
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE TASARLANIP EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN BİR GÜDÜMLÜ FÜZE PARÇASININ TİTREŞİM PERFORMANSININ ANALİTİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Berkan TAŞAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
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.

Berkan TAŞAR

12/01/2026

TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE TASARLANIP EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN BİR GÜDÜMLÜ FÜZE PARÇASININ TİTREŞİM PERFORMANSININ ANALİTİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Berkan TAŞAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Bu tez çalışmasında, güdümlü füze sistemlerinde kullanılan Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB) tutucu parçasının titreşim performansının iyileştirilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizleri, eklemeli imalat ve deneysel test yöntemleri bütünleşik bir yaklaşımla incelenmiştir. Mevcut tutucunun dinamik davranışı modal analiz ile değerlendirilmiş, kritik mod şekilleri belirlenmiş ve montaj arayüzleri dikkate alınarak tasarım uzayı tanımlanmıştır. Doğal frekansların yükseltilmesini hedefleyen topoloji optimizasyonu sonucunda iki alternatif tasarım elde edilmiş ve bu tasarımlar harmonik tepki analizleriyle titreşim iletim performansı açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda en dengeli dinamik tepkiyi veren geometri seçilmiş ve Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting, SLM) yöntemiyle AlSi10Mg malzemeden üretilmiştir. Eklemeli imalat sonrasında bazı numunelere gerilim giderme ısıl işlemi uygulanarak ısıl işlemin titreşim davranışı üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Sayısal analizler, yeni tasarımın mevcut tutucuya kıyasla daha yüksek doğal frekanslara ve daha düşük titreşim genliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen sinüs tarama titreşim testi ve füze seviyesindeki modal darbe testi, yeniden tasarlanan tutucunun AÖB'ye iletilen titreşimleri önemli ölçüde azalttığını doğrulamıştır. Ayrıca ısıl işlemin, eklemeli imalat kaynaklı iç gerilmeleri azaltarak titreşim tepkisini daha kararlı hale getirdiği görülmüştür. Elde edilen bulgular, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın birlikte kullanılmasının, yüksek titreşim hassasiyeti gerektiren savunma ve havacılık uygulamalarında daha dayanıklı ve güvenilir yapısal bileşenlerin geliştirilmesi için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu	:	91448, 91433, 91428
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli imalat, topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizi, titreşim testi
Sayfa Adedi	:	164
Danışman	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE VIBRATION PERFORMANCE OF A GUIDED MISSILE COMPONENT DESIGNED BY TOPOLOGY OPTIMIZATION AND MANUFACTURED VIA ADDITIVE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Berkan TAŞAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

In this thesis, a comprehensive approach integrating topology optimization, finite element analyses, additive manufacturing, and experimental vibration testing is employed to enhance the vibration performance of the Inertial Measurement Unit (IMU) holder used in guided missile systems. The dynamic behavior of the existing holder was first examined through modal analysis, and its critical mode shapes were identified. Considering the mounting interfaces, the design domain was defined and topology optimization was conducted with the objective of increasing the natural frequencies and improving the structural response under vibrational loading. Two alternative geometries were obtained and evaluated using harmonic response analyses, after which the design exhibiting the most balanced and stable dynamic characteristics was selected and manufactured from AlSi10Mg alloy using the Selective Laser Melting (SLM) process. Additionally, stress-relief heat treatment was applied to a portion of the manufactured samples to assess its influence on dynamic performance. Numerical analyses demonstrated that the redesigned holder possesses higher natural frequencies and lower vibration amplitudes compared to the existing configuration. Experimental evaluations, including sine sweep vibration testing and missile-level modal impact testing, confirmed that the optimized design substantially reduces vibration transmission to the IMU. The heat treatment was also observed to improve dynamic stability by alleviating residual stresses introduced during additive manufacturing. Overall, the findings indicate that combining topology optimization with additive manufacturing enables the development of more durable, reliable, and vibration-resistant components for aerospace and defense applications, particularly where high vibration sensitivity is critical.

Science Code	:	91448, 91433, 91428
Key Words	:	Additive manufacturing, topology optimization, finite element analysis, vibration test
Page Number	:	164
Supervisor	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, çalışmamın her aşamasında değerli katkılarını ve yapıcı eleştirilerini esirgemeyen, sabırla rehberlik eden saygıdeğer danışman hocama Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik bakış açımı geliştirmemde ve bu çalışmanın nitelikli bir şekilde tamamlanmasında sağladığı destek benim için son derece kıymetlidir.

Tez sürecim boyunca akademik çalışmalarımı mesleki sorumluluklarımla birlikte sürdürebilmem konusunda her zaman destek olan, süreç yönetimi ve planlama konularında yol gösterici yaklaşımlar sunan iş yerindeki yöneticim Mehmet Arınç DEMİRTAŞ'a teşekkür ederim. Aynı zamanda bu süreçte bilgi paylaşımı, yardımları ve moral desteğiyle her zaman yanımda olan değerli iş arkadaşım Yaşar Eray ÖZKAN'a ve diğer tüm iş arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi bu süreçte de sevgileri, emekleri ve sabırlarıyla yanımda olan; beni koşulsuz destekleyen annem Güllü TAŞAR ve babam Bekir TAŞAR'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Bugün sahip olduğum azmin, disiplinin ve hedef bilincinin temelinde onların emeği ve fedakarlıkları bulunmaktadır. Her zaman yanımda olan, desteğini ve güvenini hissettiren kardeşim Burak TAŞAR'a da ayrıca teşekkür ederim.

Bu zorlu ve yoğun tez sürecinde anlayışı, sabrı ve sevgisiyle bana güç veren; motivasyonumu kaybettiğim anlarda beni yeniden ayağa kaldıran; akademik ve kişisel yolculuğumun her aşamasında yanımda olan eşim Beste İLİ TAŞAR'a ise en içten ve özel teşekkürlerimi sunarım. Uzun çalışma saatlerine, stresli dönemlere ve yorgunluğa gösterdiği hoşgörü; beni her zaman cesaretlendiren sözleri ve varlığı, bu süreci tamamlayabilmemde en büyük dayanaklarımdan biri olmuştur. Sadece bu tez çalışmasında değil, hayatın her alanında bana sunduğu destek, anlayış ve sevgi için minnettarım. Bu çalışmanın tamamlanmasında emeği ve katkısı her zaman hissedilen eşime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. KAVRAMSAL BİLGİLER 61

3.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri 61

3.2. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri 61

3.2.1. Toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri 62

3.2.2. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi 64

3.3. Topoloji Optimizasyonu 65

3.4. Ataletsel Ölçüm Birimleri (AÖB) 67

3.4.1. AÖB çalışma prensibi 68

3.4.2. AÖB kullanım alanları 68

3.4.3. Titreşimlerin AÖB performansına etkisi 69

4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ANALİZ 71

4.1. Sistemin Tanımlanması 71

4.2. Malzeme Bilgileri 74

4.3. Yük Koşulları 75

4.4. Mevcut AÖB Tutucu Analizleri 76

Sayfa

4.4.1. Mevcut tutucu modal analiz 76
4.4.2. Mevcut tutucu statik analiz 80
4.4.3. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi 81
4.4.4. Ağ bağımsızlığı çalışması 85
4.5. Topoloji Optimizasyonu 91
4.6. Modal Analizler 100
4.7. Harmonik Tepki Analizleri 107
4.8. Statik Analiz 116
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 119
5.1. Eklemeli İmalat ile Üretim 119
5.2. Sinüs Taraması ile Titreşim Testi 124
5.2.1. Sinüs tarama testinin kurulumu ve uygulanışı 124
5.2.2. Sinüs tarama testi sonuçları 127
5.2.3. Analiz - test doğrulaması 133
5.3. Modal Darbe Testi 137
5.3.1. Modal darbe testi kurulumu ve uygulanışı 137
5.3.2. Modal darbe testi sonuçları 138
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 147
6.1. Sonuçlar 147
6.2. Öneriler 149
KAYNAKLAR 151
EKLER 159
EK-1. Farklı yönlerindeki sinüs tarama testleri için test düzeneği görünümleri 160
EK-2. AÖB tutucuları üzerindeki ivmeölçerlerden ve kontrol ivmeölçerinden alınan ölçüm sonuçları 162
ÖZGEÇMİŞ 164

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Serbest-serbest kirişlerin ilk iki rezonans için kabul fonksiyonu genlikleri 16

Çizelge 2.2. Ankastre kirişlerin maksimum doğal frekansı için optimize edilmiş ME parametrelerinin sonuçları 30

Çizelge 2.3. L9 (3^3) ortogonal dizi tasarım şeması ve gözeneklilik sonuçları 36

Çizelge 2.4. Seçilen yapıların kayıp faktörleri 57

Çizelge 4.1. Malzeme mekanik özellikleri 74

Çizelge 4.2. Malzeme mukavemet değerleri 75

Çizelge 4.3. Güdümlü mühimmat yük koşulları 76

Çizelge 4.4. Mevcut tutucu doğal frekans değerleri 77

Çizelge 4.5. Mevcut tutucu ve gövde modal analizi doğal frekans değerleri 83

Çizelge 4.6. Modal analiz farklı ağ yapısı bilgileri 86

Çizelge 4.7. Farklı ağ yapılarına yöre mevcut tutucu doğal frekans değerleri 87

Çizelge 4.8. Ağ yapısı bilgileri 88

Çizelge 4.9. Farklı ağ yapılarına göre harmonik tepki analizi sonuçları 91

Çizelge 4.10. Topoloji optimizasyonu soncu yeniden düzenlenmiş geometrinin doğal frekans değerleri 96

Çizelge 4.11. Doğal frekans değerleri karşılaştırması 101

Çizelge 4.12. Tutucular ve gövdenin modal analizine ait doğal frekans değerleri 109

Çizelge 4.13. 0–2000 hz arası en yüksek genlik değerleri (harmonik tepki analizi sonuçları) 114

Çizelge 4.14. Mevcut tutucuya göre genlik değişim oranları 115

Çizelge 5.1. SLM işlem parametreleri 119

Çizelge 5.2. Sinüs tarama testi X ekseni en yüksek genlik değerleri 128

Çizelge 5.3. Sinüs tarama testi Y ekseni en yüksek genlik değerleri 129

Çizelge 5.4. Sinüs tarama testi Z ekseni en yüksek genlik değerleri 130

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Airbus A320 motor yuvası menteşe braketinin topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatı 6

Şekil 2.2. Optimizasyon sonuçları: a) tek amaçlı optimizasyon sonucu, b) çok amaçlı optimizasyon sonucu 7

Şekil 2.3. Kiriş uzunluğu ve kütle fraksiyonu sınırlarının farklı kombinasyonları için nihai kesit tasarımları 8

Şekil 2.4. Optimize edilmiş ve başlangıçtaki yapıların FRF'leri 9

Şekil 2.5. Nihai optimizasyon tasarımı 10

Şekil 2.6. (a) Tasarım alanı; (b) CAD ve (c) FDM baskılar: üretim süreci kısıtlamaları olmayan modeller (solda) ve bağlantı süreci kısıtlamalarını dikkate alan modeller (sağda) 12

Şekil 2.7. İkinci denemede SLM işlemiyle mükemmel şekilde üretilmiş dişli 13

Şekil 2.8. Frekans tepkileri: (a) 1. metayapı üzerinde yapılan çekiç testinin frekans tepkisi, (b) 2. metayapı üzerinde yapılan çekiç testinin frekans tepkisi 14

Şekil 2.9. Düşük boy/en oranı numuneleri üzerinde yapılan süpürülmüş sinüs testlerinden elde edilen gerinim tepkisi 15

Şekil 2.10. Katmanlı üretim ile üretilen eliminatörlerin konsepti 16

Şekil 2.11. Maksimum titreşim tepe değerleri 17

Şekil 2.12. Kısa uzunluk (a) ve uzun uzunluk (b) sınır koşulları ve ağ modeli (c) 18

Şekil 2.13. Kısa ve uzun sabit kenarlar için frekans tepki fonksiyonları 18

Şekil 2.14. AlSi10Mg–NiTi kafes yapısı IPC'nin hazırlık işleminin gösterimi: (a) SLM'in şematik diyagramı, (b) NiTi tozu, (c) NiTi kafes yapısı örneği, (d) AlSi10Mg tozu ile doldurulmuş NiTi kafes yapısı, (e) AlSi10Mg tozu, (f) AlSi10Mg'nin NiTi kafes yapısına nüfuzu, (g) AlSi10Mg–NiTi kafes yapısı IPC, (h) AlSi10Mg–NiTi kafes yapısı IPC numunesi 19

Şekil 2.15. Tüm numunelerin 100 mm/s² (üstte) ve 800 mm/s² (altta) uyarım genlikleri için FRF'leri ile hesaplanan doğal eğilme frekansları $fn*$: 800 mm/s²'deki (2) daha yüksek sönüm, 100 mm/s²'ye (1) kıyasla üçüncü eğilme modu için örnek olarak vurgulanmıştır 20

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.16. Rastgele titreşim yükleri tarafından uyarılan ivme tepkisi: a) X yönü ve b) Z yönü 21

Şekil 2.17. Hücrelerin ve kafes yapılarının gerçek görüntüsü 22

Şekil 2.18. a) Katı numune ile karşılaştırırken, değişen hücre tipleri ve boyutları ile lazer toz yatak füzyonu (LPBF) ile oluşturulan Ti6Al4V'nin doğal frekansı arasındaki ilişki. b) Katı numune ile karşılaştırırken, değişen hücre tipleri ve boyutları ile LPBF ile oluşturulan Ti6Al4V'nin sönümleme oranı arasındaki ilişki 23

Şekil 2.19. Tasarlanan IWP ve BCC: (a) IWP birim hücresi ve modeller, (b) BCC birim hücresi ve modeller 24

Şekil 2.20. Numunelerin ilk doğal frekansları 25

Şekil 2.21. a) BCC temel hücresi ve b) simetri düzlemleri ile numune modeli 26

Şekil 2.22. Proses parametre seviyeleri ve şematiği 28

Şekil 2.23. Dolgu yoğunluğu için sönümleme faktörü kutu grafikleri. Kırmızı noktalar uç değerlerdir. Mor daireler ham verilerdir 28

Şekil 2.24. Nozul boyutu için sönümleme faktörü kutu grafikleri. Kırmızı noktalar uç değerlerdir. Mor daireler ham verilerdir 29

Şekil 2.25. İşlem parametrelerinin TPU kirişlerinin rezonans frekansları ve kayıp katsayıları üzerindeki temel etkileri: (a) Tarama açısı, (b) nozul sıcaklığı, (c) katman yüksekliği, (d) birikim hızının TPU kirişlerinin rezonans frekansları üzerindeki etkisi ve (e) tarama açısı, (f) nozul sıcaklığı, (g) katman yüksekliği ve (h) birikim hızının TPU kirişinin kayıp katsayıları üzerindeki etkisi 31

Şekil 2.26. Tarama stratejileri: (a) satranç tahtası tarama stratejisi, (b) şerit tarama stratejisi ve (c) altıgen tarama stratejisi 32

Şekil 2.27. Farklı tarama stratejisi türlerinin şematik gösterimi: a) tek yönlü tarama; b) çift yönlü/zigzag tarama; c) ada taraması; d) tek yönlü taramaya dayalı tarama dizilerinin varyasyonu; e) çift yönlü taramaya dayalı tarama dizilerinin varyasyonu; f) helis (sarmal) tarama; g) kontur tarama; h) çift yönlü, lazer ışınının çift geçişli taraması; i) çift yönlü, lazer ışınının çift geçişli taraması, katmanlar arasında tarama vektörünün 90° döndürülmesi; j) çapraz tarama; k) çift yönlü, lazer ışınının tek geçişli taraması, katmanlar arasında tarama vektörünün 90° döndürülmesi; l) ardışık katmanlar arasında tek yönlü taramanın 90° döndürülmesi; m) tarama vektörünün 45° döndürülmesi; n) noktasal ergitme taraması 33

Şekil 2.28. Farklı LED'lere sahip SEM morfolojileri, (a) 2 J/cm; (b) 3 J/cm ve (c) 4,5 J/cm 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.29. Tarama stratejisinin bağıl yoğunluk üzerindeki etkisi 35

Şekil 2.30. Minimum gözeneklilik için öngörülen optimum lazer gücü ve tarama hızı..... 37

Şekil 2.31. Üretildiği haliyle (AB) durumundaki ve ısıl işlem sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ölçülen kayıp faktörleri: xy-numuneleri ve z-numuneleri açık ve koyu gri renklerle gösterilmiştir 38

Şekil 2.32. Üretildiği haliyle ve ısıl işlem görmüş AlSi10Mg numuneleri için tipik gerilme-gerinim eğrileri ve nanoindentasyon sonuçları 39

Şekil 2.33. Farklı ısıl işlemlerde SLM AlSi10Mg numunelerinin çekme özellikleri ... 40

Şekil 2.34. İlk pervanenin (işleme sonrası) bütünsel bozulması (mm) 41

Şekil 2.35. Yeni pervanenin (işleme sonrası) hafifletilmiş bütünsel bozulması (mm) 41

Şekil 2.36. Deformasyonun hedef CAD modeliyle karşılaştırılması (mm) 42

Şekil 2.37. Yeniden kaplayıcı çarpışma senaryosunun şematik gösterimi 44

Şekil 2.38. (a-b) orijinal CAD geometrisinin, (c-d) ilk yinelemenin telafi edilmiş CAD geometrisinin ve (e-f) ikinci yinelemenin telafi edilmiş CAD geometrisinin bozulma konturları ve sapma profilleri 45

Şekil 2.39. Akma dayanımı karşılaştırması (AH:eklemeli-yatay, AV:eklemeli-dikey, C:döküm)..... 47

Şekil 2.40. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımı numunelerin çekme özellikleri; üretildiği haliyle ve farklı sıcaklıklarda uygulanan çözelti ısıl işlemleri sonrasında. (Üretim sonrası çözelti ısıl işlemi 2 saat boyunca uygulanmış ve oda sıcaklığında su ile soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir)..... 48

Şekil 2.41. Hacim oranı değerleri ile σ_* (a) ve E_* (b) arasındaki ilişki 49

Şekil 2.42. MS1'in 1. ve 2. tepelerine ait sönüm oranı "ζ" değerleri 51

Şekil 2.43. Bal peteği yapılarının doğal frekans değerleri 52

Şekil 2.44. Mod sayısı ve frekans arasındaki değişim 53

Şekil 2.45. Mod 7 (eğilme modu) 53

Şekil 2.46. Farklı uyarı frekanslarında yer değiştirme genliğinin değişimi 54

Şekil 2.47. Döner kesici mil ve oluk pulluklarının harmonik tepki gerilme diyagramı..... 55

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.48. Döner kesici mil ve oluk pulluklarının harmonik tepki deformasyon diyagramı 55

Şekil 2.49. Ara destekli tekdüze konsol kiriş 56

Şekil 2.50. Freze kutusunun tepkisi 58

Şekil 2.51. Plastik damper gövdelerinin ve silikon sönümleme elemanlarının tasarımı ve eklemeli imalat süreci 59

Şekil 3.1. Metal eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması 62

Şekil 3.2. Seçici lazer ergitme üretim yöntemi şeması 65

Şekil 3.3. Üç eksenli ataletsel ölçüm biriminde ivmeölçer ve dönüölçer yerleşimi 67

Şekil 4.1. Güdümlü mühimmat 71

Şekil 4.2. Güdümlü mühimmat güdüm bölümü mekanik yapısı 72

Şekil 4.3. Ataletsel ölçüm birimi-1 (AÖB-1) 72

Şekil 4.4. Ataletsel ölçüm birimi-2 (AÖB-2) 73

Şekil 4.5. Mevcut AÖB tutucu parçası 73

Şekil 4.6. AÖB tutucu parçası ölçü bilgileri 74

Şekil 4.7. Füzenin koordinat sistemi 75

Şekil 4.8. Mevcut tutucu modal analizi ağ yapısı 76

Şekil 4.9. Mevcut tutucu modal analiz modeli 77

Şekil 4.10. Mevcut tutucu 1. mod şekli 77

Şekil 4.11. Mevcut tutucu 2. mod şekli 78

Şekil 4.12. Mevcut tutucu 3. mod şekli 78

Şekil 4.13. Mevcut tutucu 4. mod şekli 78

Şekil 4.14. Mevcut tutucu 5. mod şekli 79

Şekil 4.15. Mevcut tutucu 6. mod şekli 79

Şekil 4.16. Mevcut tutucu statik analiz sonucu; eşdeğer gerilme 81

Şekil 4.17. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi ağ yapısı 82

Şekil 4.18. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi modeli – 1 82

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.19. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi modeli – 2 84

Şekil 4.20. Harmonik tepki analizi sonuç yüzeyi 84

Şekil 4.21. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi sonucu; X ekseni ivme genliği değerleri 85

Şekil 4.22. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi sonucu; Y ekseni ivme genliği değerleri 85

Şekil 4.23. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi sonucu; Z ekseni ivme genliği değerleri 85

Şekil 4.24. Modal analiz farklı ağ yapıları 86

Şekil 4.25. Farklı ağ yapıları 88

Şekil 4.26. Genlik ölçüm noktaları 89

Şekil 4.27. Vertex 1 için X ekseni ivme genliğinin ağ yoğunluğuna bağlı değişimi 90

Şekil 4.28. Vertex 1 için Y ekseni ivme genliğinin ağ yoğunluğuna bağlı değişimi 90

Şekil 4.29. Vertex 1 için Z ekseni ivme genliğinin ağ yoğunluğuna bağlı değişimi 91

Şekil 4.30. Topoloji optimizasyonu için tasarım uzayı 92

Şekil 4.31. Tasarım uzayı ağ yapısı 92

Şekil 4.32. Optimizasyon parametreleri 93

Şekil 4.33. Topoloji optimizasyonu modeli 94

Şekil 4.34. Topoloji optimizasyonu sonucu – izometrik üstten görünüm 94

Şekil 4.35. Topoloji optimizasyonu sonucu – izometrik alttan görünüm 95

Şekil 4.36. Topoloji optimizasyonu sonucu – yandan görünüm 95

Şekil 4.37. Topoloji optimizasyonu sonucu yeniden düzenlenmiş geometri 96

Şekil 4.38. Farklı kolon tasarımı denemeleri 97

Şekil 4.39. Tasarım 1 izometrik görünümü 98

Şekil 4.40. Tasarım 1 üstten ve alttan görünümü 98

Şekil 4.41. Tasarım 1 önden ve yandan görünümü 98

Şekil 4.42. Tasarım 1 kesit görünümü 99

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.43. Tasarım 2 izometrik görünümü 99

Şekil 4.44. Tasarım 2 üstten ve alttan görünümü..... 99

Şekil 4.45. Tasarım 2 önden ve yandan görünümü..... 100

Şekil 4.46. Tasarım 2 kesit görünümü 100

Şekil 4.47. Tasarım 1 modal analizi ağ yapısı 101

Şekil 4.48. Tasarım 2 modal analizi ağ yapısı 101

Şekil 4.49. Tasarım 1 – 1. mod şekli..... 102

Şekil 4.50. Tasarım 1 – 2. mod şekli..... 102

Şekil 4.51. Tasarım 1 – 3. mod şekli..... 102

Şekil 4.52. Tasarım 1 – 4. mod şekli..... 103

Şekil 4.53. Tasarım 1 – 5. mod şekli..... 103

Şekil 4.54. Tasarım 1 – 6. mod şekli..... 103

Şekil 4.55. Tasarım 2 – 1. mod şekli..... 104

Şekil 4.56. Tasarım 2 – 2. mod şekli..... 104

Şekil 4.57. Tasarım 2 – 3. mod şekli..... 104

Şekil 4.58. Tasarım 2 – 4. mod şekli..... 105

Şekil 4.59. Tasarım 2 – 5. mod şekli..... 105

Şekil 4.60. Tasarım 2 – 6. mod şekli..... 105

Şekil 4.61. Tasarım 1 harmonik tepki analizi ağ yapısı..... 107

Şekil 4.62. Tasarım 1 harmonik tepki analizi modeli 107

Şekil 4.63. Tasarım 2 harmonik tepki analizi ağ yapısı..... 108

Şekil 4.64. Tasarım 2 harmonik tepki analizi modeli 108

Şekil 4.65. X ekseni yönündeki ortalama ivme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması..... 110

Şekil 4.66. Y ekseni yönündeki ortalama ivme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması..... 110

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.67. Z ekseni yönündeki ortalama ivme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 111

Şekil 4.68. X ekseni yönündeki ortalama deformasyon genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 111

Şekil 4.69. Y ekseni yönündeki ortalama deformasyon genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 112

Şekil 4.70. Z ekseni yönündeki ortalama deformasyon genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 112

Şekil 4.71. X ekseni yönündeki ortalama gerilme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 113

Şekil 4.72. Y ekseni yönündeki ortalama gerilme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 113

Şekil 4.73. Z ekseni yönündeki ortalama gerilme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması 114

Şekil 4.74. Tasarım 2 statik analiz sonucu; eşdeğer gerilme 117

Şekil 5.1. AÖB üzerinden alınan X ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları 127

Şekil 5.2. AÖB üzerinden alınan Y ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları 129

Şekil 5.3. AÖB üzerinden alınan Z ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları 130

Şekil 5.4. Doğrulama analizi modeli (fikstürlü analiz modeli)..... 133

Şekil 5.5. Fikstürlü doğrulama analizi kapsamında X ekseni frekans tepkisi 134

Şekil 5.6. Sinüs tarama titreşim testi için tutucu üzerindeki X ekseni frekans tepkisi 134

Şekil 5.7. X ekseni analiz ve test sonucu karşılaştırması..... 135

Şekil 5.8. Fikstürlü doğrulama analizi kapsamında Y ekseni frekans tepkisi 135

Şekil 5.9. Sinüs tarama titreşim testi için tutucu üzerindeki Y ekseni frekans tepkisi 136

Şekil 5.10. Y ekseni analiz ve test sonucu karşılaştırması..... 136

Şekil 5.11. X ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2) 139

Şekil 5.12. X ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2-AB) 139

Şekil 5.13. X ekseni frekans yanıtı (Tasarım 2 – Tasarım 2-AB)..... 140

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.14. Y ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2) 141

Şekil 5.15. Y ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2-AB) 141

Şekil 5.16. Y ekseni frekans yanıtı (Tasarım 2 – Tasarım 2-AB)..... 142

Şekil 5.17. Z ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2)..... 143

Şekil 5.18. Z ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2-AB)..... 143

Şekil 5.19. Z ekseni frekans yanıtı (Tasarım 2 – Tasarım 2-AB)..... 144

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Üretim sonrası Tasarım 2 – üstten görünüm 120
Resim 5.2. Üretim sonrası Tasarım 2 – alttan görünüm 120
Resim 5.3. Üretim sonrası Tasarım 2 – önden görünüm 121
Resim 5.4. Üretim sonrası Tasarım 2 – arkadan görünüm 121
Resim 5.5. Üretim sonrası Tasarım 2 – yandan görünüm 121
Resim 5.6. Zımpara sonrası yüzey görünümü 122
Resim 5.7. Kılavuz çekilmiş bağlantı bölgeleri 123
Resim 5.8. Tasarım 2 tutucu ve AÖB-1 montaj durumu 123
Resim 5.9. Tasarım 2 tutucu ve AÖB-2 montaj durumu 124
Resim 5.10. Tasarım 2 tutucu ve gövde montaj durumu 124
Resim 5.11. İvmeölçer yerleştirilmiş AÖB-2 ve tutucu komplesi 125
Resim 5.12. Sinüs tarama test düzeneği – 1 125
Resim 5.13. Sinüs tarama test düzeneği – 2 126
Resim 5.14. Füze seviyesinde modal darbe testi düzeneği 138

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°	Derece
°C	Santigrat Derece
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
dB	Desibel
dev/dk	Devir/Dakika
g	Yerçekimi İvmesine Göre İvme Birimi (1g=9,81m/s2)
g/cm³	Gram/Santimetreküp
GPa	Gigapaskal
HV	Sertlik Değeri
Hz	Hertz
J	Joule
J/cm	Joule/Santimetre
J/mm³	Joule/Milimetreküp
kg	Kilogram
mg/dk	Miligram/Dakika
mm	Milimetre
mm/N	Milimetre/ Newton
mm/s	Milimetre/Saniye
mm/s²	Milimetre/Saniye Kare
MPa	Megapaskal
N	Newton
nm	Nanometre
Pa	Paskal
Q^{-1}	İç Sürtünme Katsayısı
W	Watt

Simgeler	Açıklamalar
α	Alfa (Rayleigh Sönüm Katsayısı)
β	Beta (Rayleigh Sönüm Katsayısı)
η	Sönümlenme Oranı
µm	Mikrometre
ξ	Sönüm Oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ACS	Oluklu Çekirdekli Alüminyum Sandviç (Aluminum Corrugated Sandwich)
AFRL	Amerikan Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı (Air Force Research Laboratory)
AFS	Alüminyum Köpük Sandviç (Aluminum Foam Sandwich)
ANN	Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)
AR	Boy/En Oranı (Aspect Ratio)
AÖB	Ataletsel Ölçüm Birimi
BCC	Hacim Merkezli Kübik **(**Body-Centered Cubic
BESO	Çift Yönlü Evrimsel Yapısal Optimizasyon (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
DED	Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition)
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DMLM	Doğrudan Metal Lazer Ergitme (Direct Metal Laser Melting)
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EBM	Elektron Işınıyla Ergitme (Electron Beam Melting)

Kısaltmalar	Açıklamalar
EDM	Elektrik Arkı ile İşleme (Electrical Discharge Machining)
Eİ	Eklemeli imalat
ESO	Evrimsel Yapısal Optimizasyon (Evolutionary Structural Optimization)
FDM	Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling)
FFF	Eritilmiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication)
FRF	Frekans Tepki Fonksiyonu (Frequency Response Function)
HIP	Sıcak İzostatik Presleme (Hot Isostatic Pressing)
IMU	Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
IPC	İç İçe Faz Kompozitleri (Interpenetrating Phase Composites)
IWP	İç İçe Örülmüş Faz (Interwoven Phase)
İHA	İnsansız Hava Aracı
LED	Doğrusal Enerji Yoğunluğu (Linear Energy Density)
LPBF	Lazer Toz Yatak Füzyonu (Laser Powder Bed Fusion)
Max	Maksimum
ME	Malzeme Ekstrüzyonu
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistem
MOTO	Çok Amaçlı Topoloji Optimizasyonu (Multi-Objective Topology Optimization)
PBF	Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion)
PBF-LB	Lazer Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion – Laser Beam)
PCLSS	Piramit Çekirdekli Kafes Sandviç Yapı (Pyramidal Core Lattice Sandwich Structures)
PLA	Polilaktik Asit
PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
RMS	Kök Ortalama Kare (Root Mean Square)

Kısaltmalar	Açıklamalar
RSM	Yanıt yüzeyi yöntemi (Response Surface Methodology)
SEBM	Seçici Elektron Işın Ergitme (Selective Electron Beam Melting)
SF	İstifleme Hataları (Stacking Faults)
SIMP	Cezalandırmalı Katı İzotropik Malzeme (Solid Isotropic Material with Penalization)
SLM	Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)
SOTO	Çok Amaçlı Topoloji Optimizasyonu **(**Single-Objective Topology Optimization)
SSTL	Surrey Satellite Technology Ltd.
TPMS	Üçlü Periyodik Minimal Yüzey (Triply Periodic Minimal Surface)
TPU	Termoplastik Poliüretan
VTM	Sanal Sıcaklık Yöntemi (Virtual Temperature Method)
XFEM	Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (eXtended Finite Element Method)
XRD	X-Işını Difraksiyonu (X-ray Diffraction)

1. GİRİŞ

Savunma ve havacılık sanayilerinde kullanılan yapısal bileşenlerin güvenilirliği, görev süresince maruz kaldıkları yüksek dinamik yükler altında yapısal bütünlüklerini koruyabilme kabiliyetine doğrudan bağlıdır. Özellikle güdümlü füze sistemlerinde yer alan ataletsel ölçüm birimi (AÖB), mühimmatın konum ve yönelim bilgilerinin doğru biçimde elde edilmesini sağlayan temel bir alt sistemdir. AÖB'nin çalışma ortamında oluşan yüksek seviyeli titreşimler, sistemin ölçüm doğruluğunu düşürerek görev başarısını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, AÖB'yi taşıyan yapısal parçaların titreşim sönümleme performansının artırılması, sistem güvenilirliğini sağlama açısından kritik öneme sahiptir.

Geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen taşıyıcı parçalar, karmaşık geometrilerin uygulanması konusunda sınırlı bir esnekliğe sahiptir. Bu durum, hem ağırlık azaltımı hem de titreşim dayanımının artırılması gibi birbiriyle ilişkili tasarım hedeflerinin aynı anda gerçekleştirilmesini güçleştirmektedir. Son yıllarda bu sınırlamaların aşılmasına yönelik olarak topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat teknolojileri önemli birer mühendislik yaklaşımı haline gelmiştir. Topoloji optimizasyonu, belirli yükleme ve sınır koşulları altında yapının malzeme dağılımını en verimli şekilde belirleyerek gereksiz bölgelerdeki malzemeyi ortadan kaldıran, böylece hafif ve rijit yapılar elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bununla birlikte, bu optimizasyon sonucunda ortaya çıkan karmaşık geometrilerin üretilebilirliği, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin geometrik kısıtları nedeniyle uzun yıllar boyunca sınırlı kalmıştır.

Bu sınırlamayı ortadan kaldıran eklemeli imalat teknolojileri, katmanlı üretim prensibiyle üç boyutlu dijital modellerin doğrudan fiziksel parçalara dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Özellikle metal esaslı eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (ing. Selective Laser Melting, SLM), yüksek boyutsal doğruluk ve karmaşık geometrilerde üretim özgürlüğü sunmasıyla öne çıkmaktadır. Bu yöntem, kalıp gereksinimini ortadan kaldırarak malzeme israfını azaltmakta ve çok parçalı yapıların yekpare üretimini mümkün kılmaktadır. Böylece topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen hafif ve yüksek dayanımlı yapılar, eklemeli imalat sayesinde fiziksel olarak üretilebilir hale gelmektedir.

Literatürde topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın birlikte kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmaların büyük çoğunluğu genel mekanik bileşenler veya havacılık yapılarında statik yükleme koşulları altında yürütülmüştür. Bendsøe ve Sigmund, topoloji optimizasyonunun teorik altyapısını ortaya koyarak yöntemin mühendislik uygulamalarında kullanılmasına öncülük etmiştir [1]. Zegard ve Paulino, eklemeli imalatla bütünleştirilen optimizasyon süreçlerinin tasarım özgürlüğünü genişlettiğini göstermiştir [2]. Orme ve diğerleri ile Ramadani ve arkadaşları ise topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen tasarımların SLM yöntemiyle üretimi sonrası titreşim performansındaki iyileşmeleri raporlamışlardır [3-4]. Ancak bu çalışmaların çoğu, yüksek titreşim ortamlarında görev yapan savunma sistemlerine özgü bileşenler üzerinde yoğunlaşmamıştır. Özellikle AÖB tutucu parçalarının titreşim davranışını doğrudan hedefleyen araştırmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu durum, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın entegrasyonunun savunma sistemlerindeki dinamik koşullara uyarlanması açısından literatürde önemli bir boşluk bulunduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, söz konusu eksiklikten hareketle, güdümlü füze sistemlerinde kullanılan bir AÖB tutucu parçasının titreşim performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat teknikleri bütünleşik biçimde kullanılarak titreşim dayanımı açısından daha verimli bir tasarım elde edilmesi amaçlanmıştır. Mevcut tasarımın dinamik karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, ardından belirlenen tasarım uzayı üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanarak doğal frekansların artırılması hedeflenmiştir. Elde edilen yeni tasarım seçici lazer ergitme yöntemiyle AlSi10Mg alaşımından üretilmiş, farklı tasarım ve ısıl işlem koşullarının titreşim davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmanın kapsamı aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Mevcut AÖB tutucu parçasının dinamik karakteristiklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmesi,
- Topoloji optimizasyonu uygulanarak doğal frekansların artırılması ve optimum malzeme dağılımının belirlenmesi,
- Eklemeli imalata uygun nihai tasarım geometrisinin geliştirilmesi,
- Eski ve yeni tasarıma ait parçaların harmonik tepki analizlerinin gerçekleştirilmesi ve karşılaştırılması,

- Yeni tasarım parçanın seçici lazer ergitme yöntemiyle AlSi10Mg malzemeden üretilmesi,
- Deneysel titreşim testlerinin gerçekleştirilmesi ve yeni parçanın mevcut tasarıma göre performansının incelenmesi,
- Isıl işlemin titreşim davranışına etkisinin incelenmesi.

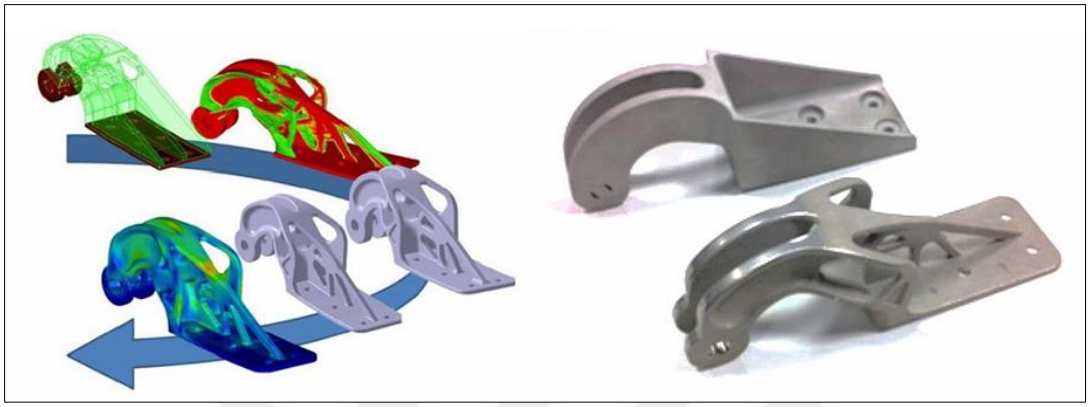
Bu tez çalışması; giriş, literatür araştırması, kavramsal bilgiler, topoloji optimizasyonu ve analiz, deneysel çalışmalar ile sonuç ve öneriler olmak üzere altı ana bölümden oluşmaktadır. Literatür araştırması bölümünde, eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu alanlarında gerçekleştirilen güncel çalışmalar incelenmiştir. Kavramsal bilgiler bölümünde ise, çalışmada kullanılan yöntemlerin teorik temelleri açıklanmıştır. Topoloji optimizasyonu ve analiz bölümünde, yapılan sayısal çalışmalar ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular sunulmuştur. Deneysel çalışmalar bölümünde, yapıların dinamik davranışlarını incelemeye yönelik gerçekleştirilen titreşim testlerine yer verilmiştir. Son olarak, sonuçlar ve öneriler bölümünde elde edilen bulgular özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara ilişkin önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat, geleneksel talaşlı üretim yöntemlerinin geometrik sınırlamalarını ortadan kaldırarak karmaşık, hafif ve fonksiyonel yapıların üretimine olanak sağlayan ileri bir imalat teknolojisidir. Bu üretim yönteminin sunduğu yüksek geometrik esneklik, topoloji optimizasyonu ile bir araya geldiğinde, yüksek performans gerektiren mühendislik bileşenlerinin tasarımında köklü yeniliklerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Güdümlü füze sistemlerinde yer alan yapısal elemanlar; yüksek seviyeli titreşimler, yoğun termal yükler ve ani dinamik ivmeler gibi zorlayıcı çalışma koşullarına maruz kalmaktadır. Bu nedenle, söz konusu bileşenlerde yalnızca yapısal dayanım değil, aynı zamanda titreşim kararlılığı ve doğal frekans karakteristikleri de büyük önem taşımaktadır. Ancak, geleneksel imalat yöntemleriyle bu tür hafif ve yüksek rijitliğe sahip yapıların üretimi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Topoloji optimizasyonu, belirli bir tasarım alanı içerisinde malzemenin en etkin biçimde dağıtılmasını sağlayarak ağırlık azaltımı, rijitlik artırımı veya belirlenen doğal frekans aralıklarında performans optimizasyonu gibi hedeflere ulaşılmasına imkan tanır. Eklemeli imalat teknolojilerinin bu optimizasyon sonuçlarını doğrudan üretilebilir hale getirmesi, mühendislik tasarım yaklaşımlarında yeni bir dönemin başlangıcını temsil etmektedir.

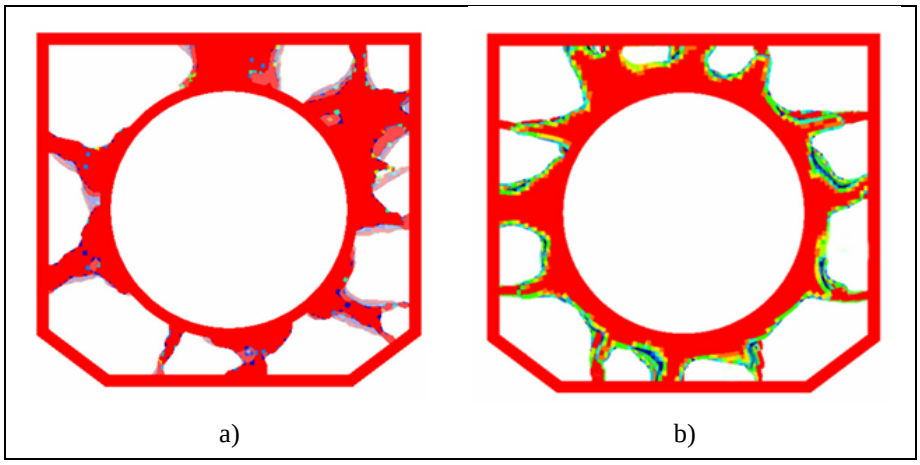
Zhu ve diğerleri çalışmalarında, topoloji optimizasyonunun uçak ve uzay yapılarının tasarımındaki uygulamalarını incelemişlerdir. Çalışmada, öncelikle Cezalandırmalı Katı İzotropik Malzeme (ing. Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP), Evrimsel Yapısal Optimizasyon (ing. Evolutionary Structural Optimization, ESO) ve homojenleştirme temelli yöntemler açıklanmış ve bu yaklaşımların yapısal ağırlığı azaltmada ve rijitliği artırmada etkili olduğu belirtilmiştir. Uçak pylonları, gövde panelleri, kanat kaburgaları ve çok bileşenli sistemler üzerinde yapılan uygulamalarda, topoloji optimizasyonu sonucunda yük taşıma yollarının etkin biçimde belirlendiği ve bazı durumlarda yapısal ağırlığın %60'a kadar azaldığı ifade edilmiştir. Airbus A320 uçağında kullanılan bir braket için yapılan topoloji optimizasyonu örneği Şekil 2.1'de paylaşılmıştır. Ayrıca, çoklu bağlantı elemanlarının yerleşiminin ve birleşim noktalarındaki yük dağılımının optimize edilmesiyle eklemlerdeki kesme yüklerinin %20–30 oranında azaldığı rapor edilmiştir. Makalede, burkulma dayanımı, titreşim davranışı ve doğal frekansların da topoloji optimizasyonu yoluyla iyileştirildiği

gösterilmiştir. Yazarlar, eklemeli imalat teknolojileriyle topoloji optimizasyonunun bütünleşik kullanımının, karmaşık geometrilere sahip hafif ve yüksek performanslı havacılık yapılarının üretimini mümkün kıldığına dikkat çekmişlerdir ve topoloji optimizasyonunun havacılık ve uzay mühendisliği alanında gelecekte daha etkin bir tasarım aracı olacağı belirtilmiştir [5].



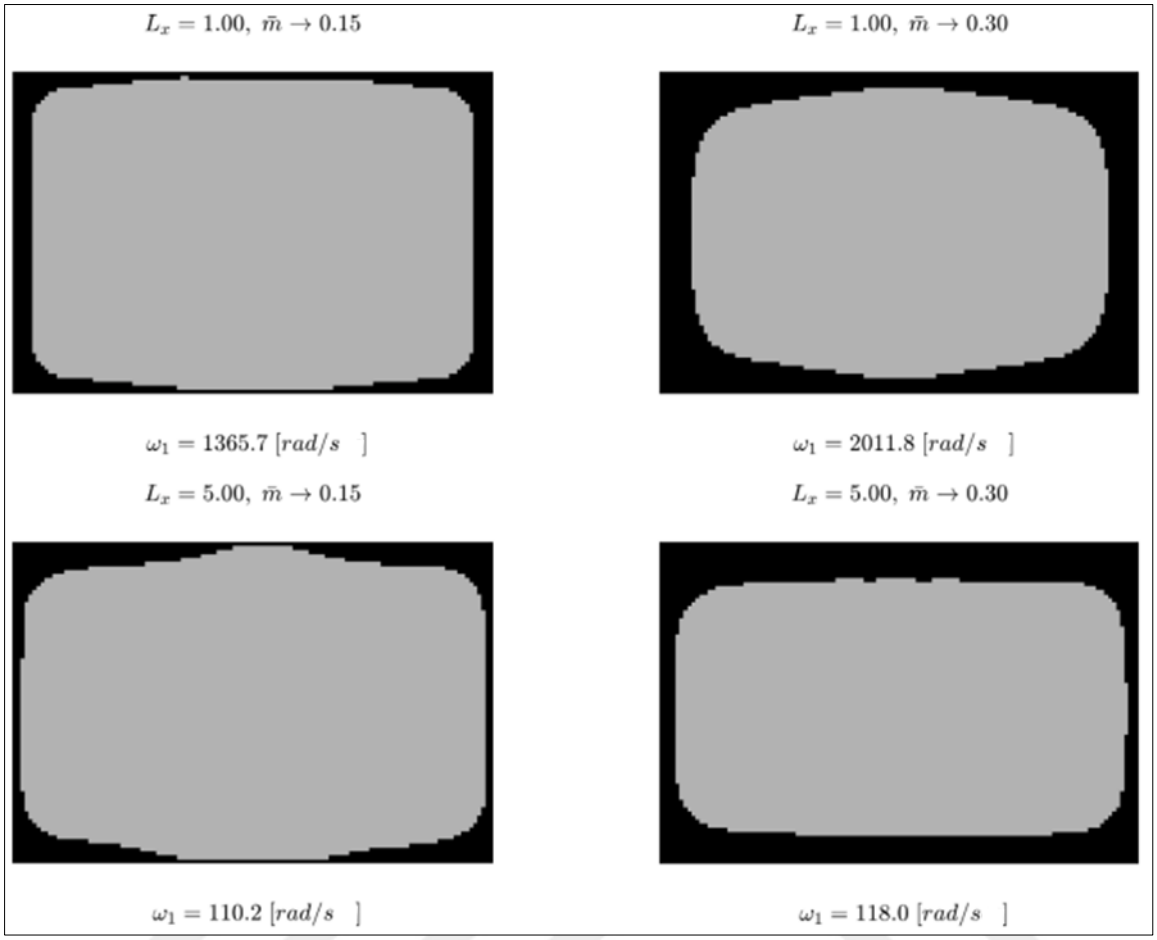
Şekil 2.1. Airbus A320 motor yuvası menteşe braketinin topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatı [5-6]

Tan ve diğerleri çalışmalarında, mikro-uyduların birincil taşıyıcı yapısındaki titreşimleri azaltmak amacıyla çok amaçlı topoloji optimizasyonu uygulamışlardır. Çalışmada, rijitlik ve rastgele titreşim tepkisinin aynı anda optimize edildiği çok amaçlı topoloji optimizasyonu (ing. Multi-Objective Topology Optimization, MOTO) modeli geliştirilmiş ve bu model, yalnızca rijitlik hedefli tek amaçlı topoloji optimizasyonu (ing. Single-Objective Topology Optimization, SOTO) ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2.2'de bu iki modele göre yapılmış topoloji optimizasyonu sonucu paylaşılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre, çok amaçlı optimizasyonun tek amaçlı optimizasyona kıyasla üç uzaysal yönde daha düşük kök ortalama kare (ing, Root Mean Square, RMS) titreşim değerleri elde ettiği, maksimum azalma değerinin 2,94 g ve azalma oranının %30,6 olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca silindir üst kısmındaki maksimum tepki değerinin 3,87 g'ye kadar düştüğü ve bu değerin %33,0 oranında azaldığı ifade edilmiştir. Analiz ve deney sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu, hatanın %7'nin altında kaldığı belirtilmiştir. Bu bulgular, önerilen çok amaçlı topoloji optimizasyonu yönteminin mikro-uydu taşıyıcı yapılarında titreşim bastırmada etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koyduğu söylenmektedir [7].



Şekil 2.2. Optimizasyon sonuçları: a) tek amaçlı optimizasyon sonucu, b) çok amaçlı optimizasyon sonucu [7]

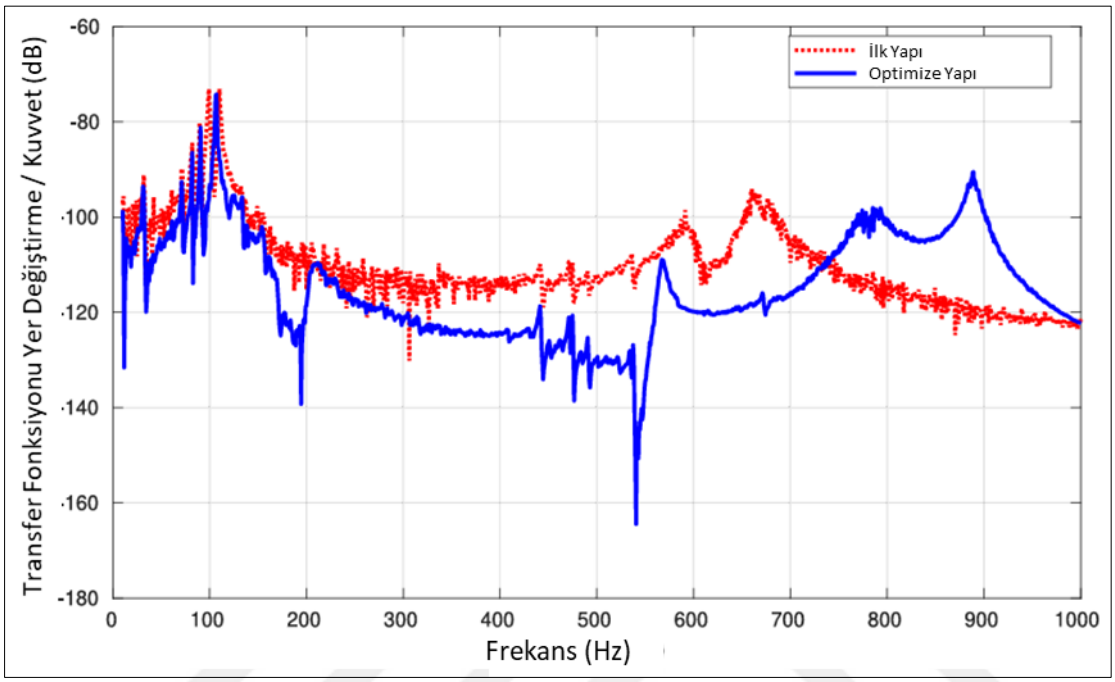
Marzok ve Waisman, ekstrüde kirişlerin (ing. extruded beams) doğal frekanslarını maksimize etmek amacıyla geliştirilen yeni bir topoloji optimizasyonu yöntemini tanıtmışlardır. Çalışmada, genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (ing, eXtended Finite Element Method, XFEM) kullanılarak, üç boyutlu modellemede serbestlik derecesi sayısı önemli ölçüde azaltılmış ve bu sayede hesaplama verimliliği artırılmıştır. Kirişlerin serbest titreşim modları ve doğal frekansları, küresel zenginleştirme fonksiyonları (ing. global enrichment functions) aracılığıyla doğruluk kaybı olmadan az sayıda eleman kullanılarak hesaplanmıştır. Optimizasyon problemi, SIMP yöntemi ile tanımlanan sürekli yoğunluk değişkenleri kullanılarak formüle edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, kısa kirişlerde kesit düzleminde yerelleşmiş titreşim modlarının ortaya çıktığı ve bu modların kesit geometrisinde ciddi bozulmalara yol açtığı görülmüştür. Uzun kirişlerde ise titreşim davranışının daha küresel modlar şeklinde gerçekleştiği ve optimize edilmiş tasarımların, aynı kütleye sahip boş dikdörtgen kesitli kirişlere kıyasla yaklaşık %15 daha yüksek temel frekans elde ettiği belirtilmiştir (Şekil 2.3). Ayrıca, farklı kütle oranı sınırlamalarında (0,15 ve 0,30) yapılan analizlerde, kütle oranının artırılmasının doğal frekansı yükselttiği, kiriş uzunluğunun artmasının ise frekansı azalttığı ifade edilmiştir. Son olarak, XFEM modelinin hem küresel hem yerel titreşim davranışlarını, yalnızca iki 3B eleman kullanarak doğru biçimde yakalayabildiği gösterilmiştir [8].



Şekil 2.3. Kiriş uzunluğu ve kütle fraksiyonu sınırlarının farklı kombinasyonları için nihai kesit tasarımları [8]

Lopes ve diğerleri, uzatılmış dinamik bir yapının doğal frekans ayırım aralığını artırmak amacıyla sayısal ve deneysel bir topoloji optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, titreşim genliklerini azaltmak için Çift Yönlü Evrimsel Yapısal Optimizasyon (ing. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, BESO) yöntemi kullanılmıştır. Bağlantı sürekliliğini sağlamak amacıyla, ısı akısı çözümüne dayalı yeni bir bağlantı kısıtı önerilmiştir. Polilaktik asit (PLA) malzemesi kullanılarak yapılan analizlerde, 400 Hz çalışma frekansına yakın modlar arasındaki frekans farkının %28 oranında genişlediği ve yapının kütlesinin %40 azaldığı belirtilmiştir. Sonlu eleman analizleri sonucunda, 2B modelden elde edilen mod şekillerinin 3B analizlerle uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Deneysel doğrulama sürecinde, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen optimize edilmiş numune elektromanyetik bir sarsıcı ile uyarılmış ve titreşim ölçümleri lazer Doppler vibrometre ile yapılmıştır. Deneysel ve sayısal frekans tepki fonksiyonlarının (ing. Frequency Response Function, FRF) birbirine oldukça yakın olduğu, ilk iki bükülme modunun sırasıyla 107 Hz ve 790 Hz'de gerçekleştiği ve bu iki mod arasındaki frekans

farkının 133 Hz arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca optimize edilen yapının 108 gramdan 64,8 grama düştüğü ve Şekil 2.4'te sunulan titreşim genliklerinin önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir [9].

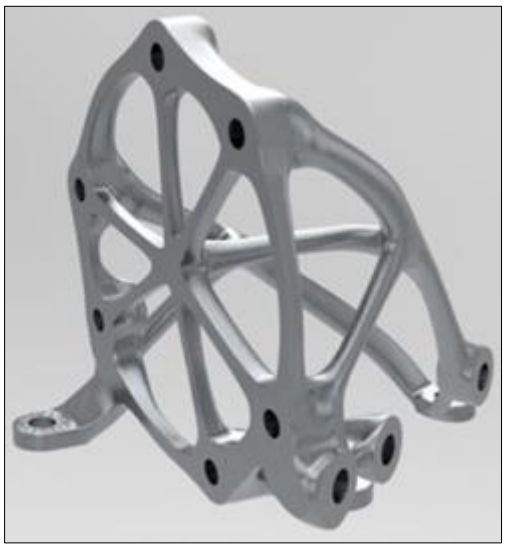


Şekil 2.4. Optimize edilmiş ve başlangıçtaki yapıların FRF'leri [9]

Hanush ve Manjaiah, havacılık uygulamalarında kullanılan bir uçak yatak braketinin performansını artırmak amacıyla eklemeli imalat süreciyle topoloji optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Çalışmada AlSi12Mg alüminyum alaşımı kullanılmış ve tasarım süreci ANSYS 2020 R2 yazılımında yürütülmüştür. Braket, statik yükleme koşulları altında yeniden modellenmiş ve malzeme dağılımı, seviye set (ing. level-set) temelli topoloji optimizasyonu yöntemiyle optimize edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, parçanın ağırlığında %44,8 oranında azalma sağlandığı ve emniyet katsayısının 1,5'ten 2,3'e yükseldiği rapor edilmiştir. Ayrıca, model beş farklı baskı yönelimiyle simüle edilmiş ve 90° yöneliminin en düşük artık gerilmelere (295,81 MPa) ve en az destek yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Parametrik optimizasyon sonucunda, 80 W lazer gücü, 1000 mm/s tarama hızı ve 90 µm tarama aralığıyla elde edilen enerji yoğunluğunun 29 J/mm³ olduğu ve bu koşullarda artık gerilmelerin en düşük seviyede gerçekleştiği ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olduğu ve optimize edilen parçanın üretimi için %55 daha az malzeme gerektiği belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu ve

eklemeli imalatın entegrasyonunun, havacılık bileşenlerinde hafiflik ve yüksek dayanım kombinasyonunu mümkün kıldığı söylenmektedir [10].

Orme ve diğerleri, uzay uçuş donanımlarında hafiflik ve yüksek performansın sağlanması amacıyla topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın bir arada kullanılmasını ele almışlardır. Çalışmada, lazer toz yatağı ergitme yöntemiyle gerçekleştirilen üç uygulama örneği sunulmuştur. İlk iki örnek, Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL) tarafından yürütülen bir teknoloji gösterim uydusuna ait iki mevcut bileşenin yeniden tasarımını (bileşenlerden biri Şekil 2.5'te paylaşılmıştır); üçüncü örnek ise SpaceIL'in ay görevi için geliştirilen fırlatma aracında yer alan beş parçanın optimizasyonunu kapsamıştır. Her bir durumda, destek yapılarını azaltmak, ergitilmemiş tozun temizlenmesini kolaylaştırmak ve ısı transferinden kaynaklanan bozulmaları en aza indirmek amacıyla eklemeli imalat kısıtları topoloji optimizasyonuna entegre edilmiştir. Optimizasyon süreci, üretim yönüyle ilişkilendirilmiş ve tasarımlar sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır. Üretilen bileşenlerin, imalat sırasında oluşturulan test kuponlarıyla birlikte yapısal yeterlilik testlerinden geçirildiği ve uçuşa elverişli özellikler sergilediği belirtilmiştir. Parçalarda ağırlığın %40'a varan oranlarda azaldığı, buna karşın mekanik dayanımın korunduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, optimize edilen bileşenlerin yüzey kalitesi ve geometrik doğruluğunun geleneksel yöntemlerle üretilenlere kıyasla daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [3].

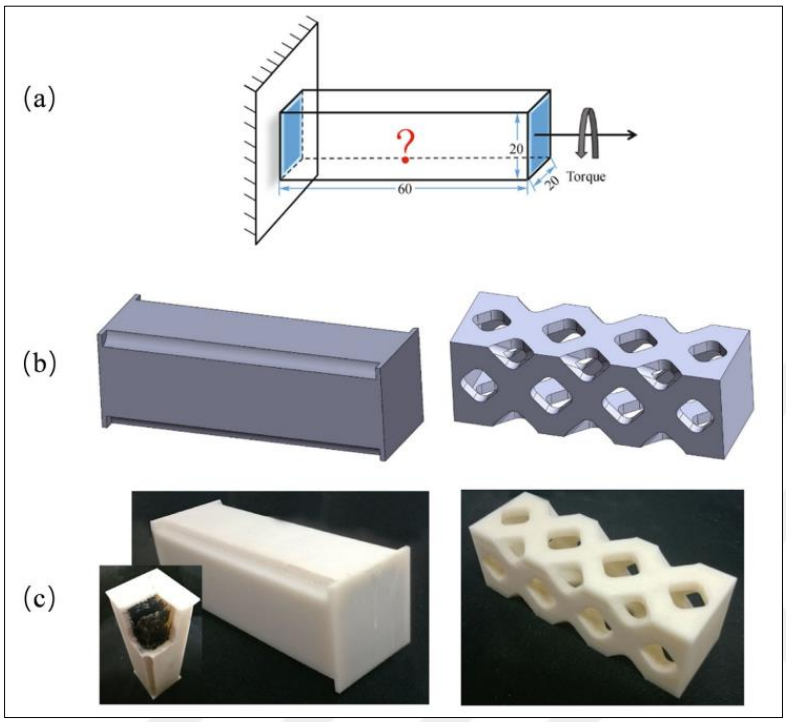


Şekil 2.5. Nihai optimizasyon tasarımı [3]

Efa ve Ifa eklemeli imalat için topoloji optimize edilmiş bileşenlerde tasarım parametrelerinin ve 3B baskı yöneliminin verimlilik üzerindeki etkilerini incelemiş ve çalışmada sanal ortamda belirlenen parametrelerin fiziksel testlerle doğrulandığı belirtilmiştir. Yanıt yüzeyi yöntemi (ing. Response Surface Methodology, RSM) ve Yapay Sinir Ağı (ing. Artificial Neural Network, ANN) yöntemleriyle elde edilen simülasyon sonuçlarının yüksek korelasyon gösterdiği ifade edilmiş, böylece maksimum yer değiştirme ve von-Mises gerilmesi tahminlerinin güvenilir olduğu ortaya konmuştur. Genetik Algoritma (GA) ile en uygun tasarım parametrelerinin minimum emniyet katsayısı 1,2, minimum kalınlık 3,85 mm ve maksimum kalınlık 8,42 mm olduğu belirlenmiş ve bu parametrelerde maksimum yer değiştirmenin 0,101 mm, maksimum von-Mises gerilmesinin ise 29,1 MPa seviyesinde gerçekleştiği rapor edilmiştir. Mikro yapı, sertlik, aşınma ve X-ışını kırınımı analizi (ing. X-ray Diffraction, XRD) testleri, düşey baskı yöneliminin daha kristalin yapı, daha yüksek sertlik (31,56 HV) ve daha düşük aşınma ile sonuç verdiğini göstermiştir. Ayrıca yatay baskı ile karşılaştırıldığında düşey baskıda sürtünme kuvvetinin ve kütle kaybının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Tüm bu bulguların, optimize tasarım parametreleriyle birleştirildiğinde daha dayanıklı 3B baskılı topoloji optimize bileşenler üretilebildiği ifade edilmektedir [11].

Liu ve diğerlerinin çalışmasında, eklemeli imalat yapılarında üretilebilirlik ve yapısal özellik kısıtlarını dikkate alan topoloji optimizasyon yöntemlerinden elde edilen bulgular detaylı biçimde incelenmiştir. Çalışmada özellikle bağlantı kısıtının yapısal bütünlüğü korumada kritik rol oynadığı ve bu kısıt dikkate alınmadığında ortaya çıkan kopuk veya yüzer parçaların üretim sürecinde başarısızlığa yol açtığı belirtilmiştir. Bağlantı kısıtı uygulandığında ise tüm bileşenlerin sürekli bir yapı oluşturduğu ve eklemeli imalat sırasında geometrik bütünlüğün korunduğu ve daha başarılı sonuçlar alındığı gösterilmiştir. Şekil 2.6'da bağlantı kısıtı dikkate alınmadan ve alınarak üretilen yapıların CAD (bilgisayar destekli tasarım) ve eriyik yığma modelleme (ing Fused Deposition Modeling – FDM) karşılaştırması paylaşılmıştır. Ayrıca sanal sıcaklık yöntemi (ing. Virtual Temperature Method, VTM) ile kapalı boşlukların doğru şekilde tespit edildiği, minimum uzunluk ölçeği kısıtının ise küçük ve işlevsiz detayları ortadan kaldırarak daha kararlı sonuçlar sağladığı ifade edilmiştir. Kendini taşıyan (ing. self-supporting) yapı tasarımlarında geliştirilen yöntemlerle destek malzemesi ihtiyacının azaldığı, böylece üretim süresinin ve maliyetin düştüğü rapor edilmiştir. Bunun yanında, topoloji optimizasyonu sonuçlarının CAD modellerine dönüştürülmesinde kullanılan hızlı modelleme yaklaşımıyla karmaşık kafes

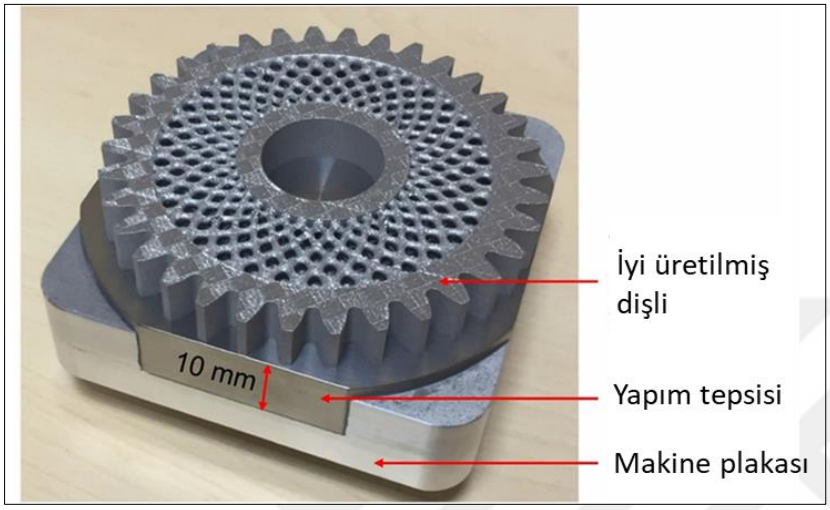
yapıların parametrik biçimde oluşturulabildiği belirtilmiştir. Çok ölçekli tasarımlarda k-ortalamalar yöntemiyle mikro yapı çeşitliliğinin artırıldığı, fiber takviyeli ve kabuk-dolgu yapıların ise yüksek rijitlik ve dayanıklılık gösterdiği ifade edilmektedir [12].



Şekil 2.6. (a) Tasarım alanı; (b) CAD ve (c) FDM baskılar: üretim süreci kısıtlamaları olmayan modeller (solda) ve bağlantı süreci kısıtlamalarını dikkate alan modeller (sağda) [12-13]

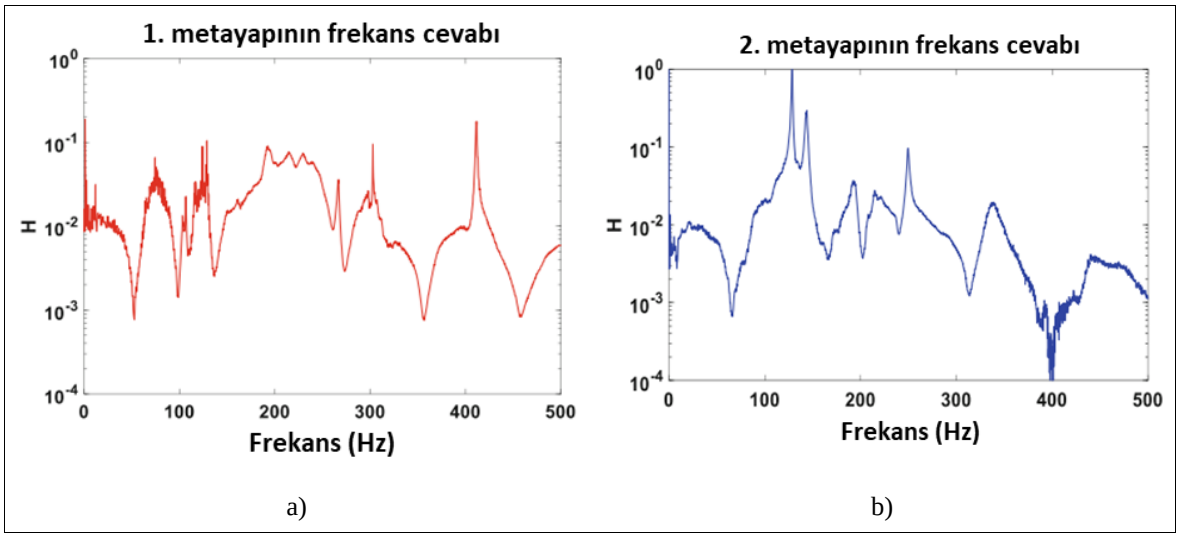
Ramadani ve diğerleri, dişli gövdesinin hem hafifletilmesi hem de titreşim düzeyinin azaltılması amacıyla topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmada, Ti-6Al-4V alaşımı kullanılarak SLM yöntemiyle kafes (ing. lattice) yapılı bir düz dişli üretilmiştir. Dişlinin gövdesi, ProTOp yazılımı ile yapılan topoloji optimizasyonu sonucunda, dayanım kaybı olmadan malzeme azaltılacak biçimde tasarlanmıştır. Üretim sürecinde yüksek ısıl gerilmeler nedeniyle ilk denemede tablanın eğildiği ve dişlinin katmanlarının ayrıldığı belirtilmiştir. Üretim tablasının kalınlığının artırılması ve ısıl işlem uygulanmasıyla ikinci denemede hatasız üretim elde edildiği rapor edilmiştir (Şekil 2.7). Deneysel analizlerde, tam dolu gövdeye sahip dişli ile karşılaştırıldığında kafes yapılı dişlinin hem kütlesinin yaklaşık üçte bir oranında azaldığı hem de ses basıncında belirgin bir düşüş sağlandığı tespit edilmiştir. 630 dev/dk hızda yapılan titreşim testlerinde, tam gövdeli dişlide 0,9 Pa olan maksimum ses basıncının, kafes yapılı dişlide 0,71 Pa'ye, kafes boşluklarının polimer ile doldurulduğu

durumda ise 0,42 Pa'ye düştüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kafes yapının titreşim enerjisini azaltmada etkili olduğunu ve polimer dolgusunun sönümleme özelliklerini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, dişli diş yüzeylerinin taşlanmasının titreşim azaltmada katkı sağladığı ifade edilmiştir [4].



