
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

UZAY ORTAMI İÇİN TASARLANMIŞ BİR EKİPMANIN KUKLA MODELİNİN YAPISAL ANALİTİK DEĞERLENDİRMESİ VE DENEYSEL DOĞRULAMASI

Cemal ALAT

YÜKSEK LİSANS
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

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,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

Cemal ALAT
12/01/2026

UZAY ORTAMI İÇİN TASARLANMIŞ BİR EKİPMANIN KUKLA MODELİNİN YAPISAL ANALİTİK DEĞERLENDİRMESİ VE DENEYSEL DOĞRULAMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Cemal ALAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Bu tez çalışmasında, alçak irtifa dünya yörüngesinde LEO yörüngesinde görev yapacak bir uydu için tasarlanan bir ekipmanın kukla modelinin yapısal analitik değerlendirmesi ve deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Gerçek ekipmanın henüz üretilmediği projelerde yapısal yeterlilik testlerini güvenli ve temsil edici bir donanım ile yürütebilmek amacıyla, dış geometrisi ve montaj arayüzleri gerçek ekipmanla birebir olan, tek parça AL7075-T651 malzemeden bir kukla ekipman tasarlanmıştır. Siemens NX ortamında oluşturulan model ile gerçek ekipman arasında kütlede yaklaşık %0,20, kütle merkezinde binde mertebesinde ve başlıca atalet momentlerinde birkaç yüzde mertebesinin altında fark elde edilmiştir. Siemens Simcenter ile oluşturulan sonlu eleman modelinde yapılan mesh yakınsama sonucunda, TET10 elemanlı yaklaşık 362 000 eleman içeren bir ağ yapısı benimsenmiş; montaj delikleri CBUSH-RBE2 elemanları ile modellenmiş ve SOL103 modal analizinde birinci doğal frekansın 262,2 Hz olduğu, böylece 140 Hz'lik fırlatıcı gereksiniminin emniyetle sağlandığı gösterilmiştir. Rastgele titreşim analizleri SOL111 çözüm tipiyle, fırlatıcı kaynaklı güç spektral yoğunluğu (PSD) ivme profilleri altında yürütülmüş; başlangıçta %2,5 olarak alınan sönüm oranı, savunma sanayi şirketi test merkezinde üç eksende gerçekleştirilen rastgele titreşim ve rezonans tarama testlerinden elde edilen PSD-frekans eğrileri üzerinden yarı güç bant genişliği (half-power bandwidth) yöntemiyle hesaplanarak modele geri beslenmiştir. Analiz-test karşılaştırmalarında modal frekans farklarının yaklaşık %5, tepe PSD genlik farklarının yaklaşık %20 ve gRMS farklarının yaklaşık %10 mertebesinin altında kaldığı gösterilmiş; benzer düzeyde farklar gerçek ekipman sonlu eleman modeli ile kukla ekipman modeli arasındaki karşılaştırmalarda da elde edilmiştir. Sonuçlar, tasarlanan kukla ekipmanın gerçek ekipmanı kütle ve dinamik davranış açısından yeterli doğrulukta temsil ettiğini ve uydu yapısal yeterlilik modelinde kullanılabilecek düzeyde doğrulandığını ortaya koymakta; izlenen tasarım, modelleme, test ve korelasyon adımları benzer uydu ekipmanı projeleri için tekrarlanabilir bir metodoloji sunmaktadır.

Bilim Kodu	:	91433
Anahtar Kelimeler	:	Uzay yapıları, kukla ekipman, sonlu elemanlar yöntemi, modal analiz, rastgele titreşim, analiz-test korelasyonu
Sayfa Adedi	:	156
Danışman	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

STRUCTURAL ANALYTICA EVALUATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A DUMMY MODEL OF EQUIPMENT DESIGNED FOR THE SPACE ENVIRONMENT

(M. Sc. Thesis)

Cemal ALAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

In this thesis, a dummy model of equipment designed for a satellite operating in LEO orbit was structurally analytically evaluated and experimentally validated. To conduct structural qualification tests with safe and representative hardware for projects where the actual equipment has not yet been produced, dummy equipment was designed, made of a single piece of AL7075-T651 material, with external geometry and mounting interfaces identical to the actual equipment. Differences between the model created in the Siemens NX environment and the actual equipment were found to be approximately 0.20% in mass, part of the order of thousandths in the center of mass, and less than a few percent in the principal moments of inertia. Mesh convergence on the finite element model created with Siemens Simcenter resulted in a mesh structure containing approximately 362,000 elements with TET10 elements; the mounting holes were modeled with CBUSH-RBE2 elements. The SOL103 modal analysis showed that the first natural frequency was 262.2 Hz, thus safely meeting the 140 Hz launcher requirement. Random vibration analyses were conducted using the SOL111 solution type using launcher-induced PSD acceleration profiles. The damping ratio, initially set at 2.5%, was calculated using the half-power bandwidth method with PSD-frequency curves obtained from random vibration and resonance scanning tests performed on three axes at a defense industry company's test center, and fed back into the model. Analysis-test comparisons showed that modal frequency differences were approximately 5%, peak PSD amplitude differences were approximately 20%, and gRMS differences were below approximately 10%. Similar differences were also obtained in comparisons between the actual equipment finite element model and the dummy equipment model. The results demonstrate that the designed dummy equipment represents the actual equipment with sufficient accuracy in terms of mass and dynamic behavior and has been validated to be usable in the satellite structural capability model. The design, modeling, testing, and correlation steps provide a repeatable methodology for similar satellite equipment projects.

Science Code	:	91433
Key Words	:	Space structures, dummy equipment, finite element method, modal analysis, random vibration, analysis-test correlation
Page Number	:	156
Supervisor	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, yapıcı eleştirileri ve desteğiyle çalışmanın şekillenmesine büyük katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a içtenlikle teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalar için gerekli imkânları ve çalışma ortamını sağlayan, bünyesindeki test merkezini kullanma fırsatı sunan TUSAŞ'a; çalışma süreci boyunca anlayışı ve desteğiyle yanımda olan yöneticim Atayıl KOYUNCU'ya ve her ihtiyaç duyduğumda yardımlarını esirgemeyen İsmail ARSLAN, Hasan AKÇE, Muhammed İsmail AYDINLIOĞLU ve Hasan TEKAÜT başta olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu sürecin zorlu dönemlerinde moral ve motivasyon kaynağım olan, her zaman koşulsuz destekleriyle yanımda bulunan sevgili annem Ayşe ALAT'a, babam Atilla ALAT'a ve sabrı, anlayışı ve desteğiyle bu yolculuğu benimle paylaşan eşim Ünzile Binnur ALAT'a minnettarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 13

2.1. Uydu Sistemleri ve Yörüngeler 13

2.2. Yapısal Yeterlilik Modelleri ve Kukla Ekipman Yaklaşımı 19

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Model Doğrulama 24

2.4. Modal Analiz ve Test-Analiz Korelasyonu 33

2.5. Rastgele Titreşim Analizi ve Çevresel Testler 39

2.6. Tasarım ve Optimizasyon Yaklaşımları 44

2.7. Diğer İlgili Çalışmalar 49

3. KUKLA EKİPMAN TASARIMI 59

3.1. Kukla Ekipmanın Geometrik ve Fiziksel Temsili 59

3.2. Kütle Özellikleri ve Malzeme Tanımı 64

4. SAYISAL ANALİZLER 67

4.1. Modelleme Yaklaşımı ve Varsayımlar 67

4.2. Mesh Stratejisi ve Yakınsama 70

4.3. Sınır Koşulları ve Arayüz Temsili 73

Sayfa

4.4. Modal Analiz 77

4.5. Rastgele Titreşim Analizi 83

5. DENEYSEL TEST 89

5.1. Tesis ve Donanım 89

5.2. Enstrümantasyon ve Kalibrasyon 91

5.3. Rezonans Tarama Prosedürü 95

5.4. Rastgele Titreşim Prosedürü 100

5.5. Veri işleme ve Kabul Ölçütleri 106

6. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI 111

6.1. Kütle ve Atalet Özelliklerinin Karşılaştırılması 111

6.2. Modal Analiz - Rezonans Tarama Sonuçlarının Karşılaştırılması 112

6.3. Rastgele Titreşim Analizi - Test Sonuçları Korelasyonu 116

6.4. Kukla - Gerçek Ekipman Korelasyonu 117

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 121

7.1. Araştırmanın Temel Sonuçları 121

7.2. Bilimsel ve Mühendislik Katkıları 123

7.3. Öneriler ve Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar 124

KAYNAKLAR 127

EKLER 135

EK-1. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması 136

EK-2. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması 138

EK-3. Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması 140

EK-4. X ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması 145

Sayfa

EK-5. Y ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması 147

EK-6. Z ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması 149

EK-7. Z ekseni için kukla ve gerçek ekipman rastgele titreşim analiz PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması 154

ÖZGEÇMİŞ 156

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Uydu alt sistemleri ve temel işlevleri 14

Çizelge 2.2. Gerçek ve kukla ekipmanın kütle ve atalet 16

Çizelge 2.3. Uzay ortamı türleri 18

Çizelge 2.4. İTÜ pSAT-1 yapısal gereksinimleri 34

Çizelge 2.5. COMAC kriteri değerleri 37

Çizelge 3.1. Gerçek ve kukla ekipmanın kütle ve atalet özellikleri karşılaştırması 63

Çizelge 3.2. Kukla ekipmanda kullanılan AL7075-T651 malzeme özellikleri 66

Çizelge 4.1. Ağ yakınsama sonuçları 72

Çizelge 4.2. CBUSH eleman katılık değerleri 76

Çizelge 4.3. İlk 20 moda ait doğal frekanslar ve kütle katılım oranları 80

Çizelge 4.4. Rastgele titreşim analizi sonucu tepe frekans, tepe PSD ve gRMS değerleri 88

Çizelge 5.1. Kukla ekipmana sırasıyla uygulanan testler 98

Çizelge 5.2. Önceki ve sonraki rezonans taramalara ait frekans ve genlik farkları 100

Çizelge 5.3. Rastgele titreşim analizi sonucu tepe frekans, tepe PSD ve gRMS değerleri 104

Çizelge 5.4. Z ekseni için üç test döngüsü sonunda frekans ve genlik farklarının özeti 106

Çizelge 5.5. Z ekseni rastgele titreşim testi için analiz-test gRMS, tepe frekans ve tepe PSD yüzde farkları 110

Çizelge 6.1. Modal analiz-rezonans tarama karşılaştırma tablosu 114

Çizelge 6.2. Z ekseni rastgele titreşim analizi-test karşılaştırma tablosu 114

Çizelge 6.3. Z ekseni gerçek ekipman SEM-kukla ekipman SEM rastgele titreşim analizi karşılaştırma tablosu 114

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Uydu yörüngeleri 15

Şekil 2.2. Kepler'in yörünge elementleri 15

Şekil 2.3. Küçük uyduların yıllara göre fırlatılmaları 16

Şekil 2.4. Küp uydu boyutları 17

Şekil 2.5. Atmosfer basıncının yükseklikle değişimi 18

Şekil 2.6. Fırlatma evrelerinde ortaya çıkan yükler 19

Şekil 2.7. Kukla uydunun görünümü 20

Şekil 2.8. (a) Erkek THOR mankeni, (b) kadın mankeni kesitleri 22

Şekil 2.9. Ariane 502 (solda), fırlatıcıya entegrasyon sırasında MAQSATB (ortada) ve MAQSATH'ın kukla görev yükü ile 23

Şekil 2.10. Jant üzerinde mesh yapısı 24

Şekil 2.11. Katı ve kabuk eleman gösterimi 25

Şekil 2.12. Ana panel eleman ağı genel görünüş 27

Şekil 2.13. L tipi fikstürü X yönünde yapılan analizin transfer fonksiyonu 28

Şekil 2.14. Fikstür mod şekilleri; a. Mod-1, b. Mod-2, c. Mod-3, d. Mod-4, e. Mod-5, f. Mod-6 28

Şekil 2.15. Ana panel 1. mod 29

Şekil 2.16. MAC matrisindeki MAC değerlerinin örnek 3B gösterimi 31

Şekil 2.17. FalconSAT-5 Yapısal Mühendislik Modeli II 32

Şekil 2.18. Tasarım süreci şeması 33

Şekil 2.19. Yalnızca yanıt verilerine dayalı modal analiz prensipleri 35

Şekil 2.20. PCB sonlu eleman modeli 36

Şekil 2.21. Maksimum genliklerin karşılaştırmalı gösterimi 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.22. Bir sinyale olasılık dağılımı 40

Şekil 2.23. Birincil ve ikincil çentik örneği 41

Şekil 2.24. TUMnanoSAT 3B model ve sayısal hesaplama ağ modeli 42

Şekil 2.25. IMU'nun (Ataletsel Ölçüm Birimi) güdümlü füzesi ve ölçüm eksenleri..... 44

Şekil 2.26. Şekil optimizasyonu..... 45

Şekil 2.27. Genel optimizasyon döngüsü..... 46

Şekil 2.28. Farklı geometrilerdeki gövdelerde topoloji optimizasyonu sonucu 48

Şekil 2.29. Minotaur-I fırlatma aracı 49

Şekil 2.30. EM1 uzay aracı Orion'un, mürettebat (1) ve servis (2) modülleriyle birlikte bir görseli..... 54

Şekil 3.1. Gerçek ekipman 3B modeli genel görünüşü..... 63

Şekil 3.2. Kukla ekipman 3B modeli genel görünüşü 63

Şekil 3.3. Gerçek ve kukla ekipmanın taban arayüzü ve delik düzeni karşılaştırması ... 63

Şekil 4.1. Kukla ekipmanın sonlu eleman modeli (genel mesh görünümü) 68

Şekil 4.2. Ağ yakınsama (mesh convergence) eğrisi 73

Şekil 4.3. Taban arayüzü ve CBUSH-RBE2 bağlantılarının detay görünümü 77

Şekil 4.4. Y ekseninde küresel eğilme şekli (1. mod)..... 82

Şekil 4.5. X ekseninde küresel eğilme şekli (2. mod)..... 82

Şekil 4.6. Z ekseninde küresel eğilme şekli (3. mod) 83

Şekil 4.7. Mod şekli (4. mod) 83

Şekil 4.8. X ve Y eksenleri düzlemde (in-plane) giriş PSD-frekans eğrileri 87

Şekil 4.9. Z ekseni düzlem dışı (out of plane) giriş PSD-frekans eğrisi 88

Şekil 4.10. Z ekseninde SEM rastgele titreşim analizi sonucu PSD-frekans eğrileri (IO1, IO2, IO3) 88

Şekil 5.1. Test merkezi titreşim test laboratuvarında kullanılan benzer sarsıcı sistemi . 91

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.2. Kukla ekipman üzerindeki sensör yerleşimi (IO1, IO2, IO3) 95

Şekil 5.3. Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama frekans-genlik eğrilerinin karşılaştırılması 99

Şekil 5.4. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması 99

Şekil 5.5. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması 100

Şekil 5.6. Z ekseninde 1., 2. ve 3. rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1 için) 105

Şekil 5.7. Z ekseninde IO1, IO2 ve IO3 sensörleri için 3. rastgele titreşim testine ait PSD-frekans eğrileri 105

Şekil 5.8. Rastgele titreşim testine ait örnek bir PSD-frekans eğrisi üzerinde gRMS hesabının şematik gösterimi 110

Şekil 6.1. Z ekseni IO1 noktasında analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin üst üste gösterimi 115

Şekil 6.2. Z ekseni IO2 noktasında analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin üst üste gösterimi 115

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Genlik [g veya g^2/Hz]
A_{50}	%50 ölçü boyunda kopma uzaması [%]
E	Elastisite (Young) modülü [Pa]
f	Frekans [Hz]
F(t)	Zaman alanında dış kuvvet vektörü [N]
f_max	Rastgele titreşim analizinde PSD integrasyonunun üst frekans sınırı [Hz]
f_min	Rastgele titreşim analizinde PSD integrasyonunun alt frekans sınırı [Hz]
G	Kayma modülü [Pa]
g	Yerçekimi ivmesi ve ivme seviyesi birimi [m/s^2]
H(ω)	Frekans alanında sistemin transfer fonksiyonu
Hz	Hertz Frekans Birimi [1/s]
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	Kütle atalet momenti bileşenleri (x, y, z eksenleri etrafında) [kg·m^2]
K	Rijitlik matrisi [N/m]
M	Kütle [kg]
Q	Kalite faktörü
Rm	Çekme dayanımı [Pa]
Rp0,2	%0,2 kalıcı şekil değiştirmeye karşılık gelen akma dayanımı [Pa]
S	İvme güç spektral yoğunluğu (PSD) [g^2/Hz]

Simgeler	Açıklamalar
S_a(f)	İvme güç spektral yoğunluğu fonksiyonu [g^2/Hz]
S_F(ω)	Girdi kuvvetinin güç spektral yoğunluğu [N^2/Hz]
S_x(ω)	Çıktı yer değiştirme yanıtının güç spektral yoğunluğu [(m^2)/Hz]
t	Zaman [s]
x(t)	Zaman alanında yer değiştirme vektörü [m]
$\dot{x}$(t)	Zaman alanında hız vektörü [m/s]
$\ddot{x}$(t)	Zaman alanında ivme vektörü [m/s^2]
ω	Açısal frekans [rad/s]
ρ	Malzeme yoğunluğu [kg/m^3]
ν	Poisson oranı
σ	Standart sapma
ζ	Sönüm oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
3B	Üç Boyutlu
AL7075-T651	Yüksek Dayanımlı Alüminyum Alaşımı
BBM	Ekmek Tahtası/Ön Geliştirme Modeli (Breadboard Model)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CBUSH	NASTRAN Doğrusal Sönüm Tipi Bir Boyutlu Bağlantı Elemanı
COMAC	Koordinat Modal Güvence Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion)

Kısaltmalar	Açıklamalar
CSAC	Çip Ölçekli Atomik Saat (Chip-Scale Atomic Clock)
CubeSat	Standart Küçük Uydu Platformu (Küp Uydu)
DOF	Serbestlik Derecesi (Degree of Freedom)
ECSS	Avrupa Uzay Standartları İş Birliği (European Cooperation for Space Standardization)
EM	Mühendislik Modeli (Engineering Model)
EQM	Mühendislik Yeterlilik Modeli (Engineering Qualification Model)
FM	Uçuş Modeli (Flight Model)
FRF	Frekans Cevap Fonksiyonu (Frequency Response Function)
GEVS	NASA Goddard Çevresel Doğrulama Standardı (General Environmental Verification Standard)
GEO	Jeosenkron Dünya Yörüngesi (Geostationary Earth Orbit)
GFEM	Küresel Sonlu Eleman Modeli (Global Finite Element Model)
GTO	Jeostatik Transfer Yörüngesi (Geostationary Transfer Orbit)
gRMS	İvmenin Kök Ortalama Kare Değeri (Root Mean Square of Acceleration)
IMU	Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
IO	İvmeölçer
IO1	1 Numaralı İvmeölçer
IO2	2 Numaralı İvmeölçer
IO3	3 Numaralı İvmeölçer
LEO	Alçak İrtifa Dünya Yörüngesi (Low Earth Orbit)
MAC	Mod Şekli Korelasyon Katsayısı (Modal Assurance Criterion)

Kısaltmalar	Açıklamalar
MEO	Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit)
MPC	Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control)
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NX	Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan CAD Yazılımı
OMA	Operasyonel Modal Analiz (Operational Modal Analysis)
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu (Power Spectral Density)
PWA	Baskılı Devre Kartı Montajı (Printed Wiring Assembly)
PFM	Proto-Uçuş Modeli (Protoflight Model)
QM	Yeterlilik Modeli (Qualification Model)
RMS	Kök Ortalama Kare (Root Mean Square)
RBE2	Çoklu Düğüm Rijit Bağlantı Elemanı (Rigid Body Element 2)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM)
SEM	Sonlu Elemanlar Modeli
SHM	Yapısal Sağlık İzleme (Structural Health Monitoring)
SM	Yapısal Model (Structural Model)
SRS	Şok Cevap Spektrumu (Shock Response Spectrum)
SSO	Güneş Eşzamanlı Yörünge (Sun Synchronous Orbit)
STM	Yapısal-Termal Model (Structural-Thermal Model)
TVA	Ayarlı Titreşim Sönümleyici (Tuned Vibration Absorber)
TVC	İtki Vektör Kontrolü (Thrust Vector Control)

1. GİRİŞ

Uzay tabanlı sistemler; haberleşme, gözlem, navigasyon ve bilimsel araştırma gibi pek çok alanda kritik roller üstlenmektedir. Bu durum, söz konusu sistemlerden beklenen güvenilirlik düzeyi ile göreve her an hazır olma gereksinimlerinin giderek artmasına neden olmaktadır. Alçak Dünya yörüngesinde görev yapacak uyduların, hem fırlatma yüklerine hem de görev boyunca maruz kalacakları çevresel etkilere dayanımının sağlanabilmesi için, uydu platformunun ve üzerinde taşınan ekipmanların yapısal açıdan ayrıntılı biçimde analiz edilmesi ve bu analizlerin yer testleri ile desteklenerek doğrulanması gerekmektedir.

Bu çerçevede, savunma sanayi şirketi tarafından yürütülen ve LEO yörüngesine yerleştirilmesi planlanan bir uydu geliştirme projesinde, uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde kullanılmak üzere tasarlanan bir ekipmanın kukla modelinin dinamik davranışının güvenilir biçimde temsil edilmesi özel bir önem taşımaktadır. İlgili ekipmana ait tasarım çalışmaları, sayısal analizler ve yer testleri, savunma sanayi şirketi bünyesinde yer alan test merkezinde gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, söz konusu kukla ekipmanın bilgisayar destekli tasarımından başlayarak, sonlu elemanlar yöntemi ile yürütülen modal ve rastgele titreşim analizlerine; buradan da test merkezinde elde edilen deneysel veriler kullanılarak yapılan doğrulama adımlarına ve analiz-test korelasyonuna uzanan bütüncül bir değerlendirme sunulmaktadır. Çalışma kapsamında önce konu ile ilgili literatür özetlenmekte, ardından kukla ekipmanın tasarım yaklaşımı ve sayısal modelleme stratejisi açıklanmakta; devamında deneysel test düzeni ile uygulanan prosedürler tanıtılmakta ve son olarak sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak elde edilen bulgular ışığında değerlendirmeler ve geleceğe dönük öneriler ortaya konulmaktadır.

Konunun tanımı

Alçak Dünya yörüngesinde görev yapacak uydular, fırlatma fazı boyunca itki sisteminin oluşturduğu eksenel titreşimler, aerodinamik yükler, yüksek şiddette akustik gürültü ve piroşoklar gibi geniş bir frekans aralığına yayılan dinamik çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu zorlu yükleme ortamı altında fırlatıcı ile uydu bütününün yapısal bütünlüğünün korunabilmesi için, uydu platformu ile üzerinde taşınan ekipmanların söz

konusu dinamik çevre altında emniyetli biçimde görev yapabildiğinin analitik ve deneysel yöntemlerle doğrulanması gerekmektedir [1, 2].

Bu doğrulama sürecinde, uydu yapılarına ve ekipmanlarına ait sonlu eleman modelleri üzerinden yürütülen sayısal analizlerle birlikte, fırlatma senaryosunu temsil eden modal, sinüsoidal ve rastgele titreşim testleri yaygın biçimde kullanılmaktadır [3]. Özellikle rastgele titreşim testleri, ivme PSD cinsinden tanımlanan geniş bantlı yüklemeler altında ekipmanların dinamik davranışının ve dayanımının doğrulanmasında temel araçlardan biridir. ECSS (Avrupa Uzay Standartları İş Birliği) standartları, bu tür testlerde gerçekleştirilen rezonans taramaları öncesi ve sonrasında doğal frekans ve genlik değişimleri için sırasıyla en fazla %5 ve %20 olacak şekilde sınır değerler önermektedir. Söz konusu sınırlar hem yapısal bütünlüğün korunup korunmadığının değerlendirilmesinde hem de test ile analiz korelasyonunun yeterliliğinin incelenmesinde ölçüt olarak kullanılmaktadır [4, 5].

Uydu seviyesi testlere geçilmeden önce, hem maliyet hem de program kısıtları göz önünde bulundurularak, gerçek uçuş konfigürasyonunu temsil eden yapısal yeterlilik modellerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu modeller üzerinde, kuvvet, kütle ve ataletsel özellikleri bakımından gerçek uçuş birimine karşılık gelecek biçimde tasarlanan kukla ekipmanlar entegre edilmektedir. Böylece, yaygın biçimde kullanılan bu kukla ya da dayanım maketi niteliğindeki ekipmanlar aracılığıyla taşıyıcı yapının küresel dinamik karakteristikleri, gerçek uçuş ekipmanı üretilmeden önce temsil edilebilmekte ve kritik bölgelerde ortaya çıkabilecek olası hasar mekanizmalarının önceden öngörülmesi mümkün hale gelmektedir [6]. Ancak kukla ekipmanlar, geometrik ve kütlesel olarak yeterince temsil edici olmadığında hem modal özelliklerde hem de rastgele titreşim yanıtlarında anlamlı sapmalar oluşabilmekte; bu durum, fırlatıcı gereksinimlerinin sağlandığına dair güveni azaltmakta ve ek test/analiz döngüleri doğurmaktadır.

Diğer taraftan, sonlu eleman modellerinin doğruluğu; idealizasyon düzeyi, ağ (mesh) kalitesi, arayüz tanımlarının doğruluğu ve malzeme özelliklerinin güvenilirliği gibi çok sayıda etmene bağlıdır. Literatürde yer alan uydu ve ekipman yapılarına yönelik model güncelleme çalışmalarında, test ile analiz sonuçları arasındaki farkların çoğu durumda sınır koşullarının tanımlanış biçiminden, birleştirme elemanlarının (örneğin cıvatalar ve bağlantı plakaları) sayısal modelde temsil edilişinden ve imalat sürecinden kaynaklanan artık gerilmelerden etkilendiği vurgulanmaktadır [3], [6]. Bu nedenle, analiz modeli ile test

sonuçları arasındaki frekans ve genlik farklarının ECSS'te tanımlanan sınırlar içinde tutulması için hem sayısal modelin hem de test prosedürünün özenle kurgulanması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasının odaklandığı temel problem, alçak Dünya yörüngesine yerleştirilecek bir uydu için oluşturulan yapısal yeterlilik modeli üzerinde, gerçek ekipmanın üretiminden önce tasarlanmış olan bir kukla ekipmanın dinamik açıdan ne ölçüde temsil edici olduğunun ortaya konulmasıdır. Çalışma kapsamında incelenen kukla ekipman, tek parça AL7075 T651 alüminyum kütükten talaşlı imalatla üretilen ve gerçek uçuş ekipmanının kütle, kütle merkezi ve atalet momentlerini sık toleranslar içinde karşılayacak şekilde bilgisayar ortamında modellenen bir yapıdır. Gerçek uçuş ekipmanı ile kukla ekipman arasında, kütlede yaklaşık %0,20, üç eksendeki kütle merkezi konumlarında yaklaşık %0,12 ile %0,25 aralığında, başlıca atalet momentlerinde ise I_{xx}, I_{yy} ve I_{zz} bileşenleri için sırasıyla yaklaşık %4,33, %1,83 ve %0,83 mertebesinde farklar bulunmaktadır. Bu farklar, kukla ekipmanın kütle özellikleri bakımından gerçek ekipmana oldukça yakın bir temsil sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu temsilin modal davranış ve rastgele titreşim yanıtı üzerindeki etkisinin hem analitik çalışmalar hem de deneysel testler aracılığıyla ayrıntılı biçimde doğrulanması gerekmektedir.

Ayrıca tek parça alüminyum kütükten talaş kaldırma yöntemi ile imal edilen parçalar için, imalat sürecinden kaynaklanan artık gerilmelerin özellikle ilk test döngülerinde doğal frekanslarda kaymalara neden olabildiği bilinmektedir. Bu tez kapsamında incelenen kukla ekipman üzerinde gerçekleştirilen çoklu rezonans taramaları ve rastgele titreşim testleri sonrasında, özellikle Z ekseni yönünde uygulanan ardışık testlerde frekans kaymalarının giderek azaldığı gözlenmiştir. Bu davranışın, imalat sırasında oluşan iç gerilmelerin zamanla giderilmesi ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Dolayısıyla ele alınan problem yalnızca kukla ekipmanın geometrisinin ve kütle özelliklerinin tasarımından ibaret değildir. Aynı zamanda sonlu eleman modelinin oluşturulmasını, rastgele titreşim analizi adımlarını ve yer testleri ile elde edilen veriler ışığında test ile analiz korelasyonunun ECSS kriterlerine uygun biçimde ortaya konulmasını da kapsamaktadır.

Frekans ve genlik kaymalarındaki diğer sebeplerini incelemek gerekirse; öncelikle kukla ekipmanın fikstüre bağlandığı arayüz bölgesinde ilk yükleme döngülerinde meydana gelebilen "oturma/yerleşme" davranışı dikkate alınabilir. Temas yüzeylerindeki

mikroskobik pürüzlülüklerin yeniden düzenlenmesi, cıvata ön yüklerinin çok küçük oranlarda yeniden dağılımı ve sürtünmeli temas koşullarının kararlı hâle gelmesi, sınır şartlarının etkin rijitliğini ve sönüm karakterini değiştirerek rezonans tepelerinde hem genlik farklılıklarına hem de rezonans frekanslarında kaymalara yol açabilmektedir. Bununla birlikte ivmeölçerlerin montaj koşulları (sıkma torku, yapıştırıcı tabakasının davranışı ve sensör tabanının tam oturması) ile kablo güzergâhı ve kablo gerginliğinin ölçüm noktasına ek moment oluşturması, özellikle yüksek frekans bölgelerinde ölçülen genliklerin tekrarlanabilirliğini etkileyebilmektedir. Ayrıca rezonans tarama sırasında kullanılan sinyal işleme parametrelerindeki (frekans çözünürlüğü, ortalama alma sayısı ve pencereleme) farklılıklar tepe değerlerinin okunmasında sapmalara neden olabilmektedir. Son olarak, test süresince oluşabilecek sınırlı sıcaklık değişimleri ve temas bölgelerinde mikro kayma mekanizmaları da malzeme ve arayüz davranışını etkileyerek gözlenen farklılıkların oluşumunda rol oynayabilmektedir.

Kukla ekipmanın kütle özellikleri ve dinamik davranışı gerçek uçuş ekipmanını yeterli doğrulukta temsil etmediğinde, uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde elde edilen modal özellikler ve rastgele titreşim yanıtları uçuş konfigürasyonunu temsil etmeyecek; bu durum doğal frekansların kayması, rezonans büyütmelerinin yer değiştirmesi ve arayüzden yapıya aktarılan yüklerin değişmesi nedeniyle hem test kabul kriterlerinin hatalı yorumlanmasına (yanlış kabul/ret kararları) hem de gereksiz muhafazakâr tasarım ve ek test/analiz iterasyonlarına yol açabilecektir. Böyle bir uyumsuzluk tespit edildiğinde, düzeltici faaliyetlerin ilk adresi kukla ekipmanın ve analiz-test kurulumunun temsiliyetidir: kütle dağılımının ayar kütleleri/boşaltmalar ile yeniden eşleştirilmesi, arayüz rijitliği ve sınır koşullarının daha gerçekçi biçimde modellenmesi, sönümün deneysel olarak güncellenmesi ve test tarafında oturma/yerleşme, bağlantı ön yükleri, sensör montajı ve ölçüm belirsizliklerinin kontrol altına alınması önerilmektedir. Bununla birlikte, yürütülen duyarlılık çalışmaları ve model güncelleme adımları sonucunda sapmanın kukla ekipmandan ziyade gerçek uçuş ekipmanının öngörülen dinamik hedefleri sağlamamasından kaynaklandığı gösterilirse, gerçek ekipmanda da tasarım revizyonu (rijitlik artırımı, kütle yeniden dağılımı, bağlantı/arayüz iyileştirmeleri veya yerel takviye çözümleri) önerilebilecek; böylece uçuş biriminin fırlatıcı gereksinimleri ve uydu seviyesi dinamik bütünlük kriterleri açısından emniyetli çalışma zarfı içinde kalması amaçlanacaktır.

Araştırmanın amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, yürütülen bir uydu geliştirme projesi kapsamında, uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde kullanılmak üzere tasarlanan bir ekipmanın kukla modelinin, gerçek uçuş ekipmanının dinamik davranışını temsil etme yeterliliğini analitik ve deneysel olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda, kukla ekipmanın kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri bakımından gerçek ekipmanla belirlenen toleranslar dâhilinde eşleştirilmesi; sonlu eleman modeli üzerinden elde edilen modal ve rastgele titreşim yanıtlarının, test merkezinde gerçekleştirilen yer testlerinden elde edilen verilerle karşılaştırılarak doğrulanması hedeflenmektedir.

Öncelikle gerçek uçuş ekipmanının üç boyutlu modeli temel alınarak, tek parça AL7075-T651 malzemeden üretilebilecek bir kukla ekipman geometrisinin tasarlanması hedeflenmektedir. Bu tasarım sürecinde kukla ekipmanın kütle, kütle merkezi ve atalet momenti değerlerinin, proje kapsamında tanımlanan tolerans aralıkları içinde gerçek ekipman ile uyumlu hale getirilmesi amaçlanmakta ve böylece uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde gerçek ekipmanın dinamik temsiline uygun bir fiziksel model elde edilmektedir. Tasarım aşamasının ardından kukla ekipmanı temsil eden ayrıntılı bir sonlu eleman modelinin oluşturulması, bu modelde kullanılacak eleman türlerinin seçilmesi, ağ boyutlarının belirlenmesi ve kalınlık boyunca uygulanacak katmanlandırma stratejisinin tanımlanması gerekmektedir. Mesh yakınsama çalışmaları ile modelin doğal frekanslara duyarlılığı incelenmekte ve bu çalışmalar, sayısal modelin yeterli doğruluk düzeyine ulaştığını göstermeyi amaçlayan temel alt adımları oluşturmaktadır. Bu kapsamda kukla ekipmanın montaj arayüzlerini temsil eden CBUSH (NASTRAN Doğrusal Sönüm Tipi Bir Boyutlu Bağlantı Elemanı) ve RBE2 (Çoklu Düğüm Rijit Bağlantı Elemanı) türü birleştirme elemanları kullanılarak sınır koşulları modellenmekte, modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ile mod şekillerinin fırlatıcı gereksinimleri ile uyumu değerlendirilmektedir. Özellikle birinci doğal frekansın belirlenen eşik değer olan 140 Hz üzerinde olduğunun gösterilmesi, çalışmanın başlıca tasarım hedeflerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Tez kapsamında ele alınan bir diğer hedef, kukla ekipman için X, Y ve Z eksenlerinde tanımlanan PSD girdileri altında rastgele titreşim analizlerinin yürütülmesidir. Bu analizler sonucunda ivmeölçer yerleşim noktalarındaki frekans ve genlik yanıtları g^2/Hz cinsinden

elde edilmekte, başlangıçta varsayılan %2,5 sönüm oranının hesaplanan tepkiler üzerindeki etkisi ortaya konulmaktadır. Yürütülen sayısal çalışmalar, uzay sistemleri entegrasyon ve test merkezinde kukla ekipman üzerinde gerçekleştirilen rezonans taramaları ile rastgele titreşim testleri ile desteklenmektedir. Farklı eksenlerde ve birden fazla tekrar içeren test serileri sonucunda frekans, tepe genlik ve gRMS (İvmenin Kök Ortalama Kare Değeri) değerlerinin belirlenmesi amaçlanmakta, imalat kaynaklı iç gerilme etkilerinin ise testler boyunca gözlenen frekans kaymaları üzerinden izlenmesi hedeflenmektedir. Özellikle Z ekseninde uygulanan rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD frekans eğrileri kullanılarak yarı güç bant genişliği yöntemi ile sönüm oranı hesaplanmakta, bu değer analiz modeline geri beslenmekte ve güncellenen sönüm oranı ile yinelenen rastgele titreşim analizleri test sonuçları ile yeniden karşılaştırılmaktadır. Bu adımların tümü, modelin dinamik davranışının deneysel gözlemlere yaklaştırılması açısından kritik bir aşama olarak değerlendirilmektedir.

Son aşamada sonlu eleman modelinden elde edilen modal ve rastgele titreşim sonuçları ile yer testlerinden elde edilen veriler arasındaki uyumun nicel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda frekans farklarının yaklaşık yüzde beş mertebesinde tanımlanan sınırlar içinde kalıp kalmadığı, genlik farklarının ise yaklaşık yüzde yirmi mertebesinde kabul edilen kriterleri sağlayıp sağlamadığı değerlendirilmektedir. Böylece analiz ile test arasındaki korelasyonun sayısal olarak ortaya konulması hedeflenmektedir. Yürütülen bu korelasyon çalışmaları sonucunda tasarlanan kukla ekipmanın uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde gerçek ekipmanın dinamik temsili olarak kullanılmasının uygunluğuna ilişkin genel bir hükme varılması beklenmektedir. Ayrıca benzer ekipmanlar için izlenebilecek tasarım ve doğrulama süreçlerine yönelik öneriler geliştirilmesi de çalışmanın hedefleri arasındadır. Bu sayede bir yandan mevcut uydu projesi kapsamında güvenilir bir kukla ekipman metodolojisi oluşturulmakta, diğer yandan gelecekte yürütülecek benzer çalışmalar için tekrar edilebilir bir tasarım analiz ve test çerçevesi tanımlanmaktadır.

Araştırmanın önemi

Uydu yapısal yeterlilik modellerinde kullanılan kukla ekipmanlar, gerçek uçuş donanımı henüz üretilmemişken yapıya kütlesel ve ataletsel yük getiren başlıca bileşenler arasında yer almaktadır. Bu ekipmanların kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri bakımından gerçek

donanımı temsil etmesi beklenmekte, buna ek olarak modal ve rastgele titreşim davranışlarının da yapısal sistemin küresel dinamiği ile uyum göstermesi gerekmektedir. Literatürde ise kukla ekipmanların çoğu çalışmada yalnızca kütle eşdeğerliği üzerinden ele alındığı, sonlu eleman modeli ile sınır koşulu temsili, rastgele titreşim analizi ve yer testlerini bir arada içeren bütünleşik bir korelasyon çerçevesi içinde sistematik olarak incelendiği örneklerin görece sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, kukla ekipmanın analitik ve deneysel bakımdan hangi ölçütler sağlandığında yeterli temsil düzeyine ulaştığının açık biçimde tanımlanmasını zorlaştırmakta ve benzer projelerde farklı ya da kimi zaman gereğinden fazla muhafazakâr mühendislik yorumlarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Bu tez çalışması, bir alçak Dünya yörüngesi uydu projesi kapsamında, uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde kullanılacak bir kukla ekipman için tasarım, analiz ve test süreçlerini adım adım tanımlayan ve başka projelere de uyarlanabilecek nitelikte tekrarlanabilir bir metodoloji önermektedir. Çalışmada, Siemens NX (Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan CAD Yazılımı) ortamında kütle özellikleri gerçek ekipman ile uyumlu olacak biçimde tasarlanan tek parça AL7075-T651 malzemeden bir kukla ekipman esas alınmıştır. Bu ekipman için Siemens Simcenter yazılımı kullanılarak ayrıntılı bir sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu model üzerinden modal ile rastgele titreşim analizleri yürütülmüştür. Aynı donanım, savunma sanayi şirketi test merkezinde gerçekleştirilen rezonans taramaları ve rastgele titreşim testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sayısal ve deneysel veriler, doğal frekans, tepe genlik, güç spektral yoğunluk eğrileri ve gRMS değerleri üzerinden nicel olarak karşılaştırılmakta, ECSS uyumlu frekans ve genlik farkı sınırları esas alınarak analiz ile test arasındaki korelasyonun nasıl değerlendirilebileceğine ilişkin sistematik bir yaklaşım geliştirilmektedir. Böylece kukla ekipmanın yalnızca kütle benzerliği bakımından değil, dinamik davranış açısından da yeterli temsil sağlayıp sağlamadığı, önceden tanımlanmış ölçütler aracılığı ile açık biçimde ortaya konulmaktadır.

Bu yönüyle yürütülen çalışma, savunma sanayi şirketi bünyesindeki ilgili uydu projesine hizmet etmenin ötesinde, benzer yapısal yeterlilik modeli ve kukla ekipman uygulamalarına sahip diğer kurum ve projeler için de aktarılabilir nitelikte bir mühendislik çerçevesi sunma potansiyeli taşımaktadır. Kütle özelliklerinin eşleştirilmesi, sonlu eleman modelinin oluşturulması, sınır koşulu ve arayüz temsillerinin tanımlanması, sönüm oranının deneysel yöntemler ile belirlenmesi ve uygulanacak test prosedürlerinin sistematik biçimde ortaya

konulması gibi adımların aynı çatı altında bütünleştirilmesi, farklı ekipman ve projelerde benzer adımların izlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Böyle bir yaklaşım, projeler arasında karşılaştırılabilirliğin artmasına katkıda bulunmakta ve mühendislik kararlarının daha nesnel temellere dayandırılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca uydu yapısal yeterlilik modeli testlerinde kullanılacak kukla ekipmanların, gerçek ekipmanın dinamik temsili açısından ne düzeyde güvenilir olduğunun erken aşamada ortaya konması, maliyet, zamanlama ve risk yönetimi bakımından da önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu sayede hem mevcut proje kapsamında kullanılan kukla ekipman yaklaşımının sağlamlığı desteklenmekte hem de gelecekte yürütülecek benzer çalışmalar için başvurulabilecek pratik bir başvuru çerçevesi oluşturulmaktadır.

Varsayımlar

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen tasarım, sayısal analiz ve deneysel doğrulama adımlarında belirli varsayımlar esas alınmıştır. İlk olarak, fırlatma sırasında uydu ile üzerinde taşınan ekipmanların maruz kalacağı dinamik çevreyi temsil eden sinüsoidal ve rastgele titreşim yüklerinin, fırlatıcı firmadan sağlanan yük çevresi tanımlarına ve proje gereklerine uygun biçimde oluşturulduğu kabul edilmektedir. Bu çerçevede analizlerde ve testlerde kullanılan PSD eğrilerinin fırlatma ortamını yeterli doğrulukta temsil ettiği varsayılmaktadır. Ayrıca savunma sanayi şirketi bünyesinde yer alan test merkezinde kullanılan titreşim test sistemi, güç amplifikatörleri, sarsıcı tablası ve veri toplama birimleri dâhil olmak üzere tüm ölçüm ve uyarım donanımının, üretici talimatları ile ilgili prosedürlere uygun biçimde kalibre edildiği ve bu kalibrasyonların testler süresince geçerliliğini koruduğu kabul edilmiştir. Rastgele titreşim ve rezonans tarama testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin seçilen frekans bandında doğrusal davrandığı, hassasiyet değerlerinin üretici kataloglarında verilen tolerans aralıkları içinde kaldığı ve sensör kütlesinin kukla ekipman üzerindeki kütle dağılımını ve dinamik davranışı ihmal edilebilir düzeyde etkilediği de bir diğer temel varsayım olarak benimsenmiştir.

Malzeme ve modelleme varsayımları kapsamında, kukla ekipmanın imalatında kullanılan AL7075-T651 alüminyum alaşımının elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk gibi elastik malzeme özelliklerinin standart malzeme veri tablolarında verilen değerler ile uyumlu olduğu kabul edilmektedir. Talaşlı imalat sürecinden kaynaklanabilecek yerel özellik değişimlerinin ise bu çalışmada kullanılan sonlu eleman modeli düzeyinde ihmal

edilebilir büyüklükte olduğu varsayılmıştır. Sonlu eleman modelinde yapı davranışı küçük şekil değiştirme varsayımı altında ve doğrusal elastik bir malzeme modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Bu nedenle mod şekilleri ile rastgele titreşim yanıtları hesaplanırken, malzeme ve geometriye ilişkin doğrusal olmayan etkiler göz önünde bulundurulmamıştır. Bağlantı bölgelerinde ortaya çıkabilecek sürtünme etkileri de aynı gerekçe ile hesaba katılmamıştır. Montaj arayüzlerinin sonlu eleman modelinde CBUSH ve RBE2 türü elemanlar ile temsil edilmesinin, kukla ekipman ile uydu yapısal yeterlilik modeli arasındaki bağlantı rijitliğini ve yük aktarımını çalışmanın amacı doğrultusunda yeterli doğrulukta yansıttığı kabul edilmektedir. Bu temsil yaklaşımından kaynaklanabilecek yerel farklılıkların, küresel dinamik karakteristikler ve analiz ile test korelasyonu üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı varsayılmıştır.

Sönüm ve korelasyon yaklaşımı açısından modal ve rastgele titreşim analizlerinde kullanılan sönüm oranları, başlangıç aşamasında literatür bilgisi ve benzer uygulamalar esas alınarak tek bir değer olarak yüzde iki virgül beş biçiminde tanımlanmıştır. Daha sonraki aşamada Z ekseninde gerçekleştirilen rastgele titreşim testlerinden elde edilen güç spektral yoğunluk eğrileri üzerinden sönüm oranı yeniden hesaplanmış, bulunan değer sayısal modele geri beslenmiş ve başlangıç varsayımı buna göre güncellenmiştir. Bu kapsamda sönümlemenin frekanstan bağımsız, oransal yani modal sönüm yaklaşımı ile temsil edilmesinin analiz ile test karşılaştırmaları için yeterli olduğu varsayılmaktadır. Analiz ile test korelasyonunun değerlendirilmesinde esas alınan doğal frekans, tepe genlik ve gRMS büyüklükleri için, hem sayısal analizler hem de deneysel ölçümler açısından belirsizliklerin makul sınırlar içinde kaldığı kabul edilmiştir. Test verilerinde yer alabilecek ölçüm hatalarının, sinyal işleme adımlarından kaynaklanabilecek küçük farkların ve nümerik yuvarlatmaların, sonuçların genel eğilimini ve korelasyon değerlendirmesini değiştirmeyecek düzeyde olduğu varsayılmaktadır. Son olarak, çalışma kapsamında gerçekleştirilen korelasyon analizlerinin seçilen modlar, frekans bantları ve ivmeölçer konumları üzerinden yürütüldüğü, buna karşın uydunun tüm görev senaryosunu ve tüm olası yükleme durumlarını kapsamının dışında bıraktığı kabul edilmektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçların yorumlanmasında, analiz ve testlerin kapsadığı frekans aralığı, sınır koşulu tanımı ve yükleme senaryoları ile sınırlı kalındığı varsayımı benimsenmiştir.

Sınırlılıklar

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular ile yapılan değerlendirmeler, izlenen yöntem ve belirlenen kapsam nedeniyle bazı sınırlılıklar içermektedir. Öncelikle çalışma, belirli bir alçak Dünya yörüngesi uydu projesi kapsamında, uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde yer alan tek bir ekipmana ait kukla model ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçların, farklı görev profillerine, farklı fırlatıcı yük çevrelerine ya da geometri ve kütle özellikleri bakımından belirgin biçimde farklı ekipmanlara doğrudan genellenmemesi gerekmektedir. Kukla ekipman tasarımında, tek parça AL7075-T651 malzemeden talaşlı imalat yöntemi ile üretilebilecek bir yapı esas alınmıştır. Farklı malzemelerin kullanıldığı çözümler, döküm ya da kaynaklı imalat gibi alternatif imalat yöntemleri ya da çok parçalı tasarım yaklaşımları ise bilinçli olarak çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Dolayısıyla burada sunulan tasarım ve doğrulama yaklaşımının, öncelikle bu malzeme seçimi ve imalat kurgusu için geçerli olduğu dikkate alınmalıdır.

Sayısal analizlerde kullanılan sonlu eleman modeli, doğrusal elastik malzeme modeli ve küçük şekil değiştirme varsayımları altında oluşturulmuştur. Bu kapsamda, plastik şekil değiştirme etkileri, bağlantı bölgelerindeki sürtünme davranışı, malzeme ve geometriye bağlı doğrusal olmayan (non-linear) tepkiler dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçların elastik çalışma bölgesi için ve tanımlanan yük seviyeleri altında geçerli olduğu, aşırı yükleme durumlarının ise bu çalışmanın kapsamı dışında kaldığı kabul edilmektedir. Modal ve rastgele titreşim analizlerinde, kukla ekipman ile yapısal yeterlilik modeli arasındaki bağlantılar CBUSH ve RBE2 türü elemanlar kullanılarak idealize edilmiştir. Bu yaklaşım, bağlantı rijitliği ile yük aktarımının küresel dinamik davranış üzerindeki etkisini çalışma amacı açısından yeterli doğrulukta temsil etmek üzere seçilmiştir. Buna karşılık bağlantı cıvatalarının ayrıntılı üç boyutlu temsili ve yerel gerilme yığılmalarının incelenmesi bu kapsamda ele alınmamıştır. Analiz ve test çalışmaları, modal analizler için 20-2800 Hz aralığına, rastgele titreşim testleri için ise 20-2000 Hz aralığına odaklanmıştır. Bu frekans aralıklarının dışında kalan yüksek frekanslı yerel modlar, piroşok etkileri ve akustik yüklemeler değerlendirme kapsamında yer almamaktadır.

Deneysel çalışmalar, savunma sanayi şirketi test merkezinde yer alan titreşim test sisteminde, X, Y ve Z eksenlerinde tek eksen yükleme altında yürütülmüştür. Bu nedenle elde edilen sonuçların, çok eksenli eşzamanlı yüklemeler ya da farklı sınır koşulu

konfigürasyonları için doğrudan geçerli olduğu varsayılmamalıdır. Rastgele titreşim testlerinde kukla ekipman üzerinde sınırlı sayıda ivmeölçer konumu kullanılmış, bu kapsamda üç sensör noktasından ölçüm alınmıştır. Analiz ile test karşılaştırmaları yalnızca bu ölçüm noktalarındaki yanıtlar üzerinden gerçekleştirilmiş, ekipmanın tamamına ilişkin alan bazlı titreşim dağılımı ayrıntılı biçimde incelenmemiştir. Bu tezde gerçekleştirilen analiz ile test korelasyonu, esas olarak doğal frekans, tepe genlik, güç spektral yoğunluk eğrileri ve gRMS değerleri üzerinden yürütülmüştür. Yorulma ömrü, hasar birikimi, ömür tahmini ve uzun süreli görev koşulları altında performans gibi konular ise bilinçli olarak çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Çalışmada kullanılan fırlatıcı yük çevresi ile kabul kriterleri, ilgili proje gereksinimleri ve ECSS dokümanları temel alınarak belirlenmiş, farklı fırlatıcılara ait yük tanımları, alternatif kabul kriterleri ve diğer standartlar bu kapsamda ayrıca değerlendirilmemiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, uzay görevleri için geliştirilen uydu sistemlerinin genel mimarisi, yörünge seçimi ve ortam koşulları, yapısal yeterlilik modelleri ve kukla ekipman yaklaşımı, sonlu elemanlar yöntemi ve model doğrulama süreçleri, modal analiz ve test-analiz korelasyonu, rastgele titreşim analizi ve çevresel testler ile tasarım-optimizasyon yöntemleri bir bütünlük içinde ele alınmaktadır. Literatürde yer alan tezler, makaleler ve standart dokümanlar, hem geliştirilen uydu projesinin gereksinim çerçevesini anlamak hem de bu tezde önerilen kukla ekipman tasarımı, sayısal analiz ve deneysel doğrulama yaklaşımının konumunu doğru tarif etmek amacıyla değerlendirilmiştir.

Çalışmalar, özellikle küçük uydu ve küp uydu yapıları, fırlatma yükleri, rastgele titreşim ve modal testler, sonlu eleman tabanlı model doğrulama yöntemleri ve yapısal optimizasyon uygulamaları üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu bölümde önce uydu sistemleri ve yörüngeler bağlamında görev ve ortam kavramı, ardından yapısal model felsefesi, sayısal modelleme ve dinamik doğrulama, rastgele titreşim metodolojisi ve tasarım-optimizasyon yaklaşımları tartışılmakta; son olarak da bu tezin yaklaşımını dolaylı olarak destekleyen ilgili çalışmalar özetlenmektedir.

2.1. Uydu Sistemleri ve Yörüngeler

Uydu sistemleri, temel olarak yapı, ısıl kontrol, güç, yörünge ve yönelim belirleme ve kontrol, veri işleme, haberleşme ve faydalı yük gibi çok sayıda alt sistemin entegre biçimde çalıştığı karmaşık uzay araçlarıdır. Söz konusu alt sistemler ve temel işlevleri Çizelge 2.1'de özetlenmektedir. Bu alt sistemlerin görev süresi boyunca çevresel şartlara dayanıklı olması, birbirleriyle tam uyum içinde ve kesintisiz çalışması görevin başarısı açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır [7, 8]. Gündoğdu, PSAT 1 uydusu üzerinden yaptığı çalışmada, uydu tasarımında yer ve uzay ortamının eksik ya da yanlış tanımlanması durumunda yapısal modellemenin gerçek görev koşullarını temsil edemeyeceğini vurgulamakta ve yük ortamının ile alt sistem etkileşimlerinin bütüncül biçimde modellenmesinin zorunlu olduğunu belirtmektedir [7]. Şanlı ise ASTINSAT 1 adlı 3U küp uydu projesi kapsamında yapı, güç, haberleşme, komut ve veri yönetimi, yönelim belirleme ve kontrol ile ısı alt sistemlerinden oluşan bir mimari tanımlamakta ve bu alt sistemlerin fırlatma ile uzay ortamı gereksinimleri göz önünde bulundurularak entegre edildiğini ifade

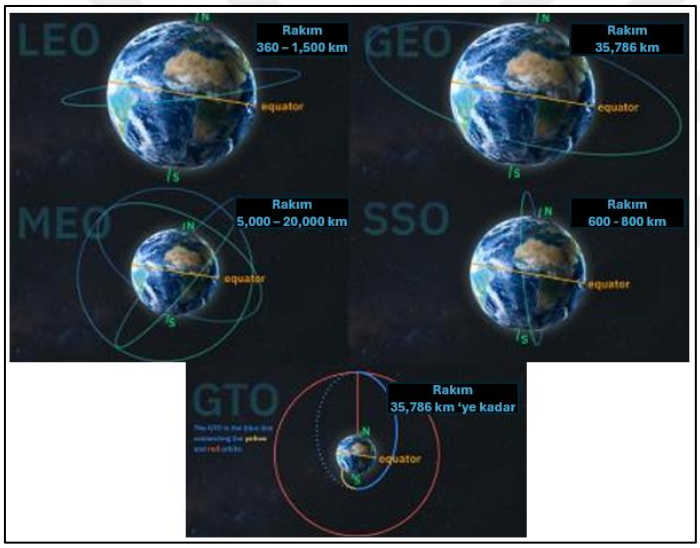
etmektedir [8]. Arslan'ın çalışmasında da, Dünya yörüngesinde belirli yörünge elemanları ile tanımlanan uyduların güvenilir görev icrası için yapısal, ısıl, elektriksel ve yörünge ile yönelim gereksinimlerinin birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır [9].

Çizelge 2.1. Uydu alt sistemleri ve temel işlevleri [7]

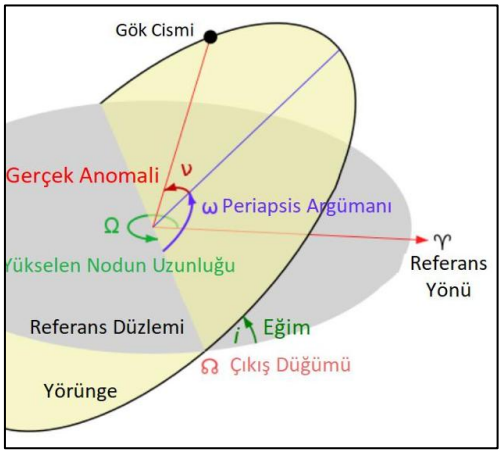
Alt Sistem	Temel İşlevi
Yapı Alt Sistemi	Temel olarak uydunun yapısal zorlanmalara karşı dayanıklı olmasını ve diğer alt sistemlerin birbirleri ile bağlantısını sağlayan sistemdir.
Isıl Kontrol Alt Sistemi	Uydunun tümünün ve alt sistemlerinin görev süresince sıcaklık değerlerinin belli sınırlar içerisinde kalmasını sağlayan sistemlerdir.
Güç Alt Sistemi	Uydunun ihtiyaç duyduğu gücün üretilmesi, düzenlenmesi, diğer sistemlere dağıtılması ve depolanması işlevlerini erine getirmekle görevli sistemdir.
Yörünge ve Yönelim Belirleme ve Kontrol Alt Sistemi	Uydunun görevi sırasında takip edeceği yörüngeyi saptayan, denetleyen ve yörüngeden sapılması durumunda uydunun tekrar uygun yörüngeye oturtulmasından sorumlu sistemdir.
Veri Kotarma Alt Sistemi	Uydunun görev yaptığı süre boyunca yer istasyonundan gelen verileri alıp diğer alt sistemlere aktarmak ve tersi şekilde uydunun yarattığı tüm sağlık bilgileri ile faydalı yük verilerini bellekte saklamak ve gerektiğinde yer istasyonuna aktarmak gibi görevleri yerine getirir.
Haberleşme Alt Sistemi	Uydunun yer istasyonu ile iletişimini sağlamakla görevli sistemdir.
Faydalı Yük Alt Sistemi	Uydunun ana görevini yerine getirebilmesi için gereken yükleri barındıran sistemdir.

Literatürde uydular, çoğunlukla bulundukları yörünge irtifasına göre alçak irtifa Dünya yörüngesi, orta irtifa yükseklikte Dünya yörüngesi (MEO), jeostasyon ya da jeosenkron Dünya yörüngesi (GEO) ve daha yüksek irtifadaki özel yörüngeler olarak sınıflandırılmaktadır; söz konusu yörünge tipleri Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir [8, 9]. Bu yörüngelerin geometrik özelliklerini ve uzaydaki konumlarını tanımlamada kullanılan temel Kepler yörünge elemanları ise Şekil 2.2'de sunulmaktadır. Şanlı, yapay uyduları alçak, orta, eşzamanlı (yer durağan) ve yüksek irtifa yörüngeleri olmak üzere dört temel sınıfta ele almakta ve LEO bölgesini yaklaşık 160-2 000 km irtifa aralığı olarak tanımlamaktadır. Bu irtifada yer gözlem uydularının ve Uluslararası Uzay İstasyonu'nun görev yaptığı belirtilmektedir. MEO yörüngesinde 2 000-35 786 km bandında küresel konumlandırma uydularının, yaklaşık 35 786 km irtifadaki GEO (Jeosenkron Dünya

Yörüngesi) bölgesinde ise haberleşme uydularının konumlandığı ifade edilmektedir [8]. Arslan, yörünge sınıflandırmasını LEO, MEO ve GEO'ya ek olarak Güneş eşzamanlı yörüngeyi (SSO) ve jeostatik transfer yörüngesini (GTO) de içerecek biçimde genişletmekte ve yörünge irtifasının kapsama alanı, yörünge hızı ile fırlatma maliyetleri üzerinde doğrudan belirleyici bir etken olduğunu vurgulamaktadır [9]. Çam, yörünge tiplerine göre görev örneklerini ve uygulama alanlarını özetleyerek LEO yörüngesinin yer gözlemi, meteoroloji ve keşif görevleri için sağladığı yüksek mekânsal çözünürlük ile kısa geçiş sürelerini başlıca avantajlar olarak ön plana çıkarmakta; bu çalışma kapsamında kullanılan gerçek ve kukla ekipmanın ilgili yörünge senaryosu için esas alınan kütle ve atalet parametreleri ise Çizelge 2.2'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir [10].



