**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ENDÜSTRİYEL PNÖMATİK TEKERLEK JANTININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİMİ

**İsmail AYTİMUR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Temmuz, 2025

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ENDÜSTRİYEL PNÖMATİK TEKERLEK JANTININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİMİ

İsmail AYTİMUR tarafından hazırlanan tez çalışması 02.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Tolga MERT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAKÖK, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Endüstriyel Pnömatik Tekerlek Jantının Topoloji Optimizasyonu ve Eklemeli İmalat ile Üretimi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İsmail AYTİMUR

İmza

*Aileme*

*ve*

*eşime*

# TEŞEKKÜR

"Endüstriyel Pnömatik Tekerlek Jantının Topoloji Optimizasyonu ve Eklemeli İmalat ile Üretimi" başlıklı tez çalışmamı oluştururken benden bilgi birikimini, yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ'a, değerli desteklerinden dolayı ALUTEAM Tasarım ve Üretim Koordinatörü Sn. Mert COŞKUN'a, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak daima yanımda olan kıymetli annem, babam ve kardeşlerime, tez çalışmam boyunca tüm destekleri ve sabrı için biricik eşim Gamze AYTİMUR'a ve kendileriyle geçireceğim zamandan feragat eden çok kıymetli çocuklarım Muhammed Ali AYTİMUR ve Lavinya Arya AYTİMUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İsmail AYTİMUR

# İÇİNDEKİLER

**SİMGE LİSTESİ** vii
**KISALTMA LİSTESİ** viii
**ŞEKİL LİSTESİ** ix
**TABLO LİSTESİ** xii
**ÖZET** xiii
**ABSTRACT** xv
**1 GİRİŞ** 1
1.1 Literatür Özeti ..... 2
1.2 Tezin Amacı ..... 11
1.3 Eklemeli İmalat ..... 11
1.3.1 Eklemeli İmalat Proses Adımları ..... 12
1.3.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri ..... 15
1.4 Plastik Enjeksiyon ..... 20
1.4.1 Plastik Hammaddeler ..... 20
1.4.2 Plastik Enjeksiyon Prosesi ..... 21
1.4.3 Plastik Enjeksiyon Kalıbı ..... 24
1.5 Yapısal Optimizasyon ..... 26
1.5.1 Boyut Optimizasyonu ..... 27
1.5.2 Şekil Optimizasyonu ..... 27
1.5.3 Topoloji Optimizasyonu ..... 28
**2 YÖNTEM VE METOT** 32
2.1 Plastik Jantın Modellenmesi ve Analizi ..... 33
2.2 Plastik Janta Etkiyen Yükler ..... 35
2.2.1 Radyal Yük ..... 35
2.2.2 Lastik İç Hava Basıncının Oluşturduğu Yük ..... 38
2.3 Plastik Jant Tasarımının İyileştirilmesi ..... 49
2.4 Plastik Jantın Topoloji Optimizasyonu ..... 51
2.5 Numune İmalatı ..... 61
2.6 Dayanım ve Ömür Testi ..... 66
**3 BULGULAR** 69
3.1 Yeni Plastik Jant Modellerinin Doğrulanması ..... 70

3.2 Numune İmalatı.....81
3.3 Dayanım ve Ömür Testi.....83
3.4 Maliyet Analizi .....91
**4 SONUÇ** **94**
4.1 Sonuçlar .....94
**KAYNAKÇA** **98**
**TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR** **103**

# SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| b | Lastik Boncuğu Yatak Genişliği |
| d | Dakika |
| mm | Milimetre |
| MPa | Megapascal |
| N | Newton |
| $\bar{r}$ | Lastik Kütle Merkezinin Eksene Uzaklığı |
| $r_f$ | Jant Flanşı Yükleme Noktası Yarıçapı |
| $R_0$ | Lastik Dış Yarıçapı |
| $R_i$ | Jant Anma Yarıçapı |
| s | Saat |
| $T_f$ | Jant Yanağına Uygulanan Yanal Kuvvet |
| W | Watt |
| $W_0$ | Yükleme Açısında Lastiğe Etkiyen Basınç |
| $W_p$ | Lastik Yan Yüzeyine Etkiyen Toplam Yanal Kuvvet |
| °C | Santigrat Derece |
| µm | Mikrometre |
| $\Theta_0$ | Yükleme Açısı |

# KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| 3B | 3 Boyutlu |
| ABS | Akrilonitril Bütadien Stiren |
| AlMgSc | Alüminyum Alaşımı |
| BJ | Bağlayıcı Püskürtme |
| DLP | Dijital Işık İşleme |
| DMLS | Direkt Metal Lazer Sinterleme |
| EBAM | Elektron Işınlı Eklemeli İmalat |
| EBM | Elektron Işını İle Ergitme |
| FDM | Eritilerek Yığarak Modelleme |
| FE | Sonlu Eleman |
| LENS | Lazer Mühendislikli Net Şekillendirme |
| LOM | Lamine Nesne Üretimi |
| PA | Poliamid |
| PA12 | Poliamid 12 |
| PC | Polikarbonat |
| PE | Polietilen |
| POM | Polioksimetilen |
| PJ | Çoklu Malzeme Püskürtme |
| PLA | Polilaktik Asit |
| PLC | Programlanabilir Mantıksal Denetleyici |
| PP | Polipropilen |
| PS | Polistiren |
| PVC | Polivinil Klorür |
| PTFE | Politetrafloroetilen |
| SLA | Stereolitografi |
| SLM | Seçici Lazer Ergitme |
| SLS | Seçici Lazer Sinterleme |
| Ti6Al4V | Titanyum Alaşımı |
| UV | Ultraviyole |

# ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 1. 1** Eklemeli imalat işlem adımları ..... 13
**Şekil 1. 2** Plastik enjeksiyon makinesi bölümleri ..... 22
**Şekil 1. 3** Plastik enjeksiyon çevrim aşamaları ..... 22
**Şekil 1. 4** Plastik enjeksiyon kalıbı parçaları ..... 24
**Şekil 1. 5** Soğuk yolluk sistemi ..... 25
**Şekil 1. 6** Sıcak yolluk sistemi ..... 26
**Şekil 1. 7** Boyut optimizasyonu ..... 27
**Şekil 1. 8** Şekil optimizasyonu ..... 28
**Şekil 1. 9** Menteşe destek parçasının topoloji optimizasyonu ..... 30
**Şekil 1. 10** Bir yarış aracına ait parçanın topoloji optimizasyonu ..... 30
**Şekil 1. 11** Topoloji optimizasyonu için önerilen yöntem adımları ..... 31
**Şekil 2. 1** Taşıma arabası ve endüstriyel pnömatik tekerlek ..... 33
**Şekil 2. 2** Plastik jantın modeli ..... 33
**Şekil 2. 3** Plastik jantın izometrik kesit görünümü ..... 34
**Şekil 2. 4** Plastik jantın bölümleri ..... 34
**Şekil 2. 5** Plastik Jant, rulman ve lastik montajı ..... 35
**Şekil 2. 6** Lastiğe etkiyen düşey kuvvetin gösterimi ..... 36
**Şekil 2. 7** Radyal yük hesabı için b ve rf ölçüleri ..... 37
**Şekil 2. 8** Radyal yükün jant üzerinde etkilediği alan ..... 38
**Şekil 2. 9** Lastik iç hava basıncının jant üzerinde etkilediği alan ..... 39
**Şekil 2. 10** Lastik iç hava basıncının oluşturduğu yanal kuvvet ve etkilediği bölgelerin şematik gösterimi ..... 40
**Şekil 2. 11** Lastik iç hava basıncının jant yanaklarını etkilediği alan ..... 41
**Şekil 2. 12** Plastik jantın statik yapısal analizinin proje adımları ..... 42
**Şekil 2. 13** PP hammaddenin kütüphaneye kayıt edilmesi ..... 42
**Şekil 2. 14** Plastik jantın analiz ortamına aktarılması ..... 43
**Şekil 2. 15** Plastik jantın mesh modellemesi ..... 44
**Şekil 2. 16** Plastik jantın mesh modellemesi detay görünüm ..... 44
**Şekil 2. 17** Radyal yükün plastik janta uygulanması ..... 45
**Şekil 2. 18** İç hava basıncının plastik janta uygulanması ..... 46
**Şekil 2. 19** Jant yanaklarına gelen yükün uygulanması ..... 46
**Şekil 2. 20** Jant sabitleme yüzeylerinin tanımlanması ..... 47

**Şekil 2. 21** Jant sabitleme ve yükleme yüzeylerinin gösterimi.....47
**Şekil 2. 22** Plastik jantın toplam deformasyonu.....48
**Şekil 2. 23** Plastik jantın eşdeğer gerilmesi.....48
**Şekil 2. 24** Plastik jantın güvenlik katsayısı.....49
**Şekil 2. 25** Plastik jantın kesit görünümü.....50
**Şekil 2. 26** İyileştirilmiş plastik jantın kesit görünümü.....50
**Şekil 2. 27** Plastik jantın optimizasyon için dilimlenmesi.....52
**Şekil 2. 28** Plastik jantın topoloji optimizasyonu adımları.....53
**Şekil 2. 29** Plastik jant diliminin tasarım bölgesi (design region).....54
**Şekil 2. 30** Plastik jant diliminin dış çember bölgesi (outer body).....54
**Şekil 2. 31** Plastik jant diliminin göbek bölgesi (inner body).....54
**Şekil 2. 32** Plastik jant diliminin sonlu elemanlar modeli.....56
**Şekil 2. 33** Plastik jant diliminin sınır koşullarının gösterimi.....57
**Şekil 2. 34** Plastik jant dilimine 0.3 hacim kesiri kısıtı uygulaması.....58
**Şekil 2. 35** Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu (0.3 hacim kesiri kısıtı).....59
**Şekil 2. 36** Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu (0.4 hacim kesiri kısıtı).....59
**Şekil 2. 37** Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu (0.5 hacim kesiri kısıtı).....59
**Şekil 2. 38** Plastik jant modellerinin görselleri.....60
**Şekil 2. 39** EOS P396 seçici lazer sinterleme makinesi.....61
**Şekil 2. 40** Model 2 jantın eklemeli imalat hazırlığı.....62
**Şekil 2. 41** Model 2 jantın eklemeli imalat ile üretimi.....63
**Şekil 2. 42** Model 2 jantın kumlama işlemi.....64
**Şekil 2. 43** Model 2 jantın görseli.....64
**Şekil 2. 44** Model 2 jantın montajı.....65
**Şekil 2. 45** Montajı tamamlanmış model 2 jantın görseli.....65
**Şekil 2. 46** Tekerlek dayanım ve ömür test cihazı.....66
**Şekil 2. 47** Test parametrelerinin ayarlanması.....67
**Şekil 2. 48** Model 2 jantın dayanım ve ömür testi.....68
**Şekil 2. 49** Model 1 jantın dayanım ve ömür testi.....68
**Şekil 3. 1** Topoloji optimizasyonu sonucu plastik jant model 2.....69
**Şekil 3. 2** Topoloji optimizasyonu sonucu plastik jant model 3.....69
**Şekil 3. 3** Topoloji optimizasyonu sonucu plastik jant model 4.....70
**Şekil 3. 4** Yeni jant modellerinin statik yapısal analizi proje adımları.....71

