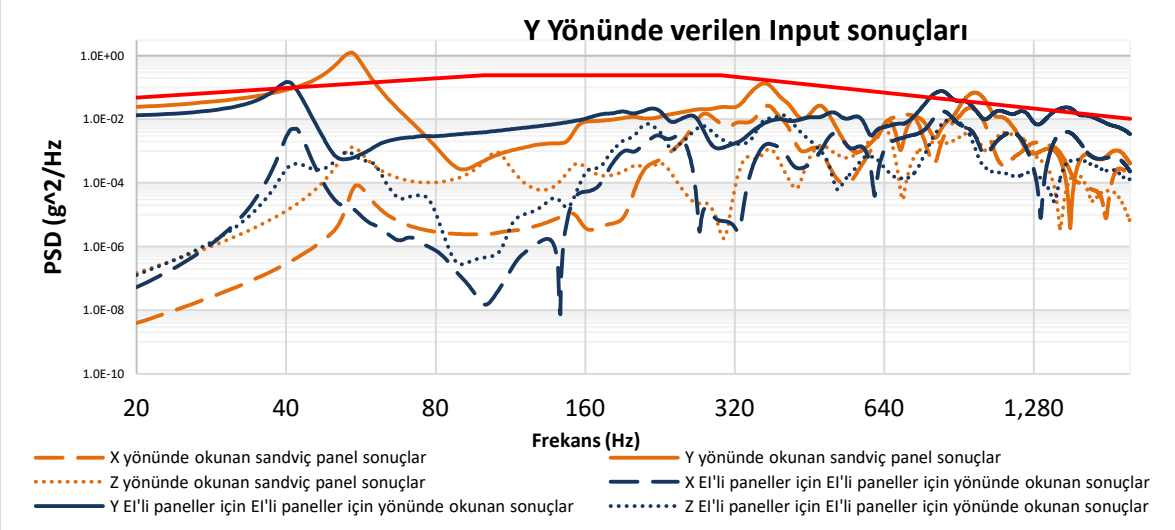
Şekil 2.3. Manyetik tork çubuğu için Z yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

EK-3. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması pil ekipmanı

Şekil 3.1 ‘de, X yönünde pil ekipmanının eksenel dayanım limiti PSD değerleri ile karşılaştırıldığında, 350-500 Hz aralığında sandviç panelli yapının Y yönünde okunan PSD değerlerinin limitin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durum, bu frekans aralığında sandviç panelli yapının ekipman için risk oluşturduğunu göstermiştir. Eklemeli imalat (EI) paneller ise uydu doğal frekanslarının üzerindeki tüm frekans aralığında dayanım limitinin altında kalmış ve daha güvenli bir performans sergilemiştir.



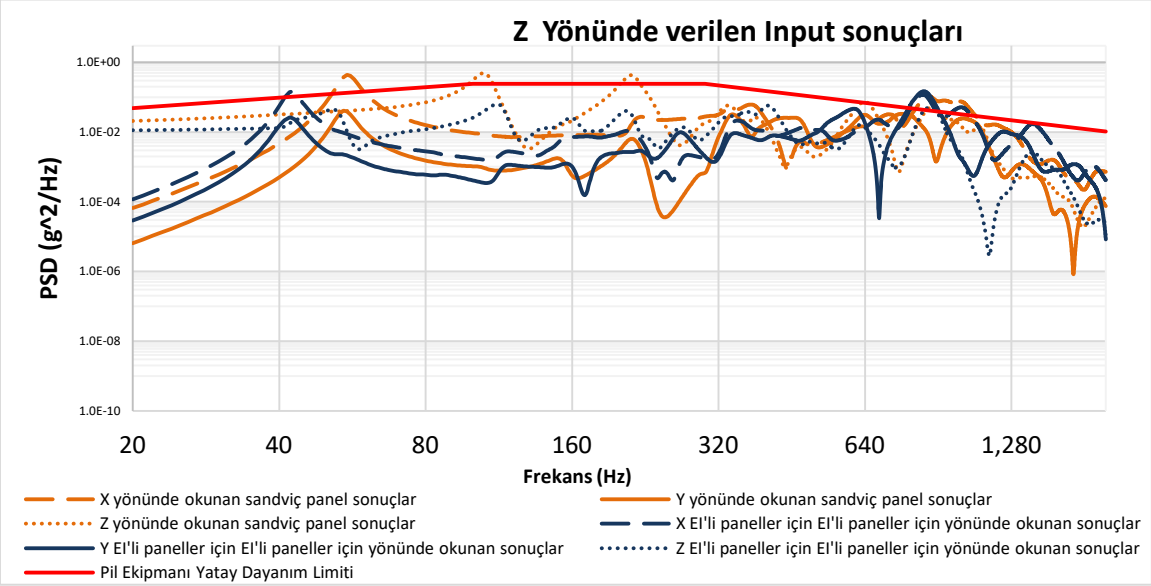
Şekil 3.1. Pil ekipmanı için X yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması



Şekil 3.2. Pil ekipmanı için Y yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

EK-3.(devam) Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması pil ekipmanı

Şekil 3.2 ‘de Y yönünde uygulanan titreşim yükleri altında sandviç panellerin ve eklemeli imalat (EI) panellerin PSD değerleri, pil ekipmanı yatay dayanım limiti ile karşılaştırılmıştır. 640 Hz ile 1280 Hz aralığında sandviç panellerin PSD değerlerinin dayanım limitini aşmıştır. EI panellerle tasarlanmış uyduda bulunan pil ekipmanı sandviç panelli tasarımda bulunan ekipmana göre daha güvenli şartlarar sahipolduğu belirlenmiştir.

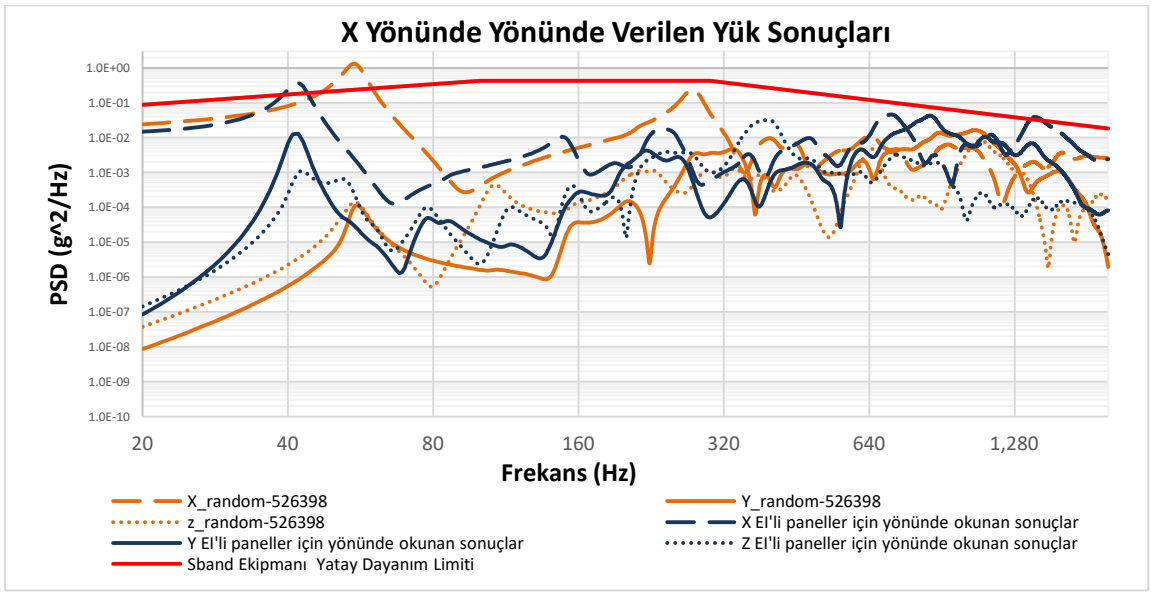


Şekil 3.3. Pil ekipmanı için Z yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