Şekil 2.1. Uydu yörüngeleri [9]

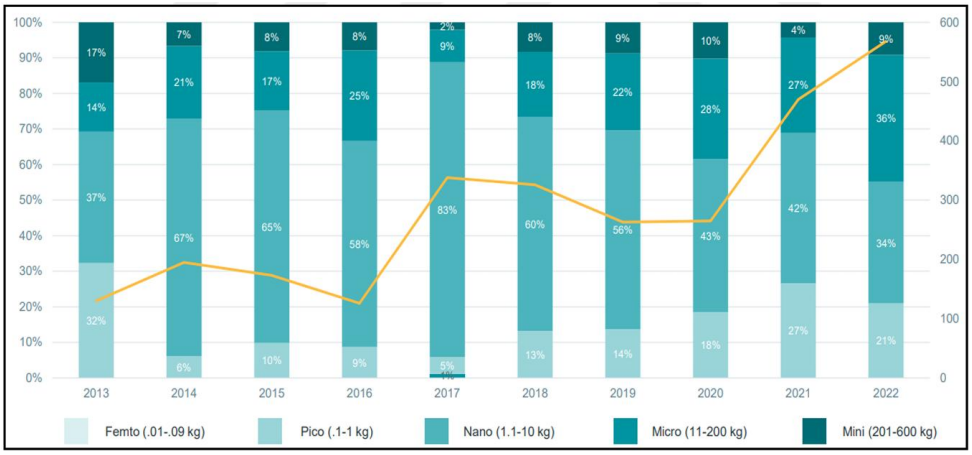


Şekil 2.2. Kepler'in yörünge elementleri [8]

Çizelge 2.2. Gerçek ve kukla ekipmanın kütle ve atalet [10]

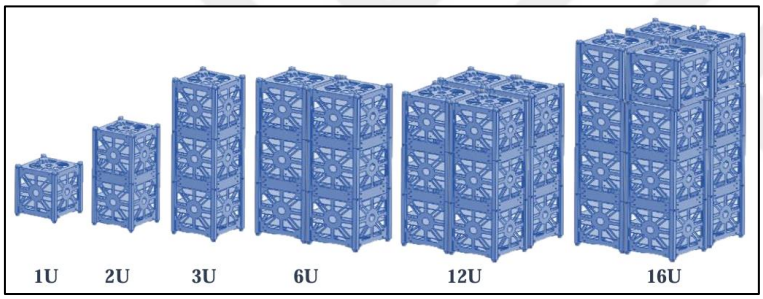
Uyduların Sınıflandırılması		
Bulunduğu Yörüngeye Göre	Görevine Göre	Kütlesine Göre
Alçak Yörünge Uyduları	Gözlem Uyduları	Pico Uydular
Orta Yörünge Uyduları	Haberleşme Uyduları	Nano Uydular
Yüksek Yörünge Uyduları	Navigasyon Uyduları	Küp Uydular
		Mikro Uydular
		Mini Uydular
		Büyük Uydular

Uydular kütlelerine göre de sınıflandırılmakta ve pico, nano, küp uydu, mikro, mini ile büyük uydu gibi kategoriler fırlatma sistemi seçimi, maliyet analizi ve görev tasarımı açısından temel bir tasarım parametresi olarak kullanılmaktadır. Çam, küçük uyduların (mini, mikro, nano ve pico) sayısının son yıllarda belirgin biçimde arttığını belirtmekte ve bu eğilimin hem bileşenlerin giderek küçülmesi hem de fırlatma maliyetlerinin düşmesi ile doğrudan ilişkili olduğunu, küçük uyduların yıllara göre fırlatma adetlerindeki artış eğiliminin ise Şekil 2.3'te gösterildiğini ifade etmektedir [10]. Menteş, uydu teknolojilerinde bileşenlerin minyatürleştirilmesi sonucunda uydu kütlelerinde belirgin bir azalma eğilimi ortaya çıktığını vurgulamakta ve bu durumun daha fazla ülkenin ve kurumun uzay projelerine katılımını mümkün kıldığını belirtmektedir [11]. Arslan da benzer biçimde uyduları büyük, orta, mini, mikro, nano ve piko sınıflarına ayırmakta ve kütle azaldıkça görev çeşitliliğinin büyük ölçüde korunabildiğini, küçük uyduların ise esnek görev mimarilerine olanak tanıdığını ifade etmektedir [9].



Şekil 2.3. Küçük uyduların yıllara göre fırlatılmaları [10]

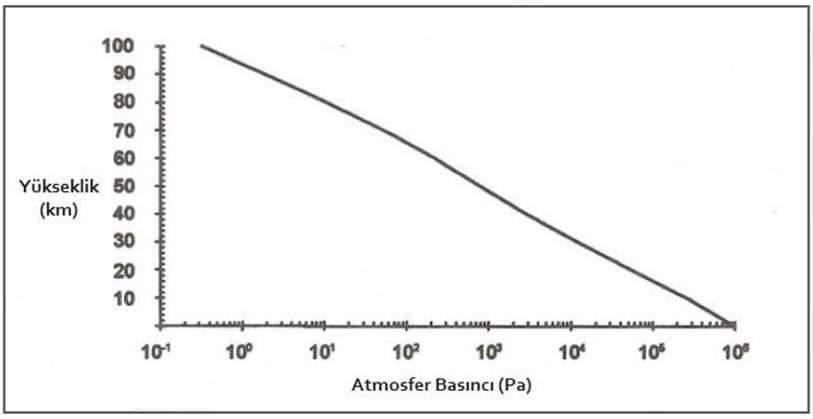
Küçük uydu sınıfları içerisinde küp uydu (CubeSat) standardı, son yirmi yıllık dönemde en yaygın kullanılan ve en fazla kabul gören platform hâline gelmiştir. Menteş, küp uyduları kenar uzunluğu 100 mm olan ve kütlesi en fazla 1,33 kg'a ulaşan küp biçimli nano uydular olarak tanımlamakta, birim hücrelerin art arda eklenmesiyle 2U, 3U ve daha büyük konfigürasyonların oluşturulabildiğini belirtmektedir [11]. Şanlı ise CubeSat Design Specification Rev. 14 dokümanına atıfla ASTINSAT-1 uydu gövdesi için koordinat sisteminin, dış boyutların, malzeme gereksinimlerinin ve yerleştirici arayüzlerinin bu standarda göre belirlendiğini, 3U konfigürasyonda hem yapısal tasarımın hem de alt sistem paketlemesinin ayrıntılı biçimde incelendiğini ifade etmektedir [8]. Jumshudlu, küp uydu boyutlarını ve standardın getirdiği geometrik kısıtları Şekil 2.4'te şematik olarak sunmakta, bu görsel yaklaşım üzerinden modüler yapının farklı görev gereksinimlerine uyarlanabilen konfigürasyonların kolaylıkla türetilmesine imkân tanıdığını ortaya koymaktadır [12].



Şekil 2.4. Küp uydu boyutları [12]

Yörünge seçimi, yalnızca görevin geometrisini tanımlamakla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda uzay ortamının özelliklerini ve uydunun maruz kalacağı çevresel yüklerin düzeyini doğrudan belirlemektedir. Menteş, uzay ortamını vakum, nötral atmosfer, plazma, radyasyon ve iri ölçekli parçacık ortamı başlıkları altında sınıflandırmakta ve bu ortamların yoğunluğunun yörünge irtifası ile eğimine bağlı olarak değiştiğini göstermekte; uzay ortamı türleri ve uydular üzerindeki başlıca etkileri ise Gündoğdu tarafından Çizelge 2.3'te özetlenmektedir. Atmosfer basıncının yükseklikle değişimi ise Şekil 2.5'te örnek olarak sunulmaktadır. LEO bölgesinde vakum koşullarının tetiklediği gaz çıkışı (outgassing) sonucunda yüzeylerde kirlenmenin oluştuğu, atomik oksijenin malzeme aşınmasına yol açan kimyasal etkilerinin bulunduğu, plazma ortamının yüzey yüklenmesine neden olduğu ve radyasyonun elektronik bileşenlerde bozulma etkileri yarattığı ayrıntılı biçimde tartışılmaktadır [11]. Şanlı, 160-2 000 km irtifa aralığındaki alçak yörüngede atomik oksijen, plazma ve radyasyonun küp uydu yapısı üzerinde ciddi hasarlara yol açabileceğini, bu

nedenle malzeme seçimi ile ısıl tasarım aşamalarında söz konusu etkilerin başlangıçta dikkate alınmasının zorunlu olduğunu vurgulamaktadır [8]. Uzay çöplerinin özellikle 800 km üzeri irtifalarda mikro göktaşlarına kıyasla daha yoğun ve daha yüksek risk oluşturduğu, bu parçacıkların yüksek hızlardaki çarpışmalarının ise önemli düzeyde yapısal hasar potansiyeli taşıdığı ifade edilmektedir [11]. Gündoğdu ve Çam, yörünge, ortam ve tasarım arasındaki ilişkinin yapısal gereksinimleri, doğal frekans sınırlarını ve rastgele titreşim ile şok yük seviyelerini doğrudan şekillendirdiğini, bu nedenle yörünge kararı verilmeden sağlıklı ve tutarlı bir yapısal gereksinim seti oluşturulamayacağını vurgulamaktadır [7], [9, 10].

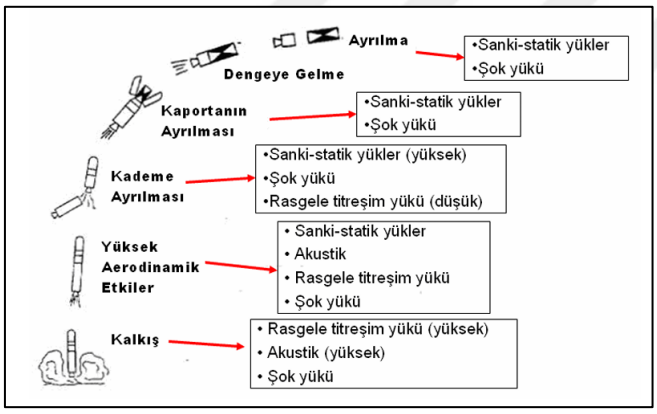


Şekil 2.5. Atmosfer basıncının yükseklikle değişimi [11]

Çizelge 2.3. Uzay ortamı türleri [7]

Ortam	Uydulara etkisi
Vakum ortamı	Gaz çıkışı (outgassing), Algılayıcıların kirlenmesi
Radyasyon ortamı	Enerji birikmesi, Malzemelerde hasar/performans kaybı, Tekil olay etkileri
Mikro-göktaşları ve uzay çöpleri ortamı	Çukur oluşumu, Yerel plazma oluşumu, Yönelim kaybı, iç ve/veya dış duvarların delinmesi, Basınçlı birimlerin patlaması, Kalıcı yapısal hasar oluşumu

Bu literatür bulguları birlikte ele alındığında, yörüngenin yalnızca görevin kapsama alanını ve yer istasyonları ile olan iletişim geometrisini değil aynı zamanda uydunun maruz kalacağı vakum, termal çevrim, radyasyon, plazma, nötral atmosfer ve parçacık ortamı gibi çevresel koşulları da belirlediği açıkça görülmektedir. Gündoğdu, bununla birlikte fırlatma evrelerinde ortaya çıkan statik, dinamik ve şok yüklerinin de yapısal tasarım açısından kritik olduğunu vurgulamakta; söz konusu yük türleri ve fırlatma sürecindeki değişimleri Şekil 2.6'da şematik olarak sunmaktadır. Bu çerçevede seçilen yörünge irtifası ve eğimi, yapısal tasarım gereksinimlerinin, doğal frekans sınırlarının, rastgele titreşim ve şok yük seviyelerinin ve uzay ortamına özgü ısıl ve malzeme gereksinimlerinin tanımlanmasında temel bir girdi niteliği kazanmaktadır [7-11]. Bu tez çalışmasında söz konusu yörünge ortam tasarım ilişkisi, LEO yörüngesinde görev yapacak bir uyduya ait tekil bir ekipmanın kukla modeli temelinde ele alınacaktır. İzleyen bölümlerde ise yapısal yeterlilik modeli kavramı, kukla ekipman yaklaşımı, sonlu elemanlar yöntemi ve çevresel test süreçleri ayrıntılı olarak incelenecektir.

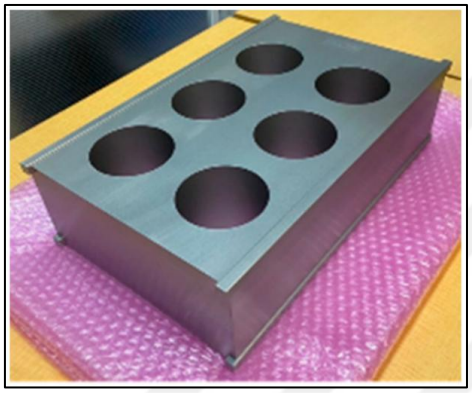


Şekil 2.6. Fırlatma evrelerinde ortaya çıkan yükler [7]

2.2. Yapısal Yeterlilik Modelleri ve Kukla Ekipman Yaklaşımı

Uzay projelerinde yapısal tasarımın doğrulanması, farklı donanım modelleri üzerinde gerçekleştirilen mekanik testlerin hiyerarşik bir yapı içinde kurgulanmasıyla sağlanmaktadır. ECSS standardı, mühendislik modeli (EM), yeterlilik modeli (QM/EQM), uçuş modeli (FM) ve proto-uçuş (protoflight modeli, PFM) gibi donanım seviyelerini tanımlamakta, bunun yanı sıra yapısal model (SM) ve yapısal termal modelin (STM) erken aşama mekanik doğrulama amacıyla kullanılmasını önermektedir [4]. İlgili ECSS el kitabında, yeterlilik testlerinin çoğunlukla SM veya STM üzerinde yürütüldüğü, uçuş

donanımının ise kabul düzeylerinde (acceptance) test edilerek doğrulandığı belirtilmektedir [13]. Okuyama ve çalışma arkadaşları, Ten-Koh uydularını örnek alarak ekmek tahtası modeli (BBM), mühendislik modeli (EM) ve uçuş modelinin (FM) görev ve işlevlerini ayrıntılı biçimde irdelemekte, her model seviyesinde sonlu eleman analizlerinden yararlanılarak dayanım ve rijitlik gereksinimlerinin karşılandığını göstermektedir; benzer bir yaklaşımla oluşturulan kukla uydunun genel görünümü ise Şekil 2.7'de sunulmaktadır [14]. Süer, TÜRKSAT 3USAT projesi kapsamında EM (Mühendislik Modeli) ve FM modellerine uygulanan titreşim test seviyelerini ve bu modellerin tasarım döngüsündeki işlevlerini detaylandırarak benzer bir doğrulama şeması sunmaktadır [15].

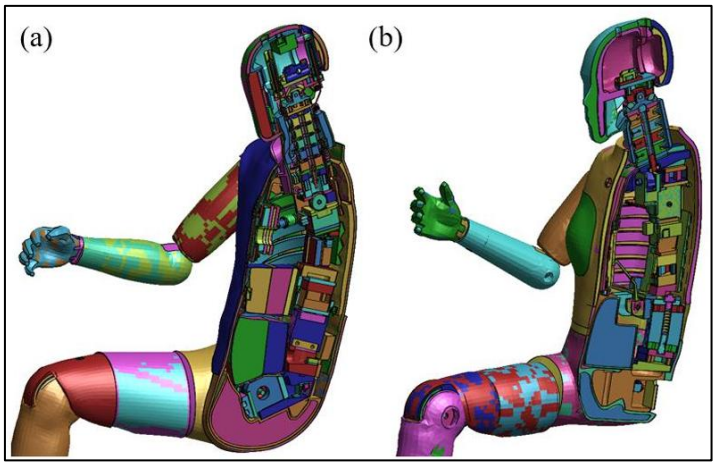


Şekil 2.7. Kukla uydunun görünümü [14]

Yapısal yeterlilik çoğunlukla tasarım limit yüklerinin üzerine belirli yeterlilik katsayılarının eklenmesiyle tanımlanan seviye değerlerinde gerçekleştirilen statik, sinüs ve rastgele titreşim testleri aracılığıyla gösterilmektedir. ECSS el kitabında yük analizinin tasarım ve test yüklerinin belirlenmesindeki kilit rolü vurgulanmakta, yeterlilik (qualification) ve kabul (acceptance) test seviyelerinin tasarım limit yüklerine uygulanacak katsayılara göre tanımlandığı ve kullanılan prototip ile proto-uçuş (protoflight) yaklaşımının bu seviyeleri doğrudan etkilediği ifade edilmektedir [5]. Aynı dokümanda, testlerin prototip yapısal model ya da yapısal model (structural model) üzerinde görece yüksek seviyelerde, uçuş donanımı üzerinde ise daha düşük kabul seviyelerinde yürütülmesi önerilmektedir [13]. Elektronik kart düzeyi için gerçekleştirilen bir çalışmada proto-uçuş ya da yeterlilik düzeyi ile kabul ya da fırlatma (launch) düzeyi için tanımlanan rastgele titreşim seviyeleri NASA Goddard Çevresel Doğrulama Standardına (NASA GEVS) göre belirlenmiş, yüksek güç tayf yoğunluğu (power spectral density) seviyelerinde uygulanan testlerin kart düzeyindeki yorulma davranışı ve lehim eklemi dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir [16]. Küp

uydu yapıları özelinde gerçekleştirilen çalışmalarda ise yeterlilik, proto-uçuş ve uçuş test seviyeleri için kullanılan sinüs ve rastgele titreşim profilleri karşılaştırılmış, küçük uydular için de ECSS ve GEVS gereklerini karşılayan mekanik test stratejilerinin uygulanabileceği ortaya konmuştur [2]. Abdelal ve çalışma arkadaşları, küçük uydu yapıları için dayanım maketi olarak adlandırdıkları yapısal maket üzerinde statik santrifüj, rastgele titreşim ve modal testlerden oluşan kapsamlı bir yeterlilik programı önermekte ve bu sayede hem nakliye hem de fırlatma koşullarının tek bir yapı üzerinde temsil edilebildiğini göstermektedir [6].

Yapısal yeterlilik modeli kavramının yalnızca uzay uygulamaları ile sınırlı olmadığı, farklı dinamik yük durumlarında "insan" ya da "ekipman" temsilcisi kuklaların da benzer bir anlayışla modellendiği görülmektedir; bu kapsamda kara aracı çarpışma senaryolarında kullanılan erkek ve kadın THOR antropometrik mankenlerine ait kesit görünümleri Şekil 2.8'de sunulmaktadır. Pepeç, kara aracı titreşim ve çarpışma senaryolarında kullanılan antropometrik mankenlerin (anthropometric dummy) yani çarpışma testi mankenlerinin (crash test dummy) sonlu elemanlar modellerini (finite element model) inceleyerek, serbestlik derecesi yüksek bu kuklaların kütle dağılımı, eklem rijitlikleri ve temas yüzeyleri doğru biçimde temsil edildiğinde, insan vücudunun ivme ve gerinim yanıtlarının oldukça başarılı şekilde taklit edilebildiğini göstermektedir. Bu tür çalışmalar, kukla modellerin ister bir insan ister bir uydu alt sistemi temsil etsin, dinamik tepkiyi gerçekçi biçimde yansıtabilmesi için yalnızca kütle değerinin değil aynı zamanda kütle merkezi (center of mass), atalet momentleri (moments of inertia) ve bağlantı koşullarının (boundary conditions) birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Kademeli model felsefesinin uzay sistemlerine uygulanmasında çoklu fiziksel model (multi physical model) kullanımı ile iç bileşenlerin kütle simülatörleri (mass simulator) aracılığıyla temsil edilmesi de yaygın bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır [17].



Şekil 2.8. (a) Erkek THOR mankeni, (b) kadın mankeni kesitleri [17]

Yapısal model ile kukla ya da dublör ekipman kavramları, uçuş donanımını doğrudan kullanmadan gerçek yapı ve ekipmanın kütlesini, kütle merkezini ve dinamik özelliklerini temsil ederek yapısal doğrulama yapılmasına olanak sağlayan önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır. ECSS dokümanında, uzay aracı seviyesindeki statik ve dinamik testlerde faydalı yüklerin ve bazı ekipmanların test sayısını ve karmaşıklığını azaltmak amacıyla kukla (dummy) veya kütle dublörü (mass dummy) ile temsil edilebileceği, ancak bu dublörlerin gerçek ekipmanın yalnızca kütlesini değil aynı zamanda kütle merkezini ve rijitlik özelliklerini de yeterli doğrulukta taklit etmesi gerektiği belirtilmektedir [5]. ECSS standardı, ekipman düzeyindeki testler öncesinde kütle, kütle merkezi ve atalet momentlerinin belirli toleranslar içinde ölçülmesini zorunlu kılmakta ve bu bilgilerin hem sonlu eleman modellerinin hem de yapısal dublörlerin doğrulanmasında kullanılmasını şart koşmaktadır [4].

Literatürde, kukla uydu (dummy satellite), dayanım maketi (strength mock-up) ve dublör kütle (mass dummy) kavramlarının farklı ölçek ve konfigürasyonlarda uygulandığı görülmekte olup Ariane 5 fırlatıcısına entegrasyon sırasında kullanılan MAQSAT serisi kukla uydulara ait görünümler Şekil 2.9'da sunulmaktadır. Ariane 5 için geliştirilen MAQSAT serisi kukla uydular, tipik haberleşme uydularının kütle, kütle merkezi ve temel mod frekanslarını temsil edecek şekilde tasarlanmış; ek kütleler yardımıyla dinamik özellikleri uçuş donanımına benzetilmiştir [18]. Benzer şekilde, Ten-Koh 2 misyonu için üretilen W6U kukla uydu, uçuş modelinin dış boyutlarını ve ray arayüzlerini koruyacak şekilde tamamen alüminyumdan imal edilmiş; bu yapı üzerinde gerçekleştirilen titreşim testleri ile uzunlamasına doğal frekansların basit yöntemlerle belirlenmesi hedeflenmiştir

[14]. Abdelal ve arkadaşları, küçük uydu dayanım maketi yapısının geometri, malzeme ve ekipman yerleşimi bakımından uçuş modeli (flight model) ile uyumlu olacak biçimde tasarlandığını belirtmektedir. Çalışmada yük taşıyan elemanlar ile hassas ekipman dublörlerinin, kütle ve kütle merkezi açısından özgün bileşenleri temsil edecek şekilde modellendiği ifade edilmektedir [6].



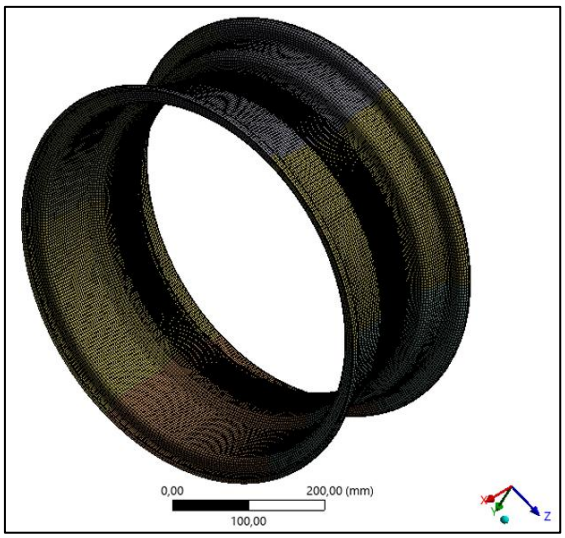
Şekil 2.9. Ariane 502 (solda), fırlatıcıya entegrasyon sırasında MAQSATB (ortada) ve MAQSATH'ın kukla görev yükü ile [18]

Bu tezde ele alınan kukla ekipman yaklaşımı, söz konusu kukla uydu ve yapısal model felsefesiyle aynı doğrulama mantığını paylaşmaktadır. Gerçek ekipmanın üretiminin uzun sürmesi, üzerindeki elektronik bileşenlerin maliyetinin ve test riskinin yüksek olması gibi nedenlerle, uçuş donanımını kütle, kütle merkezi, atalet momentleri ve dış geometri bakımından temsil eden tek parça bir kukla ekipmanın tasarlanması tercih edilmektedir. Bu kukla ekipmanın gerçek ekipmanla aynı taban arayüzlerine sahip olması, ECSS'de tanımlanan kütle-atalet toleranslarını karşılaması ve yapısal yeterlilik modelinde doğru yük yollarını oluşturması hedeflenmektedir [4, 5]. Böylece yeterlilik seviyesindeki rastgele titreşim testleri gerçek ekipman yerine kukla ekipmanla emniyetli bir biçimde icra

edilebilmekte; elde edilen test sonuçları sonlu eleman modeli ve yapısal gereksinimler ile karşılaştırılarak, gerçek ekipman entegrasyonu öncesinde güvenilir bir doğrulama basamağı yaratılmaktadır.

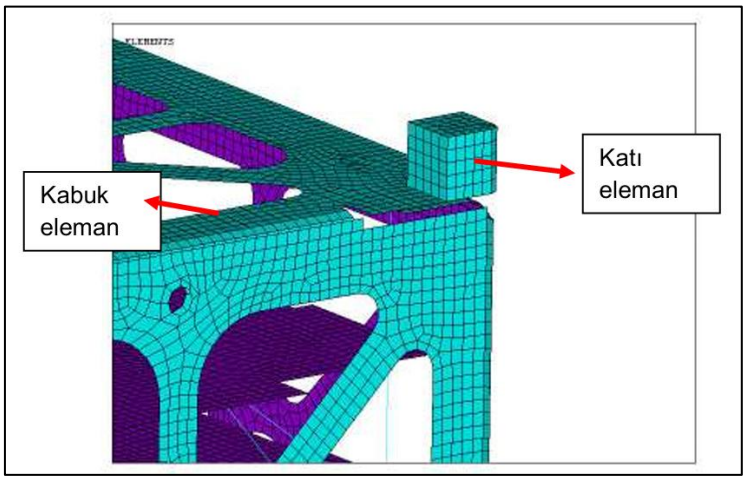
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Model Doğrulama

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), yapısal gerilme, statik ve dinamik titreşim, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği gibi birçok mühendislik problemini sayısal olarak çözmek için kullanılan en temel yöntemlerden biridir. Yöntem, önce fiziksel sistemin matematiksel modelinin kurulmasına, daha sonra problem alanının sonlu sayıda elemana ayrılarak her bir elemanın uygun şekil fonksiyonları ve malzeme özellikleriyle temsil edilmesine dayanır [19]. Abdelal ve çalışma arkadaşları, uydu yapılarının tasarım, test ve imalat süreçlerinde sonlu eleman analizlerinin kritik bir rol oynadığını; küresel ve alt sistem düzeyindeki statik, modal ve rastgele titreşim analizlerinin, doğru tanımlanmış bir SEY modeli gerektirdiğini vurgulamaktadır [6]. Kessler, artan alt sistem sayısı ve arayüz karmaşıklığı nedeniyle özellikle küçük uydularda dijital modelleme ve sonlu eleman analizinin tasarım döngüsünün merkezine yerleştiğini belirtmektedir [20]. Kose, ticari araç jantlarında ağ yapısındaki eleman sayısından bağımsızlık koşulunu sağlamak için farklı eleman sayılarıyla analizler yürütmüş; jant üzerinde oluşturulan örnek mesh yapısı Şekil 2.10'da gösterilirken, %1'in altında farkla ağ bağımsızlığının ve %6,71 fark ile fiziksel radyal yorulma testi sonuçlarıyla doğrulamanın sağlanabildiğini göstermiştir [21].



Şekil 2.10. Jant üzerinde mesh yapısı [21]

Uydu ve küp uydu yapılarının sonlu elemanla modellenmesine yönelik tez çalışmalarında benzer modelleme stratejileri izlendiği görülmektedir; bu kapsamda kabuk ve katı eleman tiplerinin temel gösterimi Şekil 2.11'de şematik olarak sunulmaktadır. Gündoğdu, PSAT-1 uydusunu kabuk, katı, çubuk, kütle ve çok noktalı rijitlik elemanları (SHELL181, SOLID185, BEAM189, MASS21, MPC184) kullanarak modellemiş; on binlerce elemandan oluşan bu model üzerinde modal analiz yaparak fırlatma sisteminin talep ettiği 90 Hz'in üzerindeki doğal frekans gereksinimini sağlamaya çalışmıştır [7]. Süer ise ISIS 3U küp uydu yapısı için yüz binlerce eleman ve bir milyonu aşkın düğüm içeren ayrıntılı bir model oluşturmuş; malzeme atamaları, bağlama bölgeleri ve et kalınlıklarının geometrik gerçekle uyumlu tanımlandığını ve modelin kütle özelliklerinin uçuş modeliyle eşleştirildiğini belirtmiştir [15]. Toygar, bir haberleşme uydusuna ait genel sonlu eleman modelinde servis ve haberleşme modüllerinin, merkezi silindirin, güneş panelleri ile reflektörlerin bir araya getirilmesi sonucunda yaklaşık 800 000 eleman ve 900 000 düğüm içeren küresel bir model oluşturulduğunu belirtmektedir. Söz konusu modelde panellerin büyük ölçüde kabuk elemanlarla, yer yer ise katı elemanlarla temsil edildiği ve bu panellere monte edilen ekipmanların yapısal olmayan kütle (non structural mass) yaklaşımı kullanılarak panellere dağıtıldığı ifade edilmektedir [22].

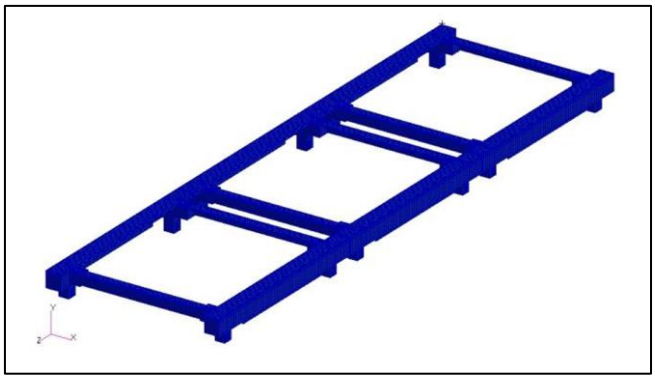


Şekil 2.11. Katı ve kabuk eleman gösterimi [7]

Eleman türü ve ağ inceliği, sonlu eleman modellerinin doğruluğunda belirleyici unsurlar arasındadır. Jovanovic, SPARTAN platformunun modellenmesinde 0B, 1B, 2B ve 3B elemanlar kullanarak karma geometriyi temsil etmiş; üç boyutlu parçalar için CTETRA ve CHEXA, ince cidarlı bileşenler için CQUAD4 ve CTRIA3 kabuk elemanların tercih edildiğini ayrıntılı biçimde açıklamıştır [23]. Seara de Sá, uydu benzeri bir yapının detaylı

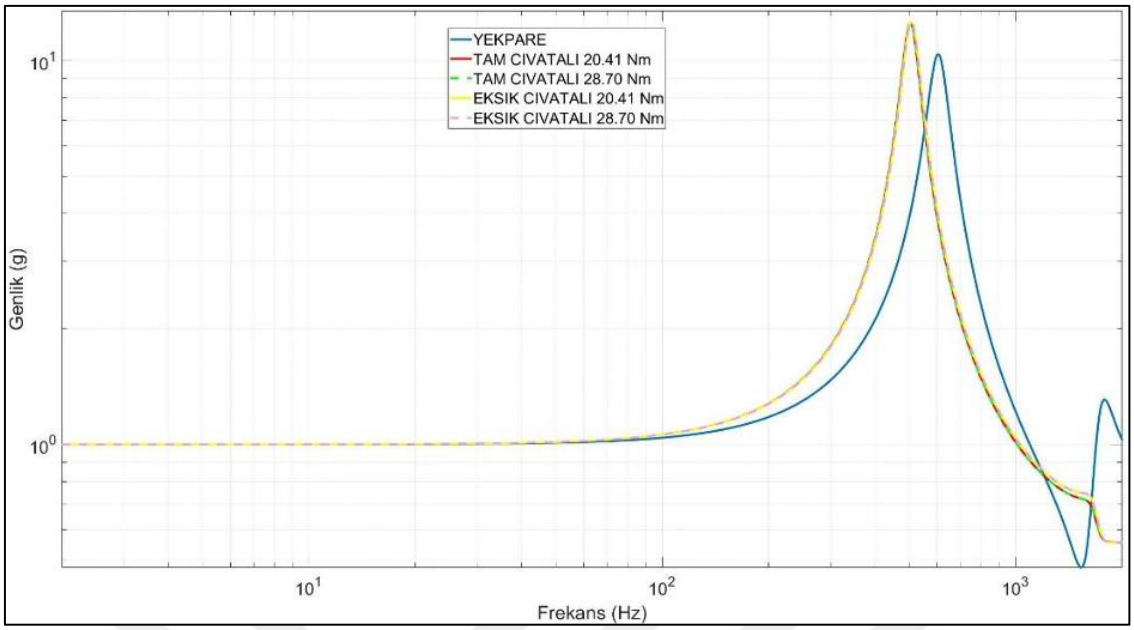
SEY modelinde katı eleman olarak CTETRA/CHEXA, levha benzeri bölgelerde CQUAD4/CTRIA3 kullanıldığını, düşük mertebeli CTETRA4 elemanların aşırı rijitlik nedeniyle kaçınılması gerektiğini belirtmektedir [24]. Küçükbayram, şok testi plakalarının modellenmesinde kabuk ve katı elemanların modal cevaplarını karşılaştırarak, lineer ve karesel elemanların SRS (Şok Cevap Spektrumu) sonuçlarına etkisini incelemiş; dalga boyuna göre eleman boyutu seçiminde sekiz ve üzeri eleman/dalga boyu kullanımının uygun frekans çözünürlüğü sağladığını göstermiştir [25].

Uydu sistemleri için oluşturulan küresel sonlu eleman modellerinin tipik özellikleri, Toygar tarafından geliştirilen bir haberleşme uydusu genel sonlu eleman modeli örneği üzerinden ayrıntılı biçimde ortaya konmaktadır. Bu çalışmada servis ve haberleşme modülleri, merkezi silindir, güneş panelleri ve reflektörler bir araya getirilerek yaklaşık 800 000 eleman ile 900 000 düğümden oluşan bir Küresel Sonlu Eleman Modeli oluşturulmuş ve bu model Küresel Sonlu Eleman Modeli (Global Finite Element Model, GFEM) olarak adlandırılmıştır. Birincil yük taşıyıcı yapıların büyük çoğunluğu kabuk elemanlarla, belirli kritik bölgeler ise katı elemanlarla modellenmiş, panellere entegre ekipmanlar yapısal olmayan kütle yaklaşımıyla ilgili panellere dağıtılmıştır. Paneller arasındaki ve ekipman panel arayüzlerindeki bağlantılar, rijit ve yarı rijit karakterli RBE2, CBUSH ve CBAR türü elemanlarla temsil edilmiş, model doğrulama çalışmaları kapsamında eleman kalite kriterleri, mükerrer eleman ve serbest kenar denetimleri gerçekleştirilmiş ve sonuçta modelin toplam kütlesi ile kütle merkezi bilgilerinin fırlatıcı tolerans aralıkları içinde kalması sağlanmıştır [22]. Benzer biçimde Süer, ISIS 3U yapısı için oluşturduğu modelde bağlama bölgelerinin konik vida yuvalarına kadar ayrıntılı temsil edildiğini, eleman boyutunun et kalınlığı ile tutarlı seçildiğini ve modelin kütle özelliklerinin uçuş modelini temsil edecek şekilde ayarlandığını, ana panel üzerinde kullanılan eleman ağına ilişkin genel görünüşün ise Şekil 2.12’de sunulduğunu ifade etmektedir [15].

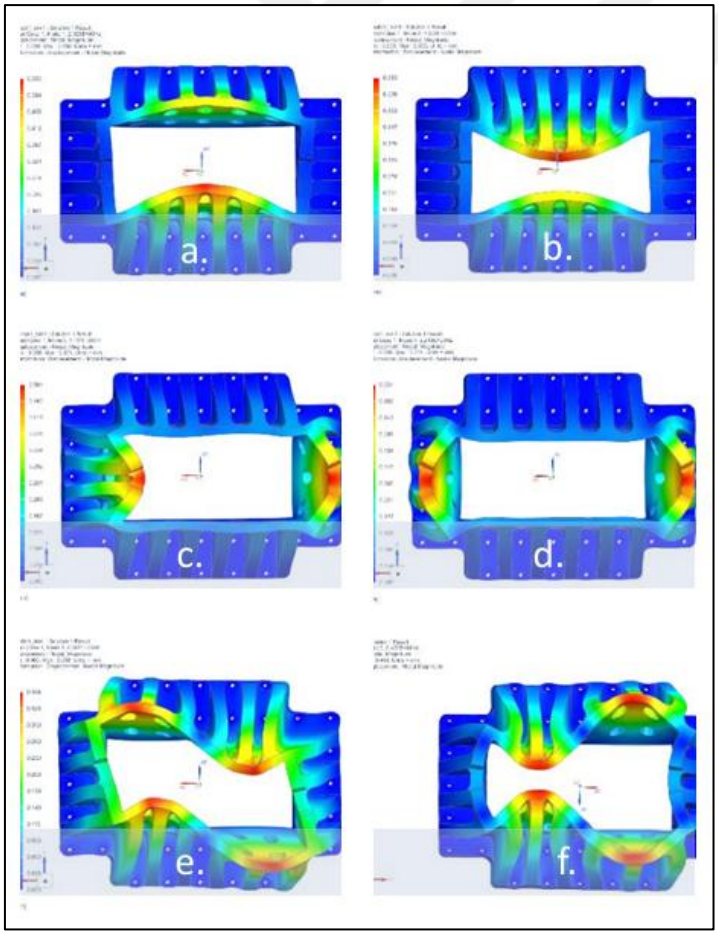


Şekil 2.12. Ana panel eleman ağı genel görünüş [15]

Alt sistem ve ekipman düzeyinde yapılan sonlu eleman çalışmaları, bu tezde incelenen kukla ekipman problemiyle özellikle ilişkilidir. Arslan, kablo yükseltme braketinin Siemens NX ortamında oluşturulan sonlu eleman modelinde 0B, 1B ve 3B elemanları bir arada kullanmış; kablo demeti kütlesini CONM2 kütle elemanlarıyla, kablo-braket etkileşimini ise RBE2 tipi rijit bağlantılarla temsil etmiştir. Karmaşık geometri nedeniyle CTET10 ikinci mertebe tetra elemanlar tercih edilmiş; 0,55 mm mertebesindeki eleman boyutuyla yaklaşık 120 000 eleman ve 200 000 düğümlü ayrıntılı bir model elde edilmiştir [9]. Yıldırım ve arkadaşları ve Özkan gibi çalışmalarda da fikstürler ve cıvatalı kirişler için oluşturulan SEY modelleri üzerinden transfer fonksiyonları, mod şekilleri ve bağlantı davranışları analiz edilerek, test-analiz korelasyonu amaçlı ele alınmış; örnek olarak L tipi bir fikstür için X yönünde elde edilen transfer fonksiyonu Şekil 2.13’te, aynı fikstüre ait ilk altı mod şekli ise Şekil 2.14’te sunulmuştur [26, 27].

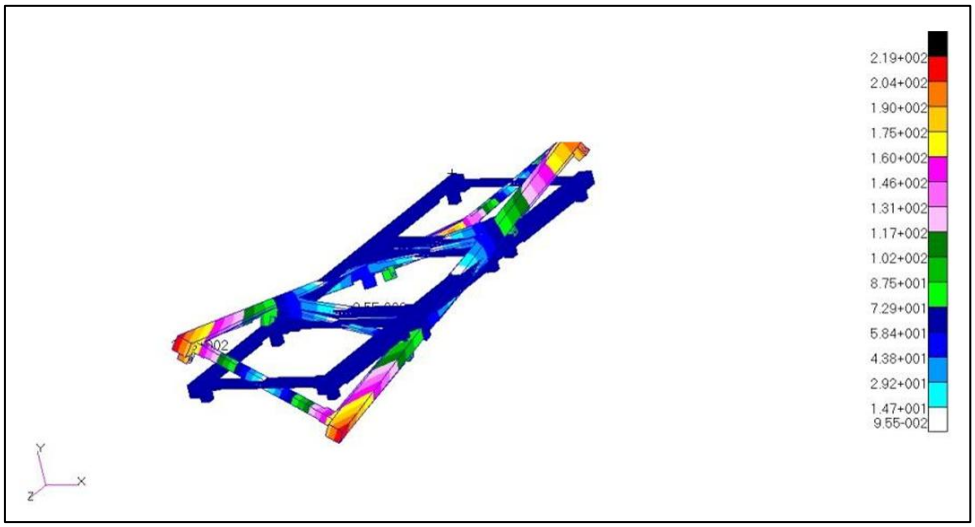


Şekil 2.13. L tipi fikstürü X yönünde yapılan analizin transfer fonksiyonu [27]



Şekil 2.14. Fikstür mod şekilleri; a. Mod-1, b. Mod-2, c. Mod-3, d. Mod-4, e. Mod-5, f. Mod-6 [26]

Sonlu eleman modelinin doğrulanması, yalnızca geometrik ve malzeme tanımlarının denetlenmesini değil, modelin dinamik davranışının deneysel ölçümlerle ne ölçüde uyumlu olduğunun ortaya konmasını da amaçlamaktadır. Abdelal ve arkadaşları, uydu yapılarının nitelendirme testlerinde elde edilen rastgele titreşim ve modal verilerin sonlu eleman dayanım modelinin doğrulanması ile gerektiğinde model varsayımlarının düzeltilmesi için kullanıldığını belirtmekte, ayrıca farklı malzeme modellerinin, bağlantı rijitliklerinin ve imalat kaynaklı iç gerilmelerin doğal frekanslar ile mod şekilleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır [6]. Menteş, ürettiği küp uyduya uygulanan titreşim testlerinden elde edilen sonuçları mekanik analizlerle karşılaştırarak, sonlu eleman modelinin fırlatma aracı gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir [11]. Süer de, ISIS 3U gövdesi için yürüttüğü modal test ve SEY modal analizleri arasında frekans ve mod şekli açısından yeterli uyum sağlandığında model doğrulama aşamasını tamamlanmış saymakta, bu kapsamda ana panelin birinci mod şekli Şekil 2.15'te örnek olarak sunulmaktadır [15]. ECSS, yapısal dinamik matematiksel modellerin deneysel modal veriler kullanılarak mutlaka doğrulanması gerektiğini belirtmekte ve model ile ölçüm arasındaki korelasyonun belirli sınırlar içinde kalması durumunda, söz konusu modellerin uçuş yüklerinin hesaplanması ve ilgili yapısal analizlerin yürütülmesi için güvenle kullanılabileceğini ifade etmektedir [5].

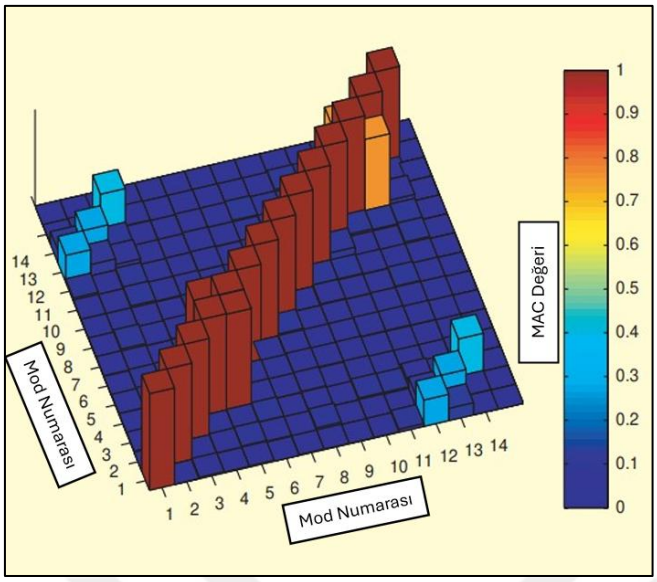


Şekil 2.15. Ana panel 1. mod [15]

Model doğrulama kavramı, sonlu eleman modelinin yalnızca geometrik ve malzeme tanımlarının değil, dinamik davranışının da gerçek yapıyı ne ölçüde temsil ettiğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Abdelal ve çalışma arkadaşları, uydu yapıları için yürütülen

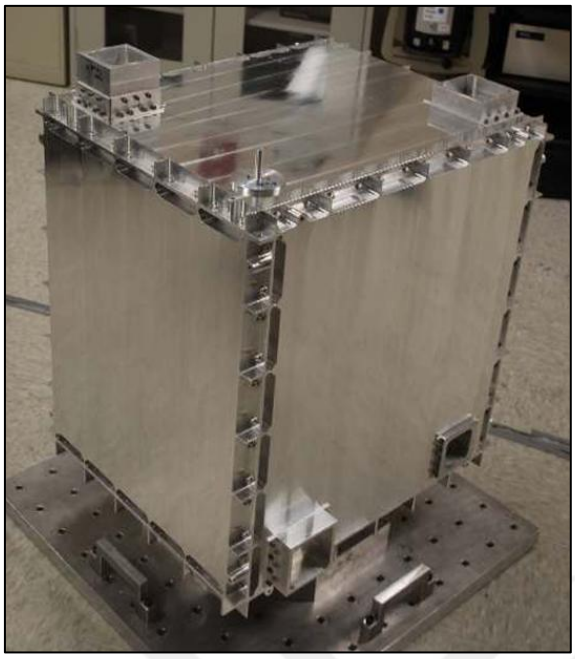
nitelendirme testleri kapsamında rastgele titreşim ve modal testlerden elde edilen verilerin, sonlu eleman dayanım modelinin doğrulanması ve gerekiyorsa model varsayımlarının düzeltilmesi için kullanıldığını; ilk iterasyonda analitik ve deneysel modal sonuçlar arasında farklar oluşmasının, malzeme modelleri, bağlantı rijitlikleri ve imalat kaynaklı iç gerilmeler gibi belirsizliklerden kaynaklanabildiğini ifade etmektedir [6]. Küp Uydu literatüründe de benzer bir yaklaşım izlenmekte; Menteş, ürettiği örnek uyduya uygulanan titreşim testlerinden elde edilen sonuçların mekanik analizlerle karşılaştırılması yoluyla sonlu eleman modelinin doğrulandığını, böylelikle yapının fırlatma aracı gereksinimlerini karşıladığının ortaya konulduğunu belirtmektedir [11]. Süer'in ISIS 3U yapısı üzerinde gerçekleştirdiği modal testler ve sonlu eleman modal analizleri de adım adım karşılaştırılmış; frekans ve mod şekillerinin tatmin edici uyuma ulaştığı nokta, model doğrulama aşamasının tamamlanması için ölçüt olarak alınmıştır [15].

Sonlu eleman modelinin deneysel verilerle karşılaştırılması sürecinde, test-analiz korelasyonunu nicel olarak ifade eden çeşitli kriterler kullanılmaktadır. MAC, mod şekillerinin istatistiksel tutarlılığını inceleyen ve 0 ile 1 arasında değer alan en yaygın göstergelerden biridir. Vardallı, MAC'in farklı sonlu eleman modelleri ile deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında, özellikle uçak ve benzeri karmaşık sistemlerin model doğrulama süreçlerinde sıklıkla kullanıldığını; değerin 1'e yakın olmasının mod şekillerinin yüksek korelasyonunu, 0'a yakın olmasının ise düşük benzerliği ifade ettiğini vurgulamakta ve MAC matrisindeki değerlerin üç boyutlu örnek gösterimini Şekil 2.16'da sunmaktadır [28]. Uzay yapıları bağlamında Igolkin ve çalışma arkadaşları, bir uzaktan algılama teleskobu çerçeve maketinin dinamik özelliklerini hem deneysel hem de sonlu eleman analizleriyle incelemiş; doğal frekanslarda kayda değer sapmalar tespit ederek mevcut modelin ayarlanması gerektiği sonucuna varmış ve korelasyon değerlendirmesi için COMAC (Koordinat Modal Güvence Kriteri), MAC, CSAC (Çip ölçekli atomik saat) ve CSF gibi hem modal hem de frekans cevap fonksiyonu (FRF) tabanlı kriterleri birlikte kullanmışlardır [29]. Bu tür çalışmalar, model doğrulamanın yalnızca doğal frekans farklarına bakılarak değil, mod şekli benzerliği ve frekans cevabının tamamı üzerinden yapılması gerektiğini göstermektedir.



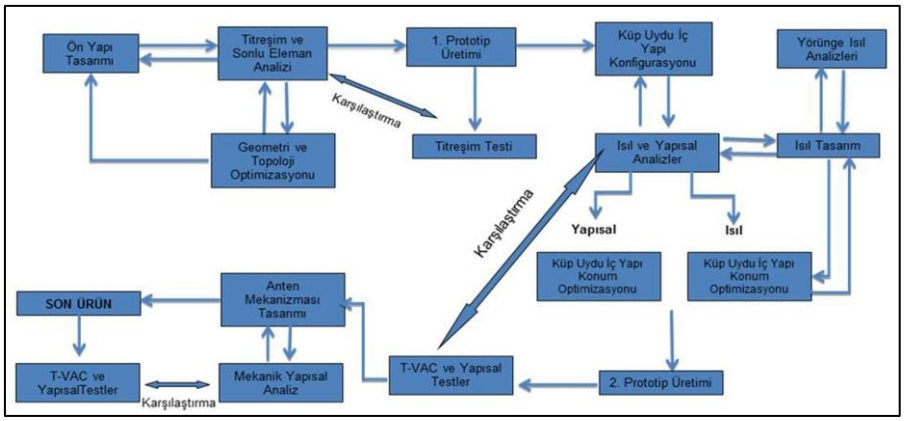
Şekil 2.16. MAC matrisindeki MAC değerlerinin örnek 3B gösterimi [28]

Model güncelleme ve sonlu eleman parametrelerinin test verilerine göre ayarlanması da literatürde geniş yer tutmaktadır. Doupe, FalconSAT 5 uydusunun yapısal mühendislik modeline ait sonlu eleman modelinin, yoğun modal analiz verileri kullanılarak optimize edilmesine odaklanmış; geometrik olarak karmaşık uydular için dinamik olarak doğru modeller oluşturmanın güçlüğüne dikkat çekmiş ve doğal frekans ve mod şekillerindeki sapmaların, malzeme ve bağlantı parametrelerinin ayarlanması yoluyla azaltılabileceğini göstermekte, söz konusu yapısal mühendislik modelini ise Şekil 2.17'de örnek olarak sunmaktadır [30]. Benjamin, kompozit plak örneği üzerinden modal veriye dayalı sonlu eleman model güncellemesi konusunu matematiksel açıdan incelemektedir. Çalışmada, küresel kütle ve rijitlik matrislerinin eleman düzeyinde ayarlanmasıyla doğal frekanslar ve mod şekilleri bakımından daha iyi bir uyumun elde edilebildiği, bu süreçte hedef fonksiyonun tanımlanmasında bir ölçüt olarak MAC kullanılabildiği ortaya konmaktadır [31]. ECSS el kitabında, yapısal dinamik matematiksel modellerin deneysel modal verilerle mutlaka doğrulanması gerektiği belirtilmekte, test ile analiz arasındaki korelasyonun kabul edilebilir sınırlar içinde olması durumunda bu modellerin uçuş yüklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılabileceği ifade edilmektedir. Buna karşılık korelasyonun istenen düzeyin altında kalması hâlinde model faktörleri ile dinamik değişkenlik katsayılarının dikkate alınması ve buna bağlı olarak modelde ve gerekli görülen durumlarda tasarımda revizyona gidilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [5].



Şekil 2.17. FalconSAT-5 Yapısal Mühendislik Modeli II [30]

Küp Uydu ve küçük uydu çalışmalarında, sonlu eleman yöntemi ve model doğrulama adımları genellikle paylaşılan bir metodoloji içinde ele alınmakta olup bu genel tasarım ve doğrulama akışı Süer tarafından Şekil 2.18'de şematik olarak sunulmaktadır. Süer'in ISIS 3U yapısı, Gündoğdu'nun pSAT-1 yapısı ve Menteş'in örnek uydu çalışması; önce CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) temelli ayrıntılı bir sonlu eleman modelinin oluşturulduğunu, ardından modal ve rastgele titreşim analizlerinin yürütüldüğünü, son aşamada ise laboratuvarda gerçekleştirilen modal ve rastgele titreşim testlerinden elde edilen doğal frekans, mod şekli ve genlik değerlerinin analiz sonuçları ile karşılaştırıldığını göstermektedir [7], [11], [15]. ECSS kılavuzları da, bu yaklaşımı destekleyecek şekilde, sonlu eleman modellerinin karmaşıklığının test programı ile uyumlu olmasını, model doğrulama için uygun deneysel konfigürasyonların seçilmesini ve korelasyon sonuçlarına bağlı olarak model faktörlerinin belirlenmesini önermektedir [5]. Bu tez çalışmasında kullanılacak kukla ekipman sonlu eleman modeli ve buna ilişkin modal-rastgele titreşim analizlerinin, literatürde sunulan bu modelleme ve doğrulama çerçevesi ile uyumlu şekilde kurgulanması hedeflenmektedir.



Şekil 2.18. Tasarım süreci şeması [15]

2.4. Modal Analiz ve Test-Analiz Korelasyonu

Modal analiz, bir yapının doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını belirleyerek dinamik karakteristiğini tanımlayan temel yöntemlerden biridir. Öztürk, mekanik sistemlerin serbest titreşim davranışının kütle ve rijitlik matrislerine dayalı bir özdeğer probleminin çözümüyle elde edildiğini; doğal frekans ve mod şekillerinin hem analitik hem deneysel modal analizlerde en önemli çıktılar olduğunu belirtmektedir [32]. Demir, darbe ve titreşim yüklerine maruz kalan yapıların güvenli tasarımı için modal parametrelerin doğru belirlenmemesi durumunda, dayanım değerlendirmesi ve yorulma ömrü tahmininde ciddi sapmalar oluşabileceğini vurgulamaktadır [33]. Uzay yapıları özelinde Abdelal ve arkadaşları, sonlu eleman tabanlı modal analizlerin, fırlatma ve uzay ortamında maruz kalınacak dinamik yüklerin değerlendirilmesi açısından kritik bir araç olduğunu ifade etmektedir. Çalışmada bu analizlerin yalnızca dinamik yüklerin öngörülmesi için değil, aynı zamanda rastgele titreşim ve şok analizlerinde kullanılacak indirgenmiş modellerin oluşturulması ile yapısal test seviyelerinin tanımlanmasında da belirleyici rol oynadığı vurgulanmakta, böylece tasarım ve doğrulama süreçlerinin daha güvenilir ve izlenebilir bir temele oturtulabileceği ortaya konmaktadır [6].

Fırlatma sürecinde fırlatıcı ile uydu arasında rezonans oluşmaması için belirli doğal frekans sınırlarının sağlanması, hemen tüm uydu tasarım çalışmalarında temel bir gereksinimdir. ECSS, rastgele titreşim analizlerine başlamadan önce serbest veya uygun şekilde kısıtlanmış modal analiz yapılmasını, elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin fırlatıcı gereksinimleriyle karşılaştırılmasını ve bu sonuçların dinamik yük katsayılarının hesabında kullanılması gerektiğini belirtmektedir [5]. Gündoğdu, PSAT-1 için birinci doğal frekansın

90 Hz'in üzerinde tutulmasının fırlatma sistemiyle rezonans riskini azaltmak açısından kritik olduğunu göstermekte ve İTÜ pSAT-1 uydusuna ait temel yapısal gereksinimleri Çizelge 2.4'te özetlemektedir [7]. Menteş, farklı yapısal konfigürasyonlara sahip dört küp uydu modeli için serbest modal analizler gerçekleştirmekte ve ilk yanal ile eksenel mod frekanslarının sırasıyla 45 Hz ve 90 Hz sınır değerlerinin üzerinde kalacak biçimde tasarlandığını ortaya koymaktadır. Çalışmada örnek olarak birinci yanal modların yaklaşık 60 Hz civarında, birinci eksenel modların ise 170 Hz mertebesinde gerçekleştiği rapor edilmektedir [11]. Çam de mikro uydu gövdesi için temel yanal ve eksenel modları fırlatıcı sistemin kritik frekanslarından uzak tutarak, sinüs ve rastgele titreşim yükleri altında rezonans riskini azaltmayı hedeflediğini belirtmektedir [10]. Ekipman düzeyinde Arslan, kablo yükseltme braketi için yaptığı çalışmada birinci doğal frekansın 140 Hz'in üzerinde olmasını kabul kriteri olarak belirleyerek, fırlatma sırasında rezonans olasılığını sınırlandırmayı amaçlamıştır [9].

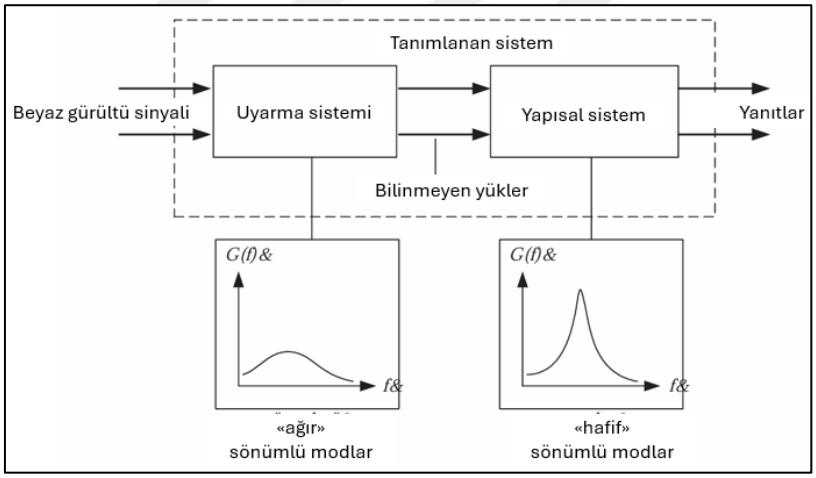
Çizelge 2.4. İTÜ pSAT-1 yapısal gereksinimleri [7]

Katılık	Eksenel: 90 Hz Yanal: 45 Hz
Sanki-statik yük faktörü	Eksenel: 11 g Yanal: +/- 6 g
Rastgele titreşim yükü	Doğal frekans değerleri belirlenip PSD bilgisi kullanılacaktır.

Modal analiz sonuçları, çoğu zaman rastgele titreşim ve sanki statik analizlerde kullanılacak bileşik yüklerin hesaplanmasında da doğrudan rol oynamaktadır. Gündoğdu, PSAT-1 gövdesi üzerinde gerçekleştirdiği modal analiz sonucunda elde ettiği mod şekilleri ve frekanslardan yararlanarak, PSLV fırlatıcısı için tanımlanan sanki statik ve rastgele yük faktörlerini bir arada kullanmıştır. Çalışmada her eksen için bileşik ivme yükleri hesaplanmış, bu ivme değerleri gerilme analizlerine giriş verisi olarak uygulanarak yapının fırlatma koşulları altındaki gerilme dağılımları değerlendirilmiştir [7]. Menteş, benzer şekilde küp uydu modelleri için yirmi dört farklı yükleme kombinasyonu tanımlamış ve bu yükleri modal analiz çıktıları ile ilişkilendirerek hem sanki statik hem de rastgele titreşim durumlarını temsil eden bileşik yükleri oluşturmuştur [11]. ECSS de modal kütle katılım

oranlarının ve mod şekillerinin, rastgele titreşim ortamında beklenen ivme ve gerilme tepkisinin hesaplanmasında kullanılması gerektiğini açıklamaktadır [5].

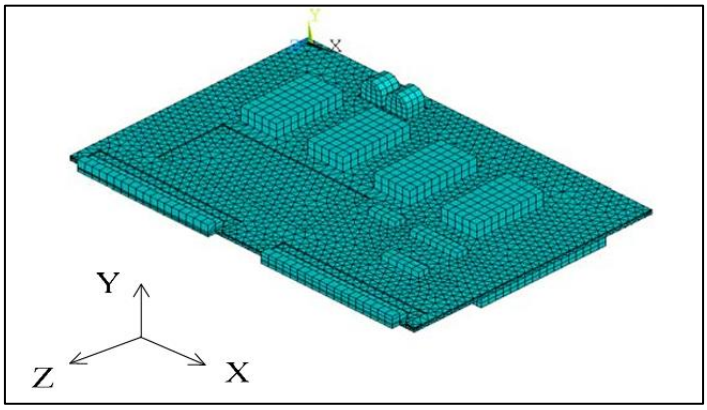
Deneysel modal analiz (Experimental Modal Analysis, EMA), analitik modal sonuçların doğrulanması ve model parametrelerinin güncellenmesi için kullanılan temel araçtır. Öztürk, deneysel modal analizde yapı üzerine uygulanan uyartıların (darbe, süpürülen sinüs ya da rastgele sinyal) ve buna karşılık ölçülen tepkilerin (ivme, hız veya yer değiştirme) birlikte değerlendirilmesiyle frekans cevabı fonksiyonlarının (FRF) elde edildiğini belirtmektedir. Çalışmada bu FRF'lerin analiz edilmesi sonucunda doğal frekansların, sönüm oranlarının ve mod şekillerinin çıkarılabildiği ifade edilmektedir [32]. Montalvão, Maia ve Ribeiro, deneysel modal teknikleri detaylı olarak sınıflandırarak uyartım ve ölçüm noktası seçimi, veri toplama stratejileri ve FRF işlem adımlarını tanımlamakta; yalnızca yanıt verilerine dayalı modal analiz prensiplerini ise Şekil 2.19'da şematik olarak sunmaktadır [34]. Ibsen ve Liingaard, yanlış seçilen uyartım ve ölçüm noktalarının mod şekillerinin eksik uyarılmasına ve ölçümlerin gereğinden uzun sürmesine yol açarak veri kalitesini düşürebileceğini vurgulamaktadır [35].