Şekil 2.7. İkinci denemede SLM işlemiyle mükemmel şekilde üretilmiş dişli [4]

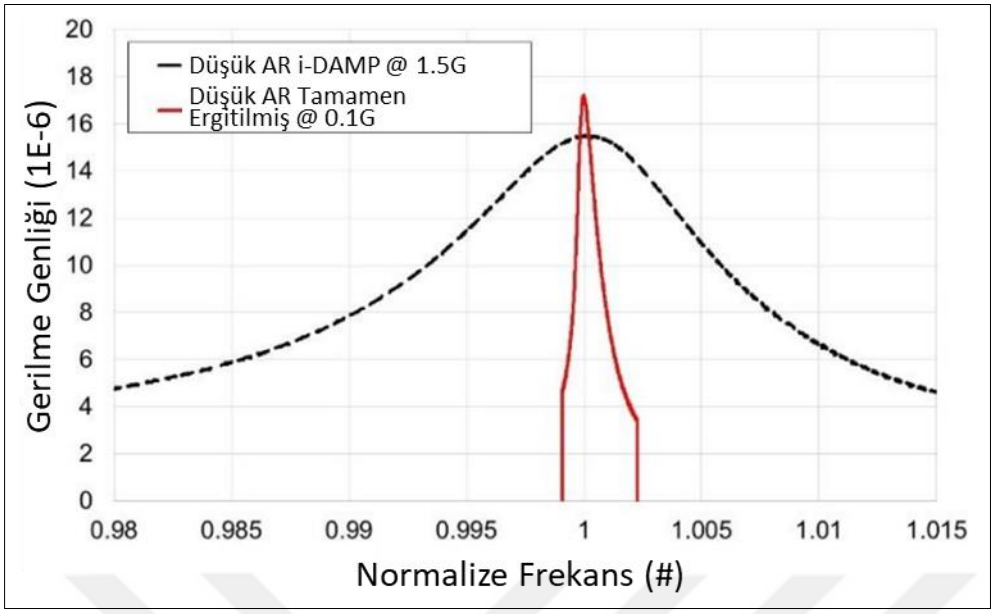
Huang ve diğerleri, eklemeli imalat tekniğiyle üretilen metametaryal yapılarda titreşim sönümleme davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada iki farklı periyodik metayapı (ing. metastructure) tasarımı geliştirilmiş ve bunlar 3B baskı yöntemiyle yüksek hassasiyette üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde yapılan deneysel testlerde, yapısal titreşimlerin düşük frekanslarda önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Deneysel doğrulama sürecinde, metayapıların belirli frekans aralıklarında titreşim genliğini zayıflattığı ve yerel rezonans mekanizması sayesinde enerji sönümlemesinin sağlandığı ifade edilmektedir. Ayrıca, geometrik parametrelerin ve periyodik hücre düzeninin bant boşluğu (ing. band gap) oluşumunda belirleyici rol oynadığı belirtilmiştir. Ölçülen frekans tepkileri, analitik ve sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu rapor edilmiştir. İki farklı yapıya ait frekans cevapları Şekil 2.8'de sunulmuştur. Bu sonuçlar, eklemeli imalatla üretilen hafif ve karmaşık yapıların titreşim kontrolü ve elastik dalga yalıtımı uygulamalarında etkin biçimde kullanılabileceğini göstermiştir [14].



a) b)

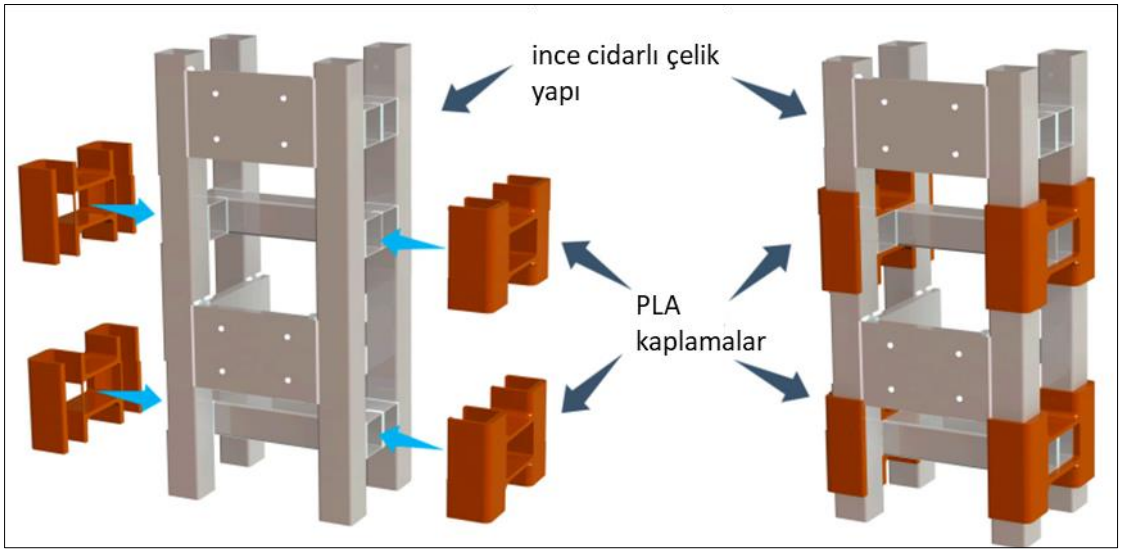
Şekil 2.8. Frekans tepkileri: (a) 1. metayapı üzerinde yapılan çekiç testinin frekans tepkisi, (b) 2. metayapı üzerinde yapılan çekiç testinin frekans tepkisi [14]

Scott-Emuakpor ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kaburgalı takviyeli (ing. rib-stiffened) yapıların titreşim sönümleme kapasitesini artırmayı amaçlayan bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, i-DAMPTM adı verilen eklemeli imalat yoluyla doğal sönümleme teknolojisi kullanılarak, lazer toz yatak ergitme yöntemiyle Ni-Alaşımlı 718 plakalar üretilmiştir. Yüksek (4:1) ve düşük (1:1) boy/en oranına (ing. aspect ratio, AR) sahip iki farklı takviyeli plaka tasarımı geliştirilmiş ve bu tasarımlar üzerinde titreşim deneyleri yapılmıştır. Deneylerde plakalar, AFRL'nin (Amerikan Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı) standart titreşim yorulma yöntemine göre rezonans koşullarında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, toz dolu boşluklar içeren i-DAMPTM plakalarının tamamen ergitilmiş (ing. fully fused) örneklere kıyasla titreşim genliğini ciddi oranda azalttığı görülmüştür. Titreşim testi sonucu Şekil 2.9'da paylaşılmıştır. Düşük oranlı plakalarda titreşim bastırma yaklaşık %92, yüksek oranlı plakalarda ise %96'nın üzerinde ölçülmüştür. Bununla birlikte, yapının rijitliğinde kayda değer bir azalma olmadığı, 1. eğilme modundaki doğal frekans farkının ihmal edilebilir düzeyde kaldığı belirtilmiştir. 2. eğilme modunda ise rijitlikte yaklaşık %5 azalma gözlenmiştir. Bulgular, yapının yalnızca %2'sinde yer alan toz hacminin titreşim enerjisinin sönümlenmesinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Çalışmada, i-DAMPTM teknolojisinin, mikro türbin kompresörleri ve şaft gibi hafif ve dayanıklı uçak bileşenlerinde kısa vadede uygulanabilir olduğu ifade edilmektedir [15].



Şekil 2.9. Düşük boy/en oranı numuneleri üzerinde yapılan süpürülmüş sinüs testlerinden elde edilen gerinim tepkisi [15]

Dunaj ve diğerleri, ince cidarlı çelik yapıların titreşim sönümleme özelliklerini artırmak amacıyla eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş PLA kaplamaların etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, Şekil 2.10'da sunulan PLA malzeme, pres geçme (ing. interference fit) yöntemiyle çelik kirişlerin üzerine uygulanmış ve hem sayısal hem de deneysel analizlerle sistemin dinamik davranışı değerlendirilmiştir. İlk olarak PLA malzemenin statik (üç nokta eğme) ve dinamik özellikleri belirlenmiş, ardından farklı kalınlıklarda (3, 5 ve 8 mm) ve farklı sayılarda (2–5 parça) kaplama konfigürasyonları modellenmiştir. Analizler sonucunda, kaplama kalınlığı arttıkça rezonans genliklerinin önemli ölçüde azaldığı ve 8 mm kaplama kullanıldığında genlikte yaklaşık %90 oranında düşüş elde edildiği belirtilmiştir. Kısmi kaplama durumlarında da ilk rezonans tepesinde %75'e varan azalma sağlandığı ifade edilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 2.1'de paylaşılmıştır. Deneysel doğrulamalar, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerle büyük ölçüde uyum göstermiştir; rezonans frekansları arasındaki bağıl farkın %0,6'yı aşmadığı rapor edilmiştir. Ayrıca, çelik çerçeve üzerindeki uygulamalarda PLA kaplamaların ilk rezonans genliğini yaklaşık %37 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, eklemeli imalatla üretilen PLA kaplamaların ince cidarlı yapıların titreşim sönümleme performansını etkin biçimde artırabildiğini göstermiştir [16].



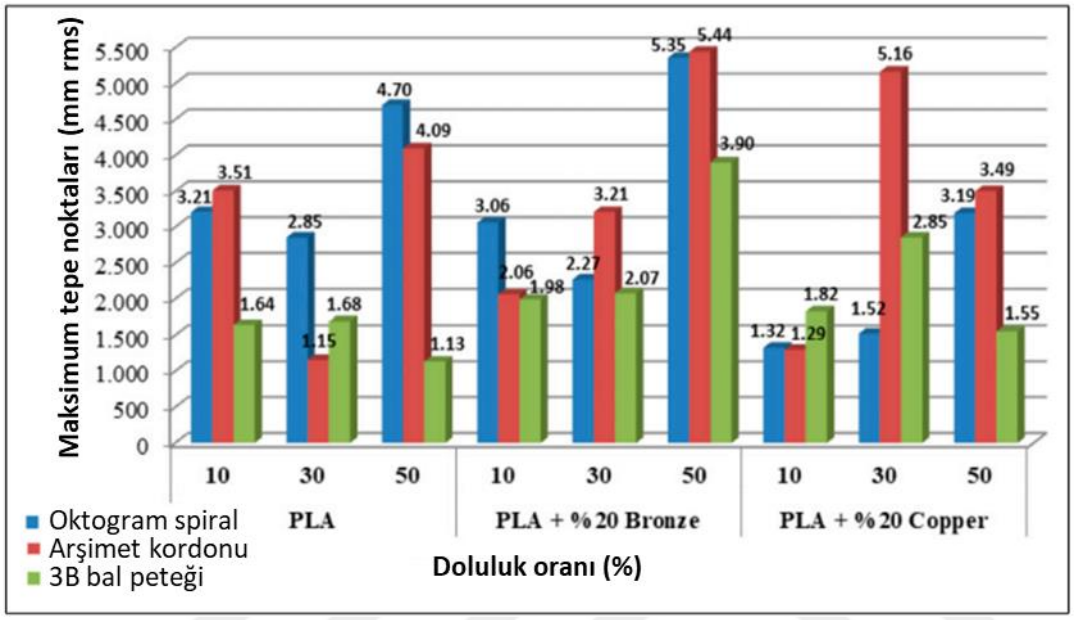
Şekil 2.10. Katmanlı üretim ile üretilen eliminatörlerin konsepti [16]

Çizelge 2.1. Serbest-serbest kirişlerin ilk iki rezonans için kabul fonksiyonu genlikleri [16]

Özellik	1. Rezonans Genliği (mm/N)	2. Rezonans Genliği (mm/N)	Kütle (kg)
Çelik	0,0083	0,0009	6,27
3 mm	0,0024	0,0002	6,92
5 mm	0,0015	0,0001	7,35
8 mm	0,0009	0,00007	8,07

Kam ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan FDM tekniğiyle üretilen metal/polimer kompozit burç yatakların (ing. sleeve bearing) titreşim sönümleme yeteneklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı filament türü — PLA, PLA + %20 Bronz ve PLA + %20 Bakır — ile üretilmiş toplam 54 numune (27 çift) değerlendirilmiştir. Numuneler üç farklı dolgu yapısında (oktogram spiral, Arşimet kordonu ve 3B bal peteği) ve üç farklı doluluk oranında (%10, %30, %50) üretilmiştir. Deneyler, 900 dev/dk hızla dönen bir mil-yatak sistemi üzerinde yürütülmüş ve titreşim verileri eddy akımı problarıyla kaydedilmiştir. Bulgular, doluluk oranının ve dolgu yapısının sönümleme davranışı üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermiştir. PLA + %20 Bakır takviyeli yataklarda doluluk oranı arttıkça titreşim genliklerinin azaldığı, PLA + %20 Bronz takviyeli yataklarda ise genliklerin arttığı belirlenmiştir (Şekil 2.11). 3B bal peteği yapısına sahip yatakların titreşim soğurma kabiliyetinin doluluk oranıyla birlikte önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir. Mikro yapı analizlerinde, bakır takviyeli yataklarda gözeneklerin daha homojen

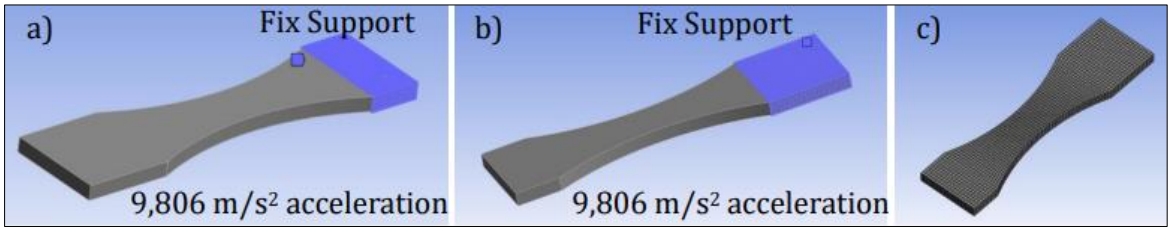
dağıldığı ve bu durumun sönümleme kapasitesini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Buna karşın, bronz takviyeli yataklarda daha büyük ve düzensiz boşluklar nedeniyle titreşim genliklerinin yükseldiği rapor edilmiştir. Genel olarak, PLA malzemesinin, bronz ve bakır takviyeli versiyonlara kıyasla daha yüksek sönümleme kapasitesi gösterdiği belirtilmiştir [17].



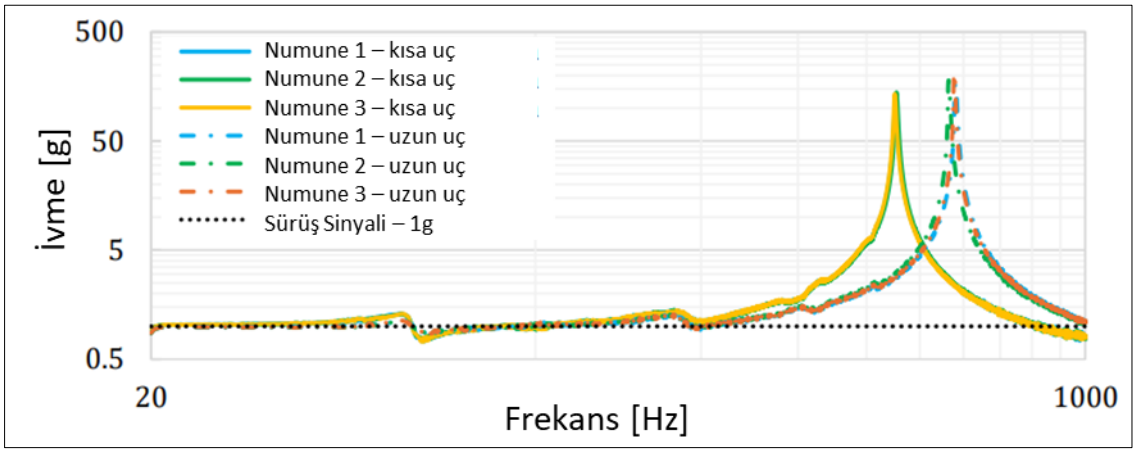
Şekil 2.11. Maksimum titreşim tepe değerleri [17]

Öhl ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemiyle seçici lazer ergitme (ing. Selective Laser Melting – SLM) süreci kullanılarak üretilen AlSi10Mg alaşımı numunelerin titreşim davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Tüm numuneler dikey yönde basılarak üretilmiş ve titreşim testleri, bir elektrodinamik sarsıcı, ivmeölçer ve lazer Doppler vibrometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.12'de paylaşıldığı üzere numuneler iki farklı şekilde sabitlenmiştir: kısa uçtan ve uzun uçtan tutularak titreşim testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel verilerden Rayleigh sönüm katsayıları (α ve β) elde edilmiş ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2.13'te sunulan sonuçlara göre, uzun uçtan sabitlenen numunelerde rezonans frekansı 574 Hz, kısa uçtan sabitlenenlerde ise 452 Hz olarak ölçülmüştür. Uzun uçtan sabitlenenlerde ortalama ivme genliği 187 g, kısa uçtan sabitlenenlerde ise 136 g olarak bulunmuştur. Sönüm oranı açısından iki konfigürasyon arasında yalnızca %9'luk küçük bir fark tespit edilmiş, kısa uçtan sabitlenen numunelerin sönüm oranlarının biraz daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında yüksek uyum elde edildiği, özellikle rezonans tepe noktaları ve frekans aralıklarının birbirini doğruladığı ifade edilmiştir. Bu bulgular, eklemeli imalatla üretilen AlSi10Mg

alaşımının yapısal titreşim ve sönümleme davranışının, üretim yönü ve sabitleme koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir [18].



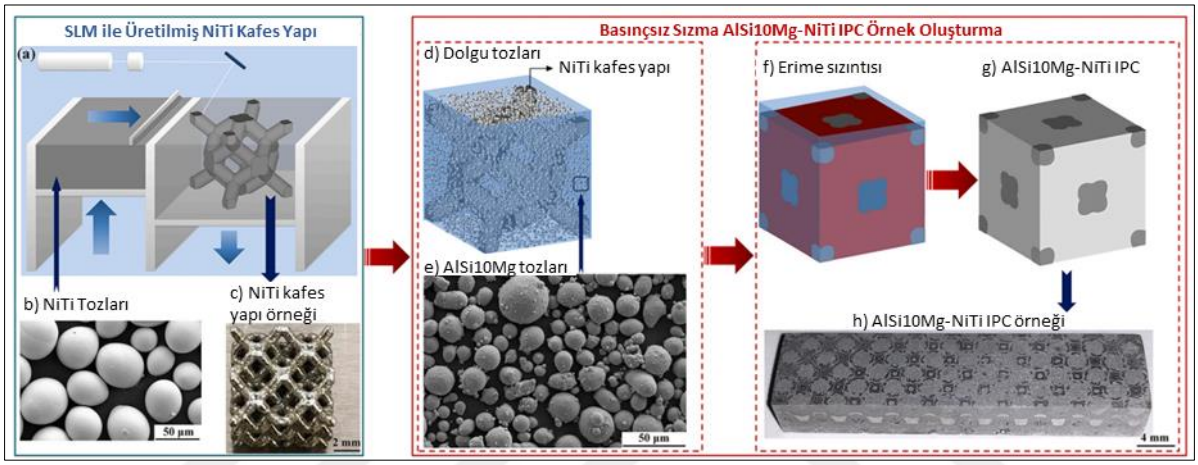
Şekil 2.12. Kısa uzunluk (a) ve uzun uzunluk (b) sınır koşulları ve ağ modeli (c) [18]



Şekil 2.13 Kısa ve uzun sabit kenarlar için frekans tepki fonksiyonları [18]

Sun ve diğerleri yüksek sönümleme kapasitesine sahip AlSi10Mg-NiTi kafes yapılı iç içe faz kompozitleri (ing. Interpenetrating Phase Composites, IPC) üretmek amacıyla eklemeli imalat ve vakumlu infiltrasyon yöntemini birlikte kullanmışlardır. NiTi alaşımından oluşturulan kafes yapılar içine AlSi10Mg tozu eritilerek basınçsız şekilde nüfuz ettirilmiş ve böylece üç boyutlu, birbirine geçmiş metalik ağ yapılar elde edilmiştir. AlSi10Mg-NiTi kafes yapısının hazırlık işleminin gösterimi Şekil 2.14'te sunulmuştur. Elde edilen IPC'lerin sönümleme kapasitesinin %94, basma dayanımının ise %100 arttığı belirtilmektedir. Yüksek sönümleme kapasitesi, büyük ölçüde, NiTi ile AlSi10Mg arasında oluşan arayüzeylerdeki tane sınırı sönümlemesi ve istifleme hataları (ing. Stacking Faults, SFs) gibi mikroyapısal etkilerle açıklanmıştır. Özellikle arayüzeylerde oluşan Ti7Al5Si12 nano-tanecikleri ile SF'lerin enerjiyi dağıttığı ve bu sayede sönümleme yeteneğinin arttığı ifade edilmektedir. IPC'nin iç sürtünme katsayısı (Q^{-1}) oda sıcaklığında 0,04'ü aşmış, bu değer 350 °C'ye kadar artmaya devam etmiştir. Bu düzeyde bir sönümleme kapasitesi, geleneksel Al matrisli

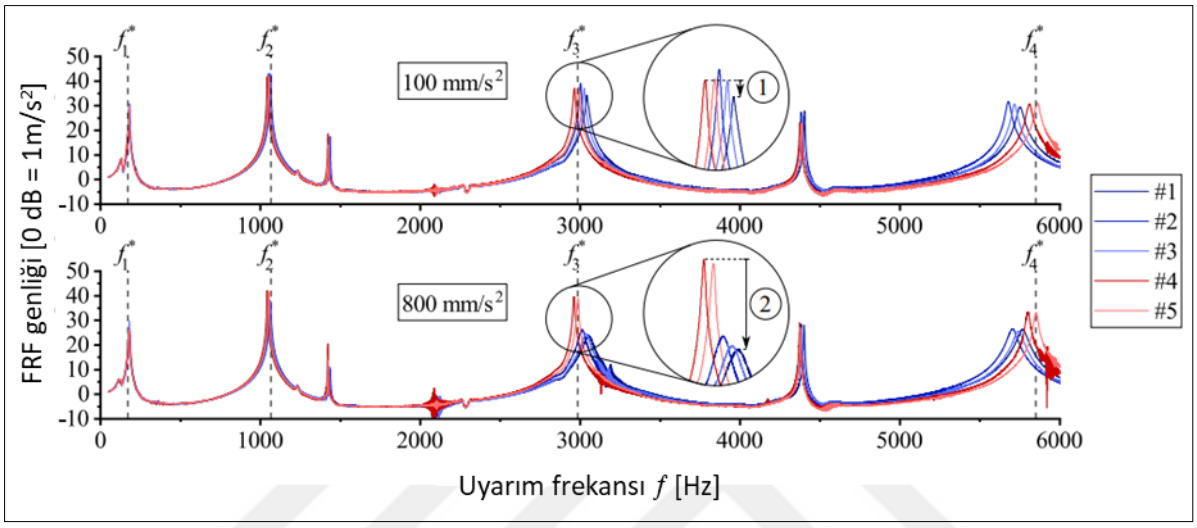
kompozitlerin çoğunun ulaşamadığı bir performans eşiği olarak belirtilmiştir. Kompozitin basma dayanımı da 250 MPa'yı aşarak AlSi10Mg matrisine kıyasla iki kat artmıştır. Bu dayanım artışı, üç boyutlu iç içe geçmiş yapının sağladığı gerilme aktarımı ve kuvvetli metalürjik bağlanma ile açıklanmıştır. Ayrıca arayüzeydeki nano-yapılı fazların dislokasyon hareketini engellediği ve mekanik özellikleri geliştirdiği söylenmektedir. Sonuç olarak, bu yöntemle üretilen IPC'lerin hem yüksek mukavemet hem de yüksek sönümleme özelliklerini birlikte sağlayabildiği ifade edilmektedir [19].



Şekil 2.14. AlSi10Mg–NiTi kafes yapısı IPC'nin hazırlık işleminin gösterimi: (a) SLM'in şematik diyagramı, (b) NiTi tozu, (c) NiTi kafes yapısı örneği, (d) AlSi10Mg tozu ile doldurulmuş NiTi kafes yapısı, (e) AlSi10Mg tozu, (f) AlSi10Mg'nin NiTi kafes yapısına nüfuzu, (g) AlSi10Mg–NiTi kafes yapısı IPC, (h) AlSi10Mg–NiTi kafes yapısı IPC numunesi [19]

Westbeld ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemi olan lazer tabanlı toz yatağı füzyonu (ing. Powder Bed Fusion – Laser Beam, PBF-LB) ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımına ait ince ve düz iç boşluklu numunelerin titreşim altındaki zorlanmış tepki davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, titreşim sırasında toz parçacıklarının parçacık-parçacık ve parçacık-duvar etkileşimleriyle enerji yutma mekanizması sayesinde sönümleme davranışının iyileştiği gösterilmiştir. Deneysel modal analizlerde, ince ve düz boşluklara sahip AlSi10Mg örneklerinin, tamamen ergitilmiş katı numunelere kıyasla %564'e kadar daha yüksek sönümleme etkisi sağladığı belirlenmiştir. Şekil 2.15'te paylaşılan sonuçlar için titreşim genliği arttıkça sönümleme katsayısının özellikle üçüncü eğilme modunda belirgin biçimde yükseldiği; 100 mm/s²'den 800 mm/s²'ye çıkıldığında sönüm faktörünün dört ila altı katına kadar arttığı bildirilmiştir. Ayrıca tozun yerleşme davranışının zamanla sönümleme performansını azalttığı ifade edilmiştir. Bilgisayarlı tomografi taramaları,

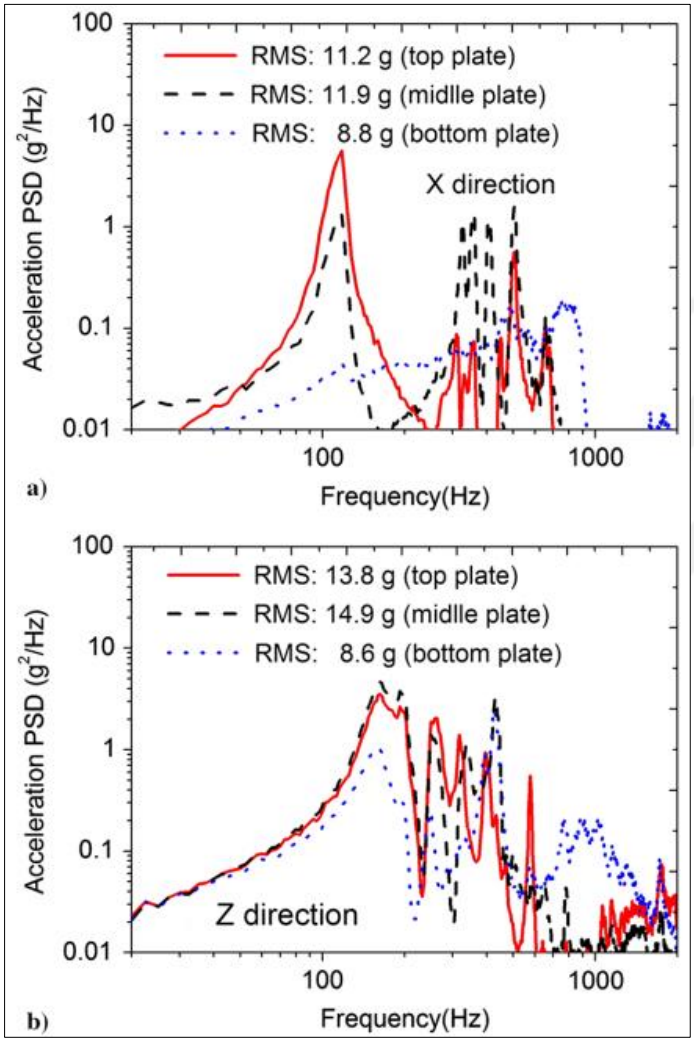
titreşim sonrası boşluk içinde tozun yerçekimi yönünde yoğunlaştığını ve üst kısımlarda boşluklar oluştuğunu göstermiştir. Bu durumun, tozun hareket kabiliyetini kısıtlayarak enerji yutma etkinliğini düşürdüğü belirtilmiştir. Deneylerde ayrıca mod şekline ve boşluğun konumuna bağlı olarak sönüm etkisinin değiştiği; en yüksek sönümün üçüncü eğilme modunda gözlemlendiği rapor edilmiştir [20].



Şekil 2.15. Tüm numunelerin 100 mm/s² (üstte) ve 800 mm/s² (altta) uyarım genlikleri için FRF'leri ile hesaplanan doğal eğilme frekansları f_n^*: 800 mm/s²'deki (2) daha yüksek sönüm, 100 mm/s²'ye (1) kıyasla üçüncü eğilme modu için örnek olarak vurgulanmıştır [20]

Zhang ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemi olan doğrudan metal lazer ergitme (ing. Direct Metal Laser Melting – DMLM) tekniğiyle üretilen AlSi10Mg kafes sandviç panellerden oluşan hafif bir uydu yapısının titreşim testlerini gerçekleştirmişlerdir. 400×400×400 mm boyutlarındaki bu yapı, 8 kg kütleye ve 104 kg taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada, kafes sandviç panellerin petek (ing. honeycomb) yapılara kıyasla daha yüksek rijitlik/ağırlık oranı sunduğu ve üretim süresini kısalttığı belirtilmiştir. Uydu yapısındaki kafes hücrelerin piramidal geometriye sahip olduğu, bağlantı bölgelerinde yerel dayanımı artırmak için hücre boyutunun küçültüldüğü ifade edilmiştir. Yapı, seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımından imal edilmiştir. Titreşim testlerinde 5–100 Hz aralığında sinüzoidal titreşim ve 20–2000 Hz aralığında rastgele titreşim yükleri uygulanmıştır. Ölçümler, X ve Z yönlerinde gerçekleştirilmiş ve ivme tepkileri analiz edilmiştir. En yüksek tepki X yönünde 3,5 g, Z yönünde ise 1,1 g olarak kaydedilmiştir. Rastgele titreşimlerde ise Şekil 2.16'ta sunulduğu üzere kök ortalama kare (RMS) ivme değerleri X yönünde 11,9 g, Z yönünde 14,9 g seviyesine ulaşmıştır. Titreşim testleri

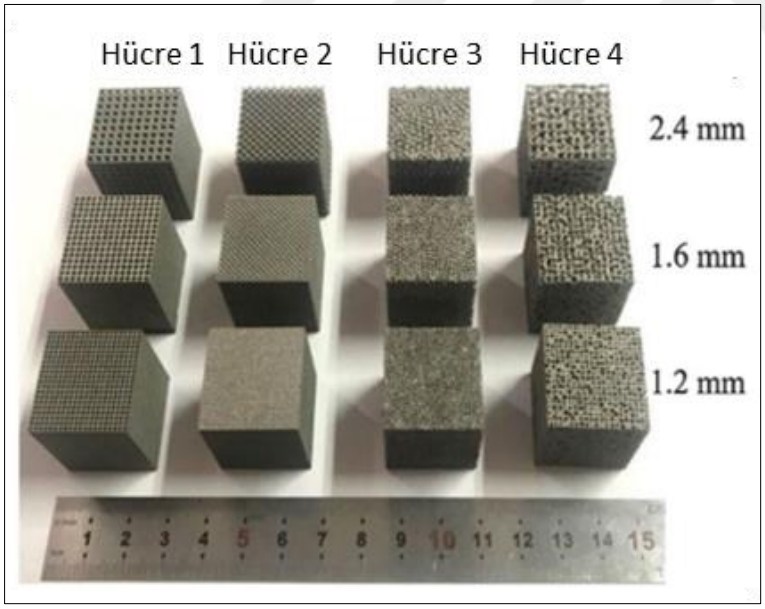
sonrasında yapılan düşük genlikli rezonans taramalarında yapının doğal frekanslarının (X yönünde 120 Hz, Z yönünde 210 Hz) değişmediği, dolayısıyla hiçbir yapısal hasar oluşmadığı tespit edilmiştir. Uydu yapısının titreşim yüklerini roket fırlatma koşullarında güvenle taşıyabildiği belirtilmiştir [21].



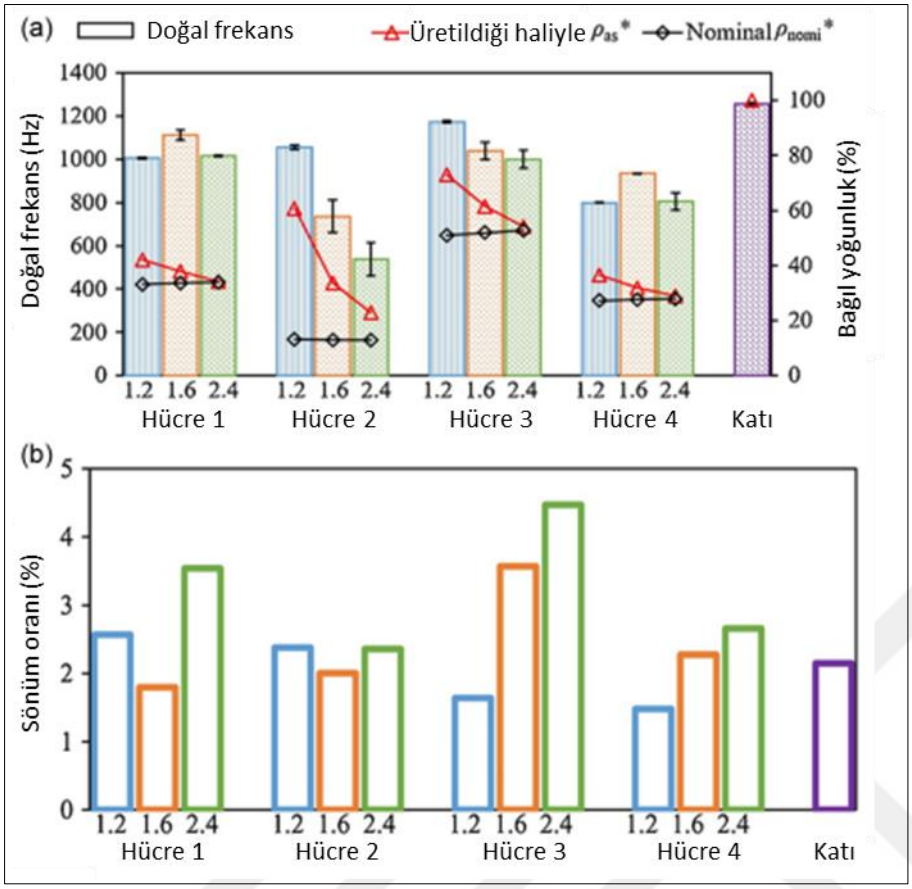
Şekil 2.16. Rastgele titreşim yükleri tarafından uyarılan ivme tepkisi: a) X yönü ve b) Z yönü [21]

Azher ve diğerleri, lazer toz yatak füzyonu (ing. Laser Powder Bed Fusion, LPBF) tabanlı eklemeli imalat (Eİ) yöntemiyle üretilen metal alaşımların titreşim özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, Eİ sürecinde ortaya çıkan gözenek, çatlak, kapanım ve benzeri kusurların titreşim davranışlarını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Üretim parametrelerinden lazer gücü, tarama hızı, tarama stratejisi, nokta boyutu, hat aralığı ve üretim yöneliminin malzemenin Young modülü ve yoğunluğu üzerinde belirleyici olduğu, bu değişimlerin doğal frekans ve sönümleme oranlarında farklılıklara yol açtığı ifade edilmiştir. Elde edilen

sonuçlara göre, tarama hızının artmasıyla Young modülünün ve doğal frekansın azaldığı, lazer gücü ve nokta boyutunun belirli bir aralığın üzerinde artması durumunda ise erime havuzunun kararsızlaşarak gözenek oluşumuna neden olduğu saptanmıştır. Ayrıca baskı yöneliminin, yapı içinde malzeme dağılımını etkileyerek titreşim davranışında anizotropik farklılıklar yarattığı görülmüştür. Çalışmada, kafes yapılı (ing. lattice) geometrilerin yüksek sönümleme özellikleri sunduğu, ancak doğal frekans değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir. Bu yapılarda hücre boyutu ve birim hücre tipi değiştikçe elastik ve dinamik tepkilerin de farklılaştığı ifade edilmiştir. Şekil 2.17'de farklı hücre yapıları ve Şekil 2.18'de LPBF yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kafes yapıların doğal frekans ve sönümleme oranı karşılaştırması paylaşılmıştır. Bunun yanında, parçacık sönümleme uygulamalarının Eİ numunelerinde titreşim genliğini azaltarak sönümleme kapasitesini artırdığı gösterilmiştir. Genel olarak, eklemeli imalatla üretilen metal alaşımların titreşim özelliklerinin, üretim parametreleri ve geometrik tasarım değişimlerine son derece duyarlı olduğu belirtilmektedir. [22].



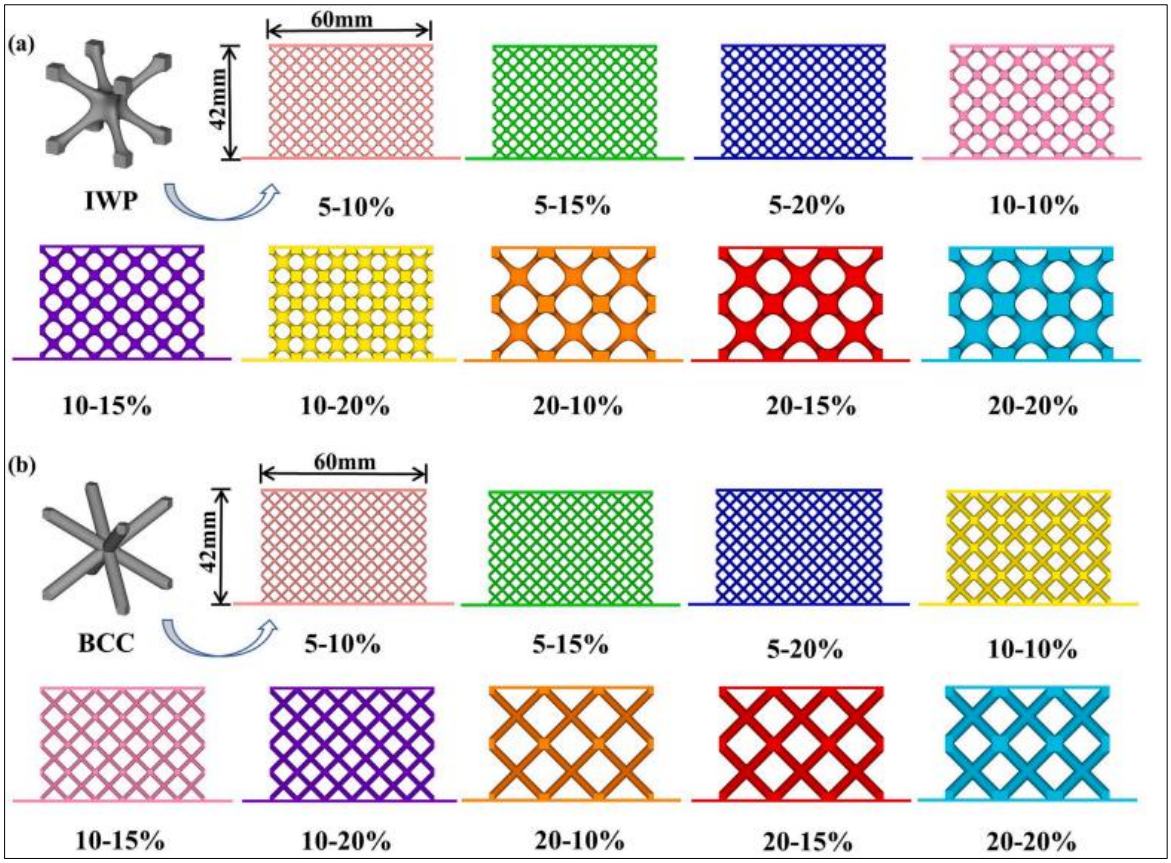
Şekil 2.17. Hücrelerin ve kafes yapılarının gerçek görüntüsü [22-23]



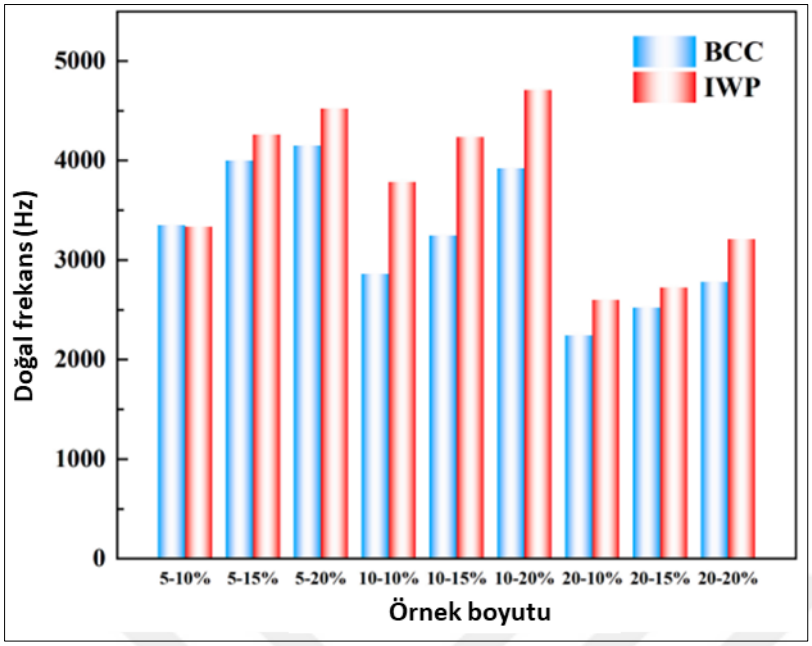
Şekil 2.18. a) Katı numune ile karşılaştırırken, değişen hücre tipleri ve boyutları ile lazer toz yatak füzyonu (LPBF) ile oluşturulan Ti6Al4V'nin doğal frekansı arasındaki ilişki. b) Katı numune ile karşılaştırırken, değişen hücre tipleri ve boyutları ile LPBF ile oluşturulan Ti6Al4V'nin sönümleme oranı arasındaki ilişki [22-23]

Zhang ve diğerleri, eklemeli imalat tekniği olarak seçici lazer ergitme (SLM) kullanılarak 316L paslanmaz çelikten üretilen iç içe örülmüş fazlı (ing, Interwoven Phase, IWP) üçlü periyodik minimal yüzey (ing. Triply Periodic Minimal Surface, TPMS) ve karşılaştırma için BCC (ing. Body-Centered Cubic) kafes yapıların basma davranışı ile titreşim özelliklerini birlikte incelemişlerdir. 5, 10 ve 20 mm birim hücre boyutu ile %10–20 hacim kesrinde toplam 18 numune hazırlanmış (Şekil 2.19), tek eksenli basma testleri ve dinamik titreşim aktarım oranı ölçümleri yapılmıştır; imalat doğruluğu değerlendirmelerinde göreli yoğunlukların %98 düzeyinde elde edildiği rapor edilmiştir. Bulgular, rijitlik ve birinci doğal frekansın hacim kesriyle doğru, hücre boyutuyla ters orantılı olduğunu göstermiştir; hacim kesrinin düşürülmesi ve birim hücrenin büyütülmesi düşük frekansta titreşim yalıtımına daha elverişli olduğu söylenmektedir. Şekil 2.20'de paylaşılan sonuçlara göre 20 mm hücre boyutunda IWP için birinci doğal frekansın hacim kesri arttıkça 2600 Hz'ten 3212,5 Hz'e yükseldiği, BCC için 2243,75–2781,25 Hz aralığında benzer bir artış sergilediği

belirtilmiştir. Rezonans tepe genliği ile sönüm oranının ters ilişkili olduğu gösterilmiş; IWP'de 20 mm–%10 konfigürasyonunda sönüm oranı ξ = 0,0840 değerine ulaşmıştır. 0–600 Hz bandında her iki yapı da 250–450 Hz civarında belirgin yalıtım sergilemiş, 5–10 mm hücrelerde tipik azalma 10–15 dB, IWP'de 20 mm–%10 için ise yaklaşık 17,5 dB olarak rapor edilmiştir. IWP'nin aynı koşullarda BCC'ye göre daha yüksek doğal frekans ve daha iyi titreşim yalıtımı sağladığı ifade edilmiştir [24].

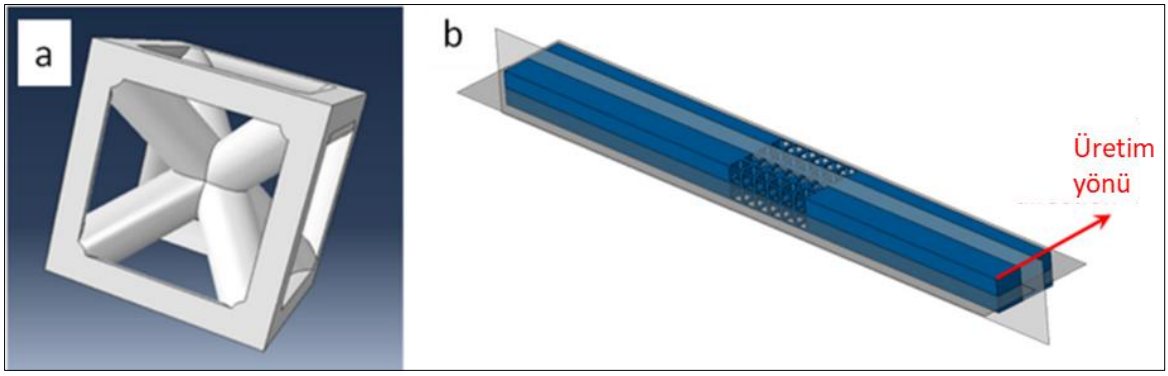


Şekil 2.19. Tasarlanan IWP ve BCC: (a) IWP birim hücresi ve modeller, (b) BCC birim hücresi ve modeller [24]



Şekil 2.20. Numunelerin ilk doğal frekansları [24]

Rosa ve diğerlerinin çalışmasında, eklemeli imalat yöntemlerinden seçici lazer ergitme (SLM) kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çelik kafes yapılarda sönümleme davranışının araştırıldığı belirtilmiştir. Çalışmada hem katı hem de kafes numuneler hazırlanmış ve iç sürtünme özellikleri farklı gerilme ve frekans koşullarında tanδ (sönümleme kapasitesini ifade eden viskoelastik kayıp ölçüsü) üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 2.21'de sunulan BCC tipinde bir kafes hücresinin kullanıldığı ve sonlu elemanlar analizlerinin, plastik şekil değişimlerinin özellikle yük doğrultusundaki çubuklarda ve bağlantı bölgelerinde yoğunlaştığını gösterdiği rapor edilmiştir. Yazarlar, 0,1–10 Hz aralığında uygulanan dinamik yükler altında kafes numunelerin katılara kıyasla belirgin biçimde daha yüksek sönümleme kapasitesi gösterdiğini, bu artışın özellikle belirli bölgelerdeki gerilme yığılması ve mikro-plastisite kaynaklı iç sürtünme mekanizmalarından ileri geldiğinin ifade edildiğini aktarmıştır. Gerilme–şekil değiştirme döngülerinden elde edilen histerezis eğrilerinin, yükleme frekansı arttıkça tanδ değerlerinin yükseldiğini gösterdiği ve aynı gerilme seviyesinde kafes yapıların daha fazla enerji sönümlediği bildirilmiştir. Spesifik sönüm kapasitesi değerlendirildiğinde kafes yapıların performansının katılara göre çok daha yüksek olduğu ifade edilmektedir [25].



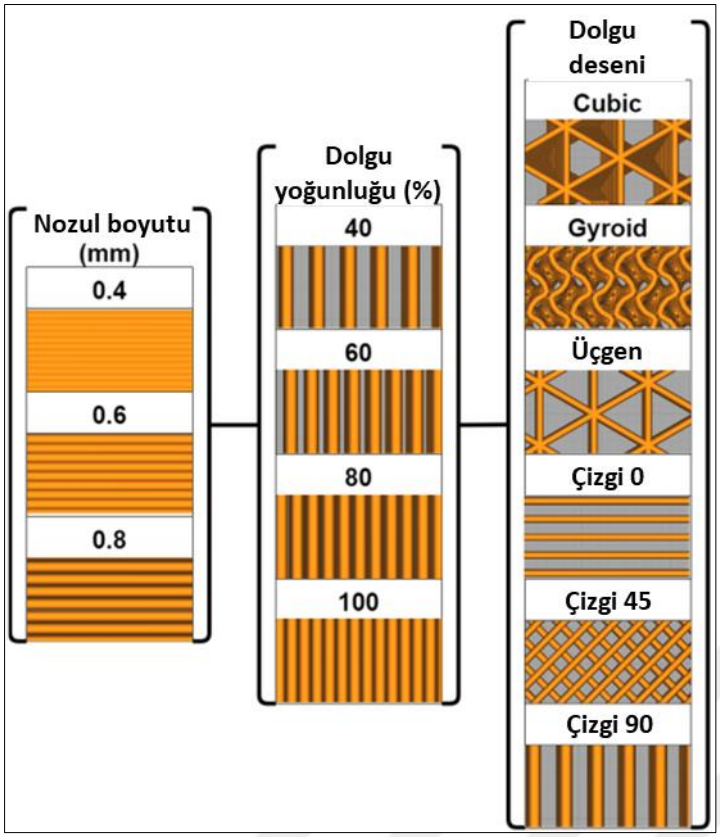
Şekil 2.21. a) BCC temel hücresi ve b) simetri düzlemleri ile numune modeli [25]

Li ve diğerleri çalışmalarında, piramit çekirdekli kafes sandviç yapıların (ing. Pyramidal Core Lattice Sandwich Structures, PCLSS) titreşim izolasyon performansını artırmak amacıyla hem dama tahtası (ing. chessboard) tasarımlı hem de gradyan yapılı yeni meta-tasarım yaklaşımlarını incelemişlerdir. Sayısal sonlu eleman analizleri sonucunda dama tahtası düzenine sahip PCLSS'nin klasik PCLSS'ye kıyasla daha düşük frekansta başlayan ve daha geniş bir titreşim bant aralığına sahip olduğu gösterilmiştir; örneğin, klasik yapıda 7919–8621 Hz aralığında görülen bant aralığının dama tahtası tasarımında 5621–7353 Hz'e düştüğü ve genişlediği ifade edilmektedir. Yazarlar, çekirdek yarıçapı, yüzey levhası kalınlığı, çekirdekler arası mesafe ve malzeme özelliklerinin bant aralığı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiş ve çekirdek yarıçapının küçülmesiyle bant aralığının daha düşük frekanslara kaydığı, yüzey levhası kalınlığının artmasıyla ise yapısal rijitliğin yükseldiği için bant aralığının yukarı kaydığı belirtilmiştir. [26]

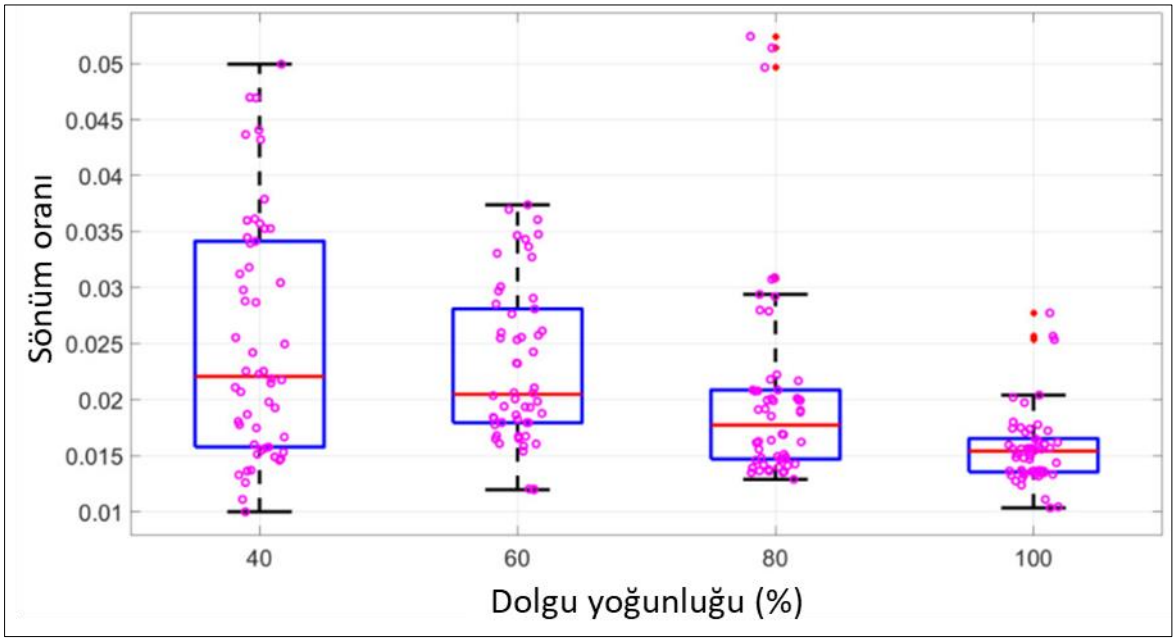
Gebhardt ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg kafes yapıların as-designed geometrilere dayalı modellenmesinin potansiyelini ve sınırlarını incelemişlerdir. Çalışmada hem yığma malzeme hem de eşkenar dörtgenlerden oluşan 12 yüzlü hücre (ing. rhombic dodecahedron) tipinde kafes numuneler üretilmiş ve mekanik davranış, çekme, basma, kesme ve burulma testleriyle değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlardan türetilen izotropik elastik-plastik malzeme modelinin, farklı yükleme türlerindeki davranışı genel olarak doğru biçimde öngördüğü gösterilmiştir. Karmaşık kafes geometrisinin özellikle keskin köşe bölgelerinde nümerik tekilliklere yol açabildiği, ancak uygun ağ yoğunluğu seçimiyle hata seviyelerinin %2–4 aralığına indirilebildiği belirtilmiştir. Deneysel ve sayısal kuvvet–yer değiştirme eğrilerinin birbirine yakın olduğu, fakat bazı durumlarda modellerin davranışı hafifçe daha yüksek tahmin ettiği ifade edilmektedir. Çalışmada bu nedenle

tasarlandığı haliyle olan (ing. as-designed) geometriye dayalı modellemenin hem kullanılabilir hem de belirli sınırlamalara sahip olduğu aktarılmıştır [27].

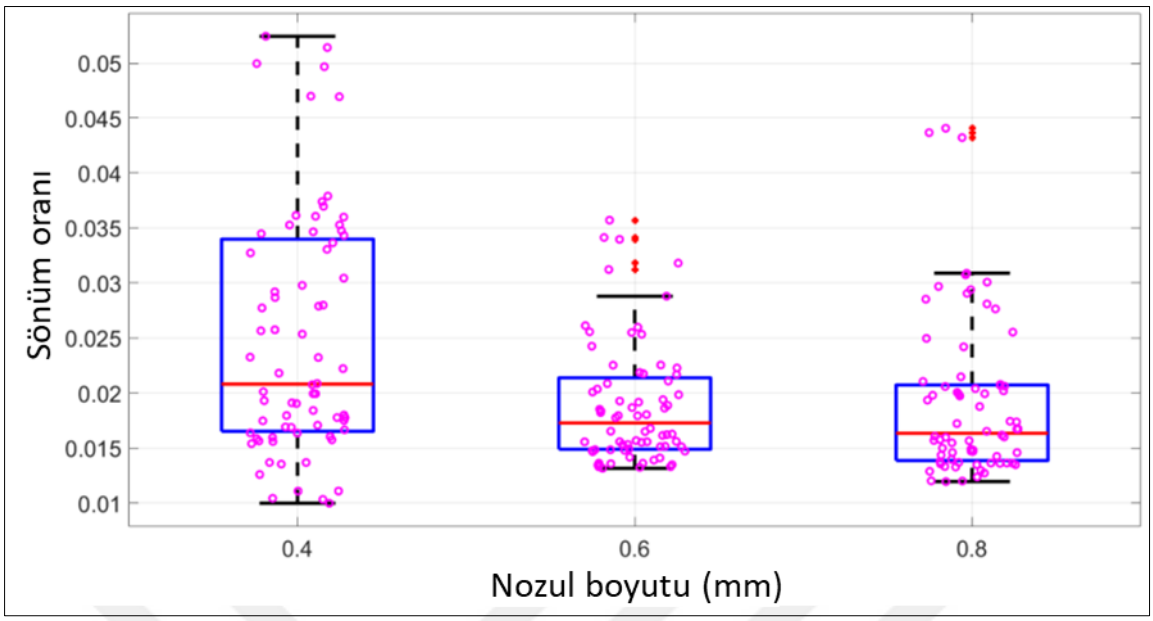
He ve diğerleri, malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen ABS (akrilonitril bütadien stiren) malzemeden imal edilmiş konsol kirişlerin sönüm özellikleri üzerindeki 3B baskı işlem parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, nozul çapı (0,4–0,8 mm), doluluk oranı (%40–%100) ve dolgu deseni (çizgi, üçgen, kübik, gyroid) değişkenleri değerlendirilmiştir (Şekil 2.22). Deneysel tasarım kapsamında 72 farklı parametre kombinasyonu için üçer numune üretilmiş ve darbesel titreşim testi ile birinci mod sönüm oranı, ayrıca dinamik mekanik analiz (DMA) ile kayıp faktör (ing. loss factor) belirlenmiştir. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, tüm baskı parametrelerinin modal sönüm oranı üzerinde anlamlı etkileri bulunduğu, ancak bu etkiler arasında doluluk oranının en belirleyici faktör olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.23'de paylaşılan sonuçlara göre doluluk oranı arttıkça sönüm oranının azaldığı, yüksek dolulukta yapıların daha rijit davrandığı ifade edilmiştir. Nozul çapının ise daha küçük değerlere indiğinde sönüm oranını artırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.24). Ayrıca nozul çapı ile doluluk oranı arasında anlamlı bir etkileşim bulunmadığı, ancak her iki parametrenin de rijitlik üzerinden sönüm davranışını dolaylı olarak etkilediği belirtilmiştir. Kayıp faktörü üzerinde ise parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı saptanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde, küçük nozul çaplarının daha fazla gözenek oluşturduğu ve bu gözeneklerin filamentler arası kayma nedeniyle enerji yutumunu artırdığı ifade edilmiştir [28].



Şekil 2.22. Proses parametre seviyeleri ve şematiği [28]



Şekil 2.23. Dolgu yoğunluğu için sönümleme faktörü kutu grafikleri. Kırmızı noktalar uç değerlerdir. Mor daireler ham verilerdir. [28]



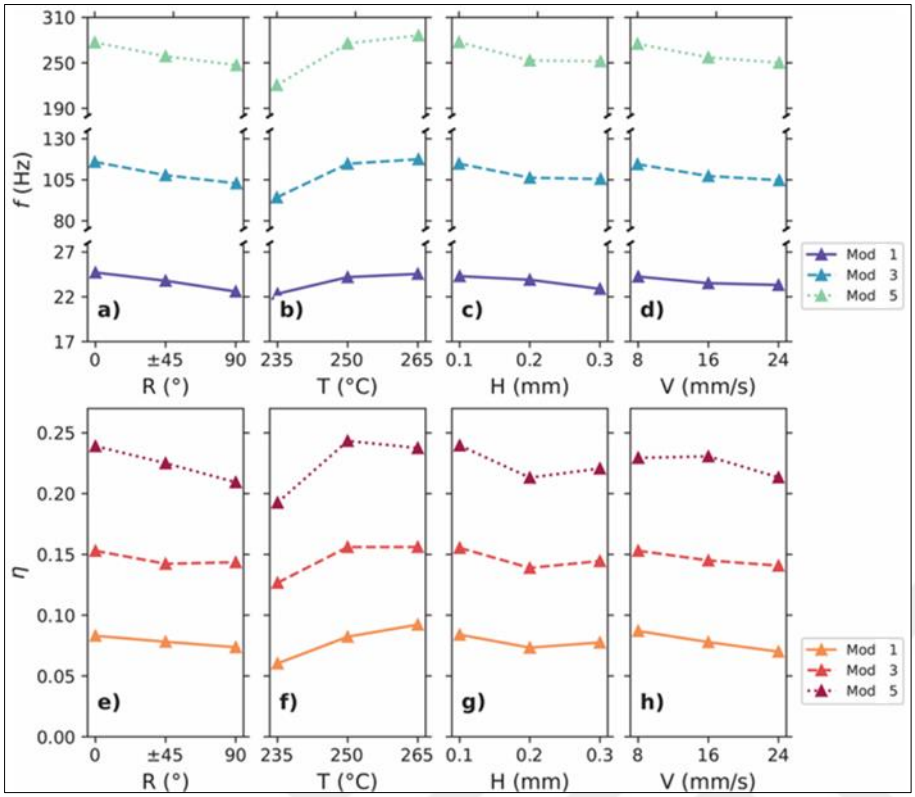
Şekil 2.24. Nozul boyutu için sönümleme faktörü kutu grafikleri. Kırmızı noktalar uç değerlerdir. Mor daireler ham verilerdir. [28]

Ekerer ve diğerleri çalışmasında, eklemeli imalat yöntemlerinden malzeme ekstrüzyonu (ME) kullanılarak üretilen ABS malzemeli konsol kirişlerin serbest titreşim davranışları incelenmiştir. Çalışmada ekstrüzyon hızı, baskı deseni ve katman kalınlığı gibi baskı parametrelerinin doğal frekans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler, yapay sinir ağları (ANN) ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) yöntemlerinin hibrit modeli ile analiz edilmiştir. Modelin, doğal frekans değerlerini %98,5 doğrulukla tahmin ettiği ve deneysel sonuçlarla uyumlu olarak maksimum %2,3 hata oranı ile oldukça hassas tahminler yaptığı görülmüştür. Sonuçlara göre, düşük ekstrüzyon hızı ve ince katman kalınlığı, üretilen kirişlerin doğal frekansını artırmaktadır. Bu durum, düşük ekstrüzyon hızında oluşan daha düşük artık gerilmeler ve ince katmanların daha homojen bir stres dağılımı sağlamasıyla açıklanmıştır. Farklı iç dolgu desenleri arasında üçgen baskı deseninin (ing. triangular pattern) en yüksek doğal frekansa ulaştığı, bunun ise 43 mm/s ekstrüzyon hızı ve 0,09 mm katman kalınlığı koşullarında gerçekleştiği belirtilmiştir (Çizelge 2.2). Bu desenin daha düzgün malzeme dağılımı ve azalmış iç kusurlar sayesinde titreşim performansını artırdığı söylenmektedir [29].

Çizelge 2.2. Ankastre kirişlerin maksimum doğal frekansı için optimize edilmiş ME parametrelerinin sonuçları [29]

No	Ekstrüzyon hızı (mm/s)	Baskı deseni	Katman kalınlığı (mm)	Karşılık gelen doğal frekans (Hz)
1	51	Doğrusal	0,12	10,8604
2	42	Altıgen	0,09	11,7725
3	43	Üçgen	0,09	11,8327

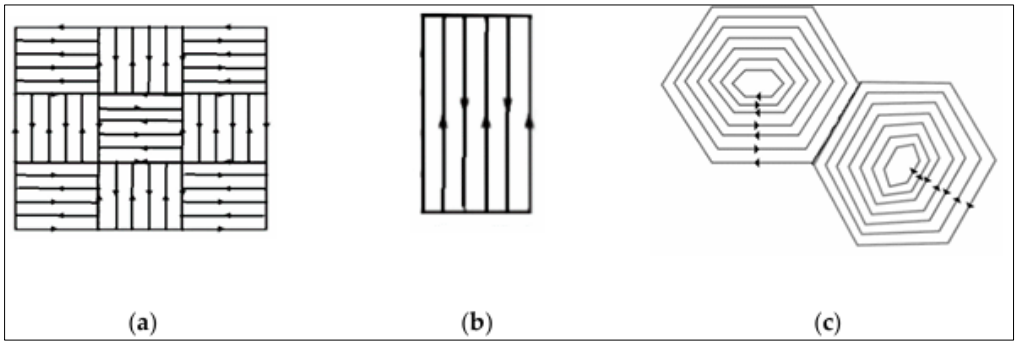
Xue ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemiyle, eritilmiş filament üretimi (ing. Fused Filament Fabrication, FFF) tekniğini kullanarak viskoelastik yapılarda titreşim sönümleme özelliklerini geliştirmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmada nozul sıcaklığı, katman kalınlığı, tarama açısı ve biriktirme hızı gibi dört ana baskı parametresinin rezonans frekansı ve kayıp faktörü (ing. loss factor) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel tasarımda ön testler sonucunda belirlenen aralıklar üzerinden Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılmış ve elde edilen veriler ANOVA analizi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlarda, nozul sıcaklığının en baskın parametre olduğu, bu değişkenin hem rezonans frekansını hem de sönüm oranını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık, düşük biriktirme hızı ve küçük katman kalınlığı ile üretilen numunelerde daha yüksek sönüm oranı elde edildiği ifade edilmiştir. Mikroyapı analizlerinde, düşük sıcaklık ve yüksek hız koşullarında katmanlar arası bağın zayıfladığı, bunun da enerji yutma kapasitesini düşürdüğü gözlemlenmiştir. En iyi performans, 265 °C nozul sıcaklığı, 0,1 mm katman kalınlığı, 8 mm/s biriktirme hızı ve 0° tarama açısı kombinasyonunda elde edilmiştir (Şekil 2.25). Bu koşullarda kayıp faktörü 0,10 düzeyine ulaşmış ve standart parametrelerle üretilen numunelere göre yaklaşık %31,8 oranında artış sağlandığı rapor edilmiştir. Ayrıca, bu optimum parametrelerle üretilen PLA yüzeyli-TPU (termoplastik poliüretan) çekirdekli sandviç kirişlerin, yalnızca PLA'dan oluşanlara kıyasla %44,4 oranında daha yüksek sönümleme kapasitesi sergilediği belirtilmiştir [30].