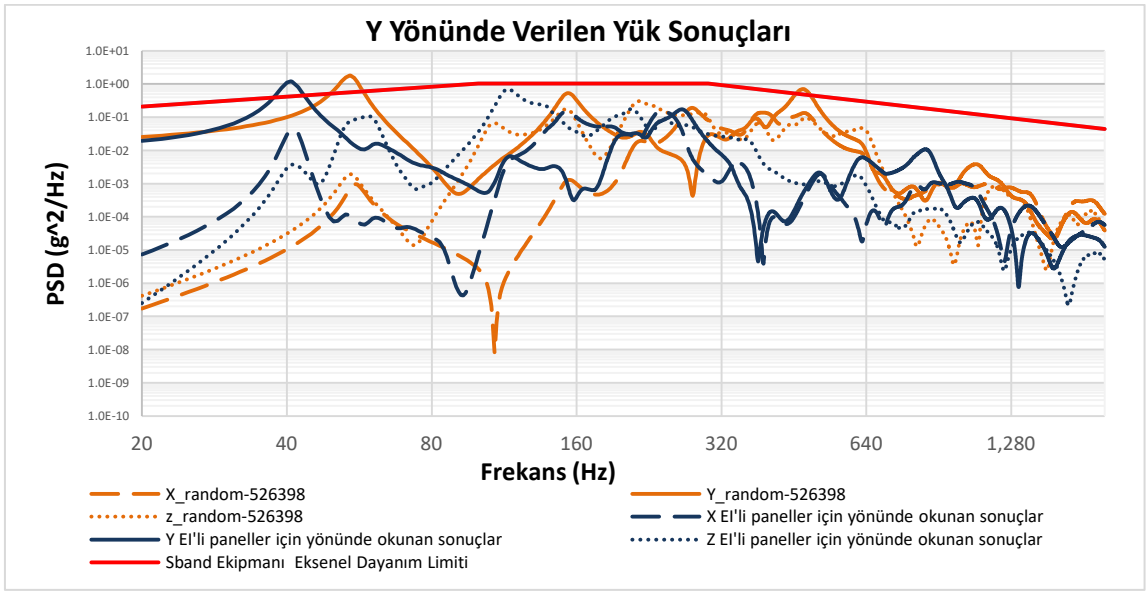
Şekil 3.32te, Z yönünde verilen titreşim yükleri altında sandviç panellerin PSD değerlerinin uydu doğal frekans değerlerinin üstünde ve 640-1280 Hz aralığında belirli frekanslarda pil ekipmanı yatay dayanım limiti'ni aştığı görülmüştür. Buna karşılık, eklemeli imalat (EI) panellerin PSD değerlerinin tüm frekans aralıklarında dayanım limitinin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Sandviç paneller belirli frekanslarda limitin üzerinde seyrederken, EI paneller daha güvenli bir davranış sergilemiştir.

EK-4. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması S-bant ekipmanı

Şekil 4.1, X yönünde uygulanan yükler altında sandviç panellerin PSD değerlerinin uydu doğal frekanaslarında yaşanan pikler hariç tüm frekans aralıklarında S-band ekipmanı yatay dayanım limiti altında kaldığı görülmüştür. Eklemeli imalat (EI) paneller ise özellikle 1415 Hz civarında limit çizgisine oldukça yaklaşmış ve bazı noktalarda aşmıştır.