Şekil 2.19. Yalnızca yanıt verilerine dayalı modal analiz prensipleri [34]

Uzay yapıları için gerçekleştirilen modal testler çoğunlukla modal inceleme (modal survey) olarak adlandırılmakta ve bu testler, fırlatma aracı ile uzay aracı arasındaki dinamik etkileşimin güvenli sınırlar içinde kalıp kalmadığının doğrulanması amacıyla uygulanmaktadır. Piatak ve çalışma arkadaşları, fırlatma aracı yapısı üzerinde gerçekleştirilen yapısal dinamik testleri ele aldıkları çalışmalarında, modal inceleme verilerinin fırlatma aracına ait sonlu eleman modelinin doğrulanması ve gerektiğinde

güncellenmesi için temel veri kaynağı niteliğinde olduğunu belirtmektedir. Ayrıca uçuş yüklerinin hesaplanmasında kullanılan yük analizi modellerinin, doğrudan bu modal inceleme sonuçları üzerine inşa edildiğini ve dolayısıyla söz konusu testlerin fırlatma aracı tasarımının yapısal güvenilirliği açısından kritik bir rol üstlendiğini vurgulamaktadır [36]. Sim ve arkadaşları, fırlatma sistemlerinin yapısal dinamik testlerinde geniş frekans aralıklarında çok noktalı uyartım ve ölçüm gereksinimi bulunduğunu; bu nedenle yüksek kanallı modal test sistemlerinin kullanıldığını ve elde edilen mod şekillerinin hem fırlatma aracı hem de yük için tanımlanan dinamik gereksinimlerin doğrulanmasında kritik rol oynadığını vurgulamaktadır [37]. Ekipman ve alt sistem ölçeğinde, Ren ve arkadaşları bir baskı devre kartının ANSYS ortamında oluşturulan sonlu eleman modal sonuçlarını deneysel modal analiz ile karşılaştırmış; çalışmada kullanılan baskı devre kartına ait sonlu eleman modeli Şekil 2.20'de sunulmakta olup, dört mod için doğal frekans farklarının %1,65-8,96 aralığında kaldığını ve bu doğruluk seviyesinin modelin mühendislik amaçlı kullanımına imkân tanıdığını rapor etmiştir [38]. Bilgili, elektrik motoru kapağına ait esnek gövde modelini, deneysel FRF ve doğal frekans sonuçları ile karşılaştırarak tüm modlarda %5'in altında hata elde etmiş ve bu sayede modelin çok cisimli dinamik simülasyonlar için güvenle kullanılabileceğini göstermiştir [39]. Küçük uydu literatüründe, Süer ISIS 3U yapısı için geliştirdiği sonlu eleman modelinin birinci doğal frekansını gövde iskeletinin modal testlerinden elde ettiği frekans ile karşılaştırmış; 276 Hz (analiz) ve 270 Hz (test) değerleri arasında yaklaşık %2,2'lik farkı yeterli görerek modeli doğrulamıştır [15]. Kaya ve Nalbant ise, Siemens NX ortamında modellenen bir titreşim test gerecinin modal analiz sonuçlarını, sarsıcı üzerinde gerçekleştirilen rezonans tarama testleri ile karşılaştırmış ve test tablasının uç bölgelerindeki ek salınımların analiz-test frekans farklarına etkisini tartışmıştır [40].



Şekil 2.20. PCB sonlu eleman modeli [38]

Test-analiz korelasyonunda en yaygın kullanılan ölçüt, Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) olup, mod şekilleri arasındaki benzerliği 0-1 aralığında nicel olarak ifade eder. Montalvao ve arkadaşları, MAC'in deneysel ve analitik mod şekilleri arasındaki küresel korelasyonu değerlendiren bir gösterge olduğunu; 1'e yakın değerlerin yüksek benzerlik, 0'a yakın değerlerin ise mod şekillerinin bağımsızlığını gösterdiğini açıklamaktadır [34]. Çalışmada, belirli koordinatlardaki yerel uyumu incelemek amacıyla Koordinat Modal Güvence Kriteri büyüklüğü tanımlanmış ve uyuşmazlık bölgelerinin tespiti için kullanılabileceği belirtilmiştir. Vardallı, uçak yapıları için yürütülen esneklik ve modal testlerde MAC değerlerinin belirli eşiklerin üzerinde olması durumunda korelasyonun yeterli kabul edildiğini; bu nedenle MAC'in uzay yapıları dâhil pek çok mühendislik uygulamasında standart bir metrik hâline geldiğini ifade etmektedir [28]. Igolkin ve arkadaşları, bir uzaktan algılama teleskobu çerçeve yapısı üzerinde yaptıkları çalışmada, MAC ve COMAC'e ek olarak Çip Ölçekli Atomik Saat (Chip-Scale Atomic Clock, CSAC) ve Çapraz İmza Ölçek Faktörü [Cross Signature Scale Factor, CSF) gibi frekans cevabı tabanlı ölçütleri kullanarak analiz-test uyumunu hem mod şekli hem FRF şeklinde değerlendirmiş; söz konusu yapı için hesaplanan COMAC kriteri değerlerini ise Çizelge 2.5'te sunmuştur [29]. Öztürk, model güncelleme çalışmasında modal güvence kriterine Mod Şekli Korelasyon Katsayısı (Modal Assurance Criterion, MAC) ek olarak frekans bölgesi güvence ölçütünü (Frequency Domain Assurance Criterion, FDAC) ve uyumsuzluk indisini (mis correlation index, MCI) içeren frekans cevabı fonksiyonu temelli ölçütlerden yararlanmış, bu sayede farklı frekans bantlarındaki uyumsuzluk bölgelerini tespit etmiş ve bu bölgelerde kütle ile rijitlik parametrelerini ayarlayarak korelasyonu iyileştirmiştir [32]. Özkan, cıvatalı kiriş deneylerinde doğal frekans farklarının bağıl yüzde hata olarak değerlendirilmesinin pratik bir korelasyon kriteri olduğunu; %5'in altında kalan farkların SEY modelinin mühendislik amaçlı kullanımına imkân verdiğini göstermektedir [27].

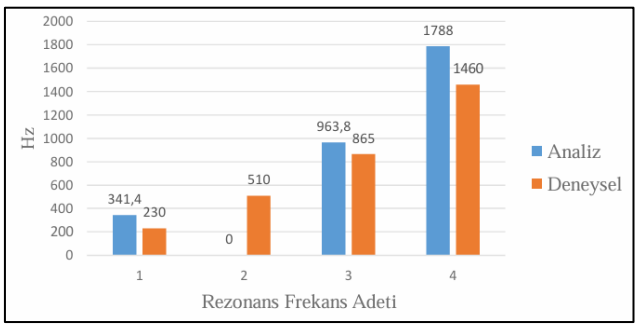
Çizelge 2.5. COMAC kriteri değerleri [29]

Düğüm sayıları hesaplama	Düğüm sayıları deneysel	COMAC_X	COMAC_Y	COMAC_Z
290	40	0,1958	0,0720	0,2889
1971	44	0,1307	0,1043	0,0776
2014	46	0,1958	0,1039	0,2852
2262	34	0,0745	0,1285	0,0510
2636	48	0,0783	0,1071	0,0388

Çizelge 2.5. (devam) COMAC kriteri değerleri [29]

2810	41	0,0739	0,1701	0,0414
1112009	50	0,3968	0,1229	0,2258
1112068	35	0,1067	0,1174	0,0801
1112141	47	0,2412	0,0529	0,0783
1112211	26	0,1467	0,1729	0,1058
1112271	39	0,1165	0,0495	0,1674
1112280	23	0,1283	0,0812	0,1367

Sim ve arkadaşları ise fırlatma sistemlerinin yapısal dinamik testlerinde geniş frekans aralıklarında çok noktalı uyartım ve ölçüm gereksinimi bulunduğunu; bu nedenle yüksek kanallı modal test sistemlerinin kullanıldığını belirtmektedir [37]. Ekipman düzeyinde Ren ve arkadaşları, baskı devre kartı sonlu eleman modal sonuçlarını deneysel modal analiz ile karşılaştırarak dört mod için %1,65-8,96 aralığında frekans hatası elde etmiş ve bu seviyeyi mühendislik amaçları için yeterli görmüştür [38]. Bilgili ise elektrik motoru kapağına ait esnek gövde modelini deneysel FRF ve doğal frekanslarla karşılaştırmış; tüm modlarda %5'in altında hata elde ederek modeli çok cisimli dinamik analizlerde kullanmıştır [39]. Küp uydu literatüründe Süer, ISIS 3U gövdesinin birinci doğal frekansını modal test sonucu 270 Hz ile SEY sonucu 276 Hz olarak karşılaştırmış; yaklaşık %2,2'lik farkı yeterli bularak modeli doğrulamıştır [15]. Kaya ve Nalbant, Siemens NX ortamında modellenen bir titreşim fikstürüne ait modal analiz sonuçlarını, sarsıcı üzerindeki rezonans tarama testlerinden elde edilen verilerle karşılaştırmış; özellikle test tablasının uç bölgelerinde gözlenen yerel salınımların frekans farkları üzerindeki etkisini tartışmış ve maksimum genliklerin karşılaştırmalı gösterimini Şekil 2.21'de sunmuştur [40].



Şekil 2.21. Maksimum genliklerin karşılaştırmalı gösterimi [40]

Bu literatür, modal analiz ve test-analiz korelasyonunun uzay yapılarında rastgele titreşim ve ömür analizlerine geçmeden önce tamamlanması gereken zorunlu bir adım olduğunu göstermektedir. Bu tez kapsamında da kukla ekipman sonlu eleman modelinden elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin, rezonans tarama ve rastgele titreşim testlerinden çıkarılan frekans ve genlik değerleri ile karşılaştırılması; farkların kabul edilen sınırlar içinde kalmasının sağlanması ve gerekirse model güncelleme adımlarının devreye alınması hedeflenmektedir.

2.5. Rastgele Titreşim Analizi ve Çevresel Testler

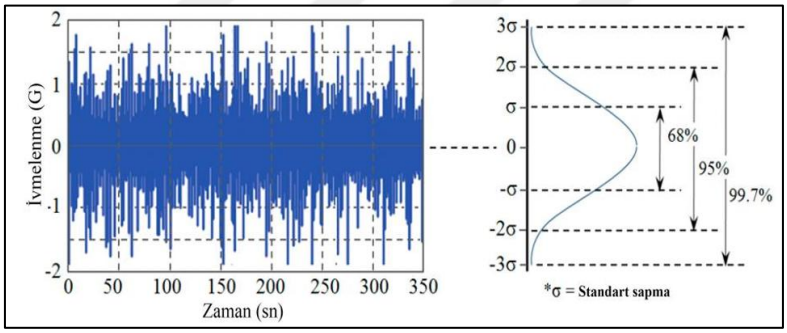
Fırlatma süreci, uzay sistemlerinin karşılaştığı en zorlu mekanik çevrelerden biridir. Roket motorlarından yayılan titreşimler, aerodinamik yükler, yüksek seviyeli akustik basınç dalgaları ve ayrılma mekanizmalarının ürettiği şoklar, geniş frekans bandında karmaşık bir dinamik yük kombinasyonu oluşturur. ECSS, uzay segmenti ekipmanlarının çevresel doğrulama programı kapsamında statik yük, sinüzoidal titreşim, rastgele titreşim, akustik, şok ve ısıl vakum testlerine tabi tutulması gerektiğini ve rastgele titreşim testinin fırlatma ortamının temsilinde temel yöntemlerden biri olduğunu belirtmektedir [4]. ECSS, fırlatma dinamiğinin çoğu durumda yalnızca quasi-statik yüklerle temsil edilemeyeceğini; yerel modların ve yüksek frekanslı titreşimlerin değerlendirilmesi için rastgele titreşim ve akustik analizlerin zorunlu olduğunu vurgular [5]. Gündoğdu, PSAT-1 uydusu için fırlatma ortamını alçak yörünge görevlerindeki en kritik yükleme durumlarından biri olarak tanımlamakta ve rastgele titreşim yüklerinin yapısal boyutlandırmadaki belirleyici rolüne dikkat çekmektedir [7]. Knight ise, uzay aracı bileşenleri için uygulanan geleneksel tek eksenli rastgele titreşim testlerinin, uçuş sırasında maruz kalınan üç boyutlu rastgele titreşim ortamını her zaman yeterince temsil etmediğini; bu temsil sorunlarının belirli yönlerde gereğinden yüksek test seviyelerine (over-test) yol açabileceğini ve daha gerçekçi sınama için test metodolojisinin iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [41].

Rastgele titreşim ortamı, istatistiksel özellikleriyle tanımlanan, zamana bağlı deterministik bir ifade ile tarif edilemeyen bir süreçtir. Al Ali, Falcon 9 fırlatıcısı için 1U CubeSat (Standart Küçük Uydu Platformu) yükü açısından rastgele titreşim ortamını tanımlarken ivme girdisinin güç spektral yoğunluğu (PSD, Power Spectral Density) ile ifade edildiğini, PSD'nin genellikle g^2/Hz birimiyle verildiğini belirtmektedir [42]. Bir rastgele titreşim

profili için toplam ivme seviyesini niteleyen kök ortalama kare değer gRMS, Eş. 2.1 ifadesiyle hesaplanmakta; burada $S_a(f)$ivme PSD fonksiyonunu temsil etmektedir.

$$g_{RMS} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_a(f)\, df} \tag{2.1}$$

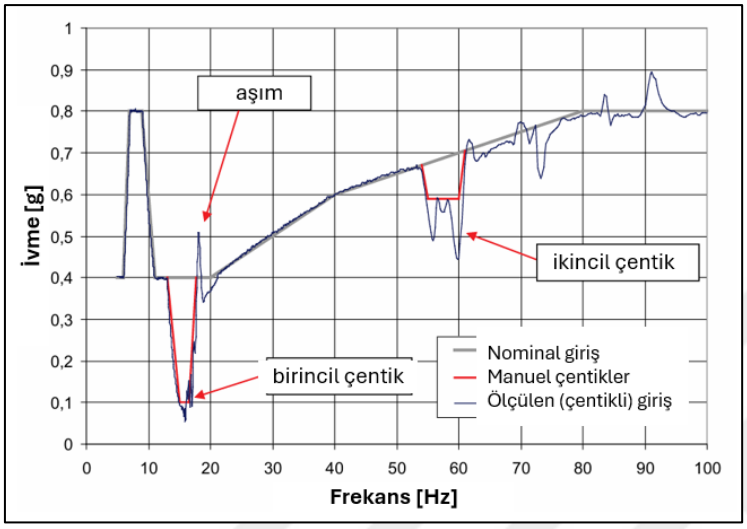
Falcon 9 için rapor edilen maksimum tahmini ortamda gRMS seviyesinin yaklaşık 5,13 g olduğu belirtilmektedir [42]. Torehov, yorucu hasar spektrumu yaklaşımında rastgele titreşim sinyallerinin istatistiksel özelliklerini güç spektral yoğunluğu (PSD) ve spektral momentler üzerinden tanımlamakta, test girdilerinin hasar eşdeğerliği prensibine göre türetilmesinin özellikle uzay yapılarında gerçek görev çevrimini daha iyi temsil ettiğini ortaya koymaktadır [43]. Binbaş ise rastgele titreşim sinyallerini çok sayıda harmonik bileşenin üst üste binmesiyle oluşan Gauss tipli bir süreç olarak tarif etmekte; rastgele titreşim sinyallerine ait olasılık dağılımının örnek bir gösterimini Şekil 2.22'de sunmakta, gRMS kavramının PSD eğrisi altındaki alan ile ilişkisini ve sigma (σ) seviyeleriyle bağlantısını ayrıntılı biçimde açıklamaktadır [44].



Şekil 2.22. Bir sinyale olasılık dağılımı [44]

ECSS standardı, rastgele titreşim test seviyeleri için kabul, nitelendirme ve proto-uçuş aşamalarına yönelik net tanımlar sunmaktadır. Ekipman kabul testlerinde PSD seviyeleri, beklenen maksimum spektrum üzerine 0 dB marj eklenerek belirlenmekte ve her eksende genellikle 1 dakika süreyle uygulanmaktadır. Nitelendirme ve proto-uçuş testleri için ise PSD eğrileri maksimum tahmini çevre üzerine +3 dB marj ile tanımlanmakta ve tipik olarak her eksende 2 dakika test süresi öngörülmektedir [4]. ECSS, bu seviyelerin doğrudan fırlatıcı kullanıcı kılavuzundan alınması yerine küresel yük analizi ile ilişkilendirilmesini önermekte, gerekli durumlarda ekipman düzeyinde sınırlandırma (notching) uygulanarak yerel seviyelerin kontrol altına alınmasını tavsiye etmektedir; birincil ve ikincil çentik

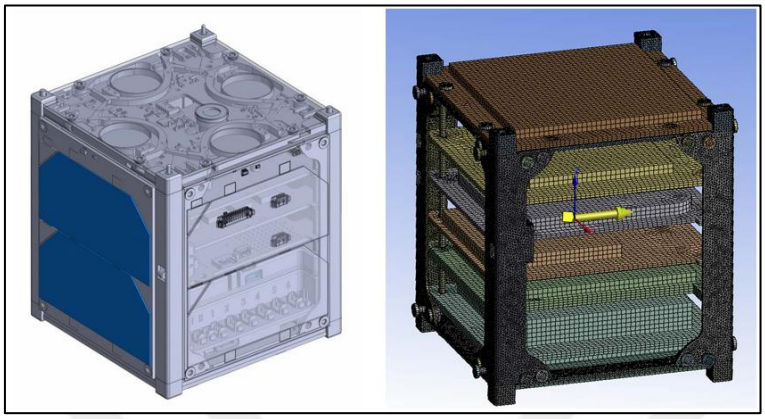
uygulamalarına ilişkin örnek bir gösterim Şekil 2.23'te sunulmaktadır [5]. NASA Goddard GEVS standardına dayanan SpaceCube PWA (Baskılı Devre Kartı Montajı) çalışmasında kart düzeyi için GEVS proto-uçuş ve kabul rastgele titreşim profilleri kullanılmış; her üç eksende 2 dakikalık testler ile fırlatma ve entegrasyon çevrimlerinin kart düzeyinde temsil edildiği gösterilmiştir [16].



Şekil 2.23. Birincil ve ikincil çentik örneği [5]

Küçük uydu ve küp uydu uygulamalarında rastgele titreşim testleri, genellikle doğrudan fırlatıcı gereksinimlerine uyumlu olacak biçimde planlanmaktadır. Süer, TÜRKSAT 3USAT uydusu için kullanılan fırlatıcıya ait kullanıcı kılavuzunda verilen rastgele titreşim seviyelerini temel alarak hem sayısal analizler hem de deneysel testler yürütmüş, özellikle düşük kütleli uydularda temel doğal frekansın 100 Hz ve üzerinde tutulmasının kritik bir tasarım ölçütü olduğunu vurgulamıştır [15]. Bostan ve arkadaşları, TUMnanoSAT misyonunda 20-2 000 Hz frekans aralığında yaklaşık 6,79 gRMS değerine ulaşan rastgele titreşim testlerini her eksen için 1 dakika süreyle uygulamış; ekipman ve uydu düzeyi rastgele titreşim testlerini rapor etmekte ve TUMnanoSAT 3B modelini sayısal hesaplama ağ modeliyle birlikte Şekil 2.24'te sunmaktadır [45]. Şanlı, ASTINSAT-1 3U küp uydusu için fırlatıcıya ait rastgele titreşim çevresini kullanarak sonlu eleman modeli üzerinde modal ve frekans cevabı analizleri gerçekleştirmiş; hem doğal frekans gereksinimlerinin hem de ivme yanıtlarının sınır değerler içinde kaldığını göstermiştir [8]. Araujo, ISTSat-1 uydusunun yerleştirici yapısı (deployer) içindeki dinamik davranışını rastgele titreşim yükleri altında incelemiş ve küp uydu yerleştirici sistemi (CubeSat deployer) sınır

koşullarının enine eksenlerde rezonans ile yük büyümesine yol açabildiğini, buna karşılık boyuna eksende kısmi bir izolasyon etkisi oluşturabildiğini ortaya koymuştur [46].



Şekil 2.24. TUMnanoSAT 3B model ve sayısal hesaplama ağ modeli [45]

Sayısal rastgele titreşim analizleri çoğunlukla modal süperpozisyon temelli frekans alanı çözümlerine dayanmaktadır. Genel formda birçok serbestlik dereceli sistem için hareket denklemi Eş. 2.2 şeklinde yazılır; burada M, C ve K sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\mathrm{F}(t)$dış zorlamayı temsil etmektedir. Frekans alanında tanımlanan transfer fonksiyonu $\mathrm{H}(\omega)$kullanılarak çıktı PSD'si Eş. 2.3 ifadesiyle elde edilir.

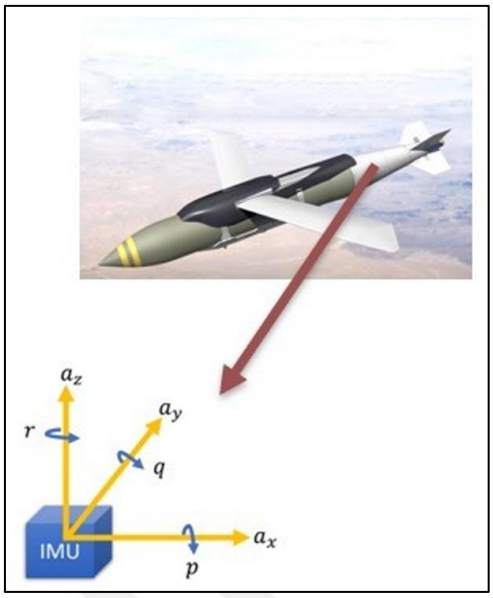
$$\mathrm{M}\,\ddot{\mathrm{x}}(t) + \mathrm{C}\,\dot{\mathrm{x}}(t) + \mathrm{K}\,\mathrm{x}(t) = \mathrm{F}(t) \tag{2.2}$$

$$\mathrm{S}_x(\omega) = \mathrm{H}(\omega)\,\mathrm{S}_F(\omega)\,\mathrm{H}^H(\omega) \tag{2.3}$$

ECSS, taban ivmesi girdisinin modal uzaya dönüştürülerek PSD tabanlı çözümlerle ivme ve gerilme yanıtlarının RMS (Kök Ortalama Kare) değerleri üzerinden değerlendirilmesini önermektedir [5]. Abdelal ve arkadaşları, uzay yapıları üzerinde yürütülen çalışmalarda sonlu eleman analizini rastgele titreşim, modal davranış ve şok tepkilerini birlikte kapsayacak biçimde bütünleşik olarak ele almakta ve özellikle ekipman ile taşıyıcı yapı arayüzlerindeki sınır koşullarının doğru modellenmesinin kritik önemine vurgu yapmaktadır. Bu yaklaşımın, yapısal tepkinin gerçekçi biçimde tahmin edilmesi ve güvenilir tasarım kararları alınması açısından belirleyici olduğu belirtilmektedir [6]. Koçmar, uzay uygulamalarında kullanılan esnek destek yapılarında Miles eşitliği ile analitik tahminleri modal tabanlı SEY çözümleriyle karşılaştırmakta; PSD altında kalan alanın gRMS ve tepe ivme değerleriyle ilişkisini ayrıntılı biçimde tartışmaktadır [47].

Rastgele titreşim sonuçlarının güvenilirliği, kullanılan sönüm modelinin doğruluğuna da bağlıdır. Briese ve Möller, uzay aracı ikincil yapılarında rastgele titreşim metodolojisini inceledikleri çalışmada çoğu analizde varsayılan %2 yapısal sönüm oranının tüm frekans aralığında geçerli olmadığını; deneysel verilerin düşük frekanslarda yaklaşık %0,6, daha yüksek frekanslarda ise daha büyük sönüm oranları gösterdiğini rapor etmektedir [48]. Küçükbayram, deneysel modal analizden elde edilen frekans ve sönüm oranlarını kullanarak oransal sönüm parametrelerini kalibre etmiş ve bu sayede rastgele titreşim analizlerinde test-analiz korelasyonunu iyileştirmiştir [25]. Rittenhouse, optik sistemlere yönelik deneysel çalışmasında yarı güç bant genişliği yönteminin modal sönüm oranlarının tayininde kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışmada ayrıca, bu yöntemle elde edilen sönüm değerlerinin frekansa bağlı modeller aracılığıyla rastgele titreşim analizlerine aktarılabileceği ve böylece dinamik davranışın daha gerçekçi biçimde temsil edilebileceği ortaya konmuştur [49]. Abu Deeb, mekanik sistemlerin rastgele titreşim ve şok yükleri altındaki davranışını incelerken oransal ve gelişmiş sönüm modellerinin sonuçlar üzerindeki etkisini nicel olarak tartışmaktadır [50].

Rastgele titreşim çevreleri, yalnızca yapısal bütünlük değil, ekipman ve alt sistemlerin fonksiyonel performansı açısından da kritik öneme sahiptir. Yalçın, optomekanik sistemlerde rastgele titreşimin görüş hattı titremesi (line-of-sight jitter) ve modülasyon transfer fonksiyonu üzerindeki etkilerini inceleyerek, optik performansın da mekanik testlerle doğrulanması gerektiğini vurgular [51]. Sood ve arkadaşları, SpaceCube baskı devre kartı üzerinde yaptıkları çalışmada termal ve rastgele titreşim yüklerinin lehim eklemlerinde yorulma hasarını hızlandırdığını, bu nedenle çevresel test profillerinin kart düzeyi güvenilirlik modelleri için doğrudan girdi olması gerektiğini ortaya koymuştur [16]. Vardallı, ataletsel ölçüm birimi (IMU) için tasarladığı pasif izolasyon sisteminde rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD-frekans verilerini kullanarak izolasyon performansını değerlendirmiş; güdümlü füze üzerinde konumlanan IMU'nun ve ölçüm eksenlerinin şematik gösterimini Şekil 2.25'te sunmakta ve bu sayede sensör ile elektronik ekipmanların görev ömrü boyunca maruz kaldığı dinamik yüklerin azaltılabileceğini göstermektedir [28].



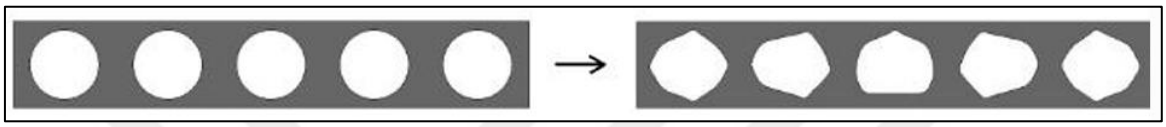
Şekil 2.25. IMU'nun (Ataletsel Ölçüm Birimi) güdümlü füzesi ve ölçüm eksenleri [28]

Sonuç olarak literatür, rastgele titreşim analiz ve testlerinin, uzay yapılarının hem küresel hem de ekipman düzeyindeki yapısal tasarımında merkezi bir rol oynadığını göstermektedir. ECSS ve GEVS gibi standartlar, kabul, nitelendirme ve proto-uçuş seviyeleri için rastgele titreşim PSD profillerini ve test sürelerini tanımlarken; akademik ve kurumsal çalışmalar bu çevrelerin sonlu eleman modelleriyle nasıl temsil edileceğini, sönüm oranlarının nasıl kalibre edileceğini ve analiz-test korelasyonunun nasıl sağlanacağını ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır [4-6], [48]. Bu tez çalışmasında, anılan yöntemler ve standartlar temel alınarak alçak dünya yörüngesinde görev yapacak bir uyduya ait tekil ekipmanın kukla modeli için rastgele titreşim analizleri gerçekleştirilmekte ve elde edilen sonuçlar çevresel test çıktıları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu yönüyle çalışma, literatürde çoğunlukla tüm uydu yapıları düzeyinde ele alınan rastgele titreşim ile yapısal tasarım ilişkisini, ekipman düzeyinde kurgulanan kukla model yaklaşımı üzerinden ayrıntılı biçimde irdelemeyi amaçlamaktadır.

2.6. Tasarım ve Optimizasyon Yaklaşımları

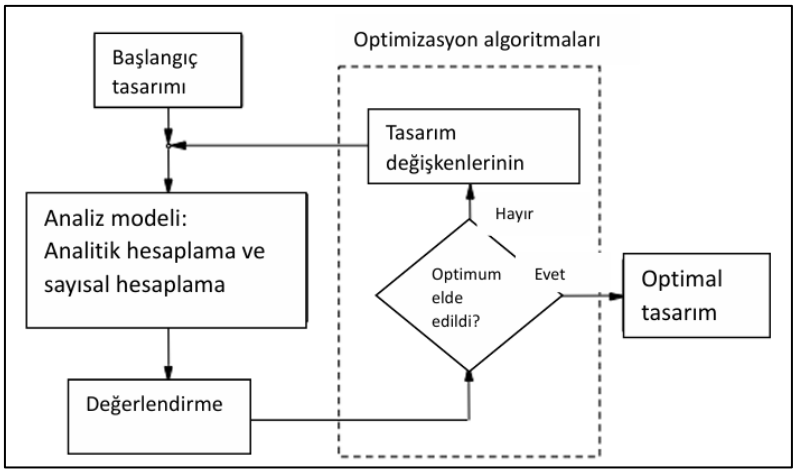
Uzay sistemlerinde yapısal tasarım, dayanım ve rijitlik gereklerinin sağlanmasıyla sınırlı olmayan, kütle, maliyet ve üretilebilirlik gibi parametrelerin eş zamanlı olarak yönetildiği çok disiplinli bir optimizasyon problemi niteliği taşımaktadır. ECSS, yük analizinden elde edilen sonuçların hem tasarım hem de test seviyeleri için temel girdi olduğunu vurgulamakta, fırlatma ve görev çevrimi boyunca yer alan tüm kritik olaylar için hesaplanan

yüklerin uygun emniyet katsayıları ile değerlendirilerek yapısal tasarımın başlangıç noktasını oluşturması gerektiğini belirtmektedir [5]. Lontsi, simülasyon odaklı tasarım yaklaşımında topoloji, şekil ve boyut optimizasyonunun birlikte kullanılmasına odaklanmakta ve bu sayede malzeme dağılımının yeniden düzenlenerek hem hafif hem de üretilebilir yapıların elde edilebileceğini, şekil optimizasyonuna ilişkin örnek bir uygulamanın ise Şekil 2.26'da gösterildiğini belirtmektedir. Çalışmada ayrıca bu yaklaşım ile tasarım döngülerinin sayısının azaldığı, buna bağlı olarak süreç verimliliğinin belirgin biçimde arttığı ifade edilmektedir [52].



Şekil 2.26. Şekil optimizasyonu [52]

Klasik yapısal optimizasyon uygulamalarında sonlu eleman çözücüleri ile optimizasyon algoritmalarının entegrasyonu önemli rol oynar. Ekren, geliştirdiği optimizasyon kodunu analitik çözücü ve MSC.NASTRAN ile entegre ederek dikdörtgen ve I kesitli ankastre kirişler üzerinde üç farklı optimizasyon stratejisini karşılaştırmış; her üç yaklaşımın da aynı optimum çözüme ulaştığını göstermiştir [53]. Kanat burulma (torsiyon) kutusu örneğinde eleman özellik ve şekil optimizasyonu birlikte uygulanmış; kabuk kalınlıkları ve kaburga konumları tasarım değişkeni olarak seçilmiş ve hem kütle azaltımı hem gerilme kısıtlarının sağlanabildiği ortaya konmuştur [53]. Benzer şekilde Kahiralla, ağır iş makinası bileşenleri için şekil optimizasyonu sürecini özetlemekte; başlangıç geometrisi üzerinde sonlu eleman analizi yapıldıktan sonra, belirlenen gerilme ve yer değiştirme sınırları altında malzeme kullanımını ve ağırlığı azaltmaya yönelik iteratif bir şekil optimizasyon algoritmasının uygulandığını, söz konusu genel optimizasyon döngüsünün ise Şekil 2.27'de şematik olarak sunulduğunu belirtmektedir. Çalışmada tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar tanımlanmış, her iterasyonda geometri sonlu eleman analizi sonuçlarına göre güncellenerek kademeli biçimde optimum tasarıma yaklaşılmıştır. Sonuçta yaklaşık yüzde otuz oranında bir ağırlık azaltımı sağlandığı, buna karşın gerilme ve deplasman kısıtlarının ihlal edilmediği gösterilmiştir [19]. Bu tür çalışmalar, uzay yapılarında da kullanılan şekil ve boyut optimizasyon yöntemlerinin genel mühendislik uygulamalarında yaygın olarak benimsendiğini göstermektedir.



Şekil 2.27. Genel optimizasyon döngüsü [19]

Küçük uydu ve mikro uydu yapılarında optimizasyon yaklaşımları çoğunlukla kütle azaltımı ile doğal frekans ve gerilme sınırlarının birlikte ele alınmasına dayanır. Çam, mikro uydu gövde yapısında klasik alüminyum levha paneller yerine eklemeli imalatla üretilebilecek sertleştirilmiş paneller ve kafes yapıların kullanılmasını önermiştir. Çalışmada, panel üzerindeki sertleştirme elemanlarının konum ve boyutlarının, modal frekansları iyileştirecek şekilde belirlenmesi gerektiği gösterilmekte, ayrıca sonlu eleman tabanlı gerilme ve şekil değiştirme haritalarının dağılımlarının panel tasarımında kritik bölgelerin tespitinde etkili bir araç olduğu vurgulanmaktadır [10]. Wang ve arkadaşları, nanosat kutu yapısında kafes dolgulu paneller için iki aşamalı topolojik tasarım yöntemi kullanarak, panel kütlesinde yaklaşık %50 azalma sağlarken temel doğal frekansta %1,19'luk artış elde etmiş; böylece hafiflik ve dinamik performansın birlikte iyileştirilebileceğini göstermiştir [54].

Nanosatellit yapıları özelinde, topoloji optimizasyonu ve kafes yapıların birlikte kullanıldığı gelişmiş tasarım yöntemleri de literatürde yer almaktadır. Wang ve çalışma arkadaşları, nanosat kutu yapısının yük taşıyan panellerini kafes dolgu ile destekleyerek doğal frekansları eniyilemeyi hedefleyen iki aşamalı bir topolojik tasarım yöntemi önermektedir. İlk aşamada, üniform kafes hücrelerle doldurulmuş panel yapısı için deneysel modal veriler elde edilmekte ve bu veriler kullanılarak panelin sonlu eleman modeli doğrulanmaktadır. İkinci aşamada ise kafes tabakasının eşdeğer elemanlarla temsil edildiği indirgenmiş bir model üzerinde, kütle kısıtları altında doğal frekansları maksimize etmeye yönelik bir topoloji optimizasyon problemi çözülmektedir. Çalışma sonucunda panel kütlesinde yaklaşık %50 düzeyinde azalma sağlandığı, buna karşılık temel doğal frekansın %1,19 oranında artırıldığı

ve böylece hem hafiflik hem de dinamik performans bakımından iyileştirilmiş bir nanosat kutu yapısına ulaşıldığı belirtilmektedir [54].

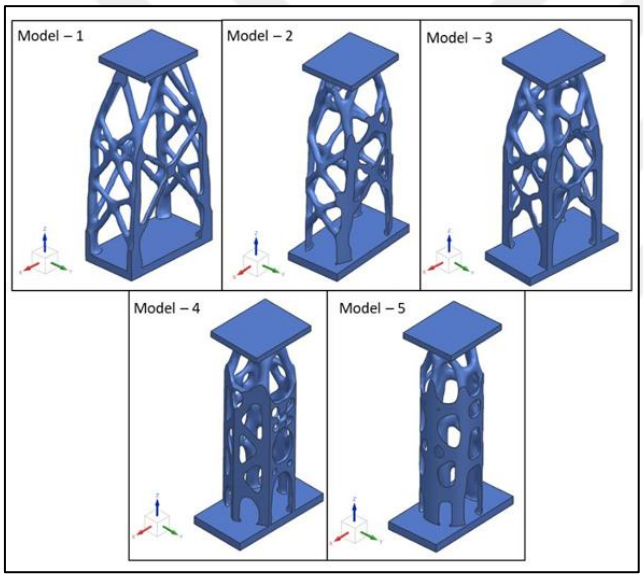
Küp uydu gövdelerinde generatif ve üretken tasarım yaklaşımlarının son yıllarda giderek daha yaygın biçimde kullanıldığı görülmektedir. Şanlı, ASTINSAT-1 küp uydusunun gövdesi için Autodesk Fusion 360 ortamında üretken tasarım yöntemini uygulamış, yörünge yerleştiricisi hacmi, alt sistem hacimleri ve güvenlik faktörü gibi sınır koşullarını tanımlayarak bu kısıtlar altında onlarca ana tasarım ve yüzlerce varyant elde etmiştir. Nihai tasarımda gövde kütlesi 219 842 g düzeyine inerken minimum güvenlik faktörü 2 değerine yükselmiş ve böylece aynı hacimsel kısıtlar içinde hem daha hafif hem de dayanım açısından daha yüksek performans sunan bir gövde yapısına ulaşılmıştır [8].

Küp uydu ve nanosat yapılarında tasarım-analiz-test zincirini bütünsel olarak ele alan çalışmalar da mevcuttur. Morettini ve çalışma arkadaşları, 1U küp uydunun mekanik tasarımından başlayarak sonlu eleman analizleri, üretim ve yapısal testlere kadar uzanan bir Küp Uydu Uzay Keşfi (CubeSat Spatial Expedition) çerçevesi sunmakta ve tasarım optimizasyonunun standartlara uygunluk, kütle bütçesi ile titreşim test seviyeleri birlikte ele alınarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [2]. Elshaal ve arkadaşları ise, AlAinSat-1 komuta ve veri işleme birimi (CDHS) modülünün rastgele titreşim analizi ve testi sonucunda, tolerans, montaj ve geometrik değişkenliklerin dinamik performans üzerindeki etkisine dikkat çekerek, gelecekteki çalışmalar için modal ve rastgele titreşim analizlerinde duyarlılık analizleri ve tasarım parametre optimizasyonunun önemine işaret etmektedir [55].

Ekipman ve alt sistem düzeyinde de benzer optimizasyon yaklaşımlarının izlendiği görülmektedir. Vardallı, güdümlü bir füze içinde yer alan ataletsel ölçüm birimi (IMU) için pasif titreşim izolasyon sistemi tasarlarken izolatör geometrisini parametrik olarak tanımlamış, sonlu elemanlar ve optimizasyon aracı kullanarak doğal frekanslar ile mod şekillerini hedefleyen bir tasarım elde etmiştir. Devamında, eklemeli imalat yöntemiyle ürettiği prototipi sinüs ve rastgele titreşim testlerine tabi tutmuş ve böylece tasarımın deneysel olarak doğrulandığını ortaya koymuştur [28].

Arslan tarafından yürütülen çalışmada ise, uydu kablolama sistemi için bir kablo yükseltme braketinin hem geleneksel işleme hem de eklemeli imalat yöntemleri ile üretimine yönelik

yapısal tasarım ve optimizasyon süreci ele alınmıştır. Siemens NX ortamında oluşturulan sonlu eleman modeline dayanarak önce braketin mevcut geometrisi için statik ve modal analizler gerçekleştirilmiş; ardından topoloji optimizasyonu kullanılarak, birinci doğal frekansın en az 140 Hz olması ve yeterli emniyet katsayısının sağlanması koşulları altında kütle azaltımı hedeflenmiştir. Farklı geometrilerdeki gövdeler üzerinde topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen örnek gövde şekilleri Şekil 2.28'de gösterilmektedir. Çalışma sonucunda, AlSi10Mg alaşımı kullanılarak eklemeli imalatla üretilebilir bir geometri elde edilmiş; optimizasyon sonrasında braket kütlesinde yaklaşık %40'a varan azalma sağlanırken, doğal frekans ve statik gerilme gereksinimlerinin korunduğu gösterilmiştir [9].



Şekil 2.28. Farklı geometrilerdeki gövdelerde topoloji optimizasyonu sonucu [9]

Uzay sistemlerinde optimizasyon yalnızca yapısal bileşenlerle sınırlı değildir; fırlatma araçları ve görev tasarımı da çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak ele alınmaktadır. Aksen, küçük uydu fırlatma aracının son kademesinde hibrit roket motoru kullanımını incelediği çalışmada hibrit itki sistemi, uçuş yörüngesi ve faydalı yük kütlesini birlikte ele alan bir optimizasyon problemi tanımlamış; çalışmada örnek alınan Minotaur-I fırlatma aracının genel görünümü Şekil 2.29'da sunulmuştur. Çalışmada modeFRONTIER yazılımı kullanılarak yanma süresi, hazne basıncı, karışım oranı ve genleşme oranı gibi motor parametreleri ile itki vektör kontrolü (TVC) açıları ve faydalı yük kütlesi arasında Pareto optimum çözümler elde edilmiştir [56]. Bu yaklaşım, uzay sistemleri tasarımında çok hedefli ve çok kısıtlı optimizasyonun gerekliliğini göstermektedir.



Şekil 2.29. Minotaur-I fırlatma aracı [56]

Bu tez çalışmasında ise, tam ölçekli topoloji veya generatif tasarım yöntemleri yerine, LEO yörüngesi için tasarlanan uyduya ait tekil bir ekipmanın kukla modelinin kütle, kütle merkezi ve atalet momentlerinin gerçek ekipman ile uyumlu hâle getirilmesini hedefleyen iteratif bir tasarım ve optimizasyon yaklaşımı benimsenmektedir. Siemens NX ortamında gerçekleştirilen bu süreçte, tek parça AL7075-T651 malzemeden üretilmesi planlanan kukla ekipman üzerinde boşaltma cepleri, kesit değişiklikleri ve geometrik düzenlemeler kullanılarak kütle özellikleri hassas şekilde ayarlanmakta; aynı zamanda sonlu eleman analizleri ile doğal frekans ve gerilme gereksinimlerinin sağlanması gözetilmektedir. Böylece, literatürde sunulan gelişmiş optimizasyon yöntemlerinin temel ilkeleri, üretim ve gizlilik kısıtlarının bulunduğu gerçek bir mühendislik problemi için pratik ve uygulanabilir bir tasarım metodolojisine uyarlanmış olmaktadır.

2.7. Diğer İlgili Çalışmalar

Uydu yapıları, rastgele titreşim ve modal analiz konularıyla doğrudan ilişkili çalışmaların yanı sıra, bu tezde kullanılan yöntem ve yorumları destekleyen çok sayıda dolaylı literatür

de bulunmaktadır. Titreşim yükleri altında yorulma davranışı ve güvenli çalışma sınırlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar, rastgele titreşim testlerinin yorulma hasarı ile ilişkilendirilmesinde yol gösterici olmaktadır. Abu Deeb, havacılık bileşenleri için tek serbestlik dereceli sistem tabanlı titreşim analizinden başlayarak sönüm, zorlanmış titreşim ve yorulma kavramlarını ayrıntılı biçimde ele almakta; doğal frekans, sönüm oranı ve genlik ilişkilerini kapalı form çözümlerle ortaya koymaktadır [50]. Baylı, sabit kanatlı İHA kanatları için 2024 T3 ve 7075-T6 alüminyum alaşımlarında yapısal analiz ve yorulma hesapları yaparak S-N eğrileri ve Miner kuralına dayalı toplam hasar yaklaşımıyla flap hareketleri altındaki ömrü tahmin etmektedir [57]. Babuçoğlu ise kaynaklı birleşimlerde ısı girdisi, ısıdan etkilenen bölge ve tane yapısı değişimlerinin mekanik özellikler ve yorulma üzerinde oluşturduğu etkileri incelemektedir. Kaynak ısısı için kullandığı Eş. 2.4 bağıntısında Q birim uzunluğa aktarılan ısı girdisini, η verim katsayısını, I akımı, U gerilimi ve v kaynak hızını temsil etmekte; ısı girdisinin artmasıyla tane büyümesi ve dayanım azalımı arasındaki ilişki ortaya konmaktadır [58].

$$Q = \eta \frac{I\,U}{v} \tag{2.4}$$

Bu çalışmalar, kukla ekipmanın tek parça talaşlı imalatla üretilmesine rağmen, uzay yapılarında malzeme seçimi, ısıl işlem ve üretim parametrelerinin dinamik dayanım ve ömür üzerindeki etkilerinin göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Artık gerilmelerin titreşim yoluyla giderilmesine yönelik çalışmalar, tekrarlanan rastgele titreşim testleri sonrasında doğal frekanslardaki kaymaların yorumlanması açısından önemli bir ipucu sunmaktadır. Servak ve arkadaşları, 2024 alüminyum kirişler üzerinde titreşimsel gerilim giderme yöntemini hem sonlu eleman hem de deneysel çalışmalarla incelemekte ve rezonans civarında uygulanan alternatif yüklemenin artık gerilmelerde %20 ile %70 arasında azalma sağlayabildiğini göstermektedir. Ayrıca frekans, yükleme süresi ve moment düzeyinin yöntemin verimi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır [59]. Bu bulgular, kukla ekipman üzerinde tekrarlanan titreşim testleriyle iç gerilmelerin kısmen giderilmesi ve buna bağlı frekans kaymalarının oluşması ihtimalini desteklemektedir.

Pasif ve aktif titreşim izolasyonu, bu tezde değerlendirilen rastgele titreşim sonuçlarının yorumlanması açısından dolaylı fakat göz ardı edilemeyecek bir öneme sahiptir. İsanç, fırlatma sırasında yapıya aktarılan yükleri azaltmak amacıyla geliştirilen pasif uzay aracı

titreşim izolasyon sistemlerinde iç sönümün artırılması ve metal esaslı izolatörlerin rastgele titreşim altındaki yorulma ömrünün kestirilmesi üzerine kapsamlı bir çalışma sunmakta, sonlu eleman ve deneysel sonuçlara dayanarak izolatör geometrisi, sönüm oranı ve yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi ayrıntılı biçimde incelemektedir [60]. Sairajan ve Aglietti, uydu panellerinde piezoelektrik tabanlı entegre sönüm ve sertlik düzenleme çözümlerini inceleyerek uzay yapılarında pasif ve yarı aktif titreşim kontrolünün modal parametreler ile rastgele titreşim tepkisi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Çalışmalarında, bu tür bütünleşmiş sistemlerin özellikle panel düzeyinde dinamik davranışı şekillendirdiği ve yapısal titreşimlerin sınırlandırılmasında etkili bir araç olarak kullanılabileceği gösterilmektedir [61].

Modüler küp uydu yapıları ve benzeri küçük platformlar üzerine yapılan çalışmalarda, modal analiz, rastgele titreşim analizi ve çevresel test prosedürlerinin birlikte ele alındığı daha kapsamlı örnekler yer almaktadır. Süer, TÜRKSAT 3USAT uydusunun yapısal tasarımında sanki statik, harmonik, rastgele titreşim ve şok testlerini bir arada kullanan bütüncül bir doğrulama yaklaşımı sunmakta, PSLV fırlatıcısına ait 45 Hz ve 90 Hz doğal frekans gereksinimlerinin karşılandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca rastgele titreşim analizlerinden elde edilen deplasman ve gerilme kök ortalama kare (RMS) yanıtlarının yeterli güvenlik payı içinde kaldığı gösterilerek, yapısal tasarımın fırlatma koşulları altında kabul edilebilir düzeyde performans sergilediği ifade edilmektedir [15]. Torres, bir küp uydu yapısının modal, sanki-statik ve rastgele titreşim analizlerini tek bir yapısal model üzerinden yürüterek, kabul kriterlerini güvenlik katsayıları üzerinden tanımlamakta ve her analiz türü için frekans, yer değiştirme ve gerilme limitlerini ayrıntılı tablolarla sunmaktadır [62]. Martell, çalışmalarında NanoRacks şartnameleri (NanoRacks) temel alınarak tanımlanan MEFL +3 dB seviyeli rastgele titreşim profilleri (MEFL +3 dB) altında bir küp uydu şasisi için SOL 103/Simcenter tabanlı analiz (SOL 103/Simcenter) ile sarsıcı test korelasyonu gerçekleştirmektedir. Çalışmada gRMS 9,47 seviyesindeki test girdileri kullanılarak elde edilen deneysel verilerin, sayısal sonuçları tatmin edici düzeyde doğruladığı gösterilmektedir [63]. Bu çalışmalar, bu tezde izlenen analiz-test korelasyon yaklaşımının küp uydu literatüründeki karşılıklarını temsil etmektedir.

Rastgele titreşim metodolojisi, yük kombinasyonu ve amortismanın frekansa bağlı modellenmesi gibi daha gelişmiş konular ise özellikle uzay aracı ikincil yapıları ve ayrılma mekanizmaları üzerinden incelenmiştir. Briese ve Möller, fırlatma sırasında ayrılma

yaylarının maruz kaldığı rastgele titreşim ortamını ayrıntılı biçimde inceleyerek ayrılma yayı ile taşıyıcı yapı arasındaki etkileşimi sonlu eleman modeli ve deneysel testler üzerinden karşılaştırmaktadır. Çalışmada statik ve rastgele titreşim durumlarına ait gerilme tensörlerinin bileşimi, sönüm oranının frekansa bağlı değişimi ile RBE2 ve RBE3 tipi bağlantı elemanlarının dinamik davranışa etkileri tartışılmakta ve bu bulgular üzerinden tasarım sürecinde doğrudan kullanılabilecek pratik öneriler sunulmaktadır [48]. Torehov ise rastgele titreşim test profillerinin uçuş verilerine dayalı bir misyon sentezi yaklaşımı ile türetilmesini ele almakta, Miles denklemine dayanan klasik tek serbestlik dereceli metodolojinin çok eksenli ve çok serbestlik dereceli sistemlere genişletilmesini tartışmaktadır. Ayrıca girdi güç spektral yoğunluğu eğrilerinin (PSD) hem muhafazakâr hem de gerçekçi olacak biçimde tanımlanmasına ilişkin ilkeleri ayrıntılı olarak irdelemektedir [43]. Koçmar, Kaya ve Nalbant gibi çalışmalar ise Miles formülasyonu, PSD-gRMS ilişkisi, dB tanımı ve test profillerinden bileşke ivme hesaplarına uzanan pratik formülleri ayrıntılandırarak, rastgele titreşim seviyelerinin analitik ve deneysel olarak nasıl yorumlanacağını göstermektedir [40], [47].

Rastgele titreşim istatistiği ve veri işleme alanında yapılan çalışmalar, güç spektral yoğunluğu (PSD) ile kök ortalama kare ivme hesabı, sigma seviyeleri ve desibel eğim bölgelerinin (dB) yorumlanması açısından temel başvuru niteliği taşımaktadır. Binbaş, rastgele titreşim sinyallerinin Gauss olasılık dağılımı, standart sapma ve güç spektral yoğunluğu (PSD) kavramları üzerinden tanımlanmasını ayrıntılandırmakta, bu çerçevede test girdilerinin olasılık temelli olarak nasıl yorumlanabileceğini açıklamaktadır [44]. Koçmar, PSD-gRMS hesabı, +3 dB/−3 dB eğim bölgeleri ve sigma seviyelerinin toplam oluşma olasılıklarını vererek, rastgele titreşim profillerinin istatistiksel doğasını ve güvenlik paylarının belirlenmesini tartışmaktadır [47]. Xu ve Rydén ile Xu ve arkadaşları, rastgele süreçler, modal parametrelerin istatistiksel tahmini ve model tabanlı veri işleme tekniklerini farklı uygulamalar üzerinden ele alarak, PSD-FRF verilerinin parametrik modellerle temsil edilmesi ve belirsizlik analizinde kullanılabilecek genel yöntemler sunmaktadır [64, 65]

Son olarak, teknik olarak uzay sistemleri alanının dışında yer almakla birlikte sonlu eleman modelleme, ağ tabanlı tahmin yöntemleri, dalga yayılımına bağlı ağ (mesh) seçimi, titreşimli ortamda kontrol ve yapısal optimizasyon gibi konularda yöntemsel katkılar sunan çalışmalar da bu tez için dolaylı bir referans çerçevesi oluşturmaktadır. Küçükbayram, dalga yayılımına dayalı eleman boyu seçim kriterlerini kullanarak eğilme (flexural) dalgalarının hâkim olduğu

yapılarda sonlu eleman ağının frekans çözünürlüğü üzerindeki etkisini incelemekte ve sekiz veya daha fazla eleman/dalga boyu kullanımının yeterli olduğunu göstermektedir [25]. Kurt, çok sayıda geometrik varyasyon ve yükleme durumuna sahip kabuk yapılar için Nastran çözümü ile oluşturulan geniş bir veri setini kullanarak burkulma yükü ve gerilme alanlarını tahmin eden grafik sinir ağı tabanlı bir yaklaşıma öncülük etmekte; sonlu eleman sonuçlarının veri temelli modellerle hızlandırılabileceğini ortaya koymaktadır [66]. McKeen tarafından sunulan uydu yönelim kontrolü ve model öngörülü kontrol (MPC) yaklaşımları ise, uzay görevlerinde dinamik model doğruluğunun ve çevresel rahatsızlıkların hesaba katılmasının önemini, yörünge ve kontrol tasarımı bağlamında örneklendirmektedir [67].

Sonlu eleman modeli güncelleme (FEMU) ve yapısal sağlık izleme (SHM) alanındaki çalışmalar, bu tezde kullanılan model güncelleme mantığını destekleyen metodolojik bir çerçeve sağlar. Ali, operasyonel modal analiz (OMA) ile SEY model güncellemesini birleştirerek atmosferik gözlem kulesinin dinamik özelliklerini saha verilerinden elde etmiş; farklı sınır koşulları ve güncelleme parametrelerinin model sonuçları üzerindeki etkisini incelemiştir [68]. Çekiç, bir haberleşme uydusunun SEY modelini MSC/PATRAN ve MSC/NASTRAN kullanarak oluşturmuş; sinüs titreşim testi sırasında ivmeölçerlerde beklenen frekans ve genlikleri hesaplamış, ardından test verilerini HyperGraph ortamında analiz ederek MAC ve hata duyarlılık analizi tabanlı bir model iyileştirme prosedürü uygulamıştır [3]. Bu örnekler, kütle/kütle merkezi ve atalet özellikleri bakımından uçuş konfigürasyonunu temsil eden simülatör yapı yaklaşımının kukla ekipman tasarımıyla aynı mühendislik mantığına dayandığını göstermektedir.

İletişim uydularına yönelik titreşim analizi ve model iyileştirme çalışmalarında da benzer metodolojiler izlenmektedir. Çekiç, bir haberleşme uydusunun sonlu eleman modelini MSC/PATRAN ve MSC/NASTRAN yazılımları ile oluşturarak, doğal frekans ve frekans tepki analizleri yardımıyla sinüs titreşim testi sırasında ivmeölçerlerde beklenen frekans ve genlikleri hesaplamış; daha sonra test sonuçlarını HYPERGRAPH yazılımı ile analiz sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmada, modal güvence kriteri (MAC) ve hata duyarlılık analizine dayalı bir model iyileştirme prosedürü kullanılmış; seçilen frekans bantlarında panel, tank ve reflektör rijitlik parametreleri değiştirilerek sonlu eleman modelinin doğal frekansları deneysel değerlere yakınsayan bir yapıya dönüştürülmüştür [3]. Bu tez, uydu sistemleri için global titreşim testlerinden elde edilen verilerin, ekipman veya alt sistem

düzeyinde sonlu eleman modelinin kalibre edilmesinde nasıl kullanılabileceğine dair iyi bir örnek oluşturmaktadır.

Uzay çalışmalarında yalnızca uçuşa yönelik gerçek yapıların değil, aynı zamanda kütle, kütle merkezi ve atalet özelliklerini temsil eden simülatör yapıların da tasarlandığı görülmektedir. EM-1 görevine ait Orion uzay aracının mürettebat ve servis modülleriyle birlikte genel görünümü Şekil 2.30'da örnek olarak sunulmaktadır. Ascoli ve Haddock, NASA Kennedy Uzay Merkezinde Orion Mürettebat Modülü/Servis Modülü için uçuş aracının yakıtlı ve yakıtsız konfigürasyonlarındaki kütle özelliklerini taklit eden bir Yapısal Ağırlık ve Kütle Merkezi Simülatörü (Structural Weight and Center of Gravity Simulator) tasarlamıştır. Bu yapının, çelik balast ve su tankları kullanılarak hem toplam kütle hem de kütle merkezi değerlerini gerçek uçuş aracına yeterli doğrulukta benzettiği rapor edilmektedir. Aynı çalışmada gövde üzerine uygulanacak yüklerin ve 5g yavaşlama durumunun temsil edildiği çeşitli bağlantı ve kiriş elemanları için sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş, özellikle bağlantı bölgelerinde hesaplanan Von Mises gerilmelerinin kullanılan alüminyum alaşımın izin verilen gerilme sınırlarının altında tutulduğu gösterilmiştir [69]. Bu çalışma, kütle ve atalet özellikleri bakımından uçuş konfigürasyonunu temsil eden simülatör yapı yaklaşımının, uydu ekipmanları için oluşturulan kukla modellerle benzer bir mühendislik mantığına dayandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2.30. EM1 uzay aracı Orion'un, mürettebat (1) ve servis (2) modülleriyle birlikte bir görseli [69]

Rastgele titreşim ortamının hassas elektro optik bileşenler üzerindeki etkisini irdeleyen çalışmalar, özellikle faydalı yük düzeyinde gerçekleştirilen testlerin önemini ortaya koymaktadır. Avşar, termal nişangâh sistemi kapsamında kullanılan görüntü yoğunlaştırıcı

tüpün rastgele titreşim yükleri altındaki dinamik davranışını incelemiş ve tüpe uygulanan titreşim spektrumunun, silah sisteminin geri tepmesi ile çevresel titreşimlerinden türetilen rastgele bir ivme girdisi olarak modellendiğini belirtmiştir. Çalışmada hem analitik hem de deneysel yöntemler kullanılarak rastgele titreşim altında ortaya çıkan ivme ve gerilme seviyeleri değerlendirilmiş, özellikle optik eksen doğrultusundaki ivme piklerinin görüntü kalitesi ile ekipman ömrü üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde tartışılmıştır [70]. Bu yaklaşım, uydu faydalı yükleri ve ekipmanlarının, görev ortamına özgü rastgele titreşim girdileri altında ayrı bir bileşen olarak değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Optik ve elektro optik faydalı yükler ile telekom kuleleri üzerinde yürütülen rastgele titreşim ve sönüm çalışmaları, benzer frekans aralıklarında çalışan sistemler için önemli analoji örnekleri sunmaktadır. Avşar, termal nişangâh sistemi kapsamında kullanılan görüntü yoğunlaştırıcı tüpün rastgele titreşim yükleri altındaki davranışını ayrıntılı biçimde incelemiş, silah sisteminin geri tepmesi ile çevresel titreşimlerden türetilen rastgele ivme girdisi altında oluşan ivme ve gerilme seviyelerini hem analitik hem de deneysel yöntemlerle değerlendirildiğini göstermiştir [70]. Capilla, üç parçadan oluşan bir telekom kulesi üzerinde gerçekleştirdiği çevresel titreşim ölçümleri ve rastgele titreşim testleri aracılığıyla modal sönüm oranlarını ve mod şekillerini belirlemiş, kule segmentleri arasındaki bağlantı detaylarının küresel sönüm düzeyi ve yapının dinamik tepkisi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur [71].

İmalat ve makine mühendisliği alanındaki yapısal analiz ile optimizasyon çalışmalarında da SEY modelleri için sınır koşullarının doğru tanımlanması, uzay yapılarında karşılaşılan problemle aynı düzeyde kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Arangarajan ve arkadaşları, takım tezgâhlarında kullanılan bir fikstür yapısını ANSYS Workbench yazılımı (ANSYS Workbench) ortamında analiz ederek gerilme ve yer değiştirme dağılımlarını incelemiş, geometri üzerinde kademeli iyileştirmeler uygulayarak hem akma sınırının altında kalan gerilme seviyelerinin hem de artmış rijitliğin elde edilebildiğini göstermiştir [72]. İsanç çalışmasında titreşim sönümleyici tasarımı için ANSYS ve ABAQUS ortamında oluşturduğu SEY modellerinde FRF eğrilerinden elde edilen tepe frekans ve genlikleri kullanarak sönümleyici geometrisini ve malzeme kalınlıklarını optimize etmiş; bu yöntemlerin uzay yapılarında da ivmeölçer verilerinden FRF ve PSD eğrileri çıkarılarak dinamik özelliklerin ayarlanmasında kullanılabileceğini ortaya koymuştur [60].

Son olarak, literatürdeki bazı çalışmalar doğrudan uzay sistemlerine ilişkin olmasa da, titreşim test verilerinin sonlu eleman modeli güncelleme ve model kalibrasyonu için nasıl kullanılacağını göstermeleri bakımından önemlidir. Örneğin, İsanç çalışmasında, titreşim sönümleyici (TVA) tasarımı için ANSYS ve ABAQUS ortamında sonlu eleman modelleri oluşturulmuş; FRF eğrilerinden elde edilen tepe frekansları ve genlikleri kullanılarak sönümleyicinin geometrisi ve malzeme kalınlıkları optimize edilmiştir [60]. Bu tür çalışmalar, uzay yapılarında da ivmeölçer verilerinden FRF ve PSD eğrileri çıkarılarak, hem sönüm elemanlarının hem de ana yapının dinamik özelliklerinin ayarlanmasına yönelik benzer yöntemlerin kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu tez kapsamında yukarıda ayrıntılı biçimde özetlenen çalışmaların yanı sıra, uzay ve havacılık uygulamalarında yapısal modelleme, çevresel testler, rastgele titreşim, modal analiz, yorulma ömrü tahmini ve optimizasyon konularında benzer yaklaşımlar sunan çok sayıda tez ve makale de incelenmiştir. Bu çalışmalar, özellikle uydu ve fırlatıcı yapılarının kalifikasyon felsefesi, rastgele titreşim altında dinamik tepkinin değerlendirilmesi, sonlu elemanlar yöntemi ile test-analiz doğrulaması ve kütle/atalet özelliklerinin hassas kontrolü gibi alanlarda bu tezde benimsenen metodolojinin arka planını güçlendirmektedir [4, 73-78].