Şekil 2.25. İşlem parametrelerinin TPU kirişlerinin rezonans frekansları ve kayıp katsayıları üzerindeki temel etkileri: (a) Tarama açısı, (b) nozul sıcaklığı, (c) katman yüksekliği, (d) birikim hızının TPU kirişlerinin rezonans frekansları üzerindeki etkisi ve (e) tarama açısı, (f) nozul sıcaklığı, (g) katman yüksekliği ve (h) birikim hızının TPU kirişinin kayıp katsayıları üzerindeki etkisi [30]

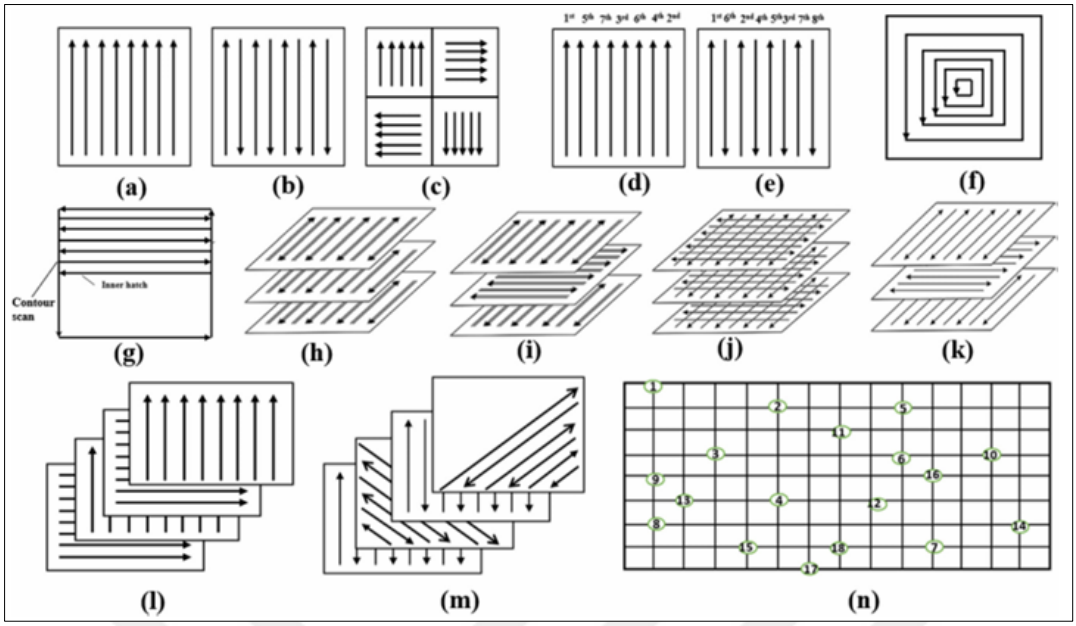
Jarfors ve diğerleri eklemeli imalat ile üretilen 1.2709 türü marajing çeliğin darbe dayanımı incelemiştir. Deneylerde, Şekil 2.26'da gösterilen farklı inşa stratejileri (satranç tahtası, şeritler ve altıgen) kullanılarak, bu stratejilerin darbe enerjisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, satranç tahtası stratejisinin diğer iki stratejiye göre daha yüksek darbe dayanımı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, satranç tahtası stratejisinde, kırılma sırasında sürekli çatlak yayılımı görülmemiş, bunun yerine daha karmaşık bir çatlak yolu oluşmuş ve bu da malzemenin daha dayanıklı olmasına yol açmıştır. Çalışma, proses parametrelerinin de önemli etkilerinin olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, daha geniş tarama aralığının darbe dayanımını artırdığı, ancak daha fazla katman dönüşümünün bu dayanımı azalttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, oksijen, azot ve hidrojen gibi gazların malzeme üzerindeki etkileri incelenmiş, hidrojen seviyelerinin tespit sınırının altında olduğu ve oksijen ile azot seviyelerinin baskın bir etki yaratmadığı belirtilmiştir. Bu bulguların, inşa stratejisinin malzemenin fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini, özellikle de çatlak

yayılma yollarını belirleyerek malzemenin dayanıklılığını artırdığını gösterdiği ifade edilmiştir [31].



Şekil 2.26. Tarama stratejileri: (a) satranç tahtası tarama stratejisi, (b) şerit tarama stratejisi ve (c) altıgen tarama stratejisi [31]

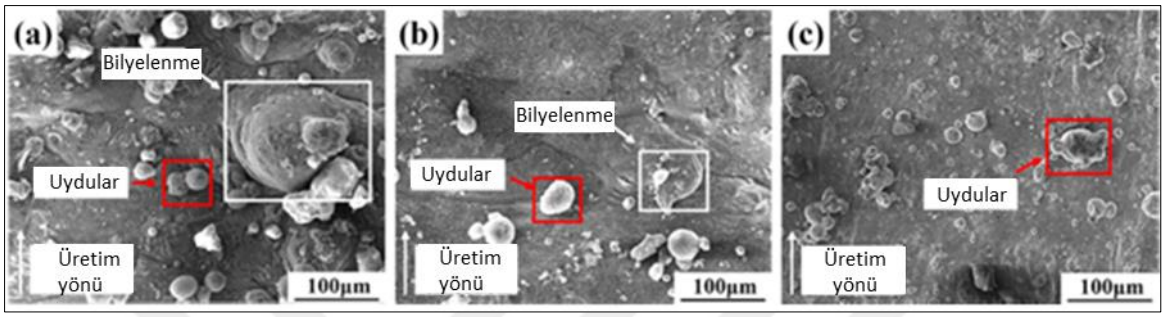
Jia ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, eklemeli imalat süreçlerinden SLM yönteminde kullanılan tarama stratejilerinin mikro yapı, mekanik özellikler ve artık gerilmeler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, Şekil 2.27'de sunulan tek yönlü, çift yönlü (zigzag), ada (ing. island), kontur, helis ve nokta ergitme (ing. point melting) gibi farklı tarama stratejilerinin, ısı dağılımı, yeniden ergitme oranı, soğuma hızı ve dolayısıyla oluşan mikro yapı üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda, bazı tarama stratejilerinin diğerlerine göre daha başarılı sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Özellikle, katmanlar arasında 90° tarama yönü döndürme stratejisinin tane yapısını daha izotropik hale getirdiği, gözenekliliği azalttığı ve artık gerilmeleri düşürdüğü söylenmektedir. Bir diğer öne çıkan yöntem olan adacık ya da diğer adıyla satranç tahtası tarama stratejisi, tüm katman alanının küçük kare ya da dikdörtgen bölgelere (adacıklara) bölünerek her bir bölgenin bağımsız ve sırayla taranması esasına dayanır. Yani lazer, büyük bir alanı baştan sona sürekli taramak yerine, küçük bölgeleri sırayla işler. Bu tarama stratejisi kısa tarama vektörleriyle ısı birikimini engellemiş, daha homojen sıcaklık dağılımı sağlamış ve hem yoğunluk hem mekanik özelliklerde olumlu etkiler göstermiştir. Ayrıca, lazerin her katmanın dış sınırını (konturunu) önce belirli bir çizgi boyunca taradığı, ardından iç kısmı doldurduğu bir strateji olan kontur tarama stratejisinin yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve mikro yapıyı daha ince taneli hale getirerek çekme dayanımını artırdığı ifade edilmektedir [32].



Şekil 2.27. Farklı tarama stratejisi türlerinin şematik gösterimi: a) tek yönlü tarama; b) çift yönlü/zigzag tarama; c) ada taraması; d) tek yönlü taramaya dayalı tarama dizilerinin varyasyonu; e) çift yönlü taramaya dayalı tarama dizilerinin varyasyonu; f) helis (sarmal) tarama; g) kontur tarama; h) çift yönlü, lazer ışınının çift geçişli taraması; i) çift yönlü, lazer ışınının çift geçişli taraması, katmanlar arasında tarama vektörünün 90° döndürülmesi; j) çapraz tarama; k) çift yönlü, lazer ışınının tek geçişli taraması, katmanlar arasında tarama vektörünün 90° döndürülmesi; l) ardışık katmanlar arasında tek yönlü taramanın 90° döndürülmesi; m) tarama vektörünün 45° döndürülmesi; n) noktasal ergitme taraması [32-34].

Yang ve diğerleri çalışmasında, SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımının dikey yüzey pürüzlülüğüne süreç parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada lazer gücü, tarama hızı ve bunların birleşimiyle hesaplanan doğrusal enerji yoğunluğu (ing. Linear Energy Density, LED) parametreleri değiştirilerek hem tek iz (ing. single track) hem de kübik numuneler üretilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, LED'in artmasıyla birlikte eriyik havuzunun sıcaklığının yükseldiği ve böylece yüzeyin düzgünleştiği, ancak aşırı yüksek LED değerlerinde Marangoni konveksiyonu ve metal buharlaşmasının artması nedeniyle yüzey kararsızlıklarının meydana geldiği belirtilmiştir. Düşük LED değerlerinde ise yetersiz ergime sonucu bilyelenme (ing. balling) olayı gözlenmiş (Şekil 2.28), bunun da yüzeyde küresel parçacık oluşumuna ve pürüzlülüğün artmasına yol açtığı ifade edilmiştir. Uygun LED aralığında (yaklaşık 4,6–8 J/cm) üretilen numunelerde yüzey pürüzlülüğü 6 μm'nin altına düşmüş, eriyik damlalarının katı yüzeyle ıslanmasının optimum düzeyde gerçekleştiği görülmüştür. LED'in sabit tutulduğu deneylerde lazer gücünün artırılmasının yüzey pürüzlülüğünü azalttığı, bunun eriyik ömrünün uzamasından kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Ayrıca, LED'in 15 J/cm'yi aşması durumunda pürüzlülüğün yaklaşık 4 µm seviyesinde sabitlendiği, ancak köşe bölgelerde ısı birikimi nedeniyle yüzeyde dalgalanmalar oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, dikey yüzey kalitesinin yalnızca enerji yoğunluğuna değil, aynı zamanda lazer gücü ve eriyik havuzu kararlılığına da bağlı olduğunu göstermiştir [35].

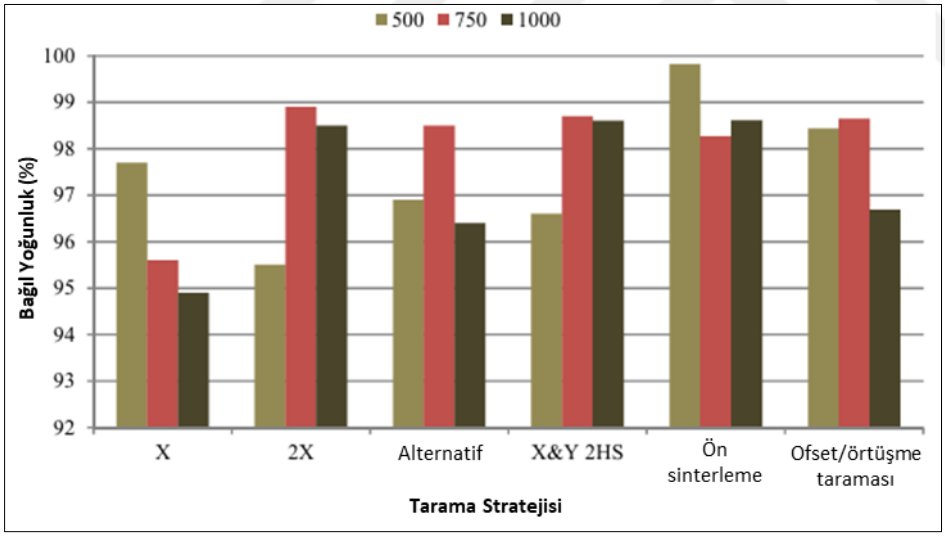


Şekil 2.28. Farklı LED'lere sahip SEM morfolojileri, (a) 2 J/cm; (b) 3 J/cm ve (c) 4,5 J/cm [35]

Körner çalışmasında seçici elektron ışın ergitme (ing. Selective Electron Beam Melting, SEBM) yönteminin metal bileşenlerin eklemeli imalatı sürecindeki rolünü incelemiştir. SEBM'nin, vakum ortamında yüksek enerjili bir elektron ışını kullanarak metal tozlarını tabaka tabaka ergitme prensibine dayandığı ve bu sayede yüksek yoğunluklu parçalar üretilebildiği belirtilmiştir. SEBM'de toz özellikleri, ışın akımı, tarama hızı ve tabaka kalınlığı gibi parametrelerin, elde edilen parçaların mikro yapı, yoğunluk ve yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğu rapor edilmiştir. Yüksek enerji yoğunluklarında tam ergitme sağlanarak gözenekliliğin azaldığı, ancak yüzey pürüzlülüğünün arttığı; düşük enerji yoğunluklarında ise tam ergimenin gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Mikro yapı incelemelerinde, hızlı katılaşma koşullarında ince taneli yapılar oluştuğu ve bu yapıların belirgin yönlenme (ing. texture) sergilediği saptanmıştır. Ayrıca, vakum koşullarının oksidasyonu önlediği, bu nedenle malzeme saflığının korunduğu ve artık gerilmelerin düşük seviyede kaldığı belirtilmiştir. SEBM ile üretilen parçaların yoğunluğunun genellikle %99,5'in üzerinde olduğu ve mekanik özelliklerinin dövme malzemelere yakın değerlere ulaştığı ifade edilmiştir [36].

Aboulkhair ve diğerleri çalışmasında, AlSi10Mg alaşımından üretilen parçaların SLM yöntemiyle imalatı sırasında oluşan gözenekliliği azaltmaya yönelik bir parametre optimizasyonu yapılmıştır. SLM'nin karmaşık ve hafif yapılı parçaların üretiminde sunduğu

avantajlara karşın, AlSi10Mg alaşımının yüksek ısı iletkenliği ve oksitlenmeye yatkınlığı nedeniyle gözenek oluşumuna eğilimli olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, tarama stratejisi, tarama hızı ve tarama aralığı gibi süreç parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Tarama aralığının 50 ve 100 µm olduğu durumlarda yeterli örtüşmenin sağlandığı ve parçaların yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Tarama hızının artışıyla birlikte metalurjik gözeneklerin azaldığı, ancak anahtar deliği (ing. keyhole) tipi düzensiz gözeneklerin oluştuğu ifade edilmiştir. Çift tarama stratejilerinde (örneğin ön sinterleme veya X&Y 2HS) bu tip gözeneklerin azaldığı rapor edilmiştir. En yüksek bağıl yoğunluğun (%99,8) 500 mm/s tarama hızı, 50 µm tarama aralığı ve ön sinterleme stratejisi kullanıldığında elde edildiği bildirilmiştir (Şekil 2.29). Mikroyapı incelemelerinde, eriyik havuzunun merkezinde ince taneli, kenarlarında ise daha iri taneli yapıların oluştuğu; anahtar deliği tipi gözenekler içinde erimemiş toz parçacıklarının bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, üretim süreci sırasında magnezyumun buharlaşma eğilimi gösterdiği ve bunun nihai alaşım bileşimini etkilediği belirtilmiştir [37].



Şekil 2.29. Tarama stratejisinin bağıl yoğunluk üzerindeki etkisi [37]

Chang ve diğerleri çalışmalarında, alüminyum alaşımlarının eklemeli onarımı (ing. additive repair) için yönlendirilmiş enerji biriktirme (ing. Directed Energy Deposition, DED) yöntemiyle düşük gözenekliliğe sahip AlSi10Mg kaplama tabakalarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, çok katmanlı üretim sürecinde ısı birikiminin etkilerini azaltmak amacıyla ön ısıtma ve katmanlar arası aralıklı işleme stratejileri uygulanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, bilyelenme, boşluk ve çökme gibi yüzey kusurlarının büyük ölçüde giderildiği

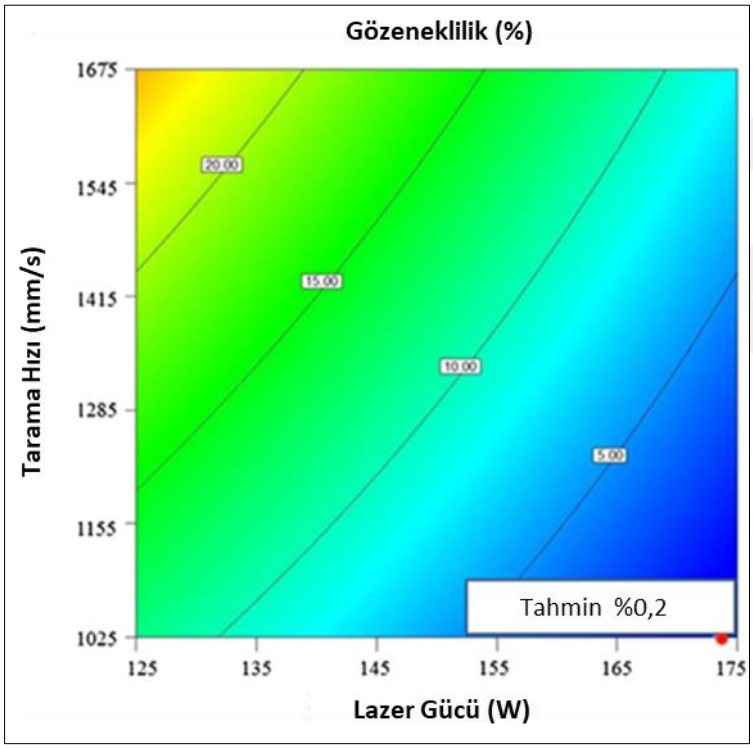
belirtilmiştir. Katman içinde çift yönlü (ing. bi-directional) tarama stratejisinin, iz kalınlığı farklarını dengeleyerek yüzey düzgünlüğünü artırdığı görülmüştür. Farklı istifleme stratejileri karşılaştırıldığında, yarım iz ofsetli yaklaşımın bir önceki katmandaki ergitme sınırlarını örtüştürerek birleşme yetersizliği ve gaz gözeneklerini azalttığı tespit edilmiştir. Deneysel tasarım analizlerinde, lazer gücünün gözenekliliği etkileyen birincil faktör olduğu, bunu toz besleme oranının izlediği, tarama hızının ise daha sınırlı bir etkide bulunduğu ortaya konmuştur. En düşük gözenekliliğin %0,09 ile 1800 W lazer gücü ve 1600 mg/dk toz besleme oranında elde edildiği belirtilmiştir (Çizelge 2.3). Ayrıca, gözeneklerin şekil bakımından pul, büyük ve mikro tipler olarak sınıflandırıldığı ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçların, DED tabanlı alüminyum onarım uygulamalarında yoğunluğu artırmak ve gözenekliliği azaltmak açısından önemli olduğu vurgulanmıştır [38].

Çizelge 2.3. L9 (3^3) ortogonal dizi tasarım şeması ve gözeneklilik sonuçları [38]

No	Lazer gücü P (W)	Toz besleme hızı F (mg/dk)	Tarama hızı S (mm/s)	Gözeneklilik (%)
1	1800	1200	5	0,11
2	1800	1600	8	0,09
3	1800	2000	11	0,13
4	1900	1200	8	0,14
5	1900	1600	11	0,12
6	1900	2000	5	0,15
7	2000	1200	11	0,21
8	2000	1600	5	0,17
9	2000	2000	8	0,24

Read ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan SLM sürecinde kullanılan işlem parametrelerinin AlSi10Mg alaşımının gözenekliliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve ada boyutu parametreleri istatistiksel deney tasarımı kullanılarak optimize edilmiştir. ANOVA analizi sonucunda gözenekliliğin en çok lazer gücü, tarama hızı ve bu iki parametrenin etkileşiminden etkilendiği belirlenmiştir. Yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızının enerji yoğunluğunu artırarak gözenekliliği azalttığı (Şekil 2.30), buna karşın düşük enerji yoğunluklarında erime havuzunun yetersiz oluşması nedeniyle birleşmemiş bölgelerin

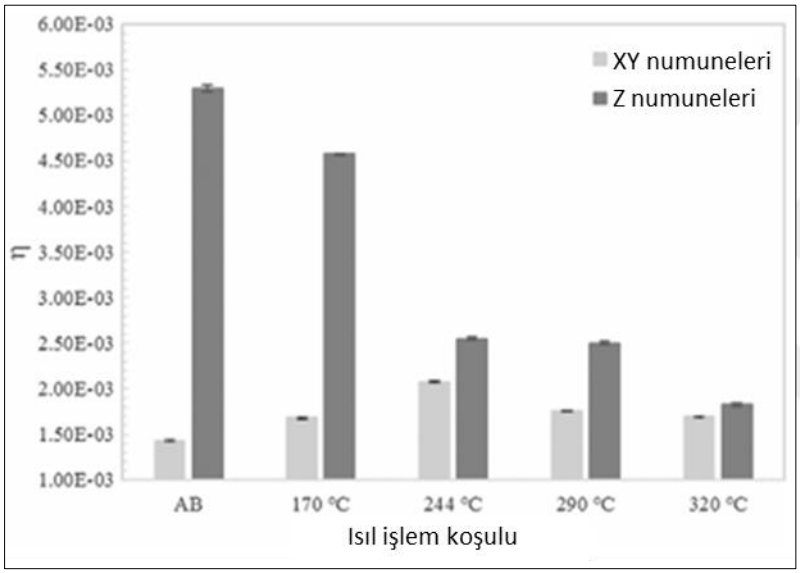
ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Optimum parametreler 175 W lazer gücü, 1025 mm/s tarama hızı, 0,65 tarama aralığı ve 5,6 mm ada boyutu olarak belirlenmiş, bu koşullarda %0,3'ten düşük gözeneklilik elde edilmiştir. Mikroyapı analizlerinde bazı bölgelerde oksit film kaynaklı düzensiz boşlukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Mekanik testler sonucunda, optimum parametrelerle üretilen SLM numunelerinin çekme dayanımı ve sünekliğinin döküm A360 alaşımına kıyasla daha yüksek olduğu, ancak uzama değerlerinin biraz daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Üretim yöneliminin (dikey/yatay) mekanik özellikler üzerinde belirgin bir fark yaratmadığı ifade edilmektedir [39].



Şekil 2.30. Minimum gözeneklilik için öngörülen optimum lazer gücü ve tarama hızı [39]

Colombo ve diğerleri çalışmasında, SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımının artık gerilmeleri (ing. residual stresses) ile sönümleme kapasitesi ilişki incelenmiştir. Çalışmada, farklı yönlerde (xy ve z) üretilen ince plaka numuneler hem üretim sonrası (ing. as-built) durumda hem de 170 °C, 244 °C, 290 °C ve 320 °C'de yapılan ısıl işlemler sonrasında test edilmiştir. X-ışını difraksiyonu (XRD) ile ölçülen artık gerilmelerin, lazer ışınının yönüyle aynı doğrultuda maksimum değerlere ulaştığı ve 244 °C üzerindeki ısıl işlemlerle neredeyse tamamen giderildiği belirlenmiştir. Çekme testlerinde, xy yönünde üretilen numunelerin z yönündekilere göre daha yüksek uzama göstermiş olduğu, bunun katmanlar arası birleştirme farklılıklarından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Sönümleme testleri sonucunda, üretim

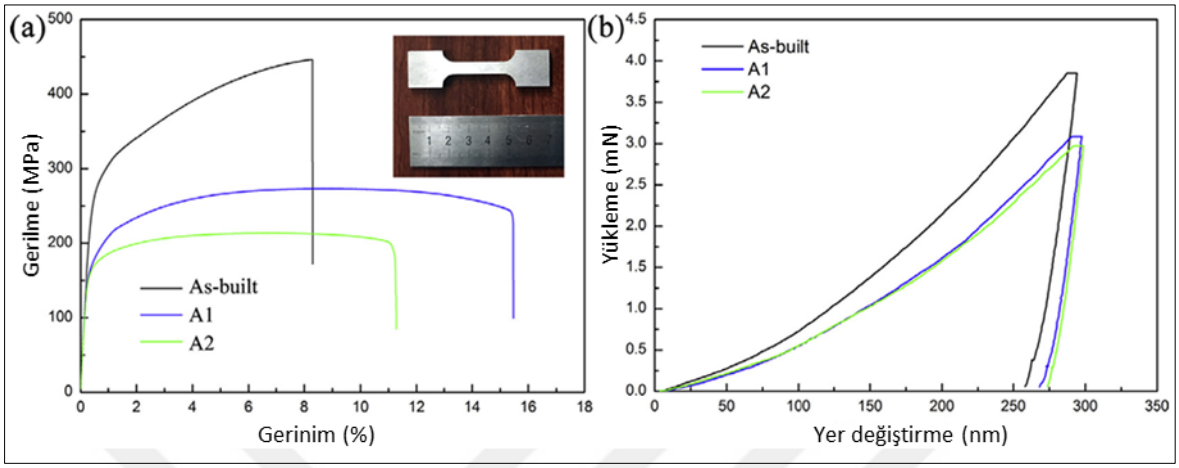
sonrası durumdaki numunelerin en yüksek sönümleme kapasitesine sahip olduğu; ısıl işlem sıcaklığı arttıkça sönümleme oranının (η) azaldığı gözlenmiştir. Z yönünde üretilen numunelerde ısıl işlem sıcaklığı ile sönümleme katsayısı arasında belirgin bir düşüş eğilimi olduğu, buna karşılık xy numunelerde ısıl işlemlerin etkisinin sınırlı kaldığı rapor edilmiştir (Şekil 2.31). Özellikle 244 °C'de yapılan ısıl işlemin hem artık gerilmeleri azalttığı hem de mekanik özellikleri koruduğu vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, artık gerilmelerin sönümleme kapasitesiyle ters orantılı olduğu, dolayısıyla uygun ısıl işlemlerle bu davranışın ayarlanabileceğini gösterdiği ifade edilmiştir [40].



Şekil 2.31. Üretildiği haliyle (AB) durumundaki ve ısıl işlem sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ölçülen kayıp faktörleri: xy-numuneleri ve z-numuneleri açık ve koyu gri renklerle gösterilmiştir [40]

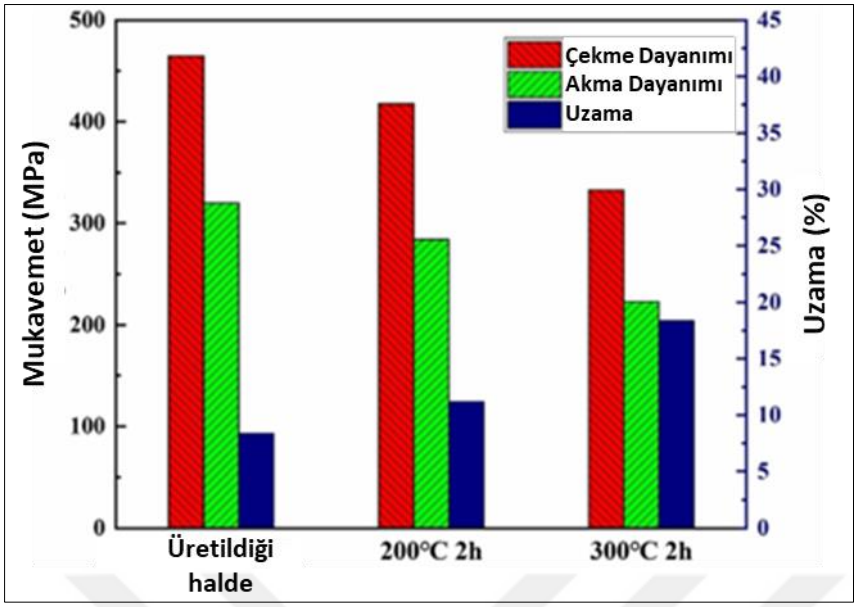
Zhuo ve diğerleri, SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımına uygulanan üretim sonrası ısıl işlemlerin mekanik özellikler ve artık gerilmeler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada iki farklı ısıl işlem uygulanmıştır: A1 rejimi (300 °C'de 2 saat + su verme) ve A2 rejimi (535 °C'de 1 saat + su verme + 190 °C'de 10 saat + fırın soğutma). Artık gerilmeler, üretildiği haliyle olan (ing. as-built) durumda −111 MPa iken A1 işleminde −13 MPa'a, A2 işleminde ise −42 MPa'a düşmüştür. Çekme testlerinde, üretildiği haliyle olan numunenin 446 MPa olan çekme dayanımı A1 işleminde 273 MPa'a gerilerken uzama %9,09'dan %15,3'e yükselmiştir. Benzer şekilde A2 işleminde 302 MPa çekme dayanımı ve %13,7 uzama elde edilmiştir (Şekil 2.32). Nanoindentasyon sonuçlarında, A1 işleminde daha dengeli mekanik davranış gözlenmiştir. Bu bulgular, ısıl işlemin üretim sırasında oluşan

artık gerilmeleri azalttığı ve malzemenin sünekliğini artırdığı, A1 rejiminin ise en uygun dengeyi sağladığı şeklinde rapor edilmiştir [41].



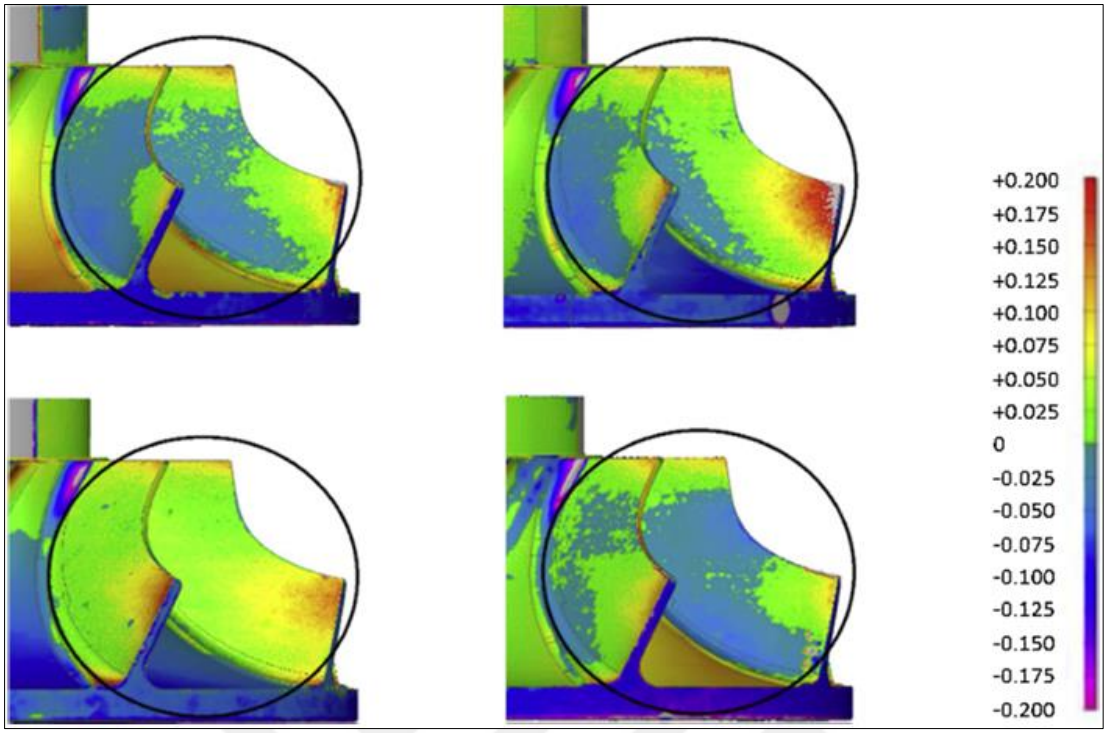
Şekil 2.32. Üretildiği haliyle ve ısıl işlem görmüş AlSi10Mg numuneleri için tipik gerilme-gerinim eğrileri ve nanoindentasyon sonuçları [41]

Jian ve diğerlerinin çalışmasında, SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımına uygulanan ısıl işlemin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen AlSi10Mg tozları kullanılmış ve numuneler 200 °C ve 300 °C'de tavlanmıştır. Mikroyapı analizlerinde, SLM yöntemiyle üretilen alaşımın α-Al katı çözelti, ağsı ötektik Si ve az miktarda Mg_2Si fazlarından oluştuğu; ısıl işlem sıcaklığı arttıkça ağsı ötektik Si'nin çözünerek parçacıklara ayrıldığı, daha sonra küreselleşip irileştiği belirlenmiştir. Ayrıca kolonlu tanelerin ısıl işlemle birlikte eş eksenli tanelere dönüştüğü ve tercihli yönlenmenin zayıfladığı görülmüştür. Şekil 2.33'te sunulan mekanik test sonuçlarına göre, tavlama sıcaklığı arttıkça çekme ve akma dayanımında azalma, uzamada ise artış meydana gelmiştir; 200 °C'de dayanımlar sırasıyla 418 MPa ve 284 MPa iken, 300 °C'de 332 MPa ve 223 MPa'a düşmüş, uzama %18,4'e yükselmiştir. Mikrosertlik değerlerinin 130,7 HV'den 104,8 HV'ye gerilediği, buna karşılık tane sınırlarında düşük açılı sınırların yüksek açılı sınırlarla yer değiştirdiği, bunun da artık gerilmelerin azaldığını göstermiştir. Korozyon testlerinde, ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla en yüksek korozyon derinliğinin 780 µm'den 570 µm'ye düştüğü ve tane sınırı özelliklerinin artışıyla tane arası korozyon direncinin iyileştiği ifade edilmiştir [42].

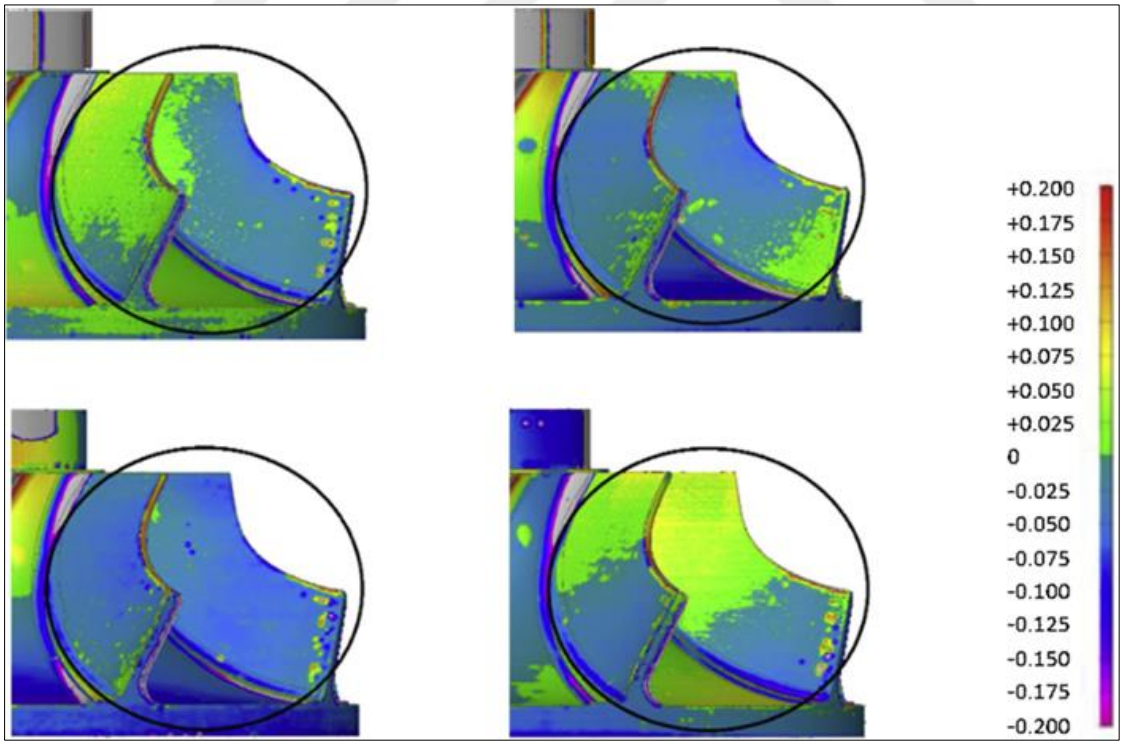


Şekil 2.33. Farklı ısıl işlemlerde SLM AlSi10Mg numunelerinin çekme özellikleri [42]

Yaghi ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, eklemeli imalat süreçlerinde meydana gelen geometrik bozulmaların (ing. distortion) nedenleri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Araştırmada, 316L paslanmaz çelikten üretilen endüstriyel bir çark (ing. impeller) örneği üzerinde hem Eİ sürecinden hem de sonrasında uygulanan talaşlı imalattan kaynaklanan distorsiyonlar analiz edilmiştir. Ölçümler GOM optik tarama, ESPI (elektronik benek deseni interferometrisi) delme yöntemi ve Contour analiziyle gerçekleştirilmiş; ayrıca artık gerilme dağılımları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak Eİ ve işleme sonrası şekil sapmaları tahmin edilmiş ve bu veriler ışığında geometrik telafi (ing. pre-distortion) yaklaşımı uygulanmıştır. Çalışmada, doğrudan Eİ ile üretilen parçalarda 200 µm'ye varan tepe distorsiyonlar ölçülmüştür (Şekil 2.34); sonlu elemanlar analiziyle önceden telafi edilen yeni geometri kullanıldığında ise distorsiyon miktarının %50'nin üzerinde azaldığı rapor edilmiştir (Şekil 2.35). Ölçümler, lazer gücü, katman kalınlığı ve tabla ön ısıtmasının termal gerilme birikimi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, destek yapılarının kaldırılması sırasında parça eğilmesinin arttığı, talaşlı işleme sonrası yüzey bölgelerinde çekme, iç bölgelerde ise basma gerilmelerinin baskın olduğu ifade edilmiştir [43].



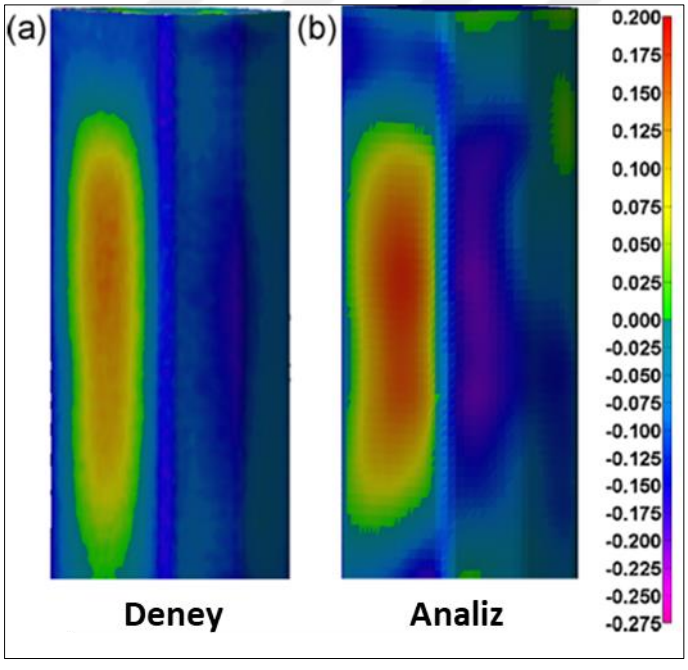
Şekil 2.34. İlk pervanenin (işleme sonrası) bütünsel bozulması (mm) [43]



Şekil 2.35. Yeni pervanenin (işleme sonrası) hafifletilmiş bütünsel bozulması (mm) [43]

Afazov ve diğerleri, SLM sürecinde oluşan bozulmaların öngörülmesi ve telafi edilmesine yönelik yeni bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, eklemeli imalat sürecinin makro ölçekli

bileşenlerde neden olduğu mekanik davranışlar sonlu elemanlar analizi ile modellenmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Araştırmada, kalibre edilmiş analitik bir ısıl model kullanılarak, lazer ısı girdisinden kaynaklanan sıcaklık alanı tanımlanmış ve bu alan, malzemenin mekanik tepkisini hesaplayan yapısal sonlu elemanlar modeline entegre edilmiştir. Ti6Al4V malzemesi kullanılarak yapılan deneylerde, analitik modelin eğilme testiyle kalibre edilmesi sonucunda deneysel olarak ölçülen 1,64 mm'lik yer değiştirme, model tarafından 1,62 mm olarak tahmin edilmiştir (Şekil 2.36). Ayrıca, endüstriyel uygulama olarak 17-4 paslanmaz çelikten üretilen bir türbin kanadı ve nikel esaslı bir ısı kalkanı geometrilerinde yöntem test edilmiştir. Her iki durumda da deneysel ölçümler ile model tahminleri arasında iyi bir uyum sağlandığı belirtilmiştir. Geliştirilen yöntemin hesaplama süresini günlerden birkaç saate düşürdüğü ifade edilmiştir. Bununla birlikte, bozulmaları azaltmak için sonlu eleman tabanlı ve optik 3B tarama tabanlı yaklaşımlar olmak üzere iki telafi yöntemi geliştirilmiş ve her iki yöntemin de distorsiyonu ±200 µm'den ±45 µm aralığına düşürdüğü gösterilmiştir. Optik 3B tarama tabanlı yöntemin dış yüzeylerde daha düzgün sonuçlar verdiği, ancak bazı bölgelerde aşırı telafi oluşturduğu söylenmektedir [44].



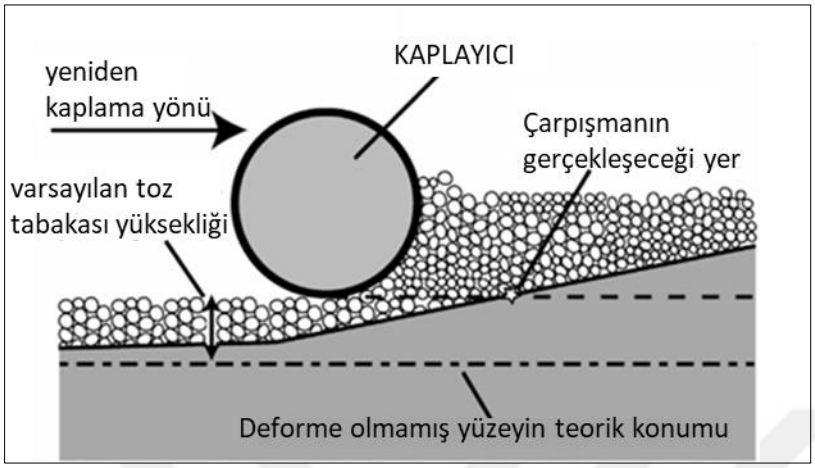
Şekil 2.36. Deformasyonun hedef CAD modeliyle karşılaştırılması (mm) [44]

Abel ve diğerleri, partikül dolgulu malzeme ekstrüzyonu esaslı eklemeli imalat süreçlerinde meydana gelen şekil bozulmasının azaltılmasına yönelik bir baskı stratejisi geliştirmiştir.

Çalışmada, seramik bazlı füzyon filament imalatı (CerAM FFF) yöntemiyle porselen numuneler üretilmiş ve katmanların baskı yönlerinin değiştirilmesinin, üretim ve sonrasındaki bağ giderme (ing. debinding) aşamalarında oluşan bozulmaları önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Bu amaçla, yaklaşık %57 hacim oranında katı yük içeren termoplastik porselen filamentler kullanılmıştır. Python tabanlı bir G-kod post-prosesleme aracıyla katmanların baskı yönleri dönüşümlü olarak değiştirilmiş ve elde edilen numuneler, tek yönlü baskı yapılan örneklerle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarında, tek yönde basılan numunelerde ±4,5 mm'ye kadar burulma ve eğilme bozulmalarının meydana geldiği, buna karşın alternatif (dönüşümlü) baskı yönü stratejisinde distorsiyonun ±1 mm seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, dönüşümlü baskı stratejisinin, bağ giderme sırasında parçaların taban plakalarına yapışmasını ve yumuşama kaynaklı çekme gerilmelerini azalttığı bildirilmiştir. Farklı malzemeler üzerinde yapılan uygulamalarda (örneğin Al_2O_3, 17-4 paslanmaz çeliği ve Ti6Al4V alaşımı), benzer şekilde düşük distorsiyon ve sınırlı çatlak oluşumu elde edildiği ifade edilmiştir. Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluğun 2,45 g/cm³ civarında olduğu ve gözenekliliğin %2–3 aralığında kaldığı belirtilmiştir. Dönüşümlü baskı stratejisinin, özellikle solventle bağ giderme aşamasında oluşan gerilme rahatlamalarına bağlı şekil bozulmalarını azalttığı söylenmektedir [45].

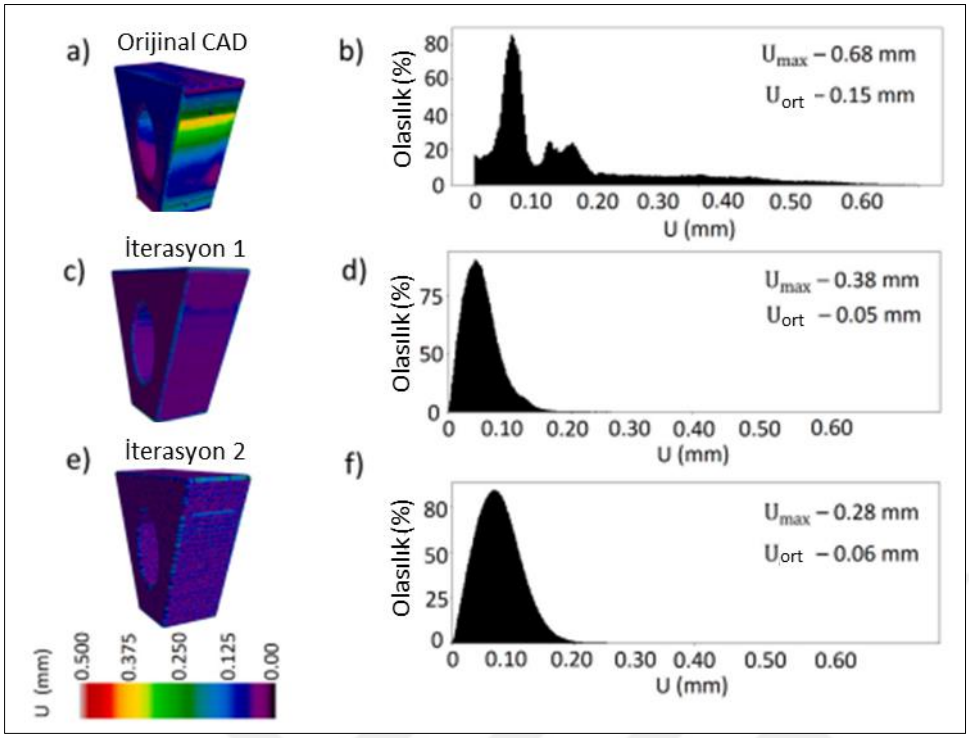
Misiun ve diğerleri, çalışmalarında eklemeli imalat parça distorsiyonlarının üretim hatalarına ve doğruluk kayıplarına neden olduğunu göstermiştir. Bu amaçla, SLM yönteminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi ve bu modelin topoloji optimizasyonu ile birleştirilmesiyle üretim sırasında oluşan distorsiyonların kontrol altına alınabileceği ortaya konmuştur. Çalışmada iki tür hata dikkate alınmıştır: üretim sürecinde Şekil 2.37'de paylaşılan tabaka yayma mekanizmasının (ing. recoater) parça ile çarpışması ve parçanın tabladan ayrıldıktan sonra meydana gelen genel şekil bozulması. Simülasyonlarda katmanlar kademeli olarak etkinleştirilmiş ve her yeni katmana özgü "doğal gerinim" (ing. inherent strain) değerleri uygulanarak termal büzülmenin etkileri hesaplanmıştır. Bu veriler, SIMP temelli topoloji optimizasyonu içinde kısıt olarak tanımlanmıştır. 2B ve 3B braket örnekleri üzerinde yapılan optimizasyonlarda, distorsiyon kısıtlarının uygulanması sonucunda parça biçiminin yeniden şekillendiği, destek görevi gören ince yapıların oluştuğu ve üretim başarısının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, uygulanan kısıtların parça distorsiyonunu önemli ölçüde azalttığı, örneğin 0,05 mm seviyesine kadar sınırlayabildiği ifade edilmektedir. Yöntemin, geleneksel geometri telafisi yaklaşımlarına

kıyasla daha doğrudan ve verimli sonuçlar verdiği, distorsiyon kaynaklı baskı hatalarının ise tamamen önlenebildiği söylenmektedir [46].



Şekil 2.37. Yeniden kaplayıcı çarpışma senaryosunun şematik gösterimi [46]

Makeen ve diğerleri çalışmalarında eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V bileşenlerde oluşan distorsiyonların tahmini ve geometrik telafisi için modifiye edilmiş içsel şekil değiştirme (ing. inherent strain) yönteminin etkinliğini incelemiştir. Çalışmada köprü formundaki numunelerde, yükseklik ve kalınlık değişiminin artık gerilmeler sonrası oluşan gevşemiş eğilme miktarını önemli ölçüde etkilediği ve daha kalın-daha kısa numunelerde eğilmenin arttığı bulunmuştur; bu durumun, taban plakası (ing. substrat) üzerinde biriken artık gerilme miktarından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Ayrıca, farklı kalınlıklardaki kamalı numunelerde (ing. wedge) yapılan incelemelerde, 5–20 mm arası kalınlıklarda üretilmiş haliyle olan (as-built) distorsiyonun yaklaşık 0,125 mm sapmayla doğru tahmin edilebildiği, ancak 1 mm'lik ince numunelerde modelin düzlem dışı distorsiyonu yakalayamadığı belirtilmiştir. Geometrik telafi uygulanmasıyla maksimum distorsiyonun 0,68 mm'den 0,28 mm'ye, ortalama distorsiyonun ise 0,15 mm'den 0,05 mm'ye düşürülebildiği gösterilmiştir ve çoklu telafi iterasyonlarının ek bir iyileşme sağlamadığı söylenmektedir (Şekil 2.38) [47].



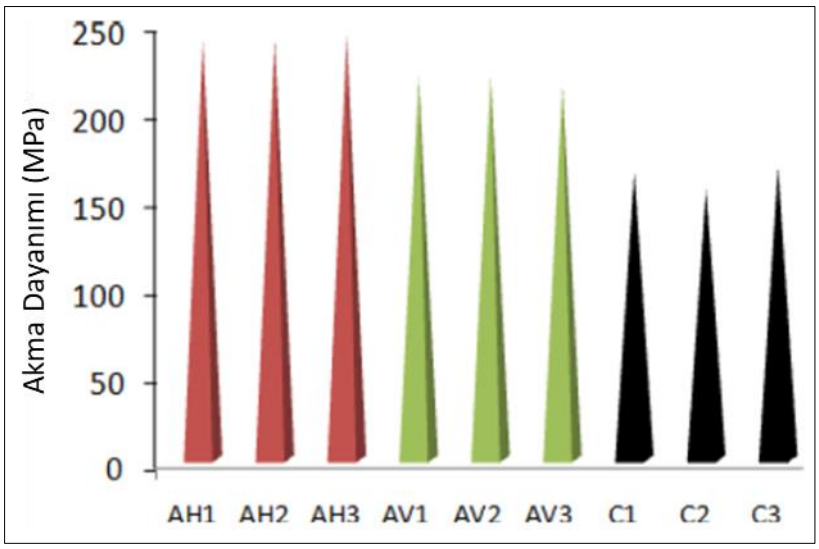
Şekil 2.38. (a-b) orijinal CAD geometrisinin, (c-d) ilk yinelemenin telafi edilmiş CAD geometrisinin ve (e-f) ikinci yinelemenin telafi edilmiş CAD geometrisinin bozulma konturları ve sapma profilleri [47]

Yarlagadda ve Broadhurst, eklemeli imalatla üretilen PLA parçalarında oluşan boyutsal distorsiyonun minimize edilmesine yönelik bir makine öğrenmesi yaklaşımı geliştirmiştir. Çalışmada CAD modellerindeki delik çaplarının, geçmiş üretim verilerindeki sapmalar dikkate alınarak tahmin edilmesi amaçlanmış ve histogram tabanlı gradyan artırmalı regresyon modeli kullanılmıştır. Model, Prusa MK4 yazıcıda üretilmiş 180 adet PLA numuneye ait delik çaplarını, katman yüksekliği, dikey duvar sayısı ve çevre hızları gibi parametrelerle ilişkilendirerek eğitilmiştir. En iyi performans veren modelin 0,0452 mm ortalama mutlak hata, 0,0614 mm RMS hata ve %99,617 R^2 değerine ulaştığı belirtilmiştir. Büyük çaplı deliklerde distorsiyonun arttığı ve veri kümesinde 6,2–7,5 mm aralığında boşluk bulunduğu ifade edilmiştir. K-katlamalı doğrulama sonucunda modelin yeni verilerde de tutarlı çalıştığı, dolayısıyla tolerans belirlemede manuel yaklaşımlara kıyasla daha isabetli sonuç verdiği gösterilmiştir [48].

El-Sari ve diğerleri, yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) eklemeli imalat yöntemiyle üretilen AISI 316L C-ring numunelerinin ısıl işlem simülasyonunun doğruluğunu, distorsiyon temelli bir doğrulama yaklaşımıyla incelemişlerdir. Çalışmada altı numune üretilmiş, ikisi üretildiği haliyle olan (ing. as-built) durumda elektrik arkı ile işleme (ing.

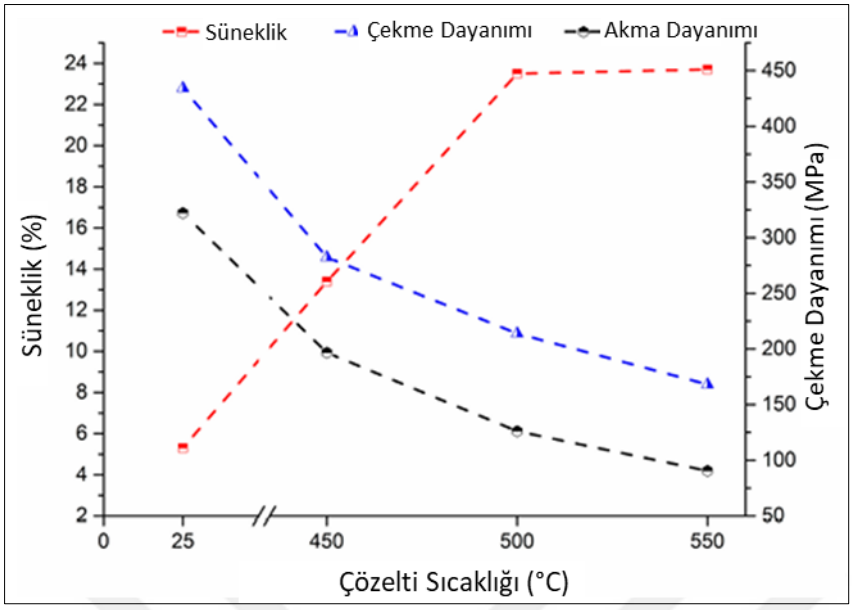
Electrical Discharge Machining, EDM) ile taban plakasından ayrılmış, dördü ise önce 1050 °C'de 140 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından EDM uygulanmıştır. 3 boyutlu tarama sonuçları, as-built numunelerin EDM sonrası dış çap, iç çap ve açıklık genişliğinde artış gösterdiğini, yani numunelerin genişlediğini ortaya koymuştur; bunun DED sürecinde oluşan dik artık gerilme gradyanlarının gevşemesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Isıl işlem görmüş numunelerde ise EDM sonrası dış çap, iç çap ve açıklık genişliği değerlerinin azaldığı, yani numunelerin büzüldüğü bulunmuştur; bu durumun ısıl işlemin artık gerilmeleri azaltmasından ileri geldiği ifade edilmektedir. Simülasyon sonuçları as-built numunelerde distorsiyonu olduğundan fazla tahmin etmiş, bunun DED simülasyonunda artık gerilme seviyesinin yüksek öngörülmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Isıl işlem görmüş numunelerde ise simülasyonun homojen sıcaklık varsayımı nedeniyle deneysel sonuçlardan sapma gösterdiği, ayrıca kullanılan sürünme (ing. creep) parametrelerinin konvansiyonel malzemeye ait olmasının gerçekte oluşan mikro yapı değişimlerini temsil etmede yetersiz kaldığı rapor edilmiştir [49].

Bharath ve diğerleri tarafından yapılan bu çalışmada, SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımının mekanik davranışı, geleneksel döküm yöntemiyle üretilen A360 alaşımıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen numunelerde kullanılan işlem parametreleri 370 W lazer gücü, 1300 mm/s tarama hızı, 0,19 mm tarama aralığı ve 0,03 mm katman kalınlığı olarak belirlenmiştir. Çekme testleri ASTM E8M standardına göre yapılmış ve sonuçlara göre SLM ile üretilen numunelerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama değerlerinin döküm A360 alaşımına kıyasla önemli ölçüde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yatay yönde üretilen numunelerin 241 MPa akma dayanımına, 408 MPa çekme dayanımına ve %10,5 uzama değerine sahip olduğu, dikey yönde üretilenlerin ise 225 MPa akma dayanımı ve %6,7 uzama gösterdiği rapor edilmiştir. Bu farkın, dikey üretimde katmanlar arası çatlak ilerlemesinin daha kolay gerçekleşmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, SLM ile üretilen malzemelerde %38 daha yüksek akma dayanımı ve %35 daha fazla süneklik elde edildiği ifade edilmiştir. Şekil 2.39'da akma dayanımı sonuçları paylaşılmıştır. Bu sonuçlar, SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir [50].



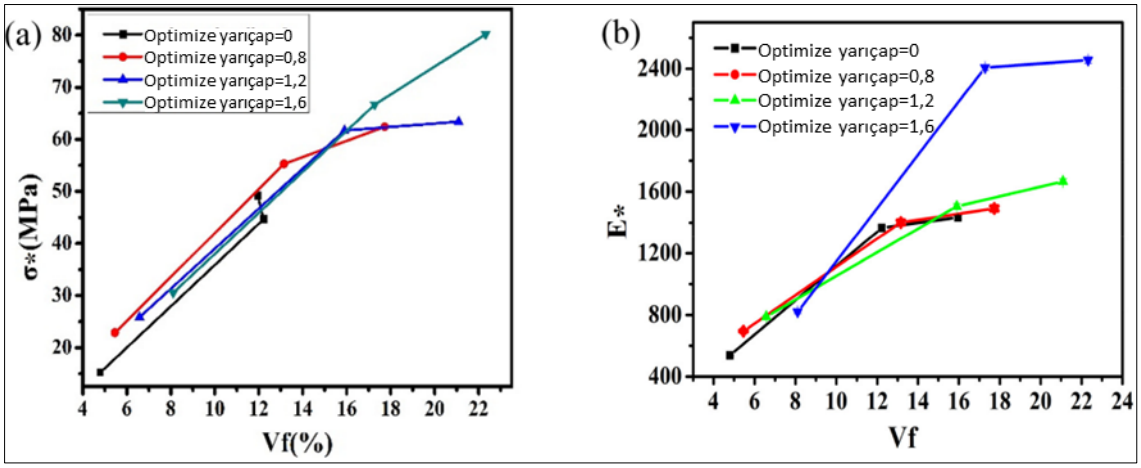
Şekil 2.39. Akma dayanımı karşılaştırması (AH:eklemeli-yatay, AV:eklemeli-dikey, C:döküm) [50]

Trevisan ve diğerlerinin çalışmasında AlSi10Mg alaşımının SLM yöntemiyle üretimi, mikro yapısal özellikleri ve mekanik davranışları ayrıntılı biçimde incelenmiştir. SLM süreci sırasında kullanılan tozun morfolojisi, tane boyutu, kimyasal bileşimi gibi özelliklerinin ve lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin nihai parça üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. SLM sürecinde hızlı ısıtma ve soğuma sebebiyle, çok ince taneli ve dayanımı yüksek mikro yapılar elde edildiği ifade edilmektedir. Çalışmada, AlSi10Mg alaşımı ile üretilen parçaların döküm yöntemine göre daha ince taneli yapılar sergilediği ve bu nedenle daha yüksek sertlik ve çekme dayanımı gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca farklı tarama stratejilerinin ve üretim yönlerinin mikro yapı üzerindeki etkileri de değerlendirilmiş; tarama yönünün kristal büyüme yönünü etkilediği ve bu durumun anizotropik mekanik özellikler oluşturduğu ifade edilmektedir. SLM süreciyle üretilen parçalarda çözümleme tavı ve yapay yaşlandırma gibi ısıl işlemlerin uygulanmasıyla mekanik özelliklerde önemli değişimler meydana geldiği gösterilmiştir. Örneğin, 550 °C'de uygulanan çözümleme tavı sonrası kopma uzamasının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.40). Ek olarak, hidrojen gözeneklenmesi gibi kusurların önüne geçmek amacıyla tozlara ön kurutma işlemi uygulandığında, elde edilen parçalardaki gözeneklilik oranının yaklaşık %50 oranında azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, lazer enerjisi ve tarama hızı gibi parametrelerin doğru kombinasyonlarla ayarlanması durumunda %99'un üzerinde yoğunluklara ulaşılabildiği söylenmektedir [51].



Şekil 2.40. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımı numunelerin çekme özellikleri; üretildiği haliyle ve farklı sıcaklıklarda uygulanan çözelti ısıl işlemleri sonrasında. (Üretim sonrası çözelti ısıl işlemi 2 saat boyunca uygulanmış ve oda sıcaklığında su ile soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir) [51].

Li ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) tekniğiyle üretilen AlSi10Mg alaşımı elmas kafes yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, farklı çubuk çapları (0,3–0,9 mm) ve düğüm bölgelerinde farklı optimize edilmiş yarıçap (0–1,6 mm) değerlerine sahip 12 adet numune üretilmiştir. Hacim kesirleri %4,5 ile %22,5 arasında değişen numunelerin üretiminde yüksek yoğunlukta (> %98) ve çatlak içermeyen yapılar elde edilmiştir. Basınç testleri ve sonlu elemanlar analizleri sonuçlarına göre, düğüm bölgelerinde gerilme yığılmalarının oluştuğu ve bu bölgelerde plastik mafsalların meydana geldiği, ancak çoğu çubuğun elastik kaldığı tespit edilmiştir. Düğüm optimizasyonunun, gerilme birikimini azaltarak yük aktarımını çubuk ortalarına yönlendirdiği ve böylece yapının rijitliğini ve dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Gerilme dağılımlarının, optimize yarıçap arttıkça daha homojen hale geldiği ve maksimum gerilme değerlerinin azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, ısı işlemi uygulamasının yüzeye yapışmış partikülleri tamamen gideremediği, ancak mekanik dayanımı bir miktar artırdığı ifade edilmiştir. Elde edilen verilerin, elastik modül ve nihai gerilme değerlerinin hacim oranı ve düğüm optimizasyonuna bağlı olarak doğrusal biçimde arttığını gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 2.41) [52].



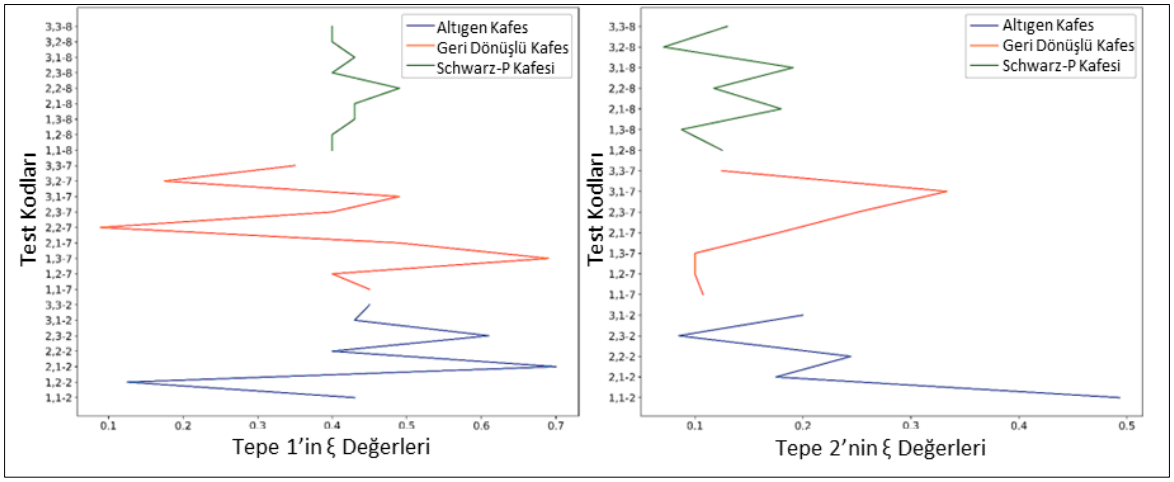
Şekil 2.41. Hacim oranı değerleri ile σ* (a) ve E* (b) arasındaki ilişki [52]

Gite ve Wakchaure, SLM sürecinde AlSi10Mg alaşımının üretim parametreleri, mikro yapısı ve mekanik özelliklerini sistematik olarak incelemiş ve farklı araştırmacıların bulgularını kapsamlı biçimde derlemiştir. Çalışmada, lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama aralığının ergime havuzu davranışı, yoğunluk ve gözeneklilik oluşumu üzerinde belirleyici olduğu ortaya konmuştur; örneğin düşük lazer gücünde soğuma hızının arttığı ve daha küçük tanelerin oluştuğu belirtilmiştir. Birçok araştırmada optimum enerji yoğunluğunun artırılmasının yüzey kalitesini yükselttiği, ancak aşırı enerji yoğunluğunun Marangoni konveksiyonu nedeniyle iz kararsızlığına yol açtığı gösterilmiştir. Mikro yapı açısından, SLM ile üretilen numunelerde ergime havuzunun merkezinde ince hücresel yapıların, sınır bölgelerinde ise daha kaba dendritik yapılarda tanelerin geliştiği rapor edilmiştir. Ayrıca yüksek soğuma hızlarının Al matrisinde aşırı doymuş Si çözünmesine ve bu nedenle daha yüksek sertlik değerlerine yol açtığı belirtilmiştir. Isıl işlem uygulamalarında, özellikle çözeltiye alma ve yaşlandırmanın Si fazını küreselleştirerek mekanik özellikleri değiştirdiği, bazı çalışmalarda ısıl işlem sonrası akma dayanımı ve sertlikte düşüşler gözlendiği ifade edilmiştir. Genel olarak, farklı araştırmalarda %99'un üzerinde bağıl yoğunluklara ulaşıldığı ve ince mikro yapının döküm alaşımlarına göre daha yüksek çekme dayanımı sağladığı bildirilmiştir [53].

Wang ve diğerleri, AlSi10Mg alaşımının seçici lazer ergitme sürecine ilişkin simülasyon çalışmalarını incelemiş ve literatürde elde edilen temel bulguları sistematik biçimde derlemiştir. İncelenen termal simülasyonlarda, lazer gücü ve tarama hızının ergiyik havuz uzunluğu ile genişliğini doğrudan belirlediği ve yüksek ısı gradyanlarının mikro yapı yönlenmesini etkilediği gösterilmiştir; ayrıca düşük enerji yoğunluklarında kesintili ergime

ve gözeneklilik oluştuğu rapor edilmiştir. Mikro yapı modellerinde, Al matrisindeki Si parçacıklarının dağılımının soğuma hızına duyarlı olduğu ve yüksek soğuma hızlarının ince dendritik yapılar ortaya çıkardığı belirtilmiştir. Artık gerilme simülasyonlarında, katmanlar arası sıcaklık farklarının distorsiyon üzerinde baskın rol oynadığı ve özellikle ince cidarlı yapılarda eğilmenin arttığı ifade edilmektedir. Mekanik özellik modellemelerinde, kusur içeren modellerin deneysel çekme dayanımını daha doğru tahmin ettiği, fakat tane yönlenmesini içeren kristal plastikliği temelli modellerin yerel gerilme yığılmalarını daha iyi yakaladığı gösterilmiştir. Ele alınan çalışmaların çoğunda, simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle genel uyum gösterdiği ancak malzeme parametrelerinin kesin belirlenememesi nedeniyle bazı sapmaların oluştuğu bildirilmektedir [54].

Kayacan ve diğerleri, eklemeli imalat kapsamında geliştirilen hibrit seçici lazer ergitme temelli bir yöntemle 316L, MS1 (maraging çelik) ve 316L+%2Cu alaşımlarından kafes (ing. lattice) yapılar üretmiş ve bu yapıların Charpy darbe ile modal titreşim özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen numuneler üzerinde sinterleme işlemi uygulanmış, ardından ivmeölçer ve darbe uyarımıyla titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 316L+%2Cu kapalı altıgen (ing. closed-hexagon) kafes yapısının 33 J darbe enerjisi ile en yüksek enerji soğurma kapasitesine sahip olduğu, 316L kapalı altıgen yapının 31 J, MS1 yeniden giren (ing. re-entrant) kafesin ise 15,5 J değerinde darbe dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Modal analiz sonuçlarında, baskın doğal frekansların genellikle 2,5 Hz ve 20–21 Hz civarında toplandığı ve önemli titreşim tepelerinin 40 Hz'in altında yoğunlaştığı görülmüştür. Sönüm oranları açısından, Şekilde 2.42'de paylaşıldığı üzere MS1 kapalı altıgen kafes yapısında yaklaşık $\xi \approx 0{,}7$ düzeyinde yüksek sönüm elde edildiği, 316L malzemesinde de kapalı altıgen geometriyle yüksek sönümleme davranışı sergilendiği bildirilmiştir. 316L+%2Cu alaşımında ise re-entrant ve Schwarz-P kafeslerin ikinci modda daha yüksek sönümleme performansı gösterdiği ifade edilmektedir. Elde edilen bulgular, kafes geometrisinin ve alaşım türünün darbe dayanımı ile titreşim sönümleme kabiliyeti üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir [55].