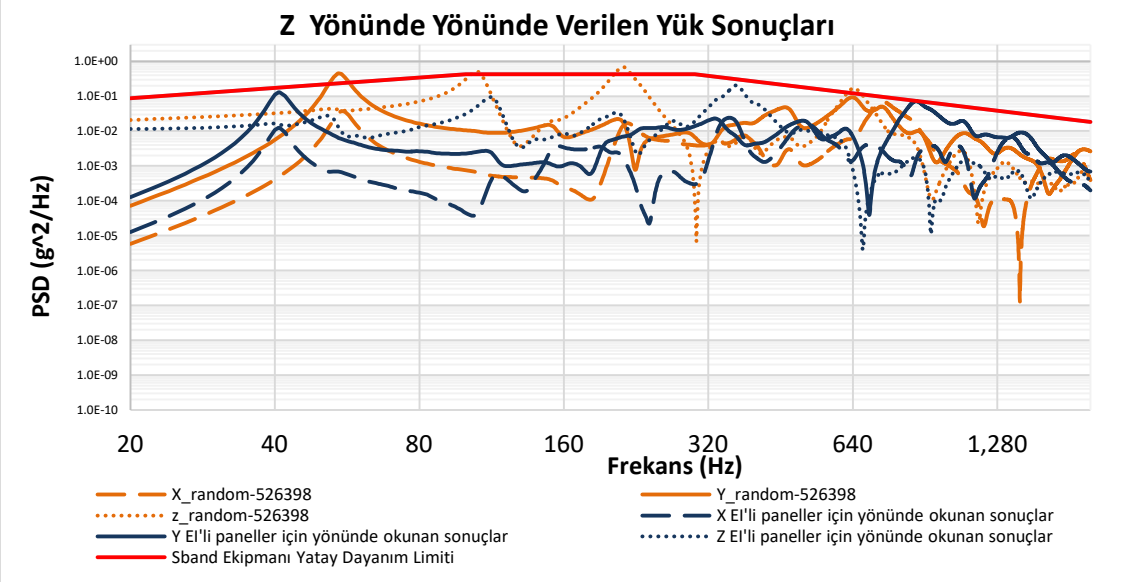
Şekil 4.1. S-Band ekipmanı için X yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması



Şekil 4.2. S-Band ekipmanı için Y yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

EK-4.(devam) Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması S-bant ekipmanı

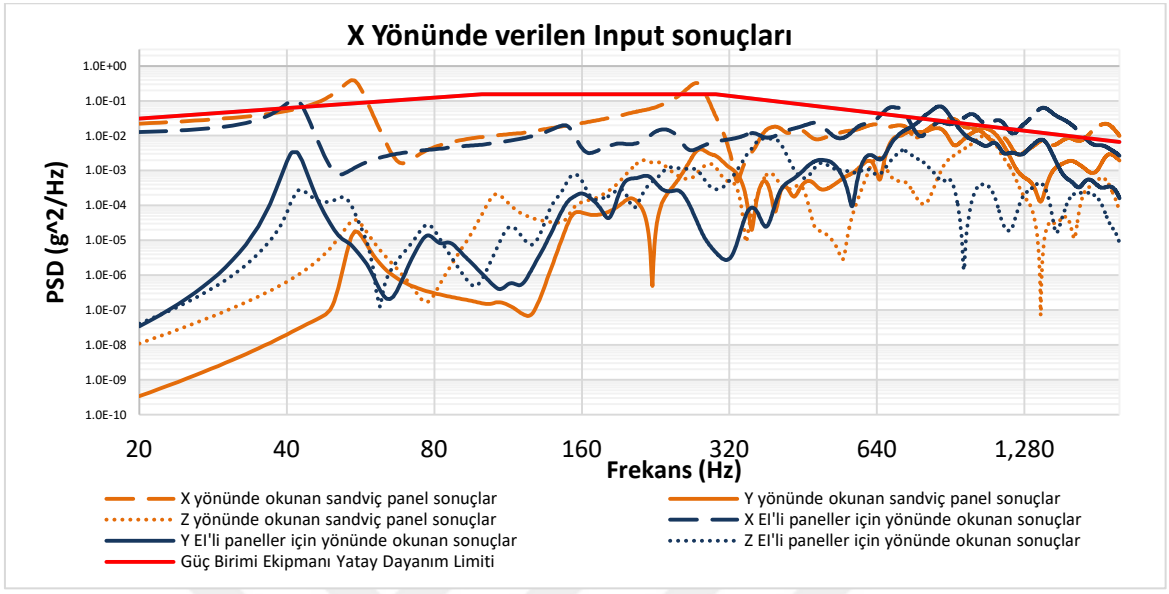
Şekil 4.2 uyduda eklemeli imalatlı panel ile sandviç panel tasarımlarının rastgele titreşim yükleri altında ekipman arayüzünden okunan güç spektral yoğunluğu (PSD) değerlerini karşılaştırmıştır. Sandviç panelli yapı,470 Hz civarında, küçük lokal aşımlar belirlenmiştir. Buna karşılık, eklemeli imalatlı panel tasarımı uydu doğal frekanaslarında yaşanan pikler hariç tüm frekans aralıklarında standart sınırları aşmamış, daha kontrollü bir titreşim performansı sergilemiştir.