Ayrıca, farklı ölçeklerdeki mekanik sistemler için yürütülen deneysel modal analiz, titreşim testi fikstürü geliştirme, sarsıcı sistem tasarımı, malzeme seçimi ve sonlu eleman model kalibrasyonu odaklı çalışmalar da bu tezin kapsamını genişleten bir referans havuzu oluşturmuştur. Bu çalışmalar; gerek klasik ışın, plaka ve gövde yapıları, gerekse küçük uydu gövdeleri, taşıyıcı yapılar ve test numunesi taşıyıcıları üzerinde gerçekleştirilen analiz ve testlerle, ağ yakınsaması, sınır koşulu idealizasyonları, arayüz rijitliği ve sönüm oranı seçimi gibi kritik modelleme kararlarının sonuçlar üzerindeki etkisini göstermekte ve bu tezde kukla ekipman için izlenen modelleme stratejisinin gerekçelendirilmesine katkı sağlamaktadır [78-84].

Son olarak, rastgele titreşim, sinüsoidal titreşim, akustik yükler ve şok ortamları altında elektronik kartlar, CubeSat yapıları, test fikstürleri, titreşim izolatörleri ve benzeri bileşenler için yapılan analiz ve test-analiz korelasyon çalışmaları da bu tezde önerilen kukla ekipman tasarım-doğrulama metodolojisinin genellenebilirliğini desteklemektedir. Bu kaynaklar; gürültülü yük spektrumlarının gRMS ve tepe PSD değerleri üzerinden değerlendirilmesi, çevresel test profillerinin görev senaryoları ile ilişkilendirilmesi, farklı malzemelerin ve

imalat yöntemlerinin dinamik performansa etkilerinin ortaya konulması ve ekipman seviyesinde yapısal doğrulama yaklaşımlarının çeşitliliğini göstermesi bakımından önem taşımaktadır [85-91].

3. KUKLA EKİPMAN TASARIMI

Bu tez çalışmasında incelenen kukla ekipman, alçak irtifa Dünya yörüngesinde görev yapması planlanan bir uydu platformunun yapısal yeterlilik modeli üzerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Proje yönetimi, uçuş modeli üretilmeden önce gerçek ekipmanın yerine geçebilecek bir kukla ekipman kullanılması kararını almıştır. Bu kukla yapının baskı devre kartı, elektronik bileşenler ve kablolama içermemesi istenmiş, buna karşılık kütle ve dinamik davranış bakımından gerçek ekipmanı temsil etmesi hedeflenmiştir. Bu çerçevede kukla modelin gerçek ekipman ile aynı montaj arayüzüne ve dış geometrik zarfa sahip olması temel bir gereksinim olarak tanımlanmıştır. Ayrıca kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri açısından belirlenen toleranslar içinde uçuş birimini temsil etmesi de tasarımın kritik hedeflerinden biri olarak kabul edilmiştir.

Kukla ekipmanın tasarımı, Siemens NX ortamında tek parça AL7075 T651 malzemeden oluşan üç boyutlu bir katı model üzerinden yürütülmüştür. Tasarım sürecinde mekanik imalat kısıtları ile sonlu eleman analizine uygunluk birlikte değerlendirilmiş, geometrik ayrıntılar bu iki gereksinim arasında denge gözetilerek belirlenmiştir. Elde edilen kukla model daha sonra Siemens Simcenter yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar ortamına aktarılmış ve ayrıntılı bir model oluşturulmuştur. Savunma sanayi şirketi bünyesinde yer alan test merkezinde gerçekleştirilen modal ve rastgele titreşim testleri ile ele alınan bu model sayesinde kukla ekipmanın hem geometrik kabiliyeti hem de dinamik davranışı değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır.

3.1. Kukla Ekipmanın Geometrik ve Fiziksel Temsili

Kukla ekipmanın tasarımındaki ilk adım, gerçek uçuş ekipmanına ait üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım modelinin ayrıntılı biçimde incelenmesi olmuştur. Bu inceleme ile geometrik olarak temsil edilmesi gereken dış yüzeyler, hacim zarfı ve arayüz bölgeleri ile kütle ve ataletsel büyüklükler açısından hedef alınacak fiziksel özellikler belirlenmiştir. Proje gereksinimleri doğrultusunda kukla modelin, gerçek ekipmanı hem geometrik hem de dinamik açıdan temsil edecek şekilde tasarlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla önce kukla modelin dış geometrik zarfının gerçek ekipman ile bire bir, yani bir bölü bir ölçekle oluşturulması sağlanmış ve uydu yapısal yeterlilik modeli içindeki yerleşim alanının ve hacim zarfının korunması amaçlanmıştır. Montaj deliklerinin, bağlantı arayüzünün ve taban

yüzey alanının gerçek ekipman ile aynı biçimde tanımlanması ile kukla modelin hem yapısal açıdan hem de entegrasyon adımlarında aynı sınır koşullarına maruz kalması güvence altına alınmıştır. Buna ek olarak kukla modelin kütle, kütle merkezi ve atalet momenti değerlerinin proje kapsamında tanımlanan tolerans aralıkları içinde gerçek ekipman ile uyumlu olması hedeflenmiştir. Böylece fırlatma ve rastgele titreşim yükleri altında ortaya çıkacak dinamik tepkinin gerçek donanıma mümkün olduğunca yakın gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Son olarak kukla ekipmanın uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde gerçek ekipman ile aynı bölgeye ve aynı oryantasyonda entegre edilebilmesini sağlayan bir bağlantı topolojisi benimsenmiştir. Bu sayede hem bilgisayar ortamındaki sonlu eleman temsilinin hem de yer testlerindeki montaj koşullarının tutarlılığı korunmuştur.

Benzer bir yaklaşım Ariane 5 fırlatmaları için geliştirilen MAQSAT kukla uydularında da izlenmiş; bu yapılarda, gerçek uyduyu temsil eden kukla uydu yapılarının kütle özellikleri ve temel doğal frekanslarının gerçek yük ile ±5-10 % aralığında tutulması hedeflenmiştir [18]. Küçük uydu ve küp uydu (CubeSat) çalışmalarında da kütle, kütle merkezi ve atalet momentlerinin ayrı bir kütle özellikleri raporu (mass properties report) ile belgelendiği ve bu büyüklüklerin ilgili standartlarda belirtilen toleranslar içinde tutulmasının zorunlu olduğu görülmektedir [2], [11], [15].

Bu tez kapsamında, gerçek ekipmanın x, y, z yönlerindeki yaklaşık dış boyutları sırasıyla 260 mm, 170 mm ve 240 mm olarak alınmış; kukla modelin de aynı dış ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanmasına dikkat edilmiştir. Böylece uydu üzerindeki kaplama yüzeyleri, komşu ekipmanlar ve kablolama için ayrılmış hacim içerisinde herhangi bir sapma oluşmadan, kukla modelin doğrudan gerçek ekipmanın yerine monte edilebilmesi mümkün kılınmıştır. Kukla ekipmanın toplam kütlesi yaklaşık 8 kg mertebesinde belirlenmiş ve tasarım boyunca bu hedef korunmuştur.

Kukla modelin iç geometrisi, dış ölçüler sabit tutulurken kütle dağılımını kontrol etmeye imkân verecek şekilde oluşturulmuştur. Bu amaçla, gövde içerisinde oyuk hacimler, kalınlık değişimleri ve lokal doluluk oranları parametrik olarak tanımlanmış; tasarım süreci boyunca bu parametreler üzerinde yinelemeli güncellemeler yapılmıştır. Benzer şekilde Israr çalışmasında, 7075-T6 alüminyum alaşımlı bir uydu yapısında alt sistemlerin yerleşimi, kütle dağılımını kontrol ederek kütle merkezini geometrik merkeze 1-2 cm içinde tutacak şekilde optimize edilmiştir. Her iterasyonda Siemens NX ortamında kütle özellikleri (kütle,

kütle merkezi konumu ve atalet momentleri) hesaplanmış; elde edilen değerler gerçek ekipmanın referans değerleri ile karşılaştırılmıştır [92].

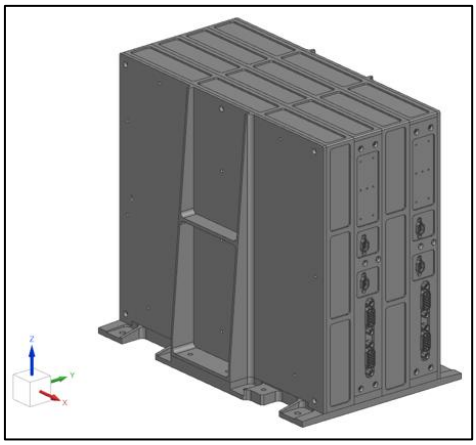
Kukla ekipmanın fiziksel boyutlandırması, gerçek ekipmanın dış zarf geometrisi ve montaj arayüzü "değiştirilemez kısıt" olarak tanımlanarak yürütülmüştür. Bu kapsamda taban arayüzü, delik yerleşimi ve hacim zarfı bire bir korunmuş; boyutlandırmanın serbestlikleri, gövde içindeki boşaltma hacimleri, et kalınlıkları ve lokal doluluk oranları üzerinden kurgulanmıştır. Tasarım değişkenleri, talaşlı imalat uygulanabilirliğini (minimum et kalınlığı, takım erişimi, köşe radyüsleri) ve yapısal bütünlüğü (lokal zayıflama riski) ihlal etmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır. Her iterasyonda Siemens NX ortamında kütle, kütle merkezi ve asal atalet momentleri yeniden hesaplanmış; elde edilen sapmalar doğrultusunda iç boşaltma bölgelerinin konumu ve hacmi güncellenerek hedef toleranslara doğru yakınsama sağlanmıştır. Böylece dış zarf ve arayüz korunurken, kukla ekipmanın kütlesel ve ataletsel özellikleri gerçek ekipmanı temsil edecek şekilde fiziksel olarak boyutlandırılmıştır.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, kukla model ile gerçek ekipman üç boyutlu modeli arasında; toplam kütlede yaklaşık %0,20, kütle merkezinde X yönünde yaklaşık %0,25, Y yönünde yaklaşık %0,21 ve Z yönünde yaklaşık %0,12 fark elde edilmiştir. Atalet momentleri açısından ise I_{xx} için yaklaşık %4,33, I_{yy} için %1,83 ve I_{zz} için %0,83 mertebelerinde sapmalar hesaplanmıştır. Literatürde Ariane 5 MAQSAT yapıları için kütle özellikleri ve temel mod frekanslarının ±5-10 % bandı içinde eşleştirildiği, CubeSat çalışmalarında ise kütle merkezi toleranslarının tipik olarak birkaç santimetre mertebesinde tanımlandığı dikkate alındığında, söz konusu farklar kukla modelin gerçek ekipmanı mühendislik açısından kabul edilebilir doğrulukta temsil ettiğini göstermektedir. Böylelikle kukla ekipman, uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde hem global modların hem de montaj arayüzüne iletilen dinamik yüklerin uçuş birimine yakın şekilde oluşmasına imkân verecek bir fiziksel temsil sağlamaktadır [2], [15], [18].

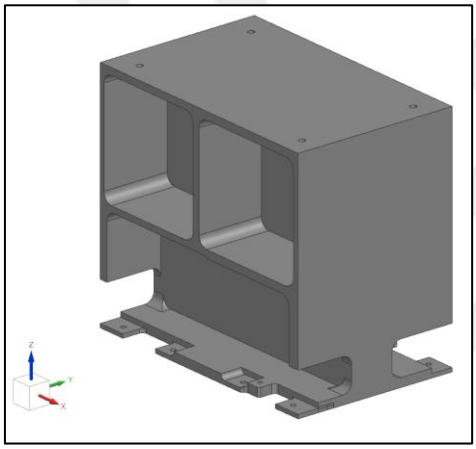
Ayrıca kukla model tasarlanırken, test ve analiz çalışmalarında kullanılacak sınır koşullarının gerçeğe mümkün olduğunca yakın uygulanabilmesi de dikkate alınmıştır. Bu amaçla montaj deliklerinin konumları, çapları ve aralarındaki mesafeler, gerçek ekipmanda kullanılan braket ve bağlantı geometrisi ile uyumlu olacak şekilde tanımlanmıştır. Böylece bir yandan sonlu eleman modelinde arayüz rijitliği yeterli doğrulukta temsil edilmiş, diğer

yandan savunma sanayi şirketi test merkezinde kullanılan test fikstürleri ile kukla ekipmanın doğrudan uyumlu olması sağlanmıştır. Literatürde yer alan kukla uydu ve yapısal maket çalışmalarında da montaj arayüzü ile delik düzeninin, gerçek yük ya da uçuş modeli ile bire bir olacak şekilde tasarlandığı ve bu sayede fırlatıcı arayüzünde benzer dinamik şartların elde edilebildiği rapor edilmektedir [14], [18].

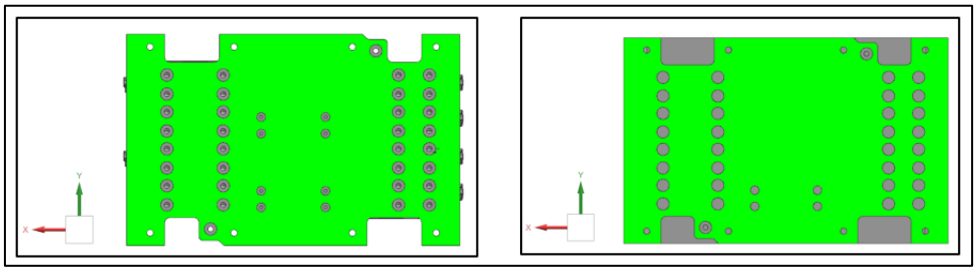
Gerçek ekipman ve kukla ekipmanın üç boyutlu genel görünüşleri, dış geometrik zarf ve hacimsel yerleşim açısından benzerliği göstermek amacıyla sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de sunulmuştur. Şekil 3.3'te ise her iki ekipmanın taban arayüzü ve montaj delik düzeni yan yana verilerek, delik yerleşimi, aralıkları ve arayüz boyutlarının ne ölçüde örtüştüğü görsel olarak ortaya konulmuştur. Çizelge 3.1'de sunulan kütle ve atalet özellikleri karşılaştırması ile değerlendirildiğinde, bu şekil ve çizelge, kukla ekipmanın uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde gerçek ekipmanın yerine herhangi bir ek adaptöre ihtiyaç duyulmadan monte edilebilmesini sağlamakta ve arayüz rijitliğinin analiz ve test çalışmalarında tutarlı biçimde temsil edilmesine imkân vermektedir.



Şekil 3.1. Gerçek ekipman 3B modeli genel görünüşü



Şekil 3.2. Kukla ekipman 3B modeli genel görünüşü



Şekil 3.3. Gerçek ve kukla ekipmanın taban arayüzü ve delik düzeni karşılaştırması

Çizelge 3.1. Gerçek ve kukla ekipmanın kütle ve atalet özellikleri karşılaştırması

	Kütle [kg]	Kütle Merkezi [mm]			Atalet Momenti [kg.mm²]		
		X	Y	Z	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
Fark (%)	0,20	0,25	0,21	0,12	4,33	1,83	0,83

3.2. Kütle Özellikleri ve Malzeme Tanımı

Kukla ekipmanın kütle özelliklerinin gerçek ekipmana olabildiğince yakın olması, hem modal analiz sonuçlarının hem de rastgele titreşim yanıtlarının temsil ediciliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle tasarım sürecinde, kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri için proje kapsamında belirlenen toleranslar dikkate alınmıştır.

Gerçek ekipmanın üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım modelinden elde edilen referans kütle özellikleri temel alınmış ve kukla modelin bu değerlere belirli bir eşleşme doğruluk düzeyi içinde yaklaşması hedeflenmiştir. Bu çerçevede, ilk olarak kukla modelin toplam kütlesi ile gerçek ekipmanın toplam kütlesi arasındaki farkın %1'in altında tutulması amaçlanmıştır. Böylelikle hem yapısal analizlerde hem de titreşim testlerinde kütleye bağlı dinamik yanıtın gerçek donanıma mümkün olduğunca yakın temsil edilmesi hedeflenmiştir.

Ayrıca, üç eksendeki kütle merkezi konumlarının binde mertebesinde sapmalarla eşleşmesi hedeflenerek, fırlatma ve rastgele titreşim yükleri altında oluşacak atalet etkilerinin gerçek ekipmanla uyumlu olması sağlanmaya çalışılmıştır. Benzer şekilde, başlıca atalet momentleri olan I_{xx}, I_{yy} ve I_{zz} bileşenleri için farkların yalnızca birkaç yüzde mertebesinin altında kalması hedeflenmiş; böylece kukla modelin dönel dinamik davranışının da gerçek ekipmanın atalet karakteristiklerini yeterli doğrulukta temsil etmesi amaçlanmıştır.

Uydu ve CubeSat literatüründe de, kütle merkezi ve atalet momentlerinin belirli toleranslar içinde tutulmasının hem fırlatıcı arayüzü hem de tutum kontrol performansı için zorunlu olduğu vurgulanmaktadır. Örneğin, Morettini ve arkadaşları çalışmasında, CubeSat'ler için kütle, kütle merkezi ve atalet momentlerinin ayrı bir rapor ile doğrulandığı ve test akışına geçmeden önce bu değerlerin uygunluğunun kontrol edildiği belirtilmektedir [2]. Süer ve Menteş çalışmalarında ise, Cubesat yapılarında kütle merkezinin geometrik merkeze üç eksende de birkaç milimetre seviyesinde yaklaştırıldığı ve bunun standartlarda tanımlanan 2 cm sınırlarının oldukça altında olduğu gösterilmektedir [11], [15]. Israr, büyük hacimli bir uydu yapısında, alt sistemlerin yerleşimi yoluyla kütle merkezinin geometrik merkeze 1-2 cm içinde tutulmasını tasarımın temel koşulu olarak tanımlamaktadır [92].

Siemens NX ortamında yürütülen iteratif tasarım çalışmaları sonucunda, kukla ekipman ile gerçek ekipman arasında kütlede yaklaşık %0,20; kütle merkezinde X yönünde %0,25, Y

yönünde %0,21 ve Z yönünde %0,12; atalet momentlerinde ise I_{xx} için yaklaşık %4,33, I_{yy} için %1,83 ve I_{zz} için %0,83 fark elde edilmiştir. Bu sonuçlar, hem proje kapsamında hedeflenen tasarım toleransları hem de literatürde raporlanan kukla uydu ve CubeSat çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, kukla ekipmanın dinamik açıdan gerçek ekipmanı temsil edebileceğini göstermektedir. Özellikle ilk doğal frekans ve küresel modların, kütle ve atalet momentlerindeki bu farklar altında fırlatıcı gereksinimlerini karşılayacak seviyede kaldığı, ilerleyen bölümlerde modal analiz sonuçları ile ortaya konulacaktır.

Kukla ekipmanın malzemesi olarak AL7075-T651 alüminyum alaşımının seçilmesinde, yüksek özgül mukavemet, iyi işlenebilirlik ve havacılık/uzay uygulamalarında yaygın kullanım gibi etkenler belirleyici olmuştur. Uzay yapılarında 7000 serisi alüminyum alaşımlarının yüksek akma dayanımı ve özgül mukavemetleri nedeniyle özellikle birincil taşıyıcı yapı elemanlarında tercih edildiği, hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda vurgulanmaktadır [15], [23]. Jovanovic çalışmasında, DEFIANT platformunun birincil yapısında alüminyum 7075-T651, ikincil elemanlarda ise 6061-T6 alaşımının kullanıldığı; birincil yapı üzerindeki daha yüksek gerilmelerin 7075 seçiminde belirleyici olduğu belirtilmiştir [23]. Süer ise TÜRKSAT 3USAT yapısında Al 7075-T73 malzemesiyle gerçekleştirilen analizlerde, fırlatma yükleri altında elde edilen gerilme seviyelerinin akma sınırının oldukça altında kaldığını göstermektedir [15].

AL7075-T651 alaşımının tek parça bir kütükten talaşlı imalat ile üretime imkân vermesi, montaj arayüzlerinde ilave bağlantı detaylarına ihtiyaç duymadan rijit bir gövde elde edilmesini sağlamaktadır; bu alaşıma ait temel mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir. Okuyama ve arkadaşları tarafından sunulan alüminyum alaşımlı kukla uydu çalışmasında da, yapısal kabuk (monokok) yapının içinin oyularak hem kütlenin azaltıldığı hem de yeterli rijitliğin korunduğu gösterilmiştir [14]. Benzer şekilde Israr, 7075-T6 alaşımlı uydu yapısında monoblok çözümlerle rijitliğin artırıldığını ve yükler altında bütünleşik bir gövde davranışının sağlandığını belirtmektedir [92]. Bu tezde de AL7075-T651 alaşımı, kukla ekipmanın hem kütle hedeflerini karşılamasına hem de sonlu eleman modelinde uçuş birimine benzer rijitlik değerleri elde edilmesine katkı sunmakta; test merkezinde gerçekleştirilen titreşim test altyapısı ve talaşlı imalat süreçleriyle uyumlu bir çözüm ortaya koymaktadır.

Kukla ekipmanın üç boyutlu katı modeli Siemens NX ortamında oluşturulmuş; kütle özelliklerinin doğru hesaplanabilmesi amacıyla modele AL7075-T651 malzemesi atanarak yoğunluk değeri tanımlanmıştır. Böylece NX'in kütle, kütle merkezi ve atalet momenti hesapları doğrudan geometrik hacim ve yoğunluk üzerinden yürütülmüş, sonuçlar ortak bir referans koordinat sisteminde raporlanarak gerçek ekipman modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizlerine aktarım aşamasında ise aynı malzeme kartı kapsamında elastisite modülü ve Poisson oranı gibi doğrusal elastik parametreler de tanımlanarak NX-CAE geçişinde birim tutarlılığı korunmuştur.

Sonuç olarak, bu bölümde tanımlanan kütle özellikleri ve malzeme seçimi, kukla ekipmanın hem geometrik hem de dinamik açıdan gerçek ekipmanı temsil etmesini sağlayan temel tasarım girdilerini oluşturmakta; bir sonraki bölümde sunulacak sonlu eleman modeli ve analiz adımları için başlangıç noktası niteliği taşımaktadır.

Çizelge 3.2. Kukla ekipmanda kullanılan AL7075-T651 malzeme özellikleri

Tanım	Sembol	Değer	Birim
Yoğunluk	ρ	2,81	kg/m³
Elastisite modülü	E	71,70	GPa
Kayma modülü	G	26,90	GPa
Poisson oranı	ν	0,33	
Çekme dayanımı	Rm	≈ 570	MPa
Akma dayanımı, 0,2%	Rp0,2	≈ 500	MPa
Kopma uzaması	A_{50}	≈ 11	%

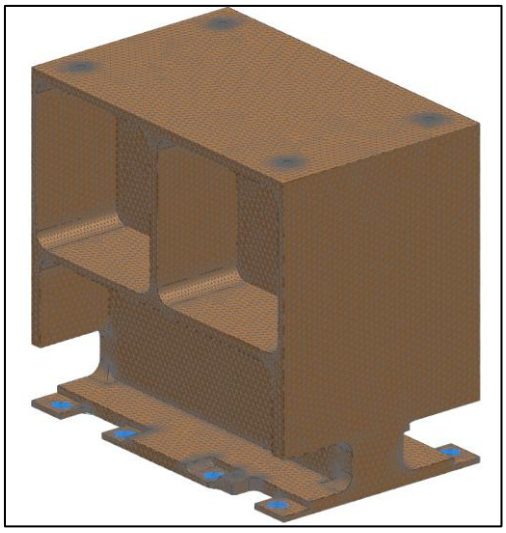
4. SAYISAL ANALİZLER

Bu bölümde, LEO yörüngesinde görev yapması planlanan bir uydu için tasarlanan ekipmanın kukla modeli üzerinde gerçekleştirilen sayısal analizler sunulmaktadır. Kukla ekipmanın tasarımı, üçüncü bölümde açıklandığı üzere Siemens NX ortamında oluşturulan üç boyutlu katı model üzerinden gerçekleştirilmiş; bu model Siemens Simcenter yazılımına aktarılmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak dinamik analizlere uygun bir sonlu eleman modeli (SEM) oluşturulmuştur.

Sayısal analiz kapsamı, fırlatma sırasında ekipmanın maruz kalacağı mekanik çevrenin temsil edilmesi için iki ana grupta toplanmıştır. İlk olarak, kukla ekipmanın küresel dinamik davranışının belirlenmesi amacıyla modal analiz gerçekleştirilmiş; bu analiz sonucunda doğal frekanslar, mod şekilleri ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. İkinci olarak, fırlatıcı kullanıcı kılavuzunda tanımlanan rastgele titreşim yük çevresinin ekipman üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla rastgele titreşim analizi yapılmış; bu analizlerde PSD ve toplam ivme seviyesi gibi büyüklükler hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, savunma sanayi şirketi test merkezinde aynı kukla ekipman üzerinde gerçekleştirilen rezonans tarama ve rastgele titreşim testlerinden elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılarak analiz-test korelasyonu değerlendirilmiştir.

4.1. Modelleme Yaklaşımı ve Varsayımlar

Kukla ekipman için sonlu eleman modelinin oluşturulmasında hem geometrik sadelik hem de dinamik davranışın doğru temsil edilmesi birlikte gözetilmiş; elde edilen sonlu eleman ağına ilişkin genel mesh görünümü Şekil 4.1'de sunulmuştur. Üçüncü bölümde ayrıntıları verilen kukla model, Siemens NX ortamında tek parça AL7075 T651 malzemeden oluşan üç boyutlu bir katı model olarak tanımlanmıştır. Bu model Siemens Simcenter yazılımına aktarılırken, analizi anlamlı ölçüde etkilemeyecek küçük detaylar ile keskin köşe tanımları mümkün olduğunca sadeleştirilmiştir. Böylece hem eleman sayısının kontrol altında tutulması hem de ağ kalitesinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 4.1. Kukla ekipmanın sonlu eleman modeli (genel mesh görünümü)

Sonlu eleman modelinde kukla ekipmanın gövdesi, üç boyutlu 10 düğümlü düzgün dörtyüzlü TET10 katı elemanlar ile temsil edilmiştir. Bu eleman türü, karmaşık geometriye sahip hacimlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmakta ve eğrisel yüzeylerin temsilinde yeterli esneklik sunmaktadır. Kukla ekipmanın kalınlık boyunca eğilme davranışının doğru biçimde yakalanabilmesi için kalınlık yönünde en az iki eleman tabakası tanımlanmıştır. Bu sayede özellikle montaj arayüzü çevresinde oluşabilecek eğilme gerinimlerinin daha gerçekçi temsil edilmesi amaçlanmıştır. Dördüncü bölümün ilerleyen alt başlıklarında ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere, eleman boyutu 33 mm düzeyinden 5 mm düzeyine kadar kademeli olarak düşürülmüş ve yapılan mesh yakınsama çalışmaları sonucunda 5 mm'lik hedef eleman boyutunun modal frekanslar açısından yeterli doğruluk sağladığı görülmüştür.

Modelleme yaklaşımında, uzay yapıları literatüründe yaygın olarak kabul gören varsayımlar temel alınmıştır. Ekipmanın malzemesinin doğrusal elastik, izotrop ve homojen bir davranış gösterdiği kabul edilmiştir. AL7075 T651 alaşımına ait elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk gibi elastik malzeme özellikleri, standart malzeme kataloglarında verilen değerler esas alınarak modele tanımlanmıştır. Fırlatma sırasında ekipmanın maruz kalacağı dinamik yükler, küçük şekil değiştirme varsayımı altında değerlendirilmiş, bu doğrultuda malzeme doğrusal olmayan ile temas kaynaklı doğrusal olmayan etkiler ve büyük yer değiştirmeler çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Söz konusu kabullerin özellikle ilk modlara ait frekans ve mod şekillerinin belirlenmesi ile rastgele titreşim altında ekipman üzerinde oluşan

ivme ve gerilme seviyelerinin mühendislik açısından yeterli doğrulukta tahmin edilmesi için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Kukla ekipman ile test tablası arasındaki bağlantı, sonlu eleman modelinde idealleştirilmiş cıvata temsil elemanları kullanılarak modellenmiştir. Bu amaçla montaj deliklerinin çevresinde yer alan düğüm noktaları, rijit bağlantı elemanları (RBE2) aracılığıyla ortak bir düğümde toplanmıştır. Elde edilen bu düğümler ile test tablasını temsil eden ortak referans düğüm arasında ise bir boyutlu burç tipi elemanlar tanımlanmıştır. Söz konusu CBUSH elemanları, bağlantının üç doğrultudaki ötelenme rijitliklerini ve üç eksen etrafındaki dönel rijitliklerini temsil edecek biçimde parametrelenmiştir. Ayrıntılı katılık değerleri dördüncü bölümün ilgili alt başlığında çizelge halinde sunulmaktadır. Böylece cıvata bağlantılarının tüm geometrik ayrıntıları modellenmeden montaj arayüzünün küresel rijitliğinin ve yük aktarım karakteristiklerinin sayısal modele dâhil edilmesi amaçlanmıştır

Kukla ekipmanın imalatında tercih edilen AL7075-T651 temperi, yüksek dayanımın yanında imalat sonrası boyutsal kararlılığın artırılmasına ve artık gerilmelerin azaltılmasına yönelik bir koşul olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ekipman seviyesindeki dinamik testlerde gözlenen sönüm, yalnızca malzemenin içsel sönüm karakteristiğinin bir sonucu olmayıp; montaj arayüzlerindeki temas koşulları, cıvata ön yüklerinin dağılımı, sürtünme kaynaklı mikro kaymalar, sensör montajı ve kablolama gibi sistem seviyesindeki etkilerle birlikte ortaya çıkan “etkin sönüm” davranışını temsil etmektedir. Bu nedenle çalışmada sönüm oranı başlangıçta mühendislik varsayımı olarak tanımlanmış; ardından rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD-frekans eğrileri üzerinden deneysel olarak hesaplanarak sayısal modele geri beslenmiş ve böylece temper durumundan bağımsız olarak gerçek sistem davranışına daha yakın bir sönüm temsili sağlanmıştır.

Dinamik analizlerde sönüm etkisini temsil etmek için modal analizde yalnızca özdeğerler ve özvektörler elde edilmiş, bu nedenle sönümsüz bir çözüm tercih edilmiştir. Rastgele titreşim analizlerinde ise başlangıçta tüm modlar için %2,5 oranında oransal yani modal sönüm tanımlanmıştır. Bu değer, literatürde küçük uydu yapıları ve uzay ekipmanları için kullanılan tipik sönüm oranları ile uyumlu olup ilk aşamada referans bir başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Daha sonra rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD ile frekans eğrileri kullanılarak Z ekseni için yarı güç bant genişliği yöntemi ile deneysel sönüm oranı hesaplanmış, elde edilen değer modele geri beslenmiş ve rastgele titreşim analizleri bu yeni

sönüm oranı ile yeniden yürütülmüştür. Böylece sayısal modelin gerçek sistem davranışına daha fazla yaklaşması sağlanmıştır.

Bu varsayımlar altında oluşturulan sonlu eleman modeli, izleyen alt başlıklarda önce ağ stratejisi ve yakınsama davranışı, ardından sınır koşulları ve arayüz temsili açısından ayrıntılı biçimde tanımlanmaktadır. Daha sonraki bölümlerde ise bu model kullanılarak gerçekleştirilen modal analiz ve rastgele titreşim analizlerinin sonuçları sunulmakta ve tartışılmaktadır.

4.2. Mesh Stratejisi ve Yakınsama

Kukla ekipmanın sonlu eleman modelinde izlenen mesh stratejisinde, hem geometrik karmaşıklığın doğru temsil edilmesi hem de hesaplama maliyetinin kontrol altında tutulması hedeflenmiştir. Sonlu elemanlar literatüründe, çok kaba ağların çözüm süresini kısalttığı ancak doğal frekanslar ile gerilme dağılımlarında belirgin sapmalara neden olabildiği belirtilmektedir. Buna karşılık, aşırı derecede ince ağların çözüm maliyetini hızla yükselttiği ifade edilmektedir. Bu nedenle doğruluk ile maliyet arasındaki dengenin dikkatle gözetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [24], [62]. Bu yaklaşım doğrultusunda kukla ekipman gövdesi için Siemens Simcenter ortamında üç boyutlu, on düğümlü dörtyüzlü TET10 elemanlar tercih edilmiştir. Karmaşık iç boşaltmalar, delikler ve yuvarlatılmış bölgeler de bu eleman türü kullanılarak temsil edilmiştir.

Mesh yakınsama çalışması kapsamında kukla ekipmanın hacmi, 33 mm hedef eleman boyutundan başlayarak 26 mm, 20 mm, 15 mm, 11 mm, 8 mm, 6 mm ve son olarak 5 mm hedef eleman boyu ile tekrar tekrar ağlanmıştır. Her bir ağ konfigürasyonu için ayrı bir modal analiz çözülmüş ve ilk doğal frekans değeri kaydedilmiştir. Bu yaklaşım, literatürde roket gövde yapıları ve karmaşık taşıyıcı elemanlar için uygulanan ve frekans ile eleman sayısı arasındaki ilişkiye dayanan mesh yakınsama çalışmalarına benzer biçimde kurgulanmıştır [93]. İlgili tez çalışmasında da, ilk mod frekansının farklı eleman sayıları için grafiğe aktarılmasıyla, frekans değerinde anlamlı bir değişim kalmadığı noktada “yakınsama” kriterinin sağlandığı kabul edilmiştir. Benzer biçimde Seara de Sá, sonlu eleman modelinin, eleman sayısı arttıkça süreklilik çözümüne yaklaşan, ancak pratikte frekanstaki değişimin kabul edilebilir düzeye indiği noktada durdurulması gereken yinelemeli bir süreç olduğunu vurgulamaktadır [24].

Bu tezde gerçekleştirilen mesh yakınsama çalışmasının sonuçları, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2'de özetlenmektedir. Çizelge 4.1'de her bir hedef eleman boyu için toplam eleman sayısı ve birinci mod frekansı verilmektedir. Şekil 4.2'de ise frekans ile eleman sayısı arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilmektedir. 33 mm hedef eleman boyunda yaklaşık 106 061 elemanla elde edilen birinci mod frekansı 250,96 Hz iken, 5 mm hedef eleman boyunda eleman sayısı yaklaşık 362 932 seviyesine çıkmakta ve birinci mod frekansı 249,60 Hz olarak hesaplanmaktadır. Bu iki uç durum arasındaki fark, birinci mod için yaklaşık %0,55 mertebesinde kalmaktadır. 11 mm ve daha küçük eleman boylarında, 1. mod frekansı ile 5 mm referans mesh arasındaki göreli farkın %0,05'in altına indiği görülmektedir. 6 mm ile 5 mm hedef eleman boyları karşılaştırıldığında ise farkın 0,01 Hz düzeyine kadar düştüğü izlenmektedir. Bu davranış, ilk doğal frekans için çözümün yaklaşık 11 mm civarından itibaren doyuma ulaştığını göstermektedir. 5 mm hedef eleman boyunun hem yakınsamış bir çözüm sunduğu hem de güvenli tarafta bir tercih olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmaktadır.

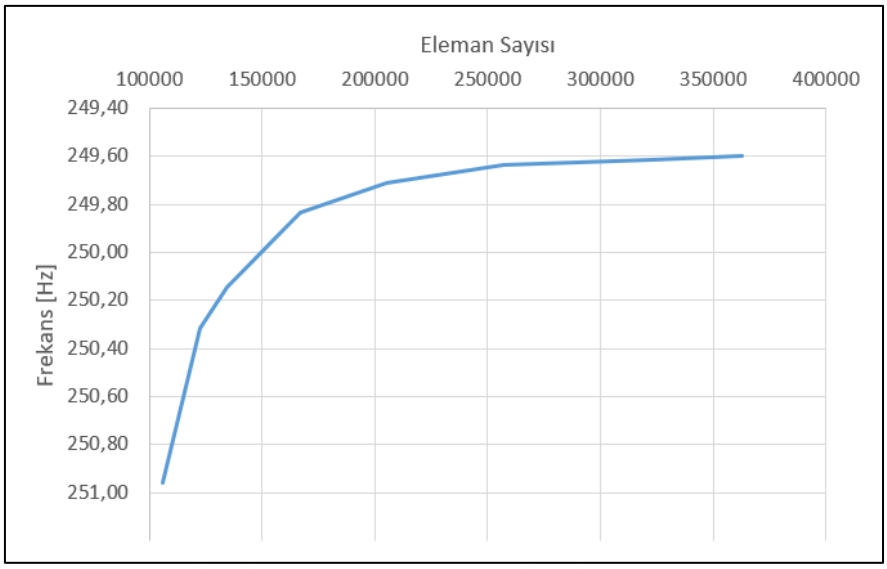
Diğer tez çalışmalarında da benzer ağ (mesh) stratejilerinin kullanıldığı görülmektedir. Qaumi, roket aeroyapısı üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada çok kaba (super-coarse) düzeyden çok ince (super-fine) düzeye kadar beş farklı ağ (mesh) derecesi tanımlamış ve her bir derecede birinci mod frekansını hesaplamıştır. Frekanstaki değişim oranının belirli bir seviyenin altına düşmesi durumunda çözümün yakınsadığını, dolayısıyla seçilen ağ (mesh) derecesinin analiz açısından yeterli kabul edilebileceğini ifade etmiştir [93]. Torres ise, karmaşık geometriye sahip parçalar için dörtyüzlü elemanların (tetrahedron) yerel mesh kontrolleriyle birlikte kullanılmasının hem geometri uyumu hem de yakınsama davranışı açısından uygun bir çözüm olduğunu vurgulamaktadır [62]. Kaya ve Nalbant çalışmasında, titreşim test fikstürü için hexa ve tetra eleman tipleri karşılaştırılmıştır [40]. Elde edilen bulgular, dörtyüzlü elemanlar kullanıldığında ağ kalitesinin daha yüksek olduğunu ve modal ile rastgele titreşim analizlerinde gereken doğal frekans ve gRMS değerlerinin standartlara uygun biçimde elde edilebildiğini göstermiştir. Kurt ise ince cidarlı otomotiv ve havacılık yapılarında kabuk (CQUAD4) elemanların tercih edilmesini, kalınlığın çok küçük olduğu durumlarda hesaplama verimliliği açısından uygun görmektedir [66]. Buna karşılık, bu tezde incelenen ekipman gibi hacimli ve kalın gövdeler için üç boyutlu katı elemanların daha doğru bir temsil sunduğuna işaret edilmektedir.

Kukla ekipmanın kalınlık yönündeki eğilme davranışını daha gerçekçi temsil edebilmek için, sonlu eleman modelinde kalınlık boyunca iki eleman tabakası tanımlanmıştır. Delik çevrelerinde, köşe geçişlerinde ve montaj arayüzünün yer aldığı bölgelerde yerel mesh sıklaştırması uygulanmış, bu sayede bu bölgelerdeki gerilme ve yer değiştirme gradyanlarının daha sağlıklı biçimde yakalanması amaçlanmıştır. Ağ kalitesi, eleman bozulması, düğümler arası açı sapmaları ve en boy oranı gibi ölçütler üzerinden kontrol edilmiş, literatürde önerilen kalite aralıkları ile uyumlu olmayan elemanlar düzeltilmiş ya da ilgili bölgeler yeniden ağlanmıştır [62], [66].

Sonuç olarak, 5 mm hedef eleman boyu ve yaklaşık 362 000 TET10 eleman içeren mesh yapısı, ilk doğal frekansın yakınsaması, yerel gerilme alanlarının temsil gücü ve hesaplama maliyeti birlikte değerlendirildiğinde bu tez çalışması için nihai sonlu eleman mesh yapısı olarak seçilmiştir. Bu mesh, dördüncü bölümün devamında sunulan sınır koşulları ile modal analiz ve rastgele titreşim analizleri için temel teşkil etmektedir.

Çizelge 4.1. Ağ yakınsama sonuçları

Eleman Boyutu [mm]	Eleman Sayısı	Frekans [Hz]
5	362 932	249,60
6	323 112	249,61
8	257 366	249,64
11	205 473	249,71
15	167 118	249,84
20	134 222	250,14
26	122 725	250,32
33	106 061	250,96



Şekil 4.2. Ağ yakınsama (mesh convergence) eğrisi

4.3. Sınır Koşulları ve Arayüz Temsili

Kukla ekipmanın sayısal modelinde sınır koşullarının tanımlanmasında temel amaç, test merkezinde kullanılan titreşim test düzeneklerinin olabildiğince gerçekçi bir temsilini elde etmek ve buna rağmen sonlu eleman modelini gereksiz ayrıntı ve hesap yükü ile karmaşıklaştırmamaktır. ECSS dokümanında, sonlu eleman alt sistemlerinin dar bant frekans yanıtının sınır koşulu varsayımlarına oldukça duyarlı olabildiği ve bu nedenle sınır koşullarının dikkatle seçilmesi gerektiği özellikle vurgulanmaktadır [5]. Bu tez çalışmasında da kukla ekipman ile test tablası arasındaki arayüz, hem montaj cıvatalarının yük aktarımını hem de fırlatma ortamını temsil eden rastgele titreşim girdilerinin uygulanmasını sağlayan idealize bir sınır koşulu modeli ile temsil edilmiş olup, bu modele esas alınan CBUSH eleman katılık bileşenleri Çizelge 4.2'de, taban arayüzü ile CBUSH-RBE2 bağlantılarının detay görünümü ise Şekil 4.3'te sunulmaktadır.

Literatürde, uzay yapıları ve ayırma sistemleri için oluşturulan sonlu eleman modellerinde cıvatalı bağlantıların genellikle RBE2 rijit diyafram elemanları ve CBUSH yay ve sönüm elemanları ile idealize edildiği belirtilmektedir. Örneğin Briese ve Möller çalışmasında, ayırma sistemi ile fırlatıcı arayüzü arasındaki her bir cıvata, iki adet RBE2 elemanı ve bu iki eleman arasında tanımlanan sıfır uzunluklu bir CBUSH elemanı ile modellenmiştir [48]. Burç tipi elemanlara tüm doğrultularda yüksek çevrimsel ve dönel katılık değerleri atanmış, böylece cıvataların pratikte rijit davrandığı kabul edilmiştir. Aynı modelde bu CBUSH

elemanlarının diğer ucu, tüm serbestlik derecelerinin 6 SD sabitlendiği ortak bir düğüme bağlanmakta ve rastgele titreşim girdisi bu düğüm üzerinden uygulanmaktadır. ECSS'de, tipik bir rastgele titreşim testinde test numunesinin bir fikstür üzerinden sarsıcı tablasına cıvatalarla bağlandığı, kontrol ivmeölçerlerinin ise arayüze yakın noktalara yerleştirildiği bir konfigürasyonun esas alındığı ifade edilmektedir [13].

Bu tez kapsamında oluşturulan modelde, kukla ekipman ile test tablası arasındaki bağlantı, literatürdeki benzer uygulamalarla uyumlu olacak şekilde idealleştirilmiştir. Kukla ekipmanın taban yüzeyinde yer alan sekiz adet montaj deliğinin çevresindeki katı eleman düğümleri, her bir delik için tanımlanan birer rijit bağlantı elemanı (RBE2) aracılığıyla "delik başı düğümü"ne bağlanmıştır. Bu rijit bağlantı elemanları (RBE2), delik çevresindeki düğümlerin tüm öteleme ve dönme serbestlik derecelerini delik başı düğümünde toplayarak delik çevresinin rijit diyafram benzeri bir davranış sergilemesini sağlamaktadır. Her bir delik başı düğümü ile test tablasını temsil eden ortak referans düğüm arasına ise birer burç tipi eleman yerleştirilmiştir. Bu burç tipi elemanlar, üç doğrultudaki öteleme ve üç eksen etrafındaki dönme katılık bileşenleri ile montaj cıvatalarının küresel rijitliğini idealize etmektedir. Katılık değerleri belirlenirken savunma sanayi şirketi iç tasarım girdileri, fikstür geometrisi ve test düzeninin rijitlik gereksinimleri birlikte değerlendirilmiş, elde edilen katılık bileşenleri Çizelge 4.2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

CBUSH ve RBE2 elemanlarına dayanan bu arayüz temsili, literatürde raporlanan modellere benzer biçimde, cıvata geometrisinin ayrıntılı olarak modellenmesine gerek kalmadan arayüz rijitliğini ve yük aktarımını yeterli doğrulukta temsil etmektedir. Briese ve Möller çalışmasında, her bir cıvatanın RBE2 CBUSH RBE2 zinciri üzerinden ayırma halkasına bağlandığı ve CBUSH elemanının diğer ucunun tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiş tek bir düğüme tanımlandığı ifade edilmektedir [48]. Benzer biçimde ECSS'de, rastgele titreşim analizlerinde kullanılacak alt sistem modellerinde arayüz koşullarının, örneğin rijit veya esnek uç koşulları ile cıvata temsil elemanlarının, test konfigürasyonu ile tutarlı olacak şekilde tanımlanması gerektiği vurgulanmaktadır [5]. Ayrıca sınır koşulları ile ilgili varsayımların dinamik cevap üzerindeki etkisinin mutlaka sorgulanması ve bu etkinin duyarlılık açısından değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

Bu tezde modal analiz için kullanılan sınır koşulu, titreşim test tablasının davranışını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Sonlu eleman modelinde test tablası, burç tipi elemanların Z

doğrultusunda tabla ile bağlantılı uçlarının bağlandığı ortak bir referans düğüm ile temsil edilmiştir. Modal analiz aşamasında bu referans düğümün üç çevrimsel serbestlik derecesi (Serbestlik Derecesi, X, Y, Z) sabitlenmiş, buna karşılık üç dönel serbestlik derecesi (Serbestlik Derecesi, R_x, R_y, R_z) serbest bırakılmıştır. Böylece kukla ekipman, çekirdekte rijit kabul edilen bir test tablasına, üç doğrultuda yer değiştirmesi engellenmiş ancak dönel serbestlikleri kısıtlanmamış bir arayüz üzerinden bağlanmış olmaktadır. Bu yaklaşım, hem test düzeneklerinde sarsıcı tablasının pratikte yüksek rijitliğe sahip olması ile uyumlu kabul edilmektedir hem de literatürde ekipman seviyesindeki rastgele titreşim ve modal testlerde yaygın olarak kullanılan "3 çevrimsel Serbestlik Derecesi sabit, 3 dönel Serbestlik Derecesi serbest" sabitleme yaklaşımını takip etmektedir.

Rastgele titreşim analizlerinde de aynı arayüz temsili kullanılmıştır. Bu durumda, sınır koşulu tanımına ek olarak taban girdisinin tanımlanması söz konusudur. Ortak referans düğüm yine 3 çevrimsel serbestlik derecesinde sabitlenmiş, dönel serbestlikler serbest bırakılmıştır. İlgili eksende (X, Y veya Z) tanımlanan rastgele titreşim girdisi, ivme bazlı taban uyarımı şeklinde bu düğüme uygulanmıştır. Böylece ECSS'de tanımlandığı gibi, test numunesinin bir test fikstürü üzerinden elektrodinamik sarsıcı tablasına cıvatalarla bağlandığı ve taban uyarımı şeklinde rastgele titreşim yüküne maruz bırakıldığı durum, sayısal modelde base-excitation yaklaşımıyla temsil edilmiştir [13]. Türker tarafından tasarlanan titreşim test fikstüründe, gerçek ürünler yerine eşdeğer kütle ve atalet özelliklerine sahip kukla birimlerin alt yüzeydeki montaj delikleri üzerinden fikstüre cıvatalandığı ve kontrol ivmeölçerlerinin bu arayüze yakın konumlara yerleştirildiği ifade edilmektedir [94]. Bu tezde kullanılan kukla ekipman, fikstür ve sarsıcı sisteminin birlikte ele alındığı temsilin de bu uygulama ile yöntemsel olarak uyumlu olduğu sonucuna varılmaktadır.

Sonuç olarak, kukla ekipmanın sonlu eleman modelinde kullanılan sınır koşulları ve arayüz temsili belirli varsayımlar çerçevesinde yapılandırılmaktadır. Öncelikle sekiz montaj deliği çevresinde RBE2 elemanları kullanılarak rijit diyafram bölgeleri oluşturulmakta, bu sayede delik çevresindeki düğüm noktaları her bir delik için tanımlanan rijit bir referans noktaya bağlanarak arayüz rijitliği idealize edilmektedir. Bu diyafram bölgelerinden test tablasını temsil eden ortak referans düğüme uzanan CBUSH elemanları tanımlanmakta, böylece kukla ekipman ile test tablası arasındaki bağlantı eksenel ve kesme rijitliklerini temsil eden bir dizi bir boyutlu eleman üzerinden modellenmektedir.

Referans düğüm, modal analiz aşamasında taban hareketi bulunmayan ve dolayısıyla çevrimsel yer değiştirme yapmayan sabit bir nokta olarak kabul edilmektedir. Bu sayede yapının serbest titreşim karakteristikleri taban hareketinden bağımsız biçimde elde edilmektedir. Rastgele titreşim analizlerinde ise aynı referans düğüm bir yandan sabit sınır koşulu altında tutulmakta, diğer yandan taban uyarımının uygulandığı nokta olarak değerlendirilmektedir. Böylece hem sabit tabanlı tepki hem de taban zorlaması altındaki dinamik davranış, çalışmanın amacı ile uyumlu ve kendi içinde tutarlı bir biçimde temsil edilmektedir. Bu yaklaşım, kukla ekipmanın modal ve rastgele titreşim analizlerinde kullanılan sınır koşulları ile arayüz modellemesinin genel çerçevesini özetlemektedir. Söz konusu idealizasyon, test merkezinde kullanılan gerçek test arayüzünün temsil edilmesine olanak sağlamakta ve literatürde yaygın biçimde yer alan cıvata ile arayüz modelleme yaklaşımları ile de uyum göstermektedir. Bu temel üzerine bir sonraki alt bölümde modal analiz sonuçları, ardından rastgele titreşim analizine ilişkin ayrıntılar sunulacaktır.

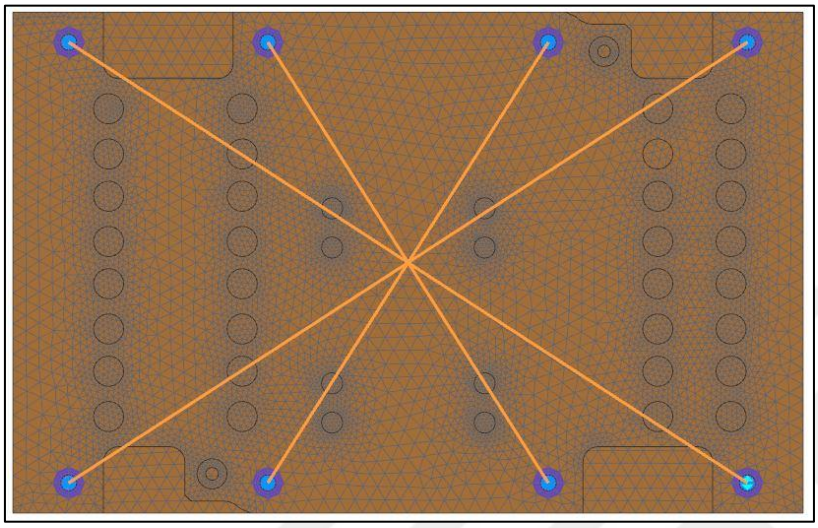
Özetle, bu tez kapsamında sayısal analizlerde kullanılan sınır koşulları, deneysel titreşim test düzeneklerini temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Kukla ekipman, taban arayüzündeki montaj delikleri üzerinden idealize edilerek delik çevresi düğümleri RBE2 elemanları ile her bir delik için tekil bir referans düğümde toplanmış; bu düğümler CBUSH elemanları aracılığıyla test tablasını temsil eden ortak bir referans düğüme bağlanmıştır. Modal analizde, test tablasının yüksek rijitlikte olduğu kabulüyle ortak referans düğümün üç çevrimsel serbestlik derecesi (X, Y, Z) sabitlenmiş, üç dönel serbestlik derecesi (R_x, R_y, R_z) serbest bırakılarak ekipmanın tabla üzerindeki bağlanma koşulu modellenmiştir. Rastgele titreşim analizlerinde ise aynı arayüz temsili korunmuş ve ilgili eksendeki taban ivme girdisi ortak referans düğüme taban uyarımı (base-excitation) olarak uygulanmıştır; böylece analiz koşulları ile test konfigürasyonu arasında tutarlı bir sınır koşulu eşleştirmesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.2. CBUSH eleman katılık değerleri

Tanım	Değer
X Yönü	$10*10^9$ N/mm
Y Yönü	$10*10^9$ N/mm
Z Yönü	$10*10^9$ N/mm
X Radyan Başına Dönüş	$1000*10^9$ N.mm

Çizelge 4.2. (devam) CBUSH eleman katılık değerleri

Y Radyan Başına Dönüş	$1000*10^9$ N.mm
Z Radyan Başına Dönüş	$1000*10^9$ N.mm



Şekil 4.3. Taban arayüzü ve CBUSH-RBE2 bağlantılarının detay görünümü

4.4. Modal Analiz

Modal analiz, bir yapının doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönümleme özelliklerini belirlemeye yönelik temel bir yapısal analiz türüdür. Bu yöntem, sistemin kütle, katılık ve sınır koşulu bileşenlerine bağlı olarak titreşim karakteristiğini ortaya koymaktadır. Çoban ve Özkan çalışmalarında da vurgulandığı üzere doğal frekanslar ve mod şekilleri, bir yapının dış zorlamalar bulunmadığı durumda hangi frekanslarda ve nasıl titreştiğini tanımlamaktadır [27], [95]. Bu modal büyüklükler, rezonans riskinin değerlendirilmesi ve tasarım optimizasyonu için bir başlangıç noktası oluşturmaktadır. Arslan, uydu yapıları bağlamında modal analizin, özellikle doğal frekansların fırlatma ortamı ile etkileşimini anlamak ve kritik modlarda gerekli yapısal iyileştirmeleri tanımlamak amacıyla kullanıldığını belirtmektedir [9].

Fırlatma aracı kullanıcı kılavuzlarında, uydu ve uydu bileşenlerinin doğal frekanslarına ilişkin alt sınırlar tanımlanmaktadır. Rezonansın önlenmesi için uydu ile fırlatma aracının doğal frekanslarının belirli aralıklarda birbirinden ayrık olması gerektiği ifade edilmektedir. Arslan, fırlatma aracı kullanım kılavuzlarında genellikle 100 Hz mertebesine kadar bir doğal

frekans bandı tanımlandığını, bileşen seviyesinde ise titreşim izolasyon teorisi kullanılarak bileşen doğal frekansı için alt sınırların türetildiğini belirtmektedir [9]. Koçmar çalışmasında da, fırlatma süreci boyunca rezonansları önlemek amacıyla hassas tutucu bir ayağın doğal frekanslarının genellikle 140 Hz üzerinde tutulması gerektiği belirtilmektedir [47]. Modal analiz sonuçlarının da minimum doğal frekansın bu sınırın üzerinde kaldığını gösterdiği ifade edilmektedir. Bu tezde incelenen ekipman için de proje kapsamında birinci doğal frekansın en az 140 Hz olması bir tasarım gereksinimi olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen modal analiz ile bu gereksinimin sağlandığı, ilk 20 moda ait doğal frekanslar ve kütle katılım oranlarının Çizelge 4.3'te toplu olarak sunulmasıyla nicel olarak ortaya konulmuştur.

Literatürdeki uydu ve bileşen çalışmaları, modal analizlerin hem fırlatma gereksinimlerinin doğrulanması hem de sonlu eleman modellerinin deneysel verilerle korelasyonu için kullanıldığını göstermektedir. Seara de Sá, ISTSat-1 CubeSat yapısı için hazırladığı çalışmada, sonlu eleman modelinden elde edilen modların, modal test ile ölçülen modlarla MAC kullanılarak 1400 Hz'e kadar kıyaslandığını ve temel frekansın fırlatma otoritesinin talep ettiği alt sınırın üzerinde olduğunu göstermektedir [24]. Kaya ve Nalbant ise, adaptör yapıları için 20 moda kadar modal analiz gerçekleştirilmiştir. 2800 Hz'e kadar elde edilen doğal frekanslar kullanılarak, hem hedeflenen ilk mod frekansının üzerinde kalındığı hem de test aralığına kadar yeterli sayıda modun çözüldüğü rapor edilmiştir [40]. Benzer yaklaşımlar, Çam tarafından metot uydu yapısı için, Çoban tarafından ise vinç bom sistemleri için de kullanılmıştır. Her iki çalışmada da modal analiz sonuçları, tasarımın rijitlik gereksinimleri ve rezonans güvenliği ile ilişkilendirilmiştir [10], [95].

Bu tez kapsamında LEO yörüngesinde görev yapacak bir uyduya ait ekipmanın kukla modeli için modal analizler, Siemens Simcenter ortamında SOL 103 çözüm tipi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde ayrıntıları verilen sonlu eleman modelinde kukla ekipman gövdesi üç boyutlu TET10 katı elemanlarla temsil edilmiştir. Montaj arayüzü ise RBE2 ve CBUSH eleman kombinasyonları kullanılarak savunma sanayi test merkezi titreşim test tablasını idealize edecek şekilde modellenmiştir. Sınır koşulu olarak CBUSH elemanlarının test tablasını temsil eden referans düğümü 3 çevirimsel serbestlik derecesinde, X, Y ve Z doğrultularında sabitlenmiş; 3 dönel serbestlik derecesi olan R_x, R_y ve R_z bileşenleri serbest bırakılmıştır. Bu yaklaşım hem test merkezinde kullanılan test düzeneklerindeki rijit tabla davranışını yansıtmakta hem de literatürde ekipman seviyesinde

yaygın olarak kullanılan, 3 çevrimsel serbestlik derecesinin sabit ve 3 dönel serbestlik derecesinin serbest bırakıldığı modal sabitleme stratejisi ile uyum göstermektedir.

Modal analizde frekans aralığı 20 ile 2800 Hz arasında tanımlanmış ve bu aralıkta 20 mod çözdürülmüştür. Elde edilen ilk 6 modun rijit cisim (rigid body) davranışını temsil etmediği görülmektedir. Bu durum, uygulanan sınır koşulları altında kukla ekipmanın artık serbest bir cisim gibi değil, test tablasına bağlanmış bir alt sistem gibi davrandığını göstermektedir. Modal çözümler sonucunda elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ve kütle katılım oranları Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. İlk 3 küresel mod, kukla ekipmanın serbest titreşim davranışını temsil eden temel modlar olarak belirlenmiştir. Birinci mod, Y ekseni doğrultusunda küresel eğilme karakterine sahip olup yaklaşık 262,21 Hz frekansta ortaya çıkmaktadır. İkinci mod, X ekseni doğrultusunda küresel eğilme modu olarak tanımlanmış ve frekansı yaklaşık 360,64 Hz olarak elde edilmiştir. Üçüncü mod ise Z ekseni doğrultusunda küresel eğilme davranışı sergilemekte olup yaklaşık 660,12 Hz frekansta gerçekleşmektedir. Böylece her üç ana modun da küresel eğilme karakterinde olduğu ve farklı eksenler boyunca ekipmanın dinamik rijitliğini temsil ettiği görülmektedir. Elde edilen bu değerler, fırlatıcı gereksinimi olan birinci mod frekansının 140 Hz ve üzerinde olması koşulunun önemli bir emniyet payı ile sağlandığını göstermektedir. Benzer biçimde Kaya ve Nalbant çalışmalarında, Z eksenindeki ilk doğal frekansın 301,20 Hz olarak elde edilmesi ile 200 Hz hedef değerinin üzerinde kalındığını rapor etmektedir. Koçmar ise esnek bir tutucu ayak için 844 Hz seviyesindeki ilk mod frekansı sayesinde 140 Hz sınırının oldukça üzerinde bir tasarım elde edildiğini belirtmektedir. Bu bağlamda kukla ekipman için elde edilen 262,21 Hz'lik birinci mod frekansının, hem fırlatma gereksinimi hem de benzer çalışmalarla karşılaştırma açısından yeterli rijitlik sağladığı sonucuna varılmaktadır [40], [47], [96].

Modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri, kukla ekipmanın farklı frekanslardaki deformasyon tiplerini göstermekte ve özellikle rastgele titreşim testlerinde ivmeölçer yerleşimlerinin belirlenmesinde yol gösterici olmaktadır. Çoban çalışmasında, farklı bom konfigürasyonları için ilk 12 modun hem frekans hem de mod şekli olarak raporlandığı, kütle katılım faktörleri ile etkin kütle değerlerinin ise eklerde sunulduğu belirtilmektedir [95]. Bu tezde de kukla ekipmanın ilk 6 mod şekli, Y, X ve Z eksenlerindeki küresel eğilme ve burulma davranışlarını ortaya koyacak şekilde Şekil 4.4 ile Şekil 4.7 arasında sunulacaktır. Bu şekiller üzerinde, rastgele titreşim analizlerinde kullanılmak üzere IO1, IO2 ve IO3

sensör noktalarının konumları ayrıca işaretlenecektir. Böylece hem analiz tarafında hem de test tarafında aynı dinamik bölgelerin izlenmesi mümkün olacaktır.