**Şekil 3. 5** PA12 hammaddenin kütüphaneye kayıt edilmesi ..... 71
**Şekil 3. 6** Yeni model jantların sabitleme ve yükleme yüzeylerinin gösterimi ..... 72
**Şekil 3. 7** Plastik jant model 2'nin toplam deformasyonu ..... 73
**Şekil 3. 8** Plastik jant model 3'ün toplam deformasyonu ..... 73
**Şekil 3. 9** Plastik jant model 4'ün toplam deformasyonu ..... 74
**Şekil 3. 10** Plastik jant model 2'nin eş değer gerilmesi ..... 74
**Şekil 3. 11** Plastik jant model 3'ün eş değer gerilmesi ..... 75
**Şekil 3. 12** Plastik jant model 4'ün eş değer gerilmesi ..... 75
**Şekil 3. 13** Plastik jant model 2'nin güvenlik katsayısı ..... 76
**Şekil 3. 14** Plastik jant model 3'ün güvenlik katsayısı ..... 76
**Şekil 3. 15** Plastik jant model 4'ün güvenlik katsayısı ..... 77
**Şekil 3. 16** Model 2 jantın feder bölgesindeki güvenlik katsayıları ..... 77
**Şekil 3. 17** Tüm jant modellerinin hacim değişimleri ..... 79
**Şekil 3. 18** Tüm jant modellerinin ağırlık değişimleri ..... 79
**Şekil 3. 19** Tüm jant modellerinin toplam deformasyon değişimleri ..... 79
**Şekil 3. 20** Tüm jant modellerinin maksimum eşdeğer gerilme değerlerinin değişimi ..... 80
**Şekil 3. 21** Tüm jant modellerinin güvenlik katsayısı değişimleri ..... 80
**Şekil 3. 22** Topoloji öncesi ve sonrası jant federi değişimi ..... 81
**Şekil 3. 23** Model 2 janta ait genel ölçüler ..... 81
**Şekil 3. 24** Model 2 jantın test sonuç ekranı ..... 83
**Şekil 3. 25** Model 1 jantın test sonuç ekranı ..... 84
**Şekil 3. 26** Model 2 jantın ömür testi sonrası genel görünümü ..... 85
**Şekil 3. 27** Model 2 jant federlerinin deformasyonu ..... 85
**Şekil 3. 28** Test öncesi ve sonrası model 2 jant görünümü ..... 86
**Şekil 3. 29** Model 1 jantın ömür testi sonrası genel görünümü ..... 88
**Şekil 3. 30** Model 1 jant federlerinin deformasyonu ..... 89
**Şekil 3. 31** Model 1 jant dış çemberindeki deformasyon izleri ..... 89
**Şekil 3. 32** Test öncesi ve sonrası model 1 jant görünümü ..... 91
**Şekil 3. 33** Model 1 ve model 2 jantların ölçüm sapma yüzdeleri ..... 91

# TABLO LİSTESİ

**Tablo 3. 1** Tüm jant modellerinin yapısal parametrelerinin kıyaslanması.....78
**Tablo 3. 2** Model 2 jantın test öncesi ölçüm sonuçları .....82
**Tablo 3. 3** Model 1 jantın test öncesi ölçüm sonuçları .....82
**Tablo 3. 4** Model 2 jantın test sonrası ölçüm sonuçları .....87
**Tablo 3. 5** Model 1 jantın test sonrası ölçüm sonuçları .....90
**Tablo 3. 6** Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimin maliyeti…….92
**Tablo 3. 7** Eklemeli imalat yöntemi ile üretimin maliyeti ……93

# ÖZET

## Endüstriyel Pnömatik Tekerlek Jantının Topoloji Optimizasyonu ve Eklemeli İmalat ile Üretimi

İsmail AYTİMUR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usulleri Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Eklemeli imalat teknolojileri, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha karmaşık ve hafif yapılar tasarlayabilme avantajına sahip olmalarının yanı sıra, sundukları tasarım esnekliği ile de öne çıkmaktadır. Ayrıca, hızlı prototipleme, malzeme verimliliği ve üretim sürecinde kalıp, takım, fikstür gibi özel gereksinimlerin ortadan kalkması gibi avantajları sayesinde, bu teknolojiler, farklı endüstri sektörlerinde giderek daha fazla benimsenmektedir. Bu çalışmada, plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen, lastik taban genişliği 76,0 mm, lastik yanak yüksekliği 76,0 mm ve jant çapı 101,6 mm olan endüstriyel pnömatik tekerlek jantı, eklemeli imalata uygun hale getirilerek, poliamid 12 (PA12) hammadde kullanılarak yeniden tasarlanması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, plastik jant üzerine etki eden yükler hesaplanarak yük dağılımları detaylı bir şekilde belirlenmiştir. Tasarım sürecinde, plastik jantın yapısal iyileştirmeleri yapılmış ve farklı hacim kesri kısıtları altında topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Elde edilen yeni jant modellerinin yapısal analizleri gerçekleştirilmiş ve bu modellerin

yapısal özellikleri karşılaştırılmıştır. En uygun performansı sergileyen modelde, toplam ağırlıkta %8,24 oranında bir azalma sağlanmış olup, bu ağırlık azalması, özellikle jant feder bölgelerinde topoloji optimizasyonunun lokal olarak uygulanması nedeniyle %50,59 oranında tespit edilmiştir. Eklemeli imalat ile üretilen yeni model jant, mevcut model jant ile eşit şartlar altında dayanım ve ömür testine tabi tutulmuş ve bu testlerde yeni model jant, ömür testinde daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Test sonuçları, eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu entegrasyonu ile üretilen yeni model jantın, mekanik özellikler ve dayanıklılık açısından önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun, geleneksel tasarım yaklaşımlarına kıyasla belirgin bir üstünlük sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat, analiz, topoloji optimizasyonu, endüstriyel uygulamalar