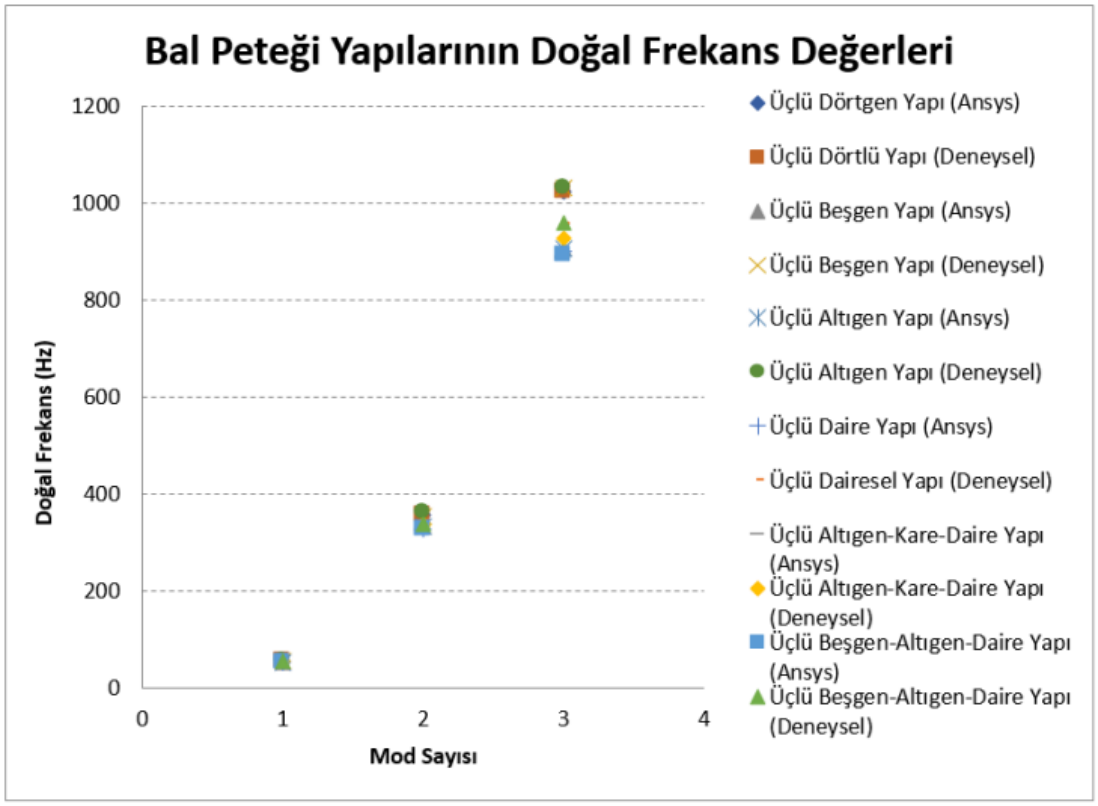


Şekil 2.42. MS1'in 1. ve 2. tepelerine ait sönüm oranı "ζ" değerleri [55]

Scalzo ve diğerleri, eklemeli imalat yöntemiyle SLM sürecinde üretilen AISI 316L paslanmaz çelik kafes yapıların sönümleme özelliklerinin, kullanılan deneysel düzenek ve sınır koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Çalışmada hem kiriş tipi hem de plaka tipi örnekler üretilmiş, ivmeölçer ve temassız lazer sensörleri ile yapılan ölçümler karşılaştırılmıştır. Numuneler hem serbest-serbest hem de kıskaçlı (ankastre) sınır koşulları altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, serbest-serbest konfigürasyonun yapının gerçek içsel sönümünü daha doğru yansıttığı, temaslı ölçüm yöntemlerinde ise sensörlerin ek kütlesi ve kablo etkilerinin sönüm oranlarını yapay olarak artırdığı belirlenmiştir. Toz dolgulu (ing. powder-filled) kafes yapıların sönümleme kapasitesinin, boş kafes yapılara göre yaklaşık üç kat, tam yoğun (referans) numunelere göre ise yaklaşık beş kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kıskaçlı düzeneklerde bağlantı yüzeylerinde meydana gelen enerji kayıplarının toplam sönüm üzerinde baskın hale geldiği, bu nedenle farklı deney koşulları altında elde edilen verilerin doğrudan karşılaştırılmasının uygun olmadığı ifade edilmiştir. Çalışmada, sönümleme ölçümlerinin güvenilirliği için temassız algılama sistemleri ve serbest-serbest sınır koşullarının tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir [56].

Atlıhan ve diğerleri eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş bal petekli yapıların titreşim davranışları nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada otomotiv sanayisinde kullanılabilecek PLA malzemesiyle dörtgen, beşgen, altıgen ve dairesel çekirdek geometrilerine sahip kirişler üretilmiş ve bu farklı hücresel yapıların doğal frekans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, mod sayısı arttıkça kirişlerin doğal frekanslarının da arttığı gözlemlenmiştir. Üçlü dairesel yapının 1., 2. ve 3. modlarda sırasıyla en düşük doğal frekans değerlerine (yaklaşık 53,46 Hz, 329,79 Hz ve 900,72 Hz)

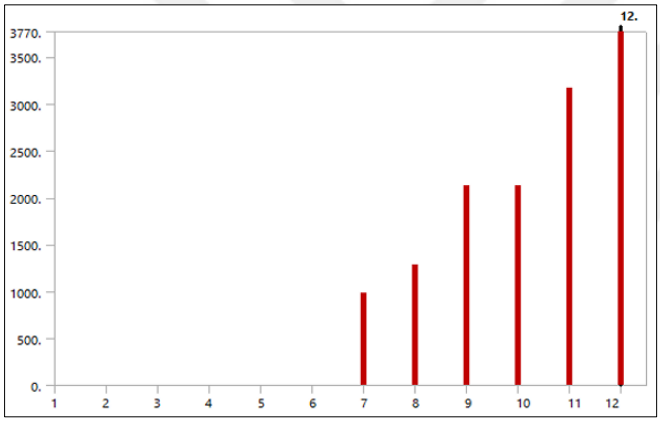
sahip olduğu; buna karşın üçlü altıgen yapının ise en yüksek frekans değerlerini (yaklaşık 53,76 Hz, 331,32 Hz ve 905,02 Hz) verdiği tespit edilmiştir. Şekil 2.43'te paylaşıldığı üzere deneysel analizler de bu sonuçları desteklemiş ve nümerik analizlerle yüksek düzeyde uyum sağladığı belirtilmiştir. Üçlü altıgen-kare-daire ve üçlü beşgen-altıgen-daire yapıların karşılaştırılması sonucunda, beşgen-altıgen-daire kombinasyonunun doğal frekans açısından daha yüksek değerlere ulaştığı ifade edilmiştir. Ayrıca, deneysel analizlerde gözlenen küçük sapmaların üretim sürecindeki malzeme boşlukları ve imalat hatalarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Genel olarak, bal peteği geometrisinin kirişin titreşim karakteristiğini önemli ölçüde etkilediği ve frekans değerlerinin hücre şekline bağlı olarak optimize edilebileceği ortaya konmuştur [57].



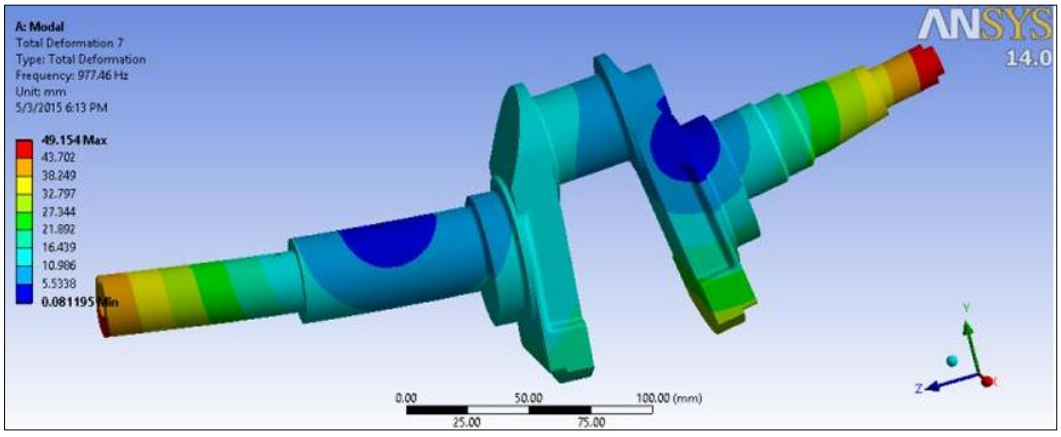
Şekil 2.43. Bal peteği yapılarının doğal frekans değerleri [57]

Ramesha ve diğerleri çalışmasında, tek silindirli bir motor krank milinin dinamik davranışı sayısal analiz yöntemleriyle incelemiştir. ANSYS ortamında gerçekleştirilen modal analizde, serbest ve sınır koşulları altında krank miline ait ilk on iki doğal frekans (Şekil 2.44) ve mod şekilleri elde edilmiştir (Şekil 2.45). Serbest durumda ilk altı modun rijit cisim hareketini temsil ettiği, sonraki modlarda ise eğilme ve burulma davranışlarının belirginleştiği tespit edilmiştir. Sınır koşulları altında yapılan analizlerde de benzer mod

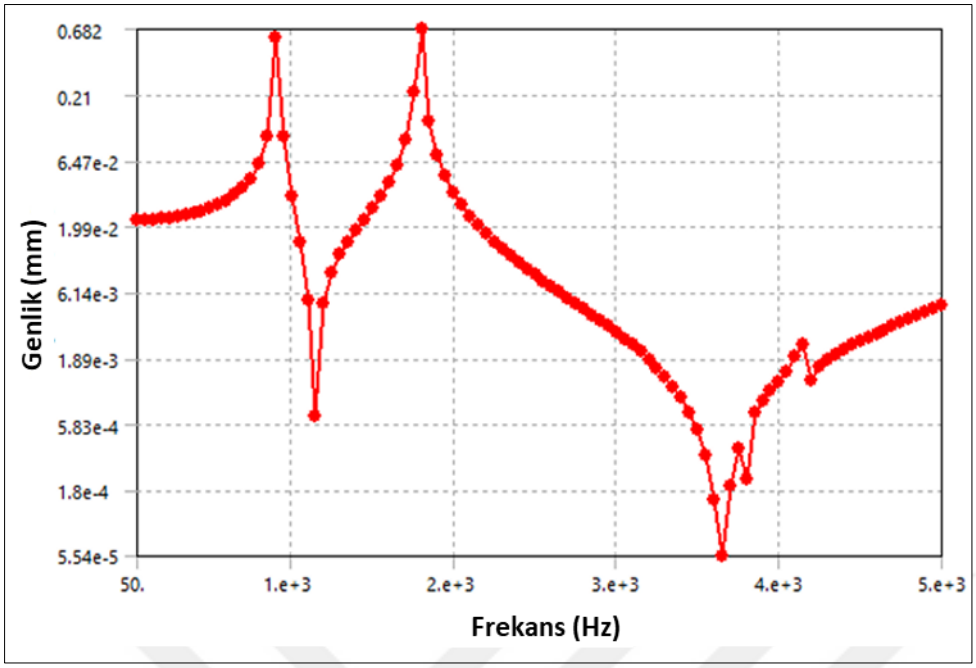
tiplerinin gözlemlendiği, ancak frekans değerlerinin sınır koşullarına bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Harmonik tepki analizinde krank miline 0–5000 Hz aralığında değişen uyarıcı frekanslar uygulanmış ve buna karşılık yer değiştirme (ing. displacement) ile gerilme (ing. stress) tepkileri değerlendirilmiştir (Şekil 2.46). Elde edilen grafiklerde rezonans bölgelerinin doğal frekanslarla çakıştığı, ancak motorun çalışma frekanslarının bu aralığın altında kaldığı görülmüştür. Bu durumun, krank milinde rezonans kaynaklı titreşim sorunlarının önüne geçilmesini sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca faz tepkilerinin incelenmesiyle krank milinin bir motor çevrimi boyunca titreşim davranışının daha iyi anlaşıldığı ifade edilmiştir. Çalışmada elde edilen bulguların, krank mili tasarımında dinamik dayanımın artırılmasına ve titreşim kaynaklı yorulma problemlerinin azaltılmasına yönelik önemli veriler sunduğu söylenmektedir [58].



Şekil 2.44. Mod sayısı ve frekans arasındaki değişim [58]

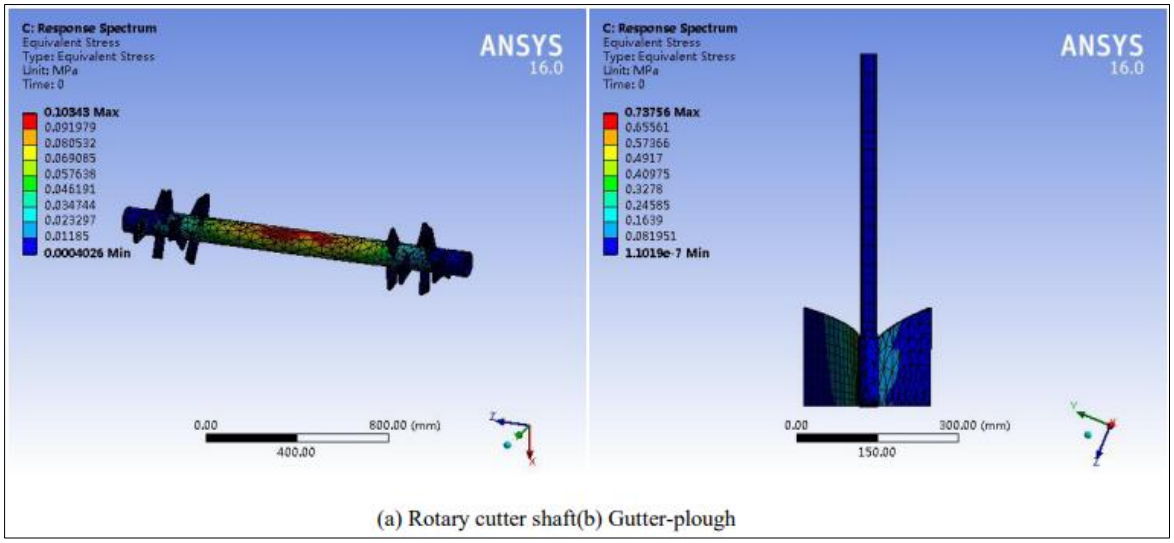


Şekil 2.45. Mod 7 (eğilme modu) [58]

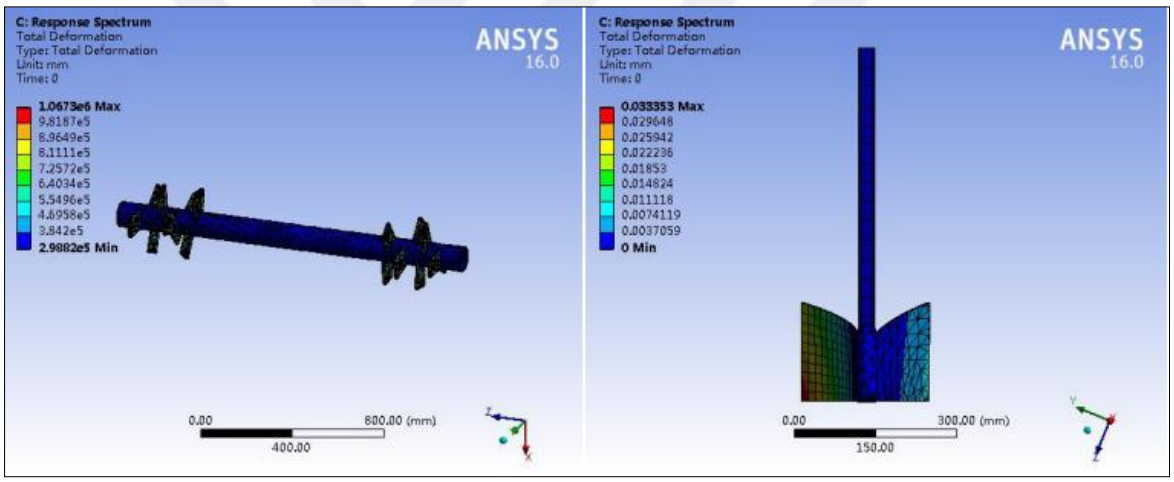


Şekil 2.46. Farklı uyarı frekanslarında yer değiştirme genliğinin değişimi [58]

Yu ve diğerleri, geliştirdikleri hendek açma cihazının titreşim koşullarındaki davranışını incelemek amacıyla ANSYS tabanlı modal ve harmonik tepki analizleri gerçekleştirmişlerdir. Modal analiz sonucunda cihazın doğal frekanslarının çalışma sırasında ölçülen 8–9 Hz titreşim aralığını tamamen kaçırdığı belirlenmiştir; bu nedenle cihazın sahada çalışırken rezonansa girmeyeceği ifade edilmiştir. Döner kazı milinin ilk alt modunda 0,0037–546,64 Hz aralığında doğal frekanslar elde edilmiş ve titreşim şekillerinin çoğunlukla X ve Z doğrultularında salınımlar içerdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, oluk açma pulluğu bileşeninde 40–397 Hz arasında doğal frekanslar bulunmuş, düşük modlarda yüksek deformasyon genliklerinin oluştuğu belirtilmiştir. Harmonik tepki analizinde 8–9 Hz çalışma frekansında maksimum gerilmelerin 0,10-0,74 MPa (Şekil 2.47), yer değiştirmelerin ise 10^{-6}–10^{-2} mm mertebelerinde (Şekil 2.48) kaldığı rapor edilmiş; bu değerlerin cihazın dayanımını veya çalışma stabilitesini olumsuz etkilemeyeceği söylenmektedir [59].



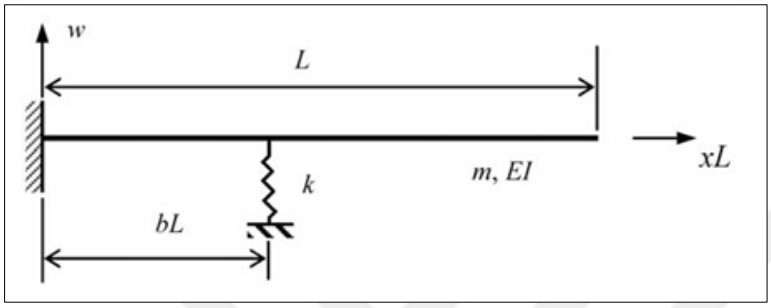
Şekil 2.47. Döner kesici mil ve oluk pulluklarının harmonik tepki gerilme diyagramı [59]



Şekil 2.48. Döner kesici mil ve oluk pulluklarının harmonik tepki deformasyon diyagramı [59]

Wang ve diğerleri çalışmasında, ara elastik desteğe sahip kirişlerin doğal frekanslarının en yüksek seviyeye çıkarılabilmesi için gereken minimum destek rijitliği analitik olarak incelenmiştir. Çalışmada ele alınan sistem, ara elastik desteğe sahip bir konsol kiriş modelidir (Şekil 2.49). Bu model üzerinde, farklı sınır koşullarına sahip Euler–Bernoulli kirişleri için doğal frekansın destek konumuna göre değişimi analiz edilmiştir. Analitik türev yaklaşımıyla kapalı form çözümler elde edilmiş ve desteğin uygun konuma yerleştirilmesi durumunda rijit bir destekle benzer titreşim davranışı sağlanabildiği belirtilmiştir. Konsol kiriş örneğinde, desteğin ikinci titreşim modunun düğüm noktasına yerleştirilmesiyle birinci doğal frekansın maksimum seviyeye ulaştığı ifade edilmiştir. Ayrıca, destek rijitliği belirli bir minimum değeri aştığında doğal frekansın daha fazla artmadığı, bu noktadan sonra mod

değişiminin meydana geldiği söylenmektedir. Basit mesnetli kirişlerde ise optimum destek konumunun kirişin orta noktasında bulunduğu ve bu durumun simetrik sınır koşullarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Daha yüksek modlar için yapılan analizlerde, destek rijitliği gereksiniminin mod numarasıyla birlikte hızla arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, elastik destek konumunun ve rijitliğinin optimize edilmesinin kirişlerin titreşim performansını iyileştirmede kritik rol oynadığına işaret etmektedir [60].



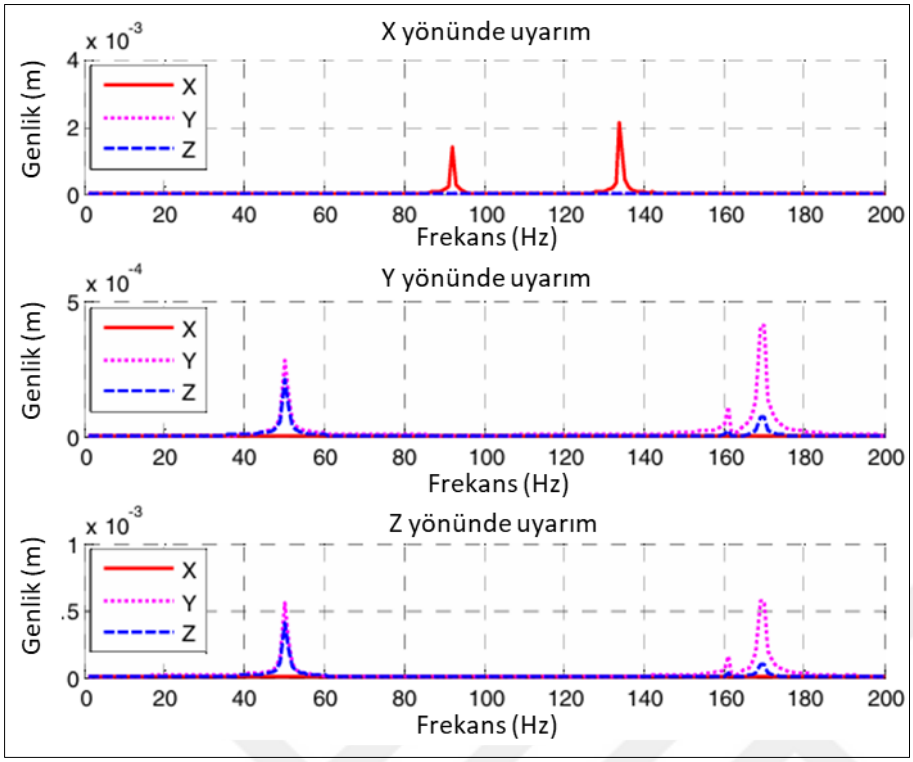
Şekil 2.49. Ara destekli tekdüze konsol kiriş [60]

Aggogeri ve diğerleri çalışmasında, takım tezgahlarında kullanılan hafif yapıların titreşim sönümleme davranışlarını geliştirmek amacıyla farklı malzemelerden üretilen Z-ekseni koç (ing. ram) prototipleri tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Çalışmada alüminyum köpük sandviç (ing, Aluminum Foam Sandwich, AFS), oluklu çekirdekli alüminyum sandviç (ing, Aluminum Corrugated Sandwich, ACS) ve karbon fiber takviyeli polimer (ing. Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) yapılar, geleneksel çelik koçla karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizleri sonucunda, AFS yapının Z yönünde çeliğe göre önemli ölçüde daha yüksek rijitlik sergilediği, CFRP'nin Y yönünde en yüksek rijitliği sağladığı, ACS'nin ise X yönünde görece daha düşük rijitlik gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel statik testlerde, elde edilen sonuçların sonlu eleman analizleriyle uyumlu olduğu ve CFRP ile AFS yapıların geleneksel koçtan daha yüksek rijitlik sunduğu belirlenmiştir. Modal analizlerde AFS yapının bükülme modunda kayıp faktörünün %1,7 olduğu, bu değerin çelik koça göre 20–30 kat daha yüksek sönümleme sağladığı ifade edilmiştir (Çizelge 2.4). Ayrıca CFRP yapının ilk doğal frekansının yaklaşık 1200 Hz seviyesine ulaştığı ve yüksek rijitlik–düşük kütle dengesi açısından verimli bir yapı sergilediği belirtilmiştir. Bu sonuçlara göre, hibrit ve kompozit malzemelerin takım tezgahlarında titreşim kontrolü ve hafiflik açısından önemli avantajlar sunduğu ifade edilmiştir [61].

Çizelge 2.4. Seçilen yapıların kayıp faktörleri [61]

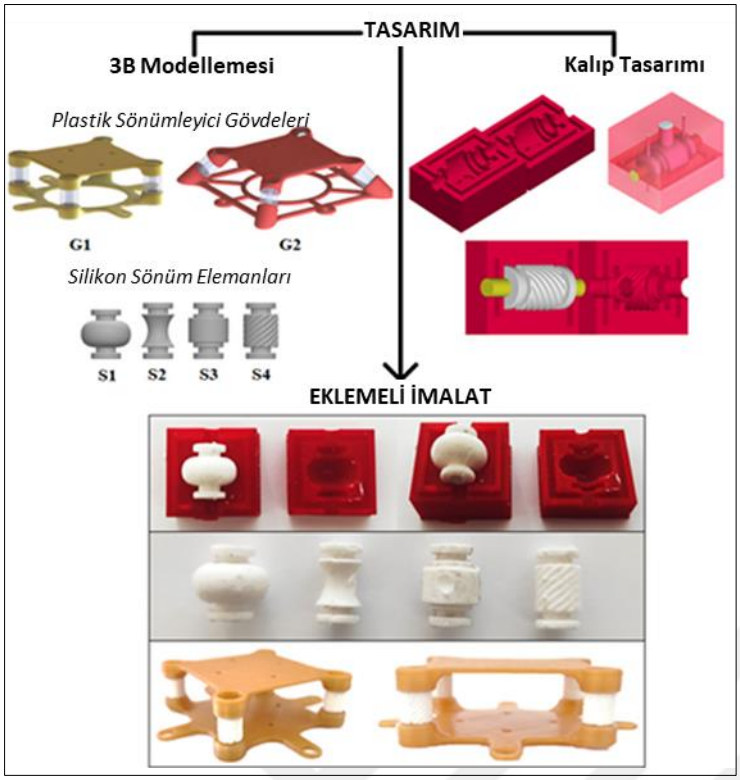
Yapı Konfigürasyonu	1. Frekans (Hz)	Kayıp Faktörü (%)
Geleneksel (çelik) Koç	670	0,08
AFS Koç	667	1,70
Al. Oluklu Koç	745	0,17
CFRP Koç	1286	0,23

Wu ve diğerleri takım tezgahlarının dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla modal analiz ve harmonik tepki yöntemlerini birlikte kullanmıştır. Çalışmada, çok serbestlik dereceli sistemin dinamik teorisi açıklanmış, gri dökme demirden (HT300) imal edilmiş tezgah gövdesinin deneysel modal analizi ve sonlu elemanlar yöntemiyle benzetimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kuvvet çekici ve ivmeölçerler kullanılarak frekans tepki fonksiyonları (FRF) elde edilmiş, ilk dört doğal frekansın sırasıyla 43,7 Hz, 62,2 Hz, 92,3 Hz ve 127,2 Hz olduğu belirlenmiştir. İlk modda kolon ve freze kutusunun Y yönünde, ikinci modda ise X yönünde eğildiği gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu, ancak sayısal modeldeki rijit sınır koşulları nedeniyle frekans değerlerinin bir miktar yüksek çıktığı belirtilmiştir. Harmonik tepki analizinde ise iş miline 0–200 Hz aralığında sinüzoidal uyarımlar uygulanmış ve iş mili ile iş tablasının dinamik tepkileri incelenmiştir. 92 Hz ve 135 Hz frekanslarında X yönünde, 50 Hz, 161 Hz ve 169 Hz frekanslarında ise Y ve Z yönlerinde belirgin titreşim artışları gözlemlenmiştir (Şekil 2.50). Y yönündeki titreşimlerin Z yönüne kıyasla daha şiddetli olduğu, bunun da Y yönünde dinamik rijitliğin daha düşük olduğunu gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca, dinamik rijitliğin uyarma frekansına bağlı olarak değiştiği ve rezonans frekanslarında belirgin biçimde azaldığı belirtilmiştir [62].



Şekil 2.50. Freze kutusunun tepkisi [62]

Gök ve diğerlerinin çalışmasında, insansız hava araçlarındaki (İHA) titreşim sorunlarını çözmek amacıyla titreşim sönümleyicileri tasarlanmış ve katkı maddeli imalat yöntemleriyle üretilmiştir (Şekil 2.51). Çalışmada özellikle tek rotorlu döner kanatlı (monokopter) İHA'larda titreşim kaynakları incelenmiş ve farklı damper tasarımları test edilmiştir. G2S2, tasarlanan sönümleyiciler arasında en yüksek performansı gösteren modeldir. G2S2, 45° açılı plastik bir gövdeye (G2) ve konkav silikon sönümleme elemanına (S2) sahip bir kombinasyondan oluşmaktadır (diğer modeler: 90° açılı plastik gövde(G1), konveks silikon sönümleyici (S1), basamaklı silikon sönümleyici (S3), silindirik silikon sönümleyici (S4)). Bu damper, testlerde 3000 rpm'de X, Y, Z eksenlerinde sırasıyla %85, %84 ve %98 oranında, 4000 RPM'de %81, %84 ve %97, ve 5000 RPM'de ise %85, %84 ve %98 oranında sönümleme performansı titreşim sönümleme sağlayarak diğer tasarımlardan üstün bulunmuştur. G2S2'nin düşük ağırlıklı İHA'larda titreşim kontrolü için etkili bir çözüm olduğu belirlenmiş ve gelecekte gerçek uçuş senaryolarında test edilmesi önerilmiştir. Bu sonuçların, katkı maddeli imalat ile üretilen titreşim sönümleyicilerinin, İHA'larda verimli bir şekilde kullanılabileceğini gösterdiği ifade edilmiştir [63].



Şekil 2.51. Plastik damper gövdelerinin ve silikon sönümleme elemanlarının tasarımı ve eklemeli imalat süreci [63]

Blachowicz ve diğerleri, metal eklemeli imalatın uydu ve roket üretimindeki mevcut durumunu ve potansiyelini kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada, SLM, seçici elektron demeti ergitme (SEBM) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) gibi metal eklemeli imalat tekniklerinin uzay uygulamalarında nasıl kullanıldığı açıklanmıştır. Alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom gibi malzemeler üzerinde yapılan çalışmaların, bu yöntemlerle karmaşık ve hafif yapılar üretilebildiğini gösterdiği belirtilmiştir. Özellikle mikro uydular için iticiler, yapısal bileşenler ve antenler gibi parçaların eklemeli imalatla başarıyla üretilebildiği ifade edilmiştir. NASA'nın Inconel 718 alaşımı kullanarak geliştirdiği itici sistemlerinde üretim süresinin ve maliyetin azaldığı, ayrıca tasarım serbestliğinin arttığı rapor edilmiştir. AlSi10Mg alaşımından lazer ergitme yöntemiyle üretilen uydu bileşenlerinde %50'ye varan kütle azalımı sağlandığı ve Scalmalloy alaşımının yüksek yorulma dayanımıyla uzay endüstrisinde umut vadettiği belirtilmiştir. Ayrıca, 27–30 GHz frekanslarında test edilen AlSi10Mg anten besleme dizilerinin uzay görevleri için yeterli mekanik dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, metal eklemeli imalatın roket motoru bileşenleri, manyetik kalkanlar ve ısı yönetim sistemleri gibi pek çok uzay aracı parçasında uygulanabilir olduğu söylenmektedir. Bununla birlikte, yüzey

pürüzlülüğü ve mekanik dayanım konularında halen geliştirilmeye açık alanlar bulunduğu ifade edilmektedir [64].

Literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı ya statik yükleme koşulları altında yürütülmüş ya da laboratuvar ölçeğinde düşük frekanslı dinamik analizlerle sınırlı kalmıştır. Yüksek titreşimli savunma sistemlerine özgü hassas bileşenlerde, bu yöntemlerin sayısal ve deneysel bütünlükte uygulandığı bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu tez çalışması, söz konusu boşluğu doldurarak topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat yöntemlerini yüksek titreşim koşullarına maruz kalan AÖB tutucu bileşenine entegre bir yaklaşımla uygulamaktadır. Böylece hem tasarım hem üretim hem de test aşamaları tek bir çerçevede değerlendirilmekte; sonuç olarak, mevcut tasarımlara göre titreşim performansı artırılmış yeni bir yapı önerisi sunulmaktadır. Bu yönüyle tez, savunma uygulamalarına özgü bir bileşen üzerinde topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın yüksek titreşim koşulları altındaki performansına etkisini inceleyen ilk örneklerden biri olma niteliğindedir. Elde edilen sonuçların, hassas ölçüm sistemlerinin güvenilirliğini artırması ve yerli savunma sanayiinde optimizasyon temelli tasarım kültürünün gelişmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

3. KAVRAMSAL BİLGİLER

3.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat, katman bazlı üretim prensibine dayalı bir ileri imalat teknolojisidir. Bu yaklaşımda, üç boyutlu (3B) dijital model verisi kullanılarak fiziksel parçalar, malzeme eklenerek üretilir. Geleneksel talaşlı imalatın aksine, üretim sırasında malzeme çıkarılmaz; dolayısıyla malzeme israfı minimum seviyededir [65].

Eklemeli imalatın gelişimi, bilgisayar destekli tasarım sistemlerindeki ilerlemeler, yüksek güçlü lazerlerin ve kontrollü toz üretim tekniklerinin yaygınlaşmasıyla paralel olarak hız kazanmıştır. Günümüzde eklemeli imalat yalnızca prototip üretimi için değil, nihai fonksiyonel parçaların üretimi için de kullanılmaktadır. Bu yönüyle, "hızlı prototipleme" kavramından "hızlı üretim" anlayışına geçiş sağlanmıştır.

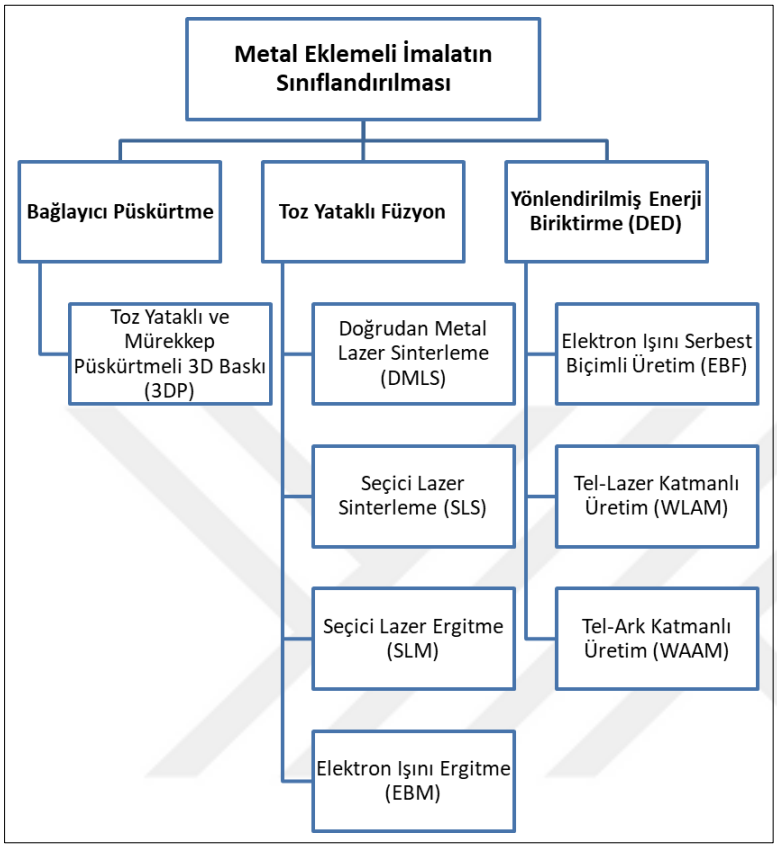
ASTM sınıflandırmasına göre eklemeli imalat; toz yatak füzyonu (ing. Powder Bed Fusion, PBF), yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED), bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, malzeme püskürtme, fotopolimerizasyon ve tabaka laminasyonu olmak üzere yedi ana kategoriye ayrılır [66]. Bu kategoriler, kullanılan enerji kaynağı, malzeme türü (metal, polimer, seramik) ve bağlama mekanizmasına göre farklılaşır.

3.2. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri

Metal eklemeli imalat, yüksek ergime sıcaklıklarına dayanıklı metallerin kontrollü biçimde katman katman birleştirilmesini sağlayan gelişmiş bir üretim yöntemidir. Bu teknoloji, özellikle havacılık, uzay, biyomedikal ve enerji sektörlerinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Karmaşık iç soğutma kanalları, kafes yapılar ve topoloji optimizasyonlu tasarımlar, metal eklemeli imalat sayesinde tek adımda üretilebilmektedir [67]. Şekil 3.1'de sunulan metal eklemeli imalat yöntemleri genel olarak üç ana sınıfa ayrılabilir:

- Toz yataklı füzyon: Metal tozlarının ince tabakalar halinde serilmesi ve seçici olarak ergitilmesi,
- Yönlendirilmiş enerji biriktirme: Tel veya toz formundaki malzemenin doğrudan ergitilerek biriktirilmesi,

- Bağlayıcı püskürtme (ing. Binder Jetting): Tozların bağlayıcı madde ile birleştirilip sinterlenmesi.



Şekil 3.1. Metal eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması [68]

Metal eklemeli imalat süreçlerinde ısı transferi, hızlı katılaşma ve faz dönüşümleri oldukça karmaşıktır. Bu durum, mikroyapıda ince taneli kolonel yapılar ve kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olur [69]. Parça kalitesi, enerji yoğunluğu, tarama stratejisi, katman kalınlığı ve soğuma hızına doğrudan bağlıdır.

3.2.1. Toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri

Toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri, metal eklemeli imalat teknolojileri arasında en yaygın kullanılan ve endüstriyel olarak en olgun yöntemlerdir. Bu teknolojide üretim, ince metal toz tabakalarının ardışık olarak serilmesi ve her katmanın belirli bölgelerinin yüksek yoğunluklu bir enerji kaynağı (lazer veya elektron ışını) ile eritilerek katılaştırılması esasına dayanır [66]. Katman tamamlandığında, üretim tablası belirli bir mesafe aşağıya iner ve yeni bir toz tabakası serilerek süreç tekrarlanır.

PBF yöntemleri, yüksek geometrik doğruluk ve yüzey kalitesi gerektiren parçaların üretiminde önemli avantajlar sunar. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi güç olan iç soğutma kanalları, kafes yapılar veya topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen kompleks geometriler bu yöntemle doğrudan üretilebilir [67]. Malzeme verimliliği de oldukça yüksektir; üretim sırasında kullanılmayan tozun büyük bir kısmı geri kazanılabilir. Bu yöntemde kullanılan enerji kaynağına göre sistemler iki alt sınıfa ayrılır:

- Lazer tabanlı sistemler: Üretim, yüksek güçlü bir lazer ışını kullanılarak gerçekleştirilir. Bu prensipte çalışan sistemler genellikle Seçici Lazer Ergitme (SLM) veya Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) olarak adlandırılır.
- Elektron ışını tabanlı sistemler: Enerji kaynağı olarak elektron demeti kullanılır. Elektron Işınıyla Ergitme (ing, Electron Beam Melting, EBM) yöntemi olarak bilinen bu süreç, vakum ortamında gerçekleştirilir. Vakum koşulları, özellikle titanyum ve zirkonyum gibi reaktif metallerin oksidasyonunu önleyerek yüksek saflıkta parçaların elde edilmesini sağlar.

Her iki sistemde de kullanılan toz malzemenin morfolojisi, partikül boyut dağılımı ve oksidasyon durumu, parça kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle küresel partikül geometrisine sahip tozlar, düzgün tabaka yayılımı ve homojen ergitme için tercih edilir [70].

Lazer tabanlı PBF süreçlerinde (örneğin SLM), lazer gücü, tarama hızı, tabaka kalınlığı ve iz genişliği gibi işlem parametreleri doğrudan yoğunluk ve yüzey kalitesini etkiler. Uygun olmayan parametreler, eksik ergime (lack of fusion) veya gözeneklilik (porozite) gibi üretim kusurlarına neden olabilir. Bu nedenle, işlem parametrelerinin optimizasyonu üretim başarısı için kritik öneme sahiptir [69].

Toz yataklı füzyon yöntemleriyle titanyum, nikel süperalaşımlar ve alüminyum alaşımları gibi çok çeşitli metaller başarıyla işlenebilmektedir. Özellikle AlSi10Mg alaşımı, düşük yoğunluğu ve yüksek dayanım/ağırlık oranı sayesinde havacılık ve otomotiv sektörlerinde tercih edilmektedir [51]. Bu alaşım, lazer toz yatak füzyon yöntemiyle üretildiğinde yüksek yoğunluk, düzgün yüzey kalitesi ve döküm alaşımlarına kıyasla üstün mekanik özellikler sergileyebilmektedir.

PBF yönteminin avantajları arasında yüksek geometri esnekliği, malzeme tasarrufu, parçaların tek adımda üretilebilmesi ve fonksiyonel özelleştirmeye olanak sağlaması sayılabilir. Ancak üretim hızı görece düşüktür ve süreç boyunca oluşan yüksek ısı gradyanları nedeniyle kalıntı gerilmeler, mikrogözenekler ve geometrik deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek ve parçaların mekanik performansını artırmak amacıyla ısıl işlem, gerilme giderme tavlaması, sıcak izostatik presleme (ing. Hot Isostatic Pressing – HIP) ve yüzey işleme gibi son işlem uygulamaları kullanılmaktadır.

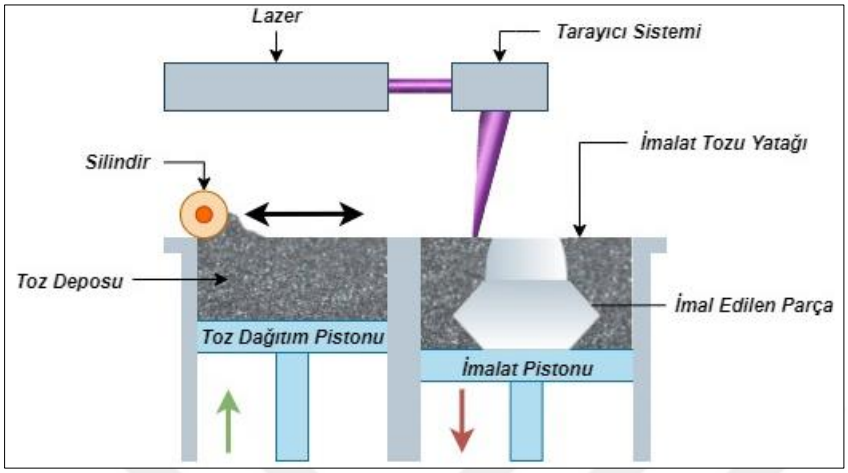
Günümüzde PBF sistemleri, birden fazla lazer kaynağını aynı anda kullanabilen çok-lazerli platformlar haline gelmiştir. Bu gelişme, üretim hızını artırmakta ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği güçlendirmektedir. Bununla birlikte, enerji yoğunluğu ve tarama stratejisinin otomatik optimizasyonu üzerine yapılan araştırmalar yöntemin gelecekteki gelişim yönünü belirlemektedir.

3.2.2. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi

Seçici lazer ergitme, toz yataklı füzyon yöntemleri arasında en yaygın kullanılan ve endüstriyel olgunluk düzeyi en yüksek eklemeli imalat tekniğidir. Bu yöntemde metal tozları, yüksek enerjili bir lazer ışını ile katman katman ergitilerek birleştirilir. Her katmanda yalnızca belirlenen bölgelerdeki toz partikülleri ergitilerek katılaşır ve bir önceki katmanla metalürjik bağ oluşturur. Süreç tamamlandığında, yüksek yoğunlukta ve karmaşık geometrilere sahip metal parçalar elde edilir [71].

Şekil 3.2'de seçici lazer ergitme üretim yöntemi şeması sunulmuştur. Üretim süreci, üretim tablası üzerine ince bir toz tabakasının bıçak veya rulo yardımıyla serilmesiyle başlar. Ardından lazer ışını, sayısal modelde tanımlanan bölgelerdeki toz partiküllerini seçici olarak ergitir. Oluşan eriyik havuzu hızla katılaşarak bir önceki katmanla bağ oluşturur. İşlem genellikle argon veya azot gazı atmosferinde yürütülür. Bu inert ortam, ergitme sırasında oksidasyonu önleyerek özellikle alüminyum ve titanyum gibi reaktif metallerin kimyasal saflığını korur. Argon gazı çoğunlukla yüksek saflık istenen uygulamalarda, azot ise daha az reaktif malzemelerde tercih edilir. Her katmanın taranması tamamlandığında, üretim platformu belirlenen katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni bir toz tabakası serilir. Bu döngü, parça tamamlanıncaya kadar sürdürülür. Üretim sonunda parça hala toz yatağı içerisindedir; etrafındaki kullanılmamış tozlar vakum veya hava üfleme sistemiyle

uzaklaştırılır ve geri kazanılır. Parça, üretim tablasından ayrıldıktan sonra destek yapıları temizlenir ve gerekirse yüzey düzeltme veya gerilme giderme işlemleri uygulanır [72-73].



Şekil 3.2. Seçici lazer ergitme üretim yöntemi şeması [74]

Parçanın yoğunluğu ve yüzey kalitesi, lazer gücü, tarama hızı, hat aralığı ve toz tabaka kalınlığı gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişir. Bu parametrelerin uygun biçimde seçilmesi, eriyik havuzunun kararlılığını ve katmanlar arası bağın sürekliliğini sağlar. Uygun olmayan parametreler gözenek oluşumuna, katman ayrılmasına veya yüzey bozukluklarına neden olabilir. Bu nedenle, üretim kalitesinin sürdürülebilmesi için parametre optimizasyonu sürecin kritik bir aşamasıdır [72].

SLM yöntemi, yüksek çözünürlük, malzeme verimliliği ve karmaşık geometrilerin üretimi açısından önemli avantajlar sunar. Titanyum, nikel, kobalt-krom ve alüminyum esaslı alaşımlar bu yöntemle başarıyla işlenebilmektedir. Özellikle AlSi10Mg alaşımı, yüksek özgül dayanımı, düşük yoğunluğu ve iyi yüzey kalitesiyle otomotiv ve havacılık sektörlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [51].

3.3. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, mühendislik tasarımında verilen bir tasarım alanı içerisinde malzeme dağılımını optimize ederek belirli bir performans kriterini (örneğin ağırlık, rijitlik veya doğal frekans) en iyi hale getirmeyi amaçlayan ileri düzey bir optimizasyon yöntemidir. Bu yaklaşım, geleneksel boyut ve şekil optimizasyonundan farklı olarak, tasarımın geometrik sınırlarını önceden belirlemez; böylece mühendislik sistemlerinin yenilikçi, hafif

ve yüksek performanslı biçimlerde yeniden tasarlanmasına olanak tanır [1]. Sonlu elemanlar analizi tabanlı sayısal yöntemlerin gelişimiyle birlikte, topoloji optimizasyonu modern tasarım sürecinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir.

Topoloji optimizasyonunun temel amacı, belirli kısıtlar altında (örneğin hacim, kütle veya malzeme miktarı) sistemin yapısal performansını maksimize etmektir. Bu süreç matematiksel olarak, malzeme yoğunluğunun sürekli bir değişken olarak ele alındığı bir optimizasyon problemi şeklinde tanımlanabilir. Tasarım alanı içerisindeki her noktaya atanan yoğunluk değişkeni, yapının hangi bölgelerinin dolu (malzeme var) veya boş (malzeme yok) olacağını belirler. En yaygın kullanılan formülasyonlardan biri, SIMP yöntemidir. Bu yöntemde, her sonlu eleman 0 ile 1 arasında bir yoğunluk değerine sahiptir ve penalizasyon katsayısı aracılığıyla ara yoğunlukların fiziksel olarak anlamlı olmayan çözümler üretmesi engellenir [75]. Böylece malzeme, belirli bir tasarım alanı içinde optimum biçimde dağıtılır.

Topoloji optimizasyonu kapsamında geliştirilen bir diğer önemli yaklaşım seviye küme yöntemidir. Bu yöntemde tasarımın sınırları, sürekli bir seviye küme fonksiyonunun sıfır seviyesiyle tanımlanır ve sınırın evrimi türev tabanlı optimizasyon algoritmalarıyla kontrol edilir [76]. Bu yaklaşım, keskin kenarların ortadan kaldırılmasına ve üretime uygun daha pürüzsüz geometrilerin elde edilmesine olanak tanır. Buna ek olarak, evrimsel yapısal optimizasyon yöntemi de literatürde önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemde düşük katkı sağlayan elemanlar iteratif olarak kaldırılarak sistem, adım adım daha verimli bir yapıya doğru evrilir [77]. Evrimsel yöntemler kavramsal olarak daha sezgisel olup, özellikle karmaşık tasarım problemlerinde başlangıç noktası olarak tercih edilmektedir.

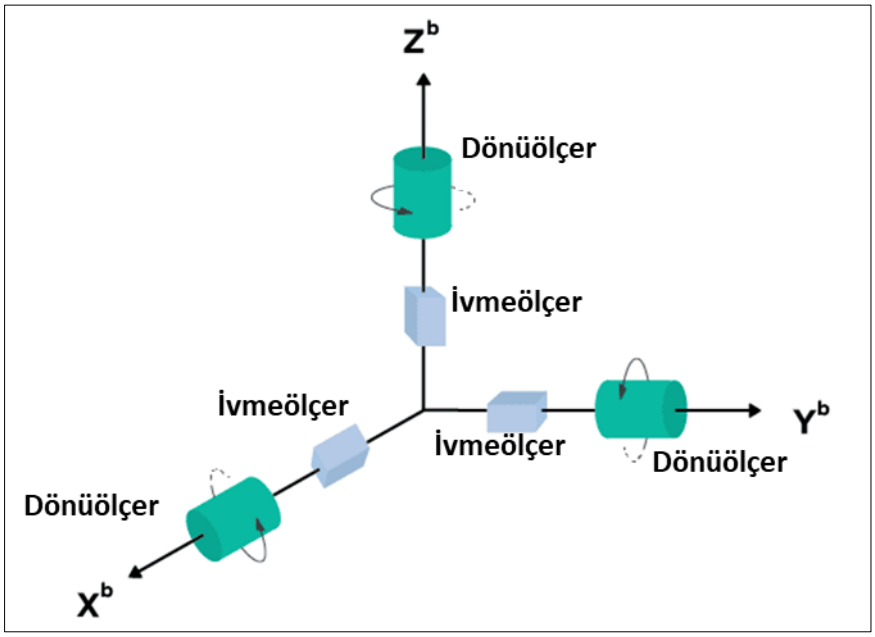
Topoloji optimizasyonu yalnızca teorik bir kavram olmaktan çıkmış, birçok endüstriyel alanda uygulama bulmuştur. Otomotiv sektöründe şasi ve taşıyıcı sistem bileşenlerinin hafifletilmesinde, havacılık ve uzay mühendisliğinde yüksek mukavemetli ve düşük ağırlıklı yapılar tasarlamada, biyomedikal mühendislikte ise protez ve implantların biyomekanik performansını iyileştirmede kullanılmaktadır. Ayrıca eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimi, topoloji optimizasyonunun önemini daha da artırmıştır; çünkü karmaşık ve geleneksel üretimle imkansız olan geometrilerin üretilmesi mümkün hale gelmiştir [65].

Son yıllarda topoloji optimizasyonuna yönelik araştırmalar, hesaplama verimliliğini artırmak ve çözüm süresini kısaltmak amacıyla yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlarla birleştirilmektedir. Bu hibrit yöntemler, optimizasyon sürecinin daha hızlı yakınsamasını sağlamakta ve başlangıç koşullarına olan bağımlılığı azaltmaktadır [78]. Dolayısıyla, topoloji optimizasyonu günümüzde yalnızca bir mühendislik aracı değil, aynı zamanda hesaplamalı tasarımın geleceğini şekillendiren disiplinler arası bir araştırma alanı haline gelmiştir.

3.4. Ataletsel Ölçüm Birimleri (AÖB)

Ataletsel ölçüm birimleri (ing. Inertial Measurement Unit – IMU), bir cismin üç boyutlu uzaydaki doğrusal ivmesini ve açısal hızını ölçen sensör sistemleridir. Genellikle üç eksende yerleştirilmiş ivmeölçer (ing. accelerometer) ve dönüölçer (ing. gyroscope) sensörlerinden oluşur. Bazı sistemlerde bu iki sensöre ek olarak manyetometre de entegre edilir. Bu yapı sayesinde AÖB, bir cismin hareketini, hızını ve yönelimini dış bir referansa ihtiyaç duymadan belirleyebilir [79].

Şekil 3.3'te, üç eksenli bir AÖB yapısında ivmeölçer ve dönüölçer sensörlerinin eksenler boyunca konumlandırılması gösterilmiştir. Her eksen (X, Y, Z), sistemin üç boyutlu hareket bileşenlerinin algılandığı yönleri temsil eder.



Şekil 3.3. Üç eksenli ataletsel ölçüm biriminde ivmeölçer ve dönüölçer yerleşimi [80]

AÖB'ler, ataletsel navigasyon sistemlerinin (ing. Inertial Navigation Systems - INS) temel bileşenidir. Bu sistemlerde ivmeölçerler cismin doğrusal ivmesini, dönüölçerler ise eksenler etrafındaki açısal hız bileşenlerini ölçer. Sensörlerden elde edilen bu veriler, gömülü bir işlemci tarafından sürekli olarak toplanır ve zamanla entegre edilerek cismin konum, hız ve yönelim bilgileri hesaplanır. Böylece küresel konumlama sistemi (ing. Global Positioning System, GPS) veya diğer dış konum referansları olmaksızın hareket izlenebilir [79,81].

3.4.1. AÖB çalışma prensibi

Bir AÖB'nin çalışma prensibi Newton'un ikinci hareket yasası ve dönme dinamiği ilkelerine dayanır. İvmeölçerler doğrusal ivmeyi, dönüölçerler ise açısal hızı ölçer. Ölçülen veriler, gövde koordinat sisteminde sürekli olarak alınır ve mikrodenetleyici tarafından filtrelenip entegre edilerek cismin hız ve konum bilgisi elde edilir [79].

Bu hesaplamalar sırasında sensörlerden kaynaklanan hata birikimlerini azaltmak amacıyla sensör füzyonu yöntemleri kullanılır. En yaygın yaklaşım, ivmeölçer ve dönüölçer verilerinin Kalman süzgeci veya komplemanter filtre gibi algoritmalarla birleştirilmesidir. Böylece kısa vadede yüksek doğruluk sağlayan dönüölçer verileri, uzun vadede kararlı olan ivmeölçer verileriyle dengelenir. AÖB sistemlerinde kalibrasyon ve hata modellemesinin uzun süreli kararlılık açısından kritik öneme sahip olduğunu belirtilmektedir [81].

3.4.2. AÖB kullanım alanları

Ataletsel ölçüm birimleri, birçok sektörde farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Başlıca uygulama alanları aşağıda özetlenmiştir:

- Havacılık ve uzay: Uçak, helikopter ve uzay araçlarında yönelim kontrolü, ataletsel navigasyon ve stabilizasyon amacıyla kullanılır.
- Otonom sistemler ve robotik: İnsansız hava araçları, otonom kara araçları ve robotlarda hareket takibi ve konum kestirimi sağlar.
- Savunma sanayi: Füze, tanksavar ve stabilize platformlarda yönelim tespiti ve hedef takibinde kullanılır.
- Denizcilik ve haritalama: Gemi, denizaltı ve harita oluşturma sistemlerinde su altı navigasyonu ve denge kontrolü sağlar.

- Tüketici elektroniği: Akıllı telefonlar, oyun konsolları ve giyilebilir teknolojilerde hareket tanıma ve eğim ölçümü görevlerinde yer alır.
- Endüstriyel otomasyon: Makine titreşimi izleme, hareket denetimi ve proses kontrolü gibi uygulamalarda kullanılır [79].

3.4.3. Titreşimlerin AÖB performansına etkisi

AÖB performansını etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biri titreşimdir. Yüksek seviyeli titreşimler sensörlerin algıladığı sinyallere parazit ekleyerek ölçüm doğruluğunu azaltır ve sensör kalibrasyonunu bozabilir. Bu durum özellikle motorlu araçlar, insansız hava araçları ve endüstriyel makineler gibi titreşimli ortamlarda belirgindir [82].

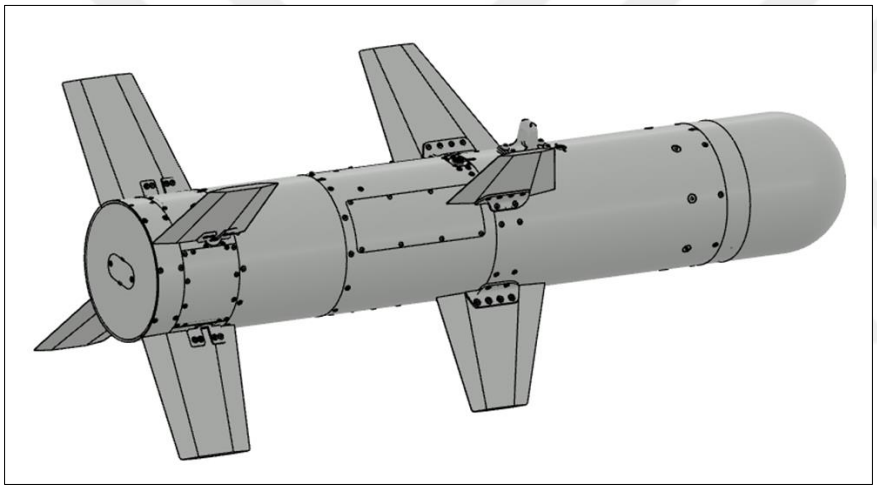
Titreşim etkilerini azaltmak için AÖB'ler genellikle titreşim sönümleme elemanları üzerine monte edilir. Bu elemanlar, yüksek şiddetteki titreşimleri sönümleyerek sensörlerin gerçek hareketi algılamasını sağlar. Inertial Labs, elastomer tabanlı izolatörlerin bu tür sistemlerde ölçüm kararlılığını artırdığını ve sensör ömrünü uzattığını belirtmektedir [83]. NovAtel ise titreşim kontrolünün hem donanımsal (izolatör, montaj geometrisi) hem de yazılımsal (filtreleme algoritmaları) düzeyde ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır [82].

Sonuç olarak, titreşim kontrolü AÖB sistemlerinin güvenilirliği için kritik önemdedir. Uygun mekanik izolasyon, montaj tasarımı ve veri filtreleme teknikleri, hem ölçüm doğruluğunu hem de sistem ömrünü önemli ölçüde artırır [81].

4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ANALİZ

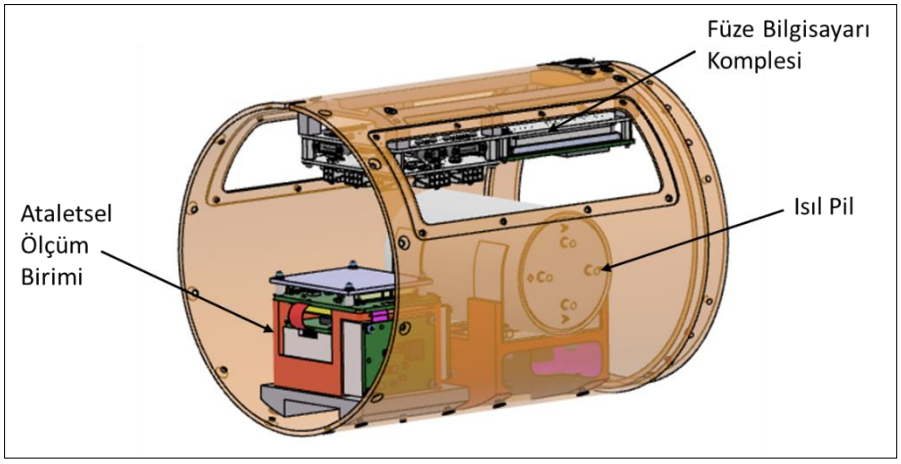
4.1. Sistemin Tanımlanması

Hava platformları tarafından taşınarak sevk ve ateşleme işlemi gerçekleştirilen güdümlü mühimmatlar, savunma sistemlerinde kullanılan ve hem yüksek etkinlik hem de hassas vuruş kabiliyeti sunan ileri teknolojik sistemlerdir. Bu mühimmatların mimarisi genellikle lazer arayıcı başlık, harp başlığı, güdüm bölümü ve kontrol sistemi olmak üzere birbirleriyle entegre çalışan ana bileşenlerden meydana gelir. Tez kapsamında incelenen güdümlü mühimmat Şekil 4.1'de sunulmuştur.



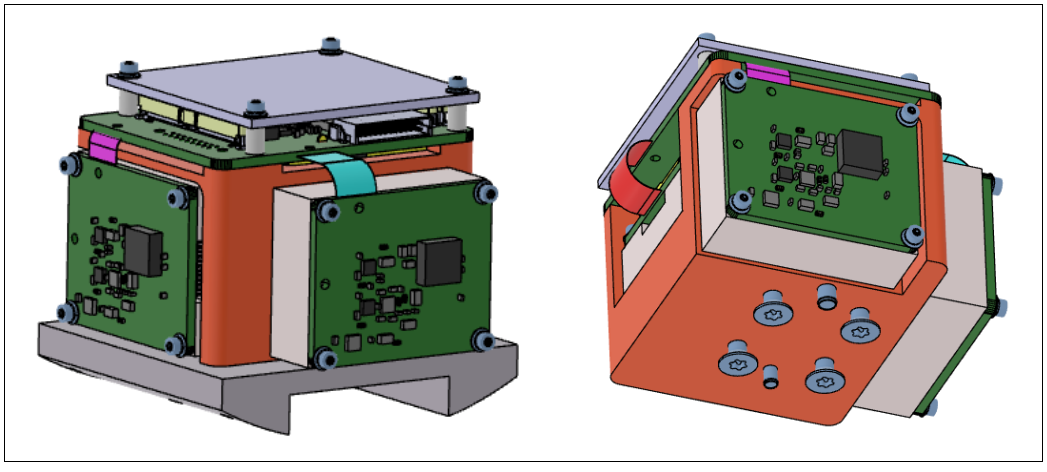
Şekil 4.1. Güdümlü mühimmat

Güdümlü füzenin temel alt sistemlerinden biri olan güdüm bölümü, hedef konumu ile ataletsel sensörlerden elde edilen verilerin toplanması, bu verilerin önceden tanımlanmış uçuş kontrol algoritması aracılığıyla işlenmesi ve elde edilen sonuçlara göre kontrol yüzeylerinin konumlandırılması için gerekli kumanda sinyallerinin üretilmesi işlevlerini yerine getirmektedir. Bu bölüm, ataletsel ölçüm birimi, enerji kaynağı olarak kullanılan ısıl pil, uçuş hesaplamalarının yürütüldüğü füze bilgisayarı, bu bileşenlerin bütünlüğünü sağlayan mekanik tutucular ve dış gövdeden oluşmaktadır. Güdüm bölümünün mekanik yapısı ve bileşenlerin yerleşim düzeni Şekil 4.2'de sunulmuştur.

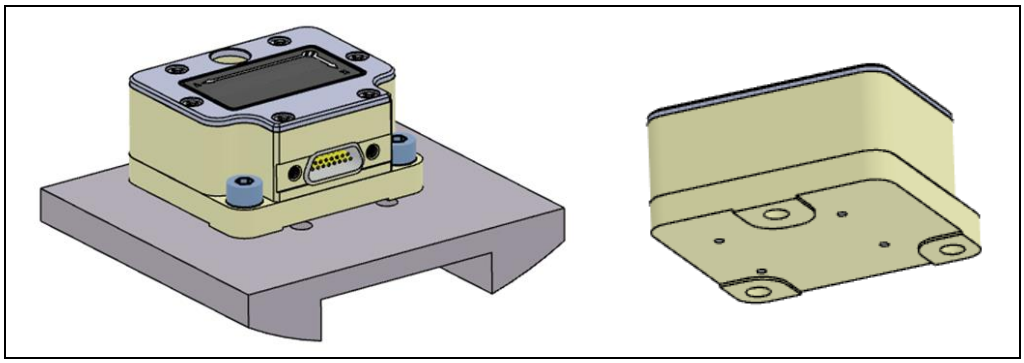


Şekil 4.2. Güdümlü mühimmat güdüm bölümü mekanik yapısı

Ataletsel ölçüm birimi, güdümlü füzenin uzaydaki konumlanma ve yönelim bilgilerini sağlamak üzere doğrusal ivmeler ile açısal hızları yüksek doğrulukta ölçen sensör dizisidir; tipik olarak ivmeölçerler ve jiroskoplardan oluşur. AÖB tarafından üretilen ham ataletsel veriler, füze bilgisayarınca entegrasyon ve uygun filtreleme yoluyla işlenerek görev sırasında anlık tutum, hız ve konum tahminlerinin elde edilmesinde kullanılır. Bu bilgiler, güdüm ve kontrol algoritmalarına doğrudan geri besleme sağlayarak kontrol yüzeylerinin doğru zamanlı komutlarla yönlendirilmesini mümkün kılar. Bu tez kapsamında incelenen güdümlü füzede aynı amaçla iki farklı AÖB birbirleriyle muadil olarak kullanılmaktadır. Bu AÖB'ler ve tutucu parçasıyla arayüzleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.

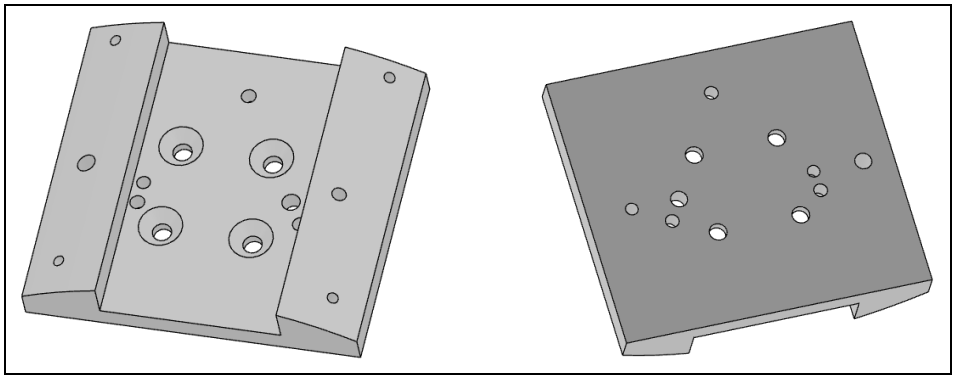


Şekil 4.3. Ataletsel ölçüm birimi-1 (AÖB-1)

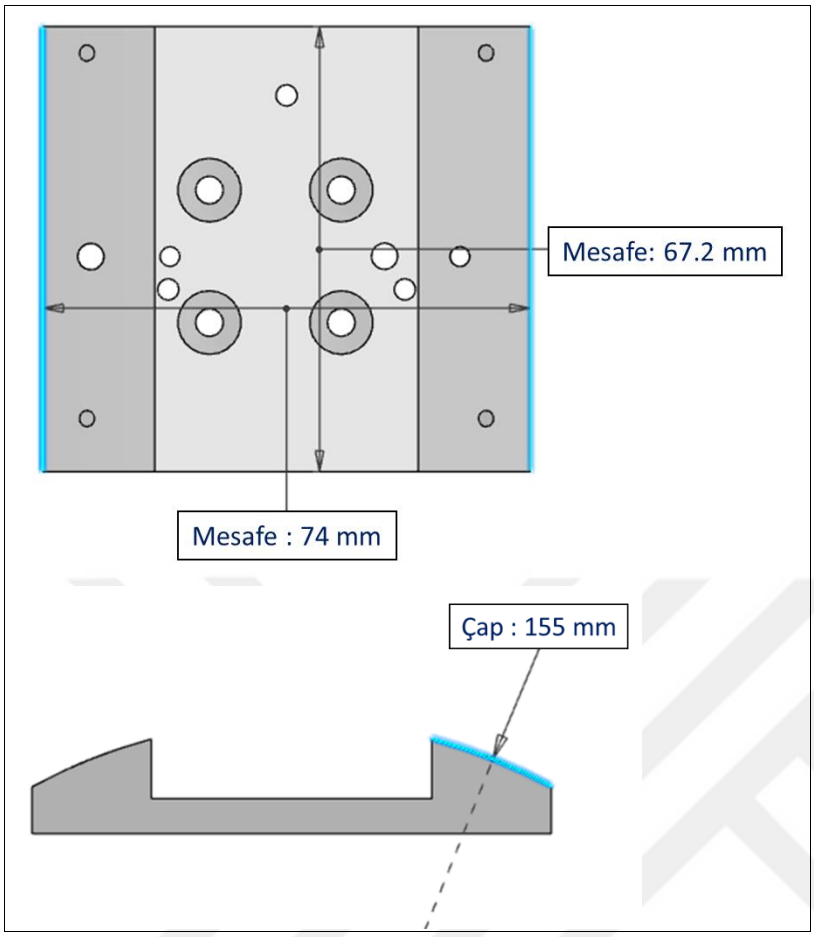


Şekil 4.4. Ataletsel ölçüm birimi-2 (AÖB-2)

Güdümlü mühimmatlarda AÖB'nin rolü kritik önem taşımaktadır, ancak hava platformları tarafından taşınan güdümlü mühimmatlar, maruz kaldıkları yüksek düzeyde titreşim ve yapısal sarsıntılar sonucu rezonans koşullarına girebilmekte; bu durum AÖB ölçümlerinde bozulmalara sebep olabilmektedir. Bu sebeple AÖB'nin maruz kaldığı titreşimlerin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, tez kapsamında AÖB'yi gövdeye bağlayan tutucu parçanın titreşim sönümleme özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışılmıştır. İncelenen mühimmatta kullanılan iki farklı AÖB için ortak bir tutucu parça kullanılmakta olup, söz konusu tutucuda her iki AÖB'nin montajına uygun arayüzler mevcuttur. Bu arayüzler; AÖB-1'in cıvata bağlantı ve pim deliklerini, AÖB-2'nin cıvata bağlantı deliklerini ve gövdeye ait cıvata bağlantı ile pim deliklerini kapsamaktadır. AÖB tutucu parçasını ve arayüzlerini gösteren görseller Şekil 4.5'te sunulmuştur. AÖB-1'in tutucu parçaya montajında havşa başlı M4x8 cıvata, AÖB-2'nin tutucu parçaya montajında ise silindirik başlı M4x12 cıvata kullanılmaktadır. Tutucu parçanın gövdeye bağlantısı havşa başlı M3x6 cıvatalar ile sağlanmaktadır. Tutucu parça, iç çapı 155 mm olan silindirik gövde içerisine yerleştirilmekte olup, en ve boy ölçüleri sırasıyla 67,2 mm ve 74 mm'dir (Şekil 4.6). Parçanın ağırlığı 98 gramdır.