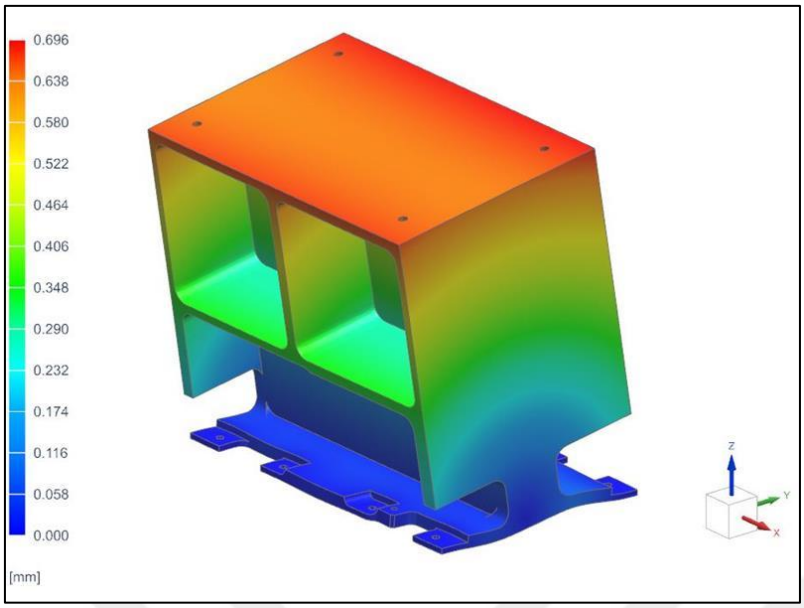
Sonuç olarak bu bölümde sunulan modal analiz, kukla ekipmanın dinamik karakteristiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, fırlatıcı gereksinimi kapsamında tanımlanan birinci doğal frekans alt sınırının güvenli biçimde sağlandığını göstermektedir. Ayrıca mod şekilleri ve kütle katılım oranları, test merkezinde gerçekleştirilen rezonans tarama ile rastgele titreşim testleri için sensör yerleşimlerinin belirlenmesine temel teşkil etmektedir. Aynı büyüklükler, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak sunulacak analiz ile test korelasyonu çalışmalarının da başlangıç noktasını oluşturmaktadır.

Çizelge 4.3. İlk 20 moda ait doğal frekanslar ve kütle katılım oranları

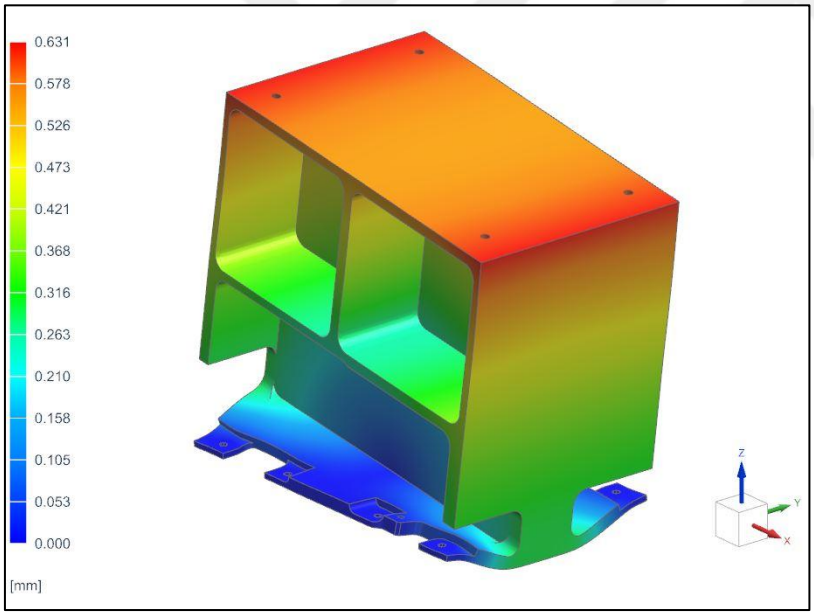
Mod	Frekans [Hz]	Kütle Katılım Değerleri (%)					
		X Yön	Y Yön	Z Yön	X Rotasyon	Y Rotasyon	Z Rotasyon
1	262,21	0,0	58,0	0,4	82,7	0,2	29,5
2	360,64	47,3	0,0	0,0	0,0	65,0	9,1
3	660,12	0,0	0,2	97,1	16,0	33,6	0,1
4	802,49	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8
5	2316,69	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,2
6	2459,01	0,1	8,7	0,0	0,1	0,0	4,5
7	2706,34	0,0	6,9	0,0	0,0	0,0	2,1
8	2806,11	1,9	3,9	0,0	0,0	0,0	4,4
9	2993,61	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	3,0
10	3051,87	26,7	0,8	0,0	0,0	0,0	2,8
11	3167,23	9,1	0,6	0,0	0,0	0,0	3,1
12	3310,71	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
13	3391,74	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	1,6
14	3520,40	0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,8

Çizelge 4.3. (devam) İlk 20 moda ait doğal frekanslar ve kütle katılım oranları

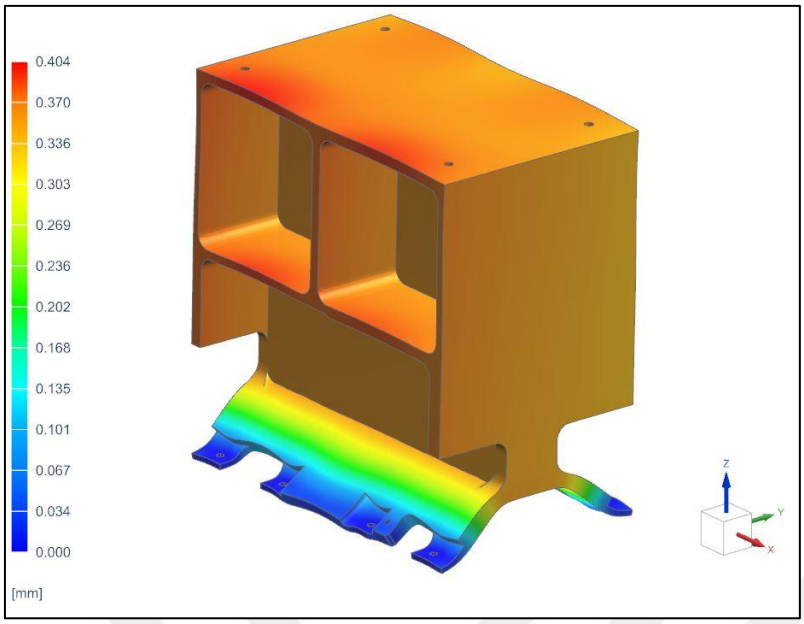
15	3891,24	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4
16	4095,20	4,8	0,1	0,0	0,0	0,0	1,4
17	5351,10	0,1	11,1	0,0	0,0	0,0	4,5
18	6928,65	0,0	0,4	0,8	0,6	0,3	0,2
19	7110,28	0,0	2,1	0,5	0,0	0,1	1,1
20	8648,69	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0



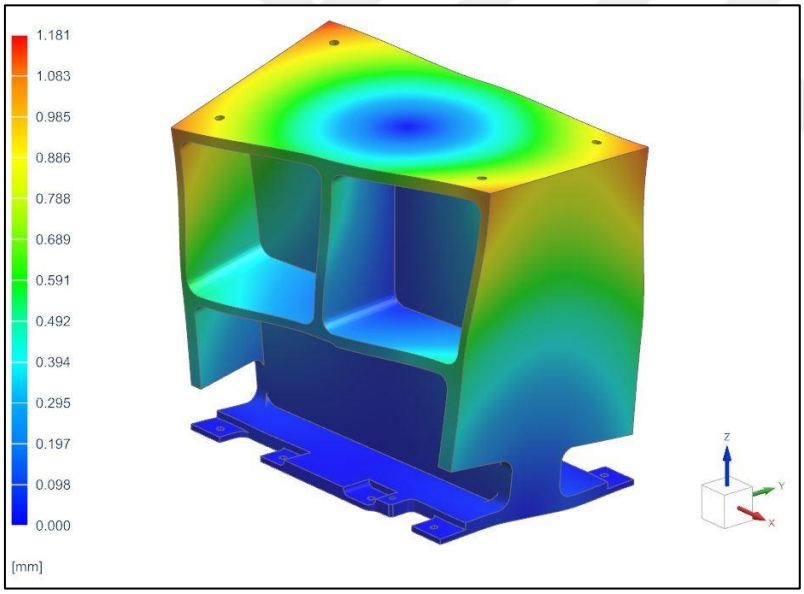
Şekil 4.4. Y ekseninde küresel eğilme şekli (1. mod)



Şekil 4.5. X ekseninde küresel eğilme şekli (2. mod)



Şekil 4.6. Z ekseninde küresel eğilme şekli (3. mod)



Şekil 4.7. Mod şekli (4. mod)

4.5. Rastgele Titreşim Analizi

Rastgele titreşim analizi, kukla ekipmanın fırlatma sırasında maruz kalacağı geniş bantlı dinamik yük çevresi altındaki davranışını incelemek ve test merkezinde gerçekleştirilen rastgele titreşim testlerinden elde edilen veriler ile sayısal modelin tutarlılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analizler, Siemens Simcenter yazılımı ortamında SOL111 çözüm tipi kullanılarak, bir önceki alt bölümde sunulan sonlu eleman

modeli ve sınır koşulları üzerinden yürütülmüştür. Çözüm aşamasında modal analiz ile elde edilen öz frekanslar ve mod şekilleri, modal süperpozisyon yaklaşımı kullanılarak hesaba katılmıştır. Bu sayede, geniş bir frekans aralığında hesaplama maliyeti kontrol altında tutulurken güç spektral yoğunluğu tabanlı (PSD) taban uyarımı altında yapısal tepkiler elde edilmiştir. Uygulanan yöntem, uzay yapıları ve uydu bileşenleri için yürütülen benzer çalışmalarda kullanılan rastgele titreşim analiz yaklaşımları ile genel hatlarıyla paralellik göstermektedir [6], [61], [97].

Rastgele titreşim yük çevresi, fırlatıcı kullanıcı kılavuzunda tanımlanan PSD profilleri esas alınarak tanımlanmıştır. Her bir eksen için (X, Y, Z) 20 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında g^2/Hz cinsinden verilen kırılma noktaları kullanılarak taban ivme spektrumu oluşturulmuştur. X ve Y (in-plane) eksenlerine ait giriş PSD-frekans eğrileri Şekil 4.8'de, Z (out-of-plane) eksenine ait giriş PSD-frekans eğrisi ise Şekil 4.9'da sunulmaktadır. Bu spektrum, CBUSH elemanlarının bağlandığı ortak referans düğüme taban ivmesi uyarımı (base excitation) şeklinde uygulanmıştır. ECSS dokümanlarında da vurgulandığı üzere, uzay uygulamalarında rastgele titreşim profilleri genellikle kırılma frekansları ve bunlara karşılık gelen PSD seviyeleri ile tanımlanmakta; bu profillerin altında kalan alanın karekökü gRMS değeri olarak kullanılmaktadır [4], [13]. Bu tezde izlenen yaklaşım, söz konusu standartlarda tarif edilen yöntemle uyumludur. Benzer biçimde, Yalçın, Türker ve Yıldırım ve arkadaşları çalışmalarında da, rastgele titreşim test profilleri kırılma frekansları üzerinden tanımlanmakta ve gRMS değeri hem analiz hem de test tarafında karşılaştırma büyüklüğü olarak kullanılmaktadır [51], [26], [94].

Sönüm modeli olarak, başlangıçta tüm modlar için %2,5 oranında modal sönüm tanımlanmıştır. Bu değer, küçük uydu yapıları ve uzay ekipmanları için literatürde sıkça kullanılan tipik sönüm oranları ile uyumlu bir başlangıç varsayımı sunmaktadır [1], [10]. Rastgele titreşim testleri sonrasında özellikle Z ekseni yönünde elde edilen güç spektral yoğunluğu eğrileri (PSD, g^2/Hz) ile frekans (Hz) grafikleri üzerinden yarı güç bant genişliği yöntemi kullanılarak sönüm oranı hesaplanmıştır. Hesaplanan deneysel sönüm oranı sayısal modele geri beslenmiş ve rastgele titreşim analizleri bu yeni değer esas alınarak yeniden yürütülmüştür. Böylece başlangıçta varsayımsal olarak tanımlanan sönüm oranı, test sonuçlarına dayanarak kalibre edilmiş ve kukla ekipmanın dinamik cevabının gerçek sisteme daha iyi yaklaşması sağlanmıştır. Bu tür deneysel sönüm kalibrasyonu, hem ECSS

kılavuzlarında hem de uzay yapıları için yürütülen rastgele titreşim çalışmalarında önerilen bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [6], [13].

Rastgele titreşim analizinin sonuçları hem küresel dinamik davranışın hem de ivmeölçer konumlarındaki yerel tepkilerin incelenmesine imkân verecek şekilde değerlendirilmiştir. Bu amaçla, kukla ekipman üzerinde rastgele titreşim testlerinde kullanılacak ivmeölçerlerin montaj konumları, sonlu eleman modelinde referans düğümler olarak tanımlanmıştır. Ekipman üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru sıralanan üç sensör konumu IO1, IO2 ve IO3 olarak isimlendirilmiş; bu düğümlerde X, Y ve Z doğrultularında ivme PSD ve gRMS değerleri hesaplanmıştır. Sensör yerleşim mantığı, literatürde rastgele titreşim testlerinde modal tepe bölgelerinin izlenmesi amacıyla sensörlerin seçilmesine yönelik yaklaşımlarla uyumludur [16], [37], [98]. Modal analiz sonuçları göz önüne alındığında, bu üç sensör konumunun birinci küresel eğilme modlarının tepe bölgelerine karşılık geldiği görülmektedir. Böylece hem analiz hem de test çalışmalarında dinamik açıdan en kritik bölgelerin izlenmesi mümkün olmaktadır.

PSD ile frekans ilişkisini gösteren eğrilerden elde edilen tepe değerlerin, kukla ekipmanın küresel modları ile uyumlu olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Rastgele titreşim analizinde X ekseni uyartımı altında IO1, IO2 ve IO3 sensörlerinde sırasıyla yaklaşık 360,60 Hz, 349,70 Hz ve 327,80 Hz civarında tepe yanıtlar elde edilmiştir. Bu tepe frekanslar, modal analizde X eksenindeki küresel eğilme modunun frekansı ile tutarlı bir dağılım sergilemektedir. Y ekseni uyarımında IO1 ve IO2 sensörleri için yaklaşık 262,20 Hz, IO3 sensörü için ise 273,10 Hz civarında tepe genlikler gözlenmiştir. Bu değerler, birinci Y yönü küresel eğilme modunun ve onu izleyen yakın modların etkisini yansıtmaktadır. Z ekseni uyarımında ise IO1 ve IO2 sensörleri için yaklaşık 660,10 Hz, IO3 sensörü için 648,90 Hz civarında tepe frekanslar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Z ekseni doğrultusundaki küresel eğilme modu ile uyumlu bir dinamik davranış ortaya koymaktadır. Z ekseninde IO1, IO2 ve IO3 sensör konumlarında elde edilen çıktı PSD-frekans eğrileri, sonlu eleman modeli (SEM) rastgele titreşim analizi sonuçlarını gösterecek şekilde Şekil 4.10'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu tür mod ile tepe değeri eşleşmeleri, uzay yapıları üzerinde yürütülen rastgele titreşim çalışmalarında hem analiz ile test korelasyonu hem de sensör yerleşiminin doğrulanması için temel bir değerlendirme aracı olarak kullanılmaktadır [1], [48], [97].

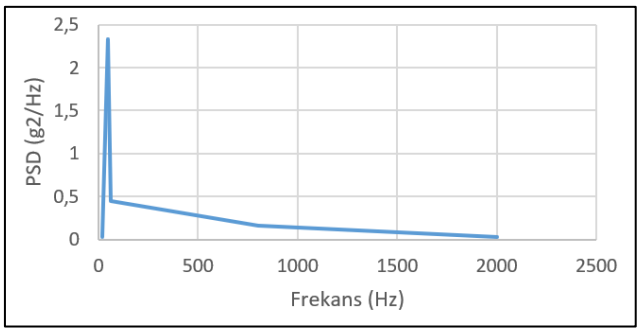
Tepe frekanslara karşılık gelen PSD genlikleri, ekipman üzerindeki dinamik yük dağılımı hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. Analiz sonuçlarına göre X ekseninde IO1, IO2 ve IO3 sensörleri için tepe genlikler sırasıyla yaklaşık 5,21 g^2/Hz, 1,49 g^2/Hz ve 0,26 g^2/Hz olarak hesaplanmıştır. Y ekseninde IO1, IO2 ve IO3 için bu değerler yaklaşık 251,8-50,79-0,41 g^2/Hz düzeyinde elde edilmiştir. Z ekseninde ise IO1, IO2 ve IO3 sensörleri için tepe genlikler yaklaşık 4,17-4,63-0,77 g^2/Hz olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, özellikle Y ekseni yönündeki rastgele titreşim yüklemesinin kukla ekipmanda küresel modlarla hizalanan belirgin bir rezonans tepkisi oluşturduğunu göstermektedir. Aynı zamanda IO1 ve IO2 sensörlerinin bu mod için baskın tepki noktaları olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tepe frekanslar, tepe PSD genlikleri ve bunlara karşılık gelen gRMS değerleri Çizelge 4.4'te özetlenmiştir. Benzer biçimde Türker ve Çam tarafından yürütülen çalışmalarda da rastgele titreşim altında belirli frekans bantlarında gözlenen PSD tepe genliklerinin yapının küresel eğilme modları ile çakıştığı ve bu durumun tasarım ile test değerlendirmeleri açısından kritik olduğu gösterilmektedir [10], [94].

Rastgele titreşim analizinde elde edilen PSD eğrilerinin frekans ekseni boyunca integrali alınarak, her sensör noktası için toplam ivme seviyesi gRMS cinsinden hesaplanmıştır. Böylece, hem fırlatıcı kullanıcı kılavuzunda tanımlanan toplam kabul seviyeleri ile hem de test merkezinde gerçekleştirilen rastgele titreşim testlerinden elde edilen gRMS değerleri ile doğrudan karşılaştırma imkânı elde edilmiştir. gRMS hesaplaması, Yalçın, Türker ve Yıldırım ve arkadaşları çalışmalarında da benzer şekilde uygulanmakta; PSD eğrisi altındaki alanın karekökü hem analiz hem de test tarafında bir karşılaştırma metriği olarak kullanılmaktadır [26], [51], [94]. Bu tezde IO1, IO2 ve IO3 sensörleri için X, Y ve Z eksenlerinde hesaplanan gRMS değerleri, beşinci bölümde sunulacak deneysel sonuçlarla birlikte değerlendirilmiş; ekipman düzeyinde analiz-test korelasyonunun nicel bir göstergesi olarak kullanılmıştır.

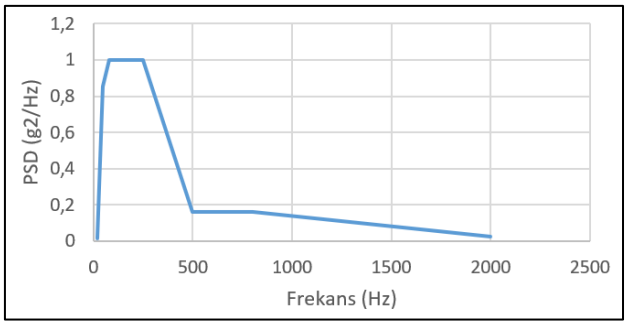
Ayrıca hem rastgele titreşim analizinde hem de ilgili testlerde elde edilen PSD ile frekans eğrileri, frekans ve genlik farkları üzerinden karşılaştırılmıştır. Özellikle Z ekseninde gerçekleştirilen üçüncü rastgele titreşim testinden elde edilen PSD eğrisi ile kukla ekipmanın sonlu eleman modelinden elde edilen cevap spektrumu karşılaştırıldığında, IO1, IO2 ve IO3 sensör konumlarında frekans farklarının %5'in, tepe PSD genlik farklarının ise %20'nin altında kaldığı görülmüştür. Benzer şekilde gerçek ekipmanın sonlu eleman modeli için gerçekleştirilen rastgele titreşim analizleri ile kukla ekipman için yapılan rastgele titreşim

analizleri arasında da frekans ve genlik farklarının aynı sınırlar içinde kaldığı belirlenmiştir. Bu tür karşılaştırmalar, uzay yapıları literatüründe analiz ile test korelasyonu amacıyla yaygın olarak kullanılan değerlendirme kriterleri ile uyumludur [4], [6], [13], [97]. Bu sonuçlar, kukla modelin gerçek ekipmanı dinamik açıdan yeterli doğrulukta temsil ettiğini ve sonlu eleman modelinin rastgele titreşim altında elde edilen deneysel verilerle tutarlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, altıncı bölümde ayrıntılı olarak ele alınacak analiz ile test korelasyonu değerlendirmelerine temel teşkil etmektedir.

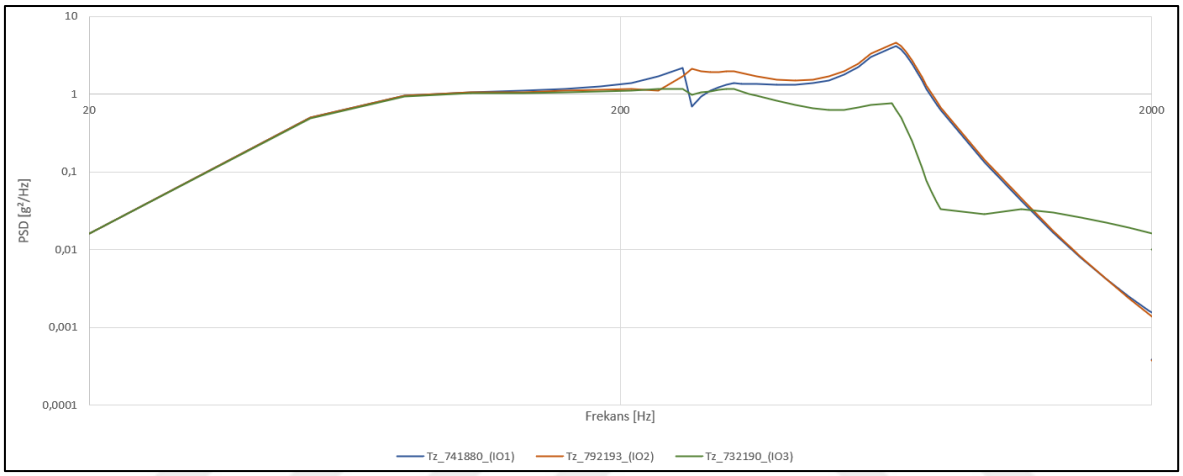
Sonuç olarak, bu alt bölümde sunulan rastgele titreşim analizi ile, kukla ekipmanın fırlatma sırasında maruz kalacağı rastgele yük çevresi altında dinamik cevabı sayısal olarak ortaya konmuş; Şekil 4.8-Şekil 4.10'da gösterilen PSD-frekans eğrileri ile Çizelge 4.4'te özetlenen tepe frekans, tepe PSD ve gRMS büyüklükleri hem fırlatıcı gereksinimlerinin hem de deneysel test sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere sistematik bir çerçeveye oturtulmuştur. Bu çerçeve, benzer ekipmanlar için yürütülecek gelecekteki projelerde de literatürdeki çalışmalarla uyumlu ve ECSS standartları ile tutarlı tekrarlanabilir bir rastgele titreşim analizi metodolojisi olarak değerlendirilebilir [1], [6], [10], [48], [61]. Bu alt bölümde Z ekseni için temsilî PSD-frekans eğrileri ve tepe değerler sunulmakta olup, X ve Y eksenlerindeki rastgele titreşim analiz sonuçları ile tüm sensör noktaları için analiz-test karşılaştırmaları EK-4, EK-5 ve EK-6'da ayrıntılı biçimde verilmektedir.



Şekil 4.8. X ve Y eksenleri düzlemde (in-plane) giriş PSD-frekans eğrileri



Şekil 4.9. Z ekseni düzlem dışı (out of plane) giriş PSD-frekans eğrisi



Şekil 4.10. Z ekseninde SEM rastgele titreşim analizi sonucu PSD-frekans eğrileri (IO1, IO2, IO3)

Çizelge 4.4. Rastgele titreşim analizi sonucu tepe frekans, tepe PSD ve gRMS değerleri

Sensör	Tepe Frekans [Hz]	Tepe PSD [g²/Hz]	gRMS [g]
IO1	660,10	4,17	37,09
IO2	660,10	4,63	39,03
IO3	648,90	0,77	24,62

5. DENEYSEL TEST

Bu bölümde, savunma sanayi şirketi test merkezinde kukla ekipman üzerinde gerçekleştirilen rezonans tarama ve rastgele titreşim testlerinin tesis, donanım, enstrümantasyon ve veri işleme adımları aktarılmaktadır. Kullanılan test düzeneği, ECSS yönergelerinde tanımlanan ekipman seviyesi rastgele titreşim test yaklaşımlarıyla uyumlu olacak şekilde oluşturulmuş; sayısal modelden elde edilen öngörüler, test planının hazırlanmasında ve kabul kriterlerinin tanımlanmasında referans alınmıştır.

5.1. Tesis ve Donanım

Kukla ekipmana yönelik tüm titreşim testleri, savunma sanayi şirketi çatısı altında faaliyet gösteren titreşim test laboratuvarında yürütülmüştür. Testler, ECSS el kitabında tanımlandığı üzere, üç uzaysal eksende (X, Y ve Z) ayrı ayrı uygulanabilen, geniş frekans bandında çalışma kabiliyetine sahip elektro-dinamik bir sarsıcı sistemi üzerinde gerçekleştirilmiş olup kullanılan benzer bir sarsıcı sistemine ait genel görünüş Şekil 5.1'de sunulmaktadır [13]. Söz konusu standartta, ekipman seviyesindeki rastgele titreşim testlerinin genellikle 20 Hz ile 2000 Hz bandında, elektrodinamik bir sarsıcı ve rijit bir test tablası kullanılarak yürütüldüğü belirtilmektedir. Test örneğinin uygun bir fikstür aracılığıyla tabla üzerine bağlandığı ve kontrol ile cevap ivmeölçerlerinin, test girdisini ve yapısal tepkileri izlemek amacıyla kullanıldığı ifade edilmektedir.

Test merkezinde kullanılan sarsıcı sistemi, bir sarsıcı tabanı, güç yükselteci ve titreşim kontrol sistemi olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Türker tarafından incelenen ticari elektrodinamik sarsıcıların yapısının da benzer şekilde tanımlandığı görülmektedir. Buna göre sistem, elektromanyetik kuvvetin üretildiği armatüre sahip sarsıcı tabanından, bu armatüre gönderilen komut sinyalini yükselten bir güç yükseltecinden ve test parametrelerinin ayarlandığı, kontrol ivmeölçerlerinden geri besleme alan bir kontrol ünitesinden oluşmaktadır [94]. Bu yapı, test merkezinde kullanılan sistemle doğrudan uyumlu olup test ekipmanının fırlatıcı tarafından talep edilen PSD profillerini hassas şekilde takip etmesini mümkün kılmaktadır.

Sarsıcı tabanı üzerine, test frekans aralığında yüksek rijitlik sağlayacak biçimde tasarlanmış ve Avrupa Uzay Standardizasyon İş birliği yönergelerinde (ECSS) önerilen titreşim aktarım

oranı sınırlarını karşılayan bir test fikstürü yerleştirilmiştir. ECSS'de, fikstürlerin 20 Hz ile 500 Hz bant aralığında ±3 desibel (dB), 500 Hz ile 2000 Hz bant aralığında ise ±6 desibel (dB) değerini aşmayan bir titreşim aktarım oranı değişimine sahip olması ve kendi rezonanslarının mümkün olduğunca yüksek frekanslara taşınması gerektiği vurgulanmaktadır [13]. Bu çalışmada kullanılan fikstür, kukla ekipmanın taban delik düzeni ile uyumlu bir arayüz sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Fikstürün kendi rezonanslarının test bandı içinde ölçülebilir bir büyütme oluşturmaması için ise yeterli rijitlikte olmasına dikkat edilmiştir.

Test tesisinin seçiminde ve sarsıcı kapasitesinin değerlendirilmesinde, Avrupa Uzay Standardizasyon İş birliği yönergelerinde (ECSS) belirtilen kriterler esas alınmıştır. İlgili dokümanda, titreşim test tesisi seçiminde sarsıcının uygulayabildiği maksimum kuvvet, kullanılabilir frekans aralığı, yer değiştirme ve hız sınırları, mevcut ölçüm kanalı sayısı ile kontrol kabiliyetleri ve test arayüzünün boyutlarının temel belirleyici parametreler olduğu ifade edilmektedir. Kontrol kabiliyetleri kapsamında sınır/durdurma tanımları (limit/abort), kök ortalama kare tabanlı sınırlandırma (RMS) ve güç spektral yoğunluğu tabanlı sınırlandırma (PSD) gibi özellikler özellikle vurgulanmaktadır [13]. Test merkezi titreşim test laboratuvarı, küçük ve orta boyutlu uydu ekipmanlarının fırlatıcı seviyesindeki yük profillerine göre test edilmesine imkân verecek kuvvet ve strok kapasitesine sahip elektrodinamik sarsıcı sistemi ile bu gereksinimleri karşılamaktadır. Ayrıca dikey ve yatay konfigürasyonlara uygun başlık genişletici ve kayma tablası çözümleri sayesinde farklı ekipman geometrileri için gerekli test arayüzü esnekliği sağlanmaktadır.

Benzer tesis yapıları ve test düzenekleri hem ECSS uygulama kılavuzlarında hem de literatürde yer alan farklı çalışmaların deneysel bölümlerinde görülmektedir. Örneğin, Süer tarafından uydu kafes yapıları için yürütülen yapısal testlerde, mühendislik modeli testleri kapsamında harmonik ve rastgele titreşim testlerinin elektro-dinamik sarsıcı üzerinde, ilgili test profilleri kullanılarak gerçekleştirildiği belirtilmektedir [15]. Vardallı, füze uygulamalarında kullanılan pasif titreşim izolatörü ve atalet ölçüm birimi (IMU) için yürüttüğü çalışmada; 20-1000 Hz bandında 1 gRMS seviyesinde rastgele titreşim testlerinin sarsıcı tabanına yerleştirilen ivmeölçerler ve sahte IMU üzerindeki üç eksenli sensörler ile kontrol edildiğini raporlamaktadır [28]. Al Ali ise CubeSat sistemleri için SpaceX tarafından tanımlanan rastgele titreşim PSD profilinin elektrodinamik sarsıcıya giriş sinyali olarak uygulandığı ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır [42]. Sarsıcı, kontrol sistemi ve

ivmeölçerlerden oluşan geri besleme döngüsü aracılığıyla hem hedef profilin hem de güvenlik limitlerinin takip edildiği belirtilmektedir.

Bu tez kapsamında kullanılan test merkezi titreşim test düzeneği, yukarıda özetlenen literatür örnekleri ve ECSS standartlarının tarif ettiği uygulama çerçevesi ile uyumlu bir altyapı sunmaktadır. Kukla ekipman, taban arayüzü üzerinden bu fikstüre cıvatalar ile bağlanmıştır. Böylece hem analiz modelinde RBE2 ve CBUSH elemanları ile idealize edilen arayüzün hem de gerçek test düzeneklerinin temsil edilebildiği, ekipman seviyesinde tekrarlanabilir bir test altyapısı oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Test merkezi titreşim test laboratuvarında kullanılan benzer sarsıcı sistemi [99]

5.2. Enstrümantasyon ve Kalibrasyon

Rastgele titreşim ve rezonans tarama testlerinde kullanılan enstrümantasyon, test merkezi titreşim test laboratuvarının standart ölçüm zincirini temel almaktadır. ECSS el kitabında belirtildiği üzere, ekipman seviyesi titreşim testlerinde temel ölçüm elemanları kontrol ivmeölçerleri, cevap ivmeölçerleri, gerektiğinde gerinim ölçerler ve kuvvet ölçüm düzeneklerinden oluşmaktadır [13]. Bu sensörlerden toplanan zaman tanım alanı verileri, uygun işaret işleme adımları ile PSD ya da transfer fonksiyonu büyüklüklerine

dönüştürülmektedir. Bu tez kapsamında da kukla ekipman testlerinde ivme temelli ölçümler esas alınmış, test merkezi veri toplama zinciri ECSS kılavuzunda tanımlanan test konfigürasyonu ve test enstrümantasyonu gerekleri ile uyumlu olacak şekilde yapılandırılmıştır.

Testlerde kullanılan ivmeölçer yerleşimi, ECSS tarafından önerilen kontrol ve cevap sensör ayrımını dikkate alacak biçimde planlanmıştır. Ayrıca literatürde yer alan uzay yapıları test uygulamalarında izlenen sensör yerleşim yaklaşımları da gözetilmiş, sensör konumları buna göre belirlenmiştir. ECSS'e göre kontrol (pilot) ivmeölçerlerinin, numunenin arayüz bölgesine yakın noktalarda, sarsıcıya bağlı fikstür tarafında ve uyarım yönünde konumlandırılması, girişin homojenliğinin ise bu sensörler üzerinden izlenmesi tavsiye edilmektedir [13]. Bu çalışma kapsamında fırlatıcı tarafından verilen PSD profiline göre titreşim kontrolü, kukla ekipmanın taban arayüzüne yakın bölgede yer alan kontrol ivmeölçer veya ivmeölçerler üzerinden yürütülmüştür. Kukla ekipman gövdesi üzerinde ise üç adet cevap ivmeölçeri, üst yüzeyden alt yüzeye doğru IO1, IO2 ve IO3 olarak isimlendirilen noktalara yerleştirilmiştir ve bu sensör yerleşimi Şekil 5.2'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu sensör konumları, sayısal modal analiz sonuçları kullanılarak küresel eğilme modlarının tepe bölgelerine karşılık gelecek şekilde seçilmiş ve böylece hem analiz hem de test tarafında dinamik açıdan kritik bölgelerin izlenmesi sağlanmıştır. Benzer sensör yerleşim mantığı, Briese ve Möller tarafından rastgele titreşim altında test edilen SSA yapısında; ivmeölçerlerin, sonlu eleman modelinde yüksek tepki beklenen bölgelere dağıtılması prensibiyle uygulanmıştır [48].

İvmeölçer yerleşimi ve sayısı bakımından, literatürdeki farklı uydu ve optik sistem çalışmalarında da benzer enstrümantasyon stratejileri izlenmektedir. Örneğin Avşar, helikopter titreşim profilinin uygulandığı bir optik sistem üzerinde gerçekleştirilen rastgele titreşim testlerinde iki adet üç eksenli ivmeölçer kullanılmaktadır [70]. Bu ivmeölçerlerden biri sarsıcı çıkışını kontrol etmek, diğeri ise optik sistemin dinamik tepkisini ölçmek amacıyla konumlandırılmaktadır. Çekiç tarafından yürütülen çalışmada ise, haberleşme uydusunun gövdesi, tankları ve reflektörü üzerine toplam 11 ivmeölçer yerleştirilmiş; sensör konumları hem global modların hem de kritik yerel modların izlenmesine imkân verecek şekilde seçilmiştir [3]. Bu tezde kukla ekipman için kullanılan üç sensörlü IO1-IO2-IO3 yerleşimi, tam uydu yapısı yerine tek bir ekipman seviyesinde çalışıldığı göz önünde bulundurularak benzer prensipleri daha kompakt bir test örneğine uyarlamaktadır.

İvmeölçerlerin montaj yöntemleri ve temas yüzeylerinin hazırlanması, ölçüm kalitesi açısından kritik bir adımdır. Çekiç, uydu panel ve tank yüzeylerine monte edilen üç eksenli PCB-356A33 ivmeölçerler için montaj öncesinde yüzeylerin düzgün ve pürüzsüz hâle getirilmesi gerektiğini, metal çapak veya yabancı cisim bulunmaması gerektiğini ve montaj yöntemine göre ivmeölçerin frekans cevabının değişebileceğini belirtmektedir [3]. Çalışmada, CFRP sandviç panellere zarar vermemek amacıyla yapıştırıcı montaj tercih edilmiş; vida bağlantısının yüksek frekans performansı avantajına karşın, yüzeye verebileceği zararlar dikkate alınarak sınırlı kullanılmıştır. Bu tez kapsamında, kukla ekipman üzerinde kullanılan ivmeölçerler için yüzey hazırlığı benzer şekilde yapılmış; sensör montajı hem frekans bandı hem de ekipman yüzeyine kalıcı hasar vermeme kriterleri dikkate alınarak seçilmiştir.

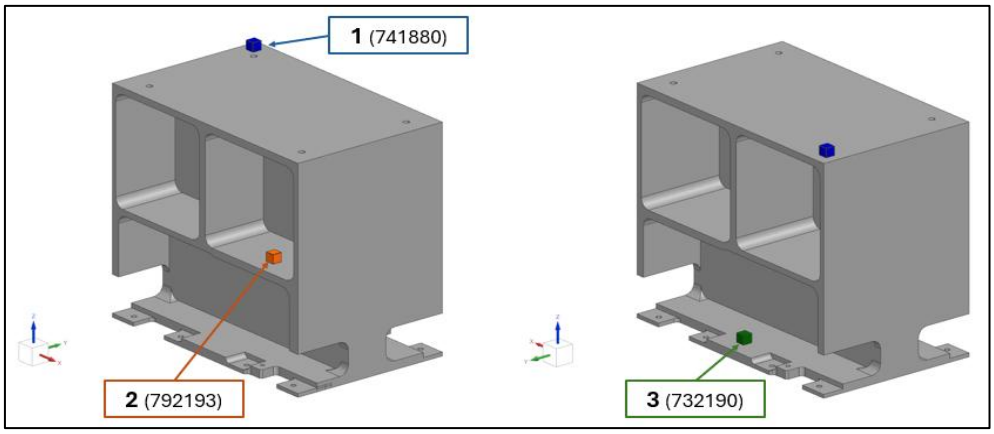
Enstrümantasyonun güvenilirliği açısından, sensör kalibrasyonu ve ölçüm zincirinin doğrulanması önemli bir gereksinimdir. ECSS'de, rastgele titreşim testleri öncesinde enstrümantasyon planının hazırlanması ve tüm ölçüm kanallarının düşük seviyeli bir ön test ile doğrulanması tavsiye edilmektedir; bu ön testte pilot ivmeölçerlerin, uyarılan frekans aralığında beklenen rijit cisim davranışını göstermesi ve sensörler arası cevap uyumunun kontrol edilmesi gerektiği belirtilmektedir [13]. Çekiç de sine titreşim testleri öncesinde ivmeölçer isimlerinin ve yönlerinin veri toplama sisteminde tanımlandığını, kanal kalibrasyonlarının yapıldığını ve bu adımın titreşim kampanyası öncesi standart bir hazırlık olduğunu ifade etmektedir [3].

Bu tez kapsamında test merkezinde kullanılan ivmeölçerler, üretici kalibrasyon sertifikalarına sahip olup test öncesinde belirli periyotlarda laboratuvar standartlarına göre yeniden kalibre edilmiştir. Sensörlere ait hassasiyet, ölçüm aralığı ve nominal frekans bandı değerleri test merkezi veri toplama ve kontrol sistemine tanımlanmış, böylece her kanal için ivme zaman geçmişi doğru birim ve ölçekle kaydedilmiştir. Demir, anten yapısının modal doğrulamasında kullanılan ivmeölçer ve darbe çekici için, hassasiyet değerlerinin veri toplama sistemi arayüzüne doğru tanımlanmasının, filtre ayarlarının ve örnekleme parametrelerinin sistematik olarak seçilmesinin ölçüm doğruluğu açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır [33]. Bu tezde de benzer bir yaklaşım izlenmiş; tüm ivmeölçer kanalları için hassasiyet, yönlendirme ve birim tanımları test öncesinde gözden geçirilmiştir.

Veri toplama sistemi, ECSS'in de önerdiği şekilde ham zaman verilerini kaydedecek ve gereksinim duyulan spektral analizleri gerçekleştirecek kapasitede seçilmiştir. El kitabında, ölçülen işaretlerin zaman geçmişi olarak kaydedilmesinin, daha sonra özel durumları incelemek veya farklı işleme yöntemleriyle yeniden değerlendirme yapmak için önemli olduğu belirtilmektedir. Avşar çalışmasında, iki adet üç eksenli ivmeölçerden toplanan verilerin analizör ve yazılım aracılığıyla gerçek zamanlı olarak oto-spektrum biçiminde izlenebildiği, referans ivmeölçerden elde edilen PSD eğrilerinin hedef titreşim profilini başarıyla takip ettiğinin doğrulama amaçlı kullanıldığı belirtilmektedir [70]. Demir ise modal deneylerde, veri toplama sistemine ilişkin ilgi frekans aralığı, spektral çizgi sayısı, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtre ayarları, ortalama alma seçenekleri ile tetikleme parametrelerinin deney öncesinde tanımlandığını belirtmektedir. Bu ayarların ölçüm kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğu, özellikle de aliasing oluşumunun önlenmesi açısından belirleyici bir rol oynadığı ifade edilmektedir [33].

Bu tezde test merkezi titreşim kontrol sistemi üzerinden elde edilen test verileri önce ".unv" formatında dışa aktarılmıştır. Daha sonra Python kullanılarak ".dat" formatına dönüştürülmüş ve elde edilen dosyalar Excel ortamına alınmıştır. Excel üzerinde her sensör ve eksen için frekans ile PSD (g^2/Hz) verileri yeniden düzenlenmiş, sensör renk kodları (örneğin IO1 için mavi, IO2 için turuncu, IO3 için yeşil) atanmış, grafikler üretilmiş ve hem rezonans tarama hem de rastgele titreşim testleri için karşılaştırma eğrileri hazırlanmıştır. Bu işlem zinciri, verilerin ECSS kapsamında tarif edilen PSD temelli değerlendirmeler ile ve sonlu eleman analizinden elde edilen PSD ile frekans eğrileriyle doğrudan karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu alt bölümde sunulan enstrümantasyon ve kalibrasyon yaklaşımı; savunma sanayi şirketi test altyapısında kullanılan standart ivmeölçer, veri toplama ve kontrol zincirini, ECSS'de tarif edilen rastgele titreşim test enstrümantasyon gereksinimleri ve literatürdeki uydu/ekipman test uygulamaları ile tutarlı biçimde kukla ekipman testlerine uyarlamaktadır. Böylece hem ölçüm sonuçlarının güvenilirliği hem de sayısal model ile deneysel veriler arasındaki korelasyonun değerlendirilebilirliği sağlanmıştır [13].



Şekil 5.2. Kukla ekipman üzerindeki sensör yerleşimi (IO1, IO2, IO3)

5.3. Rezonans Tarama Prosedürü

Rezonans tarama (sine sweep) testleri, kukla ekipmanın rastgele titreşim testleri öncesinde ve sonrasında dinamik davranışındaki değişimleri izlemek, olası hasar veya kalıcı değişimleri tespit etmek ve sayısal model ile deneysel sonuçlar arasındaki frekans uyumunu değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Kukla ekipmana sırasıyla uygulanan rezonans tarama ve rastgele titreşim test adımları, bütüncül bir bakış sunmak amacıyla Çizelge 5.1'de özetlenmiştir. ECSS el kitabında, ekipman seviyesi rastgele titreşim testlerinden önce düşük seviyeli bir rezonans arama testinin yürütülmesi önerilmektedir. Test süresince ve sonrasında rezonans frekanslarının izlenmesi ve olası kaymaların değerlendirilmesinin, yapısal hasar, cıvata gevşemesi veya arayüz problemlerinin erken tespiti açısından kritik olduğu belirtilmektedir. Benzer şekilde Çekiç ve Demir çalışmalarında da modal ve rastgele titreşim testleriyle birlikte düşük seviyeli sine taramaların kullanıldığı ve frekans kaymalarının modal korelasyonun önemli bir parametresi olarak değerlendirildiği görülmektedir [3], [13], [33].

Bu tez kapsamında kullanılan rezonans tarama profili, fırlatıcı gereksinimleri ve test merkezi test altyapısının kabiliyetleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Buna göre tarama seviyesi tepe değeri 0,5 g olacak şekilde tanımlanmış ve frekans aralığı 10 Hz ile 2000 Hz arasında seçilmiştir. Tarama 2 oktav/dakika tarama hızı ile gerçekleştirilmiş, profil kukla ekipman üzerinde X, Y ve Z eksenlerinin her birine ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylece ekipmanın tüm ana yönlerdeki dinamik davranışının rezonans taramaları aracılığıyla gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Seçilen 0,5 g seviyesinin amacı, ekipmanı doğrusal davranış bölgesinde uyararak modal frekansları ve tepe genlikleri ortaya çıkarırken yapıda gerilme kaynaklı

kalıcı bir hasar oluşmasını engellemektir. ECSS'de da rezonans arama için ana test seviyesinden daha düşük bir ivme seviyesinin kullanılması ve bu seviyede elde edilen frekans spektrumlarının referans olarak kaydedilmesi tavsiye edilmektedir. Benzer düşük seviyeli sine tarama profilleri, uydu ve optik sistem testlerinde Avşar, Çekiç ve Yıldırım ve arkadaşları tarafından da uygulanmıştır [3], [13], [70].

Rezonans tarama test akışı, her eksen için sırasıyla öncül tarama, rastgele titreşim testi ve ardıl tarama adımlarından oluşacak şekilde planlanmıştır. Kukla ekipman önce Z ekseninde test edilmek üzere test merkezi sarsıcı sistemine bağlanmış, Z eksenine dik yönde 10 Hz ile 2000 Hz aralığında 0,5 g seviyesinde öncül rezonans tarama uygulanmıştır. Bu tarama sonucunda elde edilen frekans ve genlik eğrileri, hem modal analizden beklenen temel modların doğrulanması hem de rastgele titreşim testi öncesi referans spektrumun kaydedilmesi amacıyla kullanılmıştır. Ardından Z ekseni için rastgele titreşim testi uygulanmış ve testin hemen ardından aynı profil kullanılarak ardıl rezonans tarama gerçekleştirilmiştir. Y ve X eksenleri için de aynı prosedür izlenmiş, her eksen için ayrı ayrı öncül ve ardıl sine taramalar kaydedilmiştir. Z, Y ve X eksenlerine ait öncül ve ardıl rezonans tarama frekans-genlik eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te sunulmaktadır.

Rezonans tarama sırasında titreşim kontrol sistemi, pilot ivmeölçer üzerinden 0,5 g seviyesindeki komut sine profilini takip edecek şekilde çalıştırılmıştır. Kukla ekipman üzerindeki IO1, IO2 ve IO3 sensörlerinden elde edilen ivme zaman geçmişleri, veri toplama sistemi tarafından kaydedilmiştir. Bu veriler test sonrasında frekans alanına dönüştürülmüş, her sensör ve yön için frekans ile genlik (g veya g^2/Hz cinsinden) eğrileri elde edilmiştir. ECSS ve Çekiç çalışmalarında önerildiği üzere, öncül ve ardıl taramalardan elde edilen rezonans frekansları ve genlikleri hem yapısal bütünlüğün hem de bağlantıların kontrolü için karşılaştırılmıştır [3], [13]. Bu karşılaştırmalar sonucunda elde edilen önceki ve sonraki rezonans taramalara ait frekans ve genlik farkları, Çizelge 5.2'de nicel olarak özetlenmiştir.

Bu tezde rezonans tarama sonuçları öncelikle analiz ile test korelasyonu açısından değerlendirilmiştir. Siemens Simcenter ortamında gerçekleştirilen modal analizden elde edilen ilk küresel mod frekansları (Y ekseninde 262,20 Hz, X ekseninde 360,60 Hz, Z ekseninde 660,10 Hz) ile öncül rezonans tarama testlerinden elde edilen tepe frekanslar karşılaştırılmıştır. Böylece kukla ekipmanın sonlu eleman modelinin, test başlangıcındaki

dinamik davranışı ne ölçüde temsil ettiği ortaya konmuştur. Rastgele titreşim testleri sonrasında gerçekleştirilen ardıl rezonans taramaları ise iki amaçla kullanılmıştır. Birinci amaç, olası frekans kaymalarının tespit edilmesidir. İkinci amaç ise Z ekseninde tekrarlanan rastgele titreşim testleri sonrasında dinamik cevabın kararlı bir hale ulaşıp ulaşmadığının değerlendirilmesidir. Özellikle Z ekseninde art arda uygulanan rastgele titreşim ve rezonans tarama döngüleri sonucunda, ardıl taramalardan elde edilen frekans farklarının giderek azaldığı görülmüştür. Son durumda analiz ile test frekansları arasındaki farkların, proje kapsamında belirlenen sınırlar içinde kaldığı gözlenmiştir.

Elde edilen rezonans tarama eğrileri, bir yandan modal analizden beklenen temel modların test ile doğrulanması, diğer yandan rastgele titreşim testi öncesi ve sonrası frekans kaymalarının izlenmesi için sistematik biçimde kullanılmıştır. Bu yaklaşım, literatürde Abdelal ve arkadaşları, Piatak ve arkadaşları ve Yıldırım ve arkadaşları tarafından raporlanan yöntemlerle uyumludur. Söz konusu çalışmalarda da rastgele titreşim testlerinin başında ve sonunda düşük seviyeli sine taramalar uygulanmakta, mod frekanslarındaki değişimler izlenmekte ve sonlu eleman modeli ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon bu veriler üzerinden güçlendirilmektedir [6], [26], [36].

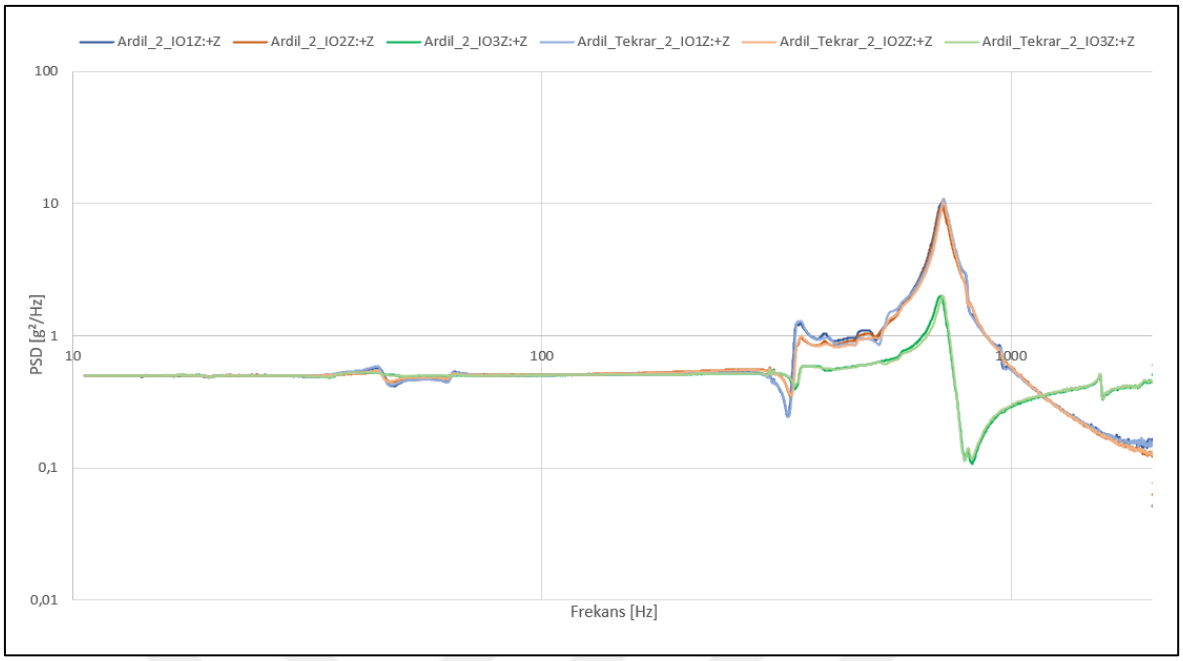
Daha detaylı açıklamak gerekirse, bu tezde "öncül rezonans tarama" her eksen için rastgele titreşim testinden hemen önce düşük seviyeli sine süpürme uygulanarak elde edilen ve ekipmanın başlangıç dinamik karakteristiğini (rezonans frekansları ve tepe genlikleri) referans olarak kaydeden ölçümdür. "Ardıl rezonans tarama" ise aynı profilin rastgele titreşim testinden hemen sonra tekrarlanmasıyla elde edilir ve yükleme sonrasında dinamik davranışta kalıcı ya da yarı kalıcı bir değişim oluşup oluşmadığını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bu iki spektrumun karşılaştırılmasıyla frekans kaymaları ve genlik değişimleri nicel olarak izlenebilmekte; gözlenen farklılıklar arayüzde oturma/yerleşme, temas koşullarındaki değişim veya olası yapısal zayıflamalar açısından bir bütünlük kontrolü göstergesi olarak yorumlanabilmektedir.

Sonuç olarak kukla ekipman için uygulanan rezonans tarama prosedürü, ECSS yönergeleri, literatürdeki uygulamalar ve sonlu eleman modeli ile test sonuçlarının karşılaştırılmasına yönelik gereksinimler dikkate alınarak kurgulanmıştır. Öncül ve ardıl sine taramalardan elde edilen frekans ve genlik bilgileri, Şekil 5.3-Şekil 5.5 ve Çizelge 5.2'de sunulan sonuçlar üzerinden analiz ile test korelasyonunda kullanılan temel girdilerden biri hâline getirilmiştir.

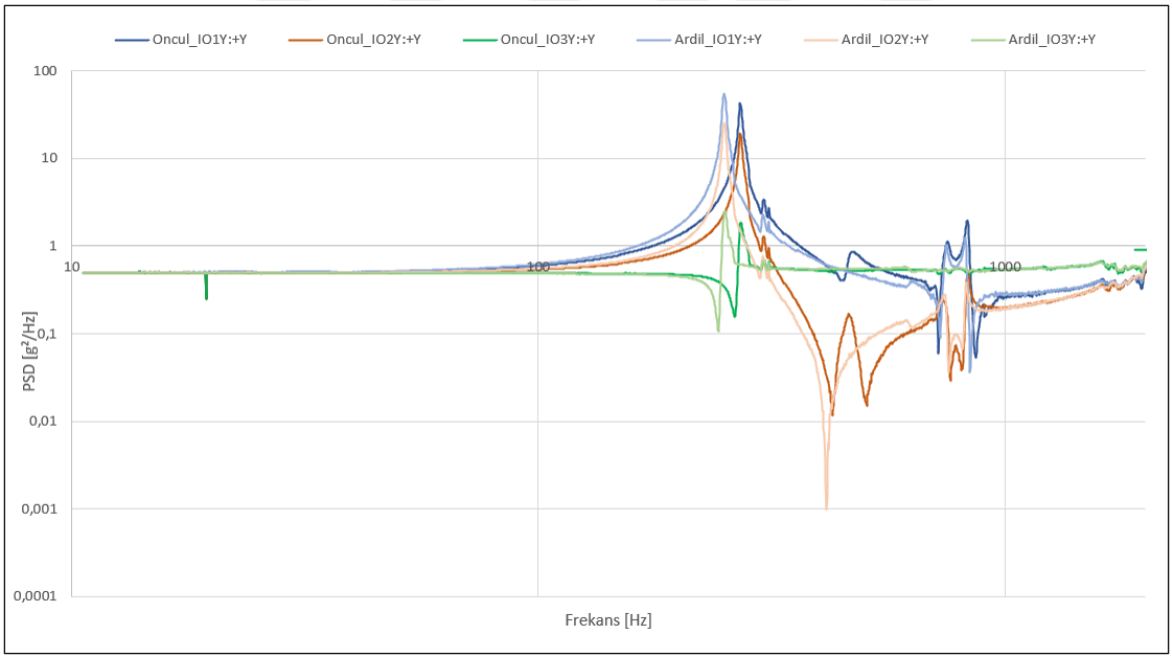
X ve Y eksenleri için öncül ve ardıl rezonans tarama sonuçlarından elde edilen frekans-genlik eğrilerinin tamamı sırasıyla EK-1 ve EK-2'de, Z ekseni için birinci, ikinci ve üçüncü rastgele titreşim test döngülerine ait öncül ve ardıl rezonans tarama eğrileri ise EK-3'te Şekil 1.7-Şekil 1.15 arasında toplu olarak sunulmaktadır.

Çizelge 5.1. Kukla ekipmana sırasıyla uygulanan testler

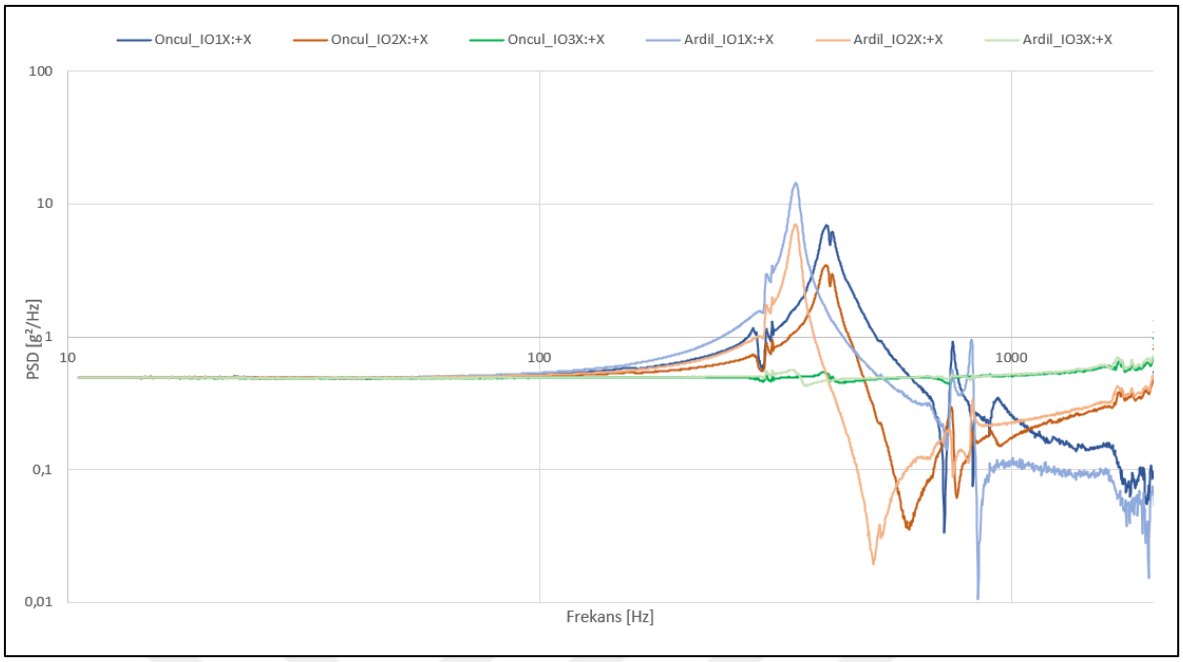
Test Sıra No	Eksen	Test
1	Z	Rezonans Tarama (Öncül)
2	Z	Rastgele Titreşim (1.)
3	Z	Rezonans Tarama (Ardıl)
4	Z	Rezonans Tarama (Ardıl_Tekrar)
5	Y	Rezonans Tarama (Öncül)
6	Y	Rastgele Titreşim
7	Y	Rezonans Tarama (Ardıl)
8	X	Rezonans Tarama (Öncül)
9	X	Rastgele Titreşim
10	X	Rezonans Tarama (Ardıl)
11	Z	Rezonans Tarama (Öncül_2)
12	Z	Rastgele Titreşim (2.)
13	Z	Rezonans Tarama (Ardıl_2)
14	Z	Rastgele Titreşim (3.)
15	Z	Rezonans Tarama (Ardıl_Tekrar_2)



Şekil 5.3. Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama frekans-genlik eğrilerinin karşılaştırılması

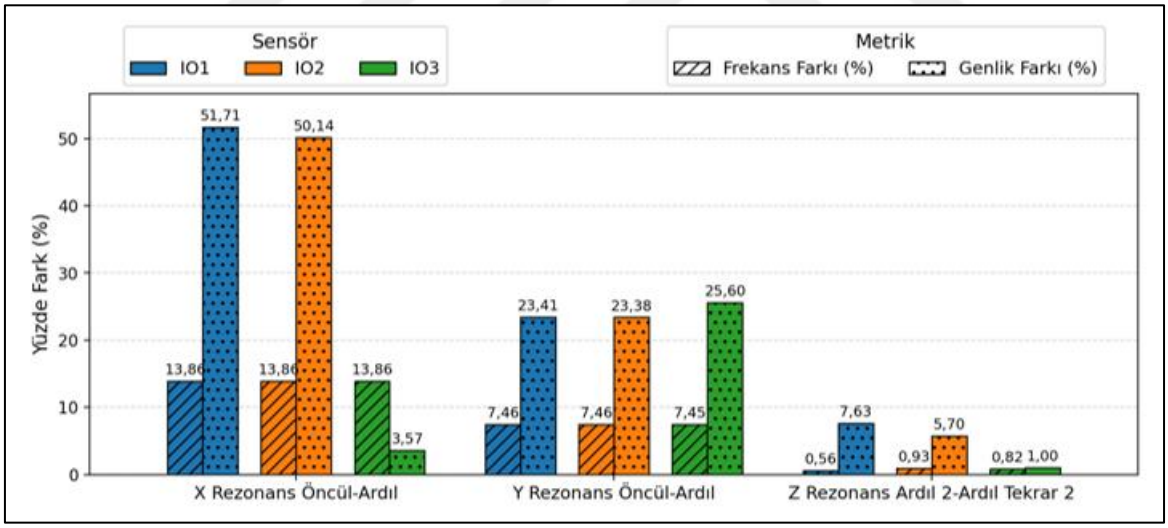


Şekil 5.4. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.5. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.2. Önceki ve sonraki rezonans taramalara ait frekans ve genlik farkları



5.4. Rastgele Titreşim Prosedürü

Rastgele titreşim testleri, kukla ekipmanın fırlatma sırasında maruz kalacağı geniş bantlı dinamik yük çevresine karşı yapısal dayanımını ve dinamik davranışını doğrulamak amacıyla, savunma sanayi test merkezinde gerçekleştirilmiştir. Rastgele titreşim testleri, çevresel koşullar altında ürünün kabulü ve yeterliliğinin gösterilmesi için kullanılan standart yöntemlerden biridir ve elektro-dinamik sallayıcıya bağlanan birimin, önceden tanımlanmış

rastgele titreşim testi profilinin belirli toleranslar içinde uygulanması prensibine dayanır [40], [94]. Testlerden elde edilen tepe frekanslar, tepe PSD genlikleri ve gRMS değerleri, eksen ve sensör bazında özetlenerek Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

Test prosedürü, fırlatıcı kullanıcı kılavuzunda tanımlanan ekipman seviyesi rastgele titreşim profillerini ve ECSS dokümanlarında tarif edilen yöntemleri esas almaktadır. ECSS'de, rastgele titreşim ortamının genellikle 20-2000 Hz bandında, kırılma frekansları ve bunlara karşılık gelen PSD (g^2/Hz) seviyeleri ile tanımlandığı, bu profillerin altında kalan alanın karekökünün gRMS değeri olarak kullanıldığı ifade edilmektedir [5]. Benzer şekilde Kaya ve Nalbant çalışmasında, rastgele titreşim yüklemesinin 20 Hz ile 2000 Hz bant genişliğinde tüm yapısal rezonansları aynı anda uyardığı ve PSD ile frekans, yani g^2/Hz ile Hz gösteriminin gRMS hesabı için temel alınması gerektiği vurgulanmaktadır [40]. Bu tezde kullanılan dikey (Z) ve yatay (X, Y) rastgele titreşim profilleri de aynı prensipler doğrultusunda, kırılma frekansları ve g^2/Hz seviyeleri ile tanımlanmış; söz konusu giriş profilleri önceki alt bölümde verilmiş, bu bölümde ise kukla ekipman üzerinde ölçülen tepe frekans, tepe PSD ve gRMS değerleri Çizelge 5.3 üzerinden değerlendirilmiştir.