# ABSTRACT

## Manufacturing of Industrial Pneumatic Wheel Rim by Topology Optimization and Additive Manufacturing

İsmail Aytimur

Department of Mechanical Engineering

Manufacturing Program

Master of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Additive manufacturing technologies not only have the capability to design more complex and lightweight structures compared to traditional manufacturing methods but also stand out with the design flexibility they offer. Additionally, with advantages such as rapid prototyping, material efficiency, and the elimination of special requirements like molds, tools, and fixtures in the production process, these technologies are increasingly being adopted in various industrial sectors. In this study, an industrial pneumatic wheel rim, produced using the plastic injection method with a tire tread width of 76,0 mm, a sidewall height of 76,0 mm, and a rim diameter of 101,6 mm, was redesigned to be compatible with additive manufacturing, using polyamide 12 (PA12) material. During the study, the loads acting on the plastic rim were calculated, and the load distributions were determined in detail. Structural improvements were made in the design process of the plastic rim, and topology optimization was applied under different volume fraction constraints. Structural analyses of the newly obtained rim models were conducted,

and their structural properties were compared. The model demonstrating optimal performance achieved an overall weight reduction of 8.24%, with this weight reduction specifically being 50.59% in areas where the topology density was locally strengthened, particularly in the rim spring regions. The new rim model produced through additive manufacturing was subjected to strength and durability tests under the same conditions as the existing model, and the new model performed better in the durability test. The test results demonstrate that the new rim model produced with additive manufacturing and topology optimization integration provides significant improvements in mechanical properties and durability. The findings clearly show that additive manufacturing and topology optimization provide a significant advantage over traditional design approaches.

**Keywords:** Additive manufacturing, analysis, topology optimization, industrial applications

# 1
# GİRİŞ

Üretim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, mühendislik tasarımlarında daha önce mümkün olmayan fırsatların doğmasını sağlamıştır [1]. Geleneksel üretim yöntemlerinde, parçaların tasarımları çoğunlukla üretilebilirlik sınırları çerçevesinde oluşturulmuş; bu da tasarım potansiyelinin tam anlamıyla kullanılamamasına neden olmuştur. Özellikle karmaşık formların üretimindeki zorluklar, mühendisleri daha sade ve üretimi kolay tasarımlar yapmaya yöneltmiştir. Bunun sonucunda, ürünlerin ağırlık, performans ve fonksiyonellik açısından idealden uzaklaştığı durumlar sıkça gözlemlenmiştir [2].

Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, üretim kaynaklı tasarım kısıtlamaları önemli ölçüde azalmış ve tasarım serbestliği kavramı ön plana çıkmıştır. Bu yeni üretim yaklaşımı, daha karmaşık, hafif ve işlevsel yapıların doğrudan üretilebilmesine olanak sağlamış, tasarımcıların yalnızca parçaların fonksiyonel gereksinimlerine odaklanarak daha özgün çözümler geliştirmesine imkan tanımıştır. Böylece, geleneksel yöntemlerle imal edilmiş pek çok parçanın, eklemeli imalatın sunduğu imkanlara uygun şekilde yeniden tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmıştır [3].

Geleneksel imalat yöntemleriyle imal edilmiş parçalara, eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğünden faydalanarak, topoloji optimizasyonu uygulanabilmektedir. Topoloji optimizasyonu ile parçaların yapısal dayanımları korunurken, gereksiz kütleler azaltılarak hafifletilmeleri sağlanabilmektedir. Literatürde eklemeli imalat yönteminin sunduğu avantajlardan yararlanılarak geometrilerin yeniden oluşturulduğu ve eklemeli imalatın farklı üstünlüklerinin ele alındığı birçok araştırma bulunmaktadır [4].

## 1.1 Literatür Özeti

Junk ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada [5], insan benzeri bir robot olan Sweaty'nin pelvis modülü üzerinde eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Çalışmanın temel amacı, geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş modülün, tasarım serbestliği avantajından yararlanarak hafifletilmesi ve montaj sürecinin basitleştirilmesidir. Topoloji optimizasyonu için Tosca yazılımı kullanılmış ve analizler sonlu elemanlar yöntemiyle desteklenmiştir. Malzeme seçimi aşamasında titanyum alaşımı (Ti6Al4V), yüksek mukavemetli alüminyum alaşımı (AlMgSc) ve takım çeliği gibi farklı seçenekler değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, özellikle AlMgSc alaşımının kullanımıyla %46'ya varan ağırlık azaltımı sağlanmış ve bileşenlerin mekanik performansı artırılmıştır. Ayrıca, bileşen sayısının ve cıvata bağlantılarının azaltılmasıyla montaj süreci önemli ölçüde kolaylaştırılmıştır. Bu çalışma, eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun birlikte kullanıldığında, mekanik performanstan ödün vermeden yapısal hafifleme ve üretim kolaylığı elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Pantham tarafından yapılan çalışmada [6], dinamik bileşenlerin eklemeli imalat teknolojisiyle üretimi için yapılan yeniden tasarımları incelemektedir. Bu çalışma, özellikle havacılık ve uzay endüstrilerindeki bileşenlerin yeniden tasarımında topoloji optimizasyonu yöntemlerinin kullanımını ele almaktadır. Çalışmada, uçak iniş takımlarında bulunan üst bağlantı ve alt bağlantı olmak üzere iki ana parça üzerinde yapılan tasarım değişiklikleri detaylandırılmaktadır. Topoloji optimizasyonu, her iki parçanın ağırlığını azaltmaya yönelik bir strateji olarak kullanılmıştır. İki farklı tasarım yapılmış ve karşılaştırılmış, her iki tasarımda da önemli ağırlık azaltma oranları elde edilmiştir. İlk tasarımda, parça ağırlığını %31,6 oranında azaltırken, İkinci tasarım daha da verimli bir tasarım sunarak %32,5'lik bir ağırlık azaltma sağlamıştır. Gerilme ve deformasyon analizleri, tasarımlar arasındaki farkları net bir şekilde ortaya koymaktadır. İkinci tasarım, 3D modele kıyasla %75 daha az deformasyon ve %35 daha fazla stres ile daha dayanıklı bir yapı sunmuştur. İlk tasarımın, özellikle güvenlik katsayısı açısından, havacılık endüstrisinde kullanılabilirliğini sınırladığı belirtilmiştir. Ancak ikinci tasarım, daha düşük deformasyon ve daha güçlü yapısal dayanıklılık ile katmanlı imalat