Şekil 4.5. Mevcut AÖB tutucu parçası



Şekil 4.6. AÖB tutucu parçası ölçü bilgileri

4.2. Malzeme Bilgileri

AÖB tutucu parçası T6 sınıfı temperlenmiş AL6061 kodlu alüminyum alaşımından talaşlı imalat ile üretilmektedir. Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yeni tasarım parça ise, AlSi10Mg toz malzemeden, eklemeli imalat yöntemi kapsamında SLM tekniği kullanılarak üretilmiştir. Malzemelere ait mekanik özellikler ve mukavemet değerleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Malzeme mekanik özellikleri [84-86]

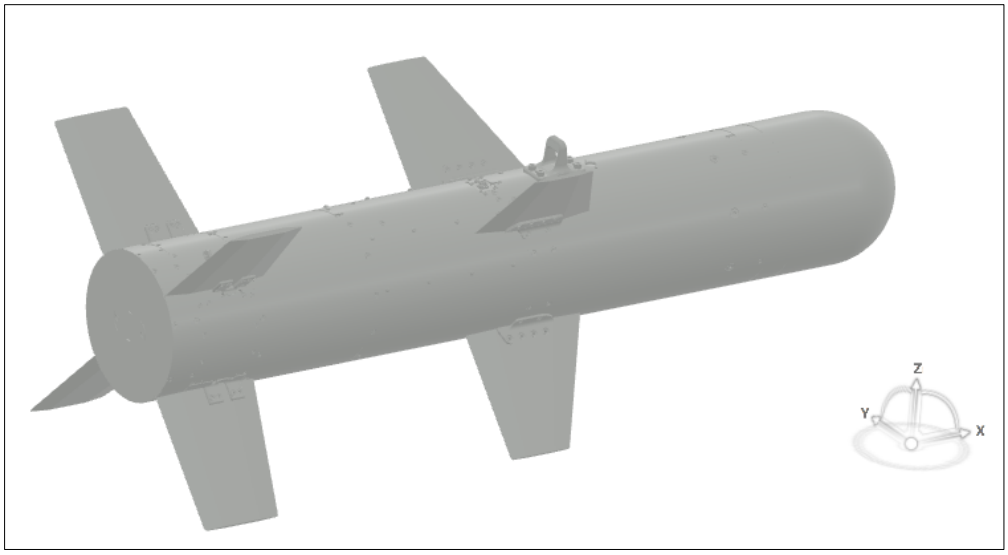
Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (g/cm^3)
AL6061-T6	68,9	0,33	2,70
AlSi10Mg (SLM)	70	0,33	2,64

Çizelge 4.2. Malzeme mukavemet değerleri [84-86]

Malzeme	-	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
AL6061-T6	-	276	310
AlSi10Mg (SLM)	Dikey Yönde	230	430
	Yatay Yönde	250	400

4.3. Yük Koşulları

Tez kapsamında ele alınan güdümlü mühimmatın, her bir eksende ±5 g ivme seviyesindeki yük koşulları altında görev yapabilme gereksinimi bulunmaktadır. Bu gereksinim, mühimmatın görev süresi boyunca karşılaşabileceği manevra kaynaklı dinamik etkiler karşısında yapısal bütünlüğünü koruması açısından önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen testler sonucunda, mühimmatın operasyon sırasında yaklaşık 2 g seviyelerine kadar titreşim yüklerine maruz kaldığı tespit edilmiştir. Bu titreşimler genellikle 500 Hz altındaki frekans aralığında meydana gelmektedir. Elde edilen yük koşulları Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Mühimmatın eksen yönlerini gösteren koordinat sistemi Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Füzenin koordinat sistemi

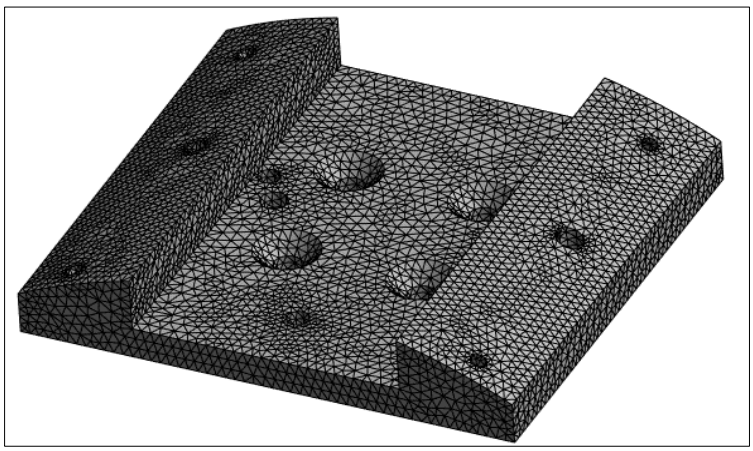
Çizelge 4.3. Güdümlü mühimmat yük koşulları

Yük Koşulları	Eksen	Yük Değeri
Yapısal Yükler	X	±5 g
	Y	±5 g
	Z	±5 g
Titreşim Yükleri	X	±2 g
	Y	±2 g
	Z	±2 g

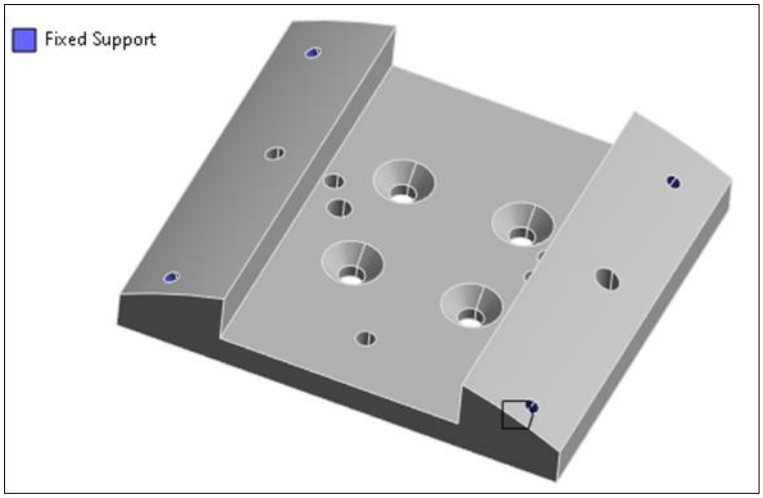
4.4. Mevcut AÖB Tutucu Analizleri

4.4.1. Mevcut tutucu modal analiz

Çalışma kapsamında ilk olarak mevcut AÖB tutucu parçası üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler ANSYS yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Model için oluşturulan ağ (ing. mesh) yapısı Şekil 4.8'de sunulmuştur. 1,4 mm eleman boyutu girdisiyle oluşturulan ağ yapısı toplamda 96 403 tetrahedral elemandan meydana gelmektedir. Analiz sürecinde, tutucu parçanın gövdeye bağlantısını sağlayan cıvata delikleri ankastre sınır koşulu (ing. fixed support) olarak tanımlanmış ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Parçaya Al6061 malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Analiz modeline ilişkin görsel Şekil 4.9'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.8. Mevcut tutucu modal analizi ağ yapısı

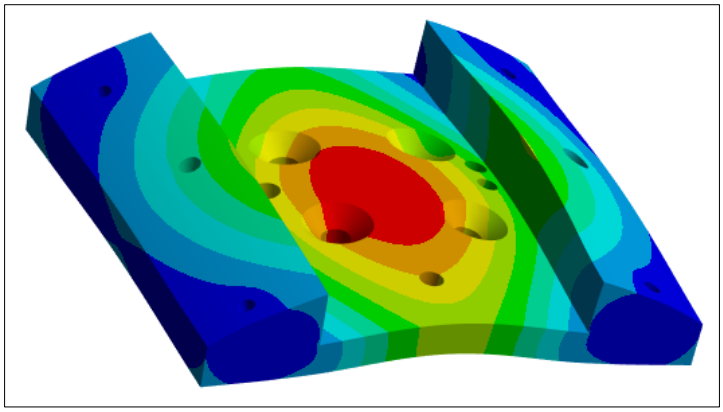


Şekil 4.9. Mevcut tutucu modal analiz modeli

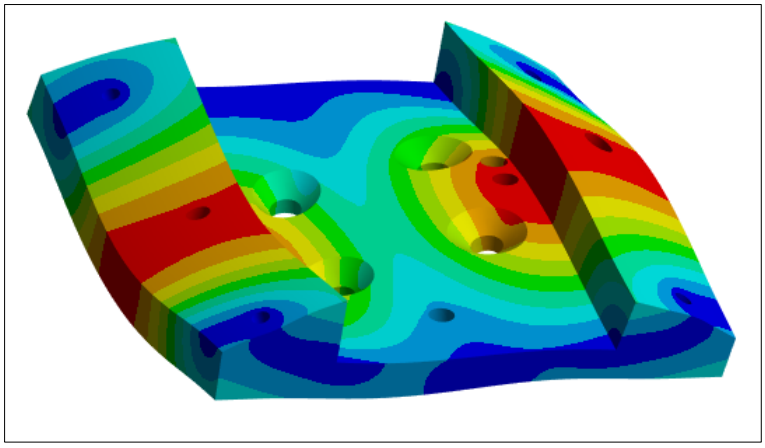
Analiz sonucunda, parçanın ilk altı doğal frekansı ile bu frekanslara karşılık gelen mod şekilleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, doğal frekansların 7289 Hz ile 15 916 Hz aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Doğal frekans değerlerinin tamamı Çizelge 4.4'te, ilgili mod şekilleri ise Şekil 4.10 – Şekil 4.15 arasında sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Mevcut tutucu doğal frekans değerleri

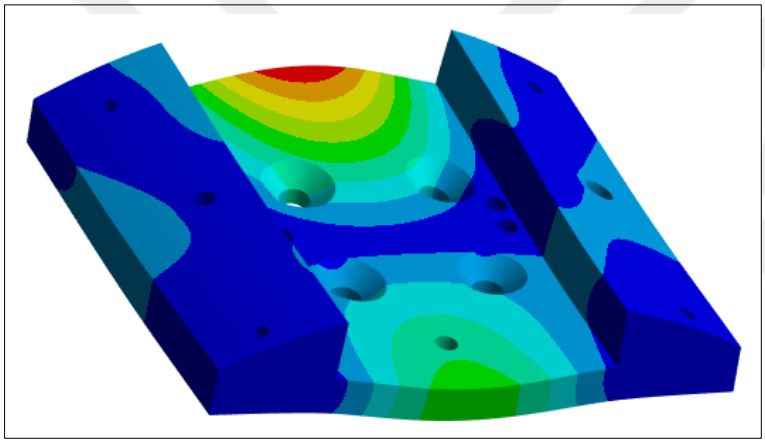
Mod	Frekans (Hz)
1	7 289
2	10 544
3	10 661
4	11 330
5	14 593
6	15 916



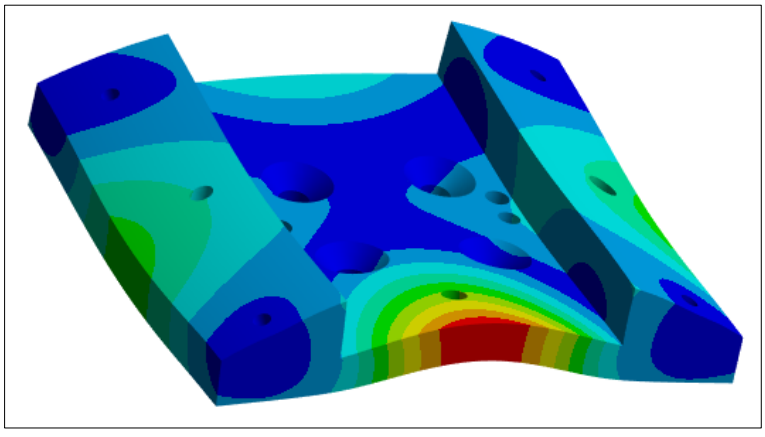
Şekil 4.10. Mevcut tutucu 1. mod şekli



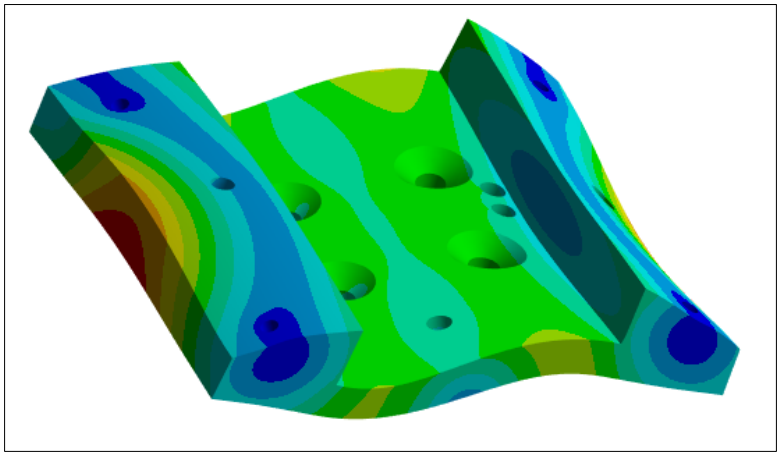
Şekil 4.11. Mevcut tutucu 2. mod şekli



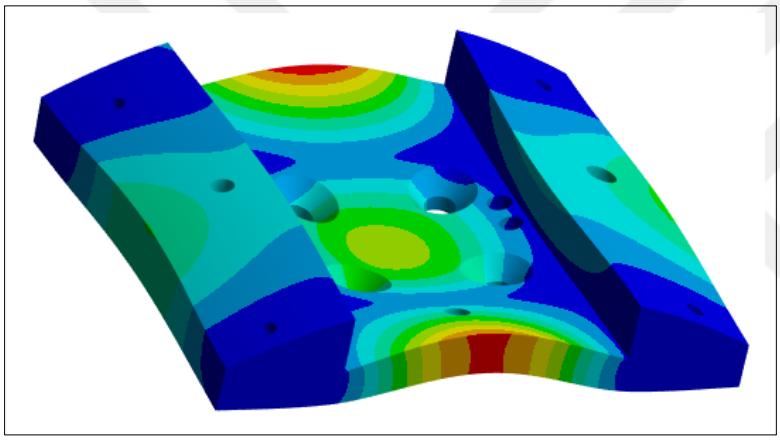
Şekil 4.12. Mevcut tutucu 3. mod şekli



Şekil 4.13. Mevcut tutucu 4. mod şekli



Şekil 4.14. Mevcut tutucu 5. mod şekli



Şekil 4.15. Mevcut tutucu 6. mod şekli

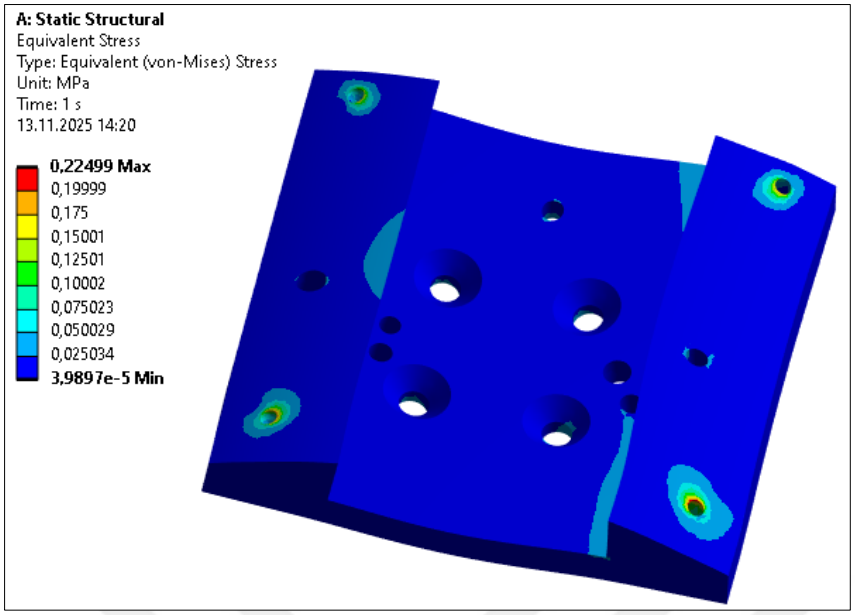
Parçanın modal davranışı, ankastre kabul edilen dört sabitleme noktasının etkisiyle büyük ölçüde orta yüzey ve serbest kenarlar üzerinde yoğunlaşmıştır. İlk modda gözlenen belirgin global bükülme davranışı yapının en baskın titreşim karakteristiğini ortaya koyarken, ikinci modda yan blokların zıt fazlarda hareket ettiği bir burulma modu ortaya çıkmıştır (Şekil 4.10, Şekil 4.11). Bu burulma modu, yapının sol ve sağ yan bloklarında hafif de olsa bir rijitlik asimetrisi bulunduğunu göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü modlar, sırasıyla üst ve alt yüzeylerde yoğunlaşan lokal bükülme davranışlarını temsil etmektedir; bu durum ilgili yüzey bölgelerinin global modlara kıyasla daha düşük lokal rijitliğe sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4.12, Şekil 4.13). Beşinci ve altıncı modlarda ise, çoklu düğüm noktaları içeren daha karmaşık global titreşim biçimleri görülmüş; özellikle altıncı modda üst ve alt kenarların yüksek deplasman üretmesi, bu bölgelerin orta yüzeyden daha esnek olduğunu teyit etmiştir (Şekil 4.14, Şekil 4.15).

Bu modal davranışların parçanın titreşim sönümleme karakteristiği açısından anlamı değerlendirildiğinde, özellikle yüksek rijitliğe sahip bölgelerde titreşim genliğinin daha hızlı azaldığı, buna karşın lokal bükülme modlarının yoğunlaştığı yüzey bölgelerinde titreşim enerjisinin daha uzun süre korunabileceği anlaşılmaktadır. Tutucunun genel mod şekilleri, sistemin malzeme bazlı sönümleme mekanizmasının özellikle geniş yüzeyli ve kalın kesitli bölgelerde daha etkin olduğunu, buna karşın ince kesitli yahut delik çevresi gibi geometrik süreksizlik içeren alanlarda sönümleme kapasitesinin görece düşük olabileceğini işaret etmektedir. Ayrıca, üst ve alt kenarlarda ortaya çıkan yüksek frekanslı lokal modlar, bu bölgelerde titreşim enerjisinin sistemden atılmasının daha zor olduğunu, dolayısıyla yerel titreşim kalıcılığı açısından kritik bölgeler olduğunu göstermektedir. Yan blokların tüm modlarda düşük deplasman göstermesi, sınır koşullarına yakın bölgelerde hem rijitliğin hem de sönümleme etkisinin yüksek olduğunu doğrulamaktadır.

Genel olarak modal analiz sonuçları, lokal modlarda oluşan yüzey bazlı bükülme davranışlarının, sönümleme açısından daha zayıf bölgelerde titreşim enerjisinin daha uzun süre kalmasına neden olabileceği görülmektedir. Bu nedenle özellikle üst ve alt kenar bölgelerinde sönümleme artırıcı yapısal iyileştirmeler yapılması, bileşenin dinamik performansını optimize etmek açısından fayda sağlayacaktır.

4.4.2. Mevcut tutucu statik analiz

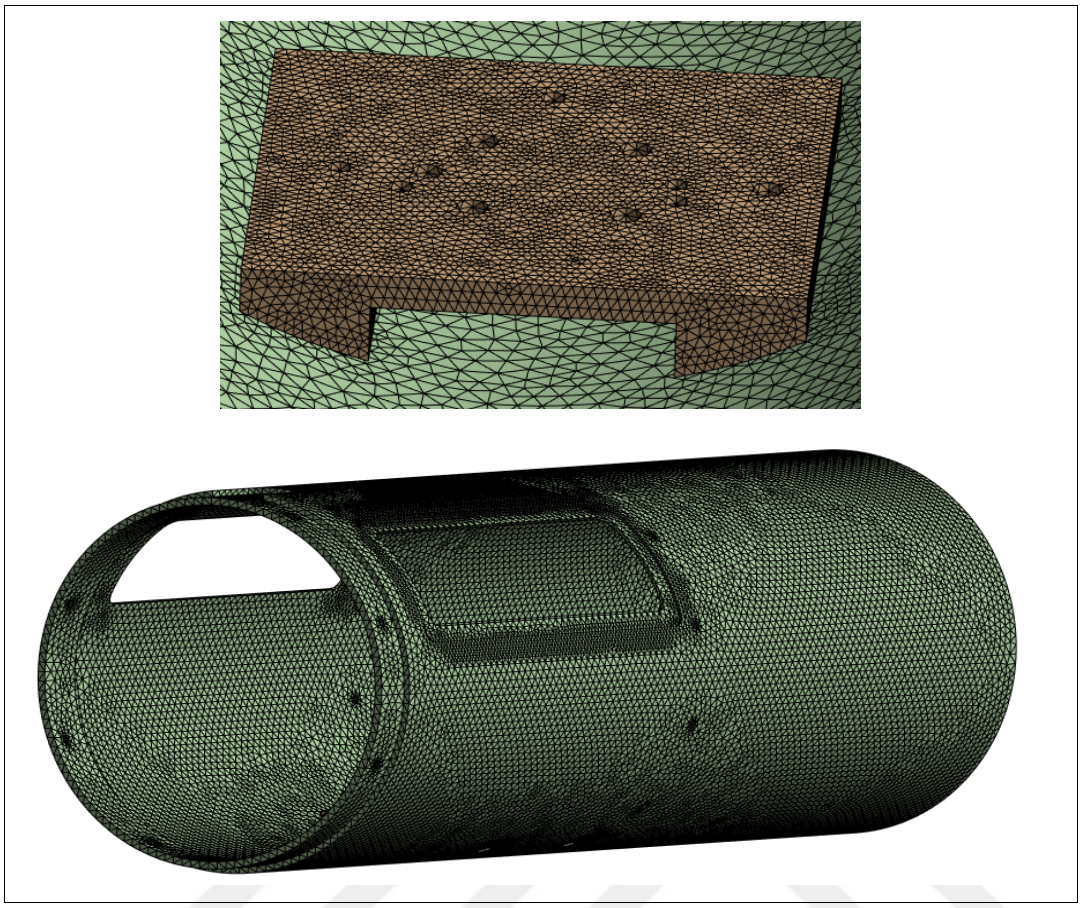
Mevcut tutucunun en yüksek yükler altındaki dayanımını değerlendirmek amacıyla, modal analiz için oluşturulan modele ek olarak statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde, X, Y ve Z yönlerinde eş zamanlı olarak 5 g ivme yükü uygulanarak en kötü durum senaryosu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, maksimum eşdeğer gerilme değeri 0,22 MPa seviyesindedir ve statik açıdan kritik bir durum bulunmamaktadır. Analiz sonuçları Şekil 4.16’da sunulmuştur.



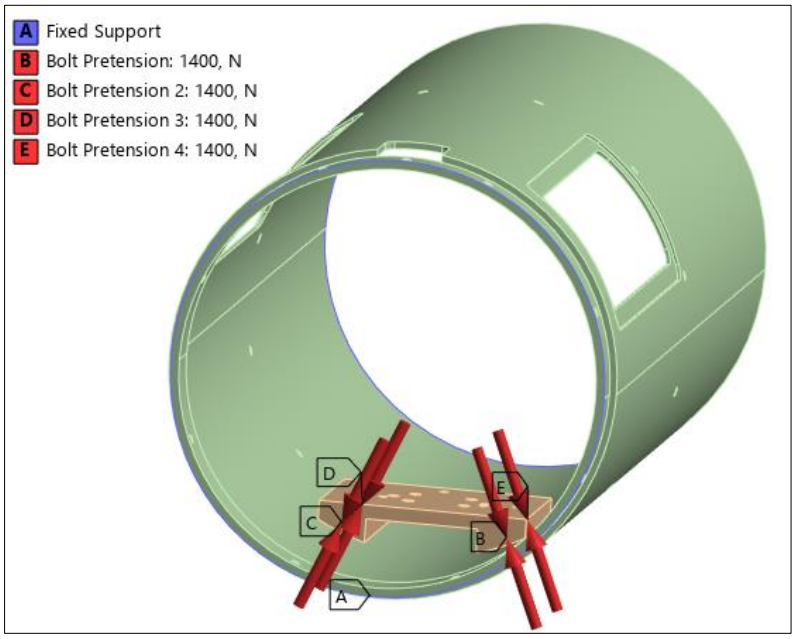
Şekil 4.16. Mevcut tutucu statik analiz sonucu; eşdeğer gerilme

4.4.3. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi

Mevcut tutucunun titreşim sönümleme özelliklerini incelemek amacıyla ANSYS yazılımında harmonik tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, daha doğru sonuçlar elde etmek için tutucunun bağlandığı gövde de modele dahil edilmiştir. Gövde ile tutucu parça arasındaki temas, ayrılma olmaksızın temas (ing. no separation) tipi olarak tanımlanmıştır. Analiz kapsamında cıvatalar kiriş (ing. beam) eleman olarak modellenmiş ve her birine 1400 N büyüklüğünde ön gerilme kuvveti (ing. bolt pretension) uygulanmıştır. Gövdenin uç kısımlarına ise sabit sınır koşulu tanımlanmıştır. Her iki parçaya da Al6061 malzeme özellikleri tanımı yapılmıştır. Ağ yapısının oluşturulmasında, gövde için 4 mm, tutucu parça için ise 1,4 mm eleman boyutu tanımlanmıştır. Bu parametrelerle oluşturulan ağ yapısı toplamda 232 562 tetrahedral elemandan meydana gelmiştir. Bu girdilerle ilk olarak modal analiz çözdürülmüştür. 2000 Hz'e kadar parçanın titreşim özelliklerini incelemek amacıyla ilk 15 modu çıkarılmıştır. Ağ yapısı Şekil 4.17'de, analiz modeli Şekil 4.18'de ve bu modele ait doğal frekans değerleri Çizelge 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.17. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi ağ yapısı

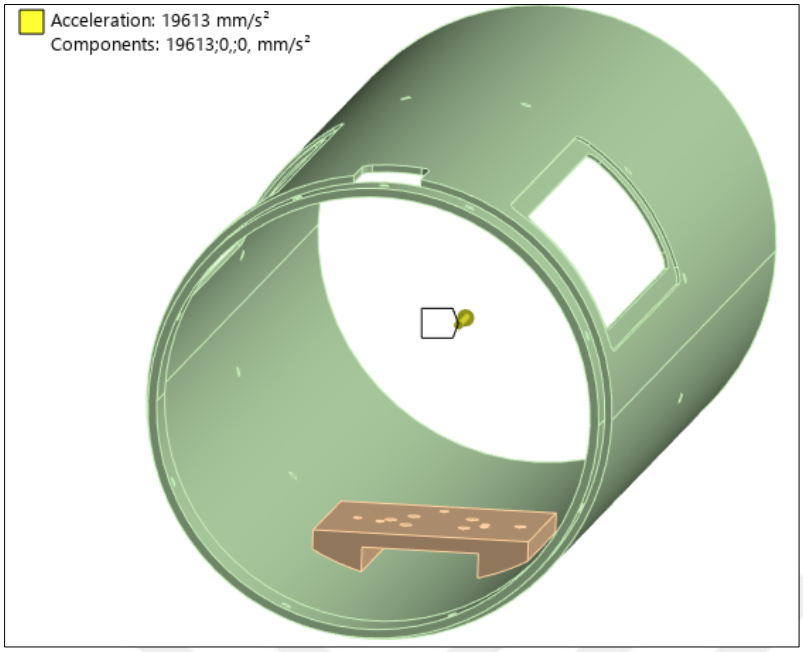


Şekil 4.18. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi modeli – 1

Çizelge 4.5. Mevcut tutucu ve gövde modal analizi doğal frekans değerleri

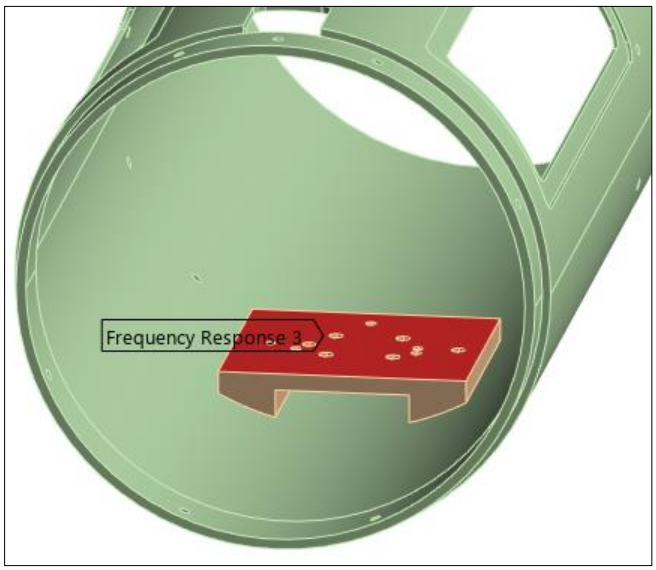
Mod	Frekans (Hz)
1	755
2	872
3	874
4	943
5	1118
6	1161
7	1270
8	1440
9	1502
10	1610
11	1789
12	1804
13	1893
14	1903
15	1966

Modal analiz tamamlandıktan sonra, harmonik tepki analizi modülü bu sonuçlara bağlanarak çalışma sürdürülmüştür. Analizlerde, 2 g ivmeye karşılık gelen 19613 mm/s² büyüklüğünde ivme yükü, X, Y ve Z eksenlerinde sinüzoidal olarak ayrı ayrı uygulanmıştır. Eksen takımı mühimmatın eksen takımı ile aynıdır. Frekans aralığı 0–2000 Hz olarak belirlenmiştir. Çalışmada sönüm oranı (ing. damping ratio) olarak 0,01 (%1) değeri tanımlanmıştır. Literatürde alüminyum üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, bu yapıların sönüm oranlarının ortalama olarak yaklaşık %1 civarında olduğunu göstermektedir. Bu nedenle alüminyum alaşımları, dinamik analizlerde yaygın olarak %1 seviyesinde sönüm ile modellenmekte ve bu yaklaşım mühendislik uygulamalarında kabul görmüş bir pratik olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada %1 değerinin tercih edilmesi, hem malzemenin deneysel olarak gözlemlenen dinamik özellikleriyle hem de literatürde yer alan genel mühendislik kabulleriyle uyumlu bir seçimdir [87-89]. Analiz modeline ilişkin görsel Şekil 4.19'da sunulmuştur.

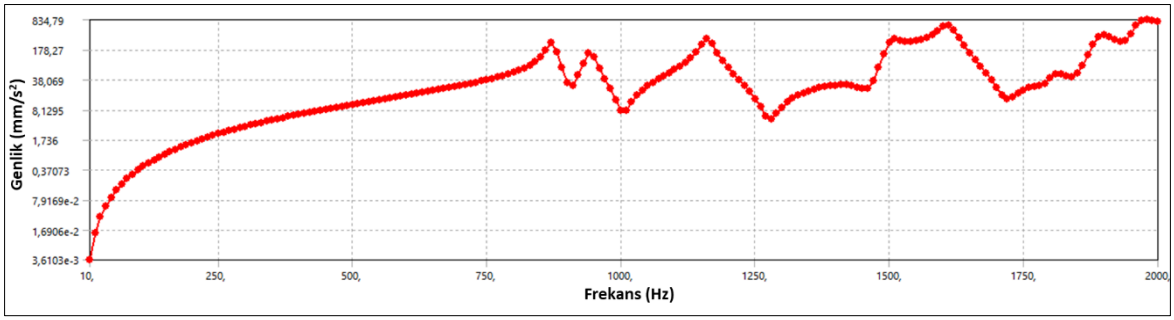


Şekil 4.19. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi modeli - 2

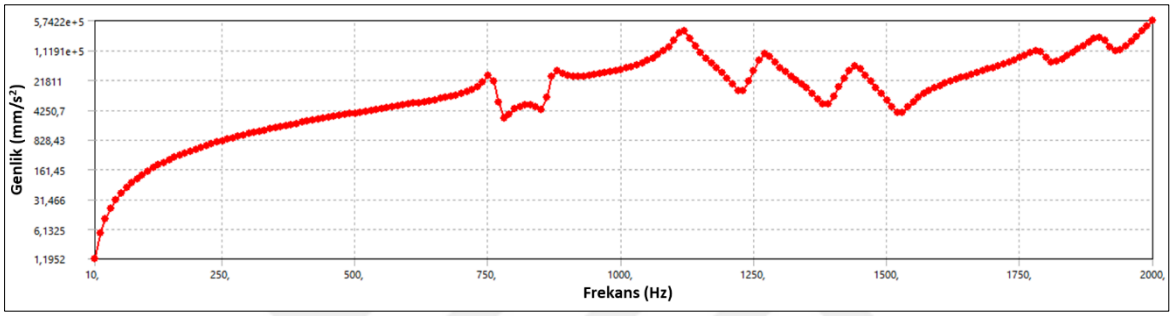
Harmonik analiz çözümünün tamamlanmasının ardından, sonuçlar tutucu parçanın AÖB ile temas eden yüzeyinden alınmıştır. Genlik değerlerinin alındığı bu yüzey Şekil 4.20'de gösterilmiştir. İlgili yüzey üzerindeki ortalama genlik değerleri ivme, deformasyon ve gerilme cinsinden değerlendirilmiştir. ANSYS ortamından alınan ivme genlik değerleri Şekil 4.21 – Şekil 4.23 arasında sunulmuştur. Tüm sonuçlar, topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yeni tasarımların analiz çıktıları ile birlikte ilerleyen bölümlerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



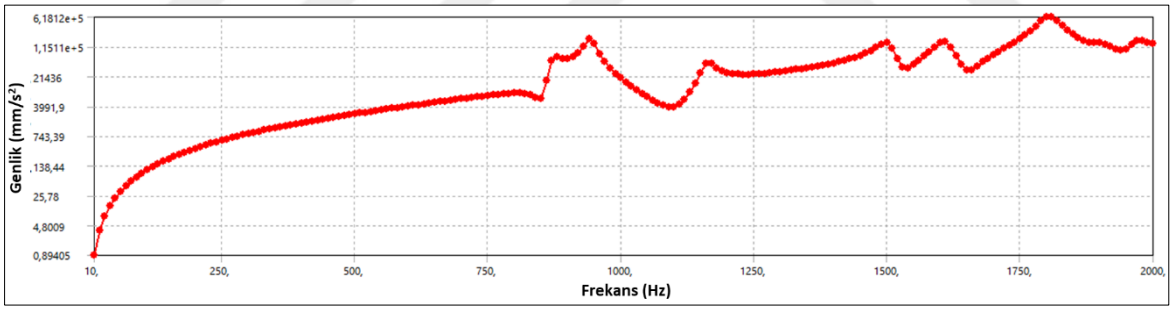
Şekil 4.20. Harmonik tepki analizi sonuç yüzeyi



Şekil 4.21. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi sonucu; X ekseni ivme genliği değerleri



Şekil 4.22. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi sonucu; Y ekseni ivme genliği değerleri



Şekil 4.23. Mevcut tutucu harmonik tepki analizi sonucu; Z ekseni ivme genliği değerleri

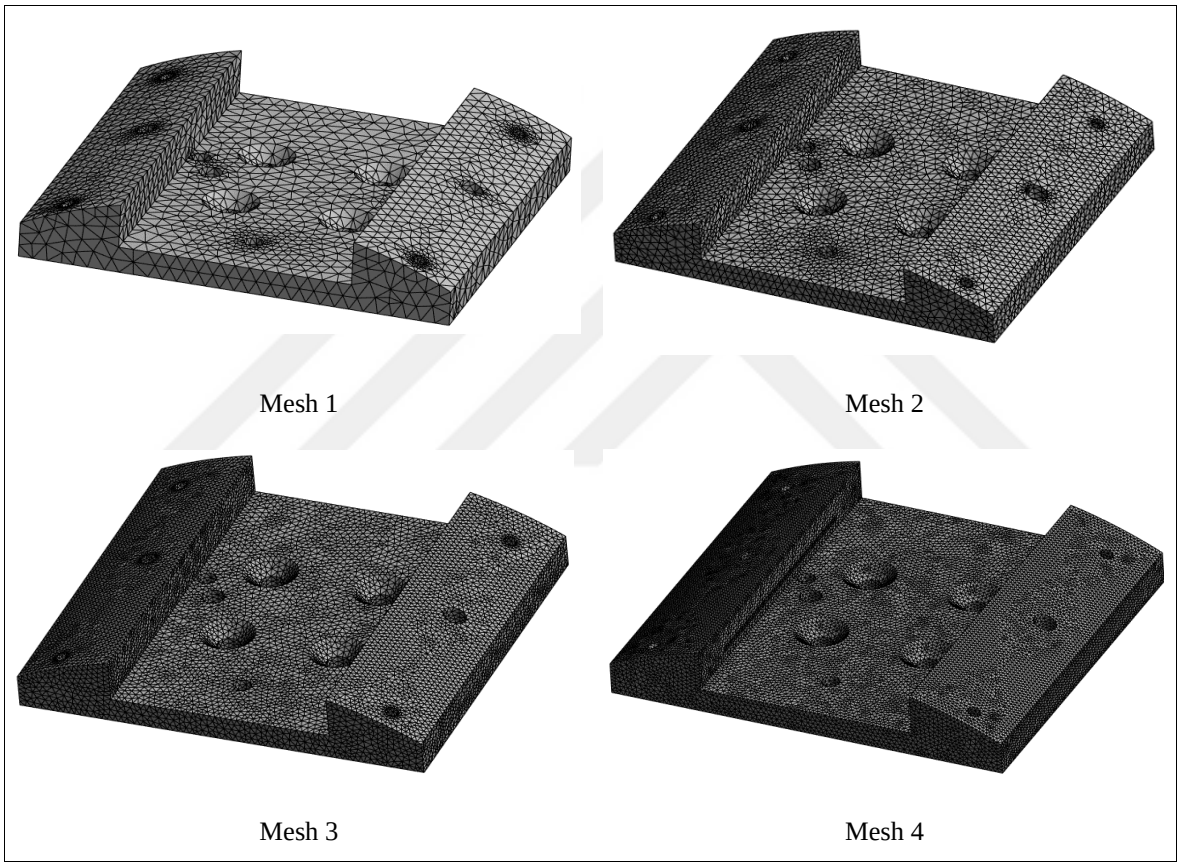
4.4.4. Ağ bağımsızlığı çalışması

Yapılan analizler kapsamında, ağ yapısına bağlı olarak sonuçların değişimi ve yakınsama davranışı ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bu amaçla, farklı eleman boyutları ve eleman sayılarına sahip birden fazla ağ yapısı oluşturularak karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirli bir eleman boyutundan sonra doğal frekans ve genlik değerlerinde anlamlı bir değişim oluşmadığını göstermiştir. Bu durum, model için yeterli ağ sıklığının sağlandığını ve çözümün ağdan bağımsız hale geldiğini (ing. mesh

independence) ortaya koymuştur. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, analizlerde kullanılacak uygun ağ yapısına karar verilmiştir.

Modal analiz ağ bağımsızlığı çalışması

Modal analiz için dört farklı ağ yapısı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bu ağ yapılarına ait görseller Şekil 4.24'te, eleman boyutu ve eleman sayılarına ilişkin bilgiler ise Çizelge 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.24. Modal analiz farklı ağ yapıları

Çizelge 4.6. Modal analiz farklı ağ yapısı bilgileri

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Eleman Boyutu (mm)	2,5	1,4	1,0	0,75
Eleman Sayısı	61 341	96 403	173 296	326 256

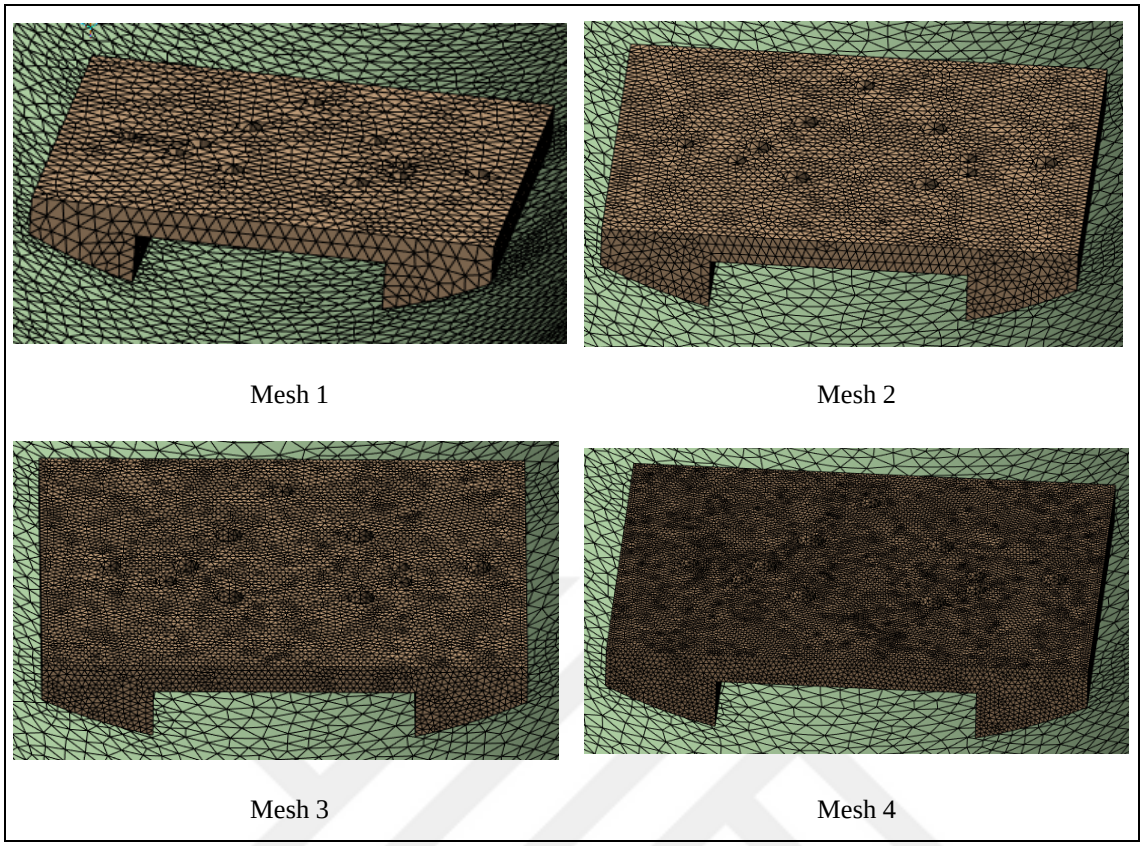
Dört farklı ağ yoğunlukları ile gerçekleştirilen modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında (Çizelge 4.7), Mesh 1 ile Mesh 2 arasındaki doğal frekans değerlerinde sınırlı bir değişim olduğu, ancak Mesh 2'den itibaren sonuçların belirgin şekilde kararlı hale geldiği görülmüştür. Mesh 2'den Mesh 3'e geçişte doğal frekanslardaki değişim oranı %0,1 seviyesinde olup oldukça küçüktür. Benzer şekilde Mesh 3 ve Mesh 4 sonuçlarının da Mesh 2'ye kıyasla anlamlı bir iyileşme sağlamadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, Mesh 2 seviyesinde ağ yapısının çözüm doğruluğu açısından yeterli olduğunu ve mesh yoğunluğunun daha da artırılmasının sonuçlara kayda değer bir katkı sunmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, hesaplama maliyetini düşük tutarken güvenilir sonuçlar elde edebilmek adına analizlerde Mesh 2 (1,4 mm eleman boyutu, 96 403 eleman) ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı ağ yapılarına yöre mevcut tutucu doğal frekans değerleri

Mod	Doğal Frekans Değerleri (Hz)			
	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
1	7 299	7 289	7 282	7 279
2	10 543	10 544	10 539	10 536
3	10 701	10 661	10 646	10 638
4	11 348	11 330	11 320	11 314
5	14 601	14 593	14 579	14 574
6	15 958	15 916	15 902	15 893

Harmonik tepki analizi ağ bağımsızlığı çalışması

Harmonik tepki analizleri için de dört farklı ağ yapısı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gövde parçasının eleman boyutu sabit tutularak tutucu parçanın eleman boyutu değiştirilmiştir. Oluşturulan dört farklı ağ yapısına ait görseller Şekil 4.25'te, eleman boyutu ve sayıları Çizelge 4.8'da paylaşılmıştır.

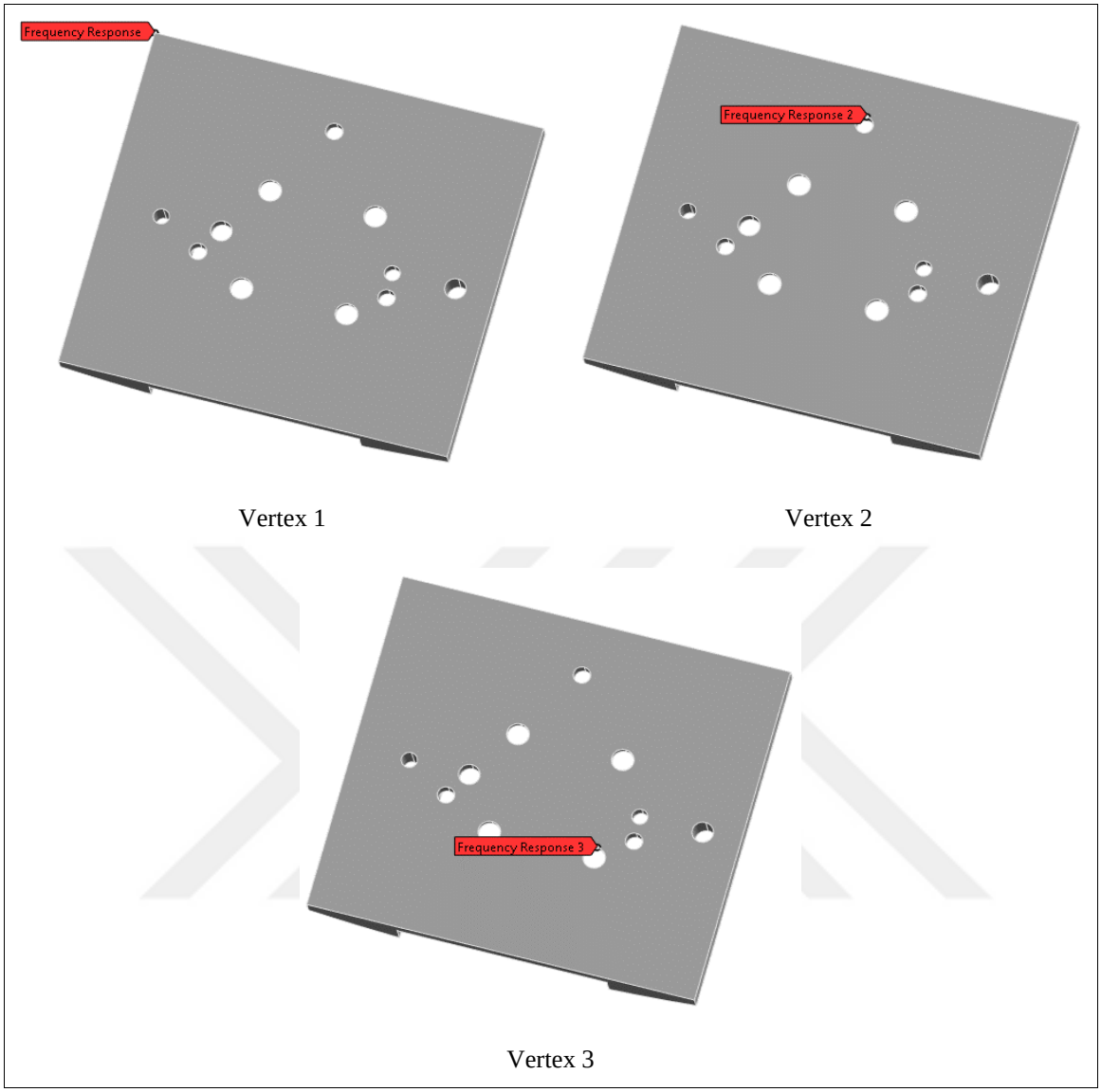


Şekil 4.25. Farklı ağ yapıları

Çizelge 4.8. Ağ yapısı bilgileri

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Tutucu Parça Eleman Boyutu (mm)	2,5	1,4	1,0	0,75
Gövde Parçası Eleman Boyutu (mm)	4	4	4	4
Toplam Eleman Sayısı	141 802	232 562	430 340	854 098

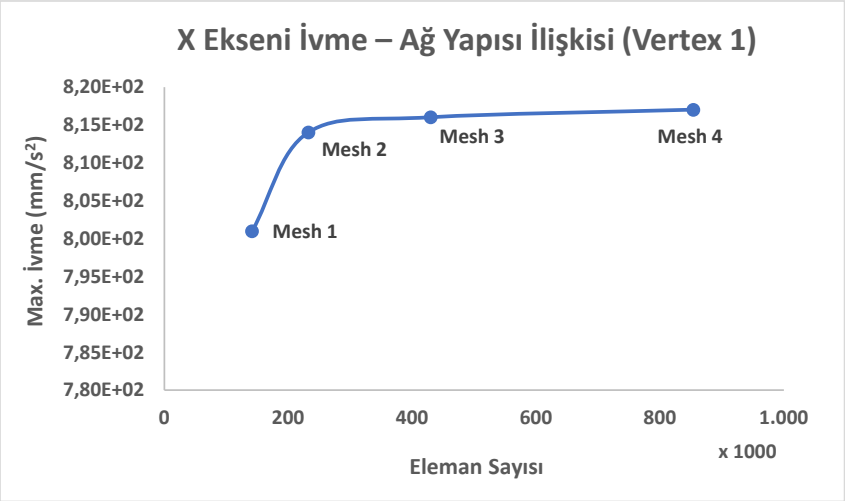
Oluşturulan farklı ağ yapılarıyla analizler tekrarlanmış ve tutucu parçanın yüzeyinde belirlenen üç farklı noktaki (vertex) ivme genliği değerleri karşılaştırılmıştır. Genlik sonuçlarının alındığı noktalar Şekil 4.26'da paylaşılmıştır.



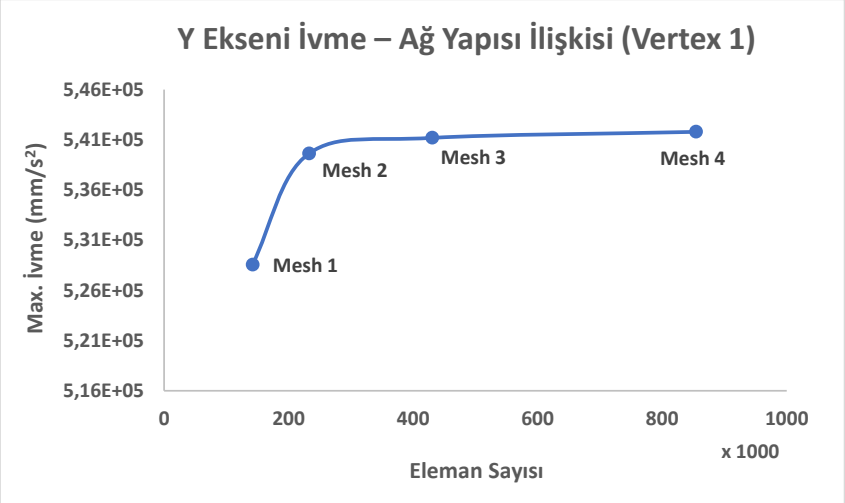
Şekil 4.26. Genlik ölçüm noktaları

Tutucu Parça Eleman Boyutu 2,5 mm, 1,4 mm, 1,0mm ve 0,75 mm değerleri için ağ yapısı oluşturularak ağ yakınsaması incelenmiştir. Farklı ağ yapılarıyla elde edilen analiz sonuçları, ilgili noktalardaki 0–2000 Hz frekans aralığı içindeki en yüksek genliğin oluştuğu frekanstaki ivme genliği değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Vertex 1 için sonuçlar Şekil 4.27 ile Şekil 4.29 arasında sunulmuştur ve tüm sonuçlar Çizelge 4.9'de özetlenmiştir. Sonuçlara göre farklı ağ yoğunluklarıyla elde edilen ivme genliği değerleri incelendiğinde, Mesh 1 ile Mesh 2 arasında belirli bir fark bulunmakla birlikte, Mesh 2 seviyesinden sonra sonuçların oldukça sınırlı ölçüde değiştiği görülmektedir. Özellikle Mesh 2, Mesh 3 ve Mesh 4 arasında tüm ölçüm noktalarında ivme genliği değerlerinin değişim oranı %0,5'in altında olup bu farklar mühendislik açısından ihmal edilebilir düzeydedir. Mesh 3 ve Mesh 4'ün

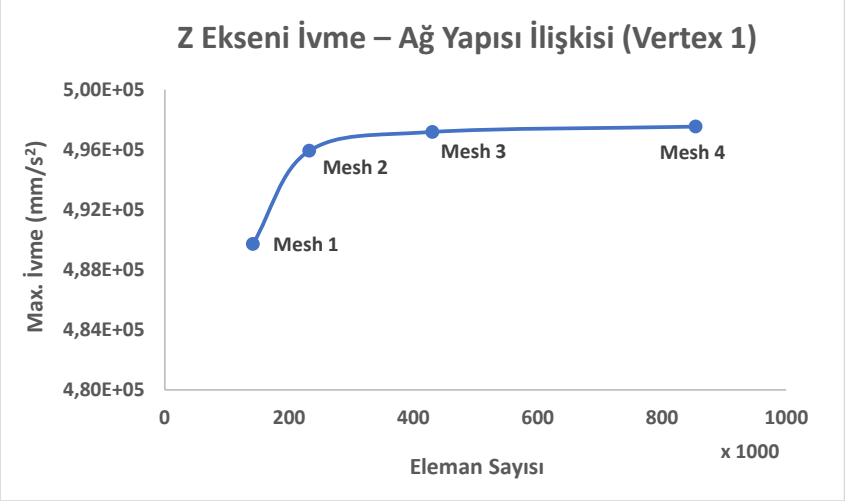
toplam eleman sayılarındaki belirgin artışa rağmen sonuçlara anlamlı bir katkı sağlamadığı dikkate alındığında, çözümün Mesh 2 seviyesinde yakınsadığı anlaşılmaktadır. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, hesaplama maliyetini gereksiz yere artırmadan güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla harmonik tepki analizlerinde Mesh 2 (1,4 mm eleman boyutu, 232 562 toplam eleman) ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.27. Vertex 1 için X ekseni ivme genliğinin ağ yoğunluğuna bağlı değişimi



Şekil 4.28. Vertex 1 için Y ekseni ivme genliğinin ağ yoğunluğuna bağlı değişimi



Şekil 4.29. Vertex 1 için Z ekseni ivme genliğinin ağ yoğunluğuna bağlı değişimi

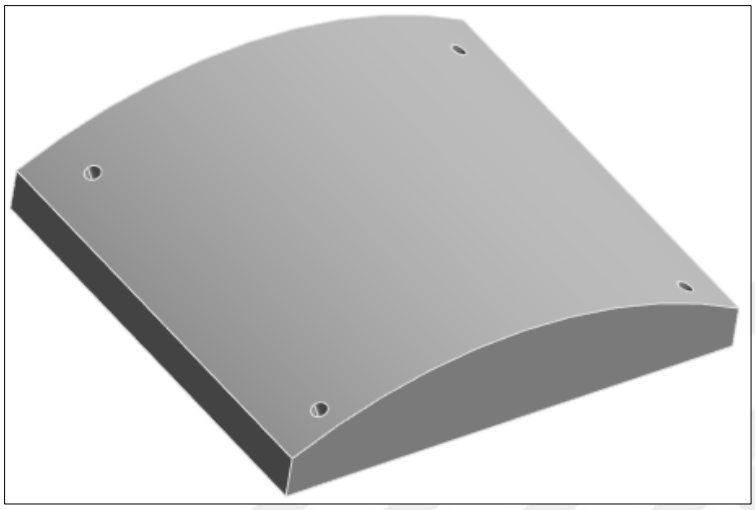
Çizelge 4.9. Farklı ağ yapılarına göre harmonik tepki analizi sonuçları

Ölçüm Noktası	Eksen	İvme Genliği Değerleri (mm/s^2)			
		Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Vertex 1	X	801	814	816	817
	Y	528 575	539 620	541 189	541 787
	Z	489 724	495 730	496 986	497 842
Vertex 2	X	849	863	865	866
	Y	535 922	546 470	547 728	548 614
	Z	575 425	580 940	582 167	582 782
Vertex 3	X	834	847	849	851
	Y	569 093	580 090	581 696	582 114
	Z	663 839	671 280	672 873	673 914

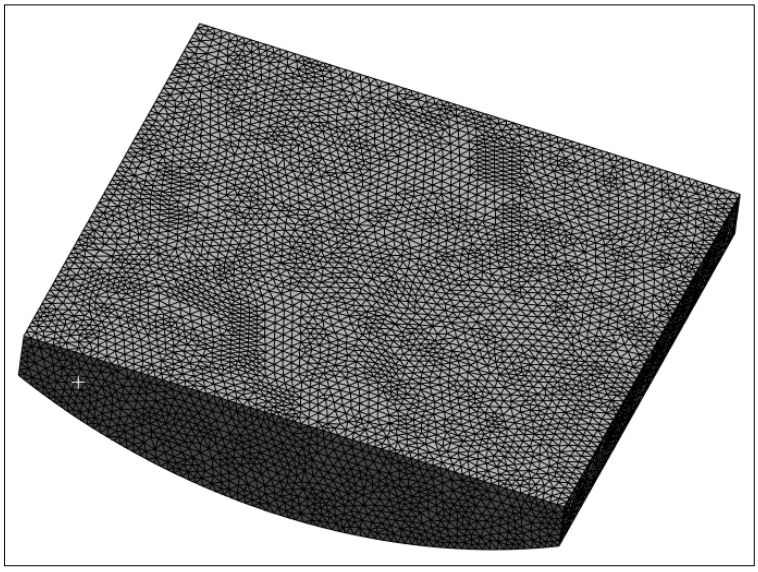
4.5. Topoloji Optimizasyonu

AÖB tutucu parçasının titreşim sönümleme özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar ANSYS yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. İlk aşamada, arayüz koşullarına uygun bir tasarım uzayı oluşturulmuştur. Söz konusu tasarım uzayı Şekil 4.30'da sunulmuştur. Oluşturulan tasarım uzayına öncelikle modal analiz uygulanmıştır; çünkü optimizasyonun, doğal frekansın maksimizasyonuna dayalı olarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Böylece, füzenin maruz kaldığı operasyonel titreşim frekanslarından mümkün olduğunca uzak bir tasarım elde edilmesi amaçlanmıştır. Malzeme bilgisi için AlSi10Mg alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri tanımlanmıştır.

Analizde, tutucunun gövdeye bağlandığı cıvata delikleri sabit sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Malzeme dağılımının daha hassas yapılabilmesi amacıyla daha sık bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda, 1 mm eleman boyutu kullanılmış ve model toplamda 211 179 elemandan meydana gelmiştir. Tasarım uzayına ait ağ yapısı Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



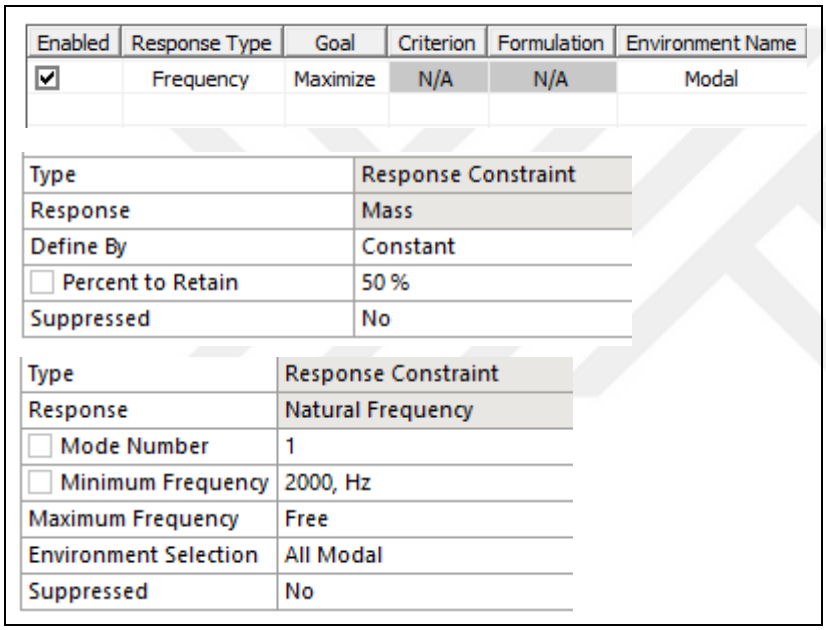
Şekil 4.30. Topoloji optimizasyonu için tasarım uzayı



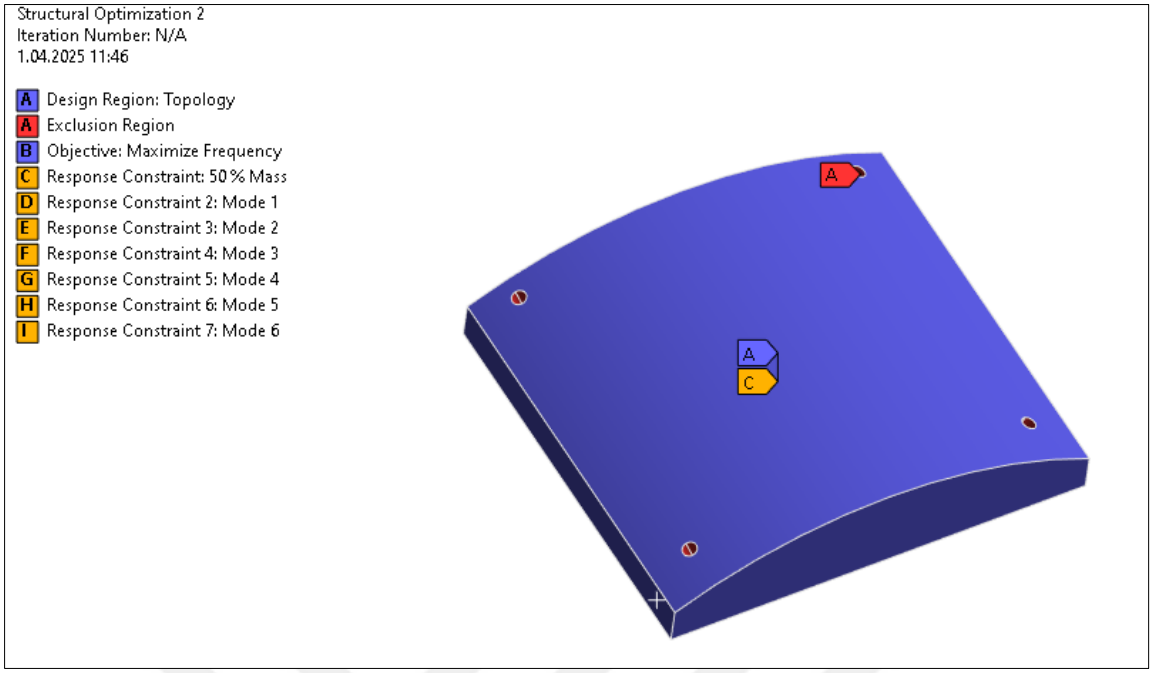
Şekil 4.31. Tasarım uzayı ağ yapısı

Tasarım uzayında modal analiz çözüldükten sonra, bu analiz ANSYS yazılımında bulunan Yapısal Optimizasyon (ing. Structural Optimization) modülüne entegre edilmiştir. Topoloji optimizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için optimizasyon hedefi ve cevap kısıtlamaları

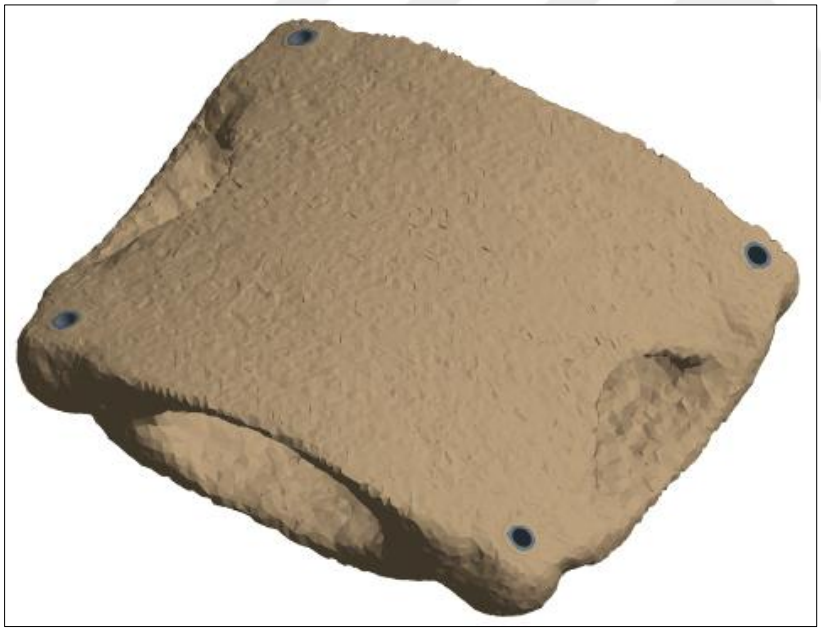
gibi parametreler tanımlanmıştır. Optimizasyonun temel hedefi olarak, sistemin doğal frekanslarının maksimize edilmesi belirlenmiştir. AÖB'nin 2000 Hz altındaki titreşim koşullarında görev yapması beklendiğinden, tutucu parçanın bu frekans aralığında herhangi bir moda sahip olmaması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, ilk altı moda minimum 2000 Hz sınır koşulu tanımlanmıştır. Ayrıca, parçanın toplam kütlesinin %50 oranında korunması yönünde bir kısıtlama eklenmiştir. Sınır koşulları tanımlanan cıvata delikleri optimizasyon bölgesinden çıkarılmıştır. Belirlenen optimizasyon parametreleri Şekil 4.32'de, oluşturulan optimizasyon modeli ise Şekil 4.33'te sunulmuştur. Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yapı Şekil 4.34 ile 4.36 arasında gösterilmiştir.