Rastgele titreşim testleri, her eksen için ECSS tarafından önerilen biçimde öncül rezonans tarama, rastgele titreşim ve ardıl rezonans taraması adımlarından oluşan bir döngü halinde yürütülmüştür. Benzer bir test diziliminin uydu ve taşıyıcı yapılar için önce sine taramaları ile temel modların belirlenmesi, ardından rastgele titreşim yüklemesi uygulanması ve son aşamada yeniden sine taramaları ile frekans kaymalarının izlenmesi şeklinde Süer ve Binbaş çalışmalarında da kullanıldığı görülmektedir. Bu tez kapsamında kukla ekipman önce Z ekseninde test edilecek şekilde test merkezi sarsıcı sistemine bağlanmıştır. 10-2000 Hz bandında 0,5 g seviyesinde öncül sine tarama uygulandıktan sonra Z ekseni için tanımlanan rastgele titreşim profili uygulanmış, testin bitiminde ise aynı sine profil kullanılarak ardıl tarama gerçekleştirilmiştir. Aynı prosedür, uygun fikstür ve başlık konfigürasyonları kullanılarak Y ve X eksenleri için de tekrarlanmıştır [15], [44].

Rezonans tarama (sine sweep) ve rastgele titreşim testleri, fırlatma çevresinin farklı yönlerini temsil eden ve birbirini tamamlayan iki ayrı doğrulama adımıdır. Rezonans tarama testinde ekipman düşük seviyeli, tek frekans bileşenli sinüzoidal bir uyarım ile belirli bir frekans aralığında taranmakta; böylece rezonans frekansları ve bu frekanslardaki tepe genlikleri belirlenerek ekipmanın dinamik karakteristiği izlenmekte ve test öncesi/sonrası değişimler

üzerinden yapısal bütünlük kontrol edilmektedir. Rastgele titreşim testinde ise önceden tanımlanan PSD profili doğrultusunda geniş bantlı bir ivme uyarımı uygulanmakta; bu sayede çok sayıda rezonans bölgesi eş zamanlı uyarılarak ekipmanın çevresel dinamik yüke karşı dayanımı ve titreşim altında göstereceği spektral tepki değerlendirilmekte, gRMS gibi bütünleşik göstergeler üzerinden genel yük seviyesi nicel olarak ifade edilmektedir. Bu çerçevede rezonans tarama, esas olarak "tanımlama ve bütünlük izleme" amaçlı bir düşük seviye ölçüm yöntemi iken; rastgele titreşim testi "çevresel yükleme ve yeterlilik/kabul doğrulaması" amaçlı yüksek enerji içerikli bir uygulama olarak ele alınmıştır.

Rastgele titreşim testleri boyunca, PSD profili sarsıcıya bağlı kontrol ivmeölçeri üzerinden takip edilirken, kukla ekipman gövdesi üzerine yerleştirilen IO1, IO2 ve IO3 ivmeölçerleri cevap sensörleri olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, ekipman seviyesindeki titreşim testlerinde fikstür üzerindeki kontrol sensörü ile ürün üzerindeki gözlem sensörlerini ayıran, iletilebilirlik performansını ve gRMS değerlerini birlikte değerlendiren çalışmalara benzemektedir [26]. Süer ve Binbaş tarafından raporlanan uydu ve taşıyıcı yapı testlerinde de kontrol sensörü sarsıcıya yakın taban bölgesine, cevap sensörleri ise yapının dinamik açıdan kritik bölgelerine yerleştirilmiş ve rastgele titreşim sırasında hem profil takibi hem de yapısal tepkiler bu sensörler üzerinden izlenmiştir. Bu tezde IO1, IO2 ve IO3 sensör konumlarının, dördüncü bölümde sunulan modal analiz sonuçları dikkate alınarak küresel modların tepe bölgelerine yerleştirilmesi, literatürdeki bu enstrümantasyon yaklaşımının kukla ekipman ölçeğine uyarlanmış bir biçimi olarak değerlendirilebilir [15], [44]. Z ekseninde gerçekleştirilen birinci, ikinci ve üçüncü rastgele titreşim testlerinden IO1 sensörü için elde edilen PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırmalı gösterimi Şekil 5.6'da; üçüncü test döngüsünde IO1, IO2 ve IO3 sensörleri için elde edilen PSD-frekans eğrileri ise Şekil 5.7'de sunulmakta ve sensörler arası dinamik tepki dağılımını görsel olarak ortaya koymaktadır.

Rastgele titreşim profillerinin tanımlanmasında, yükseklik ve süre kadar gRMS seviyeleri de esas alınmıştır. Kaya ve Nalbant, rastgele titreşim PSD grafiği altında kalan alanın karekökünün gRMS değerine karşılık geldiği, ayrıca girdi ve çıktı gRMS değerleri arasındaki oranın incelenmesinin fikstür ile ürünün dinamik performansını değerlendirmede temel bir gösterge olarak kullanılabileceği ortaya konmaktadır [40]. Koçmar tezinde de, ECSS standardında yer alan PSD ivme yükleri esas alınarak X, Y ve Z doğrultularında 120 saniyelik rastgele titreşim yüklemeleri uygulanmakta ve sonuçlar 3-sigma düzeyinde raporlanmaktadır. Bu tezde, test merkezinde yürütülen testler sırasında kontrol kanalındaki

gRMS değeri hedef profil ile karşılaştırılmış; kukla ekipman üzerindeki IO1, IO2 ve IO3 sensörlerinden elde edilen gRMS değerleri ise hem ekipman içi dinamik yük dağılımını hem de dördüncü bölümde sunulan sayısal analiz sonuçları ile korelasyonu değerlendirmek için kullanılmıştır [47]. İlgili tepe frekans, tepe PSD ve gRMS değerleri Çizelge 5.3'te nicel olarak özetlenmiştir.

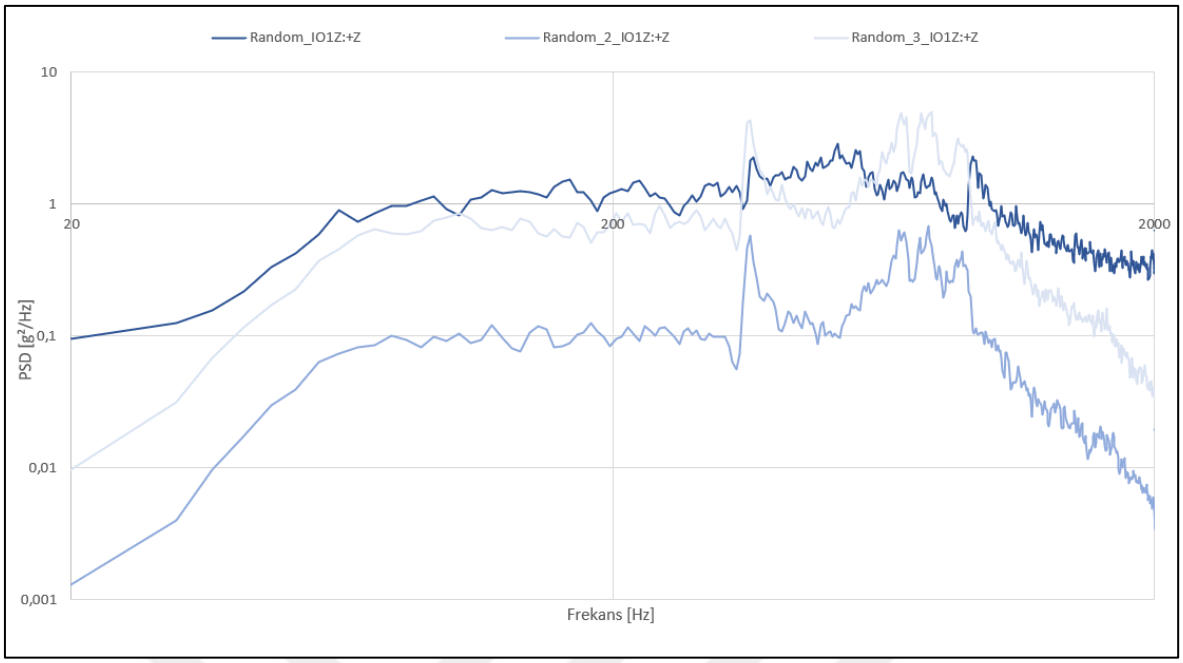
Rastgele titreşim testlerinin tekrarlanabilirliğini ve yapısal davranışta hasar oluşmadığını doğrulamak için, her rastgele titreşim test sonrasında düşük seviyeli sine taramalar gerçekleştirilmiştir. Binbaş çalışmasında, şok ve rastgele titreşim testleri sonrasında kontrol amaçlı sinüzoidal taramanın tekrarlandığı ve ilk tarama ile iyi uyum gözlenmesi hâlinde yapıda hasar olmadığı sonucuna varıldığı belirtilmektedir. Bu tezde de özellikle Z ekseninde, iç gerilme kaynaklı frekans kaymalarının azaltılması ve sistem davranışının kararlı hâle geldiğinin doğrulanması amacıyla rastgele titreşim ve rezonans tarama döngüsü üç kez tekrarlanmıştır. Z ekseninde art arda uygulanan üç rastgele titreşim testi sonucunda IO1 sensöründen elde edilen PSD-frekans eğrileri arasındaki değişim Şekil 5.6'da; üçüncü test için IO1, IO2 ve IO3 sensörleri arasındaki spektral farklar ise Şekil 5.7'de gösterilmekte ve küresel mod bölgelerinde tekrarlanabilir bir dinamik tepkiye işaret etmektedir. Üç test döngüsü sonunda Z ekseninde ölçülen frekans ve genlik farklarının özeti Çizelge 5.4'te verilmiş olup, bu farkların proje kapsamında belirlenen yaklaşık %5 frekans ve %20 genlik sınırları içinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD-frekans eğrilerinin, dördüncü bölümde sunulan sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda benzer sınırlar içinde iyi bir uyum sağlandığı tespit edilmiştir. Bu yaklaşım, literatürde rastgele titreşim sonrası frekans kaymalarının ve analiz ile test farklarının yorumlanmasına yönelik yöntemlerle uyumlu bir prosedür olarak değerlendirilebilir [44].

Sonuç olarak, bu alt bölümde sunulan rastgele titreşim prosedürü; ECSS dokümanlarında tarif edilen çevresel test yaklaşımları ve yüklediğin çalışmalarda raporlanan uygulamalar temel alınarak, savunma sanayi şirketi test altyapısına ve bu tezde kullanılan kukla ekipman özelinde ekipman seviyesi bir doğrulama programına uyarlanmıştır [15], [26], [40], [44], [47], [94]. Şekil 5.6, Şekil 5.7, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te sunulan sonuçlar, kukla ekipmanın rastgele titreşim altında tekrarlanabilir bir dinamik davranış sergilediğini ve sonlu eleman analizinden elde edilen spektral tepkilerle yeterli düzeyde korelasyon sağlandığını göstermekte; 5.5'te açıklanacak veri işleme adımları ve kabul ölçütleri için temel girdi niteliği taşımaktadır. Z ekseni için ana metinde yalnızca temsilî PSD-frekans eğrileri ve özet

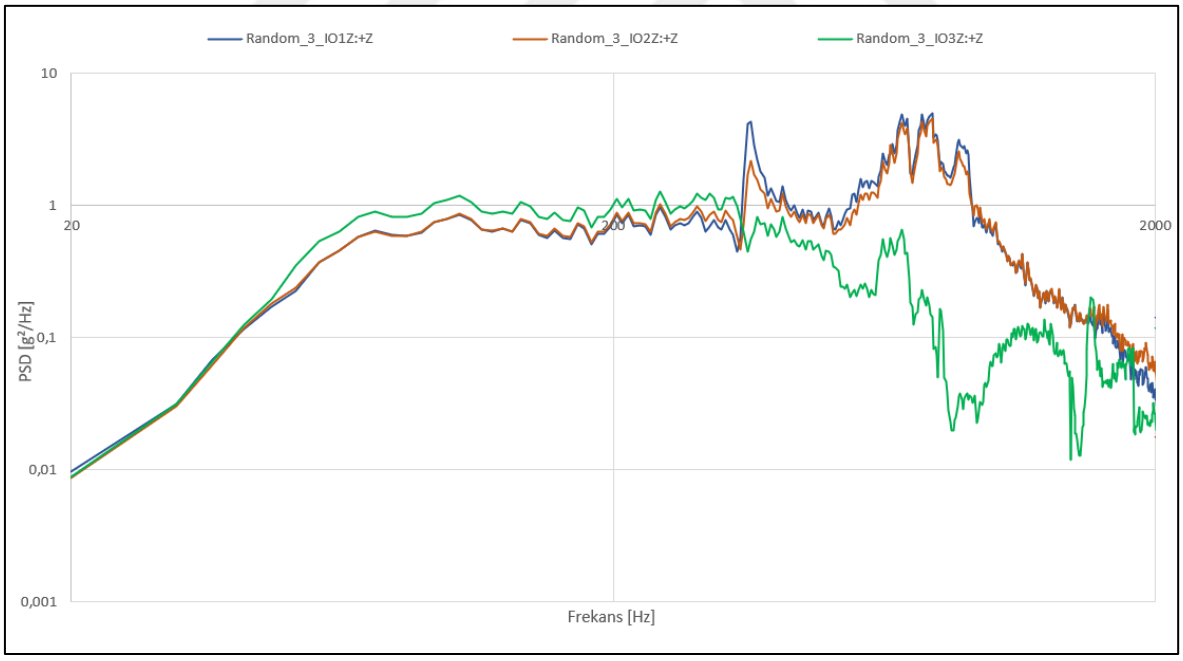
istatistikler sunulmuş, X ve Y eksenlerindeki rastgele titreşim analiz-test karşılaştırmalarının yanı sıra tüm eksen ve sensör kombinasyonlarına ait PSD-frekans eğrileri EK-4, EK-5 ve EK-6'da detaylı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Rastgele titreşim analizi sonucu tepe frekans, tepe PSD ve gRMS değerleri

Sensör	Tepe Frekans [Hz]	Tepe PSD [g^2/Hz]	gRMS [g]
IO1	681,20	4,84	38,83
IO2	681,20	4,18	38,58
IO3	681,20	0,65	21,64

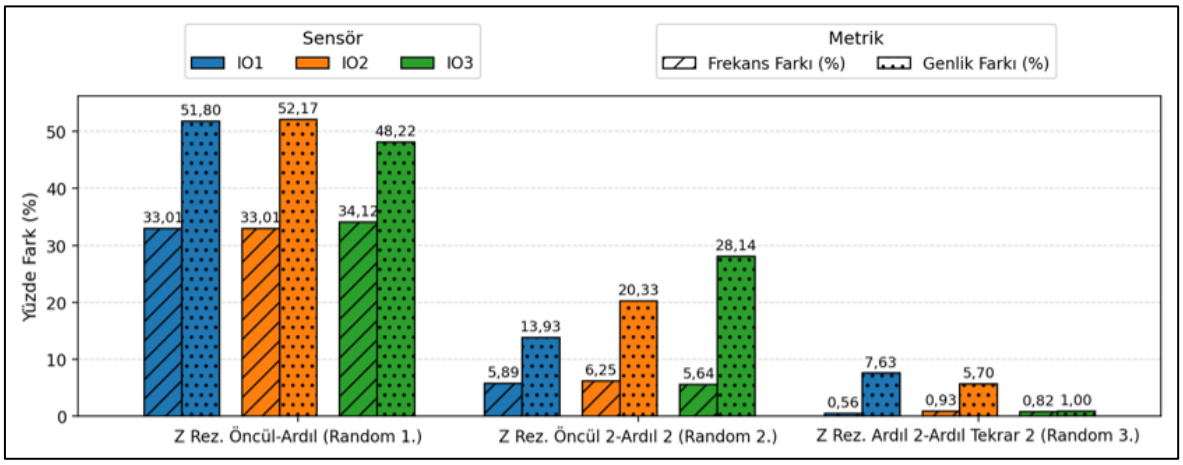


Şekil 5.6. Z ekseninde 1., 2. ve 3. rastgele titreşim testlerinden elde edilen PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1 için)



Şekil 5.7. Z ekseninde IO1, IO2 ve IO3 sensörleri için 3. rastgele titreşim testine ait PSD-frekans eğrileri

Çizelge 5.4. Z ekseni için üç test döngüsü sonunda frekans ve genlik farklarının özeti



5.5. Veri işleme ve Kabul Ölçütleri

Rastgele titreşim ve rezonans tarama testlerinde kullanılan ölçüm zincirinden elde edilen tüm veriler, savunma sanayi firması test merkezinde titreşim kontrol sistemi üzerinden ".unv" formatında dışa aktarılmıştır. Test kampanyası sonrasında bu dosyalar Python tabanlı bir araç kullanılarak ".dat" formatına dönüştürülmüş ve daha sonra Excel ortamına aktarılmıştır. Excel'de her sensör ve eksen için frekans ve PSD (g^2/Hz) verileri ayrı çalışma sayfalarına yerleştirilmiş, frekans sütunları artan sırada düzenlenmiş ve IO1, IO2 ile IO3 sensörleri için ayrı veri serileri oluşturulmuştur. Benzer şekilde Avşar çalışmasında da rastgele titreşim ve modal testlerden elde edilen verilerin önce uygun dosya formatına dönüştürüldüğü, ardından MATLAB ve Excel tabanlı araçlar ile işlenerek grafikler ve karşılaştırma tablolarının oluşturulduğu ifade edilmekte; veri dönüşüm ve düzenleme adımlarının bu şekilde yapılandırılmasının hem grafiklerin okunabilirliğini artırdığı hem de sayısal analiz sonuçları ile birebir karşılaştırma yapılmasına imkân verdiği belirtilmektedir [70]. Bu tezde de benzer bir iş akışı izlenmiş, böylece hem analiz hem de test çıktıları ortak bir değerlendirme platformunda bir araya getirilmiştir.

Veri işleme aşamasında, öncelikle rezonans tarama testlerinden elde edilen frekans ile genlik eğrileri değerlendirilmiştir. Önceki (öncül) ve sonraki (ardıl) sine taramalardan elde edilen tepe frekanslar, her sensör için ayrı ayrı belirlenmiş; bu frekansların farkı yüzde cinsinden ifade edilerek $\Delta f_\%$değerleri hesaplanmıştır. Benzer şekilde tepe genliklerdeki farklar da yüzde cinsinden $\Delta A_\%$olarak tanımlanmıştır. Avşar ve Demir çalışmalarında, modal testler sonrasında elde edilen doğal frekansların analitik ve sonlu eleman modeli sonuçları ile

yüzdelik farklar üzerinden karşılaştırıldığı, bu farkların model doğruluğu ve yapısal davranışın değişimi için bir kabul ölçütü olarak kullanıldığı görülmektedir [33], [70]. Bu tez kapsamında da rezonans tarama öncül ve ardıl sonuçları için frekans farklarının belirli bir yüzdelik bandın altında kalması, genlik farklarının ise ekipmanın hasar görmediğini gösterecek seviyede olması proje gereksinimi olarak kabul edilmiştir. Z ekseninde tekrarlanan rastgele titreşim ve sine döngüleri sonrasında, bu yüzdelik farkların giderek azaldığı ve son döngüde istenen sınırlar içine indiği gözlemlenmiştir. Bu durum, imalat kaynaklı iç gerilmelerin gevşemesi ile sistem davranışının kararlı bir hâle geldiğine işaret etmektedir.

Rastgele titreşim testleri için veri işleme, PSD-frekans eğrileri üzerinden yürütülmüştür. IO1, IO2 ve IO3 sensörlerine ait g²/Hz cinsinden PSD eğrileri her eksen (X, Y, Z) için ayrı ayrı elde edilmiş; bu eğriler kullanılarak hem tepe frekans ve tepe genlik değerleri hem de toplam ivme seviyesi hesaplanmıştır. Toplam ivme seviyesi için ilgili eksendeki PSD eğrisinin frekans ekseni boyunca integrali alınmış ve elde edilen alanın karekökü gRMS değeri olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla eşitlik Eş. 5.1 kullanılmıştır. Burada $PSD(f)$, ivme cevap spektral yoğunluğunu, $f_1$ve $f_2$ise profil için tanımlanan alt ve üst frekans sınırlarını temsil etmektedir.

$$g_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} PSD(f)\,\mathrm{d}f} \tag{5.1}$$

Mikkola çalışmasında, giriş PSD'sinden toplam ivme seviyesinin hesaplanmasında aynı yaklaşım izlenmekte; frekans ekseni boyunca yapılan sayısal integrasyonun karekökü ile gRMS büyüklüğünün elde edildiği açıkça gösterilmektedir. Berger ve ECSS dokümanlarında da rastgele titreşim ortamının PSD-frekans temsili üzerinden değerlendirilmesi ve bu spektrumun altında kalan alanın karekökünün RMS ya da gRMS değeri ile ilişkilendirilmesi veri işleme zincirinin temel adımlarından biri olarak tarif edilmektedir [1], [5], [100]. Şekil 5.8'de, rastgele titreşim testine ait örnek bir PSD-frekans eğrisi üzerinde gRMS hesabının bu prensibe göre şematik gösterimi sunulmaktadır. Aynı integral yaklaşımı, dördüncü bölümde sunulan rastgele titreşim analizlerinden elde edilen PSD eğrileri için de uygulanmış; böylece her sensör ve her eksen için analiz ile test gRMS farklarının yüzde cinsinden hesaplanmasına imkân sağlanmıştır.

Analiz-test karşılaştırmalarında, üç temel ölçüt esas alınmıştır. Bunlardan ilki, doğal frekans farkıdır ve analiz ile testten elde edilen tepe frekanslar arasındaki yüzde fark olarak değerlendirilmiştir. İkinci ölçüt, PSD tepe genlik farkı olup, g^2/Hz cinsinden analiz ve test tepe değerleri arasındaki yüzde farkı ifade etmektedir. Üçüncü ölçüt ise toplam ivme farkıdır; burada analiz ve testten elde edilen gRMS değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki yüzde fark, korelasyonun bir diğer göstergesi olarak kullanılmıştır.

Literatürde, rastgele titreşim analiz-test korelasyon çalışmalarında benzer ölçütlerin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Somashekar ve arkadaşları çalışmasında baskı devre kartları için temel mod frekansları, sonlu eleman modeli ve test sonuçları kullanılarak yüzde farklar üzerinden karşılaştırılmaktadır. Ayrıca rastgele titreşim testlerinden elde edilen gRMS yanıtları ile analiz sonuçları arasındaki farkların da yüzde mertebesinde raporlandığı görülmektedir. Avşar ise basit bir optik sistem için analitik, sonlu eleman ve deneysel rastgele titreşim sonuçlarını hem frekans hem de genlik açısından karşılaştırmakta ve farkların tek haneli yüzde mertebesinde kalmasını model doğruluğu için yeterli görmektedir [70], [98].

Bu tezde kukla ekipman için belirlenen kabul kriterleri, literatürde rastgele titreşim analizi ve test-analiz korelasyonu için önerilen yaklaşımlar ile uyumlu olacak şekilde tanımlanmıştır. Buna göre öncelikle, rastgele titreşim analizi ile rastgele titreşim testi sonuçları arasındaki frekans farklarının yaklaşık %5 mertebesinde veya bunun altında kalması hedeflenmiştir. Bu koşul, modelin doğal frekansları bakımından test sonuçlarını yeterli doğrulukta temsil ettiğinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. İkinci ölçüt, PSD eğrileri üzerinden değerlendirilen tepe genlik farklarıdır. Bu farkların yaklaşık %20 mertebesinin altında kalması hedeflenmiş; böylece zorlanmış titreşim altındaki dinamik yanıt seviyelerinin analiz ve test arasında makul sınırlar içinde uyumlu olması amaçlanmıştır. Son ölçüt olarak, analiz ve testten elde edilen gRMS değerleri arasındaki farkların yaklaşık %10 mertebesinin altında kalması, toplam ivme seviyeleri açısından kabul edilebilir bir korelasyon ölçütü olarak benimsenmiştir. Z ekseni rastgele titreşim testi için analiz-test gRMS, tepe frekans ve tepe PSD değerlerine ait yüzdelik farklar Çizelge 5.5'te özetlenmiş olup, elde edilen sonuçların tanımlanan bu sınırlar içinde kaldığı görülmektedir.

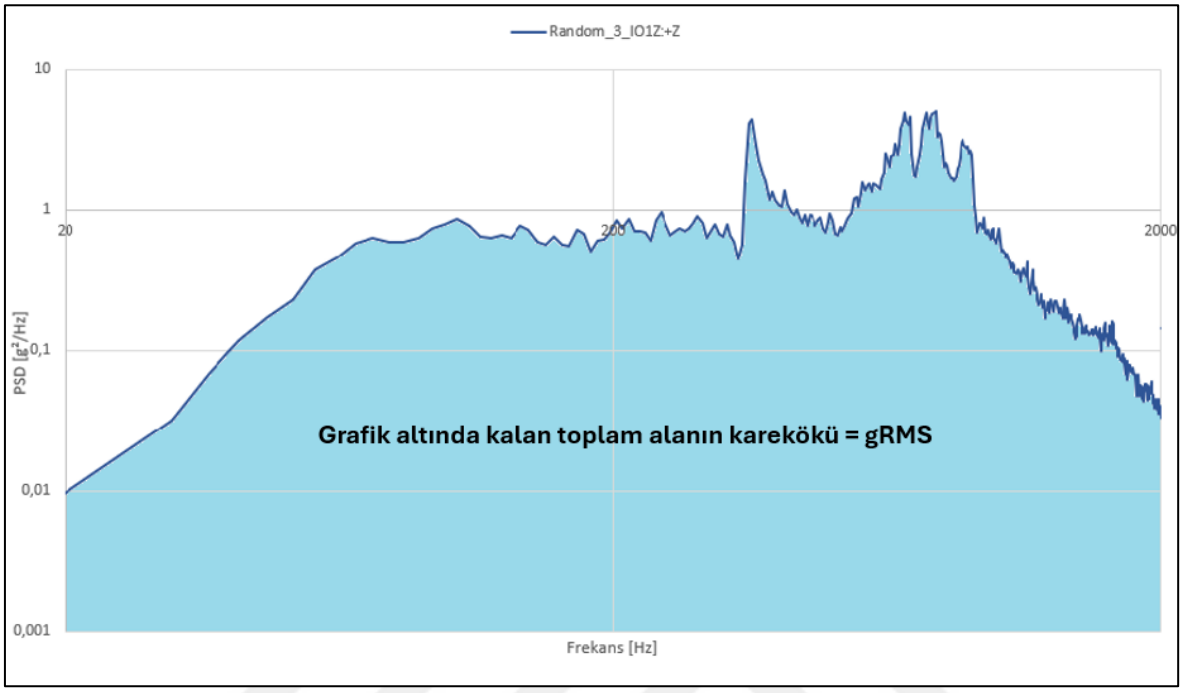
Benzer kabul mantığının, ekipman seviyesindeki rastgele titreşim testlerinde Avrupa Uzay Standardizasyon İş Birliği (ECSS) standardında tarif edilen "test sonuçlarının düşük ve orta

seviyelerde sonlu eleman modeli ile uyum göstermesi ve farkların modelin geçerliliğini sorgulatmayacak düzeyde olması" yaklaşımı ile de uyumlu olduğu değerlendirilmektedir [5], [13]. Aynı doğrultuda, gerçek ekipmanı temsil eden sonlu eleman modeli ile kukla ekipmanın sonlu eleman modeli arasında yapılan karşılaştırmalarda da frekans için %5, genlik için ise %20 düzeyinde farkların sağlanması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçların bu sınırlar içinde kalması, kukla ekipmanın dinamik açıdan gerçek ekipmanı başarıyla temsil ettiğini göstermektedir. Üretilmiş kukla ekipman üzerinde yürütülen rastgele titreşim testleri ile kukla 3B modeline ait rastgele titreşim analizleri arasında da benzer seviyede bir uyum gözlenmiş; bu bulgu, oluşturulan sonlu eleman modelinin test verilerini mühendislik açısından yeterli doğrulukla öngördüğünü ortaya koymuştur. Avşar ve Yalçın tarafından raporlanan optomekanik sistem çalışmalarında da benzer çoklu karşılaştırma stratejilerinin kullanıldığı, modal, rastgele titreşim ve frekans cevabı fonksiyonu (FRF) çıktılarının birlikte değerlendirilerek model güvenilirliğinin kapsamlı biçimde sorgulandığı görülmektedir [51], [70].

Veri işleme sürecinin önemli bir diğer çıktısı, tüm sensörler için öncül ve ardıl rezonans tarama sonuçları ile analiz ve testten elde edilen PSD eğrilerinin aynı grafik üzerinde üst üste çizilmesidir. Excel ortamında oluşturulan bu grafiklerde IO1 için mavi, IO2 için turuncu, IO3 için ise yeşil renk kullanılarak sensör tepkileri birbirinden ayrılmış; böylece hem frekans kaymalarının hem de genlik değişimlerinin görsel olarak izlenmesi sağlanmıştır. Torehov çalışmasında, farklı görev ve test güç spektral yoğunluğu profillerinin (PSD) aynı grafik üzerinde logaritmik eksenlerde üst üste çizilmesine ve kullanıcı arayüzü üzerinden seçilerek karşılaştırılmasına imkân veren MATLAB tabanlı bir araç sunulmakta; bu araç tezde kullanılan çoklu eğrili PSD ve gRMS karşılaştırma yaklaşımı ile benzer bir veri görselleştirme metodolojisi ortaya koymaktadır [43].

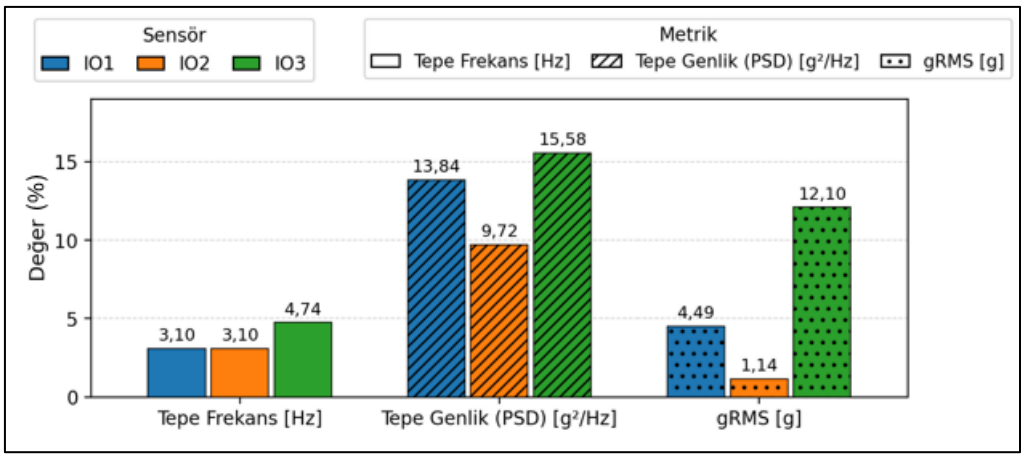
Sonuç olarak, bu alt bölümde tanımlanan veri işleme adımları ve kabul ölçütleri, yürütülen rastgele titreşim ve rezonans tarama testlerinden elde edilen verilerin sistematik biçimde değerlendirilmesini sağlamış; dördüncü bölümde sunulan sayısal analiz sonuçları ile beşinci bölümde yer alan deneysel bulguların tutarlı bir çerçevede karşılaştırılmasına imkân vermiştir. Bu yapı, ECSS'de tarif edilen rastgele titreşim test yürütme adımları ile literatürdeki analiz-test korelasyonu çalışmalarının metodolojisiyle uyumlu bir yaklaşım ortaya koymakta; kukla ekipmanın hem gerçek ekipmanı dinamik açıdan temsil ettiğini hem

de sonlu eleman modelinin test verilerini nicel ve görsel ölçütler üzerinden yeterli doğrulukla yeniden üretebildiğini göstermektedir [13].



Şekil 5.8. Rastgele titreşim testine ait örnek bir PSD-frekans eğrisi üzerinde gRMS hesabının şematik gösterimi

Çizelge 5.5. Z ekseni rastgele titreşim testi için analiz-test gRMS, tepe frekans ve tepe PSD yüzde farkları



6. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Kütle ve Atalet Özelliklerinin Karşılaştırılması

Bu tezde tasarlanan kukla ekipman, gerçek ekipmanın yerini uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde alabilmesi için öncelikle kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri açısından değerlendirilmiştir. Gerçek ekipman 3B modeli ile kukla ekipman 3B modeli karşılaştırıldığında; kütlede yaklaşık %0,20; X, Y ve Z kütle merkezi bileşenlerinde sırasıyla yaklaşık %0,25, %0,21 ve %0,12; I_{xx}, I_{yy} ve I_{zz} atalet momentlerinde ise yaklaşık %4,33, %1,83 ve %0,83 mertebesinde farklar elde edilmiştir. Bu değerler, ECSS'de ekipman seviyesinde kütle özelliklerinin ölçümü ve toleransların fırlatıcı kullanıcı kılavuzu ya da standardın tablosunda belirtilen minimum değerleri sağlaması gerektiğine dair hükümlerle uyumludur [4].

ECSS'de ekipman seviyesinde fiziksel özellik ölçümlerinin amacının boyutlar, kütle, kütle merkezi ve atalet momentlerini belirlemek olduğu, gerektiğinde balans kütleleriyle kütle merkezi ve atalet değerlerinin hassas şekilde ayarlanabileceği belirtilmektedir. Bu tezde, kukla ekipman tasarımı Siemens NX ortamında tek parça AL7075-T651 malzemeden gerçekleştirilmiş ve yukarıda verilen fark seviyelerine inene kadar 3B model üzerinde yinelemeli bir optimizasyon süreci uygulanmıştır. Böylece kukla ekipmanın kütle özellikleri, hem ECSS'de tarif edilen fiziksel özellik gereksinimleriyle hem de gerçek ekipmanın fırlatma konfigürasyonundaki kütle ve denge gereksinimleriyle tutarlı olacak biçimde eşleştirilmiştir.

ECSS'de ayrıca, statik yük testlerinde veya benzeri yapısal doğrulama faaliyetlerinde kukla yapıların kullanılması hâlinde bu kuklaların en azından kütle ve rijitlik bakımından temsil edici olması gerektiği vurgulanmaktadır. Kukla ekipmanın kütle, kütle merkezi ve atalet momenti farklarının düşük yüzde mertebelerinde kalması, temsil edicilik açısından önemli bir gösterge olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, ilerleyen bölümlerde sunulan modal ve rastgele titreşim korelasyon sonuçları ile ele alındığında, söz konusu kukla yapının gerekli temsil edicilik şartını karşıladığını göstermektedir.

6.2. Modal Analiz - Rezonans Tarama Sonuçlarının Karşılaştırılması

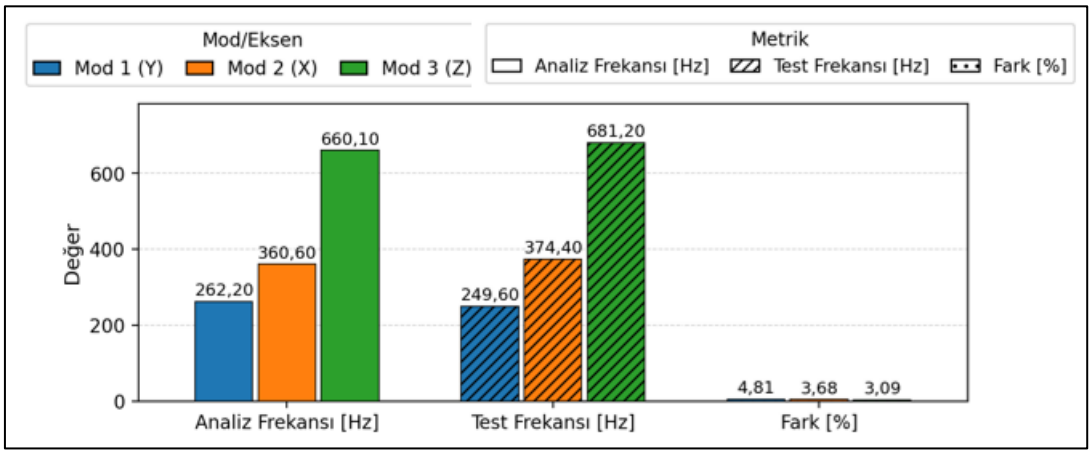
Modal analiz sonuçlarının, rezonans tarama testlerinden elde edilen frekans ve genlik değerleri ile karşılaştırılması, kukla ekipmanın dinamik davranışının hem sonlu eleman modeli hem de deneysel kurulum açısından tutarlılığını değerlendirmek için temel bir adımdır. Sonlu eleman modelinde yapının birinci doğal frekansı Y ekseni yönünde yaklaşık 262,20 Hz olarak bulunmuştur. İkinci mod X ekseni yönünde yaklaşık 360,60 Hz, üçüncü mod ise Z ekseni yönünde yaklaşık 660,10 Hz olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen öncül rezonans tarama testlerinde, sensör yerleşimleri ve sınır koşulları dikkate alınarak aynı modlara karşılık gelen rezonans tepe frekansları ölçülmüştür. İlk iterasyonlarda bazı eksenler için frekans farklarının kabul sınırlarının üzerinde kaldığı, tekrarlanan rastgele titreşim ve tarama döngülerinin ardından ise bu farkların yaklaşık yüzde 5 mertebesinin altına indiği görülmüştür.

Literatürde modal analiz ile test korelasyonu için kabul edilen frekans farkı seviyeleri incelendiğinde, Çekiç tarafından yürütülen çalışmada ECSS esas alınarak oluşturulan “test ile analiz korelasyon kriterleri” tablosunda, temel eğilme modları için öz frekans sapması sınırının %3, etkin kütlesi %10’dan büyük modlar için %5 ve diğer modlar için %10 olarak verildiği görülmektedir [3]. Benzer şekilde Avşar tarafından yapılan çalışmada, basit bir optik sistem için geliştirilen analitik model, sonlu eleman modeli ve deneysel modal analiz sonuçları birlikte değerlendirilmiş, doğal frekanslar arasındaki yüzdelik farkların tek haneli değerlerde kalması model doğruluğu açısından yeterli bir uyum düzeyi olarak yorumlanmıştır [70]. Igolkin ve arkadaşları ise, modal parametreler ile sonlu eleman modeli sonuçları arasındaki uyumu değerlendirmek için MAC, COMAC, CSAC ve CSF gibi korelasyon kriterlerini kullanmakta, özellikle frekans ve mod şekli sapmalarının tespitiyle model güncelleme ihtiyacına dikkat çekmektedir [29].

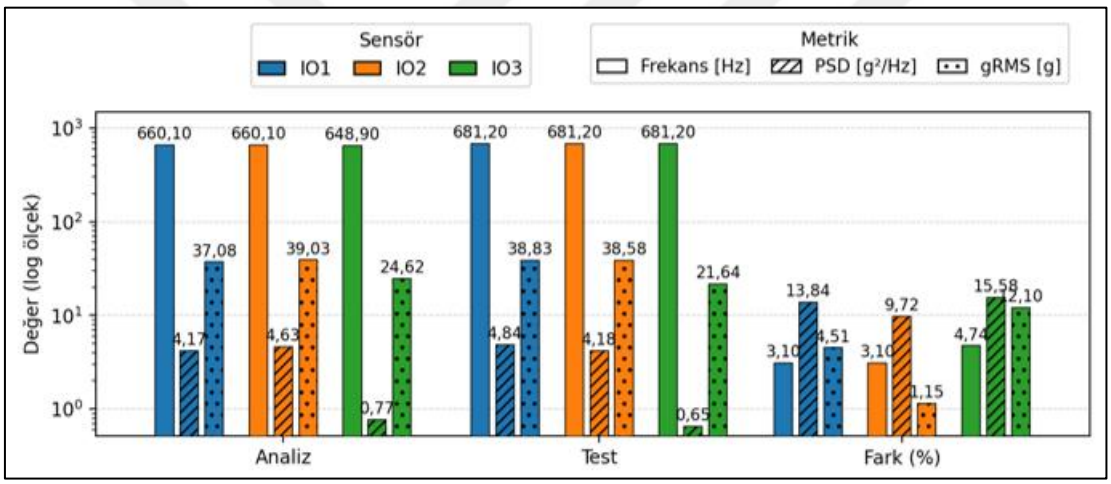
Bu tezde modal analiz ile rezonans tarama sonuçlarının karşılaştırılmasında öncelikli metrik olarak frekans farkı esas alınmış, mod şekli korelasyonu (örneğin MAC) yerine kukla ekipmanın temel global modlarının frekans bandı içinde doğru konumlanmasına odaklanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle birinci eğilme modunun fırlatıcı gereksinimi olan 140 Hz sınırının belirgin biçimde üzerinde yer aldığını göstermektedir. Rastgele titreşim analiz-test korelasyonu açısından ise Z ekseninde IO1 ve IO2 sensör noktaları için elde edilen tepe frekans, tepe PSD ve gRMS farkları Çizelge 6.2’de özetlenmiş; bu farkların

frekansta yaklaşık %5, tepe PSD genliklerinde ise yaklaşık %20 mertebesinin altında kaldığı görülmüştür. Aynı sensör noktaları için sonlu eleman analizinden elde edilen PSD-frekans eğrileri ile üçüncü Z ekseni rastgele titreşim testinden elde edilen cevap spektrumlarının üst üste gösterildiği Şekil 6.1 ve Şekil 6.2, hem tepe frekansların konumu hem de genlik seviyeleri bakımından bu uyumu görsel olarak ortaya koymaktadır. Ek olarak, Z ekseni için gerçek ekipmana ait sonlu eleman rastgele titreşim analiz sonuçları ile kukla ekipmanın sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış; tepe frekans, tepe PSD ve gRMS büyüklüklerine ilişkin özet farklar Çizelge 6.3'te sunulmuştur. Z ekseni için gerçek ekipman ve kukla ekipman sonlu eleman modellerinden elde edilen ivme PSD-frekans eğrilerinin IO1, IO2 ve IO3 sensör noktalarındaki karşılaştırmalı gösterimleri ise EK-7'de Şekil 1.31-Şekil 1.33'te sunulmakta; böylece yalnızca tepe frekans ve tepe PSD seviyeleri değil, tüm frekans bandındaki spektral yanıt dağılımı görsel olarak değerlendirilebilmektedir. Bu tabloda yer alan farkların da frekans için yaklaşık %5, genlik için ise yaklaşık %20 bandı içinde kalması, kukla ekipmanın dinamik açıdan gerçek ekipmanı temsil ettiğini ve geliştirilen sonlu eleman modelinin hem rezonans tarama hem de rastgele titreşim test verilerini mühendislik açısından yeterli doğrulukla yeniden üretebildiğini göstermektedir. Bu seviyeler, hem Çekiç tarafından aktarılan ECSS korelasyon kriterleriyle hem de Avşar ve diğer çalışmaların sunduğu modal ve rastgele titreşim test-analiz karşılaştırma örnekleriyle tutarlı bir uyum düzeyine karşılık gelmektedir [3], [70].

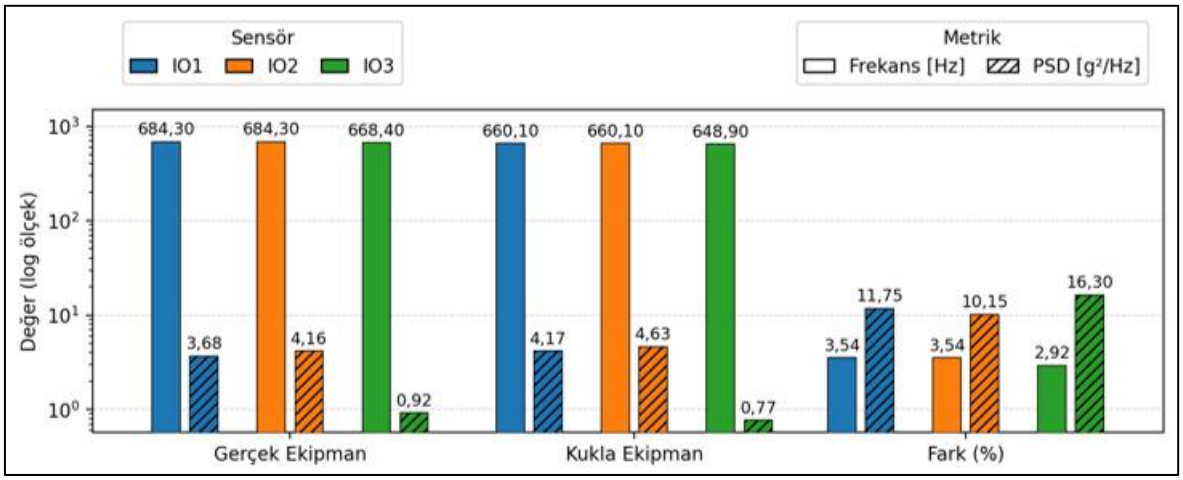
Çizelge 6.1. Modal analiz-rezonans tarama karşılaştırma tablosu

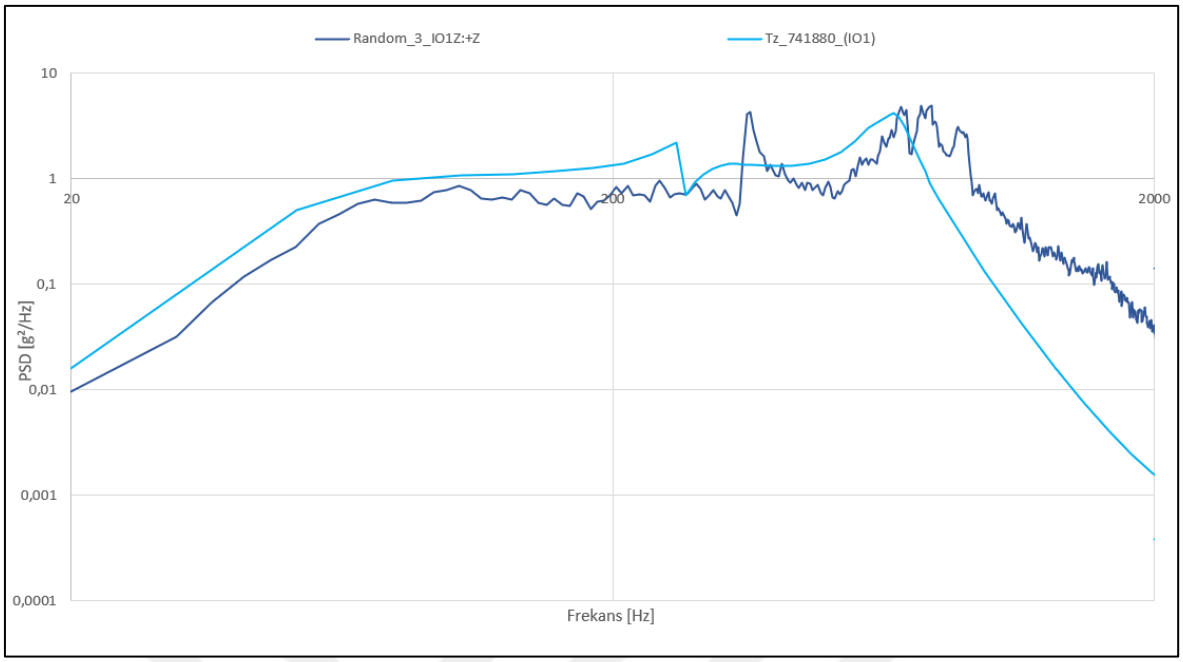


Çizelge 6.2. Z ekseni rastgele titreşim analizi-test karşılaştırma tablosu

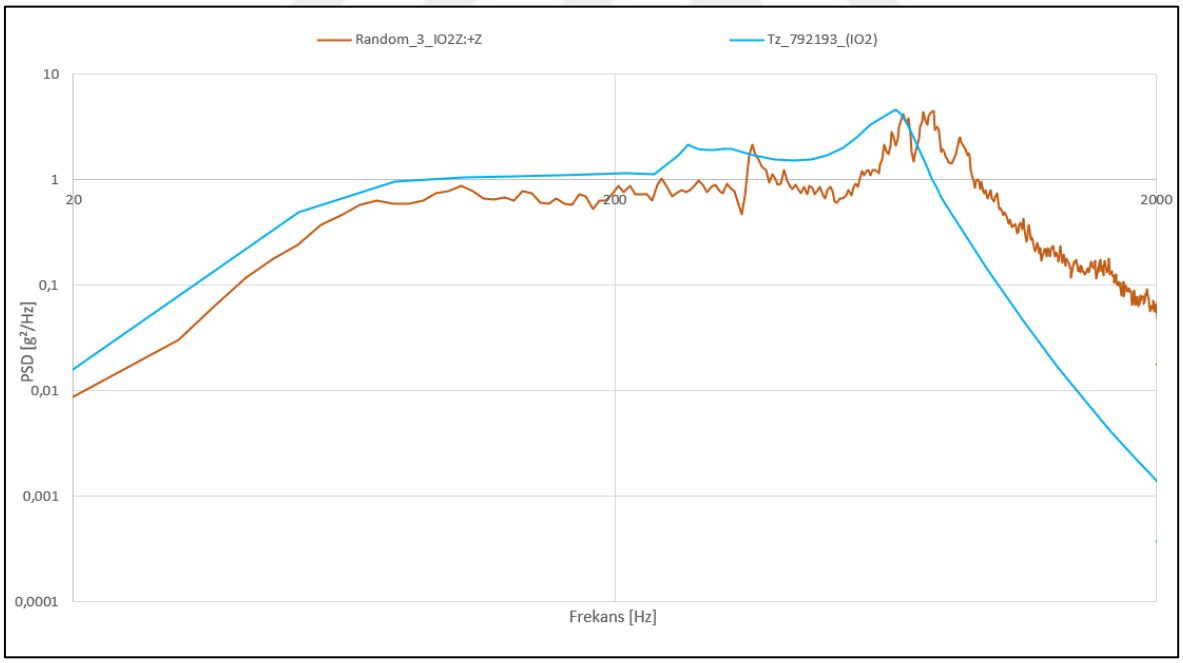


Çizelge 6.3. Z ekseni gerçek ekipman SEM-kukla ekipman SEM rastgele titreşim analizi karşılaştırma tablosu





Şekil 6.1. Z ekseni IO1 noktasında analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin üst üste gösterimi



Şekil 6.2. Z ekseni IO2 noktasında analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin üst üste gösterimi

6.3. Rastgele Titreşim Analizi - Test Sonuçları Korelasyonu

Rastgele titreşim analizleri ile test sonuçları arasındaki korelasyon, bu tezde kukla ekipmanın gerçek fırlatma ortamını temsil eden geniş bantlı yükler altındaki davranışının doğrulanmasında merkezi bir rol oynamaktadır. Dördüncü bölümde sunulan sonlu eleman tabanlı rastgele titreşim analizlerinde IO1, IO2 ve IO3 sensör konumları için X, Y ve Z eksenlerinde PSD ile frekans eğrileri elde edilmiş, bu eğrilerden tepe frekans, tepe genlik (g^2/Hz) ve gRMS büyüklükleri hesaplanmıştır. Beşinci bölümde açıklanan testlerde aynı sensör yerleşimleri kullanılarak ölçülen PSD ile frekans eğrileri analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında, özellikle Z ekseninde üçüncü rastgele titreşim testinin ardından tepe frekans farklarının yaklaşık %3 ile %5 aralığında, tepe genlik farklarının ise yaklaşık %20 mertebesinin altında kaldığı görülmüştür. Ayrıca analiz ile testten elde edilen gRMS değerleri arasındaki farkların, tüm eksenler ve sensör noktaları için yaklaşık %10 seviyesinin altında kaldığı belirlenmiştir.

Avşar çalışmasında, optik bir sistem için geliştirilen analitik model, sonlu eleman modeli ve rastgele titreşim test sonuçları hem frekans hem de rastgele titreşim çıktı genlikleri bakımından karşılaştırılmaktadır. Deneysel sonuçlarla arasındaki farklar tablolarda yüzdelik değerler hâlinde sunulmakta ve bu veriler üzerinden modelin doğruluğu değerlendirilmektedir. Abu Deeb çalışmasında ise kaynaklı ve lehimli çelik bileşenler üzerine uygulanan rastgele titreşim testleri sonucunda elde edilen yorulma ömürleri, FEMFAT yazılımı ile hesaplanan sonlu eleman tabanlı yorulma ömürleriyle karşılaştırılmış ve FE model sonuçlarının, kabul edilebilir hata payları içinde test verileriyle aynı eğilimi izlediği gösterilmiştir. Bu tür çalışmalar, rastgele titreşim testlerinde bire bir örtüşme yerine, frekans, genlik ve ömür tahminlerinin belirli yüzdelik farklarla uyumlu olmasının mühendislik açısından yeterli kabul edildiğini ortaya koymaktadır [50], [70].

ECSS dokümanlarında rastgele titreşim ortamının genellikle g^2/Hz-Hz tabanlı güç spektral yoğunluğu (power spectral density, PSD) ile tanımlandığı, bu spektrumun altında kalan alanın karekökünün ise kök ortalama kare ivme değerini verdiği belirtilmektedir. NASA PT-TE-1413 kapsamında tanımlanan rastgele titreşim testi (Random Vibration Testing) uygulamalarına yapılan atıflarda da, rastgele titreşim test-analiz korelasyonunun gRMS, tepe ivme değerleri ve spektrum profilinin şekli üzerinden değerlendirildiği vurgulanmaktadır. Bu tezde de benzer bir yaklaşım izlenmiş, hem analiz hem de test tarafında aynı frekans

bandı esas alınarak sayısal integrasyon ile kök ortalama kare ivme değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar aralarındaki yüzdelik farklar üzerinden karşılaştırılmıştır [5].

Ek olarak, Gürsoy'un çalışmasında piroşok testleri için deneysel ve sayısal şok cevap spektrumu sonuçlarının karşılaştırıldığı ve kukla bir ekipman üzerinde yürütülen sonlu elemanlar test korelasyonuna dayalı ayrıntılı bir örnek olay analizi sunulmaktadır. Çalışmada, seçilen korelasyon göstergeleri açısından farkların kabul edilebilir sınırlar içinde kalması durumunda, test parametrelerinin bu sonuçlara göre yeniden ayarlanıp kalibre edilebileceği ortaya konmuştur. Bu yaklaşımdan hareketle, bu tezde rastgele titreşim için kullanılan yüzde beş frekans farkı, yüzde yirmi tepe genlik farkı ve yüzde on kök ortalama kare ivme farkı gRMS kriterleri, hem ECSS temelli mühendislik yaklaşımı hem de literatürde raporlanan benzer FE test korelasyon çalışmaları ile uyumlu bir değerlendirme seviyesi sunmaktadır [101].

6.4. Kukla - Gerçek Ekipman Korelasyonu

Kukla ekipmanın başarısı yalnızca kendi analiz ile test korelasyonu üzerinden değil, aynı zamanda gerçek ekipmanı temsil eden sonlu eleman modeli ile olan benzerliği üzerinden de değerlendirilmelidir. Bu tezde gerçek ekipmanın 3B modeline daha önce uygulanmış rastgele titreşim analizlerinden elde edilen PSD ile frekans eğrileri, kukla ekipmanın sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda frekans farklarının yaklaşık %3 düzeyinde kaldığı, tepe genlik farklarının ise %20 sınırının altında olduğu görülmüştür. Benzer biçimde kukla ekipmanın sonlu eleman modeli ile üretilmiş kukla üzerinde gerçekleştirilen rastgele titreşim testleri karşılaştırıldığında, frekans için yaklaşık %5, tepe genlik için yaklaşık %20 ve gRMS için yaklaşık %10 mertebesinde farklar elde edilmiştir. Bu büyüklükler, kukla ekipmanın hem gerçek ekipman modeline hem de fiili test sonuçlarına göre dinamik açıdan kabul edilebilir bir uyum sergilediğini göstermektedir. ECSS'de, testlerde kukla yapıların kullanılması hâlinde bu yapıların kütle ve rijitlik bakımından temsil edici olması gerektiği ve test konfigürasyonuna özgü tahminlerin bu kukla üzerinden gerçekleştirilmesinin kabul edilebilir olduğu özellikle vurgulanmaktadır. Çekiç çalışmasında, haberleşme uydusu için geliştirilen sonlu eleman modelinin sine titreşim testleri ile karşılaştırılmasında, temel eğilme modu için frekans farkının yaklaşık %3 mertebesinde olduğu ve bu farkın, model rijitliğinin test karşısında düşük kaldığını gösteren, ancak güncelleme ile iyileştirilebilen bir sapma olduğu belirtilmektedir. Bu çalışma aynı

zamanda, analiz-test korelasyonundaki farkların sistematik biçimde incelenmesi hâlinde, model güncelleme ve sınır koşulu iyileştirmeleri ile daha iyi eşleşme elde edilebileceğini göstermektedir [3, 4].

Bu tezde kukla ekipman modeli için elde edilen frekans ve genlik farkları, hem gerçek ekipman modeli ile kıyaslandığında hem de üretilmiş kukla üzerindeki test sonuçları ile karşılaştırıldığında frekans için %5, tepe genlik için %20 ve gRMS için %10 düzeylerinde kalmaktadır. Bu sonuçlar, kukla ekipmanın hem sonlu eleman modeli hem de deneysel veriler açısından gerçek ekipmanı dinamik olarak temsil ettiğini göstermektedir. Avşar ve Abu Deeb gibi çalışmaların sunduğu örneklerde de modal frekanslar, rastgele titreşim çıktıları ya da yorulma ömrü tahminleri ile test sonuçları arasındaki farkların tek veya düşük çift haneli yüzdelerle sınırlandığı ve bu seviyelerin mühendislik uygulamaları için yeterli görüldüğü ifade edilmektedir [50], [70].