Şekil 4.3. S-Band ekipmanı için Z yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

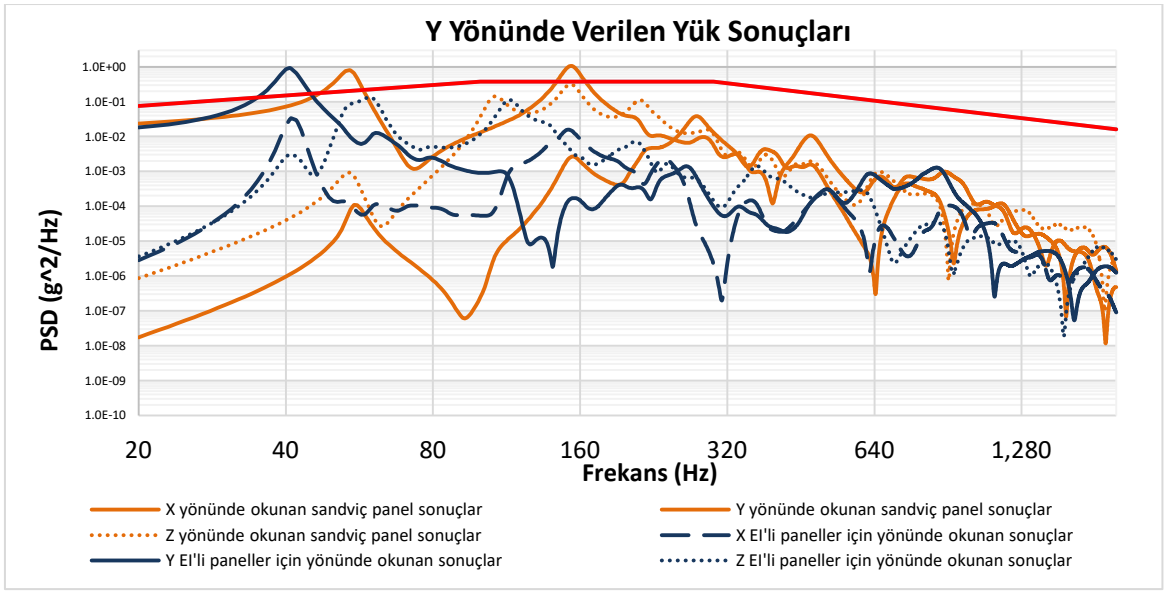
Şekil 4.3 uyduda eklemeli imalatlı panel ile sandviç panel tasarımlarının Z yönünde random titreşim yükleri altında ekipman arayüzünden okunan güç spektral yoğunluğu (PSD) değerlerini karşılaştırılmıştır. Sandviç panelli yapı, 290 Hz ve 640 Hz civarında limit değerlerini aşan belirgin titreşim seviyeleri sergilemiştir. Buna karşılık, eklemeli imalatlı panel tasarımı, uydu doğal frekanslarında görülen pikler dışında tüm frekans aralıklarında standart sınırların altında kalarak daha kararlı ve kontrollü bir performans sunmuştur.