yöntemlerine uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu gibi ileri düzey teknolojilerin, havacılık ve uzay endüstrileri gibi yüksek güvenlik gereksinimlerine sahip sektörlerde bileşenlerin verimli bir şekilde yeniden tasarlanmasını sağladığını ve bu yöntemlerin hafif yapıların üretimi için büyük potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [7], eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu kullanarak yapılan bir yeniden tasarım çalışmasına odaklanılmaktadır. Çalışma, otomotiv ve havacılık endüstrisi gibi alanlarda kullanılan fonksiyonel bileşenlerin tasarımında uygulanabilir çözümler sunmayı hedeflemektedir. Araştırmacılar, hava aracı motoru parçası üzerinde çalışma yapmışlardır. Bu parça, geleneksel üretim yöntemleriyle tasarlanmış ancak eklemeli imalat ile yeniden tasarlanarak optimize edilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, topoloji optimizasyonu ile yapılan tasarımlar, özellikle parçanın ağırlığının azaltılması ve yapısal dayanıklılığının artırılması açısından önemli sonuçlar elde edilmiştir. Geleneksel tasarımlar ile karşılaştırıldığında, topoloji optimizasyonu uygulanan parçalar, yaklaşık %40 ağırlık kaybı sağlarken, yapısal dayanıklılık ve fonksiyonel verimlilik açısından daha iyi performans sergilemiştir. Fonksiyonel parçaların yeniden tasarımında elde edilen bu iyileşmeler, endüstriyel üretim süreçlerinde katmanlı imalat ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinin entegrasyonunun önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak yapısal deformasyon ve maksimum gerilim gibi parametrelerde de önemli iyileştirmeler ortaya koymuştur. Topoloji optimizasyonu sayesinde, parçanın dayanıklılığı %20 oranında artarken, maksimum gerilim seviyesi de geleneksel tasarımdan daha düşük seviyelere çekilmiştir. Ayrıca, yapılan tasarımda kullanılan mesh yapıları parça üzerindeki yük dağılımını iyileştirerek daha verimli bir performans elde edilmesine yardımcı olmuştur. Bu da, endüstriyel uygulamalarda kullanılan katmanlı imalat parçalarının daha hafif, dayanıklı ve fonksiyonel hale gelmesini sağlamaktadır. Topoloji optimizasyonu ile yapılan yeniden tasarım, ağırlık azaltma ve yapısal dayanıklılık gibi hedeflere ulaşılmasında önemli bir rol oynamıştır ve bu yöntemlerin özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanımı için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Al Zuhairi ve arkadaşlarının çalışmasında [8], topoloji optimizasyonu neticesinde elde edilen ve doğrudan üretime uygun olmayan tasarım çıktılarının, katmanlı imalat süreçlerine entegre edilebilmesi amacıyla sistematik bir yeniden tasarım metodolojisi önermiştir. Söz konusu metodoloji; ilk olarak, optimizasyon sonucunda ortaya çıkan kompleks ve düzensiz geometriler üzerinde yük taşıyıcı unsurların ve önemsiz kütle bölgelerinin ayrıştırılmasını içermekte, ardından bu veri doğrultusunda gereksiz topolojik detayların elimine edilmesi ve yapı üzerinde işlevsel yük yollarının korunarak geometrik sadeleştirmenin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Son aşamada, katmanlı imalat teknolojilerinin karakteristik üretim kısıtları (minimum duvar kalınlığı, destek ihtiyacı, katman yönelimi vb.) dikkate alınarak, tasarımın üretime uygun hale getirilmesi sağlanmaktadır. Çalışma kapsamında uygulanan metodoloji, bir taşıyıcı yapı örneği üzerinde test edilmiş; yeniden tasarım neticesinde yapının ağırlığında yaklaşık %30 oranında azalma sağlanırken, yapısal dayanımda anlamlı bir kayıp yaşanmadığı, aksine yük taşıma kapasitesinin optimize edildiği belirlenmiştir. Elde edilen yeni tasarım, FDM yöntemi kullanılarak başarıyla üretilmiş ve sonlu elemanlar analizi ile mekanik performansı doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, topoloji optimizasyonu sonrası doğrudan üretime geçilmesinin mümkün olmadığını; üretim odaklı, fonksiyonel ve dayanıklı tasarımlar elde edilebilmesi için mutlaka sistematik bir yeniden tasarım sürecinin gerekli olduğunu ortaya koymuştur.

Vayre ve arkadaşları, eklemeli imalat süreçlerinin sunduğu üretim özgürlüklerinin tasarım metodolojileri üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında [9], metal eklemeli imalatına özel tasarım stratejileri geliştirmişlerdir. Araştırmada, eklemeli üretimin minimum duvar kalınlığı (yaklaşık 0,5 mm), maksimum çıkıntı açısı (yaklaşık 45°'den fazla destek yapısı gereksinimi), minimum kanal çapı (yaklaşık 8 mm altı kapalı kanallarda tıkanma riski) gibi üretim limitleri sayısal değerlerle ortaya konulmuştur. Araştırmacılar, bu doğrultuda dört aşamalı bir metodoloji önermiştir. Bu adımlar ilk olarak eklemeli imalata uygun temel geometrinin oluşturulması, ardından bu geometrinin üretim kısıtları doğrultusunda analizi, üçüncü aşamada geometrik optimizasyon ile tasarımın hem üretilebilirlik hem de performans açısından iyileştirilmesi, son aşamada ise sonlu elemanlar analizi gibi teknik araçlarla doğrulamanın yapılmasıdır. Uygulanan braket parça çalışmasında,

geleneksel yöntemlerle üretilmiş tasarıma göre %25'e varan bir ağırlık azalımı sağlanırken, yapısal dayanımın korunabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, destek yapılarının optimize edilmesi sayesinde üretim süresi %15 oranında kısaltılmış ve malzeme tüketimi önemli ölçüde azaltılmıştır. Çalışma genelinde, eklemeli imalata özgü tasarım prensiplerinin yalnızca ürün ağırlığının azaltılmasına değil, aynı zamanda üretim verimliliğinin artırılmasına ve toplam üretim maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağladığı belirtilmiştir.