Kukla ekipmanın tek parça AL7075-T651 kütükten talaşlı imalatla elde edilen monoblok yapıda olması, gerçek ekipmanın ise kapaklar, bağlantı elemanları ve çok parçalı bir montaj kurgusu içermesi nedeniyle iki konfigürasyon arasında dinamik davranış farkları oluşabilmektedir. Kapakların gövdeye sağladığı diyafram etkisi ve kesit ataletini artıran kapalı kesit benzeri katkısı, özellikle küresel eğilme modlarında etkin rijitliği yükselterek doğal frekansları değiştirebilir; buna karşılık cıvatalı birleşimler ve temas yüzeylerindeki mikro kaymalar, sürtünme kaynaklı ek sönüm oluşturarak rezonans tepe genliklerini ve spektral yanıt seviyelerini etkileyebilir. Ayrıca gerçek ekipmanda bulunan kapaklar, braketler, yerel takviyeler, kablo demetleri ve ikincil parçalar, toplam kütle eşleşmesi sağlansa dahi kütlenin uzaysal dağılımını ve asal atalet eksenlerini küçük mertebelerde değiştirebileceğinden, ataletsel büyüklüklerde ve mod şekillerinde yerel farklılıklar görülebilir. Bu nedenle temsil edicilik yalnızca kütle/kütle merkezi/atalet momenti uyumu ile sınırlı değerlendirilmemeli; kapak ve bağlantı kaynaklı rijitlik-sönüm farklarının etkisi, analiz-test korelasyonu ve gerekirse eşdeğer rijitlik/sönüm güncellemeleri ile nicel olarak doğrulanmalıdır. Bununla birlikte, bu tez çalışmasında söz konusu kapak, bağlantı/temas ve montaj detaylarının dinamik etkileri, modelleme karmaşıklığını ve hesaplama maliyetini artırmamak amacıyla idealizasyonlar ve mühendislik varsayımları kapsamında ele alınmıştır. İleride yürütülecek daha ayrıntılı çalışmalarda, kapakların eşdeğer kabuk/katı elemanlarla temsil edilmesi, cıvata ön yükleri ile temas-sürtünme doğrusal olmayan modele

dâhil edilmesi ve ikincil bileşenlerin (kablolama, braketler vb.) kütle/rijitlik katkılarının ayrı ayrı modellenmesi ile temsil doğruluğunun daha da artırılması mümkün görülmektedir.

Sonuç olarak, savunma sanayi şirketi test merkezinde test edilen kukla ekipmanın, kütle ve atalet özellikleri ile modal frekanslar, rastgele titreşim tepkileri ve gRMS değerleri açısından hem gerçek ekipmana ait sonlu eleman modeli hem de fiziksel kukla test sonuçları ile uyumlu bir dinamik davranış sergilediği görülmektedir. Uygulanan bütünleşik korelasyon yaklaşımı, ECSS dokümanlarında tarif edilen test ile analiz uyum ilkeleri ile literatürde yer alan sonlu eleman model test güncelleme ve korelasyon metodolojileriyle paralellik göstermektedir. Elde edilen nicel bulgular, kukla ekipmanın uydu yapısal yeterlilik modelinde gerçek ekipmanın temsili olarak güvenle kullanılabileceğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında savunma sanayi şirketi tarafından LEO yörüngesinde görev yapacak bir uydu için tasarlanan bir ekipmanın kukla modelinin yapısal analitik değerlendirmesi ile deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın kapsamı, gerçek ekipmanı temsil edecek kukla ekipmanın tasarımını, kütle özelliklerinin eşleştirilmesini, yüksek doğrulukta bir sonlu eleman modelinin oluşturulmasını, modal ve rastgele titreşim analizlerinin yapılmasını, çevresel titreşim testlerinin uygulanmasını ve son aşamada analiz ile test korelasyonunun sistematik biçimde ortaya konulmasını içermektedir. Elde edilen bulgular, bir yandan ilgili uydu projesi kapsamında kukla ekipmanın kullanılabilirliğini göstermiş, diğer yandan da benzer projeler için tekrarlanabilir bir metodoloji sunmuştur.

7.1. Araştırmanın Temel Sonuçları

Bu tez çalışmasının ana sonuçları bütüncül olarak değerlendirildiğinde, öncelikle kukla ekipmanın kütle özellikleri açısından gerçek ekipmanı temsil edecek şekilde başarıyla tasarlandığı görülmektedir. Gerçek ekipmanın 3B modeli ile kukla ekipmanın 3B modeli karşılaştırıldığında, toplam kütlede yaklaşık %0,20 fark elde edilmiştir. X, Y ve Z kütle merkezi konumları için sırasıyla yaklaşık %0,25, %0,21 ve %0,12 farklar hesaplanmıştır. I_{xx}, I_{yy} ve I_{zz} atalet momentleri için ise sırasıyla yaklaşık %4,33, %1,83 ve %0,83 mertebesinde sapmalar bulunmuştur. Bu değerler, kukla ekipmanın kütle, kütle merkezi ve atalet açısından gerçek ekipmanı yeterli doğrulukta temsil ettiğini göstermekte, dolayısıyla kukla ekipmanın yapısal yeterlilik modeli üzerinde gerçek ekipman yerine güvenle kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Sonlu eleman modeli açısından bakıldığında, mesh yakınsama çalışmaları ile arayüz temsiline ilişkin adımların da başarıyla tamamlandığı görülmektedir. Siemens Simcenter ortamında oluşturulan modelde TET10 elemanlar kullanılarak yapılan yakınsama analizlerinde, eleman boyutunun 33 mm ile 5 mm arasında değiştiği durumlar için doğal frekanslardaki değişim incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, 5 mm eleman boyutuna sahip ve yaklaşık 362 932 eleman içeren ağ yapısının, doğruluk ile hesaplama maliyeti arasında uygun bir denge sağladığı tespit edilmiştir. Montaj deliklerinde CBUSH ve RBE2 elemanları ile gerçekleştirilen arayüz modellemesi ve kalınlık boyunca iki eleman sırası tanımlanması

sayesinde, hem rijit taban davranışı hem de eğilme altındaki gerinim dağılımı sonlu eleman modelinde tatmin edici düzeyde temsil edilmiştir.

Modal analiz sonuçları, fırlatıcı tarafından tanımlanan gereksinimlerin sağlandığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Uygulanan sınır koşulları altında birinci doğal frekansın Y ekseninde yaklaşık 262,20 Hz, ikinci modun X ekseninde 360,60 Hz ve üçüncü modun Z ekseninde 660,10 Hz olarak elde edildiği görülmüştür. Projede tanımlanan ilk doğal frekansın en az 140 Hz olması koşulu, bu değerler ile önemli bir emniyet payı ile karşılanmaktadır. Mod şekilleri ve kütle katılım oranları birlikte incelendiğinde IO1, IO2 ve IO3 sensör yerleşimlerinin küresel eğilme modlarının tepe bölgelerini temsil ettiği anlaşılmıştır. Böylece hem analiz tarafında hem de test tarafında dinamik açıdan kritik bölgelerin izlenmesi mümkün hâle gelmiştir.

Rastgele titreşim analizlerinde kullanılan sönüm oranı, test verisi ile kalibre edilerek daha gerçekçi bir model elde edilmiştir. Başlangıçta tüm modlar için %2,5 olarak tanımlanan sönüm oranı, özellikle Z ekseninde elde edilen güç spektral yoğunluğu eğrileri (PSD) g^2/Hz ile frekans (Hz) eğrileri üzerinden yarı güç bant genişliği yöntemi kullanılarak deneysel olarak hesaplanmış, ardından bu yeni değer modele geri beslenerek rastgele titreşim analizleri güncellenmiştir. Böylece sönüm parametresi yalnızca başlangıçta kabul edilen bir varsayım olmaktan çıkmış, doğrudan test verisine dayanan kalibre edilmiş bir model parametresi niteliği kazanmıştır.

Savunma sanayi şirketi test merkezinde gerçekleştirilen rezonans tarama ve rastgele titreşim testleri ile sayısal analizlerin karşılaştırılması, analiz ile test uyumunun sayısal olarak tatmin edici düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. Rezonans tarama ve rastgele titreşim testlerinin nihai safhasında, test öncesi ve sonrası gerçekleştirilen rezonans taramalarından elde edilen birinci küresel mod frekansları ile modal analiz sonuçları arasındaki farkların yaklaşık %5 düzeyine indiği belirlenmiştir. Rastgele titreşim analizleri ile üçüncü Z ekseni rastgele titreşim testinden elde edilen güç spektral yoğunluğu (PSD) ve frekans eğrileri karşılaştırıldığında, IO1, IO2 ve IO3 sensör noktalarında tepe frekans farklarının yaklaşık %5, tepe PSD genlik farklarının ise yaklaşık %20 sınırının altında kaldığı görülmüştür. Analiz ve testten hesaplanan kök ortalama kare ivme değerleri arasındaki farkların da tüm eksenler için yaklaşık %10 seviyesinin altında olduğu tespit edilmiştir. Bu fark düzeyleri, hem proje kapsamındaki mühendislik gereksinimleri hem de literatürde sunulan sonlu

eleman (FE) ve test korelasyonu örnekleri ile uyumlu, yeterli bir doğruluk seviyesine işaret etmektedir.

Son olarak, kukla ekipmanın gerçek ekipmanı dinamik açıdan temsil etme kabiliyeti hem analizler arası hem de analiz ile test karşılaştırmaları üzerinden doğrulanmıştır. Gerçek ekipmana ait sonlu eleman modeline daha önce uygulanmış rastgele titreşim analizleri ile bu tez kapsamında kukla ekipmanın sonlu eleman modeline uygulanan rastgele titreşim analizleri yan yana değerlendirildiğinde, ilgili modlar için frekans farklarının yaklaşık %3 düzeyinde, tepe genlik farklarının ise yaklaşık %20 sınırının altında kaldığı görülmüştür. Benzer biçimde, kukla sonlu eleman modeli ile üretilmiş kukla ekipman üzerinde gerçekleştirilen rastgele titreşim testleri karşılaştırıldığında, frekans için %5, genlik için %20 ve gRMS için %10 mertebesindeki farkların sağlandığı tespit edilmiştir. Bu bulgular birlikte ele alındığında, kukla ekipmanın hem gerçek ekipman modeli ile hem de fiziksel kukla testleri ile uyumlu bir dinamik davranış sergilediği ve uydu yapısal yeterlilik modeli üzerinde gerçek ekipmanın temsili olarak kullanılmaya uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

7.2. Bilimsel ve Mühendislik Katkıları

Bu tez, hem literatür hem de uzay projeleri bağlamında çeşitli açılardan özgün katkılar sunmaktadır. Öncelikle kukla ekipman tasarımında, uçak ve uzay standartlarında beklenen düzeyde bir kütle eşleştirme yaklaşımı ortaya konmuştur. Literatürde yer alan pek çok çalışmada kukla ya da ikiz modeller, çoğunlukla yaklaşık kütle ve atalete sahip bloklar ya da basitleştirilmiş hacimler ile temsil edilmekte, bu nedenle geometrik ve dinamik temsil kabiliyeti sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada ise gerçek ekipmanın 1:1 geometrik temsili korunmuş, kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri sıkı toleranslar altında eşleştirilmiş ve hem yapısal hem de dinamik açıdan yüksek temsil kabiliyetine sahip bir kukla tasarımı ortaya konmuştur.

İkinci olarak, sonlu eleman modeli özelinde mesh yakınsaması, arayüz modellemesi ve sensör yerleşimi tek bir bütünleşik SEM metodolojisi altında ele alınmıştır. Ağ yakınsama çalışmaları, CBUSH-RBE2 arayüz temsili, kalınlık boyunca tanımlanan eleman katmanları ve modal analiz sonuçlarına göre seçilen sensör yerleşimleri, birbirinden bağımsız adımlar olarak değil, aynı tasarım çerçevesinin birbiriyle ilişkili bileşenleri olarak kurgulanmıştır. Bu bütünleşik yaklaşım sayesinde analiz modeli, kurulan test düzenini doğrudan temsil

edebilmiş; böylece hem analiz-test korelasyonunun yürütülmesi hem de elde edilen sonuçların mühendislik bakış açısıyla yorumlanması önemli ölçüde kolaylaşmıştır.

Bu tez kapsamındaki üçüncü katkı, rastgele titreşim analizinde kullanılan sönüm oranının deneysel veriye dayalı olarak kalibre edilmesidir. Rastgele titreşim çalışmalarında çoğu zaman nominal kabul edilen ya da tablolardan alınan sönüm oranlarının kullanıldığı görülmektedir. Bu tezde ise sönüm oranı, doğrudan testten elde edilen güç spektral yoğunluğu frekans eğrileri üzerinden yarı güç bant genişliği yöntemi ile hesaplanmış ve sonlu eleman modeline geri beslenmiştir. Böylece yalnızca doğal frekansların değil, genlik seviyelerinin de test sonuçlarıyla uyumu artırılmıştır. Sönüm, bu yaklaşımla varsayımsal bir parametre olmaktan çıkmış ve deneysel dayanağı bulunan bir model girdisi niteliği kazanmıştır.

Bir diğer önemli katkı, analiz ile test korelasyonu için açıkça tanımlanmış ve sayısal olarak ifade edilmiş kabul kriterlerinin ortaya konulmuş olmasıdır. Frekans, PSD tepe genliği ve gRMS büyüklükleri için hedef fark seviyelerinin sırasıyla %5, %20 ve %10 olarak en başta belirlenmesi, korelasyon değerlendirmesini öznel bir “benzerlik” yorumundan çıkararak nicel olarak çözülebilen bir mühendislik problemine dönüştürmüştür. Bu yaklaşım, benzer ekipmanlar için yürütülen ya da ileride yürütülecek diğer projelerde de doğrudan uygulanabilecek, kurumsal ölçekte yeniden kullanılabilir bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

Son olarak, çalışma kapsamında baştan sona tekrarlanabilir bir test-analiz metodolojisi dokümante edilmiştir. Kukla ekipman tasarımı, sonlu eleman modelinin oluşturulması, modal ve rastgele titreşim analizleri, gerçekleştirilen titreşim testleri ve bu testlerden elde edilen verilerin işlenmesi, adım adım ve bütüncül bir akış olarak ortaya konmuştur. Bu yapı, farklı ekipmanlar için benzer kukla model ihtiyaçları ortaya çıktığında, aynı metodolojinin küçük uyarlamalarla yeniden uygulanabilmesine imkân veren, sürece dönüştürülmüş bir kurumsal bilgi birikimi anlamına gelmektedir.

7.3. Öneriler ve Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasının bulguları ve sınırlılıkları dikkate alındığında, ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik çeşitli geliştirme alanları ortaya çıkmaktadır. Bu alanlar hem sayısal

modelleme ve test-analiz korelasyonu hem de imalat süreçleri, veri işleme yöntemleri ve metodolojinin genellenebilirliği bakımından değerlendirilmiştir.

Öncelikle, model güncelleme ve mod şekli korelasyonu açısından daha gelişmiş yöntemlerin kullanılması önerilmektedir. Bu tezde korelasyon için temel metrikler olarak frekans, PSD tepe genliği ve gRMS büyüklükleri seçilmiştir. Gelecek çalışmalarda ise modal korelasyon için MAC, COMAC gibi matris temelli ölçütlerin kullanılması ve sonlu eleman modelinin bu ölçütlere göre güncellenmesi, kukla ekipmanın dinamik temsil doğruluğunu daha da artırma potansiyeline sahiptir.

İç gerilmelerin ve imalat süreçlerinin daha ayrıntılı modellenmesi de bir diğer önemli geliştirme alanıdır. Tek parça alüminyum kütükten talaş kaldırılarak imal edilen kukla ekipmanda başlangıç iç gerilmelerinin, ilk test döngülerinde frekans kaymalarına neden olduğu gözlemlenmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda, üretim süreçlerinin sebep olduğu artık gerilmelerin sayısal olarak modellenmesi ve malzeme modeline dâhil edilmesi, test kampanyası öncesinde gerçekleştirilen frekans öngörülerinin hassasiyetini artırabilir.

Test kapsamının genişletilmesi de bu tezde sunulan öneriler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada odak, esas olarak sinüs tarama ve rastgele titreşim testleri üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bununla birlikte, uydu yapısal yeterlilik modeli bakış açısından değerlendirildiğinde sinüs patlama (sine burst) yükleri, şok testleri ile termal ve mekanik etkilerin birlikte uygulandığı kombine yük senaryoları da önemli bir yer tutmaktadır. Kukla ekipmanın bu tür test senaryolarına dâhil edilmesi ve sayısal modellerin söz konusu yük tiplerini de kapsayacak şekilde genişletilmesi, özellikle doğrusal olmayan davranışların ve bağlantı detaylarının daha ayrıntılı biçimde incelenmesine katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, farklı kukla konseptlerinin karşılaştırılması da gelecekteki çalışmalar için ilgi çekici bir araştırma konusudur. Bu tezde tek parça AL7075-T651 malzemeden oluşan bir kukla yaklaşımı benimsenmiştir. Alternatif olarak çok parçalı, iç dolgu veya boşluklu ya da farklı malzeme kombinasyonlarına sahip kukla tasarımlarının aynı metodoloji ile değerlendirilmesi, üretim maliyeti, işlenebilirlik ve dinamik temsil doğruluğu arasındaki dengenin incelenmesine olanak sağlayabilir.

Veri işleme süreçlerinin otomatize edilmesi ve kurumsal araçların geliştirilmesi de önerilen bir diğer çalışma alanıdır. Bu tez kapsamında test verilerinin ".unv" uzantılı dosyalardan başlayıp ".dat" formatına ve ardından Excel ortamına uzanan bir iş akışı ile işlenmesi etkin biçimde kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda bu adımların Python ya da benzeri yazılım ortamlarında yarı otomatik ya da tam otomatik hâle getirilmesi, PSD, gRMS, frekans farkı ve kabul kriterlerine ilişkin tüm çıktının tek bir raporlama aracı üzerinden üretilmesini mümkün kılacaktır. Böyle bir yaklaşım hem zaman kazandıracak hem de kurumsal ölçekte kullanılabilecek bir korelasyon aracı geliştirilmesi için sağlam bir zemin oluşturacaktır. Son olarak, bu tezde geliştirilen kukla tasarım ve doğrulama yaklaşımının diğer uydu alt sistemlerine uygulanması önerilmektedir. Sunulan metodoloji, güç birimleri, batarya kutuları, anten yapıları ya da optik yük taşıyıcıları gibi farklı alt sistem ve ekipman türlerine uyarlanabilir niteliktedir. Farklı kütle aralıkları ve arayüz geometrileri için yürütülecek benzer çalışmalar, uzay projelerinde kukla ekipman kullanımını daha sistematik ve standardize edilmiş bir yapıya kavuşturabilir ve kurumsal bir tasarım-analiz-test kültürünün yerleşmesine katkı sağlayabilir.

Bu tez çalışması, uzay ortamı için tasarlanmış bir ekipmanın kukla modelinin hem analitik yöntemlerle hem de deneysel testlerle nasıl doğrulanabileceğine ilişkin bütüncül bir çerçeve sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, bir yandan ilgili uydu projesinin gereksinimlerini karşılarken diğer yandan benzer projelerde kullanılabilecek, literatür ve uluslararası standartlarla uyumlu, tekrarlanabilir bir test-analiz metodolojisi ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

1. Berger, C. (2021). *Finite Element Analysis of a Mock Satellite Based on Launch Vehicle Requirements*. Master's Thesis, San José State University Aerospace Science, San Jose, 9-42.

2. Morettini, G., Zucca, G., Braccesi, C., Cianetti, F., & Dionigi, M. (2021). CubeSat Spatial Expedition: An Overview From Design To Experimental Verification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1038(1), 012026.

3. Çekiç, A. (2021). *Improvement of Finite Element Model by Using Sine Vibration Test Results of a Communication Satellite*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 7-123.

4. ECSS Secretariat. (2022). Space engineering – Testing (ECSS-E-ST-10-03C Rev.1). *ECSS.* Noordwijk, 1-146.

5. ECSS Secretariat. (2013). Space engineering: Spacecraft mechanical loads analysis handbook (ECSS-E-HB-32-26A). *ECSS.* Noordwijk, 1-505.

6. Abdelal, G. F., Abuelfoutouh, N., & Gad, A. H. (2013). *Finite Element Analysis for Satellite Structures*. (First edition). London: Springer-Verlag, 251-270.

7. Gündoğdu, A. (2008). *Bir Uydunun Fırlatma Esnasında Maruz Kaldığı Yükler Altındaki Yapısal Davranışının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-60.

8. Şanlı, A. (2022). *ASTINSAT-1 Küp Uydu Tasarımı, Yapısal Analizi ve Üretken Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Millî Savunma Üniversitesi Hezârfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 3-58.

9. Arslan, İ. (2025). *Uzay ve Hava Yapılarında Kullanılan Kablo Destek ve Yükseltme Bileşenlerinin Topoloji Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-133.

10. Çam, B. (2025). *Uydu Paneli ve İnsertlerinin Eklemeli İmalat ile Üretilmesine Yönelik Parametrelerin Geliştirilmesi ve Tasarım Optimizasyonu*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-101.

11. Menteş, E. (2015). *Kompozit 3U Küp Uyduların Yapısal Analiz ve Tasarımları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-129.

12. Jumshudlu, P. (2024). *Deney ve Eğitim Amaçlı Yüksek İrtifa ECubeSAT Küp Uydusu*. Yüksek Lisans Tezi, Millî Savunma Üniversitesi Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 1-56.

13. ECSS Secretariat. (2020). Space engineering Testing guidelines (ECSS-E-HB-10-03A DIR1). *ECSS.* Noordwijk, 1-266.

14. Okuyama, K.-i., Yoshikawa, K., & Oue, C. (2024). A Simple Method for Identifying the Natural Frequency of a Micro Satellite with a Primary Structure Made of Aluminum Alloy. *Aerospace*. 11(6), 436.

15. Süer, M. (2013). *TURKSAT 3USAT Uydusu'nun Yapisal Tasarimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-89.

16. Sood, B., Evans, J., Daniluk, K., Sturgis, J., Davis, M., & Petrick, D. (2017). Life Cycle Analysis of a SpaceCube Printed Circuit Board Assembly Using Physics of Failure Methodologies. *NASA.* Greenbelt, 1-51.

17. Pepeç, S. (2025). *Application of Anthropometric Finite Element Dummy Models in Objective Ride Quality Evaluation for Ground vehicles*. Master's Thesis, Istanbul Technical University Graduate School, İstanbul, 1-63.

18. Kaiser, C., Pfeiffer, E., Widani, C., & Gambietz, W. (2003, 29 September-3 October). *Ariane 5 dummy satellites and structures.* 54th International Astronautical Congress, Bremen, 1-6.

19. Khairalla, Y. (2024). *Mekanik Sistemlerde Yapısal Analiz ve Optimizasyon Teknikleri ile Ağırlık Azaltılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1-58.

20. Kessler, L. (2024). *Optimizing Digital Twin Methodology for CubeSats: Quantitative Analysis for Design, Performance, and Implementation Strategies*. Master's Thesis, Technical University of Munich TUM School of Engineering and Design, Münih, 1-70.

21. Kose, M. (2025). *Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Jantların Yapısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 7-61.

22. Toygar, A. (2023). *Design Iterations and Structural Finite Element Analysis of a Prototype Communication Satellite*. Master's Thesis, Ankara Yıldırım Beyazit University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 7-79.

23. Jovanovic, G. A. (2021). *Structural Design, Analysis and Validation of Next Generation Small Satellite Platforms*. Master's Thesis, University of Toronto Institute for Aerospace Studies, Toronto, 3-80.

24. Seara de Sá, L. B. P. (2021). *Modelling and Validation of Finite Element Structural Analysis of ISTSat-1*. Master's Thesis, Universidade de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisbon, 1-33.

25. Küçükbayram, A. İ. (2021). *Analysis and Verification of a Pyroshock Test System*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-116.

26. Yıldırım, İ., Meral, R., Güven, C., Menşur Çetin, C., Demir, M., & Çorbacı, F. K. (2023). Aviyonik ürün doğrulamasında titreşim fikstürü tasarımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 905-914.

27. Özkan, M. (2025). *Cıvata Bağlantılı Titreşim Test Fikstürlerinin Dinamik Karakterizasyonunun Teorik ve Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-64.

28. Vardallı, C. (2023). *Design Optimization and Experimental Validation of the Additively Manufactured Passive Vibration Isolator of an Inertial Measurement Unit in Aerospace Applications*. Master's Thesis, Istanbul Technical University Graduate School, Istanbul, 1-99.

29. Igolkin, A. A., Safin, A. I., & Kuznetsov, A. V. (2024). Calculation and experimental study of the dynamic characteristics of the spacecraft telescope frame mockup. *Siberian Aerospace Journal*, 25(4), 423-432.

30. Doupe, C. C. (2009). *Finite Element Model Optimization of the FalconSAT-5 Structural Engineering Model*. Master's Thesis, Air Force Institute of Technology Graduate School of Engineering and Management, Ohio, 3-16.

31. Bondsman, B. (2025). *Advances in Structural Dynamics with Applications to Cross-Laminated Timber*. Doctoral Thesis, Lund University Construction Sciences, Lund, 1-21.

32. Öztürk, M. (2009). *Finite Element Structural Model Updating by Using Experimental Frequency Response Functions*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-166.

33. Demir, M. E. (2015). *Shock Analysis of an Antenna Structure Subjected to Underwater Explosions*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-155.

34. Montalvão, D., Maia, N. M. M., & Ribeiro, A. M. R. (2006). A review on vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *Shock and Vibration Digest*, 38(4), 1-49.

35. Ibsen, L. B. ve Liingaard, M. (2006). Experimental modal analysis (DCE Technical Report No. 10). *DCE.* Aalborg, 1-29.

36. Piatak, D. J., Sekula, M. K., Rausch, R., Florance, J. R., & Ivanco, T. G. (2015, June, 25). *Overview of the space launch system transonic buffet environment test program*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Hampton, 1-9.

37. Sim, C. H., Kim, G. S., Kim, D. G., Kim, I. G., Park, S. H., & Park, J. S. (2018). Experimental and Computational Modal Analyses for Launch Vehicle Models considering Liquid Propellant and Flange Joints. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 1-12.

38. Ren, G., Li, B., Li, D., & Jiao, Y. (2015, 8, July). *Modal analysis of the printed circuit board based on finite element method*. 2014 International Conference on Computer Science and Electronic Technology (ICCSET 2014), Wuhan, 150-154.

39. Bilgili, D. (2018). *Modelling, Analysis and Experimental Validation of Vibration of Electric Motors*. Master's Thesis, Istanbul Technical University Graduate School of Science, İstanbul, 1-32.

40. Kaya, D. F. (2021). *Titreşim Fikstürlerinde Vibrasyon Ölçümleriyle Sonlu Elemanlar Model Sonuçlarının Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-78.

41. Knight, C. (2019). *More Representative Spacecraft Random Vibration Testing*. Doctoral Thesis, University of Surrey Faculty of Engineering and Physical Sciences, Guildford, 1-19.

42. Al Ali, S. (2024). *Development of Parallel Mechanism for Small Satellite Launching Emulation*. Master's Thesis, Khalifa University of Science and Technology, Abu Dhabi, 1-37.

43. Torehov, A. (2025). *Vibration Test Tailoring for Vibration Testing: Development of a MATLAB GUI for Vibration Testing with MRS and FDS*. Master's Thesis, Karlstad University Faculty of Health, Karlstad, 1-42.

44. Binbaş, M. K. (2022). *Uydularda Kullanılan Esnek Bipod Yapılarının Fırlatma Yükleri Altında İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü, Ankara, 1-84.

45. Bostan, V., Guţu, M., Melnic, V., & Martîniuc, A. (2024). Structural analysis and vibration testing of the TUMnanoSAT microsatellite. *Journal of Engineering Science*, 31(4), 8-21.

46. Araújo, L. (2024). Dynamic Response of a CubeSat within a Deployer during the Launch Phase. *IST,* Lizboa, 1-8.

47. Koçmar, Y. (2024). *Küp Uydu Uyumlu Kuantum Haberleşme Modülünün Mekanik Tasarımı, Analizi ve Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gebze, 1-21.

48. Briese, O., & Möller, F. (2025). *Random Vibration Methodology and Analysis in Spacecraft Secondary Structures: Detailed Examination of Spring Assembly Dynamics*. Master's Thesis, Linköping University Department of Management and Engineering, Linköping, 1-49.

49. Rittenhouse, J. J. (2025). *Vibration Modeling of Rectangular Plates and Application to Solar Cell Dust Mitigation*. Doctoral Thesis, Missouri University of Science and Technology Mechanical and Aerospace Engineering Department, Rolla, 1-168.

50. Abu Deeb, M. (2024). *Development of a Method to Evaluate Vibration Fatigue of Welded or Brazed Components in Engines*. Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences, Stockholm, 1-39.

51. Yalçın, E. (2022). *Random Vibration Analysis of an Optomechanical System Mounted on an Air Platform*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-117.

52. Lontsi, B. (2025). *Genel Kütle Azaltımı ve Yapısal Verimlilik İçin Ağaç İşleme Makinesi Parçalarının Topoloji Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1-91.

53. Ekren, M. (2008). *Structural Optimization Strategies via Different Optimization and Solver Codes and Aerospace Applications*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-188.

54. Wang, C., Zhang, B., Huang, S., Dou, W., Xin, S., & Yan, J. (2024). Topological Design of a Nanosatellite Structure with Optimal Frequency Responses Filled by Non-Uniform Lattices. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37(161), 1-12.

55. Elshaala, A., Okasha, M., Sulaeman, E., Jallad, A. H., Aizat, W. F., & Alzubaidi, A. B. (2024). Structural Analysis of AlAinSat-1 CubeSat. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27, 532-546.

56. Aksen, U. (2024). *Assessment and Optimization of a Hybrid Rocket Motor as the Final Stage of Small Satellite Launch Vehicle*. Doctoral Thesis, Istanbul Technical University Graduate School, Istanbul, 1-204.

57. Baylı, R. (2024). *Sabit Kanatlı İnsansız Hava Araçlarında Kullanılabilecek Şekil Değiştiren Kanatların Yapısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara, 1-58.

58. Babuçoğlu, E. (2021). *Kaynaklı Parçalarda Titreşim ile Gerilim Gidermenin Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-68.

59. Servak, H. M. (2024). Assessing the effects of uncertain parameters on dynamic response of multi-story structures using P-box. *Heliyon*, 10(32), 1-19.

60. İsanç, M. E. (2023). *Design of a Metal Vibration Isolator With High Internal Damping*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-25.

61. Sairajan, K. K., & Aglietti, G. S. (2013). Study of correlation criteria for base excitation of spacecraft structures. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 51(1), 1-11.

62. Torres, A. E. (2024). *Design, Optimization and Manufacturing Process of a CubeSat Structure: Efficiency, Innovation and Space Performance*. Master's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya School of Industrial, Terrassa, 1-73.

63. Martell, J. A. (2024). *Development of a Digital Engineering Testing Framework for CubeSat Applications*. Master's Thesis, The University of Texas at El Paso Graduate School, El Paso, 1-30.

64. Xu, T., & Rydén, T. (2025). *Mechanical Properties of Table Tennis Rackets*. Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences, Stockholm, 1-70.

65. Xu, Z., Wang, Y., He, Y., & Bai, X. (2015, 8-12 June). *The structure design of small satellite full-physical simulation system*. The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, Shenyang, 642-648.

66. Kurt, Ö. (2025). *Graph Neural Networks as Surrogate Models for Structural Analysis: A Study on Buckling Behavior*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-117.

67. McKeen, P. (2025). *Computational Methods to Improve Satellite Attitude Determination and Control with a Focus on Autonomy, Generalizability, and Underactuation*. Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1-280.

68. Ali, H. (2024). *Finite Element Model Updating for Digital Twin Development Using Operational Modal Analysis: The JRC Atmospheric Tower Case Study*. Master's Thesis, Politecnico di Milano Civil Engineering Department, Milano, 1-23.

69. Ascoli, P. A., & Haddock, M. H. (2014). NASA KSC - Internship Final Report: Orion Crew Module / Service Module Structural Weight and Center of Gravity Simulator & Vehicle Motion Simulator Hoist Structure for Orion Service Module Umbilical Testing. *KSC.* Florida, 1-27.

70. Avşar, A. L. (2008). *Dynamic Modeling and Analysis of Vibration Effects on Performance in Optical Systems*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-101.

71. Capilla, J. A. J. (2020). *Damping Behaviour of Slender Telecommunications Structures*. Doctoral Thesis, University of Exeter Vibration Engineering, Exeter, 1-275.

72. Arangarajan, M., Revathi, R., Sivaprasad, R., Alfurhood, B. S., & Mane, A. (2024). Dynamic modal analysis of satellite on board with integrated electronic systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 238(3), 708-718.

73. ECSS Secretariat. (2008). Space engineering—Structural general requirements (ECSS-E-ST-32C, Second issue). *ECSS*. Noordwijk, 1-133.

74. ECSS Secretariat. (2009). Space engineering—Structural factors of safety for spaceflight hardware (ECSS-E-ST-32-10C Rev.1). *ECSS*. Noordwijk, 1-24.

75. ECSS Secretariat. (2017). Space engineering—Verification (ECSS-E-ST-10-02C Rev.1 DIR2). *ECSS*. Noordwijk, 1-57.

76. Fathzadeh, M., Saberi, M., Ajri, M. ve Shirazi, F. A. (2021). Vibration response estimation of micro-satellite structure by finite element modelling and experimental test. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 7(1), 29-42.

77. García-Pérez, A., Sorribes-Palmer, F., Alonso, G. ve Ravanbakhsh, A. (2018). Overview and application of FEM methods for shock analysis in space instruments. *Aerospace Science and Technology*, 80, 572-586.

78. Gilbert, J. (2024). *Assessing Computing Reliability Design Practices for Low-SWaP Spacecraft Avionics by Comparison of the Ingenuity Helicopter and Dragonfly Missions*. Master's Thesis, Johns Hopkins University Applied Physics, Baltimore, 1-100.

79. Aksungur, H. (2019). *Ağır Ticari Çekici Araçların Viraj Denge Çubuğunun Tasarım İyilemesi ve Yapısal Testleri*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1-37.

80. Güldağlı, H. (2023). *3 Boyutlu Yapısal Analizlerde Minimum Model Büyüklüğünün Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 1-33.

81. Kalyani, U. H., & Wylie, M. (2020). Process Vibration Test and Analysis for Spacecraft Instruments. *Vibroengineering Procedia*, 32, 75-80.

82. Koçan, Ç. (2019). *Structural Vibration Control in Wind Turbines*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-122.

83. Lyle, K. H., & Jones, T. C. (2019). Calibration of a structural finite element model for a representative inflatable space structure utilizing probabilistic methods and surrogate models. *NASA.* Virginia, 1-34.

84. Pettersson, G. M. (2024). *Deep-Space Exploration Enabled by CubeSats with Staged Electrospray Propulsion*. Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, 1-181.

85. Özbaş, H. A. (2022). *Sistem Mühendisliği Yaklaşımı ile Elektronik Donanım Entegrasyonu ve Yapısal Analizleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 1-137.

86. Péters, M. J. (2023). *Simulations in Support of The RISE and LaRa Experiments for Determining the Rotation of Mars*. Doctoral Thesis, UCLouvain - Université catholique de Louvain, Faculté des sciences, Louvain-la-Neuve, 1-161.

87. Picka, M. (2024). *Design of 3D Printed CubeSat Structure for Mission KOSTKA*. Master's Thesis, Brno University of Technology Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno, 1-64.

88. Safarabadi, M., & Bazargan, S. (2015). Prediction of equivalent static loads act on a micro satellite via modal analysis. *Engineering Solid Mechanics*, 3, 75-84.

89. Siam, N. (2010). *Development of an Efficient Analysis Method for Prediction and Structural Dimensioning of Space Structures Subjected to Shock Loading*. Master's Thesis, Luleå University of Technology Space Science, Kiruna, 1-51.

90. Sosa, H. E. G., Mainardes, C. B., & da Silva Carneiro, S. H. (2024, 11-14 November). *Comparison of operational modal analysis methods for aerospace applications.* Proceedings of the XLV Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Maceio, Alagoas, 1-6.

91. Suhey, J. D., Gohmert, D. M., & Baldwin, M. A. (2024, 21-25 July). *Overview of integrated random vibration testing of the NASA orion crew survival suit.* 53rd International Conference on Environmental Systems (ICES-2024-488), Louisville, Kentucky, 1-12.

92. Israr, A. (2014). Vibration and Modal Analysis of Low Earth Orbit Satellite. *Shock and Vibration*, 4(2), 1-8.

93. QAUMI, T. (2021). *Numerical and Experimental Modal Analysis of a 1-Stage Rocket Aerostructure*. Doctoral Thesis, Toronto Metropolitan University Graduate School of Natural and Applied Sciences, 1-48.

94. Türker, C. (2020). *Design and Production Stages of a Vibration Test Fixture*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-88.

95. Çoban, A. (2025). *Kule Vinç Sisteminin Yapısal Analizi ve Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-108.

96. Çekirdek, B. (2023). *NACA 651-412 Kanat Profilinin Yapısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-34.

97. Xie, Y., Xue, Y., Wang, H., & Sun, Y. (2025). Structural Design and Random Vibration Analysis of a High-Stability Momentum Wheel. *Machines*, 13(5), 406.

98. Somashekar, V. N., Harikrishnan, S., Ahmed, P. A., & Kamesh, D. (2016). Vibration Response Prediction of the Printed Circuit Boards using Experimentally Validated Finite Element Model. *Procedia Engineering*, 144, 576-583.

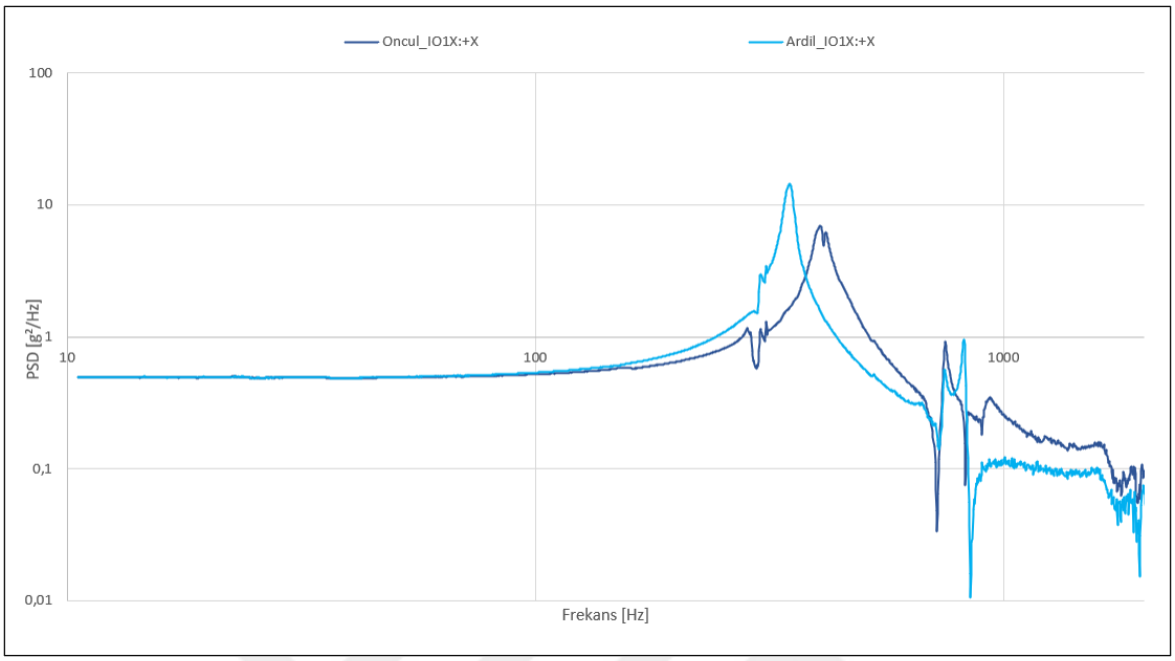
99. İnternet: Uzay Sistemleri Entegrasyon ve USET Merkezi Özellikleri Broşürü. Web: https://www.tusas.com/urunler/uzay/test-merkezi/uzay-sistemleri-entegrasyon-ve-test-merkezi, Son Erişim Tarihi: 01/01/2026.

100. Mikkola, T. (2023). *Methodology Demonstration for Minimizing Vibrations in the Transport of the ATLAS Strip End Cap*. Master's Thesis, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, Lappeenranta-Lahti, 1-86.

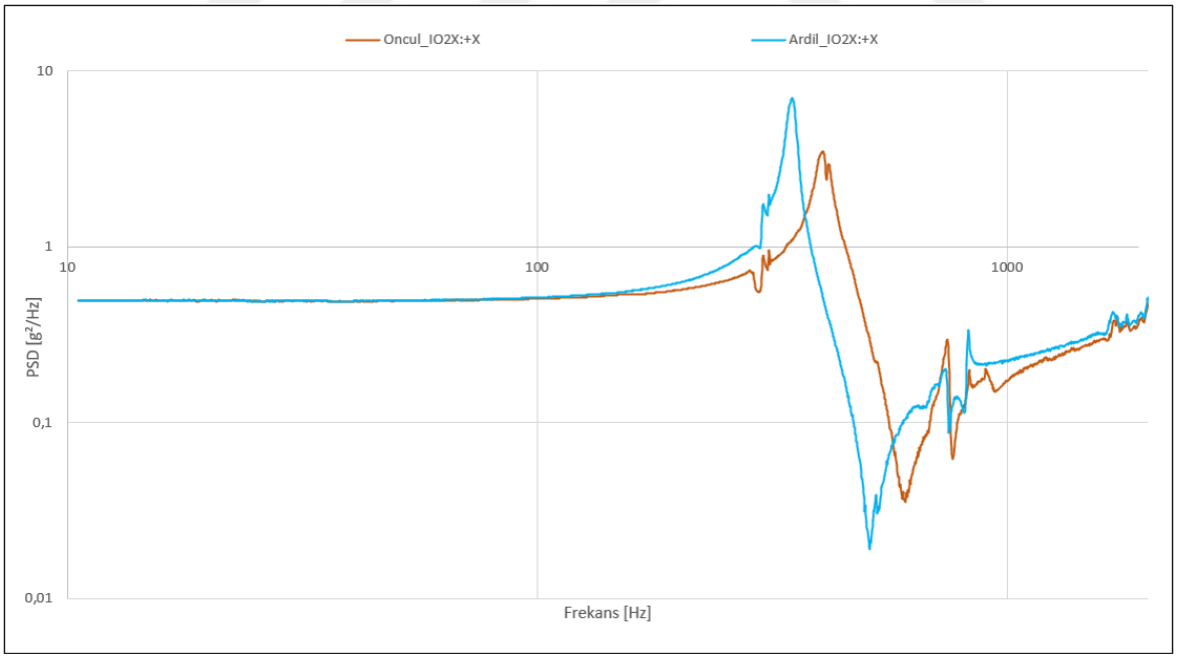
101. Gürsoy, B. (2021). *Experimental and Computational Analysis of a Ringing Plate Pyroshock Test System*. Master's Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-78.

EKLER

EK-1. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

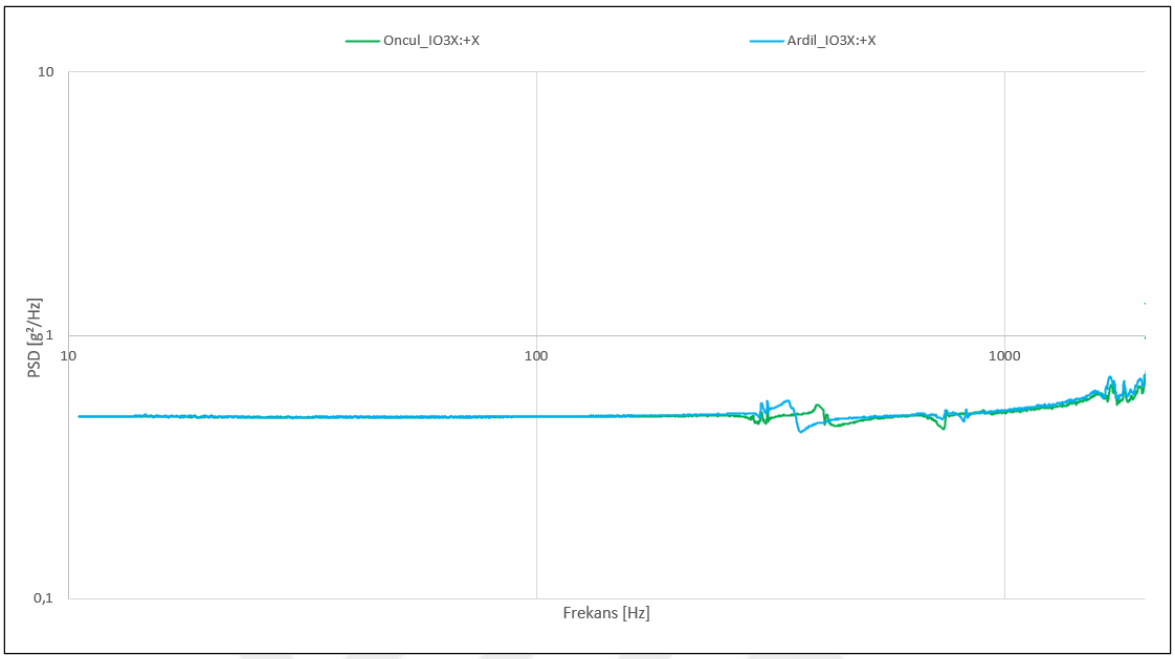


Şekil 1.1. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



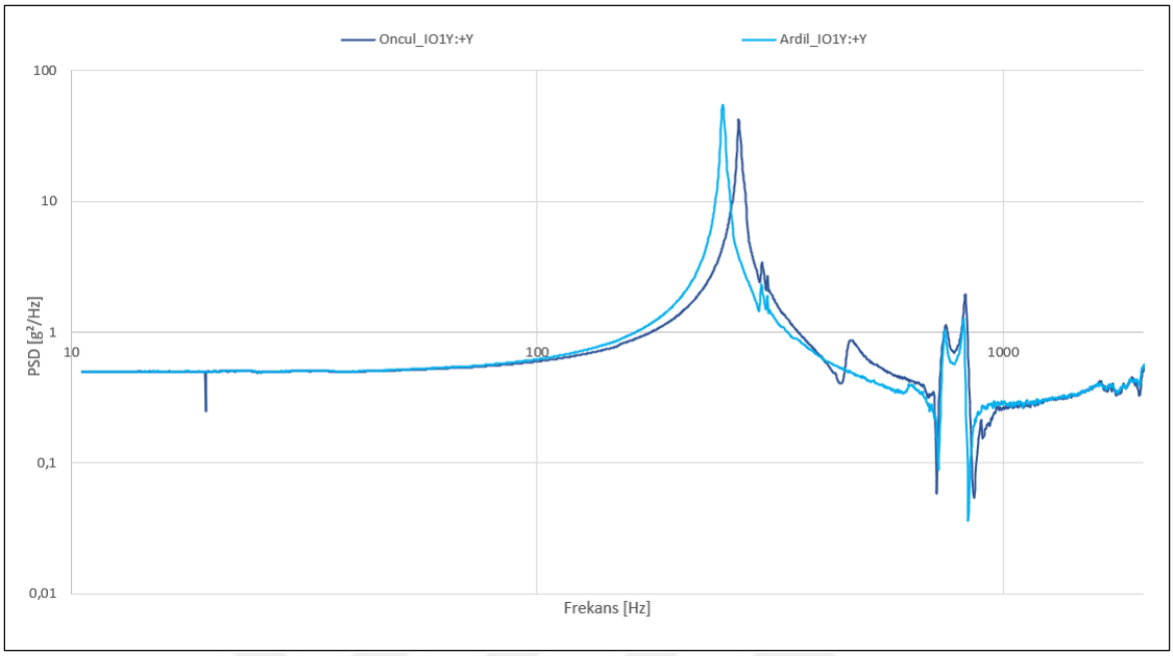
Şekil 1.2. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-1. (devam) X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

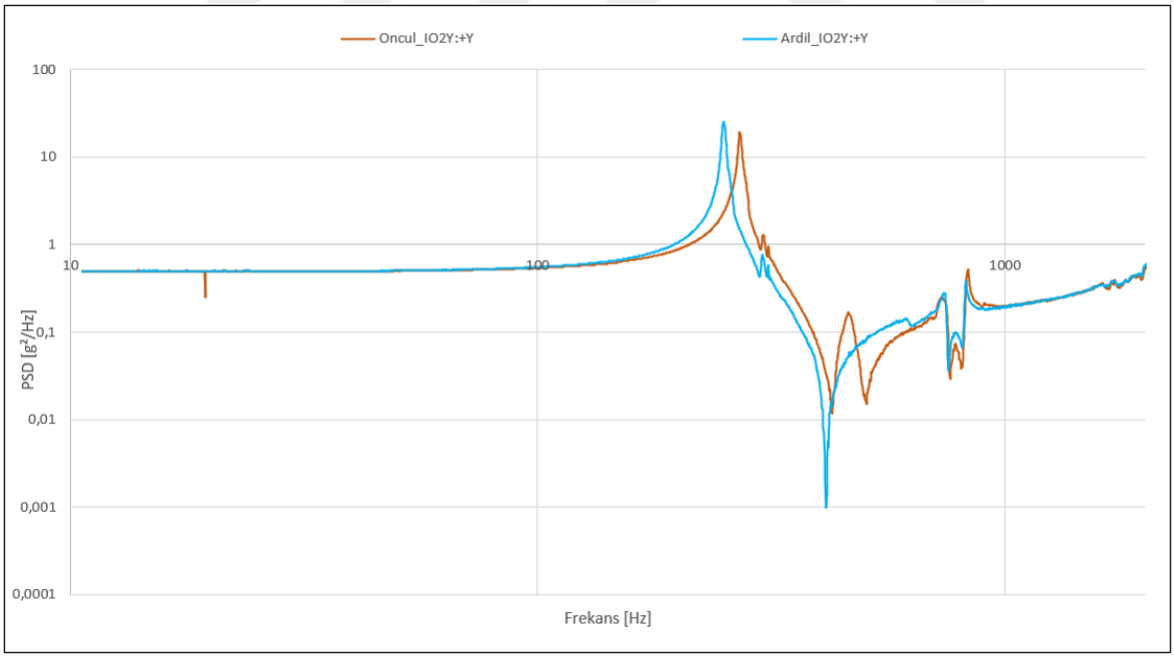


Şekil 1.3. X ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-2. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

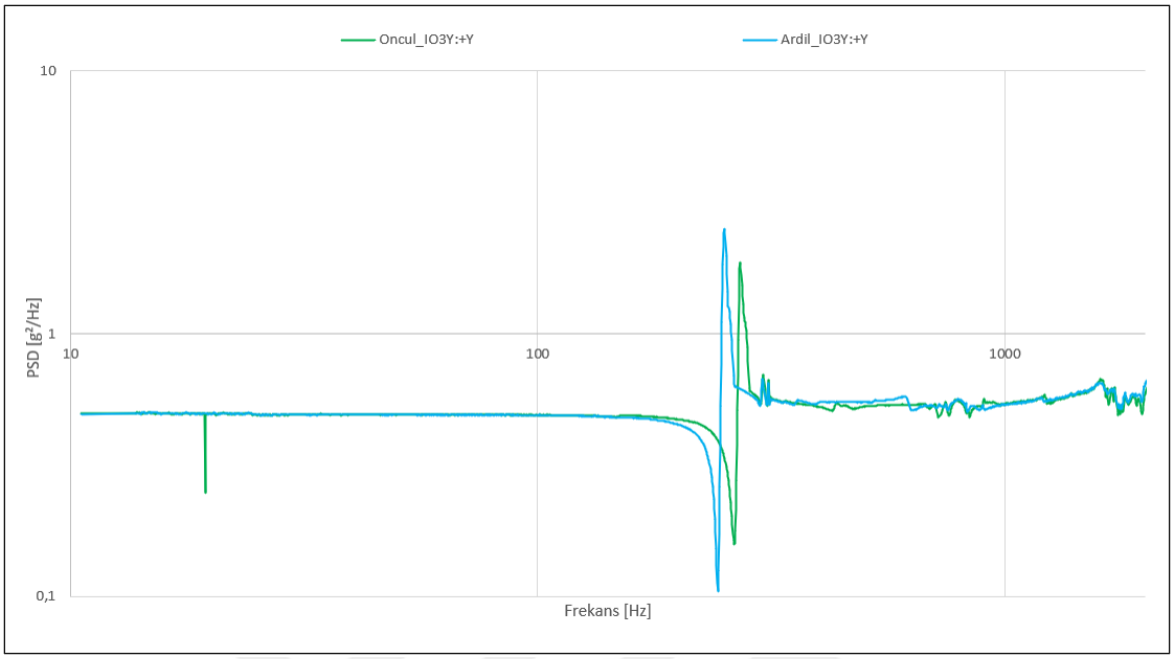


Şekil 1.4. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



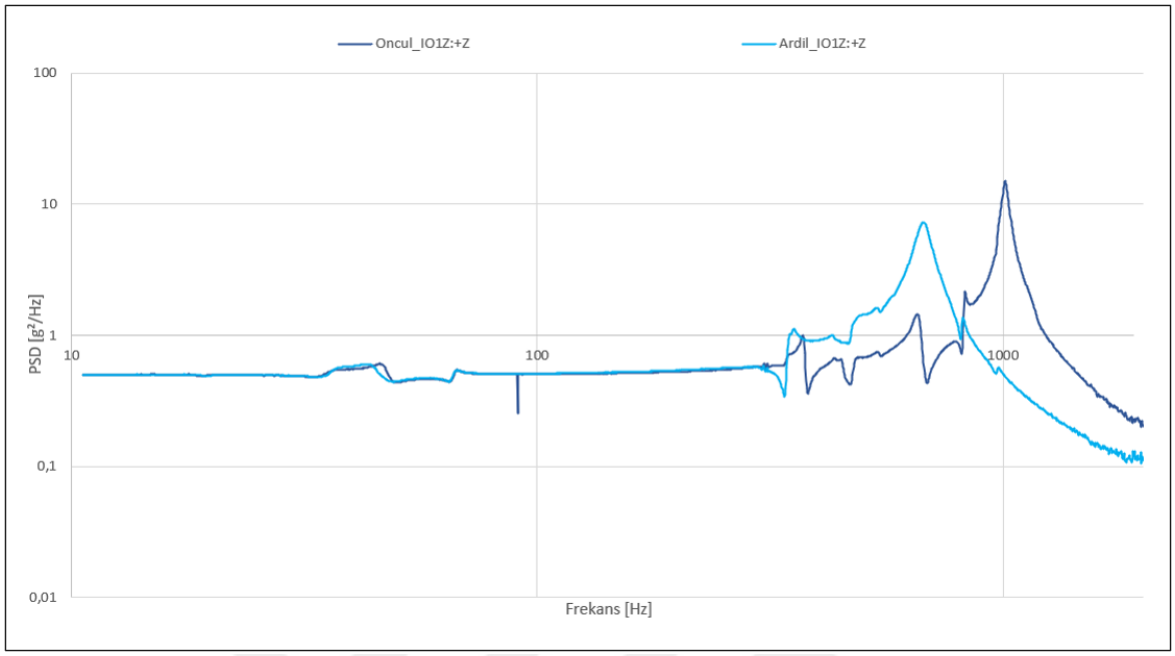
Şekil 1.5. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-2. (devam) Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

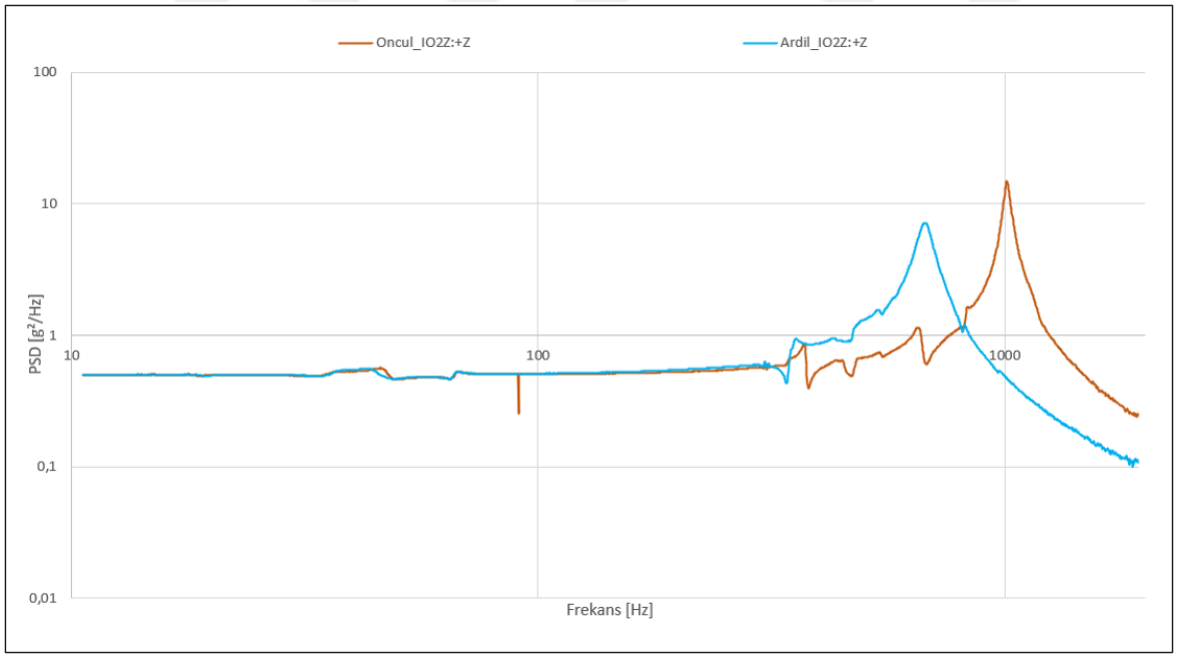


Şekil 1.6. Y ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-3. Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

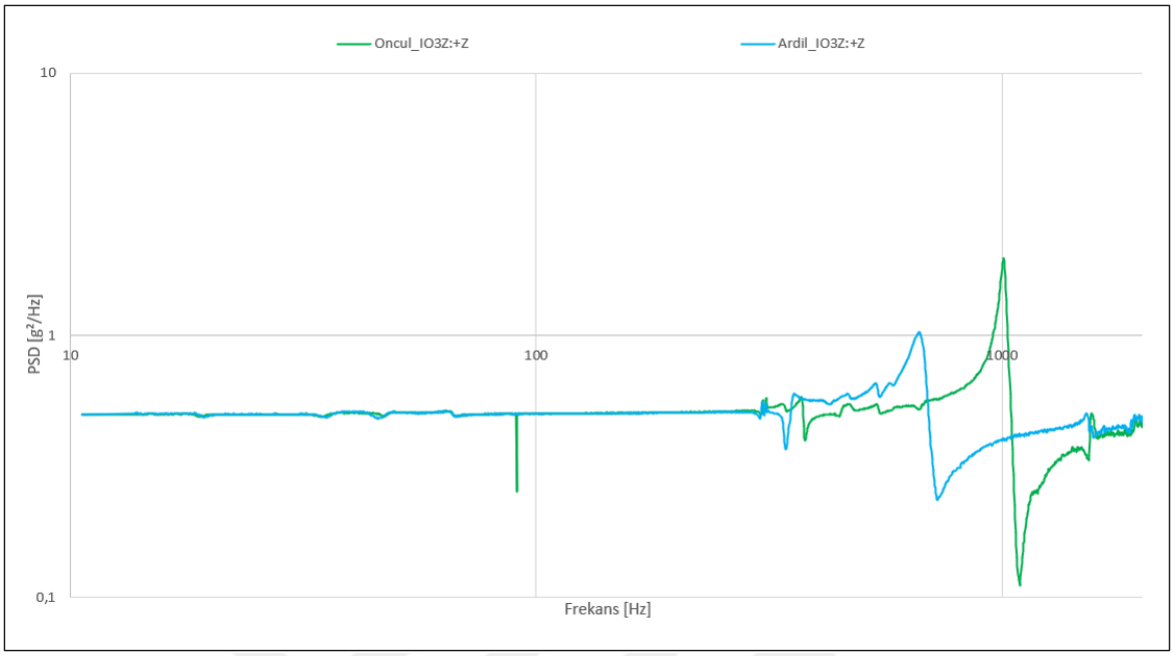


Şekil 1.7. Z ekseni için 1. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)