EK-5. Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması güç birimi ekipmanı



Şekil 5.1. Güç birimi ekipmanı için X yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

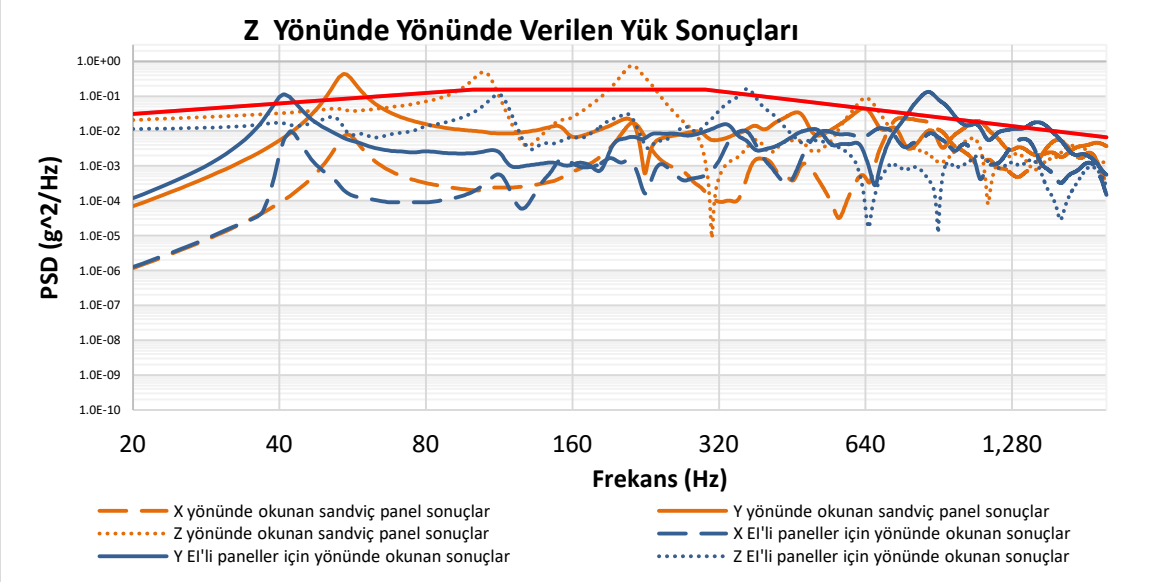
Şekil 5.1 uyduda eklemeli imalatlı panel ile sandviç panel tasarımlarının X yönünde random titreşim yükleri altında ekipman arayüzünden okunan güç spektral yoğunluğu (PSD) değerlerini karşılaştırılmıştır. Sandviç panelli yapı, 270 Hz ve 860 Hz ve 1390 Hz civarlarında limit değerlerini aşan belirgin titreşim seviyeleri sergilemiştir. Eklemeli imalatlı panellerde de yüksek frekanaslarda aşımlar mevcut olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. Güç birimi ekipmanı için Y yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

EK-5.(devam) Rastgele analiz sonuçları karşılaştırılması güç birimi ekipmanı

Şekil 5.2 uyduda eklemeli imalatlı panel ile sandviç panel tasarımlarının Y yönünde random titreşim yükleri altında ekipman arayüzünden okunan güç spektral yoğunluğu (PSD) değerlerini karşılaştırılmıştır. Sandviç panelli yapı, 150 Hz civarında limit değerlerini aşan belirgin titreşim seviyeleri sergilemiştir. Buna karşılık, eklemeli imalatlı panel tasarımı, uydu doğal frekanslarında görülen pikler dışında tüm frekans aralıklarında standart sınırların altında kalarak daha kararlı ve kontrollü bir performans sunmuştur.



Şekil 5.3. Güç birimi ekipmanı için Z yönünde verilen yüklerin karşılaştırılması

Şekil 5.3, uyduda eklemeli imalatlı panel ile sandviç panel tasarımlarının X yönünde random titreşim yükleri altında ekipman arayüzünden okunan güç spektral yoğunluğu (PSD) değerlerini karşılaştırılmıştır. Sandviç panelli yapı, 209 Hz ve 639 Hz civarlarınd a limit değerlerini aşan belirgin titreşim seviyeleri sergilemiştir. Eklemeli imalatlı panellerde de 859 Hz ve 363 Hz civarındaki frekanaslarda aşımlar görülmüştür. Her iki tasarımda da optimizasyon yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır.



Gazili olmak ayrıcalıktır