Şekil 4.32. Optimizasyon parametreleri



Şekil 4.33. Topoloji optimizasyonu modeli



Şekil 4.34. Topoloji optimizasyonu sonucu – izometrik üstten görünüm



Şekil 4.35. Topoloji optimizasyonu sonucu – izometrik alttan görünüm



Şekil 4.36. Topoloji optimizasyonu sonucu – yandan görünüm

Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yapıdan yararlanılarak CAD ortamında yeniden tasarım gerçekleştirilmiştir. Yeniden tasarlanan model Şekil 4.37'de sunulmuştur. Yeni tasarımda, beklendiği üzere, doğal frekans değerlerinde artış gözlemlenmiştir (Çizelge 4.10).



Şekil 4.37. Topoloji optimizasyonu sonucu yeniden düzenlenmiş geometri

Çizelge 4.10. Topoloji optimizasyonu soncu yeniden düzenlenmiş geometrinin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)
1	10 209
2	10 792
3	14 128
4	14 216
5	15 778
6	17 126

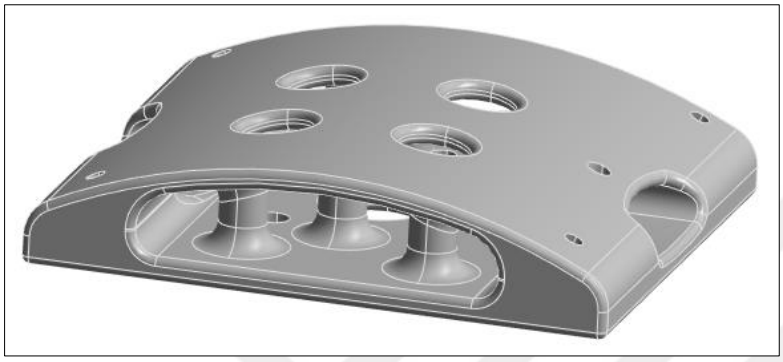
Topoloji optimizasyonu sonrasında elde edilen tasarımın doğal frekans değerlerinde artış gözlemlenmiş olsa da, titreşim sönümleme performansının yeterli olmadığı harmonik tepki analizi sonuçlarıyla tespit edilmiştir. Bu aşamada, titreşim performansını iyileştirmek amacıyla kafes (ing. lattice) yapılardan esinlenilerek tasarımın iç yüzeyinde yer alan boşluk bölgesine destek kolonları eklenmesi üzerinde çalışılmıştır. Harmonik tepki analizleriyle birlikte iteratif olarak yürütülen çalışmalar kapsamında, farklı kolon geometrilerine sahip 27

alternatif tasarım incelenmiştir. Bu tasarımların bazılarında kolonların çapı, sayısı ve konumu değiştirilirken, bazılarında ise kolonların yüzeyle yaptıkları açı değiştirilmiştir. Ayrıca, iç boşluk hacmi de farklı oranlarda değiştirilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Örnek destek kolon tasarımları Şekil 4.38'de sunulmuştur. Bu tasarımlarda, ayrıca AÖB'nin montajı için gerekli arayüz delikleri de oluşturulmuştur. AÖB-1'in montajında kullanılacak cıvataların yerleştirilebilmesi amacıyla, tutucu parçanın silindirik yüzeyinde uygun konumlara dört adet montaj boşluğu tasarlanmıştır. Cıvataların bu boşluklardan geçirilerek ilgili deliklere monte edilebilmesi ve alyan anahtar ile sıkılabilmesi planlanmıştır. Gövdeye montajında kullanılan pim yuvası ise teke düşürülmüştür.

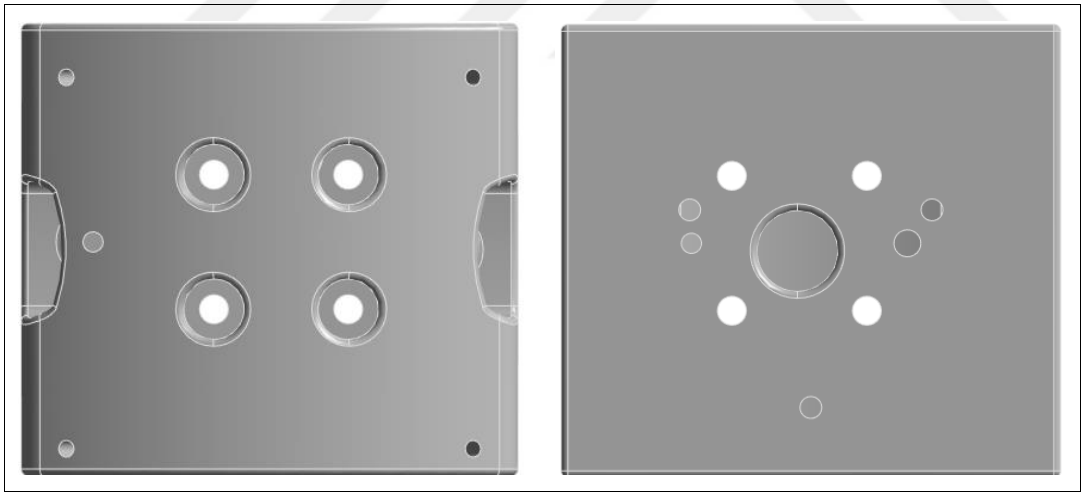


Şekil 4.38. Farklı kolon tasarımı denemeleri

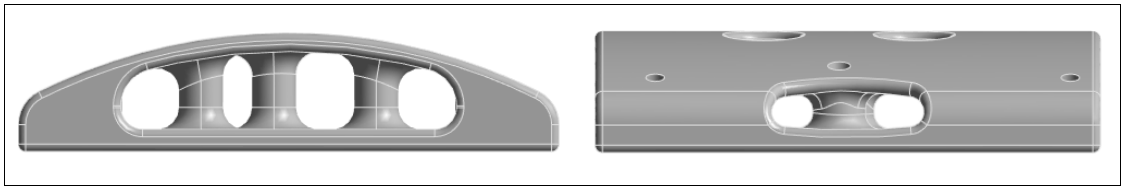
Tüm iterasyonlar sonucunda, en iyi sönümleme özelliklerini gösteren iki tasarım belirlenmiştir. Birinci tasarımda, iç kısımda 6 mm çapında altı adet silindirik destek kolonu yer almaktadır. Yan kısımlarda ise 6 mm çapında iki adet silindirik kolon bulunmaktadır. Bu geometri Tasarım 1 olarak adlandırılmıştır ve görselleri Şekil 4.39 ile Şekil 4.42 arasında sunulmuştur. Tasarım 1 tutucusunun kütlesi 91 gramdır ve mevcut tutucudan 7 gram daha hafiftir.



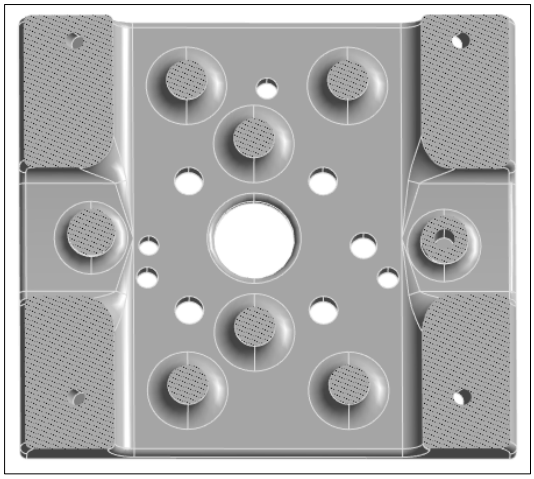
Şekil 4.39. Tasarım 1 izometrik görünümü



Şekil 4.40. Tasarım 1 üstten ve alttan görünümü

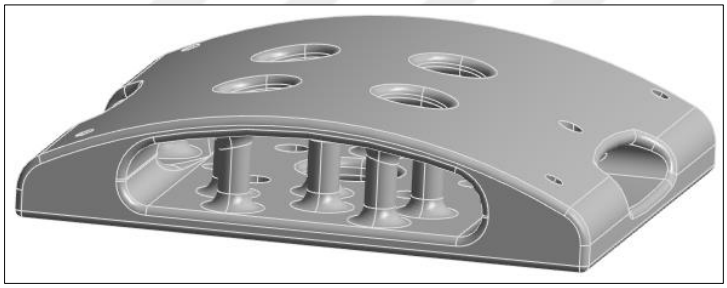


Şekil 4.41. Tasarım 1 önden ve yandan görünümü

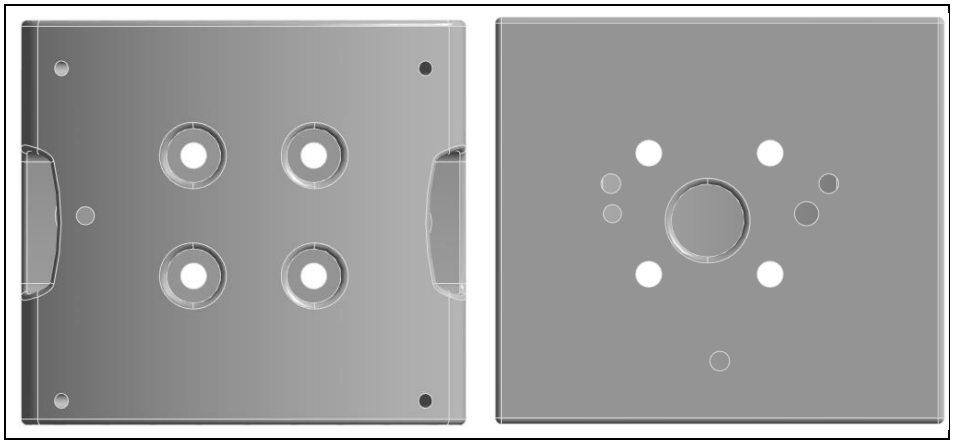


Şekil 4.42. Tasarım 1 kesit görünümü

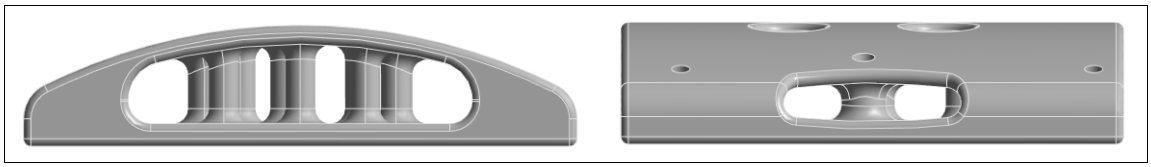
Tasarım 2 olarak adlandırılan ve uygun bulunan diğer geometride, iç bölgede 4 mm çapında 11 adet silindirik destek kolonu yer almaktadır. Parçanın yan kısımlarında ise yine 6 mm çapında iki adet ek destek kolonu bulunmaktadır. Tasarım 2'ye ait görseller Şekil 4.43 ile Şekil 4.46 arasında sunulmuştur. Tasarım 2 tutucusunun kütlesi 88 gramdır ve mevcut tutucudan 10 gram daha hafif gelmektedir.



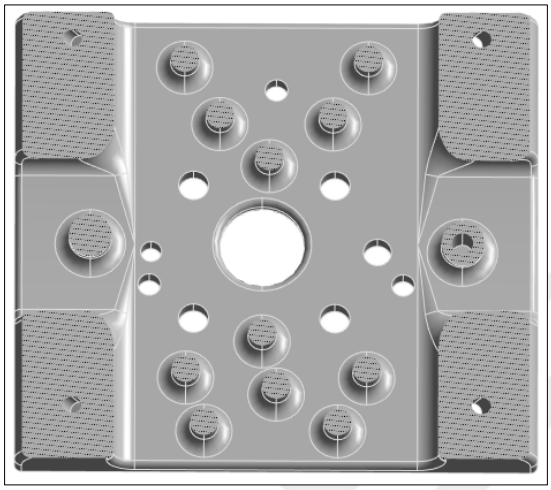
Şekil 4.43. Tasarım 2 izometrik görünümü



Şekil 4.44. Tasarım 2 üstten ve alttan görünümü



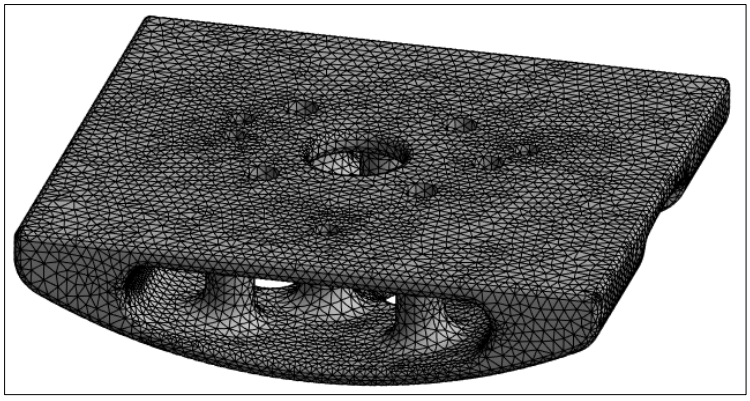
Şekil 4.45. Tasarım 2 önden ve yandan görünümü



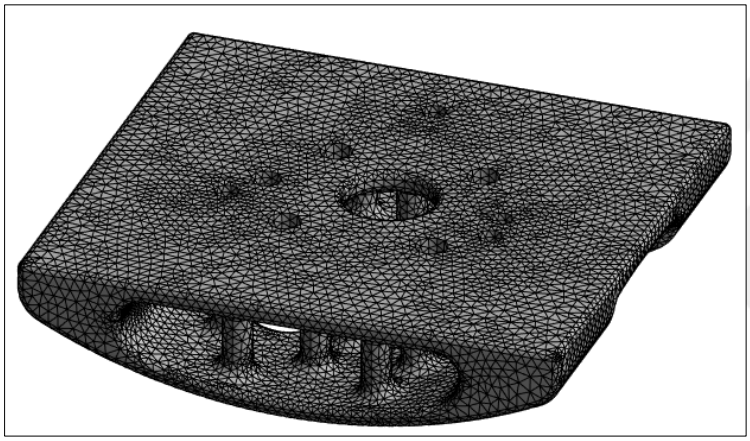
Şekil 4.46. Tasarım 2 kesit görünümü

4.6. Modal Analizler

Topoloji optimizasyonu sonrasında seçilen iki yeni tasarım için, mevcut tutucuyla benzer sınır koşulları altında ve gövde parçası modele dahil edilmeden modal analiz gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde 1,4 mm eleman boyutu tanımlaması ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Tasarım 1'in analiz modelinde 174244, Tasarım 2'nin analiz modelinde 180 246 tetrahedral eleman bulunmaktadır. Tasarım 1 ve Tasarım 2 için gerçekleştirilen modal analizlere ait ağ yapıları sırasıyla Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de sunulmuştur. Bu analizlerde, tutucu parçalara AlSi10Mg malzeme özellikleri tanımlanmıştır.



Şekil 4.47. Tasarım 1 modal analizi ağ yapısı

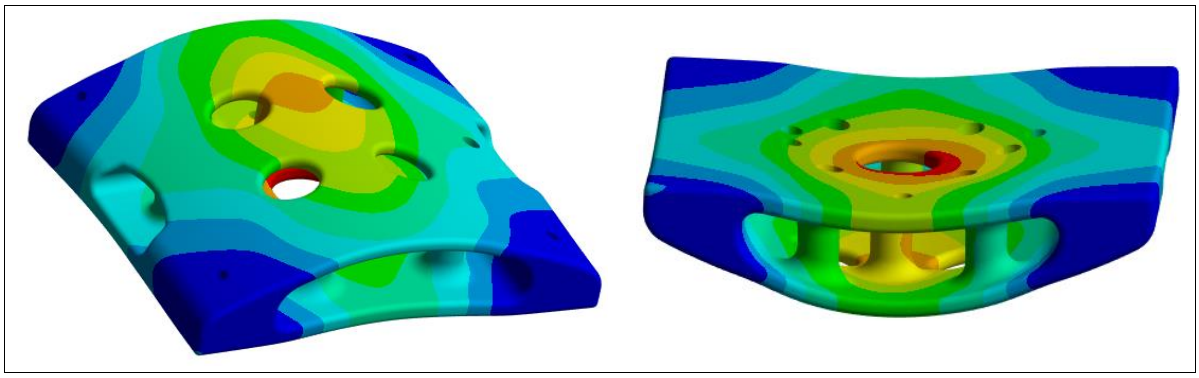


Şekil 4.48. Tasarım 2 modal analizi ağ yapısı

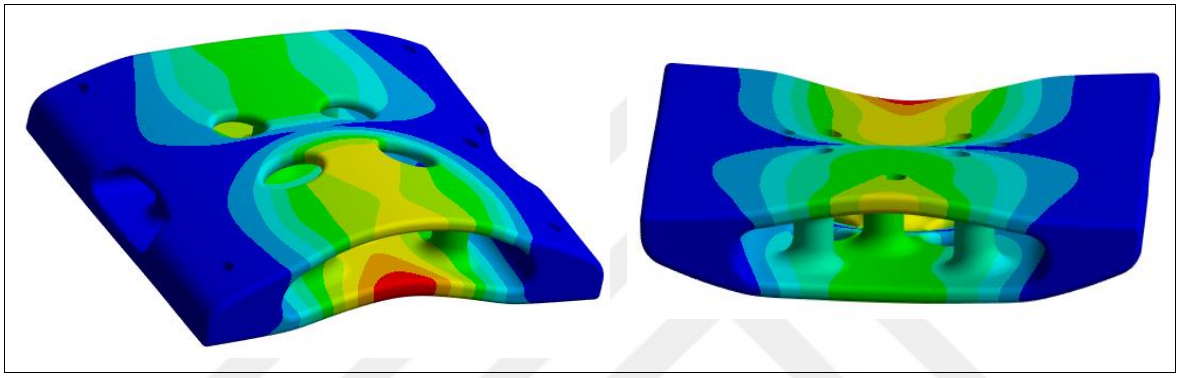
Elde edilen sonuçlar, mevcut tutucuya ait doğal frekans değerleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, her iki yeni tasarımda da doğal frekans değerleri mevcut tutucuya kıyasla artmış, Tasarım 1'de bu artış daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir. İlgili sonuçlar Çizelge 4.11'de paylaşılmıştır. İlgili doğal frekanslar için oluşan mod şekilleri Şekil 4.49 ile Şekil 4.60 arasında sunulmuştur.

Çizelge 4.11. Doğal frekans değerleri karşılaştırması

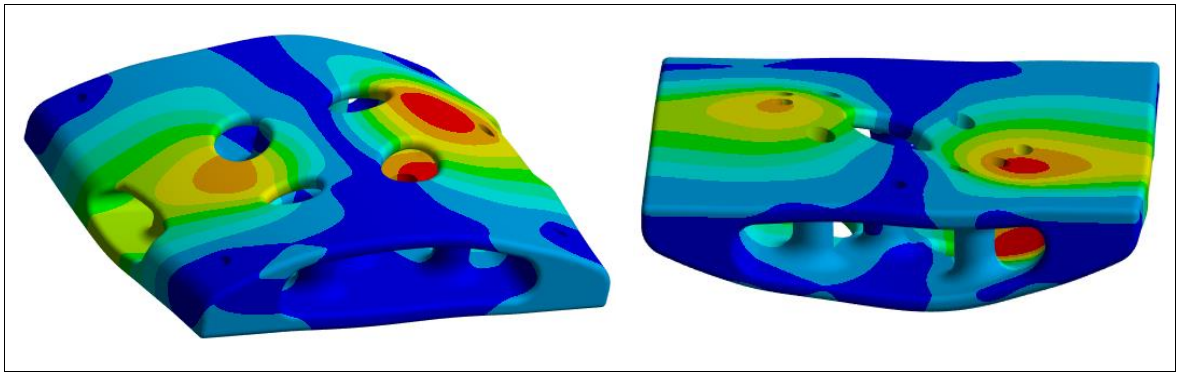
Mod	Frekans (Hz)		
	Mevcut Tutucu	Tasarım 1	Tasarım 2
1	7 289	9 291	8 345
2	10 544	11 527	10 249
3	10 661	12 603	11 413
4	11 330	14 335	12 917
5	14 593	17 125	15 733
6	15 916	18 273	15 996



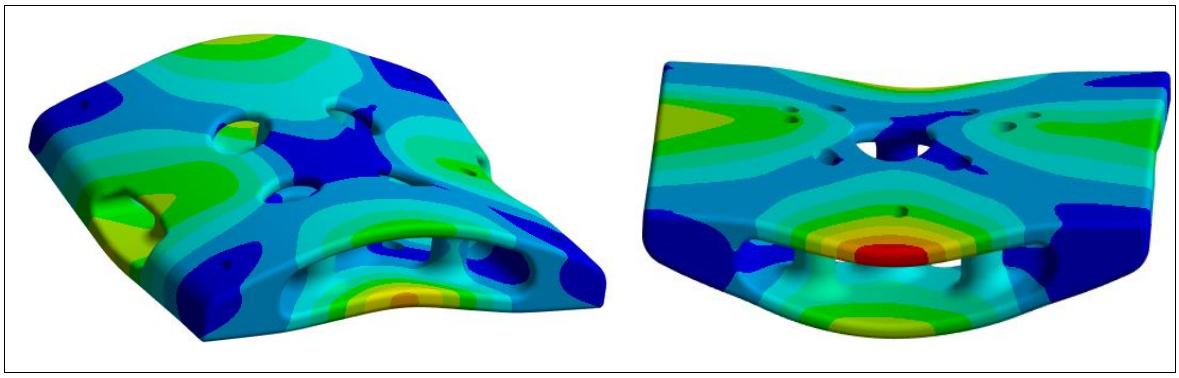
Şekil 4.49. Tasarım 1 – 1. mod şekli



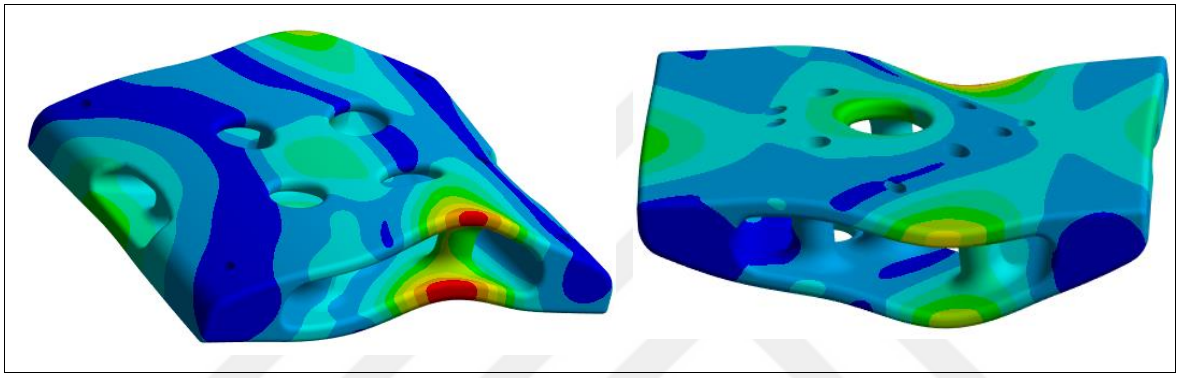
Şekil 4.50. Tasarım 1 – 2. mod şekli



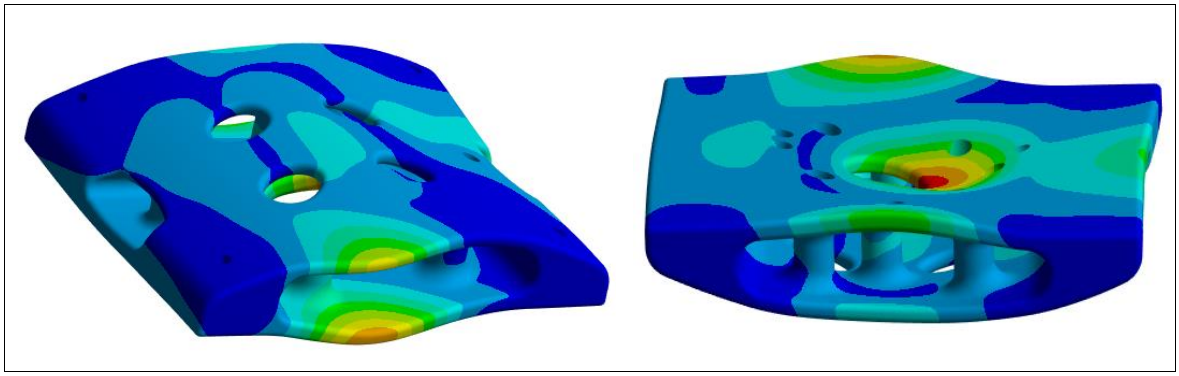
Şekil 4.51. Tasarım 1 – 3. mod şekli



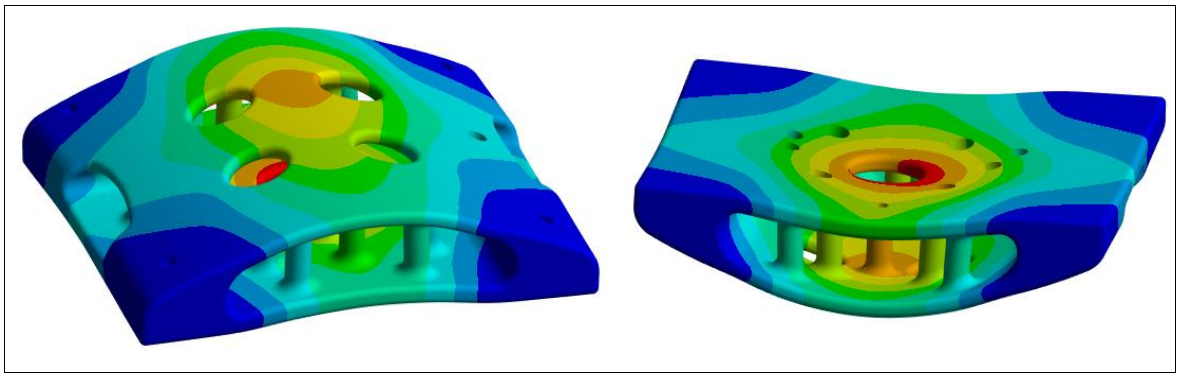
Şekil 4.52. Tasarım 1 – 4. mod şekli



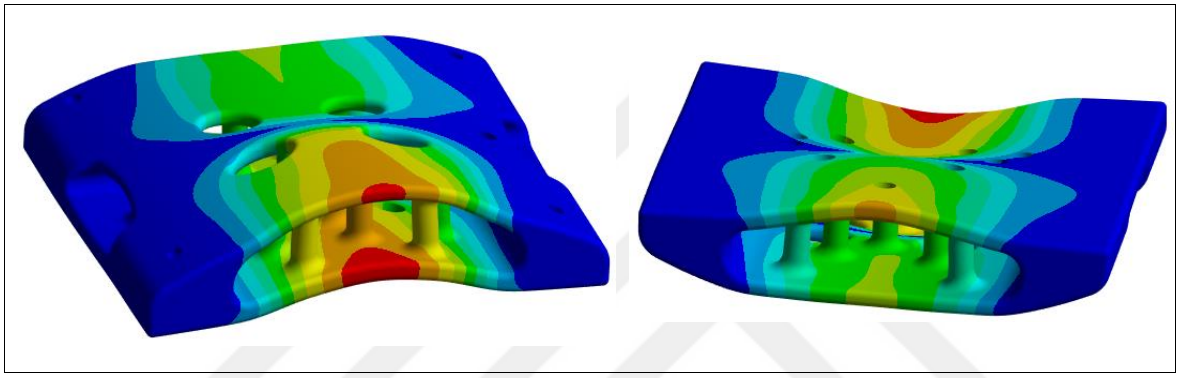
Şekil 4.53. Tasarım 1 – 5. mod şekli



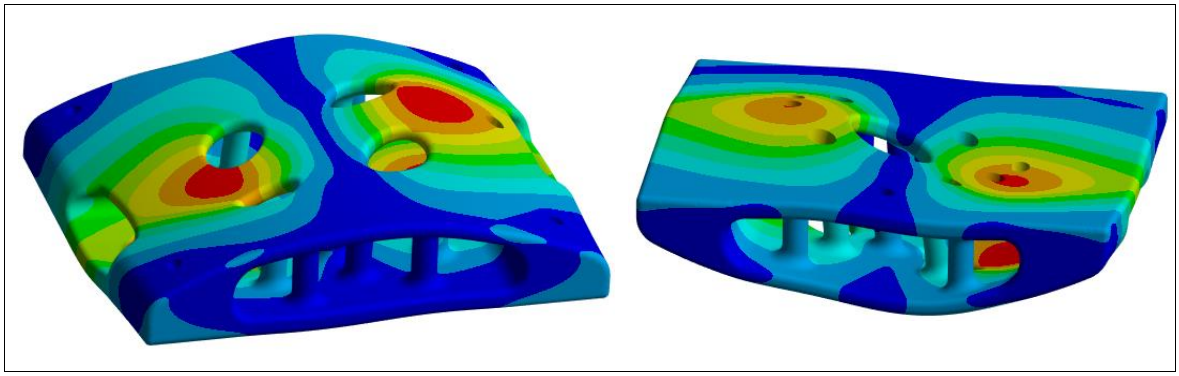
Şekil 4.54. Tasarım 1 – 6. mod şekli



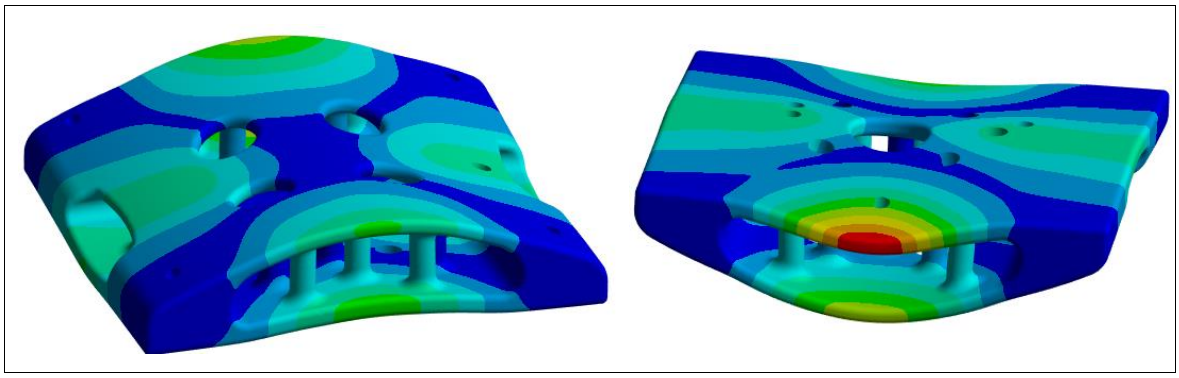
Şekil 4.55. Tasarım 2 – 1. mod şekli



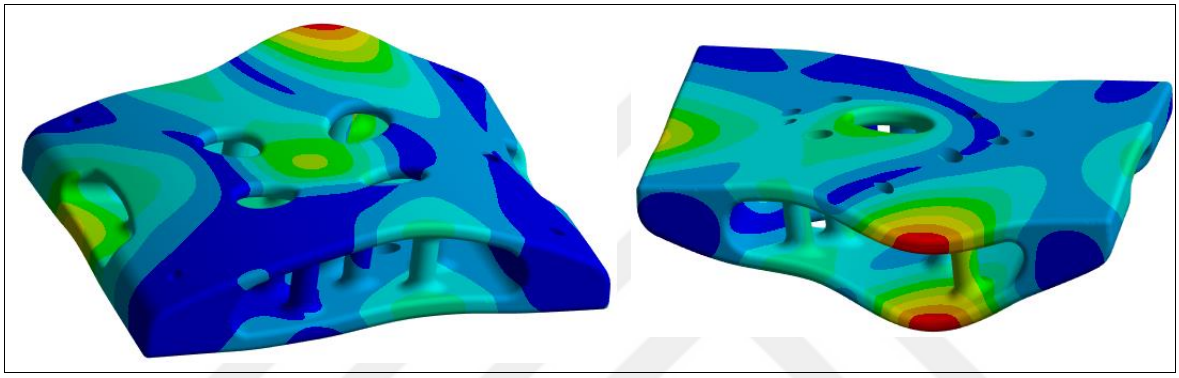
Şekil 4.56. Tasarım 2 – 2. mod şekli



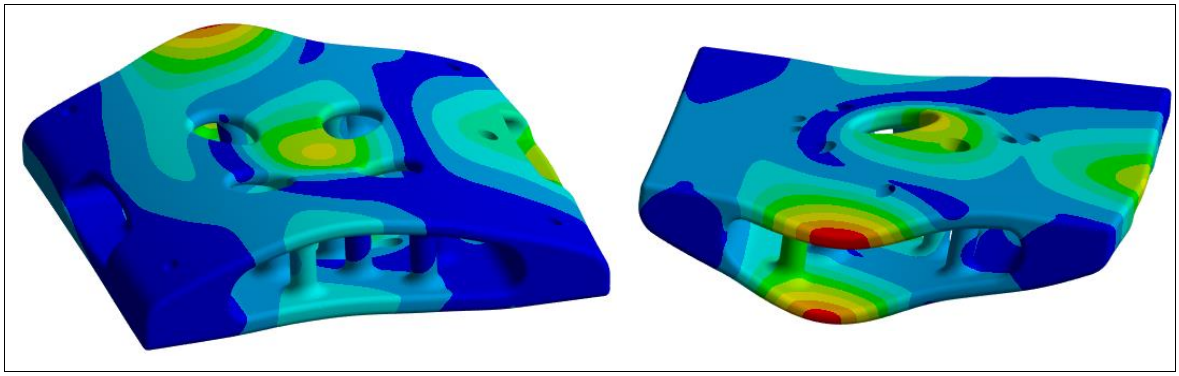
Şekil 4.57. Tasarım 2 – 3. mod şekli



Şekil 4.58. Tasarım 2 – 4. mod şekli



Şekil 4.59. Tasarım 2 – 5. mod şekli



Şekil 4.60. Tasarım 2 – 6. mod şekli

Sonuçlara göre her iki yeni tasarımın da mevcut tutucuya kıyasla daha yüksek doğal frekanslar üretmesi, destek kolonlarının eklenmesiyle parçanın global rijitliğinin arttığını ve rezonans riskinin azaldığını göstermektedir. Mevcut tutucuda özellikle orta yüzeyde geniş alanlara yayılan bükülme modları gözlenirken, hem Tasarım 1 hem de Tasarım 2'de bu modların daha sınırlı alanlara sıkıştığı ve deplasman genliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, her iki yeni tasarımın da titreşim performansını artırdığını doğrulamaktadır.

Tasarım 1'de iç bölgede kullanılan 6 mm çapında destek kolonları orta yüzeyin rijitliğini artırmış ve doğal frekansların yükselmesine katkı sağlamıştır. Benzer şekilde Tasarım 2'de ise 4 mm çapında fakat daha fazla sayıda kolon kullanılmıştır. Kolonların daha ince olması nedeniyle rijitlik artışı Tasarım 1'e kıyasla daha yumuşak karakterde olmakla birlikte, kolon sayısının fazla olması yük aktarımını daha homojen hale getirmiş ve titreşim enerjisinin yüzeyde dengeli dağıtılmasına yardımcı olmuştur. Bu nedenle Tasarım 2'de mod şekilleri incelendiğinde, özellikle orta yüzeydeki yer değiştirme bölgelerinin daha düzenli bir biçim aldığı ve lokal bükülmelerin daha kontrollü bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.

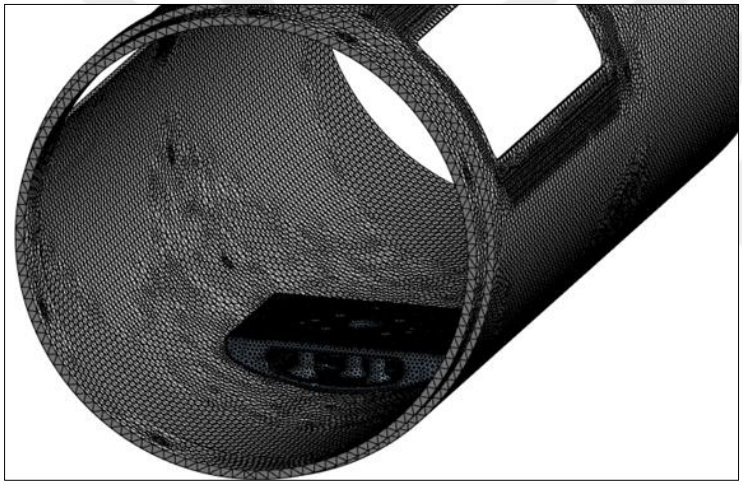
Yan bölgelerde her iki tasarımda da 6 mm çapında ek destek kolonlarının bulunması, özellikle burulma modlarında mevcut tutucuya göre belirgin iyileşme sağlamıştır. Mevcut tasarımda ikinci modda geniş genlikli burulma davranışı görülürken, yeni tasarımlarda bu davranışın daha kısıtlı olduğu ve titreşim enerjisinin gövdeye daha etkin şekilde dağıtıldığı tespit edilmiştir. Bu durum, parçanın hem yüksek frekanslı titreşimlerde hem de darbeli yüklemelerde daha dengeli davranacağının bir göstergesidir.

Her iki yeni tasarım kendi içinde değerlendirildiğinde, Tasarım 2'nin çoklu ve daha ince kolon yapısı sayesinde titreşim davranışını daha homojen bir şekilde dağıttığı görülmektedir. Tasarım 1 bazı modlarda daha yüksek doğal frekanslar sunmakla birlikte, Tasarım 2'nin kolon yerleşimi daha dengeli bir deformasyon kontrolü sağlamış ve özellikle orta yüzeyde titreşim davranışını düzenleme açısından istikrarlı bir performans sergilemiştir. Bu nedenle Tasarım 2, modal analiz sonuçlarına göre daha kontrollü bir titreşim karakteri göstermesi, deformasyon bölgelerini homojen dağıtması ve yapının genel dinamik davranışını daha kararlı hale getirmesi nedeniyle tercih edilebilir bir tasarım olarak öne çıkmaktadır.

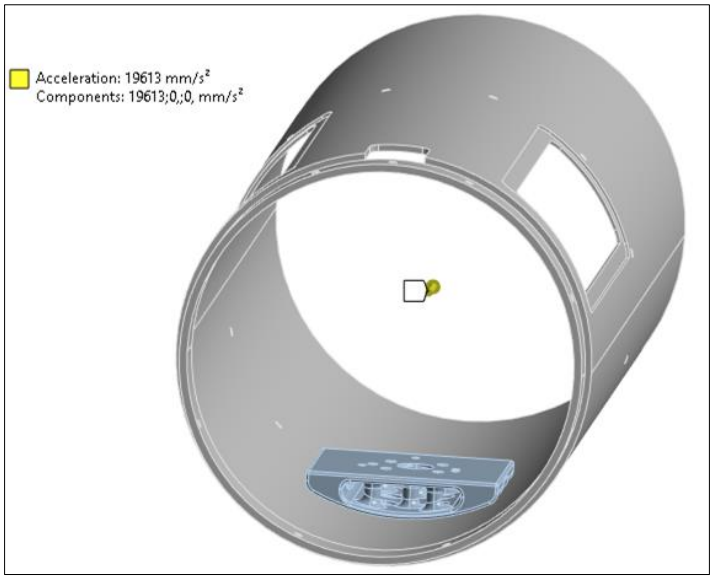
Sonuç olarak, her iki yeni tasarım da mevcut tutucuya göre anlamlı iyileştirmeler sunmakla birlikte, Tasarım 2'nin doğal frekans, mod şekli düzenliliği ve titreşim dağılımı açısından daha dengeli ve optimize edilmiş bir dinamik performans sağladığı görülmüştür. Bu analizler doğrultusunda, Tasarım 2'nin tercih edilmesinin yapının hem rezonansa karşı dayanımını hem de çalışma esnasında titreşim kararlılığını artıracağı değerlendirilmektedir.

4.7. Harmonik Tepki Analizleri

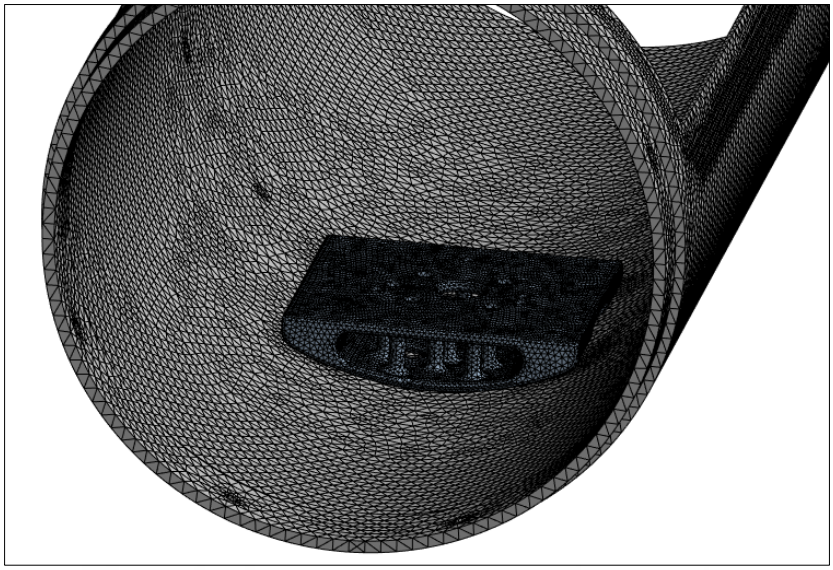
En uygun iki yeni tasarım belirlendikten sonra, bu tasarımlar için detaylı harmonik tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz modelleri, mevcut tutucu parça ile aynı sınır ve yükleme koşulları altında oluşturulmuştur. Analizlerde tutucu parçalara AlSi10Mg malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Mevcut tutucuda olduğu gibi, yeni tasarlanan parçaların ağ yapısı oluşturulurken de gövde için 4 mm, tutucu parçalar için ise 1,4 mm eleman boyutu tanımlaması yapılmıştır. Tasarım 1'in analiz modelinde 237 645 adet tetrahedral eleman bulunurken, Tasarım 2'nin modeli 233 984 adet tetrahedral elemandan oluşmaktadır. Her iki tasarıma ait ağ yapıları ve analiz modelleri Şekil 4.61 ile Şekil 4.64 arasında sunulmuştur.



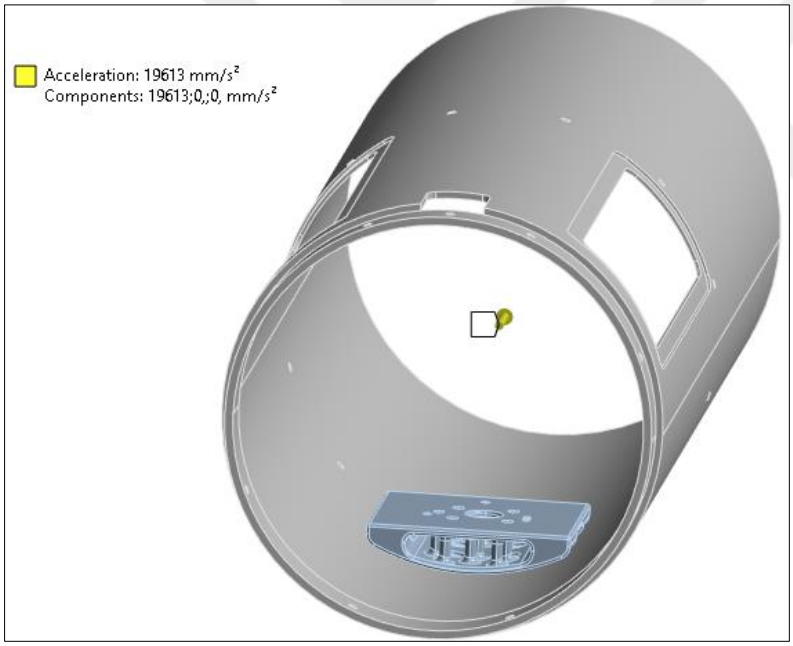
Şekil 4.61. Tasarım 1 harmonik tepki analizi ağ yapısı



Şekil 4.62. Tasarım 1 harmonik tepki analizi modeli



Şekil 4.63. Tasarım 2 harmonik tepki analizi ağ yapısı



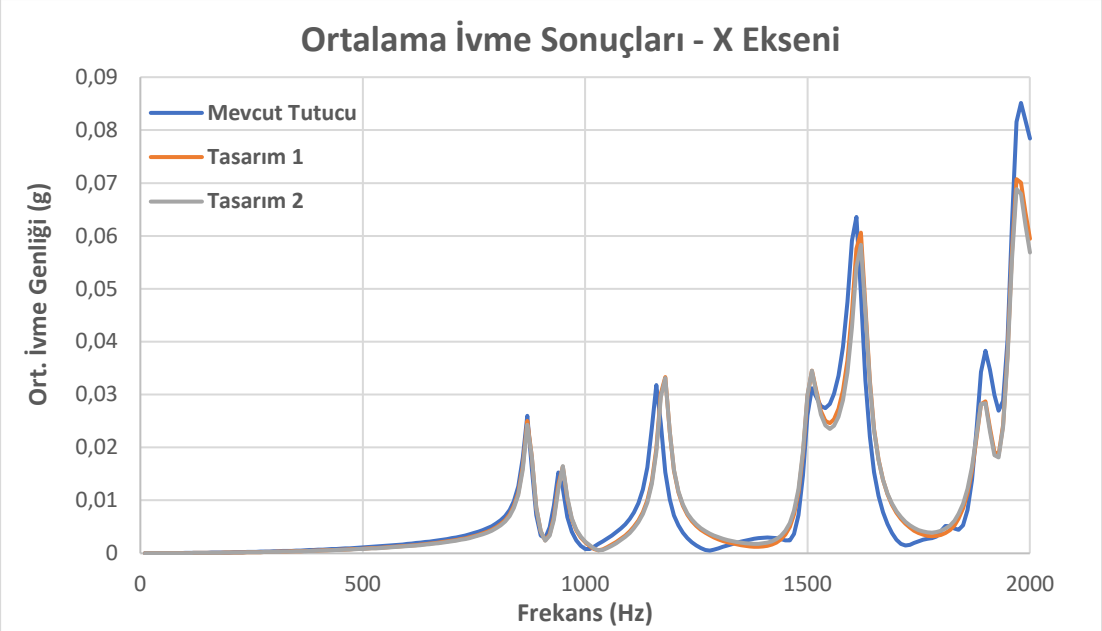
Şekil 4.64. Tasarım 2 harmonik tepki analizi modeli

Harmonik tepki analizlerine girdi oluşturmak amacıyla, öncelikle yeniden modal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analiz modellerinde, kütle bakımından tutucu parçalara göre daha ağır olan gövde bileşeni de yer aldığından, elde edilen doğal frekans değerleri mevcut tutucu analizlerinden elde edilen değerlere oldukça yakın çıkmıştır. Bununla birlikte, yeni tasarım parçalarda doğal frekans değerlerinde az da olsa bir miktar artış gözlemlenmiştir. Tüm doğal frekans değerleri Çizelge 4.12'da sunulmuştur.

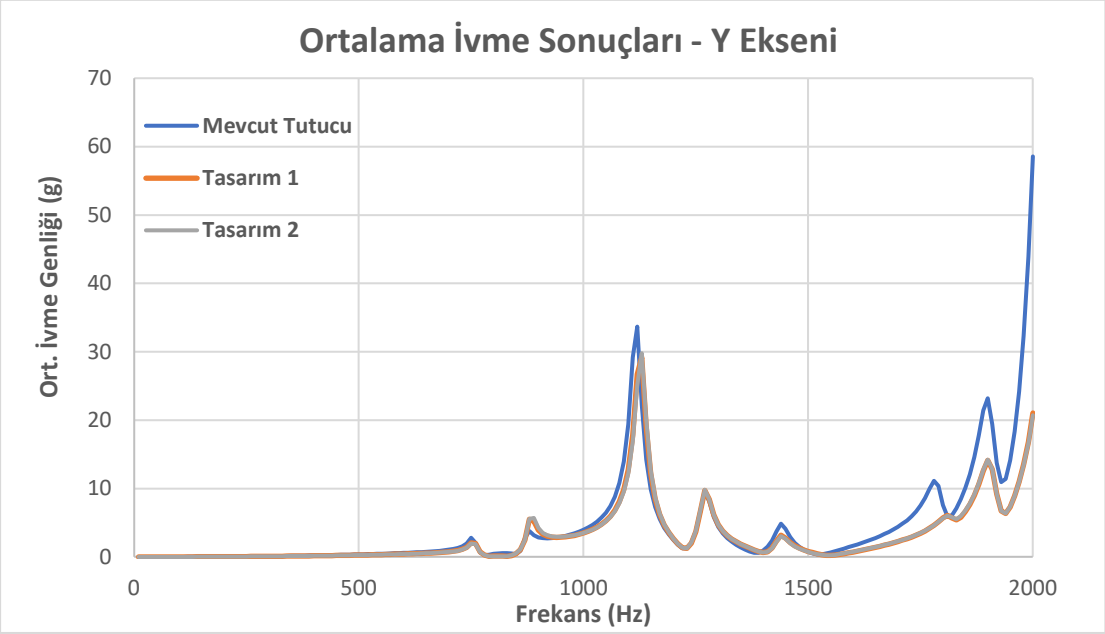
Çizelge 4.12. Tutucular ve gövdenin modal analizine ait doğal frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)		
	Mevcut Tutucu	Tasarım 1	Tasarım 2
1	755	757	757
2	872	873	874
3	874	882	883
4	943	947	948
5	1118	1127	1128
6	1161	1177	1177
7	1270	1270	1270
8	1440	1438	1439
9	1502	1504	1505
10	1610	1618	1619
11	1789	1815	1817
12	1804	1817	1818
13	1893	1894	1895
14	1903	1907	1907
15	1966	1966	1966

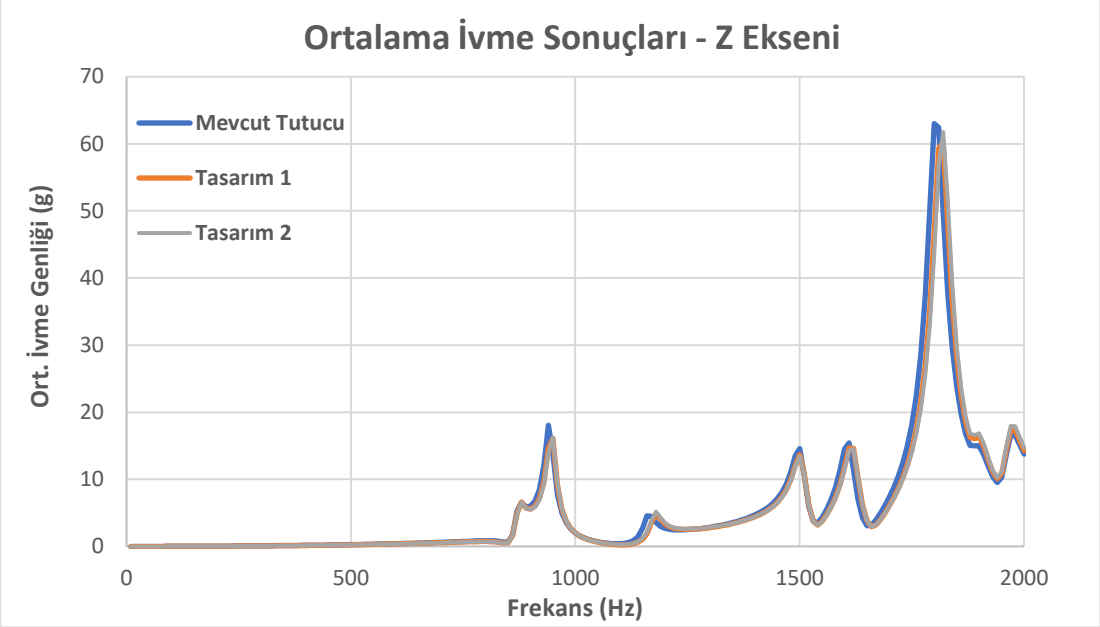
Modal analiz tamamlandıktan sonra, ANSYS yazılımındaki harmonik tepki analizi modülü modal çözüm sonuçlarına bağlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Harmonik tepki analizi sonuçları, mevcut tutucuda olduğu gibi, tutucu parçaların AÖB ile temas eden yüzeyinden elde edilmiştir. Bu yüzey üzerindeki ortalama genlik değerleri ivme, deformasyon ve gerilme cinsinden ele alınmıştır. İvme sonuçları, birim dönüşümü yapılarak g cinsinden ifade edilmiştir. Analizlere ait tüm sonuçlar Şekil 4.65 ile Şekil 4.73 arasında sunulmuştur. Bu sonuçlara göre 0–2000 Hz aralığında elde edilen en yüksek genlik değerleri Çizelge 4.13'te özetlenmiştir. Çizelge 4.14'de ise, yeni tasarlanan tutucu parçaların mevcut tutucuya göre genlik değerlerinde oluşan değişim oranları sunulmuştur. Çizelgeye yansıyan negatif değerler, genlik değerlerinde azalma olduğunu ifade etmektedir.



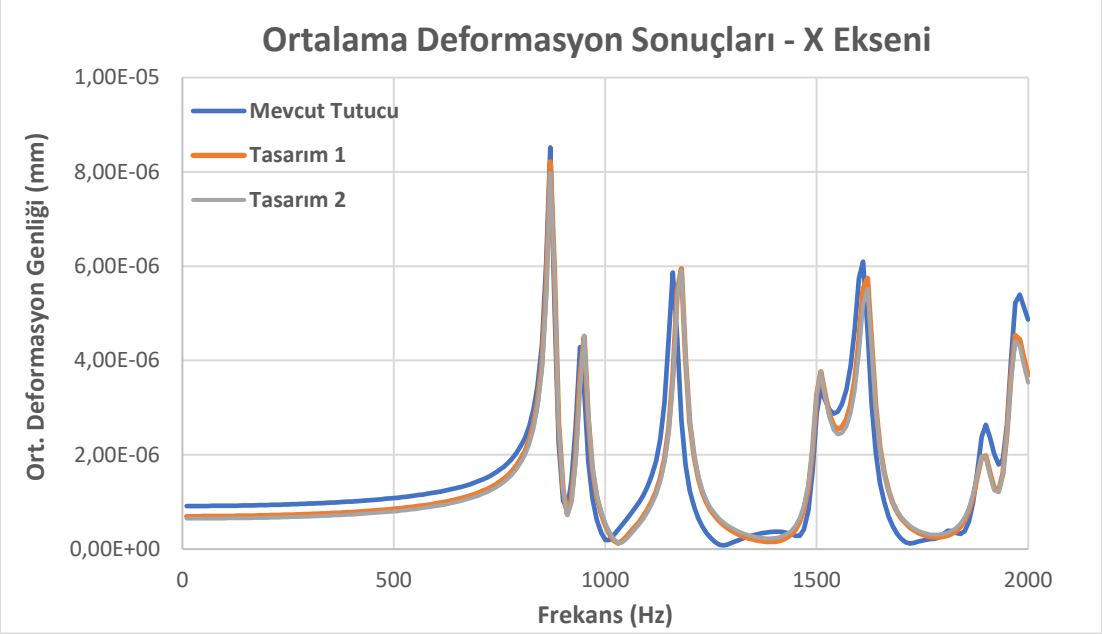
Şekil 4.65. X ekseni yönündeki ortalama ivme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



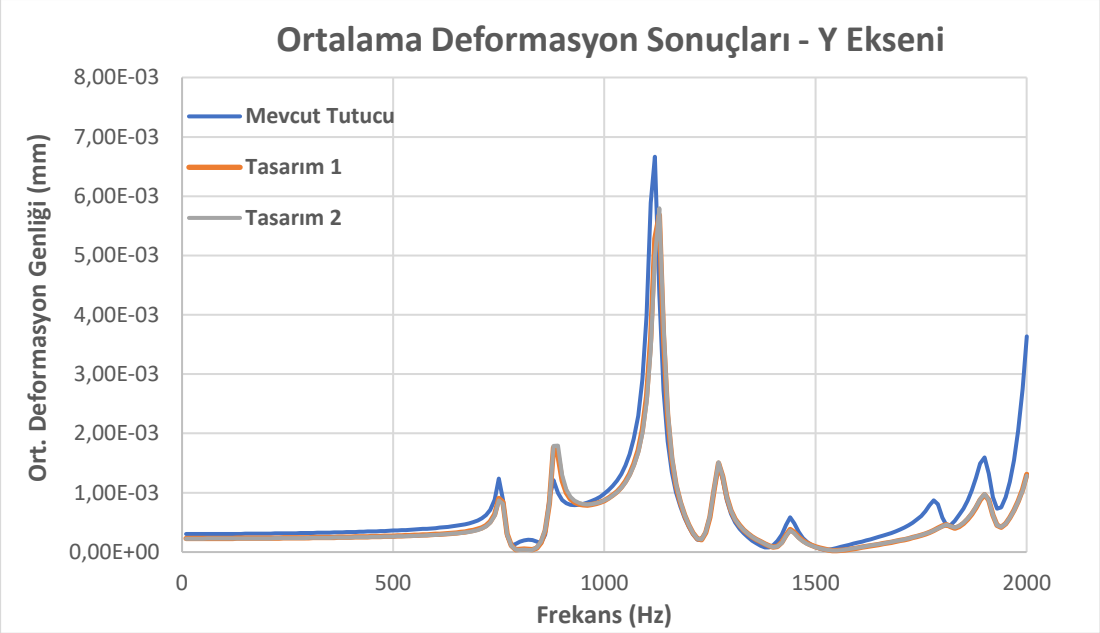
Şekil 4.66. Y ekseni yönündeki ortalama ivme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



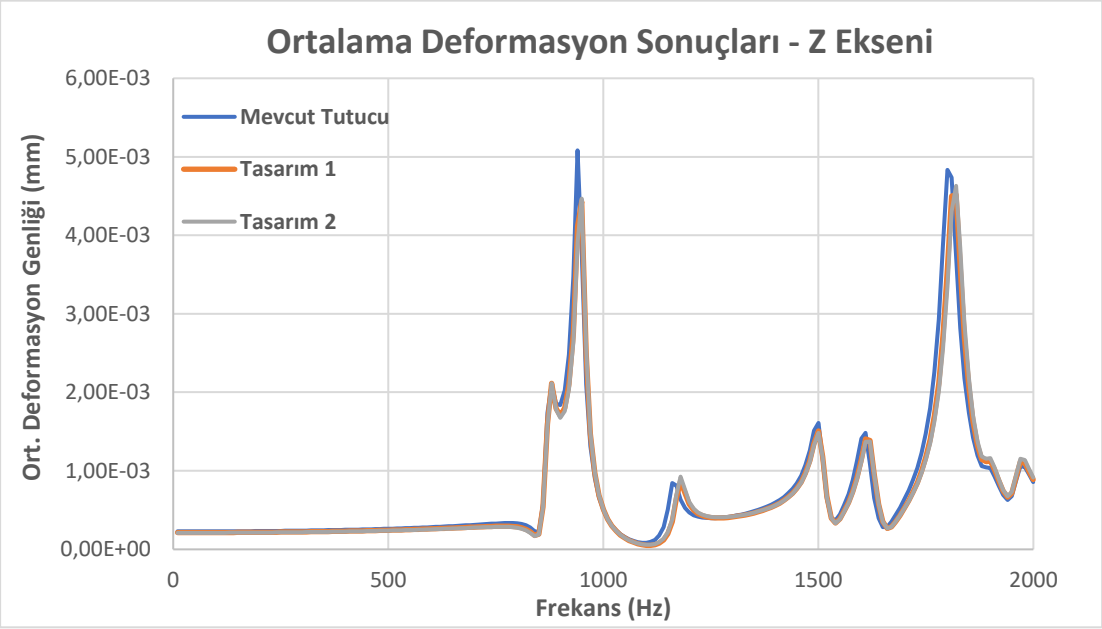
Şekil 4.67. Z ekseni yönündeki ortalama ivme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



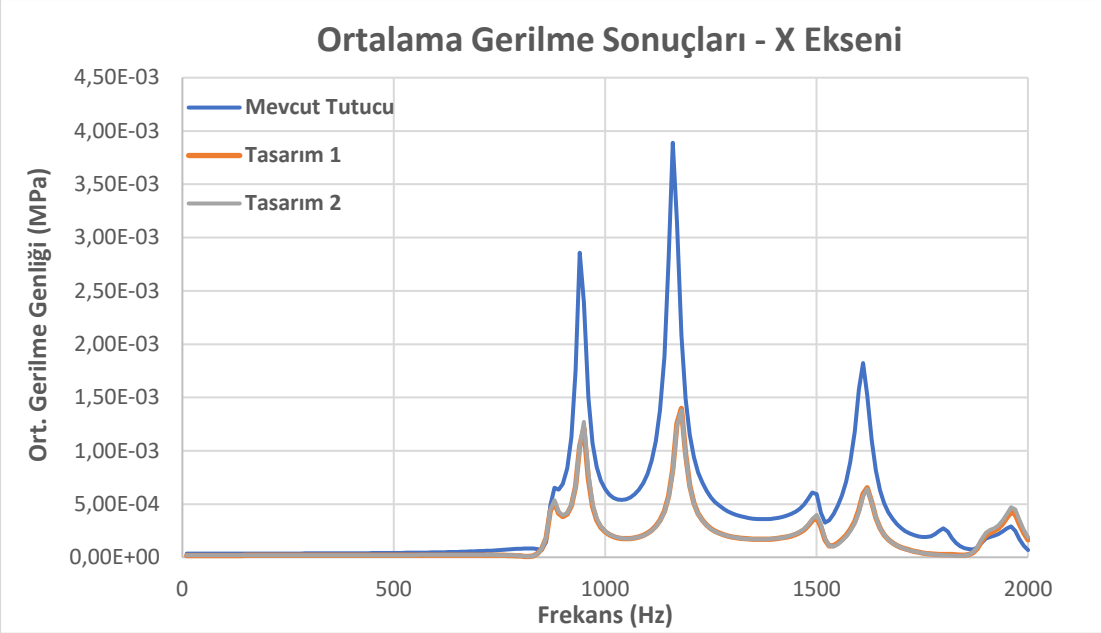
Şekil 4.68. X ekseni yönündeki ortalama deformasyon genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



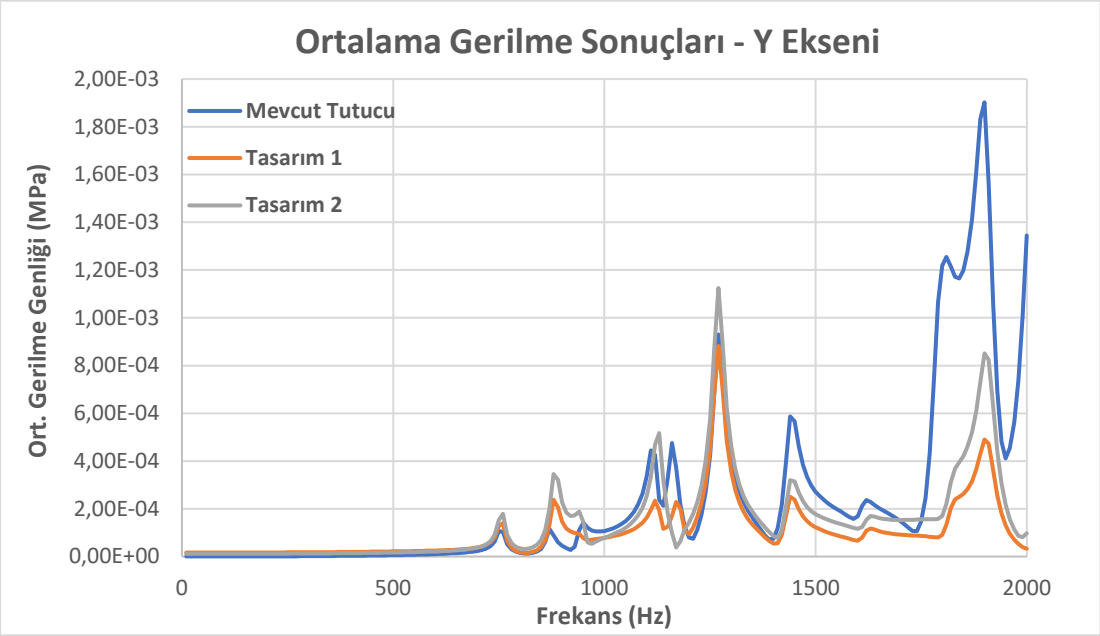
Şekil 4.69. Y ekseni yönündeki ortalama deformasyon genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



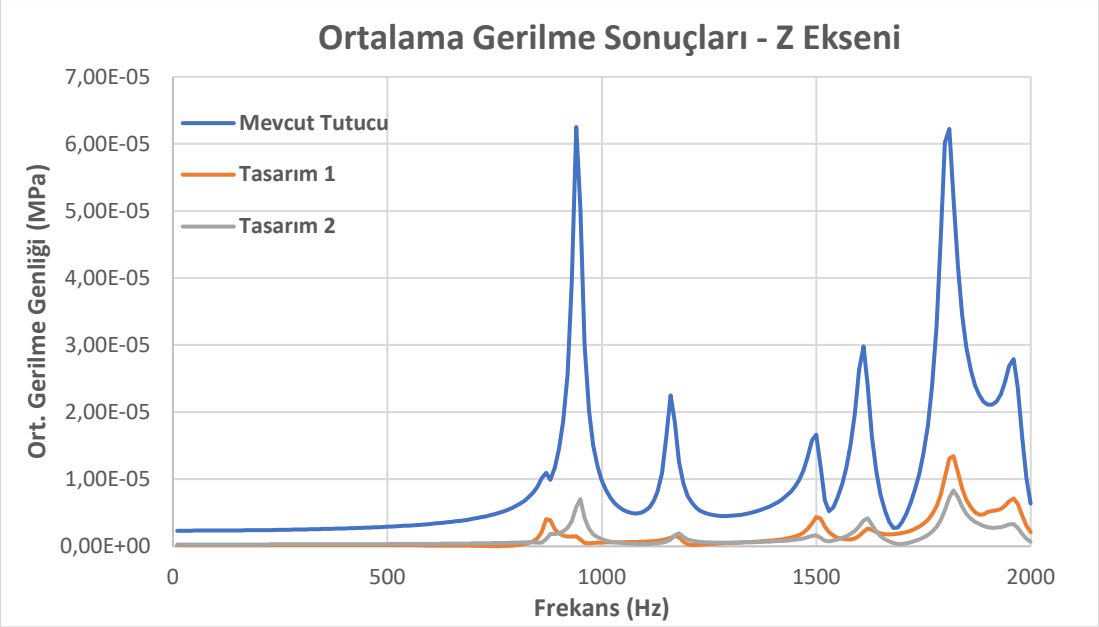
Şekil 4.70. Z ekseni yönündeki ortalama deformasyon genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



Şekil 4.71. X ekseni yönündeki ortalama gerilme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



Şekil 4.72. Y ekseni yönündeki ortalama gerilme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması



Şekil 4.73. Z ekseni yönündeki ortalama gerilme genliğinin harmonik tepki analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması

Çizelge 4.13. 0–2000 hz arası en yüksek genlik değerleri (harmonik tepki analizi sonuçları)

Sonuç Türü	Konfigürasyon	X Ekseni	Y Ekseni	Z Ekseni
İvme Sonucu (m/s^2)	Mevcut Tutucu	0,085 g	58,55 g	63,03 g
	Tasarım 1	0,071 g	29,21 g	60,21 g
	Tasarım 2	0,069 g	29,79 g	61,76 g
Deformasyon Sonucu (nm)	Mevcut Tutucu	8,52	6670	5080
	Tasarım 1	8,21	5680	4510
	Tasarım 2	7,97	5060	4630
Gerilme Sonucu (Pa)	Mevcut Tutucu	3890	1902	62,50
	Tasarım 1	1400	882	13,42
	Tasarım 2	1380	1125	8,32

Çizelge 4.14. Mevcut tutucuya göre genlik değişim oranları

Sonuç Türü	Konfigürasyon	X Ekseni	Y Ekseni	Z Ekseni
İvme Değişimi	Tasarım 1	% -16,94	% -50,12	% -4,48
	Tasarım 2	% -19,11	% -49,12	% -2,02
Deformasyon Değişimi	Tasarım 1	% -3,61	% -14,79	% -11,12
	Tasarım 2	% -6,42	% -13,09	% -8,83
Gerilme Değişimi	Tasarım 1	% -64,10	% -53,64	% -78,53
	Tasarım 2	% -64,51	% -40,85	% -86,69

Sonuçlar incelendiğinde, üç eksenin tamamında yeni tasarımların mevcut tutucuya kıyasla daha düşük genlik değerleri ürettiği görülmektedir. Özellikle Y ekseni ivme genlikleri (Şekil 4.66) tasarım farklarının en belirgin şekilde ortaya çıktığı bölgedir. Mevcut tutucu bu eksende frekans aralığı boyunca yüksek genliklerle tepki verirken, Tasarım 1 ve Tasarım 2'nin ivme genliklerini oldukça düşük seviyelerde tuttuğu gözlemlenmiştir. Bu davranış, yeni tasarımların titreşim enerjisinin yapıya iletimini azaltarak daha kararlı bir dinamik tepki oluşturduğunu göstermektedir. X ve Z eksenlerinde elde edilen ivme sonuçları (Şekil 4.65 ve Şekil 4.67) de benzer bir eğilim sergilemekte olup, her iki eksende de yeni tasarımların mevcut tutucuya göre daha düşük titreşim genlikleri ürettiği görülmektedir. Özellikle Tasarım 2'nin tüm eksenlerde daha dengeli bir ivme dağılımı sergilemesi dikkat çekicidir.