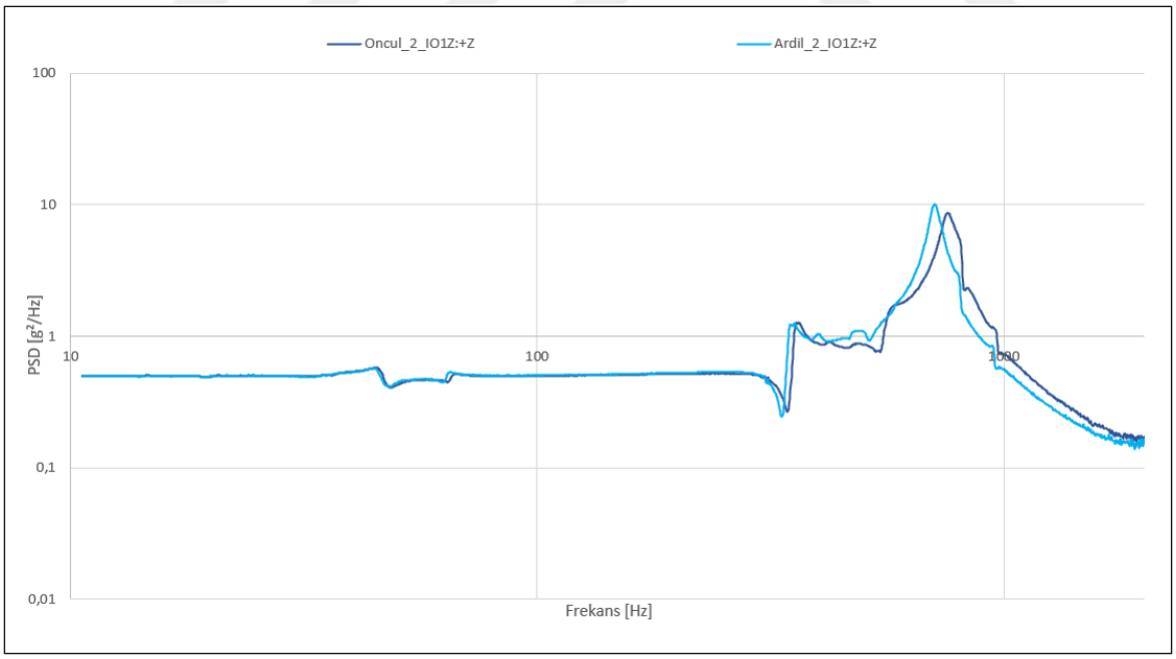


Şekil 1.8. Z ekseni için 1. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-3. (devam) Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

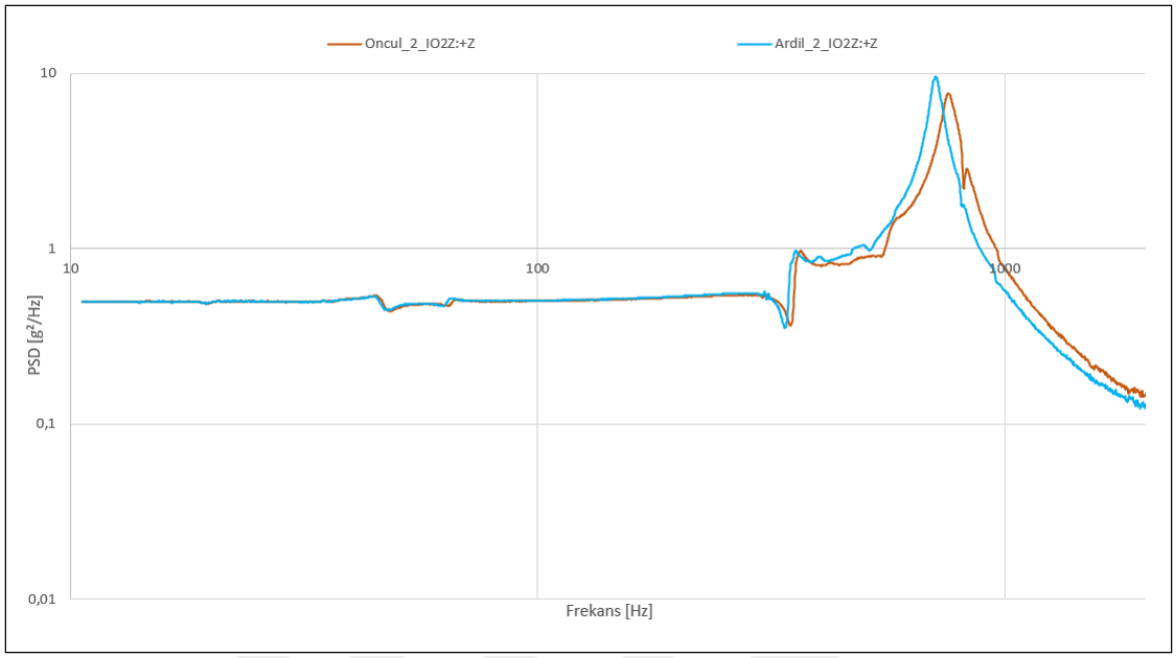


Şekil 1.9. Z ekseni için 1. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

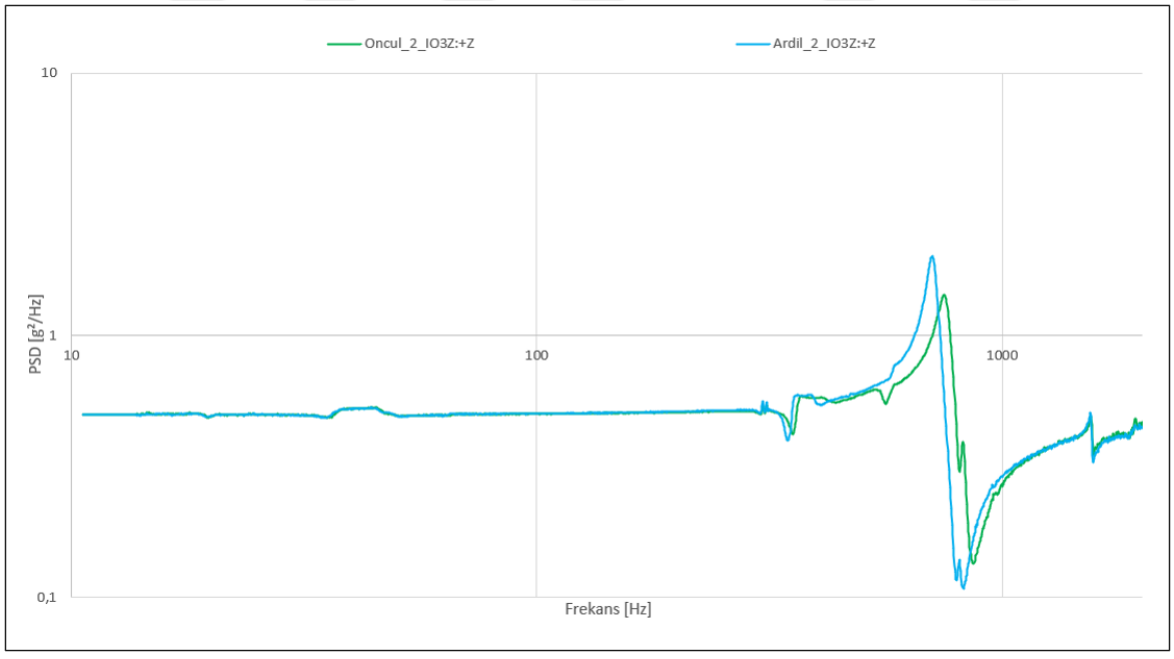


Şekil 1.10. Z ekseni için 2. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)

EK-3. (devam) Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

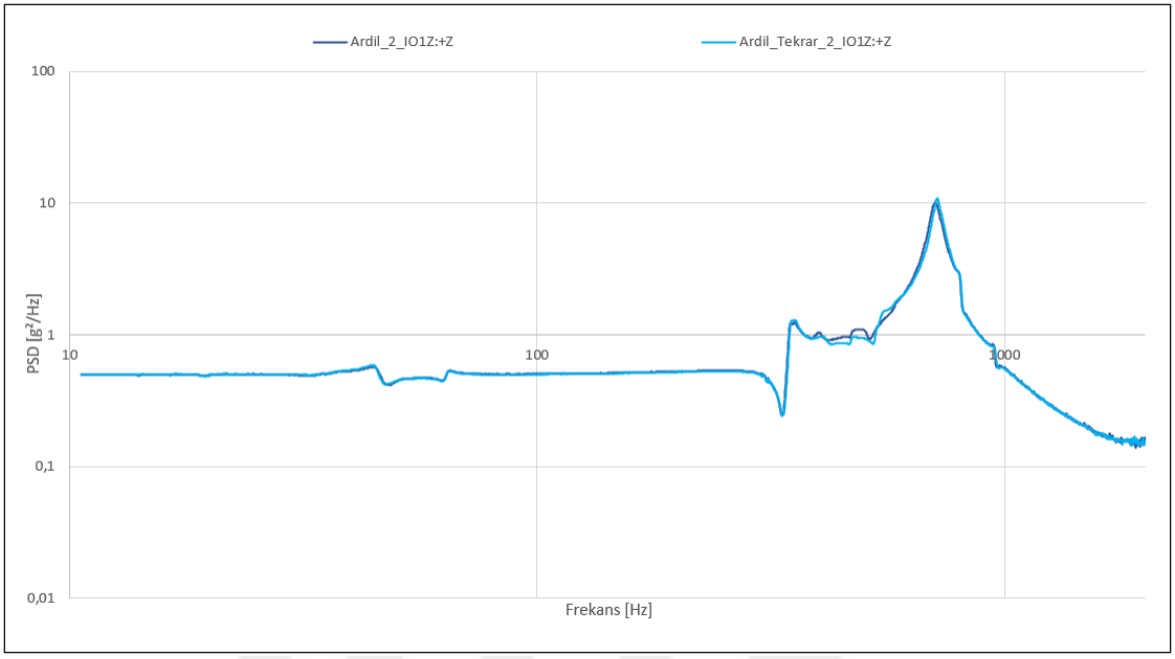


Şekil 1.11. Z ekseni için 2. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

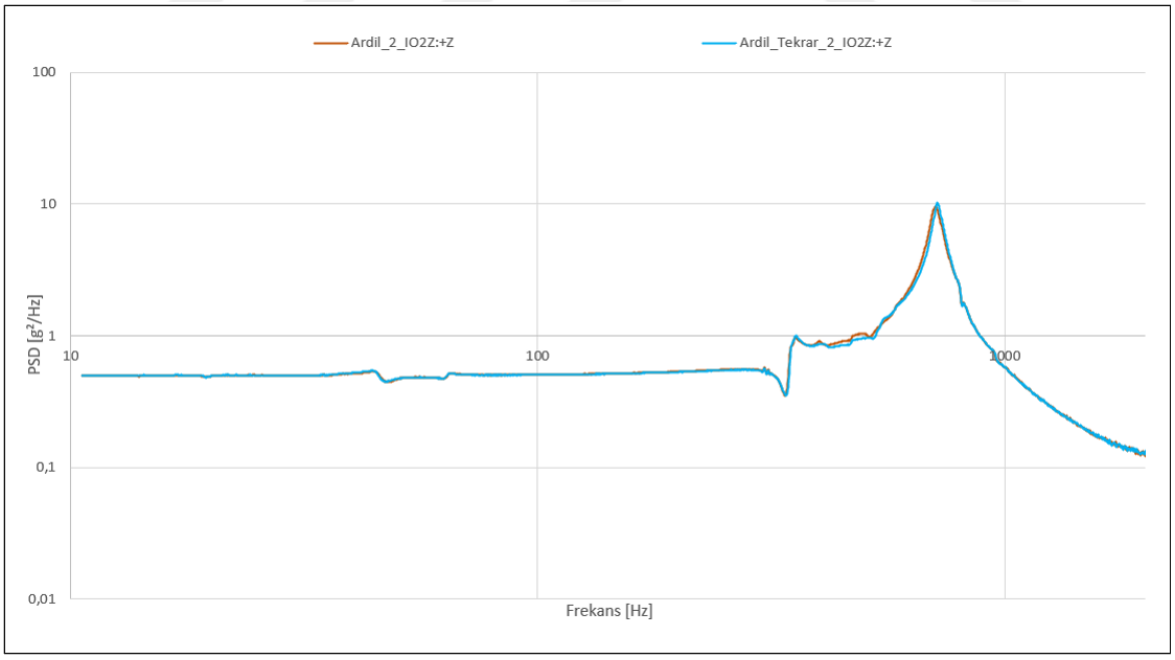


Şekil 1.12. Z ekseni için 2. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-3. (devam) Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

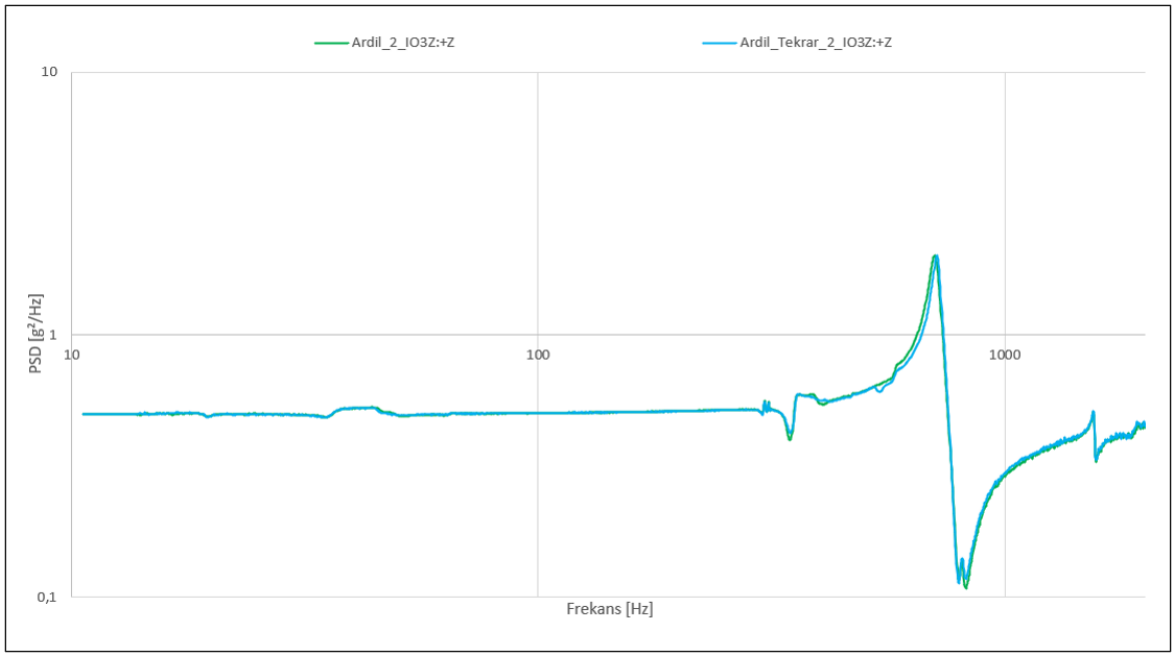


Şekil 1.13. Z ekseni için 3. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



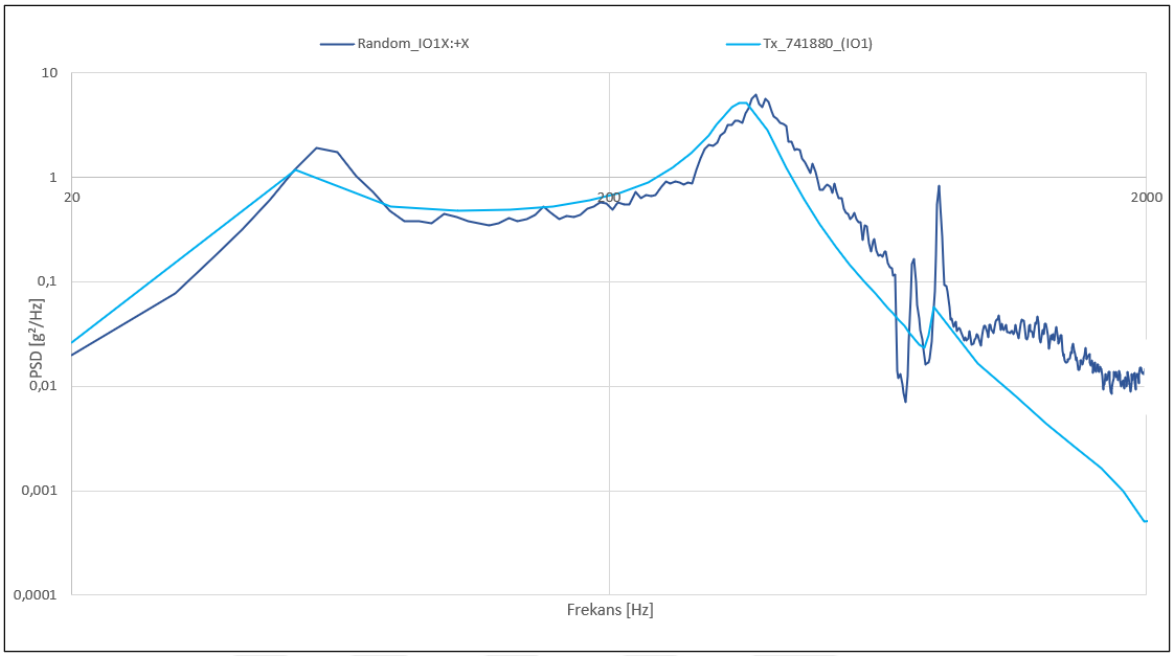
Şekil 1.14. Z ekseni için 3. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-3. (devam) Z ekseni için öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması

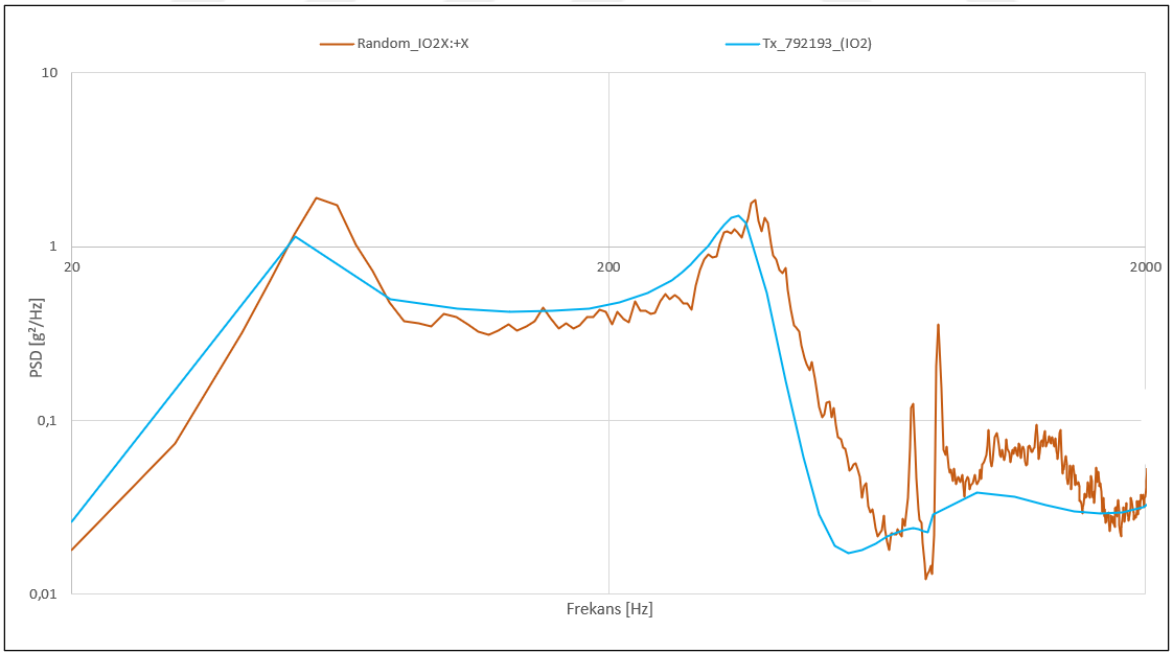


Şekil 1.15. Z ekseni için 3. random öncül ve ardıl rezonans tarama eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-4. X ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

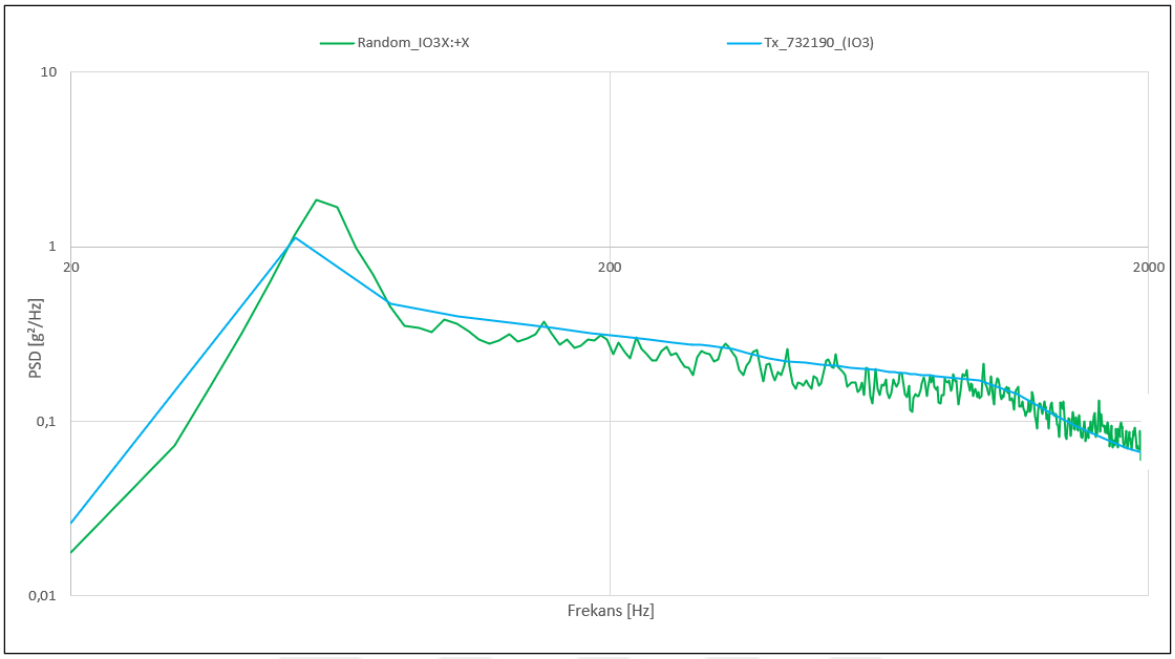


Şekil 1.16. X ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



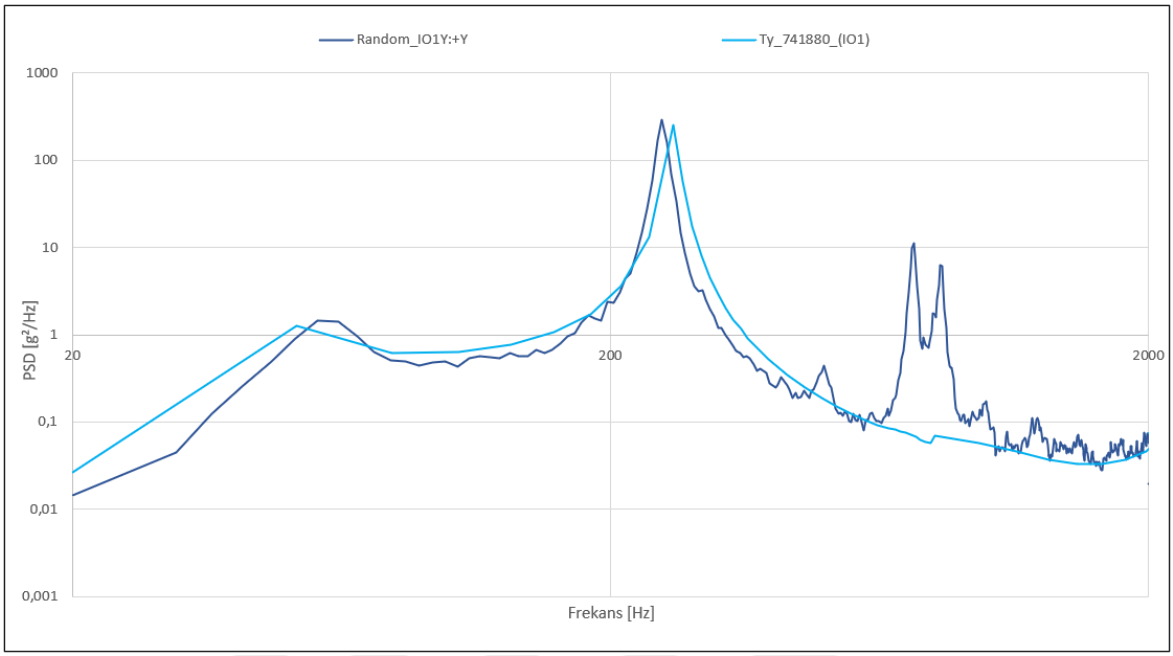
Şekil 1.17. X ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-4. (devam) X ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

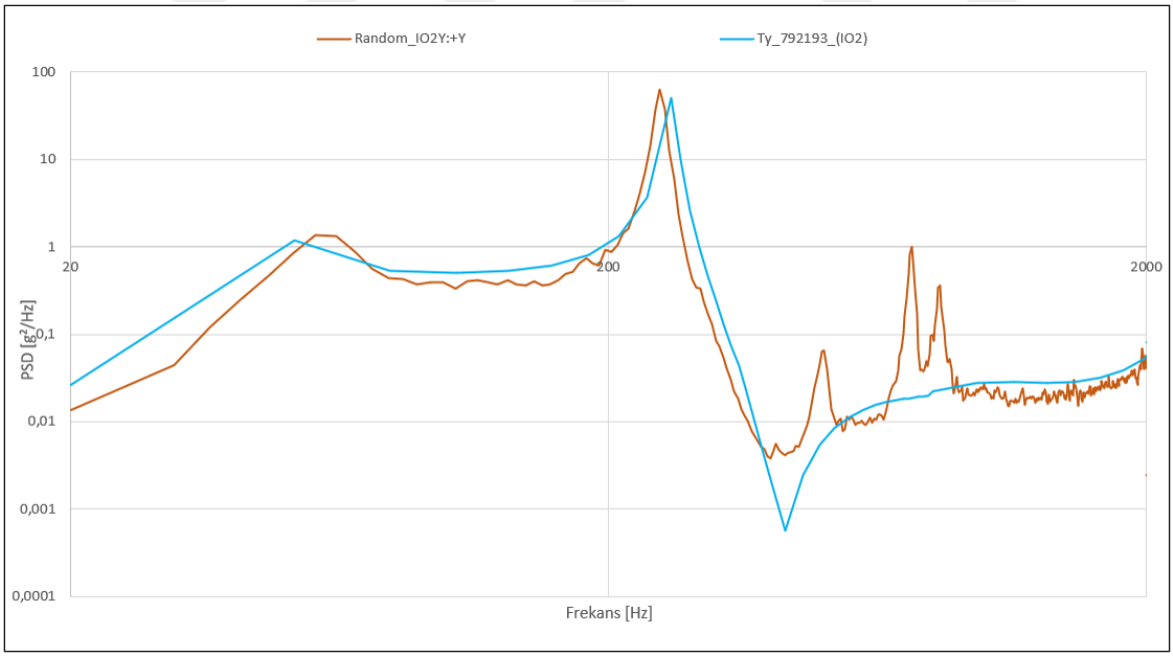


Şekil 1.18. X ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-5. Y ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

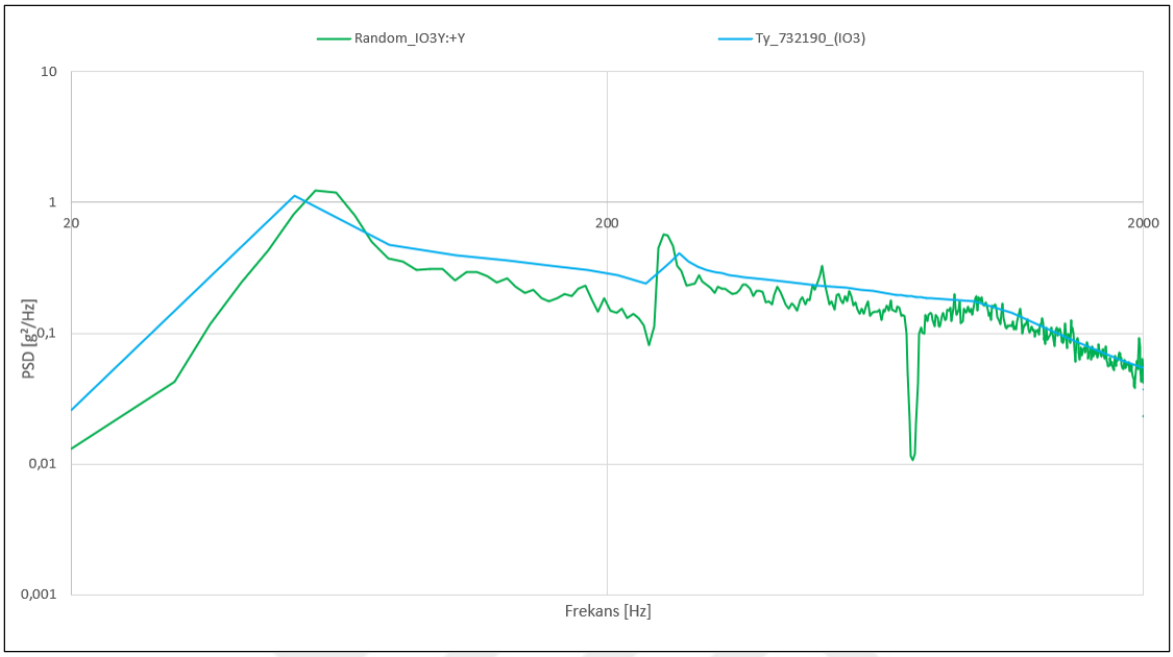


Şekil 1.19. Y ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



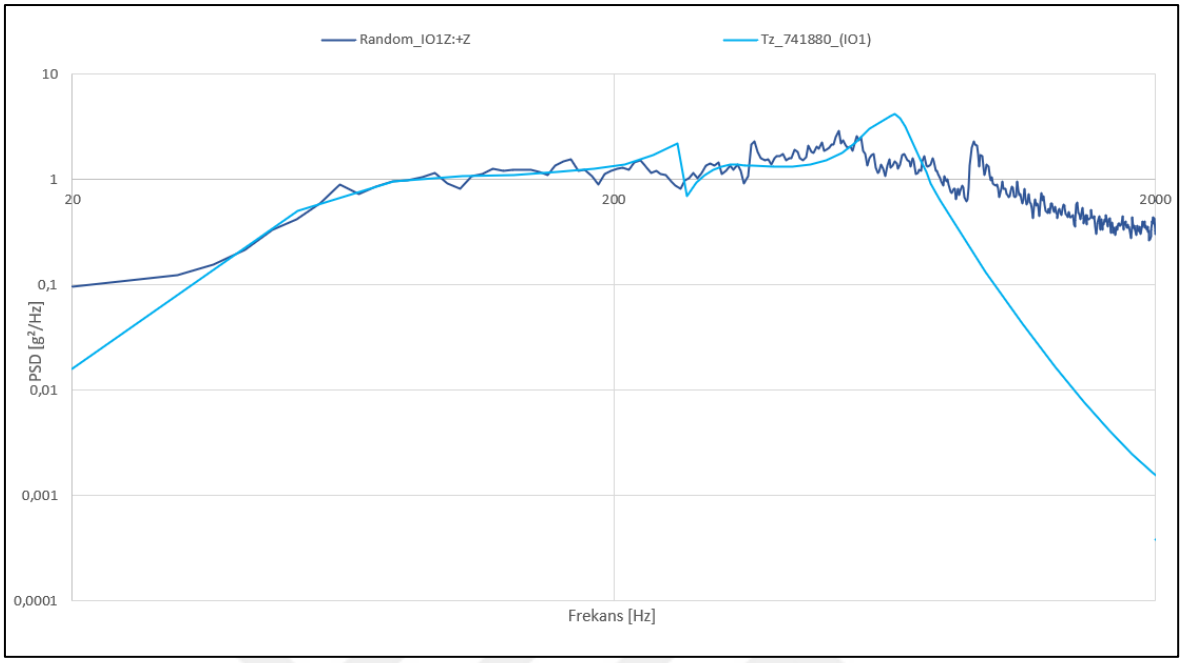
Şekil 1.20. Y ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-5. (devam) Y ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

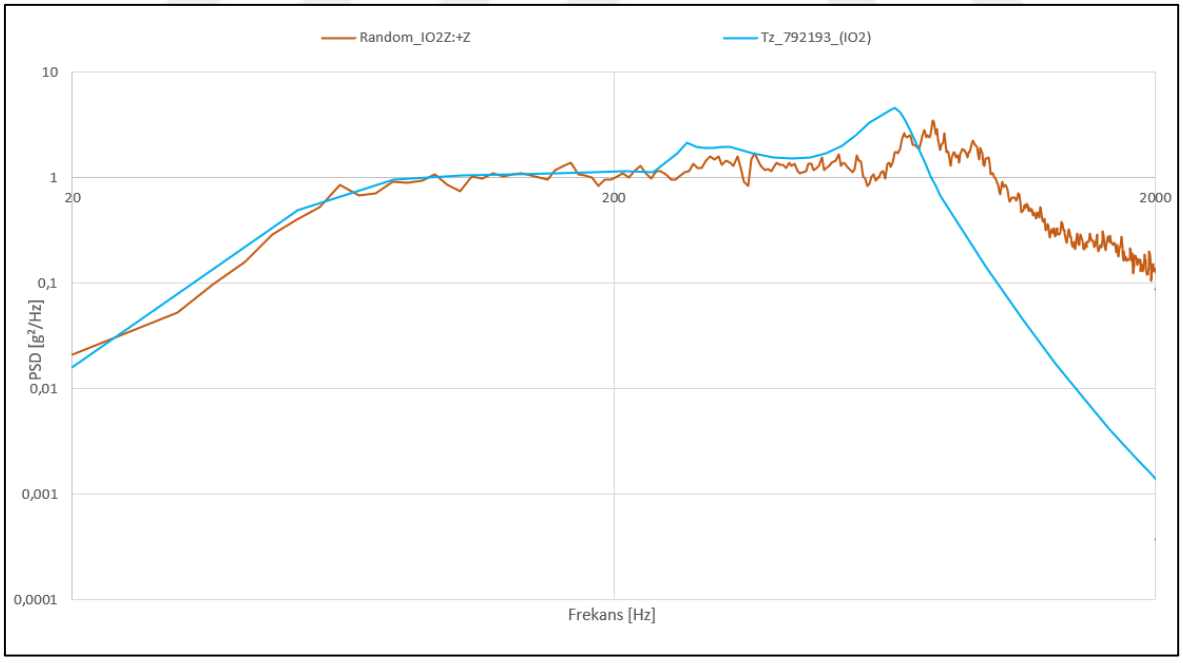


Şekil 1.21. Y ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-6. Z ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

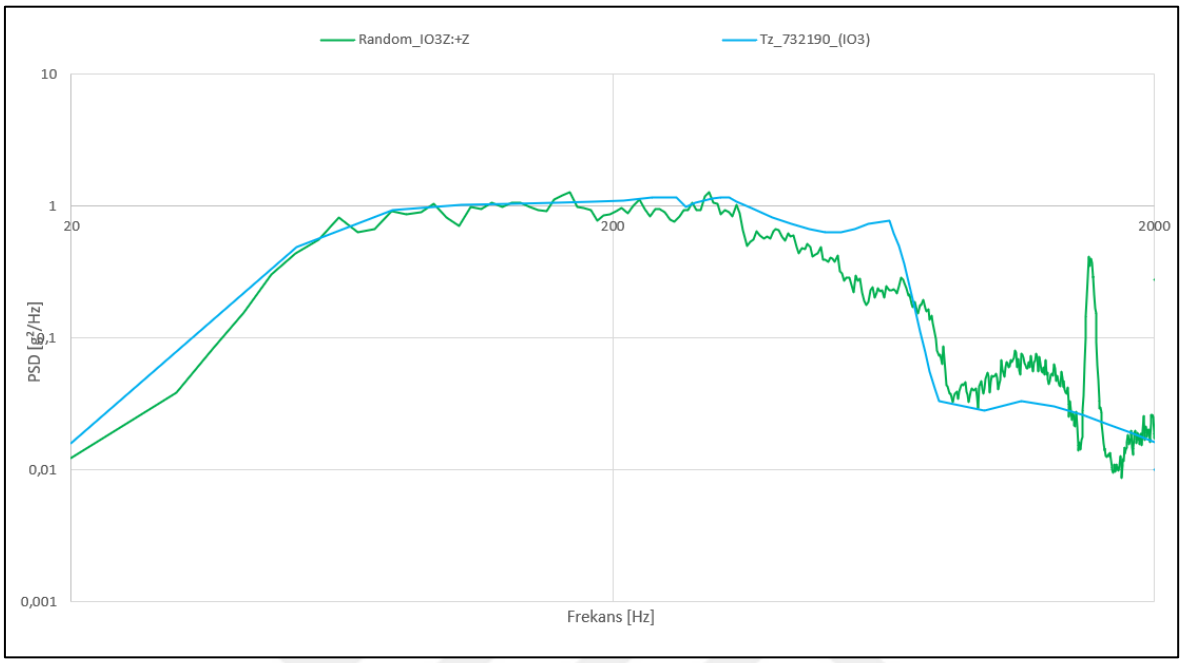


Şekil 1.22. Z ekseni için 1. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)

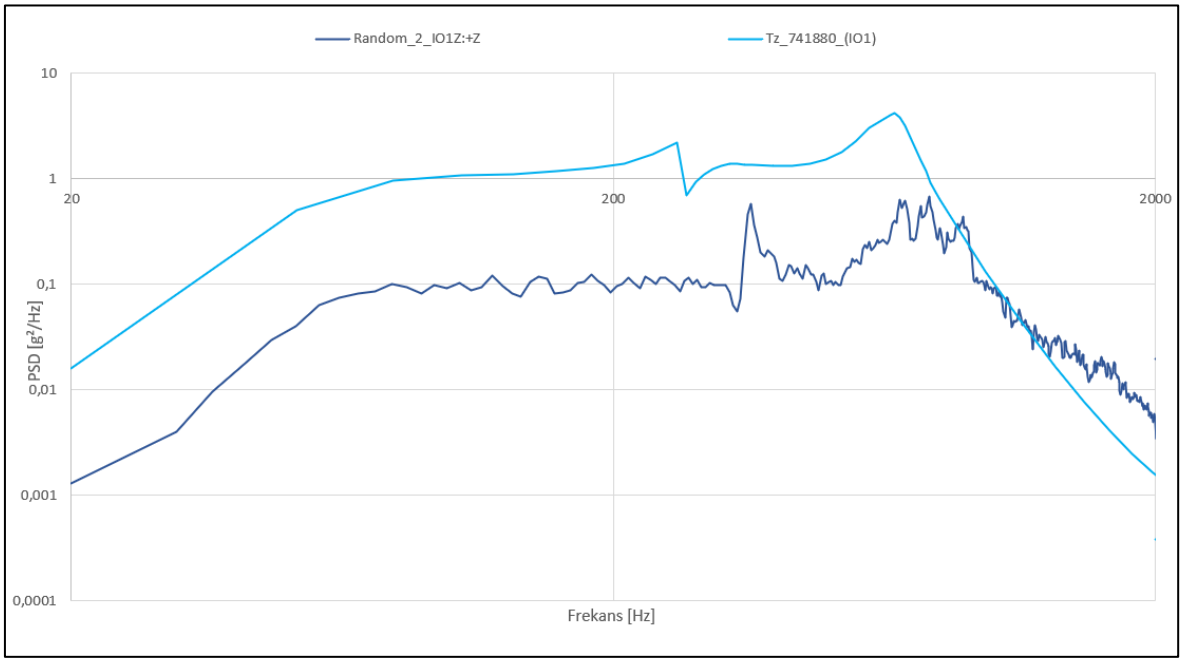


Şekil 1.23. Z ekseni için 1. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-6. (devam) Z ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

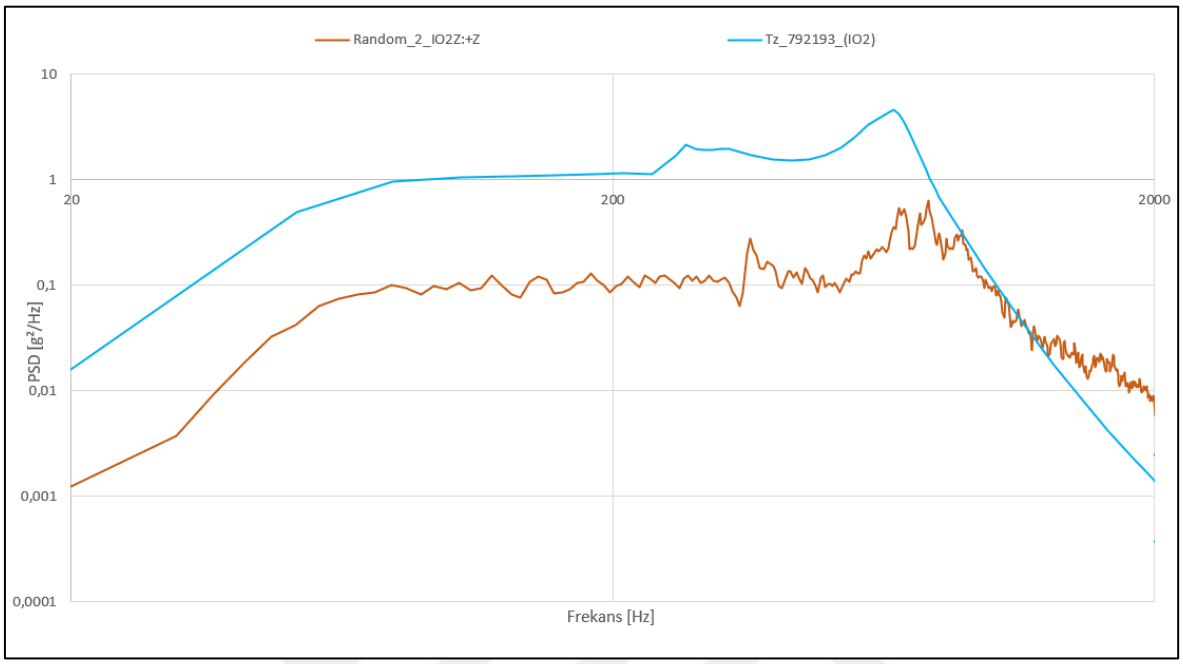


Şekil 1.24. Z ekseni için 1. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

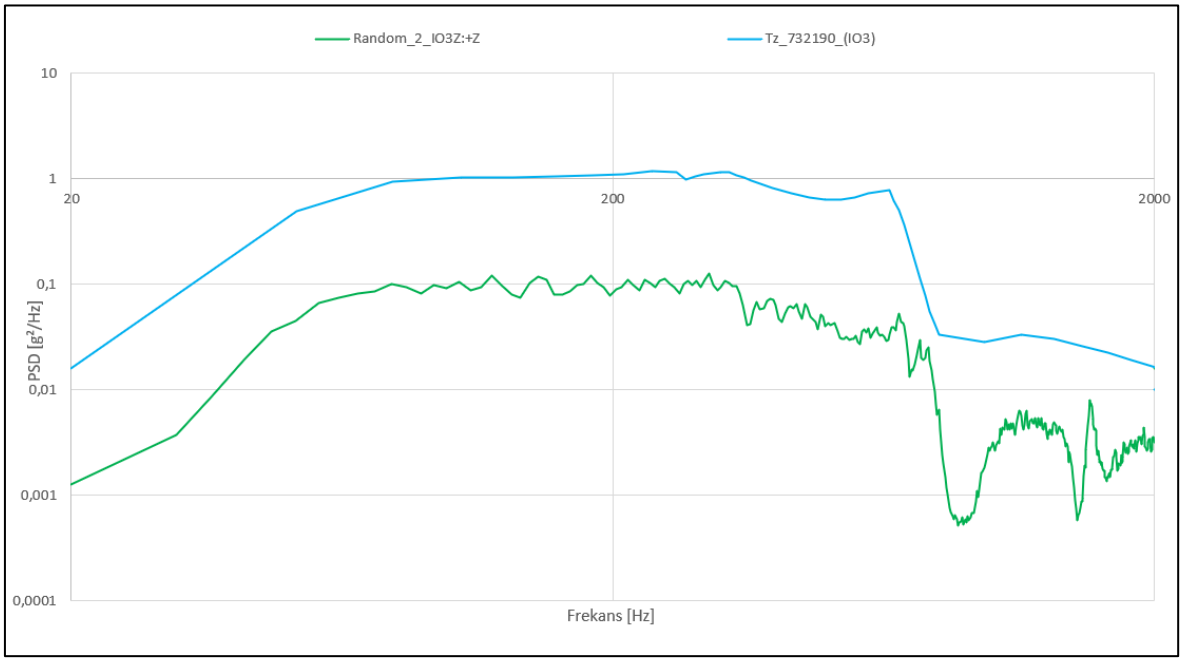


Şekil 1.25. Z ekseni için 2. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)

EK-6. (devam) Z ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

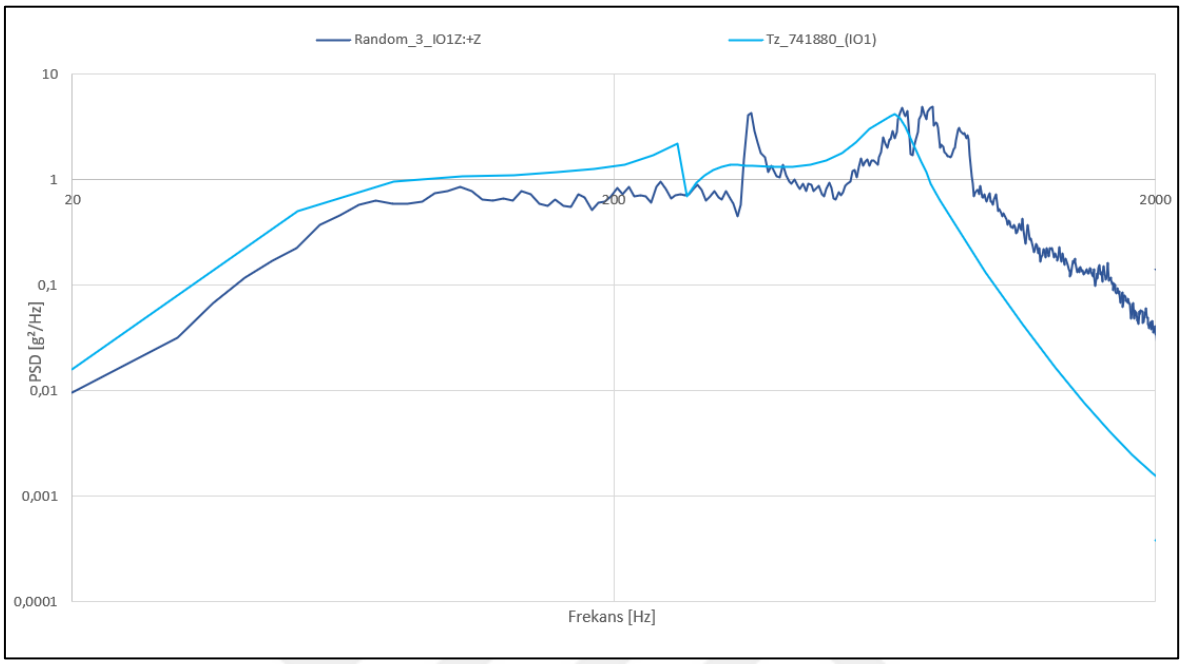


Şekil 1.26. Z ekseni için 2. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

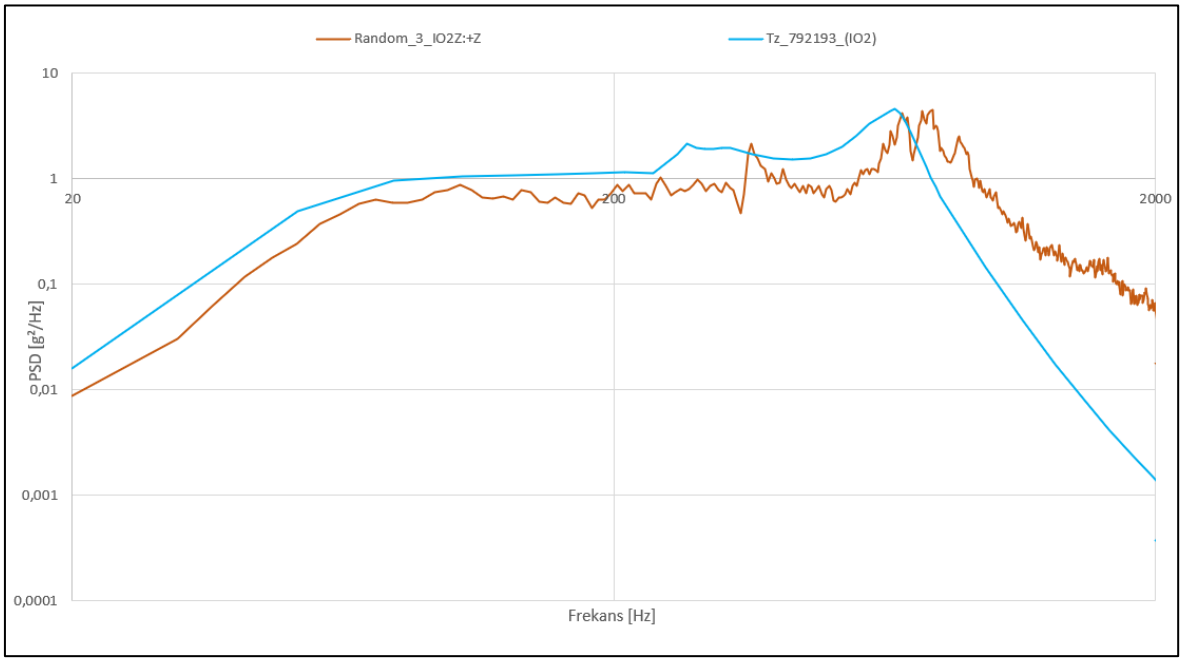


Şekil 1.27. Z ekseni için 2. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-6. (devam) Z ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

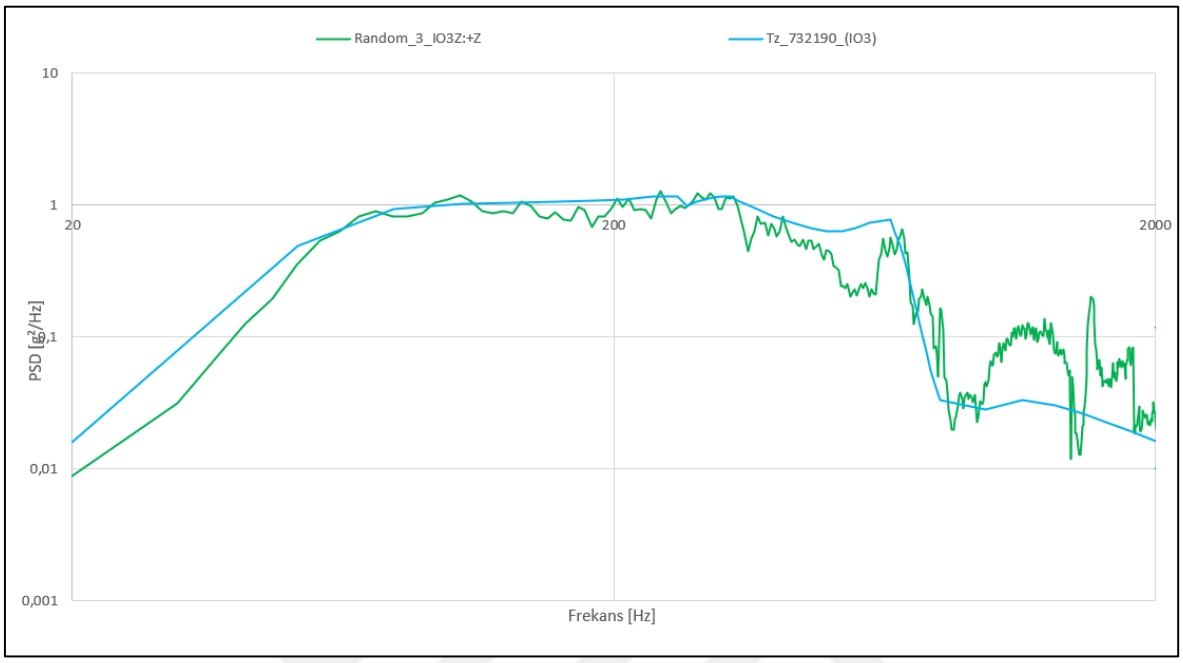


Şekil 1.28. Z ekseni için 3. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



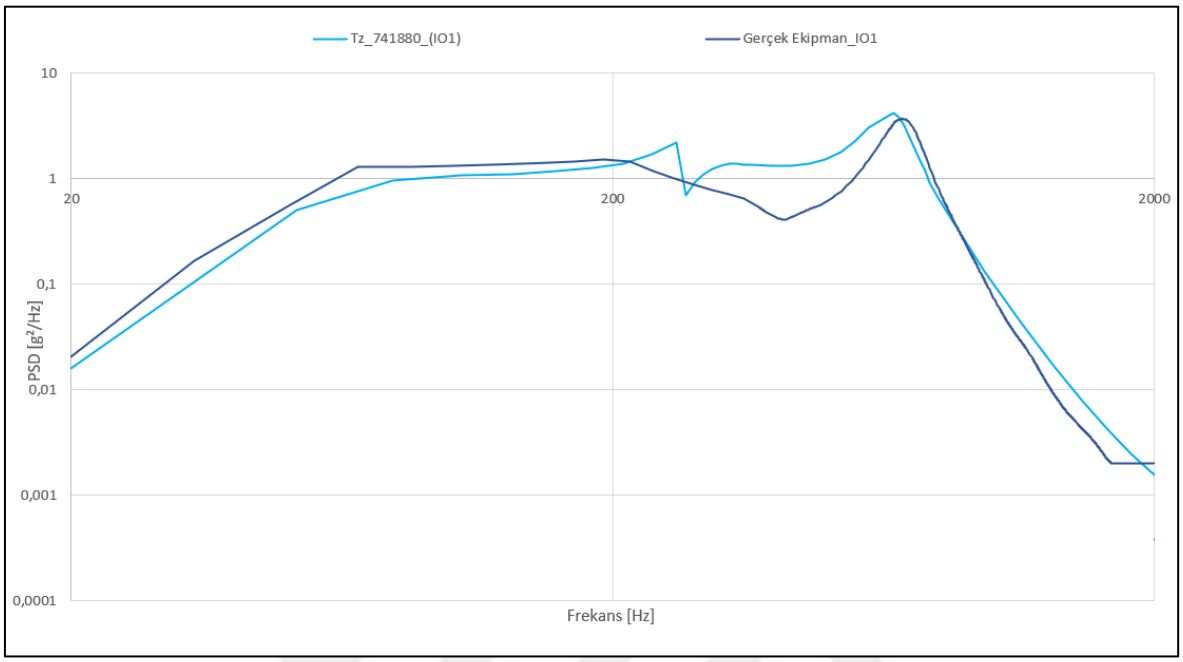
Şekil 1.29. Z ekseni için 3. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-6. (devam) Z ekseni için rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

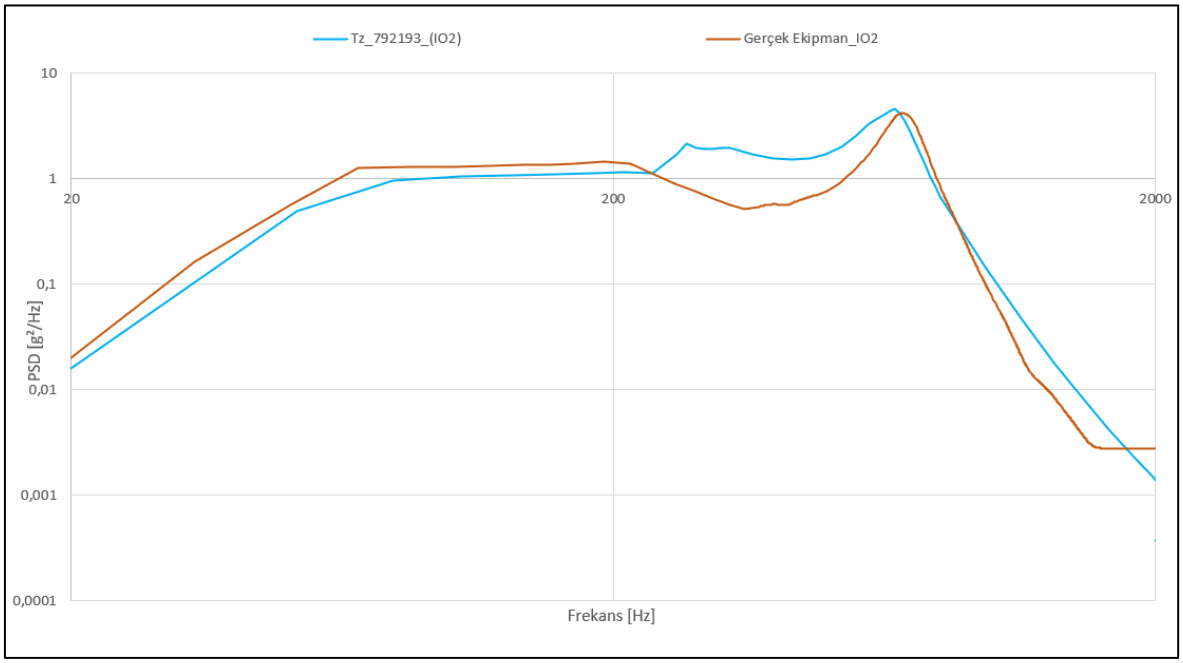


Şekil 1.30. Z ekseni için 3. rastgele titreşim analiz ve test PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)

EK-7. Z ekseni için kukla ve gerçek ekipman rastgele titreşim analiz PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması

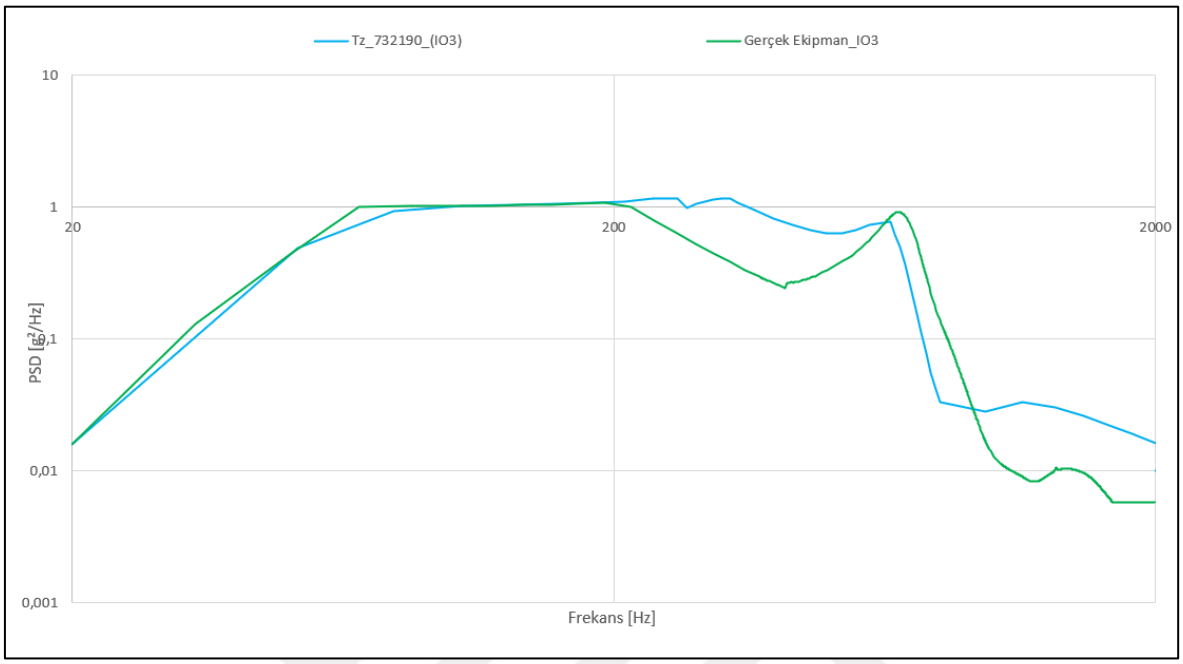


Şekil 1.31. Z ekseni için kukla ve gerçek ekipman rastgele titreşim analiz PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO1)



Şekil 1.32. Z ekseni için kukla ve gerçek ekipman rastgele titreşim analiz PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO2)

EK-7. (devam) Z ekseni için kukla ve gerçek ekipman rastgele titreşim analiz PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 1.33. Z ekseni için kukla ve gerçek ekipman rastgele titreşim analiz PSD-frekans eğrilerinin karşılaştırılması (IO3)



Gazili olmak ayrıcalıktır