Yan, Hao ve arkadaşları çalışmasında [10], eklemeli imalat süreçleri için hafif yapıların sistematik tasarımı üzerine yoğunlaşılmış ve bu doğrultuda topoloji optimizasyonu yöntemleri geliştirilmiştir. Eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu geometrik serbestlikten yararlanılarak, Inconel 718 süper alaşımı kullanılarak üretilen yapılar üzerinde detaylı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, geleneksel yöntemlerle üretilen yapılarla kıyaslandığında, topoloji optimizasyonu ile kütle üzerinde %28'e varan bir azalma elde edilmiş, bu esnada yapısal bütünlük ve mekanik dayanım önemli ölçüde korunmuştur. Optimizasyon süreci yalnızca minimum kütleyi hedeflemekle kalmamış, aynı zamanda eklemeli imalata özgü üretim kısıtlamaları, örneğin minimum yapı kalınlığı ve kritik destek açıları gibi parametreler de göz önünde bulundurularak tasarımlara entegre edilmiştir. Elde edilen optimize yapılar, üretim sonrası çekme testleri ve sonlu elemanlar analizleri ile değerlendirildiğinde, yeniden tasarlanan örneklerde maksimum gerilme seviyesinin ve toplam deformasyon değerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı doğrulanmıştır. Ayrıca çalışma, eklemeli imalat ile üretilen topoloji optimizasyon uygulanmış yapıların, sadece ağırlık azaltımı değil aynı zamanda üretim verimliliği ve fonksiyonellik açısından da önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur.

Thompson ve çalışma arkadaşları yaptıkları araştırmada [11], eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu entegrasyonunun mühendislik tasarımındaki potansiyelini incelemiştir. Çalışmalarında, topoloji optimizasyonu ile elde edilen yapısal tasarımların, eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu tasarım serbestliği sayesinde daha etkin üretilebileceği vurgulanmıştır. Özellikle, topoloji optimizasyonu ile %20–50 arasında ağırlık azaltımı sağlanabilmekte; bu da havacılık ve otomotiv gibi kütleye duyarlı sektörlerde önemli performans artışları sunmaktadır. Ancak

çalışmada, eklemeli imalatın katmanlı üretim doğası nedeniyle yapıların katman kalınlığı, destek yapısı gereksinimi ve yüzey kalitesi gibi üretimsel kısıtların tasarım optimizasyonuna doğrudan etki ettiği detaylı biçimde ele alınmıştır. Ayrıca, farklı eklemeli imalat süreçlerinin sunduğu malzeme özelliklerinin topoloji optimizasyonunda mutlaka dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada, özellikle havacılık endüstrisinden örneklerle, geleneksel üretimle karşılaştırıldığında eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu entegrasyonu sayesinde %30–60 arasında montaj parçası sayısının azaltılabildiği ve ciddi oranlarda üretim maliyeti düşüşlerinin mümkün olabileceği öne sürülmüştür. Çalışmanın sonunda, gelecekte yapay zeka destekli tasarım araçlarının ve üretim simülasyonlarının eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu entegrasyonunun verimliliğini artıracağı öngörülmüştür.

Gaynor ve Guest yaptıkları çalışmada [12], eklemeli imalat süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan destek yapısı ihtiyacını tasarım aşamasında ortadan kaldırmaya yönelik yeni bir topoloji optimizasyonu yöntemi geliştirmişlerdir. Özellikle toz yataklı ergitme gibi eklemeli imalat tekniklerinde üretim süreci sırasında oluşan çıkıntı bölgeleri nedeniyle ihtiyaç duyulan destek yapıları, malzeme tüketimini, üretim süresini ve son işlem maliyetlerini ciddi ölçüde artırmaktadır. Çalışmada geliştirilen metodoloji, üretim yönüne göre tasarım alanındaki eğim kısıtlamalarını doğrudan optimizasyon sürecine dahil etmektedir. Yöntemin performansı hem iki boyutlu hem de üç boyutlu yapısal örnekler üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar, klasik topoloji optimizasyonuna kıyasla destek yapısı ihtiyacında %85'e varan azalma sağlandığını göstermiştir. Ayrıca, optimize edilen tasarımlarda mekanik dayanımda sadece %2–5 aralığında bir azalma gözlenmiş ve bu durum, destek yapılarına olan bağımlılığı azaltırken yapısal performanstan ciddi bir ödün verilmediğini kanıtlamıştır. Çalışmada, çıkıntı kısıtlamalarının doğrudan tasarım alanına entegre edilmesinin, eklemeli imalat için doğrudan üretilebilir ve optimize edilmiş geometriler elde edilmesi açısından kritik bir adım olduğu vurgulanmıştır.

Sun, Moreira ve Rankouhi tarafından gerçekleştirilen çalışmada [13], yüksek sıcaklık uygulamalarına yönelik ısı eşanjörü tasarımı için topoloji optimizasyonu ve seçici lazer ergitme tabanlı eklemeli imalat teknolojileri entegre edilmiştir. Çalışmada, ısı eşanjörü bileşenleri için dayanım ve ısı transfer performansı optimize

edilirken, aynı zamanda üretilebilirliği artırmak amacıyla destek yapılarına olan ihtiyacı azaltan tasarım stratejileri geliştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu sürecinde, tasarım alanında malzeme dağılımı belirlenmiş ve maksimum ısı transfer yüzeyi sağlanırken basınç kaybı minimize edilmiştir. Malzeme olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı Inconel 718 alaşımı tercih edilmiş, böylece 800 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda mekanik stabilite test edilmiştir. Optimize edilen yapılar SLM yöntemiyle katman kalınlığı 40 μm olacak şekilde üretilmiş ve üretim sonrası minimum destek yapısı kullanımı sayesinde yüzey işlemleri ciddi şekilde azaltılmıştır. Termo-hidrolik testlerde, optimize edilen ısı eşanjörü prototiplerinin, geleneksel tasarımlara göre %22 oranında daha yüksek bir ısı transfer katsayısı sağladığı, basınç kaybının ise sadece %12 seviyesinde arttığı raporlanmıştır. Ayrıca, optimize edilmiş yapıların toplam kütlesinin yaklaşık %18 oranında azaltıldığı belirtilmiştir. Üretilen numuneler, 800 °C sıcaklığa kadar yapılan termal dayanım testlerinde herhangi bir çatlama veya deformasyon belirtisi göstermemiştir. Bu sonuçlar, topoloji optimizasyonu ile üretilen yapıların yalnızca mekanik yükler altında değil, aynı zamanda zorlu termal koşullar altında da üstün performans gösterebildiğini ve destek yapısı gereksinimini azaltmanın, eklemeli imalat süreç verimliliğini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, çalışma, ısı değiştirici gibi termomekanik bileşenlerin tasarımında topoloji optimizasyonunun ve eklemeli imalat teknolojisinin entegrasyonunun büyük potansiyel sunduğunu vurgulamaktadır.