Deformasyon genlikleri incelendiğinde (Şekil 4.68–4.70), yeni tasarımların mevcut tutucuya kıyasla yapıya daha düşük deformasyon aktardığı görülmektedir. Y ve Z eksenlerinde %10–15 seviyelerine varan iyileşmeler elde edilmesi, bu eksenlerdeki yük aktarımının yeni tasarımlar tarafından daha etkili şekilde kontrol edildiğini göstermektedir. Bu sonuç, yapının titreşim etkilerine karşı daha kontrollü ve kararlı bir dinamik tepki verdiğini göstermektedir. X ekseninde deformasyon farkları daha sınırlı olmakla birlikte, her iki yeni tasarımın da mevcut tutucuya göre daha düşük değerler ürettiği gözlenmiştir.

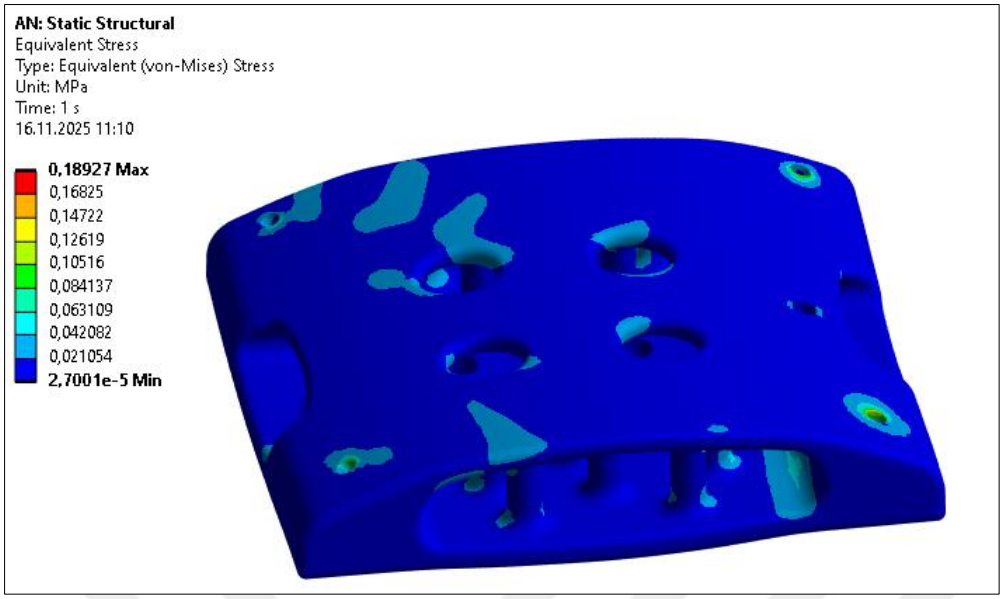
Gerilme genlikleri ise tasarımlar arasındaki farkın en net ortaya çıktığı büyüklüktür. Hem Şekil 4.71–4.73'te sunulan grafikler hem de Çizelge 4.14'te verilen değişim oranları, yeni tasarımların mevcut tutucuya kıyasla gerilme seviyelerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Tasarım 1 ve Tasarım 2'nin X ekseninde %64, Y ekseninde %40–53 ve Z

ekseninde %78–86 oranlarında gerilme azalımı sağlaması, yapıya aktarılan dinamik gerilme yükünün etkin şekilde bastırıldığını göstermektedir. Özellikle Z eksenindeki yüksek düzeyde iyileşme, dinamik yüklerin birikme eğiliminin olduğu bu eksende yeni tasarımların rezonans riskini azaltıcı bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Gerilme davranışındaki bu iyileşme, mühimmatın çalışma koşulları düşünüldüğünde kritik öneme sahiptir.

Genel olarak tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, hem Tasarım 1 hem de Tasarım 2 mevcut tutucuya kıyasla daha düşük ivme, deformasyon ve gerilme genlikleri üretmiş; böylece titreşim altında daha kararlı, güvenli ve dirençli bir davranış sergilemiştir. Bununla birlikte, Tasarım 2 tüm eksenlerde daha dengeli bir dinamik tepki oluşturması, gerilme genliklerini daha belirgin şekilde azaltması ve titreşim sönümleme davranışındaki iyileşmenin daha etkili olması nedeniyle daha ön plana çıkmaktadır. Tasarım 2'nin özellikle orta ve yüksek frekans bölgelerinde genlik artışlarını bastırma kabiliyetinin daha kuvvetli olması, rezonans oluşma ihtimalinin azaltılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda, Tasarım 2, titreşim sönümleme performansı açısından en uygun tasarım olarak belirlenmiş ve eklemeli imalatla üretim ile deneysel test süreçleri için seçilmiştir.

4.8. Statik Analiz

Eklemeli imalat ile üretim ve deneysel çalışmalar için seçilen Tasarım 2 tutucu parçasının yapısal dayanımı, mevcut tutucu parçada uygulananlarla aynı sınır koşulları altında statik analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir. Analizde benzer şekilde X, Y ve Z doğrultularında eş zamanlı olarak 5 g ivme yükü uygulanmış ve bu kapsamda en kötü durum senaryosu incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, parçanın maruz kaldığı maksimum eşdeğer gerilme değeri 0,19 MPa seviyesinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.74). Bu değer, kullanılan malzemenin dayanım sınırlarının oldukça altında olup Tasarım 2'nin uygulanan yüklemeler altında yapısal açıdan herhangi bir sorun oluşturmadığını göstermektedir. Ayrıca, mevcut tutucu ile karşılaştırıldığında gerilme seviyelerinin daha düşük çıkması Tasarım 2'nin yapısal dayanım açısından iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.74. Tasarım 2 statik analiz sonucu; eşdeğer gerilme

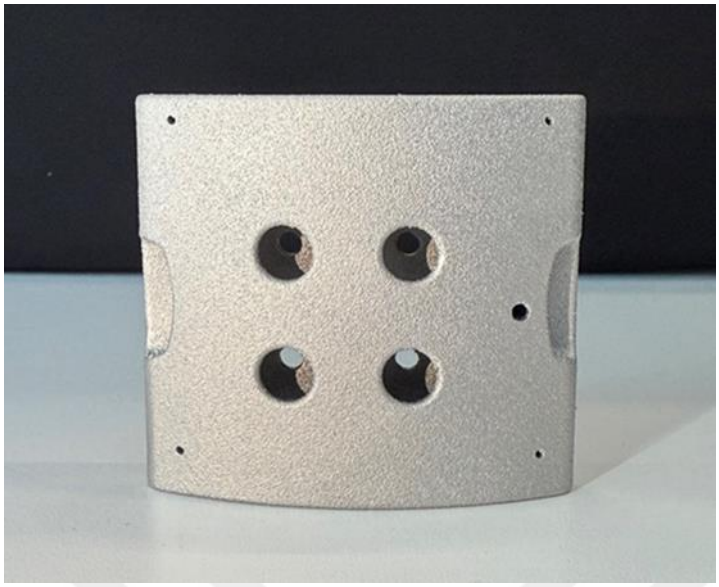
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Eklemeli İmalat ile Üretim

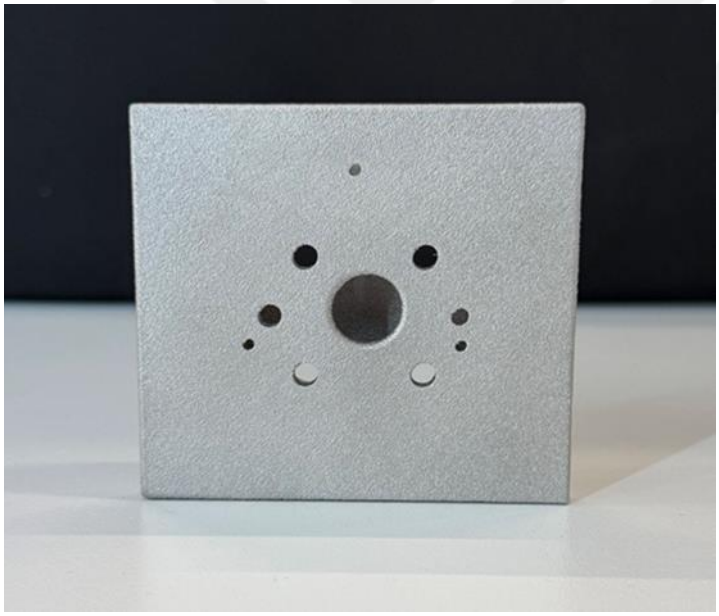
Yeniden tasarlanan ve eklemeli imalat ile üretimi tercih edilen Tasarım 2'ye ait üç boyutlu geometri üretim sürecine aktarılmıştır. Üretimde, toz yataklı bir eklemeli imalat yöntemi olan SLM teknolojisi kullanılmıştır. Malzeme olarak AlSi10Mg alaşım tozu seçilmiş olup, toz partikül boyutu 20–63 µm aralığındadır. Üretimler EOS M400-4 cihazında gerçekleştirilmiş ve cihazın standart işlem parametreleri uygulanmıştır. Kullanılan tüm işlem parametreleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Bu parametrelerle gerçekleştirilen üretimlerde elde edilen enerji yoğunluğu yaklaşık 50 J/mm³ seviyesindedir. Literatürde, seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen alüminyum alaşımlarında satranç tahtası (ing. chess) tarama stratejisinin, ısı birikimini azaltarak daha homojen mikro yapı oluşumunu desteklediği ve buna bağlı olarak mekanik özellikler ile boyutsal kararlılığı iyileştirdiği bildirilmektedir [31-32]. Bu nedenle, üretim sürecinde tarama stratejisi olarak satranç tahtası yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca, katmanlar arası bağlanmanın artırılması ve üretim kaynaklı kusurların sınırlandırılması amacıyla 30 µm katman kalınlığı seçilmiştir. Üretilen numunelerin bir kısmına 300 °C'de 2 saat süreyle gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış, bir kısmı ise üretildiği haliyle (ing. as-built) bırakılmıştır. Böylelikle ısıl işlemin titreşim sönümleme performansı üzerindeki etkisinin de değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Parçanın üretim sonrası görselleri Resim 5.1 – Resim 5.5 arasında sunulmuştur.

Çizelge 5.1. SLM işlem parametreleri

Parametre	Değer
Lazer gücü	370 W
Lazer çapı	100 µm
Tarama mesafesi	0,19 mm
Tarama hızı	1300 mm/s
Tarama deseni	Satranç tahtası
Katman kalınlığı	30 µm
Enerji yoğunluğu	50 J/mm^3



Resim 5.1. Üretim sonrası Tasarım 2 – üstten görünüm



Resim 5.2. Üretim sonrası Tasarım 2 – alttan görünüm



Resim 5.3. Üretim sonrası Tasarım 2 – önden görünüm



Resim 5.4. Üretim sonrası Tasarım 2 – arkadan görünüm



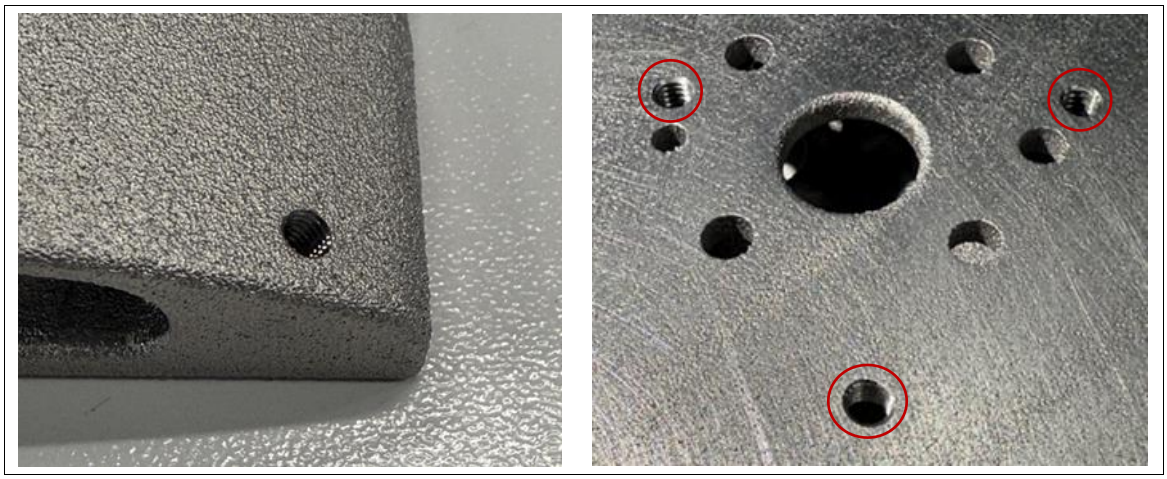
Resim 5.5. Üretim sonrası Tasarım 2 – yandan görünüm

Üretilen Tasarım 2 tutucu parçasının eklemeli imalat sonrası yüzey kalitesi, özellikle AÖB ile temas eden ara yüzeyde hassasiyet gerektirdiğinden, bu bölgeye yüzey pürüzlülüğünü azaltmaya yönelik manuel zımparalama işlemi uygulanmıştır. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg parçalar, üretim doğası gereği 8–20 µm seviyelerinde yüzey pürüzlülüğüne sahip olabilmektedir. AÖB'nin sensör doğruluğunu etkileyebilecek yerel temas noktalarının iyileştirilmesi amacıyla, temas yüzeyinde kontrollü bir yüzey düzeltme işlemi gerçekleştirilmiş ve montaj uyumluluğu artırılmıştır.

Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra, AÖB ve gövde bağlantılarında kullanılan cıvataların doğru şekilde sıkılabilmesi için parçanın ilgili bölgelerine M3 ve M4 boyutlarında kılavuz çekilmiştir. Bu işlem, SLM ile üretilen parçalarda karşılaşılabilen gözeneklilik ve lokal yüzey bozukluklarının vida açma performansını etkileyebilmesi nedeniyle dikkatle gerçekleştirilmiştir. Kılavuz çekme operasyonu sonucunda bağlantı deliklerinin vida dişleri standartlara uygun hale getirilmiş ve montaj güvenilirliği sağlanmıştır. Zımparalama sonrası elde edilen yüzeyin görselleri Resim 5.6'da; M3 ve M4 kılavuzlarının açıldığı bağlantı bölgelerine ait görseller ise Resim 5.7'de sunulmuştur.

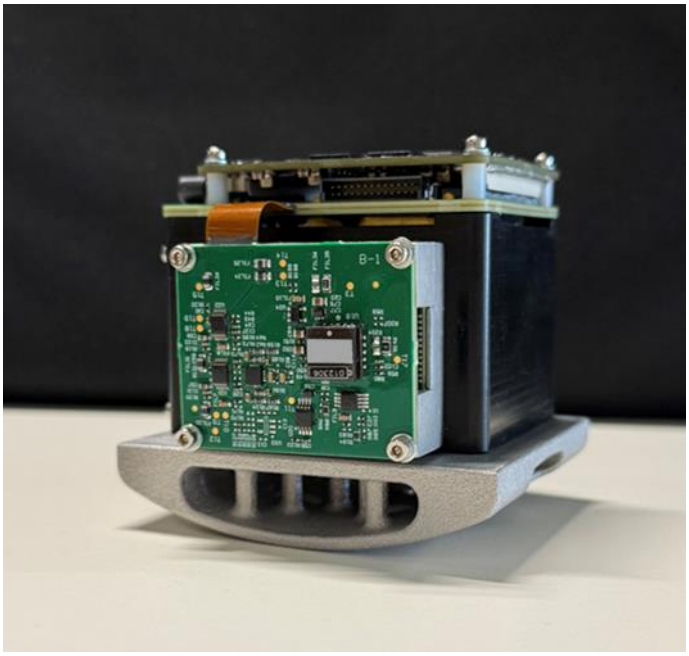


Resim 5.6. Zımpara sonrası yüzey görünümü

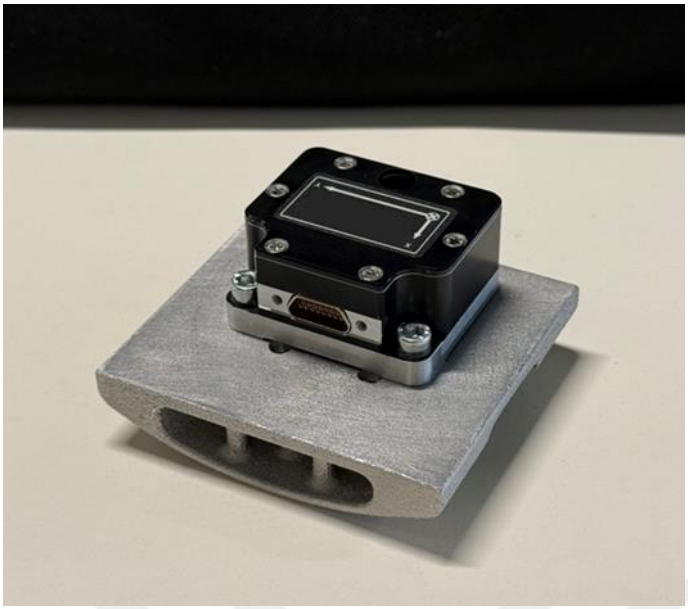


Resim 5.7. Kılavuz çekilmiş bağlantı bölgeleri

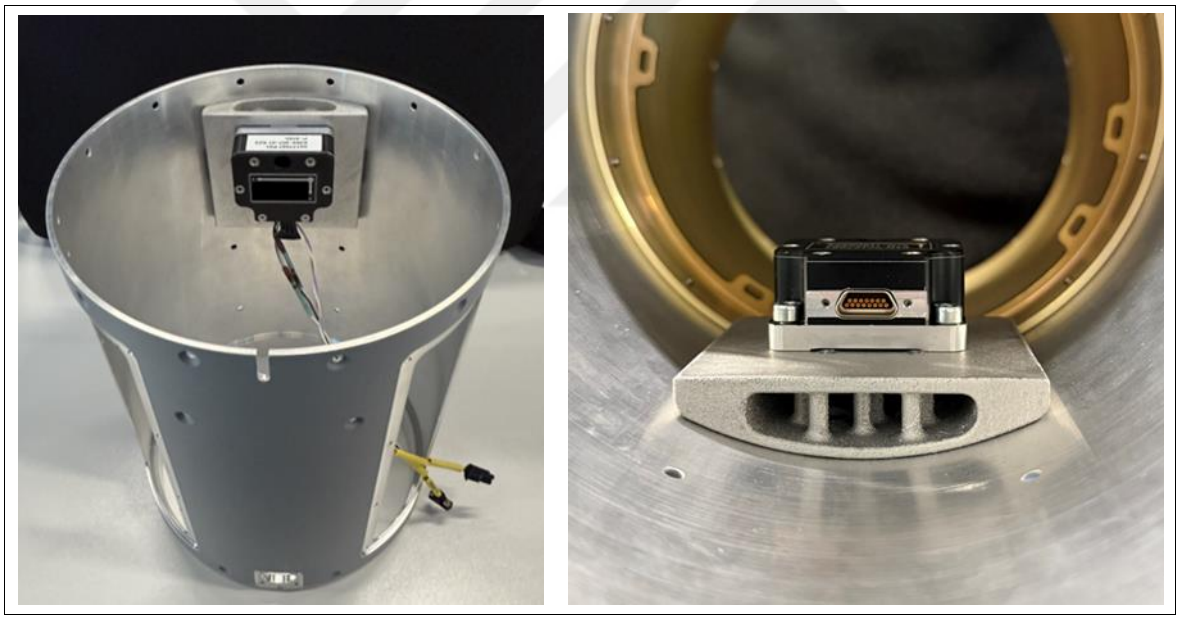
Yeni tasarım tutucu parça üzerindeki son işlemler tamamlandıktan sonra, parçanın uyumlu olması gereken AÖB'ler ile gövde üzerindeki bağlantı noktalarına montajı gerçekleştirilmiş ve montaj bütünlüğü kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sonucunda, tutucu parçanın hem AÖB'ler hem de gövde ile bağlantılarında herhangi bir uyumsuzluk veya montaj problemi gözlemlenmemiştir. Montaj aşamalarına ve nihai montaj durumuna ilişkin görseller Resim 5.8– Resim 5.10 arasında sunulmuştur.



Resim 5.8. Tasarım 2 tutucu ve AÖB-1 montaj durumu



Resim 5.9. Tasarım 2 tutucu ve AÖB-2 montaj durumu



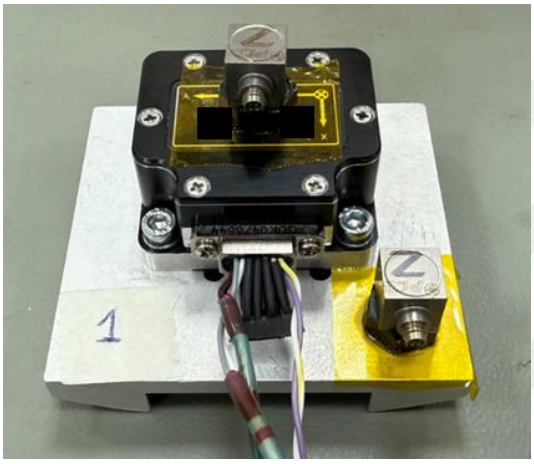
Resim 5.10. Tasarım 2 tutucu ve gövde montaj durumu

5.2. Sinüs Taraması ile Titreşim Testi

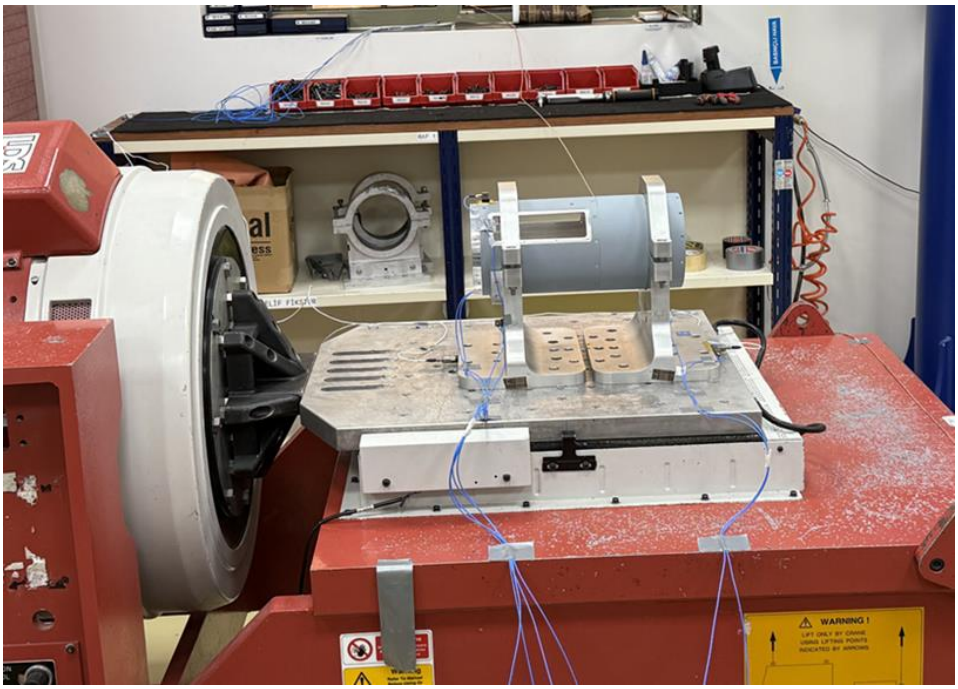
5.2.1. Sinüs tarama testinin kurulumu ve uygulanışı

Yeni tasarlanan AÖB tutucu parçasının üretim ve montajında herhangi bir sorunla karşılaşılmamasının ardından deneysel test çalışmalarına geçilmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak sinüs taraması yöntemiyle titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla özel bir

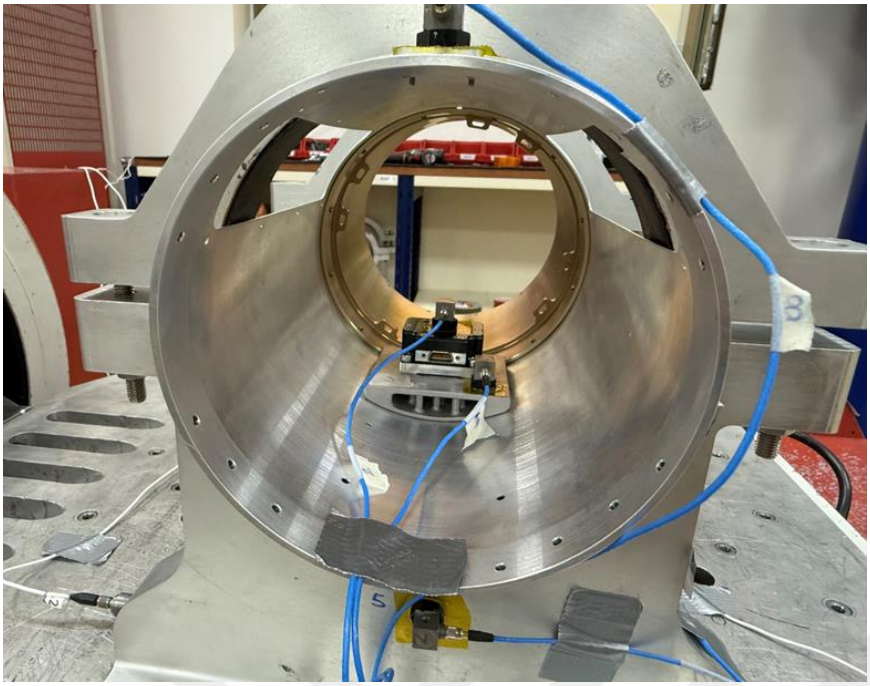
test düzeneği hazırlanmış ve deneylerde bir titreşim test cihazı kullanılmıştır. Daha kompakt yapısı ve ivmeölçer yerleştirmeye uygun yüzey geometrisi nedeniyle deneysel çalışmalar AÖB-2 üzerinde yürütülmüştür. AÖB-2'nin üzerine ve tutucu parçaların boşta kalan belirli bir bölgesine üç eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiş; bu sensörler üzerinden titreşim yanıtları ölçülmüştür (Resim 5.11). Daha sonra, ilgili tutucu konfigürasyonu gövdeye monte edilmiş ve gövde bir fikstür aracılığıyla titreşim test cihazının tablasına sabitlenmiştir. Ayrıca gövde ve fikstür üzerine kontrol amaçlı ek ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Test düzeneğine ait görseller Resim 5.12 ve Resim 5.13'te sunulmuştur.



Resim 5.11. İvmeölçer yerleştirilmiş AÖB-2 ve tutucu komplesi



Resim 5.12. Sinüs tarama test düzeneği - 1



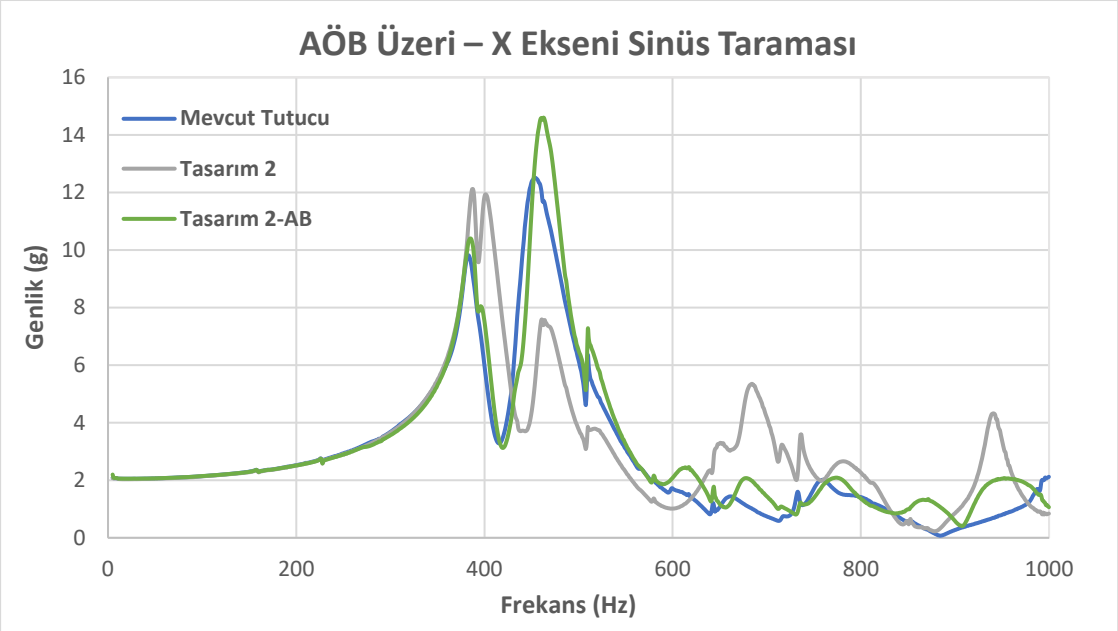
Resim 5.13. Sinüs tarama test düzeneği – 2

Test kapsamında X, Y ve Z eksenlerine karşılık gelecek şekilde, 5–1000 Hz frekans aralığında 2 g genlikli sinüzoidal titreşim ayrı ayrı uygulanmıştır. Mühimmatın taşıyıcı platform üzerinde ve platformdan ayrıldıktan sonraki fazında maruz kaldığı titreşimlerin büyük çoğunluğunun 500 Hz'in altında yoğunlaştığı Kısım 4.3'te belirtilmişti. Bununla birlikte, dinamik davranışın güvenli tarafta değerlendirilmesi ve yapının daha geniş bir frekans aralığında incelenebilmesi amacıyla test bandı 1000 Hz'e kadar genişletilmiştir. Mühimmatın operasyonel koşullarında 1000–2000 Hz frekans aralığında titreşime maruz kalmadığından, bu frekans bandının yalnızca sayısal analizler ile değerlendirilmesi yeterli görülmüştür. Titreşim cihazı tek eksende uyarım verebildiği için, her eksen yönünde testlerin gerçekleştirilebilmesi amacıyla gövde veya fikstür uygun şekilde döndürülmüştür. Tüm eksenler için test düzeneğinin görünümü Ek 1'de sunulmuştur. Aynı test prosedürü sırasıyla mevcut tutucu ile, Tasarım 2'nin gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış versiyonu ve ısıl işlem uygulanmamış versiyonu için tekrarlanmıştır. Bu kapsamda, ısıl işlem uygulanmış konfigürasyon Tasarım 2, ısıl işlem uygulanmayıp üretildiği haliyle bırakılan konfigürasyon (ing. As-Built) ise Tasarım 2-AB olarak adlandırılmıştır.

5.2.2. Sinüs tarama testi sonuçları

Titreşim testlerinde elde edilen veriler ivme cinsinden değerlendirilmiştir. AÖB üzerinden ve tutucu üzerinden alınan ölçümler karşılaştırıldığında, iki veri grubunun birbiriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Çalışmada AÖB'ye iletilen titreşimlerin sınırlanması amaçlandığından, değerlendirmeler AÖB üzerindeki ivmeölçerden alınan sonuçlar üzerinden yapılmıştır. Bununla birlikte, kontrol amaçlı kullanılan ivmeölçerin ölçümlerinde de herhangi bir tutarsızlık veya anormallik gözlenmemiştir. Tüm tutucu konfigürasyonları için X, Y ve Z eksenlerinde AÖB üzerinden alınan ivme sonuçları sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre sinüs taraması boyunca elde edilen en yüksek genlik değerleri ve yeni tasarımların genliklerinin mevcut tutucuya göre değişim oranları ise Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiştir. Bu çizelgelerde yer alan negatif değerler, ilgili tasarımın genlik değerlerinde azalma sağladığını göstermektedir. Tutucu üzerinden alınan ölçümler ile kontrol ivmeölçerine ait sonuçlar ise EK 2'de paylaşılmıştır.

X ekseni sonuçları



Şekil 5.1. AÖB üzerinden alınan X ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları

Çizelge 5.2. Sinüs tarama testi X ekseni en yüksek genlik değerleri

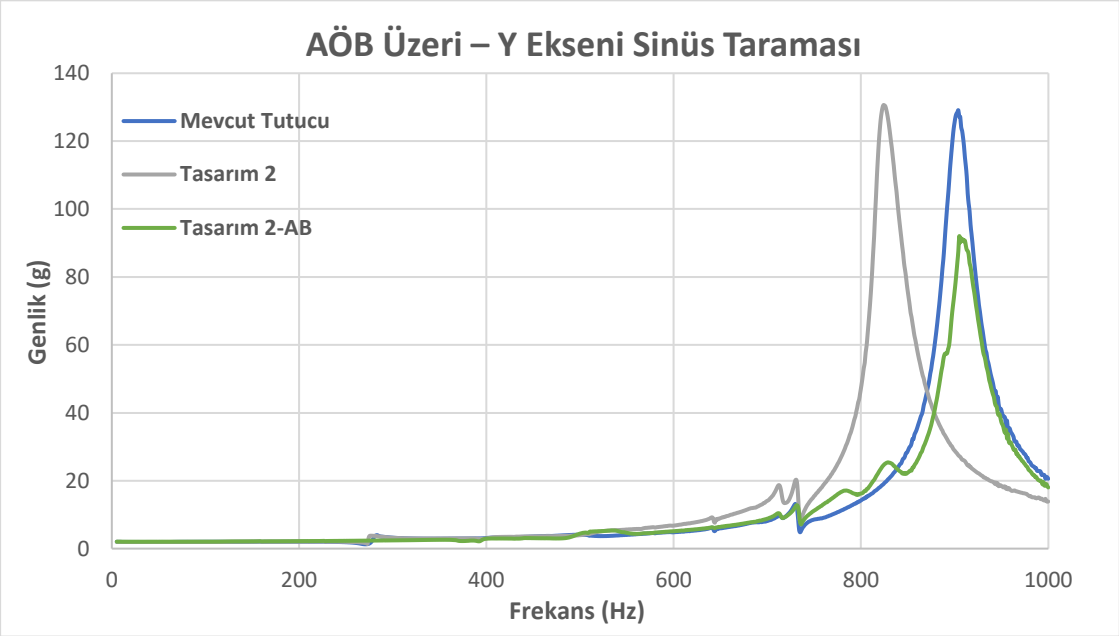
X Ekseni Titreşim Testi Sonuçları				
	Parça	Frekans (Hz)	Genlik (m/s^2)	Mevcut Tutucuya Göre Değişim (%)
1	Mevcut Tutucu	453	12,5 g	-
	Tasarım 2	464	7,6 g	-39,2
	Tasarım 2-AB	463	14,6 g	16,8
2	Mevcut Tutucu	383	9,8 g	-
	Tasarım 2	388	12,1 g	23,5
	Tasarım 2-AB	385	10,4 g	6,1

Şekil 5.1 ve Çizelge 5.2'de sunulan sonuçlara göre AÖB üzerindeki X ekseni titreşim yanıtında mevcut tutucu için en yüksek tepe ivme değeri 453 Hz frekansında 12,5 g olarak ölçülmüştür. Aynı mod Tasarım 2'de yaklaşık 464 Hz'de 7,6 g, Tasarım 2-AB'de ise 463 Hz'de 14,6 g olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç, kritik ana mod bölgesinde Tasarım 2'nin mevcut tutucuya kıyasla titreşim genliğini yaklaşık %39 oranında azalttığını; Tasarım 2-AB'nin ise yaklaşık %17 oranında artırdığını göstermektedir. Bu durum Tasarım 2'nin dinamik yük aktarımını daha düzgün dağıttığını, Tasarım 2-AB'nin ise rijitlik ve iç gerilme etkileri nedeniyle aynı modda daha yüksek bir titreşim tepkisi oluşturduğunu düşündürmektedir. Mevcut tutucu için ikinci baskın tepe değer 383 Hz'de 9,8 g olarak ölçülmüştür. Bu frekansta Tasarım 2'nin tepe değeri yaklaşık 388 Hz'de 12,1 g, Tasarım 2-AB'nin ise 385 Hz'de 10,4 g olarak kaydedilmiştir. Her iki yeni tasarım da bu modda mevcut tutucuya göre daha yüksek ivme üretmiştir. Bu artışın, yeni tasarımlardaki kütle ve rijitlik dağılımının 383 Hz yakınındaki yerel modların katılımını artırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Tasarım 2'de ayrıca iki belirgin ikincil mod tespit edilmiştir: ilki 684 Hz'de 6,2 g, ikincisi ise 943 Hz'de 5,9 g seviyesindedir. Tasarım 2-AB'de bu frekanslara karşılık gelen modlar gözlenmekle birlikte genlikleri Tasarım 2'ye kıyasla daha düşüktür. Mevcut tutucuda ise bu frekans bölgelerinde daha düşük ivme genlikleri elde edilmiştir. Bu durum, yeni tasarım geometrisinin yüksek frekanslarda belirli yerel modları daha görünür hale getirdiğini, ancak söz konusu modların ana kritik frekanslara kıyasla daha düşük seviyede kaldığını

göstermektedir. X ekseni genel olarak değerlendirildiğinde, özellikle ana mod civarında Tasarım 2'nin daha düşük ivme genlikleri üreterek AÖB üzerindeki dinamik yükü azalttığı; Tasarım 2-AB'nin ise hem ana modda hem de yüksek frekans aralıklarında daha yüksek ivme seviyeleri oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuç, Tasarım 2'nin X ekseninde daha dengeli ve kontrol edilebilir bir titreşim yanıtı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Y ekseni sonuçları



Şekil 5.2. AÖB üzerinden alınan Y ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları

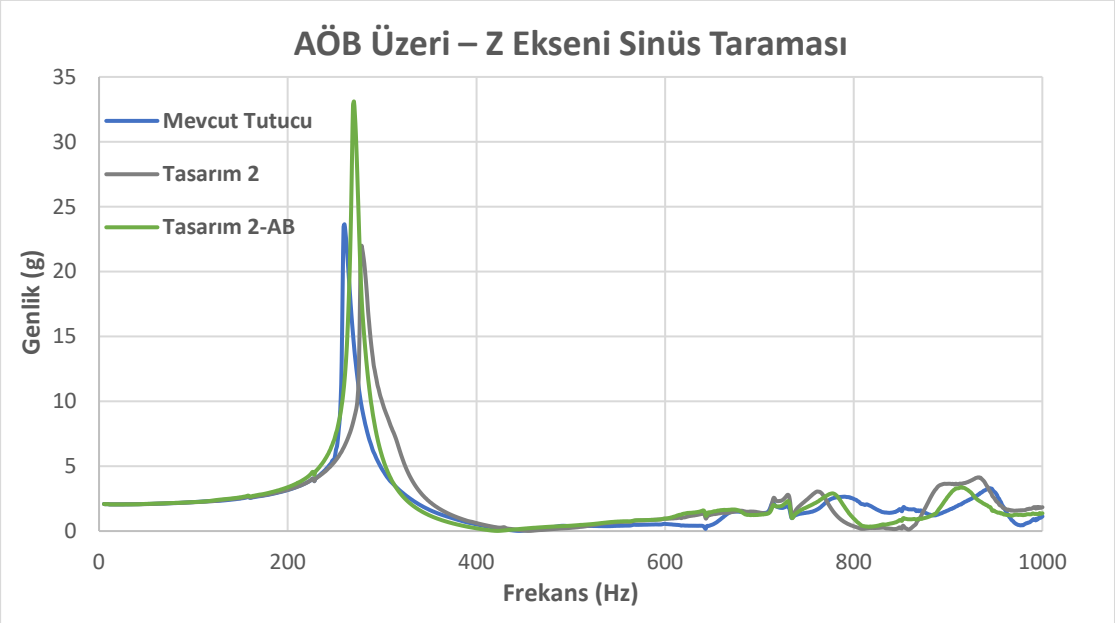
Çizelge 5.3. Sinüs tarama testi Y ekseni en yüksek genlik değerleri

Y Ekseni Titreşim Testi Sonuçları				
	Parça	Frekans (Hz)	Genlik (m/s^2)	Mevcut Tutucuya Göre Değişim (%)
1	Mevcut Tutucu	904	129,1 g	-
	Tasarım 2	824	130,6 g	1,2
	Tasarım 2-AB	905	92,0 g	-28,7

Şekil 5.2 ve Çizelge 5.3'te paylaşılan sonuçlara göre Y ekseninde mevcut tutucuda ana mod 904 Hz frekansta 129,1 g seviyesinde gerçekleşmiştir. Tasarım 2 aynı modda 130,6 g ile

mevcut tutucuya oldukça yakın bir tepki vermiş, frekans ise 824 Hz civarına kaymıştır. Tasarım 2-AB ise 905 Hz'de 92,0 g değeri ile mevcut tutucuya kıyasla tepe ivmeyi yaklaşık %29 oranında azaltmıştır. Bu eksende ana mod dışındaki dinamik büyütme katsayıları (ing. amplification level) düşük olduğundan değerlendirme yalnızca ana mod üzerinden yapılmış; sonuçlar üretim sonrası malzeme iç gerilmelerinin Y ekseninde kritik dinamik davranışı doğrudan etkilediğini göstermiştir. Tasarım 2'nin ana mod genliğini belirgin şekilde azaltmamasına rağmen frekans kaymasının kontrollü olması ve mod yapısının daha kararlı hale gelmesi, dinamik yanıtın öngörülebilirliğini artırmaktadır.

Z ekseni sonuçları



Şekil 5.3. AÖB üzerinden alınan Z ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları

Çizelge 5.4. Sinüs tarama testi Z ekseni en yüksek genlik değerleri

Z Ekseni Titreşim Testi Sonuçları				
	Parça	Frekans (Hz)	Genlik (m/s^2)	Mevcut Tutucuya Göre Değişim (%)
1	Mevcut Tutucu	260	23,7 g	-
	Tasarım 2	278	22,0 g	-7,2
	Tasarım 2-AB	270	33,1 g	39,7

Şekil 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilen sonuçlara göre Z ekseninde mevcut tutucunun ana mod tepe değeri 260 Hz frekansında 23,7 g olarak ölçülmüştür. Tasarım 2 bu modda 278 Hz'de 22,0 g değeri ile yaklaşık %7 daha düşük genlik üretmiş; Tasarım 2-AB ise 270 Hz'de 33,1 g seviyesine yükselerek mevcut tasarıma göre %40'a yakın oranda artış gerçekleştirmiştir. Bu eksende ana mod belirleyici olduğundan, Tasarım 2'nin daha düşük titreşim iletimi sağlaması yapısal davranış açısından önemli bir avantajdır. Tasarım 2-AB'deki belirgin artış ise iç gerilmelerin giderilmemiş olmasının dinamik büyütme üzerinde olumsuz etki yarattığını göstermektedir.

Isıl işlemin etkisi

Isıl işlemin dinamik davranış üzerindeki etkilerinin eksen ve mod frekansına bağlı olarak değişken olduğu görülmektedir. X ve Z eksenlerinde ısıl işlem uygulanması, özellikle ana mod frekanslarında ivme genliğini azaltmış ve titreşim iletimini daha kontrol edilebilir bir seviyeye çekmiştir. Isıl işlemin iç gerilmeleri azaltarak malzeme davranışını daha homojen hale getirdiği, bu sayede kritik modlarda daha dengeli ve kararlı bir titreşim yanıtı oluştuğu belirlenmiştir. Buna karşın, X ekseninde 383 Hz civarında olduğu gibi bazı frekanslarda ısıl işlem sonrasında sınırlı genlik artışları gözlenmiş; bu durum yerel rijitlik değişimleri ve mod şekillerindeki yeniden dağılım ile ilişkilendirilmiştir.

Y ekseninde ise ısıl işlemin etkisi diğer eksenlerden farklı bir eğilim göstermiştir. Sinüs tarama testlerinde, ısıl işlem uygulanmış numunede ana rezonans frekansının 905 Hz'den 824 Hz'e düştüğü, buna karşılık pik titreşim genliğinin 92 g'den 130.6 g'ye yükseldiği belirlenmiştir. Rezonans frekansındaki bu düşüş, sistemin Y yönündeki etkin dinamik rijitliğinin azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda genlikteki artış, dinamik sönümün ısıl işlem sonrasında azaldığını göstermektedir. Bu davranış, SLM üretim yönteminin inşa yönüne bağlı olarak oluşturduğu anizotropik yapı ile doğrudan ilişkilidir. Isıl işlem, X ve Z yönlerinde kalıntı gerilmeleri azaltarak dinamik davranışı iyileştirirken, katmanlar arası yük aktarımının daha baskın olduğu Y yönünde bağlantı rijitliği ve sürtünme kaynaklı sönümün azalmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, Y ekseninde rezonans daha düşük bir frekans bandına kaymış ve sinüs tarama sırasında daha yüksek titreşim genlikleri meydana gelmiştir.

Genel olarak elde edilen bulgular, ısıl işlemin tüm eksen ve modlar üzerinde aynı yönde etki göstermediğini, bazı eksenlerde dinamik davranışı iyileştirirken, üretim yönüne duyarlı eksenlerde sistem seviyesinde olumsuz sonuçlara yol açabildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, ısıl işlem uygulanmasına ilişkin mühendislik kararı yalnızca genlik seviyeleri üzerinden değil; kritik eksenlerdeki mod katılımı, inşa yönüne bağlı yapısal özellikler, frekans hassasiyeti ve sistemin titreşim gereksinimleri birlikte değerlendirilerek verilmelidir.

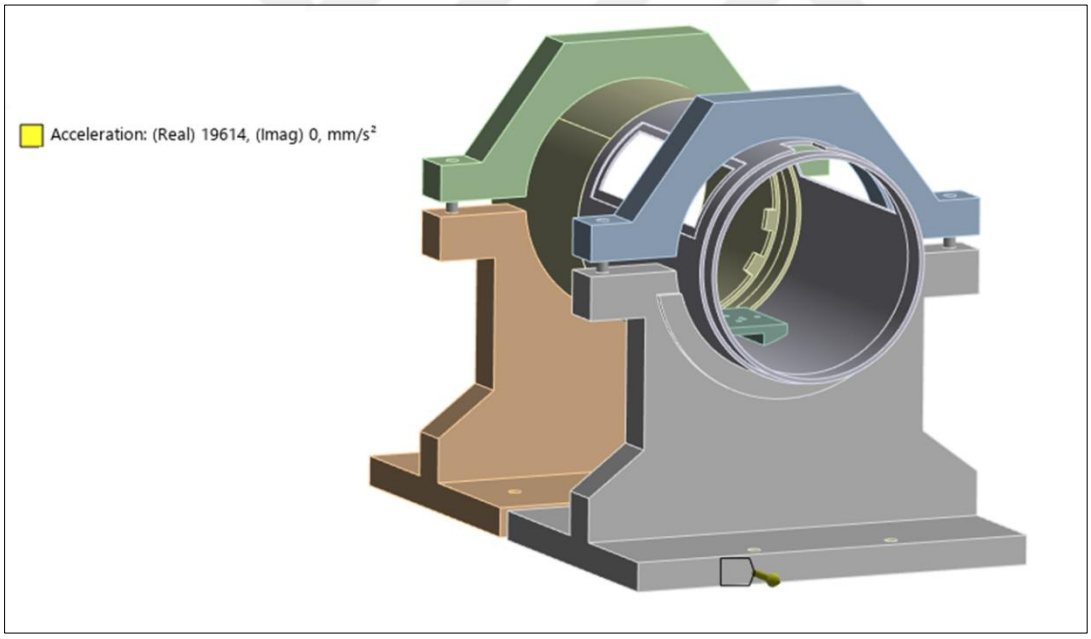
Genel değerlendirme

Sinüs taraması sonuçları, tutucu tasarımında gerçekleştirilen geometrik iyileştirmeler ile üretim sonrası uygulanan ısıl işlemlerin, AÖB'ye iletilen titreşim seviyeleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ve bu değişikliklerin sistemin dinamik davranışını anlamlı ölçüde şekillendirdiğini göstermektedir. Özellikle kritik frekans bölgelerinde yeni tasarımların mevcut tutucuya kıyasla daha düşük titreşim iletimi sağlaması, tasarım değişikliklerinin genel olarak daha dengeli ve kontrollü bir dinamik tepki sunduğunu ortaya koymaktadır. Yeni tasarımlar arasında, ısıl işlem uygulanmış konfigürasyonun bazı eksenlerde mod kararlılığı ve titreşim yanıtı açısından daha öngörülebilir bir davranış sergilediği; buna karşın SLM inşa yönüne duyarlı Y ekseninde dinamik performansın olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir.

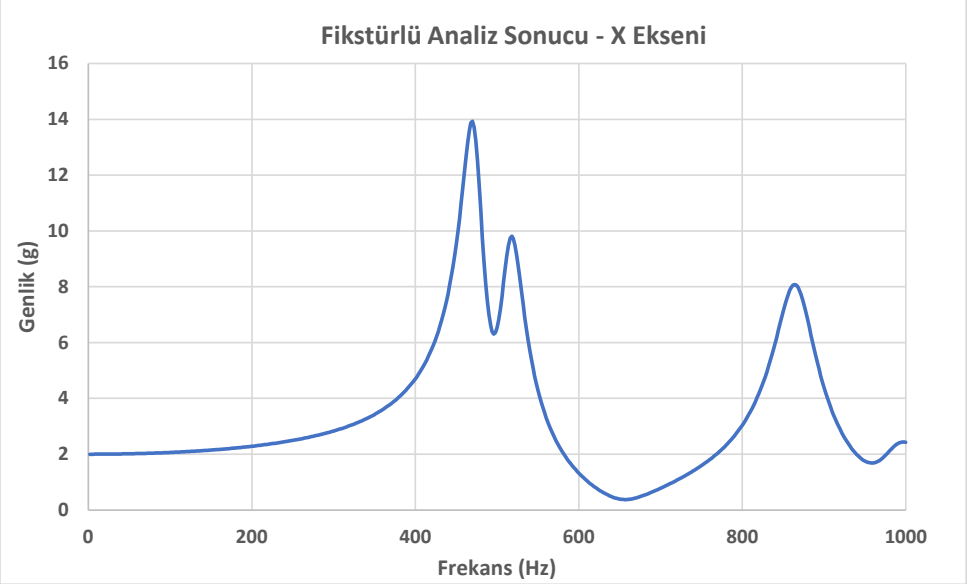
Isıl işlem uygulanmayan tasarımda bazı eksenlerde iyileşme görülmesine rağmen, diğer eksenlerde belirgin genlik artışlarının ortaya çıkması, kalıntı iç gerilmelerin sistemin dinamik davranışını daha değişken hale getirdiğini göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, yeni tasarım tutucuların mevcut tutucuya kıyasla titreşim iletimini azaltarak AÖB'nin çalışma koşulları altında daha kararlı bir dinamik ortama sahip olmasını sağladığı; tasarım geometrisi, üretim yönü ve üretim sonrası işlemlerin titreşim performansı açısından kritik rol oynadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, tasarım değişiklikleri ve ısıl işlem parametreleri birlikte ve eksen bazında değerlendirildiğinde, tutucunun titreşim sönümleme kapasitesinin artırılabileceği ve mühimmatın operasyonel güvenilirliğinin iyileştirilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

5.2.3. Analiz - test doğrulaması

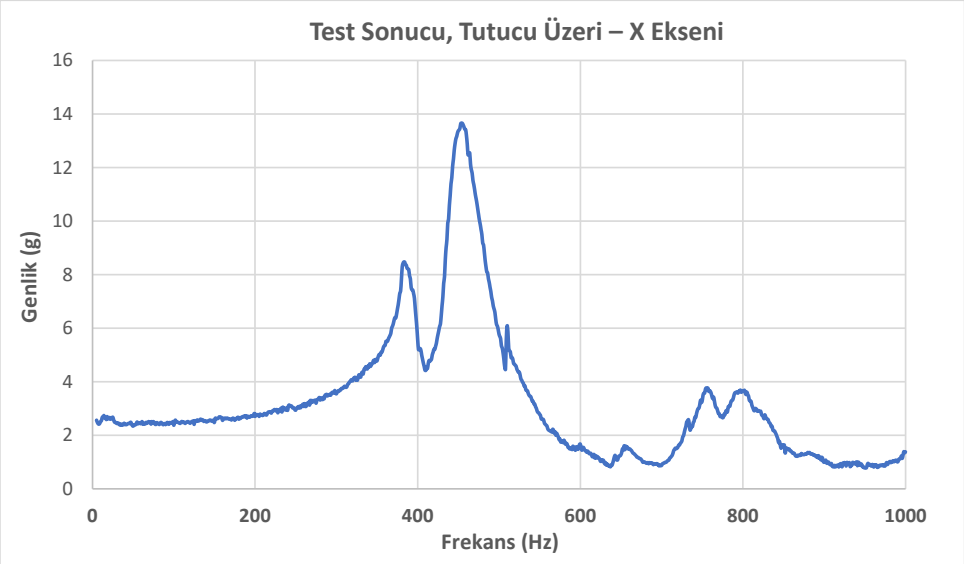
Sinüs tarama testi sonuçlarının, harmonik tepki analizi bulguları ile tam olarak örtüşmediği görülmüştür. Bu farklılığın, test düzeni içerisinde yer alan fikstür parçalarının sisteme ek kütle ve sınır koşulları kazandırması nedeniyle mod şekillerini ve genlik seviyelerini değiştirmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle, sayısal analizlerin doğruluğunu sınamak amacıyla testle aynı sınır koşullarını içeren bir doğrulama modeli oluşturulmuş ve fikstür bileşenleri de analize dahil edilmiştir. Doğrulama analizleri mevcut tutucu parçası için X ve Y eksenlerinde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları tutucunun AÖB'ye temas eden yüzeyinden elde edildiği için, test karşılaştırmaları yapılırken tutucu üzerine yerleştirilen ivmeölçerden alınan veriler kullanılmıştır. Analiz modelinin genel görünümü Şekil 5.4'de sunulmuş olup X ve Y eksenlerine ait analiz ve test sonuçları ile bunların karşılaştırması Şekil 5.5 ile Şekil 5.10 arasında paylaşılmıştır.



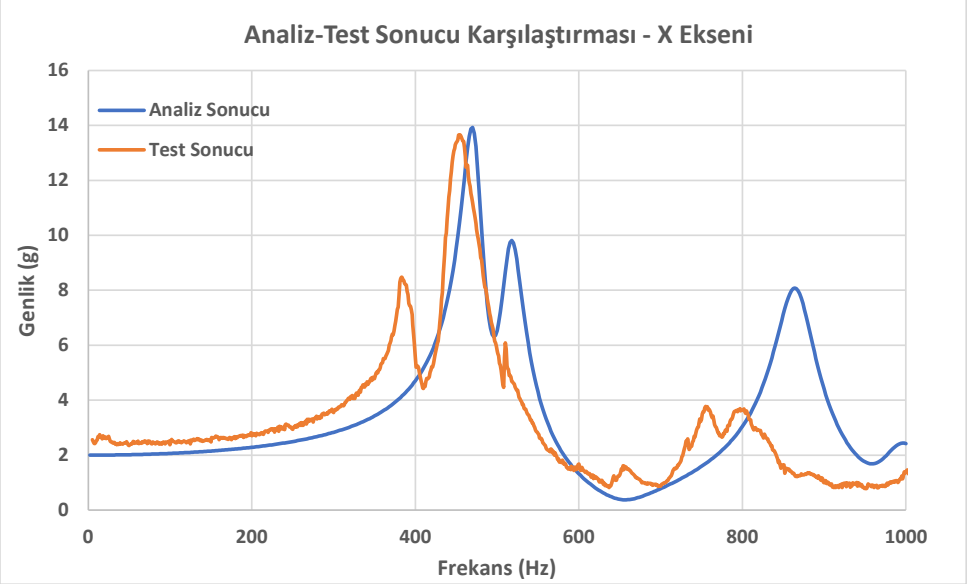
Şekil 5.4. Doğrulama analizi modeli (fikstürlü analiz modeli)



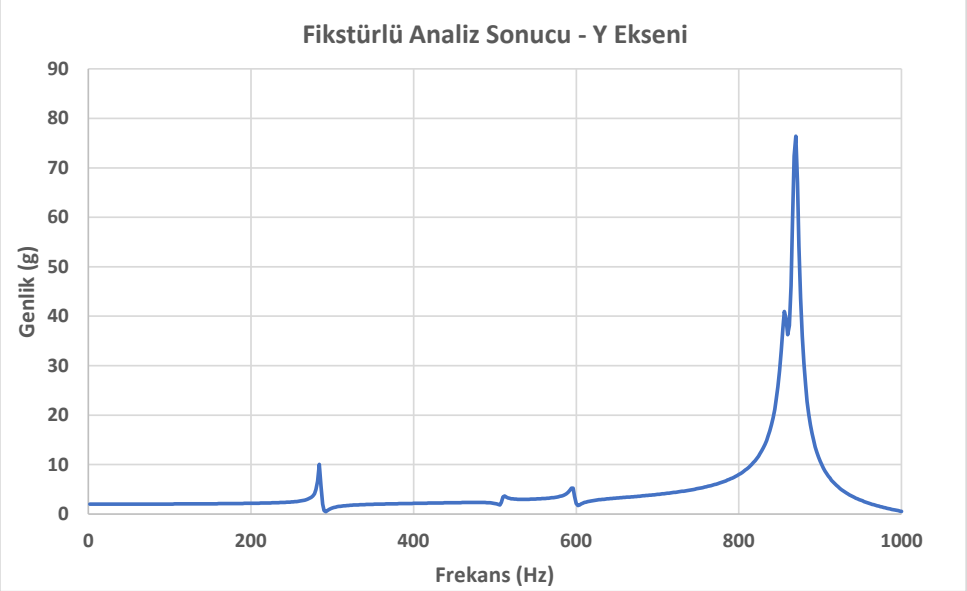
Şekil 5.5. Fikstürlü doğrulama analizi kapsamında X ekseni frekans tepkisi



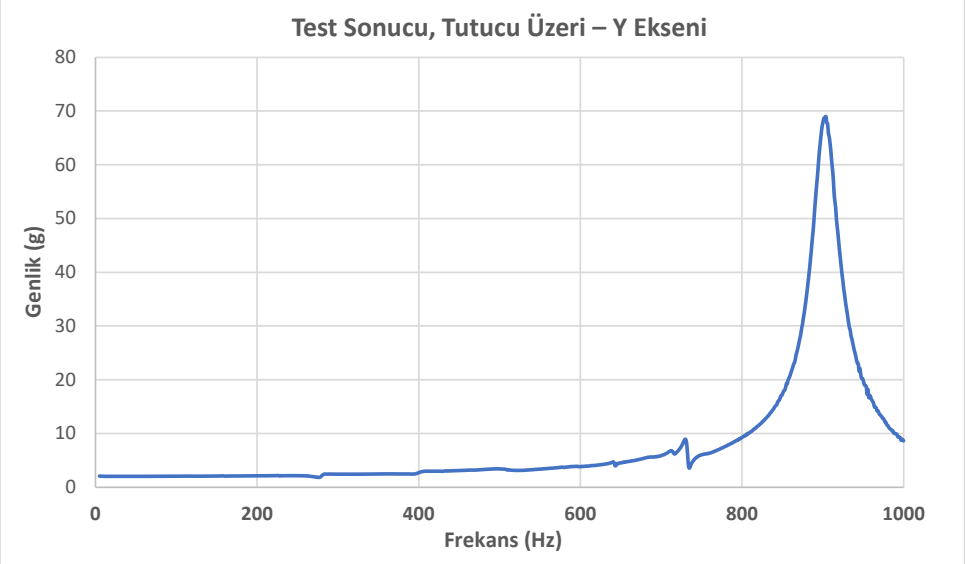
Şekil 5.6. Sinüs tarama titreşim testi için tutucu üzerindeki X ekseni frekans tepkisi



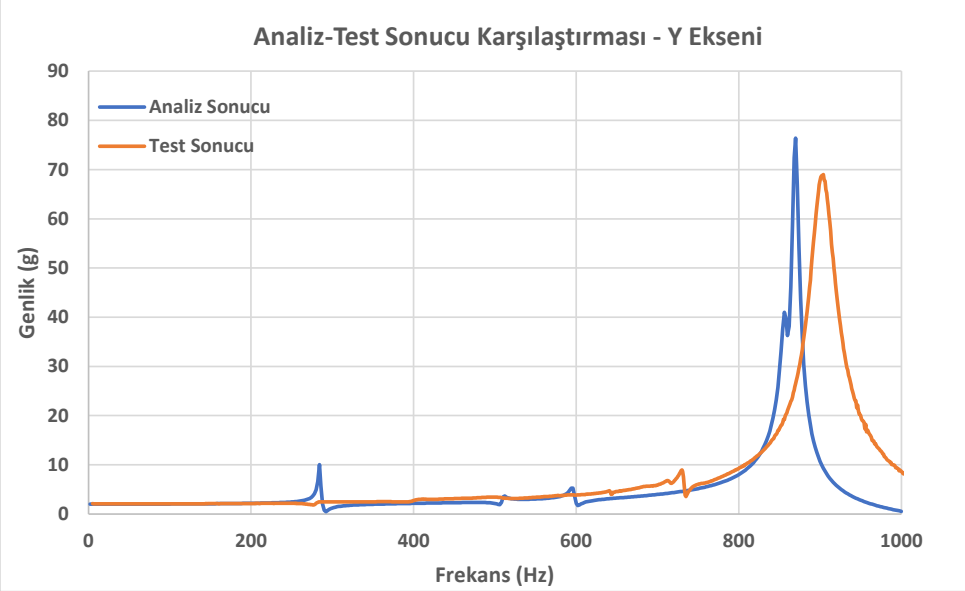
Şekil 5.7. X ekseni analiz ve test sonucu karşılaştırması



Şekil 5.8. Fikstürlü doğrulama analizi kapsamında Y ekseni frekans tepkisi



Şekil 5.9. Sinüs tarama titreşim testi için tutucu üzerindeki Y ekseni frekans tepkisi



Şekil 5.10. Y ekseni analiz ve test sonucu karşılaştırması

Sinüs taraması sırasında elde edilen test verileri ile doğrulama analizi sonuçları karşılaştırıldığında, X ve Y eksenlerinde genel davranışın büyük ölçüde birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. X ekseninde hem analiz hem de test sonuçlarında baskın modun benzer frekans aralıklarında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Analiz sonucunda ana mod 470 Hz'de 13,7 g, testte ise benzer frekans değerinde (454 Hz) 13,9 g olarak ölçülmüş ve bu açıdan yüksek düzeyde bir tutarlılık sağlanmıştır (Şekil 5.5 - Şekil 5.7). Düşük frekans aralığında (100–300 Hz) analiz ve test eğrilerinin neredeyse tamamen çakışması, modelin bu banttaki dinamik davranışı doğru biçimde yakaladığını göstermektedir. Orta frekanslarda analiz değerleri test

sonuçlarından bir miktar düşük olmakla birlikte, mod sıralaması ve genel ivme eğilimi açısından uyum korunmuştur.

Y ekseninde de analiz–test uyumu belirgin olup, sistemin baskın modları her iki veri setinde de benzer şekilde ortaya çıkmıştır. Analizde 870 Hz'de 76,4 g, testte ise 903 Hz'de 68,8 g ölçülmüştür (Şekil 5.8, Şekil 5.10). Bu eksende test genliklerinin analizden bir miktar düşük olması, fiziksel sistemdeki bağlantı gevşeklikleri, temas yüzeylerinin gerçek davranışı ve yapısal sönüm farklarıyla açıklanabilir. Ayrıca düşük ve orta frekans bölgelerinde analiz ve test eğrilerinin aynı karakteristiği göstermesi, Y ekseni modelinin gerçek sistemi yüksek doğrulukla temsil ettiğini doğrulamaktadır.

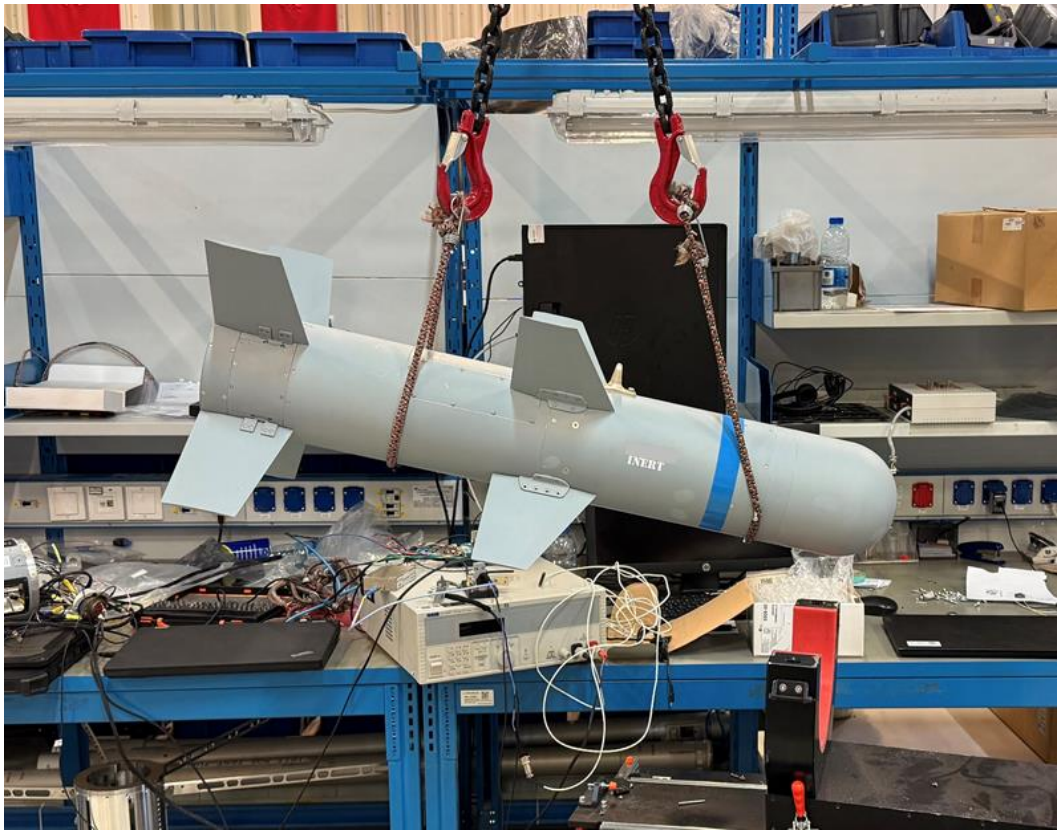
Genel olarak her iki eksende mod frekanslarının büyük ölçüde örtüşmesi, analiz modelinde kullanılan kütle–rijitlik dağılımının fiziksel sistemi doğru şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Eğrilerin formu, tepe noktalarının sıralanışı ve frekans tepkisinin genel eğilimi birlikte değerlendirildiğinde, sayısal model ile test sonuçlarının benzer bir dinamik davranış ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu doğrulama çalışması, oluşturulan analiz modelinin test koşullarını yeterli doğrulukta yansıttığını ve böylece yürütülen analitik çalışmaların güvenilirliğinin teyit edildiğini göstermiştir. Bu bulgular, modelin gelecekte yapılacak dinamik değerlendirmelerde güvenle kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

5.3. Modal Darbe Testi

5.3.1. Modal darbe testi kurulumu ve uygulanışı

Deneysel çalışmalar kapsamında ikinci olarak füze seviyesinde modal darbe testi gerçekleştirilmiştir. Testlerde çalışma kapsamındaki mühimmat, tüm bileşenleri (temsili harp başlığı ile) monte edilmiş halde vinç ve halatlar yardımıyla asılı konuma getirilmiş ve böylece sistem serbest–serbest (ing. free-free) sınır koşullarına uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Yapıya darbe çekici ile kontrollü bir mekanik uyarı uygulanmış, darbe sonrasında oluşan titreşim tepkisi ise herhangi bir harici ivmeölçer kullanılmadan doğrudan AÖB-2'nin kendi sensörleri tarafından kaydedilmiştir. Bu yöntem, AÖB'nin gerçek çalışma konumunda maruz kaldığı titreşim aktarımının deneysel olarak doğru biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır. Test sürecinde ilk olarak mevcut tutucu ile ölçümler alınmış; ardından mühimmat gerekli bölgelerinden demonte edilerek mevcut tutucu

çıkarılmış ve Tasarım 2 parçası AÖB-2 ile birlikte montajlanarak aynı test prosedürü tekrarlanmıştır. Son aşamada ise aynı uygulama, ısıl işlem uygulanmamış Tasarım 2-AB parçası için gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği görseli Resim 5.14'te sunulmuştur. Modal darbe testi sonuçları Şekil 5.11 ile Şekil 5.19 arasında sunulmuştur. Grafiklerde mevcut tutucu mavi, Tasarım 2 konfigürasyonu siyah ve Tasarım 2-AB ise yeşil renk ile gösterilmiştir.