Gang, Yang ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada [14], helikopter böceği kanatlarının yapısal verimliliğinden ilham alınarak, iskelet destekli, sinirsel stil transferi destekli bir topoloji optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, geleneksel topoloji optimizasyon tekniklerinin sınırlarının üstünde, biyolojik yapılardaki çok katmanlı ve yüksek dayanımlı-hafiflik oranını yapay tasarımlara aktarabilmeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, öncelikle helikopter böceği kanatlarının yapısal karakteristikleri tarayıcılar ve mikroskopik görüntüleme teknikleriyle analiz edilmiş, elde edilen biyomimetik veriler mühendislik tasarımlarına dahil edilmiştir. Ardından geliştirilen iskelet destekli topoloji optimizasyon algoritması, biyolojik iskelet yapısını koruyarak malzeme dağılımını optimize etmiş, böylece yüksek mukavemet ve düşük ağırlık oranı elde edilmiştir.

Son tasarımlar seçilen metal alaşımlar kullanılarak seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş ve hem yapısal hem de dayanım performansları deneysel olarak test edilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda, optimize edilmiş kanat benzeri yapıların, geleneksel topoloji optimizasyonu ile üretilen yapılara kıyasla %27 oranında daha hafif olduğu, buna karşın maksimum gerilme dayanımlarının %15 oranında arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca, yapının yorulma ömrünün iyileştirildiği görülmüştür. Çalışma, biyomimetik temelli yeni nesil topoloji optimizasyon stratejilerinin ve yapay zeka destekli tasarım tekniklerinin, özellikle uzay ve havacılık gibi hafiflik ve mukavemetin önemli olduğu alanlarda büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Gao, Xia ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada [15], havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan bir bağlantı parçası olan braket için, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat süreçlerini bir arada kullanan yenilikçi bir tasarım ve üretim yöntemi geliştirilmiştir. Araştırmada, öncelikle havacılık standartlarına uygun bir yükleme senaryosu altında geleneksel braket tasarımı analiz edilmiş, ardından topoloji optimizasyonu uygulanarak kütle azaltımı hedeflenmiştir. Optimizasyon sonucunda, yapının ağırlığında yaklaşık %35 oranında bir azalma sağlanmış, buna karşın maksimum gerilme değerlerinde sınırlı bir artış gözlemlenmiştir. Optimize edilen geometri, seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak Ti6Al4V alaşımı ile üretilmiştir. Üretim sonrası yapılan testlerde, optimize edilmiş tasarımın geleneksel tasarıma kıyasla benzer yükler altında deformasyonu %22 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, destek yapı ihtiyacını minimize etmek için yapılan geometri iyileştirmeleri sayesinde, üretim sonrası destek yapıların temizlenme süresinde yaklaşık %18 tasarruf sağlandığı da raporlanmıştır. Sonuç olarak, topoloji optimizasyonu ve üretim simülasyonlarının entegrasyonu ile, hem hafif hem de mukavemetli havacılık yapılarının, minimum üretim hatası ile üretilebileceği gösterilmiştir.

Akilan ve Reddy tarafından gerçekleştirilen çalışmada [16], bir direksiyon mafsalı parçasının tasarımı, topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılarak iyileştirilmiş ve bu yeni tasarımın eklemeli imalat süreçlerine uyumlu hale getirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında döküm yöntemiyle üretilen orijinal direksiyon mafsalının geometrik ve mekanik performansı detaylı şekilde analiz

edilmiştir. Ardından, belirlenen yükleme ve sınır koşulları altında topoloji optimizasyonu uygulanarak malzeme dağılımı yeniden yapılandırılmış ve yapısal ağırlıkta %30'un üzerinde bir azalma sağlanmıştır. Yeni tasarımda, gerilme değerleri özellikle bağlantı noktalarında azaltılmış ve rijitlik korunarak performans iyileştirilmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçları, eklemeli imalat için yeniden modellenmiş ve minimum destek yapısıyla üretilebilirliği artıracak biçimde düzenlenmiştir. Analiz sonuçlarında, yeniden tasarlanan direksiyon mafsalının maksimum gerilme değerlerinde %25'e varan azalma, toplam deformasyon miktarında ise yaklaşık %20'lik bir iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir. Bu çalışma, hafiflik, mekanik dayanım ve üretilebilirlik açısından eklemeli imalat destekli tasarım süreçlerinin geleneksel imalat yöntemlere göre önemli üstünlükler sunduğunu ortaya koymaktadır.