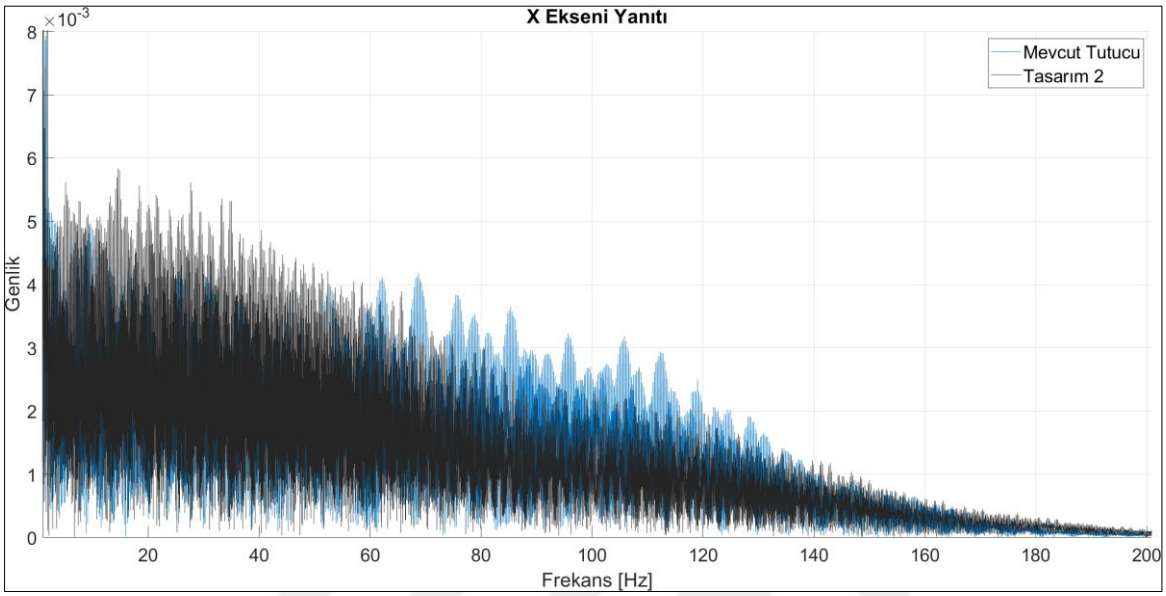
Resim 5.14. Füze seviyesinde modal darbe testi düzeneği

5.3.2. Modal darbe testi sonuçları

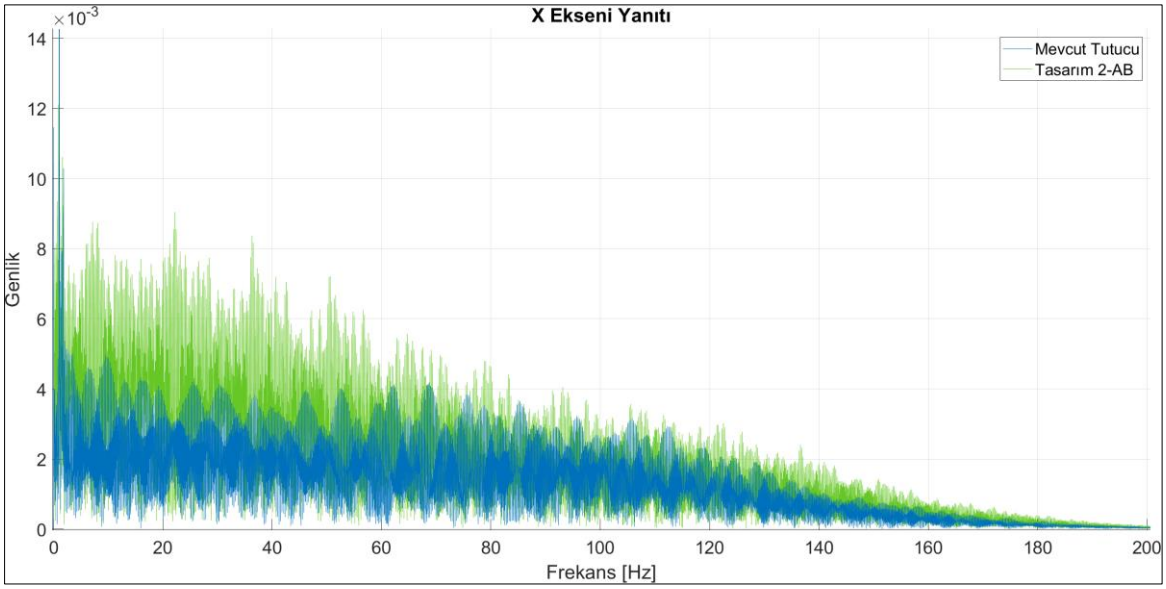
X ekseni sonuçları

X ekseni için elde edilen modal darbe testi sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.11 - Şekil 5.13), mevcut tutucu ile Tasarım 2'nin frekans bantları boyunca benzer genlik seviyeleri ürettiği, bazı frekans aralıklarında (70-130 Hz) Tasarım 2'nin, bazı aralıklarda (0-60 Hz) ise mevcut tutucunun nispeten daha düşük genlik sağladığı görülmektedir. Buna karşılık Tasarım 2-AB'nin hem mevcut tutucuya hem de Tasarım 2'ye göre X ekseni boyunca belirgin biçimde daha yüksek genlikler ürettiği dikkat çekmektedir. Spektrumun tamamında Tasarım 2-AB

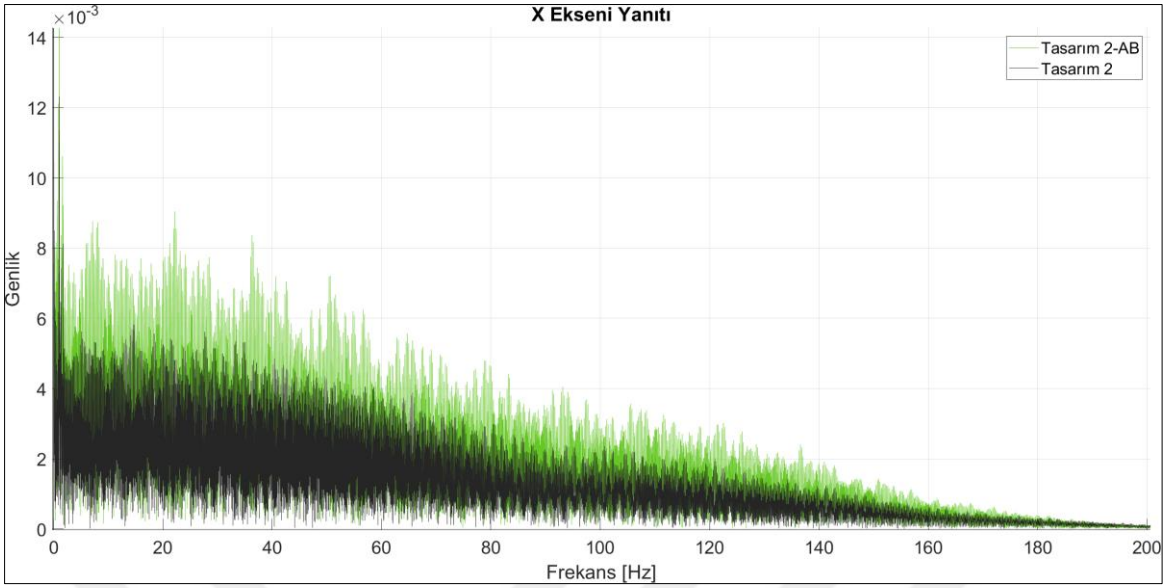
eğrisinin zarfının diğer iki konfigürasyondan daha yukarıda seyretmesi, ısıl işlem uygulanmamış tasarımın X ekseninde titreşim sönümleme açısından dezavantajlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.11. X ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2)



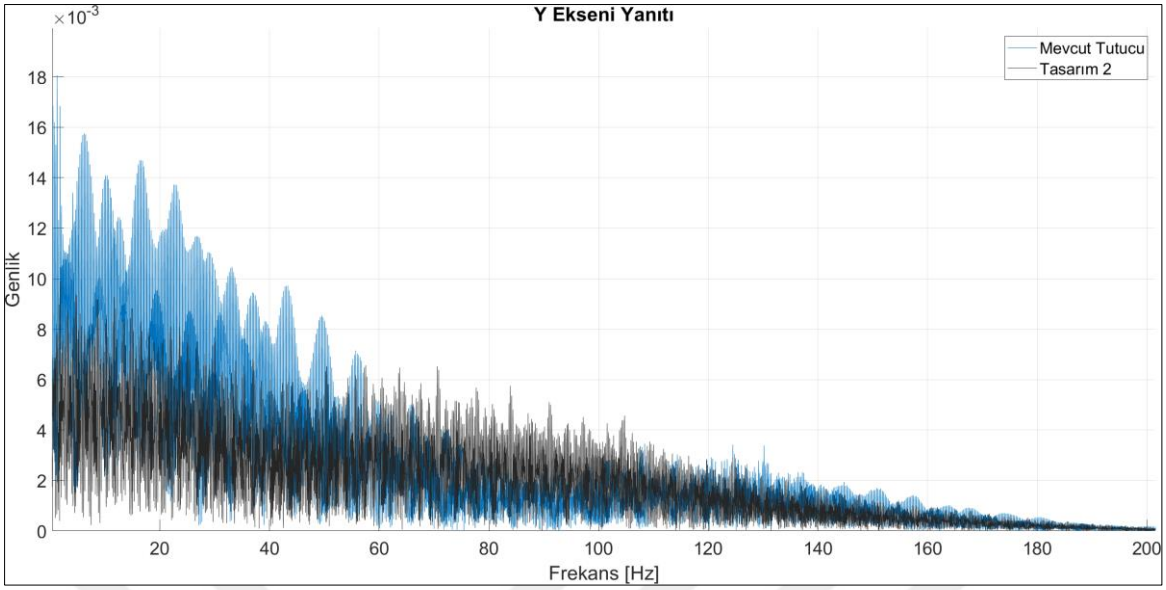
Şekil 5.12. X ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2-AB)



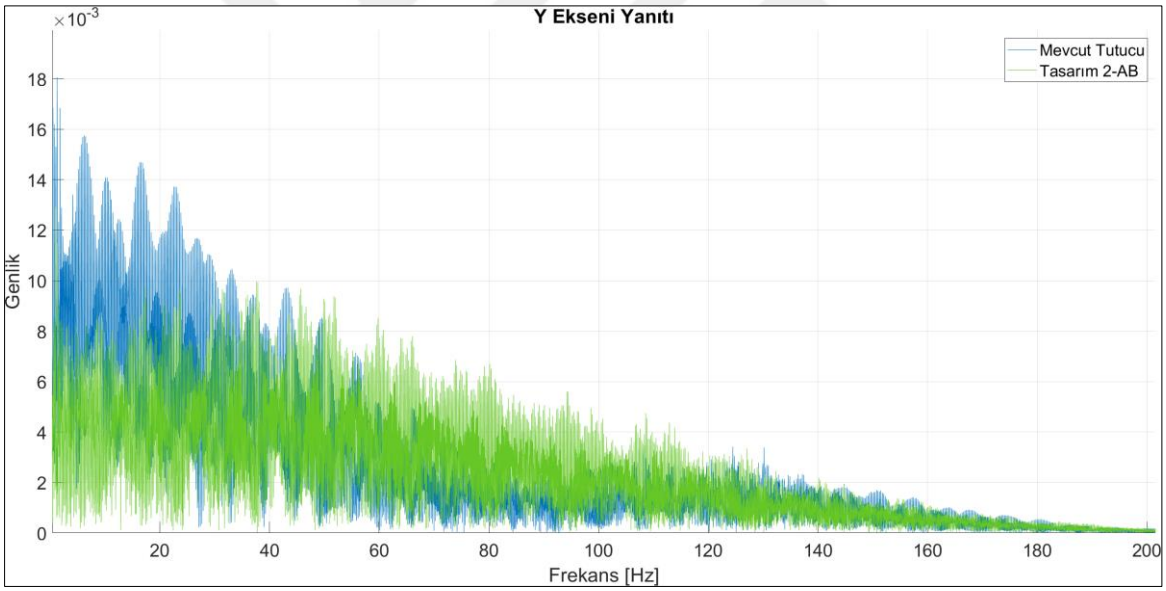
Şekil 5.13. X ekseni frekans yanıtı (Tasarım 2 – Tasarım 2-AB)

Y ekseni sonuçları

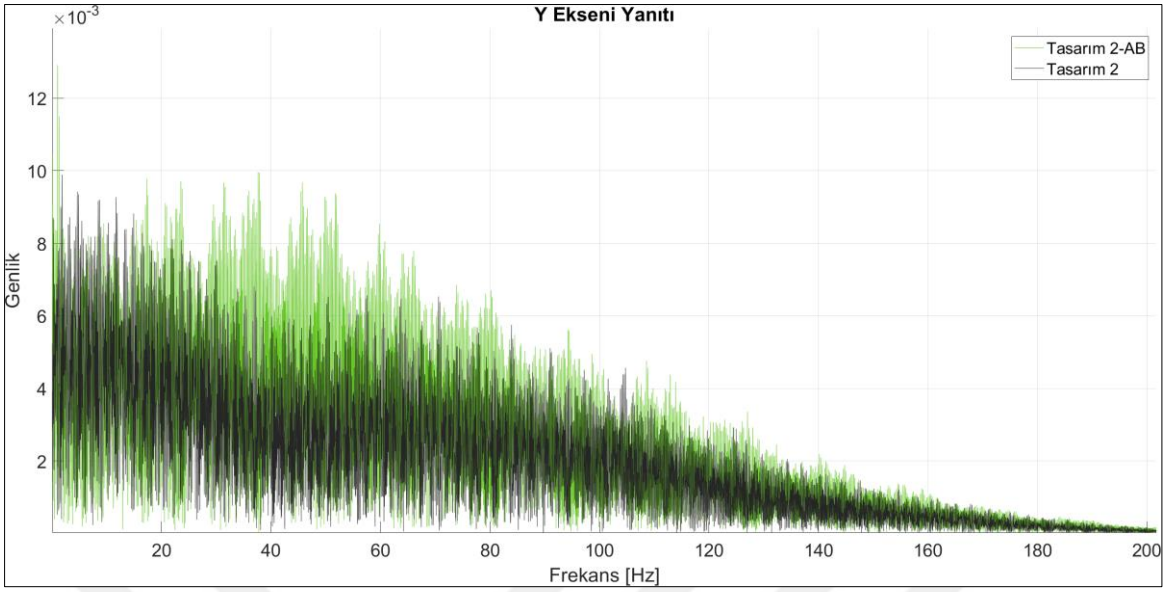
Y ekseni sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.14 - Şekil 5.16) frekans bandına bağlı olarak değişken bir davranış ortaya çıkmıştır. Düşük frekans bölgesinde (0–30 Hz) her iki yeni tasarım da mevcut tutucuya kıyasla daha düşük genlikler üreterek belirgin bir iyileşme sağlamıştır. 30–55 Hz aralığında Tasarım 2 mevcut tutucuya göre hala daha düşük genlikler üreterek bu bantta da avantaj sunmuştur. Buna karşılık 60–120 Hz aralığında durum tersine dönmektedir. Bu aralıkta mevcut tutucu, hem Tasarım 2'ye hem de Tasarım 2-AB'ye kıyasla daha düşük genlik seviyeleri üretmektedir. 130 Hz üzerindeki frekanslarda ise her iki yeni tasarım da mevcut tutucuya göre daha düşük genlik seviyeleri üretmiş ve bu bölgeden itibaren iyileştirici etkileri yeniden belirginleşmiştir. Yeni tasarımlar kendi aralarında değerlendirildiğinde, Tasarım 2 pek çok frekans bandında Tasarım 2-AB'ye göre daha düşük genlik üretmiş; Tasarım 2-AB ise bazı frekanslarda daha değişken ve yüksek genlikli bir davranış sergilemiştir. Genel olarak Y ekseninde yeni tasarımlar özellikle düşük ve yüksek frekans bölgelerinde avantaj sunarken, Tasarım 2'nin daha dengeli ve öngörülebilir bir frekans tepkisi verdiği görülmektedir.



Şekil 5.14. Y ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2)



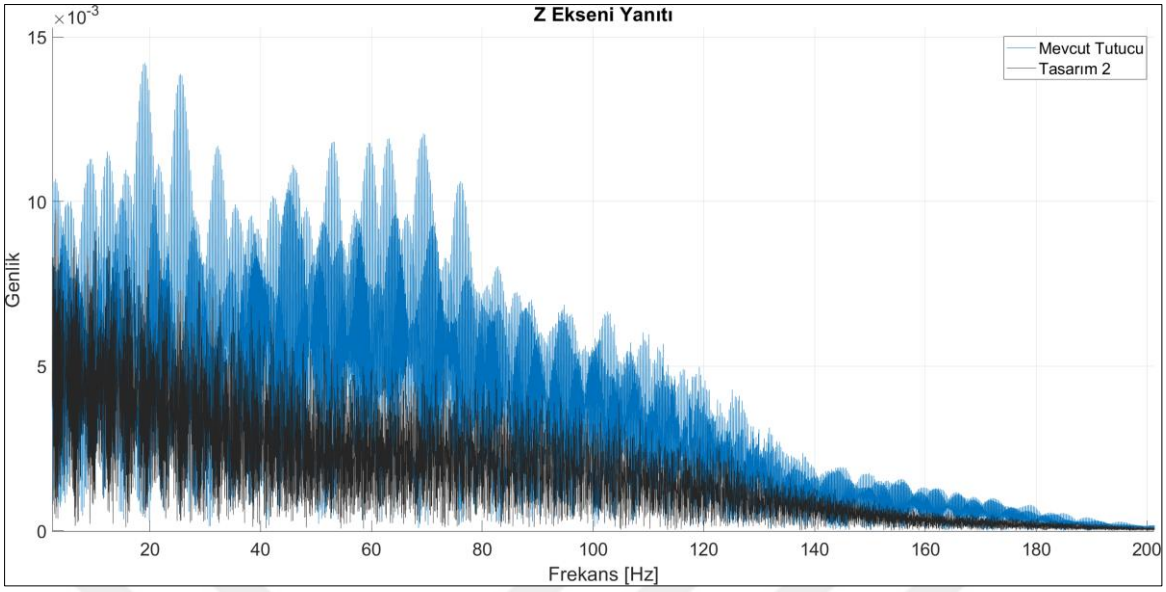
Şekil 5.15. Y ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2-AB)



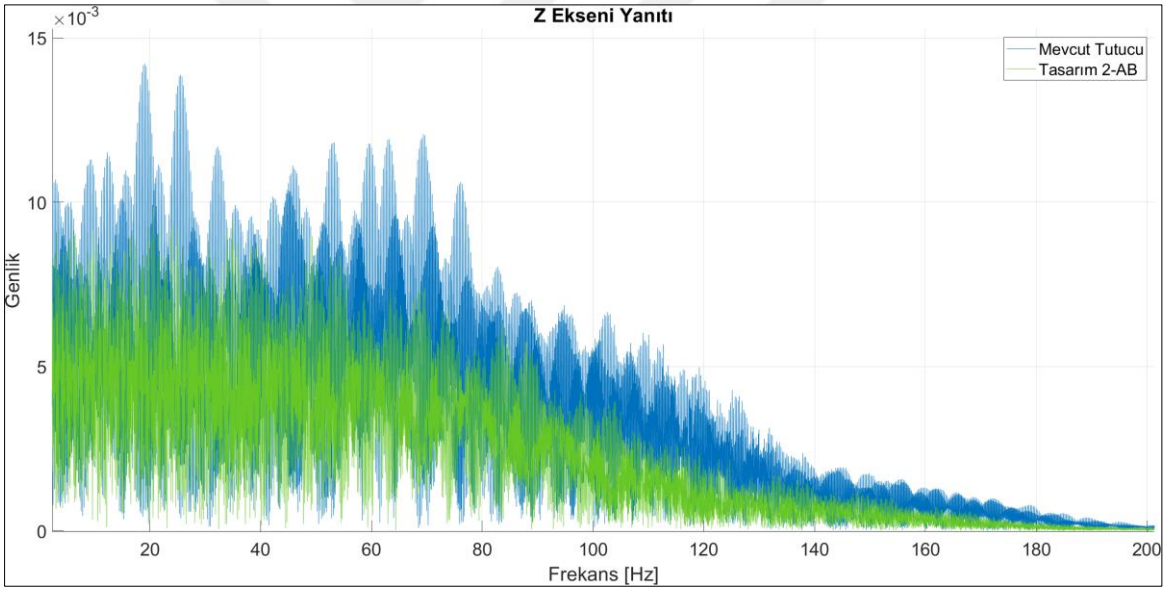
Şekil 5.16. Y ekseni frekans yanıtı (Tasarım 2 – Tasarım 2-AB)

Z ekseni sonuçları

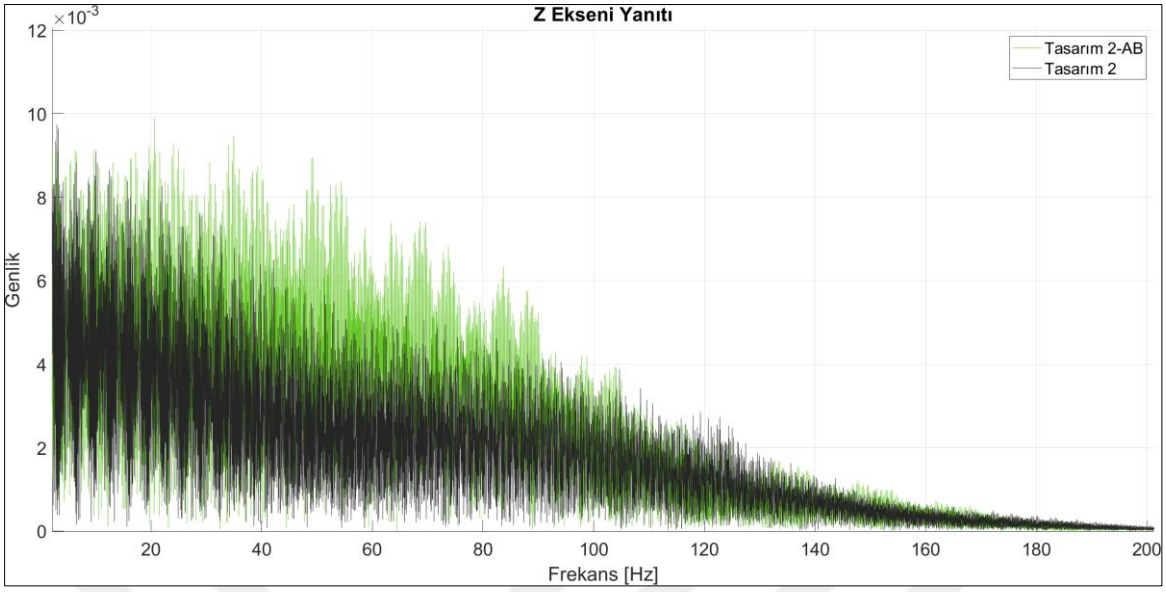
Z ekseni modal darbe testi sonuçları (Şekil 5.17 - Şekil 5.19), yeni tasarımların mevcut tutucuya kıyasla tüm frekans bantlarında daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Düşük frekans bölgesinden yüksek frekanslara kadar uzanan tüm aralıkta hem Tasarım 2 hem de Tasarım 2-AB, mevcut tutucunun belirgin şekilde altında genlik seviyeleri üretmiştir. Bu durum yeni tasarımların Z ekseni yönünde titreşim iletimini etkili biçimde azalttığını ve Z ekseninin yeni tasarımların en başarılı olduğu eksen olduğunu ortaya koymaktadır. İki yeni tasarım karşılaştırıldığında Tasarım 2 genel olarak daha düşük genlik seviyeleri üreterek daha dengeli ve kararlı bir frekans tepkisi sunarken, Tasarım 2-AB bazı bölgelerde nispeten daha yüksek fakat yine de mevcut tutucudan düşük genlikler üretmiştir. Bu sonuçlar, Z ekseninin yeni tasarımların en başarılı olduğu eksen olduğunu ve özellikle Tasarım 2'nin Z yönlü titreşim sönümleme açısından en uygun davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.17. Z ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2)



Şekil 5.18. Z ekseni frekans yanıtı (Mevcut tutucu – Tasarım 2-AB)



Şekil 5.19. Z ekseni frekans yanıtı (Tasarım 2 – Tasarım 2-AB)

Isıl işlemin etkisi

Modal darbe testi sonuçları, gerilim giderme ısıl işleminin tutucu parçanın dinamik performansı üzerinde belirgin biçimde iyileştirici bir etki yarattığını göstermektedir. Isıl işlem uygulanmış Tasarım 2, tüm eksenlerde ve frekans bantlarının büyük bölümünde Tasarım 2-AB'ye kıyasla daha düşük genlik seviyeleri üretmiş; böylece titreşim iletimini daha etkin şekilde sınırlandırmıştır. Isıl işlem görmeyen Tasarım 2-AB ise yalnızca Y ekseninin düşük frekans bölgesinde sınırlı bir avantaj sağlamış, diğer tüm bantlarda daha yüksek veya daha değişken genlik değerleri üretmiştir. Bu durum, eklemeli imalatla üretilen parçalarda ısıl işlem uygulanmaması halinde bünyede kalan kalıntı gerilmelerin dinamik davranışı olumsuz etkileyebildiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak modal darbe testi sonuçları değerlendirildiğinde, ısıl işlemin eklemeli imalat sonrası yapısal kararlılığı artırdığı, titreşim iletimindeki belirsizlikleri azalttığı ve genel dinamik performansı iyileştirdiği; dolayısıyla tasarım hedefleri doğrultusunda tercih edilmesinin daha uygun olacağı anlaşılmaktadır.

Genel değerlendirme

Modal darbe testi sonuçlarının bütüncül değerlendirilmesi, yeni tasarım tutucu parçaların mevcut tutucuya kıyasla özellikle düşük ve yüksek frekans bölgelerinde daha düşük genlik seviyeleri üreterek titreşim iletimini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Her üç eksen

için elde edilen verilerde, Tasarım 2'nin mevcut tutucuya göre daha dengeli, daha düşük genlikli ve daha kararlı bir dinamik tepki verdiği görülmüş; Tasarım 2-AB de belirli frekans aralıklarında iyileşme sağlamakla birlikte, frekans tepkisindeki dalgalanmalar sebebiyle daha değişken bir davranış sergilemiştir.

Z ekseninde yeni tasarımlar belirgin bir iyileşme sunarken, X ve Y ekseninde iyileşme frekansa bağlı olarak değişmekte; bazı bantlarda mevcut tutucu avantajlı, bazı bantlarda ise yeni tasarımlar daha düşük genlik seviyeleri üretmektedir. Bu eksenlerde Tasarım 2, Tasarım 2-AB'ye göre genel olarak daha az genlik üretmiş ve daha istikrarlı bir çizgi izlemiştir.

Tasarım 2'nin tüm eksenlerde daha tutarlı bir frekans yanıtı sunması, düşük genlik seviyeleri üretmesi ve ısıl işlem sonrası yapısal kararlılığının yükselmesi; bu tasarımın hem titreşim sönümleme performansı hem de genel dinamik dayanım açısından en uygun çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, güdümlü füze sistemlerinde kullanılan AÖB tutucu parçasının titreşim davranışının iyileştirilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizleri, eklemeli imalat süreçleri ve deneysel test yöntemleri bütünleşik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Mevcutta kullanılan AÖB tutucu parçasının dinamik karakteristikleri ayrıntılı biçimde incelenmiş, doğal frekansların yükseltilmesini ve titreşim iletiminin azaltılmasını hedefleyen topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, titreşim performansı açısından iyileştirilmiş iki alternatif tasarım elde edilmiş ve bu tasarımlar sayısal analizler yoluyla karşılaştırılmıştır. En dengeli ve kararlı dinamik davranışı sergileyen geometri, SLM yöntemi kullanılarak AlSi10Mg malzemeden üretilmiş; üretim sonrası sinüs tarama titreşim testi ve füze seviyesinde gerçekleştirilen modal darbe testi ile elde edilen sayısal bulgular deneysel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca, eklemeli imalat sürecine özgü iç gerilmelerin titreşim davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış ve bu etkinin eksen bazında sonuçları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bütünleşik yaklaşım sayesinde, tasarım–analiz–üretim–test döngüsünün her aşaması birbirini destekler nitelikte ele alınmış ve elde edilen sonuçların mühendislik açısından tutarlılığı artırılmıştır.

Modal analiz sonuçları, topoloji optimizasyonu ile geliştirilen yeni tasarımların mevcut tutucuya kıyasla dinamik açıdan belirgin bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. Mevcut tutucuda ilk altı doğal frekansın 7289 – 15 916 Hz aralığında yer aldığı görülürken, Tasarım 2'de bu aralığın 8345 – 15 996 Hz seviyesine yükseldiği belirlenmiştir. Doğal frekanslardaki bu artış, optimize edilen geometrinin yük taşıma yollarını daha etkin şekilde yönlendirdiğini ve yapının global rijitliğini artırdığını göstermektedir. Bu durum, yalnızca rezonans riskinin azaltılması açısından değil, aynı zamanda sistemin çalışma frekans aralığında daha güvenli bir dinamik davranış sergilemesi açısından da önemli bir kazanım olarak değerlendirilmiştir. Mod şekillerinin incelenmesi, mevcut tutucuda geniş yüzeylere yayılan bükülme ağırlıklı deformasyonların yeni tasarımlarda daha sınırlı ve yapısal olarak kritik olmayan bölgelere yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Deplasman dağılımının daha homojen hale gelmesi, yapının titreşim altında daha öngörülebilir ve tekrarlanabilir bir davranış sergilemesine katkı sağlamıştır. Tasarım 1'de de belirli iyileşmeler gözlenmiş olmakla birlikte, destek

kolonlarının sayısı ve konumunun daha etkin biçimde düzenlenmesi sayesinde Tasarım 2'nin mod şekilleri açısından daha dengeli ve kontrol edilebilir bir yapı sunduğu belirlenmiştir.

Harmonik tepki analizleri, yeni tasarımın AÖB'ye iletilen titreşim büyüklüklerini tüm eksenlerde anlamlı biçimde azalttığını ortaya koymuştur. X ekseninde ivme genliğinin mevcut tutucuya kıyasla yaklaşık %17–19 oranında azalması, yapının bu eksende titreşim enerjisini daha etkin şekilde sönümlediğini göstermektedir. Y ekseninde elde edilen yaklaşık %50'lik azalma, optimize edilen geometrinin bu yöndeki dinamik yük aktarımını önemli ölçüde sınırlandırdığını ve AÖB'nin maruz kaldığı titreşim seviyelerini düşürdüğünü ortaya koymuştur. Y ve Z eksenlerinde deformasyon genliklerinin %10–15 oranında azalması, yapının titreşim altında daha kontrollü bir şekil değiştirme davranışı sergilediğini ve lokal zorlanmaların sınırlandığını göstermektedir. Gerilme genliği sonuçları incelendiğinde ise Z ekseninde %78–86, Y ekseninde %40–53 ve X ekseninde %64 oranında azalma elde edilmiştir. Bu sonuçlar, optimize edilen tasarımın yalnızca titreşim genliklerini azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda yapısal dayanım ve yorulma açısından da AÖB üzerinde daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturduğunu göstermektedir.

Sinüs tarama titreşim testleri, yeni tasarım tutucu parçaların AÖB'ye iletilen titreşim seviyeleri üzerinde eksen bazında belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. X ekseninde mevcut tutucuda ölçülen 12,5 g tepe ivme değeri, gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış Tasarım 2'de 7,6 g seviyesine düşerek %39,2 oranında iyileşme sağlamıştır. Buna karşın, ısıl işlem uygulanmayan Tasarım 2-AB'de bu değerin 14,6 g'a yükselmesi, üretim sonrası iç gerilmelerin ve üretim kaynaklı yapısal düzensizliklerin titreşim davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça göstermiştir. Y ekseninde, Tasarım 2 mevcut tasarıma yakın genlik seviyeleri üretirken, Tasarım 2-AB'nin 92,0 g değeriyle %28,7 oranında azalma sağlaması dikkat çekmiştir. Isıl işlem uygulanmış konfigürasyonda Y ekseninde ana rezonans frekansının daha düşük bir banda kayması ve buna eşlik eden genlik artışı, SLM üretiminde inşa yönüne bağlı olarak oluşan anizotropik yapının, ısıl işlem sonrasında dinamik rijitlik ve sönüm karakteristiklerini eksen bazında farklı şekilde etkileyebildiğini göstermektedir. Bu bulgu, eklemeli imalatla üretilen parçalar için ısıl işlem kararının eksen bazında değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koyması açısından önemlidir. Z ekseninde ise Tasarım 2 mevcut tutucuya göre %7,2 daha düşük genlik üretmiş, Tasarım 2-AB ise %39,7 oranında artış göstermiştir. Sayısal analizler ile sinüs tarama testleri arasında

mod frekansları ve genlik eğilimleri açısından sağlanan yüksek uyum, kurulan analiz ve test altyapısının doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmiştir.

Füze seviyesinde gerçekleştirilen modal darbe testi sonuçları da yeni tasarımın titreşim iletimini azaltma kabiliyetini desteklemiştir. X ekseninde Tasarım 2 bazı frekans bantlarında mevcut tutucuya yakın, bazı bantlarda ise daha düşük genlikler üretmiş; ısıl işlem uygulanmamış Tasarım 2-AB'nin tüm bant boyunca daha yüksek genlikler üretmesi, ısıl işlemin sistem seviyesinde dinamik performans açısından kritik bir parametre olduğunu göstermiştir. Y ekseninde her iki yeni tasarım düşük frekanslarda mevcut tutucudan daha düşük genlikler üretmiş ve yüksek frekans bölgelerinde yeniden avantaj sağlamıştır. Z ekseninde ise her iki yeni tasarım da mevcut tutucuya kıyasla tüm frekans aralığında daha düşük genlik seviyeleri üretmiş, Tasarım 2 bu eksende en düşük değerleri sağlayarak belirgin bir üstünlük sergilemiştir. Bu sonuçlar, yeni tasarımın yalnızca parça seviyesinde değil, sistem seviyesinde de titreşim performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizleri ve eklemeli imalat yöntemlerinin birlikte uygulanmasıyla mevcut tutucuya kıyasla daha hafif, daha rijit ve dinamik yükler altında daha kararlı bir AÖB tutucusu elde edilmiştir. Üretim sonrası uygulanan gerilim giderme ısıl işleminin, genel olarak titreşim davranışının dengelenmesinde ve genlik seviyelerinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığı; ancak SLM üretiminde inşa yönüne bağlı yapısal özellikler nedeniyle bu etkinin eksen bazında farklı sonuçlar doğurabildiği görülmüştür. Bu çalışma, savunma ve havacılık sistemlerinde kritik bileşenlerin dinamik performansının artırılmasına yönelik bütünleşik tasarım–analiz–üretim yaklaşımının hem parça hem de sistem seviyesinde etkin, uygulanabilir ve mühendislik açısından güçlü bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

6.2. Öneriler

Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular ışığında, ileride yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Topoloji optimizasyonun farklı hedef fonksiyonlarla yeniden ele alınması: Bu tezde doğal frekansların artırılmasına odaklanılmıştır. Gelecek çalışmalarda hem doğal frekans

hem de harmonik tepki genliklerini aynı anda minimize eden çok amaçlı optimizasyon yöntemleri uygulanabilir.

- Topoloji optimizasyonu sonrası ince ayar (ing. fine-tuning) optimizasyonlarının eklenmesi: Yerel kalınlık değişimleri, kütle dağılımı ve üretim kaynaklı toleransların etkilerini azaltmak amacıyla parametrik optimizasyon adımlarıyla tasarım daha da iyileştirilebilir.
- Eklemeli imalat parametrelerinin dinamik davranış üzerindeki etkilerinin detaylandırılması: SLM parametrelerinin (tarama stratejisi, güç, hız, enerji yoğunluğu vb.) titreşim performansı üzerindeki doğrudan etkilerinin sistematik biçimde incelenmesi, optimum üretim reçetesinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.
- Isıl işlem süreçlerinin genişletilmesi: Bu tezde tek bir ısıl işlem yöntemi değerlendirilmiştir. Farklı sıcaklık–zaman profilleri veya çok aşamalı ısıl işlemlerin dinamik davranış üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Fiziksel test çeşitliliğinin artırılması:
  – Rastgele titreşim testi,
  – Şok testi,
  – Termal–mekanik çevrimli testler
  gibi füze görev çevrimini daha kapsamlı temsil eden koşullarda yeni tasarımın dayanımı test edilebilir.
- Kafes (ing. lattice) veya metamalzeme temelli alternatif tasarım yaklaşımlarının incelenmesi: Eklemeli imalatın sağladığı tasarım özgürlüğü sayesinde daha gelişmiş sönümleyici iç yapılara sahip, ancak hafifliğini koruyan tutucu tasarımları geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Bendsøe, M. P., Sigmund, O. (2004). *Topology optimization: theory, methods, and applications.* (Second Edition). Berlin: Springer.

2. Zegard, T., Paulino, G.H. (2016). Bridging topology optimization and additive manufacturing. *Struct Multidisc Optim,* 53, 175–192.

3. Orme, M., Madera, I., Gschweitl, M., and Ferrari, M. (2018). Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware. *Designs,* 2(4), 51, 1-22.

4. Ramadani, R., Pal, S., Kegl, M., Predan, J., Drstvenšek, I., Pehan, S., and Belšak, A. (2021). Topology optimization and additive manufacturing in producing lightweight and low vibration gear body. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(11–12), 3389–3399.

5. Zhu, J.-H., Zhang, W.-H., and Xia, L. (2016). Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(4), 595–622.

6. Tomlin, M., and Meyer, J. (2011, May 24-30). *Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part*. In Altair Technology Conference, Bristol, United Kingdom.

7. Tan, L., Li, L., Gu, S., and Wang, D. (2017). Multi-objective topology optimization to reduce vibration of micro-satellite primary supporting structure. *Journal of Vibroengineering,* 19(2), 831–843.

8. Marzok, A., and Waisman, H. (2024). Topology optimization of extruded beams modeled with the XFEM for maximizing their natural frequencies. *Mechanics Research Communications,* 135, 104234.

9. Lopes, H. N., Cunha, D. C., Pavanello, R., and Mahfoud, J. (2022). Numerical and experimental investigation on topology optimization of an elongated dynamic system. *Mechanical Systems and Signal Processing,* 165, 108356.

10. Hanush S. S., Manjaiah M. (2022). Topology optimization of aerospace part to enhance the performance by additive manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, 62(14), 7373-7378.

11. Efa, D. A., and Ifa, D. A. (2025). Optimization of design parameters and 3D-printing orientation to enhance the efficiency of topology-optimized components in additive manufacturing. *Results in Materials,* 26, 100702.

12. Liu, S., Li, Q., Hu, J., Chen, W., Zhang, Y., Luo, Y., and Wang, Q. (2024). A survey of topology optimization methods considering manufacturable structural feature constraints for additive manufacturing structures. *Additive Manufacturing Frontiers,* 3, 200143.

13. Liu, S., Li, Q., Chen, W., Tong, L., and Cheng, G. (2015). An identification method for enclosed voids restriction in manufacturability design for additive manufacturing structures. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 10(2), 126-137.

14. Huang S., Lin Y., Gu L., Fengshou Gu F., and Ball A. (2021). Experimental research on additive-manufacturing metamaterials applied to vibration mitigation. *Mechanisms and Machine Science*, 105, 23-28.

15. Scott-Emuakpor O., Johnson P., Celli D., and George T. (2023, June 26-30). *Enhancing the damping capability of rib-stiffened structures with additive manufacturing*. Proceedings of ASME Turbo Expo 2023 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Boston, Massachusetts, USA.

16. Dunaj P., Berczynski S., Karol Miadlicki K., Irska I., and Niesterowicz B. (2020). Increasing damping of thin-walled structures using additively manufactured vibration eliminators. *Materials*, 13(9), 2125, 1-17.

17. Kam M., Saruhan H., and Ipekçi A. (2023). Experimental investigation of vibration damping capabilities of 3d printed metal/polymer composite sleeve bearings. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(6), 2505–2522.

18. Öhl, C., Linul, E., and Galatanu, S. V. (2024, May 30 - June 1). *Vibration behaviour of additively manufactured AlSi10Mg specimens*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Timisoara, Romania.

19. Sun, X., Jiang, F., Yuan, D., Wang, G., Tong, Y., and Wang, J. (2022). High damping capacity of AlSi10Mg-NiTi lattice structure interpenetrating phase composites prepared by additive manufacturing and pressureless infiltration. *Journal of Alloys and Compounds*, 905, 164075.

20. Westbeld, J., von Coburg, F., and Höfer, P. (2023). Forced-response characterization of PBF-LB/AlSi10Mg particle dampers with thin and flat cavities. *Progress in Additive Manufacturing*, 8, 745–757.

21. Zhang, X., Zhou, H., Shi, W., Zeng, F., Zeng, H., and Chen, G. (2018). Vibration tests of 3D printed satellite structure made of lattice sandwich panels. *AIAA Journal*, 56(10), 4213–4217.

22. Azher K., Shah M., Bakhtari A.M., Castelluccio G.M., Tüfekci C.S., Cini A., Akturk N., and Salamci M.U. (2024). A review on vibration characteristics of additively manufactured metal alloys. *Advanced Engineering Materials*, 26(6), 2301650, 1-21.

23. Liu, J., Guo, K., Sun, J., Sun, Q., Wang, L., and Li, H. (2021). Compressive behavior and vibration-damping properties of porous Ti-6Al-4V alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 1–10.

24. Zhang C., Qiao H., Yang L., Ouyang W., He T., Liu B., Chen X., Wang N. and Yan C. (2024). Vibration characteristics of additive manufactured IWP-type TPMS lattice structures. *Composite Structures*, 327, 117642, 1-20.

25. Rosa, F., Manzoni, S., and Casati, R. (2018). Damping behavior of 316L lattice structures produced by selective laser melting. *Materials and Design*, 160, 1010–1018.

26. Li, Z.-Y., Ma, T.-X., Wang, Y.-Z., Li, F.-M., and Zhang, C. (2020). Vibration isolation by novel meta-design of pyramid-core lattice sandwich structures. *Journal of Sound and Vibration,* 480, 115377.

27. Gebhardt, U., Gustmann, T., Giebeler, L., Hirsch, F., Hufenbach, J. K., and Kästner, M. (2022). Additively manufactured AlSi10Mg lattices – potential and limits of modelling as-designed structures. *Materials & Design,* 220.

28. He F., Ning H., and Khan M. (2023). Effect of 3d printing process parameters on damping characteristic of cantilever beams fabricated using material extrusion. *Polymers,* 15(2), 257, 1-19.

29. Ekerer S.C., Boğa C., Seyedzavvar M., Koroglu T., and Farsadi T. (2024). Optimizing parameters for additive manufacturing: a study on the vibrational performance of 3d printed cantilever beams using material extrusion. *Rapid Prototyping Journal*, 31(1), 218-230.

30. Xue F., Boudaoud H., Robin G., Cruz Sanchez F. A., and Daya E. M. (2023). Enhancing vibration damping properties of additively manufactured viscoelastic structures through process parameter optimization. *Mechanics of Advanced Materials and Structures,* 31(25), 7515-7525.

31. Jarfors, A. E. W., Shashidhar, A. C. G. H., Yepur, H. K., Steggo, J., Andersson, N.-E., and Stolt, R. (2020). Build strategy and impact strength of SLM produced maraging steel (1.2709). *Metals,* 11(1), 51.

32. Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., and Wang, H. (2021). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 113(7), 2413–2435.

33. AlMangour B, Grzesiak D., and Yang JM. (2017). Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316Lstainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 424–435.

34. Nandwana P, Lee Y. (2020). Influence of scan strategy on porosity and microstructure of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion. *Materials Today Communications*, 24, 100962, 1-6.

35. Yang, T., Liu, T., Liao, W., MacDonald, E., Wei, H., Chen, X., and Jiang, L. (2019). The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology,* 266, 26–36.

36. Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—A review. *International Materials Reviews,* 61(5), 361–377.

37. Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., and Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing,* 1–4, 77–86.

38. Chang, T., Dong, E., Zhao, L., Xing, Y., Chen, M., Lu, J., and Cheng, J. (2025). Achieving low-porosity AlSi10Mg cladding layers for the additive repair of aluminum alloy parts by directed energy deposition. *Optics & Laser Technology,* 181, 111854.

39. Read, N., Wang, W., Essa, K., and Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design,* 65, 417–424.

40. Colombo, C., Biffi, C. A., Fiocchi, J., Scaccabarozzi, D., Saggin, B., Tuissi, A., and Vergani, L. M. (2020). Modulating the damping capacity of SLMed AlSi10Mg through stress-relieving thermal treatments. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics,* 107, 102537.

41. Zhuo, L., Wang, Z., Zhang, H., Yin, E., Wang, Y., Xu, T., and Li, C. (2019). Effect of post-process heat treatment on microstructure and properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Materials Letters*, 234, 196–200.

42. Jian, H., Yang, M., Fang, W., Pai, J., and Yang, X. (2025). Effect of heat treatment on microstructure and properties of selective laser melting AlSi10Mg alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(4), 3267–3280.

43. Yaghi, A., Ayvar-Soberanis, S., Moturu, S., Bilkhu, R., and Afazov, S. (2019). Design against distortion for additive manufacturing. *Additive Manufacturing,* 27, 224–235.

44. Afazov, S., Denmark, W. A. D., Toralles, B. L., Holloway, A., and Yaghi, N. (2017). Distortion prediction and compensation in selective laser melting. *Additive Manufacturing,* 17, 15–22.

45. Abel, J., Tiwari, S., Kardos, M., Reichel, M., and Scheithauer, U. (2022). Reducing the distortion in particle filled material extrusion (MEX)-based additive manufacturing (AM) by means of modifying the printing strategy. *Ceramics,* 5(4), 1225–1241.

46. Misiun, G., van de Ven, E., Langelaar, M., Geijselaers, H., van Keulen, F., van den Boogaard, T., and Ayas, C. (2021). Topology optimization for additive manufacturing with distortion constraints. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 386, 114095.

47. Makeen, R., Joshi, K., Jhon, M. H., and Promoppatum, P. (2024). Distortion prediction and geometry compensation using modified inherent strain method for additively manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes,* 131, 1334–1347.

48. Yarlagadda, S., and Broadhurst, E. (2025). Minimizing distortion with additive manufacturing parts using machine learning. *Journal of Emerging Investigators,* 7, 1-7.

49. El-Sari, B., Biegler, M., Graf, B., and Rethmeier, M. (2020). Distortion-based validation of the heat treatment simulation of directed energy deposition additive manufactured parts. *Procedia CIRP,* 94, 362–366.

50. Bharath C., Shamanth V., and Hemanth K. (2021). Studies on mechanical behaviour of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting and A360 alloy by die casting. *Materials Today: Proceedings,* 45(1), 78-81.

51. Trevisan, F., Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Aversa, A., Ambrosio, E. P., Lombardi, M., Fino, P., and Manfredi, D. (2017). On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*, 10(1), 76.

52. Li, Z., Nie, Y., Liu, B., Kuai, Z., Zhao, M., and Liu, F. (2020). Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 192, 108709.

53. Gite, R. E., and Wakchaure, V. D. (2023). A review on process parameters, microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy. *Materials Today: Proceedings*, 72, 966–986.

54. Wang, X., Lu, Q., Zhang, P., Yan, H., Shi, H., Sun, T., Zhou, K., and Chen, K. (2024). A review on the simulation of selective laser melting AlSi10Mg. *Optics & Laser Technology*, 174, 110500.

55. Kayacan M., Yılmaz M.S., and Alshihabi M. (2024). Impact and modal characteristics of steels manufactured by a novel hybrid selective laser melting method. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12, 1907–1928

56. Scalzo, F., Totis, G., and Sortino, M. (2023). Influence of the experimental setup on the damping properties of SLM lattice structures. *Experimental Mechanics*, 63(1), 15–28.

57. Atlıhan, G., Ovalı, İ., ve Eren, A. (2021). Eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş bal petekli yapıların titreşim davranışlarının nümerik ve deneysel olarak incelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 98–108.

58. Ramesha, C. M., Abhijith, K. G., Singh, A., Raj, A., and Naik, C. S. (2015). Modal analysis and harmonic response analysis of a crankshaft. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(6), 323–327.

59. Yu, Y., Zhang, S., Li, H., Wang, X., and Tang, Y. (2017). Modal and harmonic response analysis of key components of ditch device based on ANSYS. *Procedia Engineering*, 174, 956–964.

60. Wang, D., Friswell, M. I., and Lei, Y. (2006). Maximizing the natural frequency of a beam with an intermediate elastic support. *Journal of Sound and Vibration*, 291(3–5), 1229–1238.

61. Aggogeri, F., Borboni, A., Merlo, A., Pellegrini, N., and Ricatto, R. (2017). Vibration damping analysis of lightweight structures in machine tools. *Materials*, 10(3), 297, 1-15.

62. Wu, Z., Xu, C., Zhang, J., Yu, D., and Feng, P. (2010, December 18-20). *Modal and harmonic response analysis and evaluation of machine tools*. International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Changsha, China, 929–933.

63. Gök, K., Karagöz, G. and Gök, A. (2023). Vibration damper design and additive manufacturing for unmanned aerial vehicles. *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research*, 6(2), 23-30.

64. Blachowicz, T., Ehrmann, G., and Ehrmann, A. (2021). Metal additive manufacturing for satellites and rockets. *Applied Sciences*, 11(24), 12036.

65. Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies: 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.* (Third edition). New York, USA: Springer.

66. International Organization for Standardization. (2021). *ISO/ASTM 52900:2021 – Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. ISO.

67. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 23(6), 1917–1928.

68. Li, J. L. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A., Hasan, R., Sudin, M. N., & Ramli, F. R. (2019). Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *International Journal of Automation Technology*, 13(3), 346–353.

69. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., and Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science,* 92, 112–224.

70. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., and Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.

71. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., and Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: materials and applications. *Applied Physics Reviews,* 2(4), 041101.

72. Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., and Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews,* 57(3), 133–164.

73. Qiu, C., Adkins, N. J. E., and Attallah, M. M. (2013). Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering,* 578, 230–239.

74. İnternet: SLM 3 boyutlu baskı teknolojisi. Web: https://tr.wikipedia.org/wiki/SLM_3_Boyutlu_Bask%C4%B1_Teknolojisi, Son Erişim Tarihi: 01/11/2025.

75. Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*, 1(4), 193–202.

76. Allaire, G., Jouve, F., and Toader, A. M. (2004). Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*, 194(1), 363–393.

77. Xie, Y. M., and Steven, G. P. (1993). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, 49(5), 885–896.

78. Sigmund, O., and Maute, K. (2013). Topology optimization approaches: a comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031–1055.

79. İnternet: A complete guide to ınertial measurement unit (IMU). (2024). Web: https://www.jouav.com/blog/inertial-measurement-unit.html#jouav-scrollspy-anchor-1, Son Erişim Tarihi: 02.11.2025.

80. İnternet: Inertial measurement unit (IMU) – an introduction. (2023). Web: https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-measurement-unit-imu-an-introduction/, Son Erişim Tarihi: 02.11.2025.

81. Günhan, Y. (2014). *Ataletsel Ölçüm Birimi Hatalarının Belirlenmesi ve Düzeltimi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-19.

82. İnternet: APN-112: Inertial navigation systems and vibration. Web: https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Papers/APN-112-Inertial-Navigation-Systems-and-Vibration/APN-112-Inertial Navigation-Systems-and-Vibration.pdf, Son Erişim Tarihi: 02.11.2025.

83. İnternet: Do i need a vibration dampening?. Web: https://inertiallabs.com/do-i-need-a-vibration-dampening/, Son Erişim Tarihi: 02.11.2025.

84. İnternet: Aluminum 6061-T6; 6061-T651. Web: https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6, Son Erişim Tarihi: 08.11.2025.

85. İnternet: AlSi10Mg alloy in additive manufacturing & die casting. Web: https://langhe-industry.com/alsi10mg-alloy/, Son Erişim Tarihi: 08.11.2025.

86. İnternet: Material datasheet – EOS aluminium AlSi10Mg (EN), Web: https://www.eos.info, Son Erişim Tarihi: 08.11.2025.

87. Kamiel, B., and Fadila, A. R. (2024, August 7-8). *Dynamic analysis of aluminum 6061 utilizing the frequency response function method*. 4th International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS), Yogyakarta, Indonesia, 397–402.

88. Ramamurti, V., Mithun, S., Prabhakar, N., and Sukumar, T. (2012). Experimental determination of damping ratios at higher modes for use in modal superposition. *Journal of Engineering and Technology Research*, 4(6), 114–128.

89. Mevada, H., and Patel, D. (2016). Experimental determination of structural damping of different materials. *Procedia Engineering*, 144, 110–115.

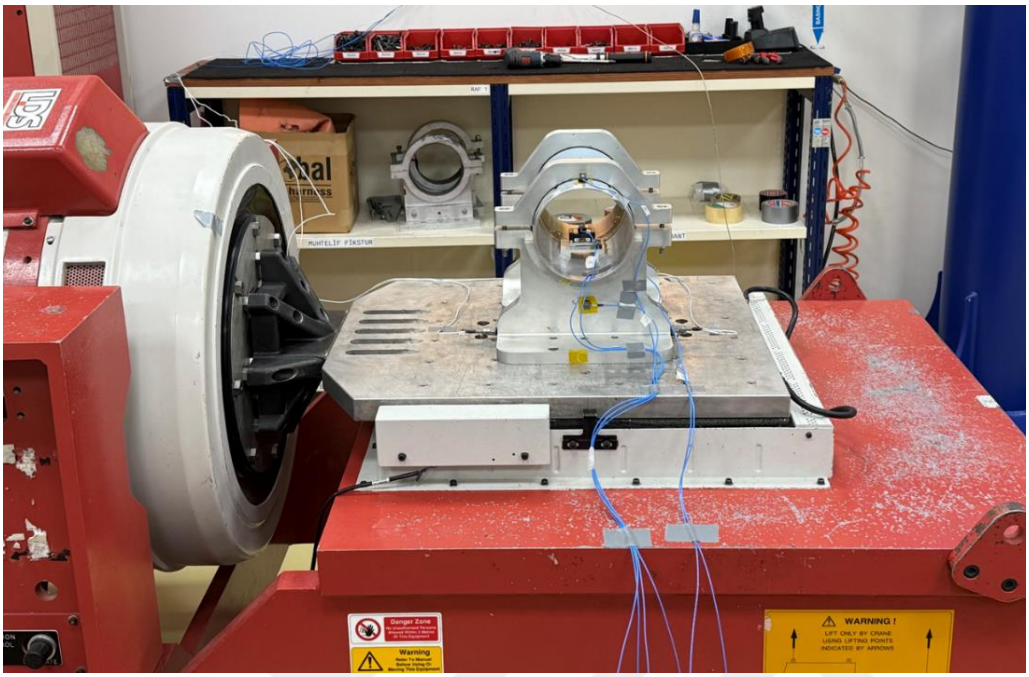
EKLER

EK-1. Farklı yönlerindeki sinüs tarama testleri için test düzeneği görünümleri

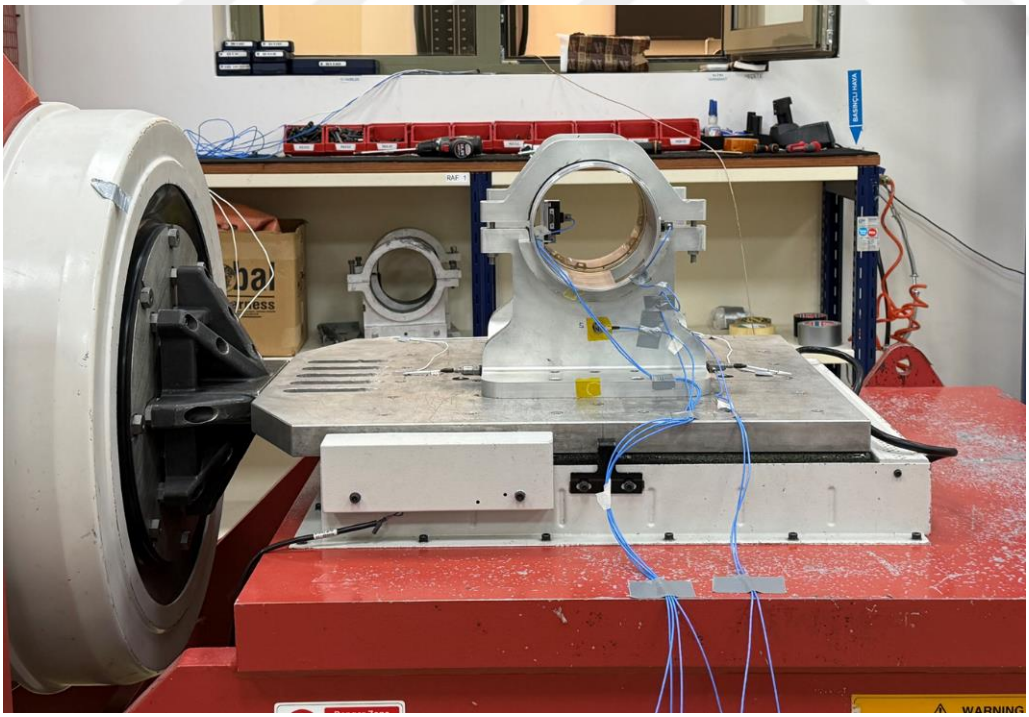


Resim 1.1. X ekseni testi için test düzeneği

EK-1. (devam) Farklı yönlerindeki sinüs tarama testleri için test düzeneği görünümleri

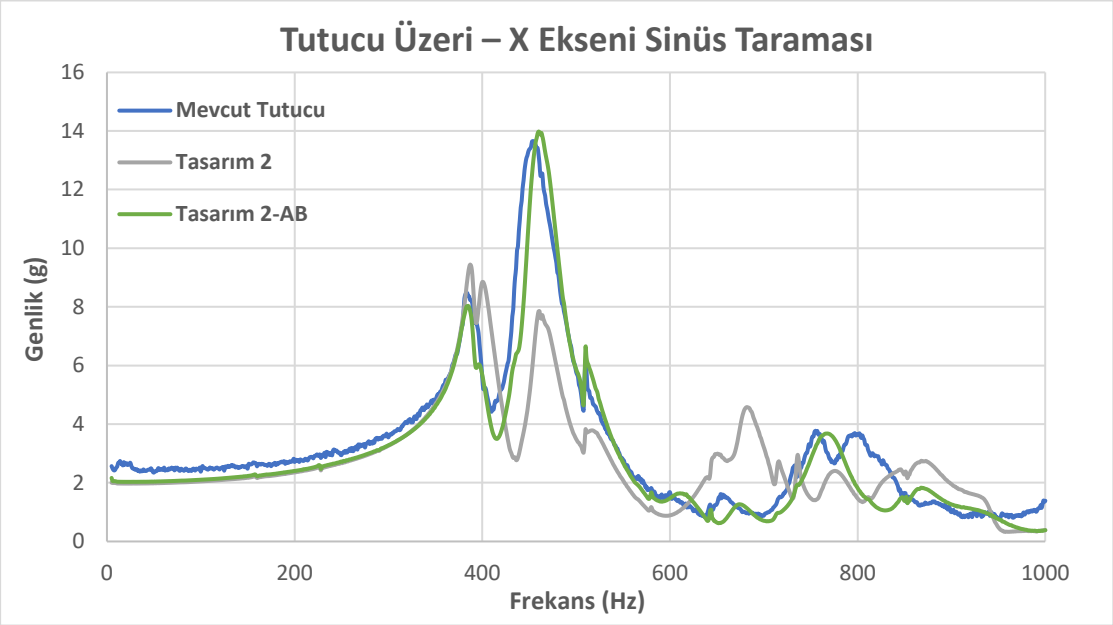


Resim 1.2. Y ekseni testi için test düzeneği

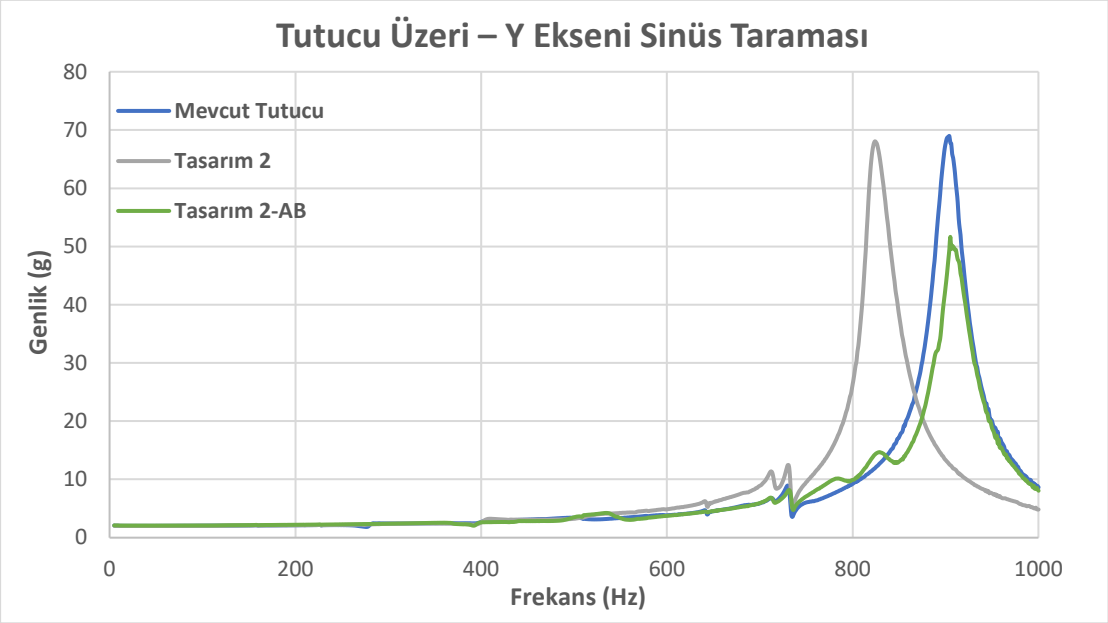


Resim 1.3. Z ekseni testi için test düzeneği

EK-2. AÖB tutucuları üzerindeki ivmeölçerlerden ve kontrol ivmeölçerinden alınan ölçüm sonuçları

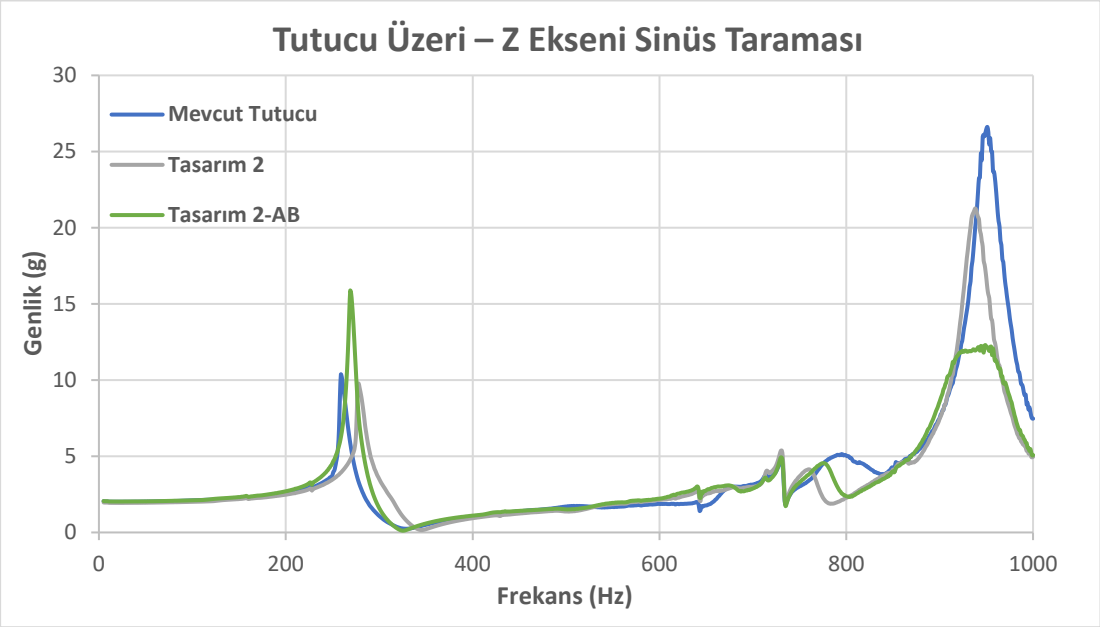


Şekil 2.1. AÖB tutucuları üzerinden alınan X ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları

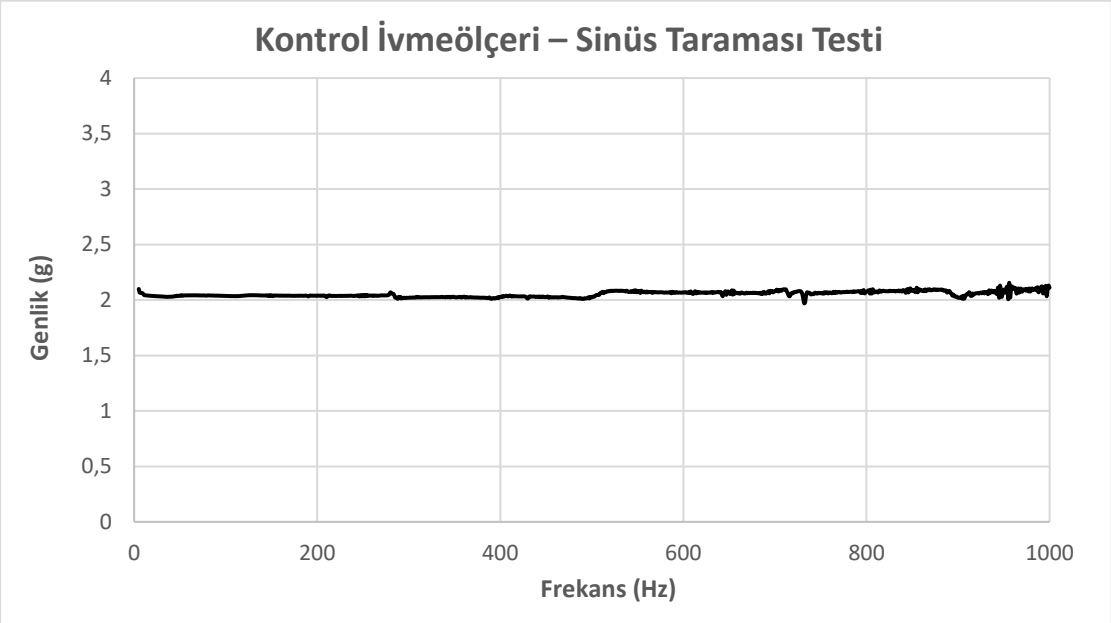


Şekil 2.2. AÖB tutucuları üzerinden alınan Y ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları

EK-2. (devam) AÖB tutucuları üzerindeki ivmeölçerlerden ve kontrol ivmeölçerinden alınan ölçüm sonuçları



Şekil 2.3. AÖB tutucuları üzerinden alınan Z ekseni sinüs taraması titreşim testi sonuçları



Şekil 2.4. Sinüs tarama testinde kullanılan kontrol ivmeölçerinin ölçüm değerleri



Gazili olmak ayrıcalıktır