Şaşmaz tarafından gerçekleştirilen çalışmada [17], çelik otomobil jantlarında yer alan havalandırma deliklerinin geometrisinin, hem yapısal dayanım hem de üretim verimliliği kriterlerini optimize edecek şekilde yeniden tasarlanması amaçlanmıştır. Çalışmada çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı benimsenmiş ve hem kütle azaltımı hem de dayanımın korunması hedeflenmiştir. Optimizasyon süreci boyunca farklı delik şekilleri ve yerleşimleri oluşturulmuş, ardından her bir modelin mekanik performansı sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmiştir. Yükleme senaryoları olarak özellikle radyal ve yan kuvvetlere maruz kalma durumları simüle edilmiş, maksimum gerilme, toplam yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, geleneksel dairesel delik tasarımlarına kıyasla daha kompleks geometrilere sahip delik yapılarının, yapısal dayanımı artırırken kütleyi %3–5 arasında azaltabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, optimize edilen delik tasarımlarının jantın dinamik performansında da iyileşmelere yol açtığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, havalandırma deliklerinin şekil ve konumlarının çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle iyileştirilmesi, hem hafiflik hem de güvenlik parametrelerini dengeli şekilde karşılayarak çelik jant tasarımında önemli avantajlar sağladığı ortaya koyulmuştur.

Tong ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [18], fonksiyonel yapıların üretiminde kullanılmak üzere, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıpların topoloji optimizasyonu ile destek gereksinimi ve içi kapalı boşluk oluşumu

olmaksızın üretilebilirliği ele alınmıştır. Çalışmada, yoğunluk tabanlı optimizasyona ek olarak, baskı yönü ve çıkıntı açısı gibi üretim kısıtlarını içeren yeni bir optimizasyon çerçevesi önerilmiş; kalıp ve döküm yapısı eşzamanlı optimize edilmiştir. Sayısal analizlerde, önerilen yöntem sayesinde yapılar içi tam dolu kalıplarla kıyaslandığında %38'e varan oranlarda daha hafif tasarlanabilmiş, aynı zamanda kalıplar tamamen destek kullanılmadan üretilebilir hale gelmiştir. Ek olarak, optimize edilen yapılar döküm sırasında kapalı boşluk içermemiş ve bu da üretim sonrası hataları minimize etmiştir. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde, dayanımda %5-8 arasında sınırlı bir azalma gözlenmiş olsa da üretim sürecinde sağlanan malzeme tasarrufu ve işlem kolaylığı dikkate alındığında bu kayıp kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Bu çalışma, kalıp ve döküm entegrasyonu açısından topoloji optimizasyonunun üretim odaklı kullanılmasına önemli bir katkı sunmaktadır.

Shin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [19], çok eksenli eklemeli imalat süreçlerinde karşılaşılan üretim zorluklarının üstesinden gelmek amacıyla yenilikçi bir uzay zaman tabanlı topoloji optimizasyonu yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem, klasik topoloji optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, üretim sırasını ve parçanın geometrisini eş zamanlı olarak optimize etmeye olanak tanımaktadır. Özellikle aşırı çıkıntılar ve malzeme anizotropisi gibi, çok eksenli üretim yöntemlerinde sıkça karşılaşılan problemler tasarım sürecine doğrudan entegre edilmiştir. Böylece, optimize edilen yapılar hem mekanik açıdan daha dayanıklı hem de üretilebilirlik açısından sınır koşullarını sağlayacak şekilde ortaya çıkmaktadır. Sayısal uygulamaların sonucu, geliştirilen yöntemin mekanik performansı %10 ile %12 oranında iyileştirdiğini ve üretim kısıtlarına tam uyum sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bu yenilikçi optimizasyon yaklaşımı, çok eksenli eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu üretim esnekliğini maksimize ederek, geleneksel tek eksenli yöntemlere kıyasla daha karmaşık ve fonksiyonel tasarımların oluşturulmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak yapılan bu çalışma, eklemeli imalat alanında hem tasarım hem de üretim aşamalarında karşılaşılan temel sorunlara yenilikçi çözümler sunmaktadır.

## 1.2 Tezin Amacı

Eklemeli imalat teknolojileri, geleneksel imalat yöntemlerine göre daha karmaşık ve hafif yapılar oluşturabilmesi ile dikkat çekmekte ve tasarım esnekliği sağlamaktadır. Ayrıca, hızlı prototipleme, malzeme verimliliği ve üretim sürecinde kalıp, takım, fikstür gibi özel gereksinimlere ihtiyaç duyulmaması gibi avantajları sayesinde endüstrinin farklı sektörlerinde giderek daha yaygın hale gelmektedir.

Bu çalışmada, halihazırda plastik enjeksiyon yöntemiyle polipropilen (PP) hammaddesinden üretilen endüstriyel pnömatik tekerlek jantının, eklemeli imalata uygun şekilde ve topoloji optimizasyonu kullanılarak yeniden tasarlanması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, plastik jant üzerine etki eden yükler hesaplanmış, yük dağılımları belirlenmiş, tasarım sürecinde jantın geometrisi iyileştirilmiş, topoloji optimizasyonu uygulanmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yeni model, eklemeli imalatta poliamid 12 (PA12) hammadde kullanılarak üretilmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Çalışmanın diğer amaçları arasında; eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu entegrasyonunun geleneksel tasarım anlayışına kıyasla mühendislik tasarımındaki potansiyelini vurgulamak ve eklemeli imalatın avantajlarını, performans artırıcı yönlerini ortaya koymak yer almaktadır. Ayrıca, bu üretim yönteminin sağladığı tasarım serbestliği sayesinde istenilen bölgelerde daha az hammadde kullanılarak daha mukavemetli endüstriyel ürünler üretilebileceğine dikkat çekilmektedir. Son olarak, bu yöntemle üretilen parçaların tasarım süreçlerine dair yeni bir anlayış geliştirilmesi ve eklemeli imalat teknolojilerinin daha geniş bir üretim yelpazesinde kullanılmasına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

## 1.3 Eklemeli İmalat

Üç boyutlu baskı, eklemeli imalat olarak da bilinen; genellikle hızlı prototipleme veya geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi zor geometrilerin imalatı için tercih edilen, kalıp, takım ve fikstür gibi ek maliyetler gerektirmeyen, tasarım serbestliği sunan yenilikçi bir üretim metodudur. Geleneksel olarak, talaş kaldırılarak yapılan frezeleme veya tornalama gibi işlemlerin aksine, bu yöntemde parçalar, 3 boyutlu modelin verilerine dayanarak katman katman malzeme eklenerek imalat

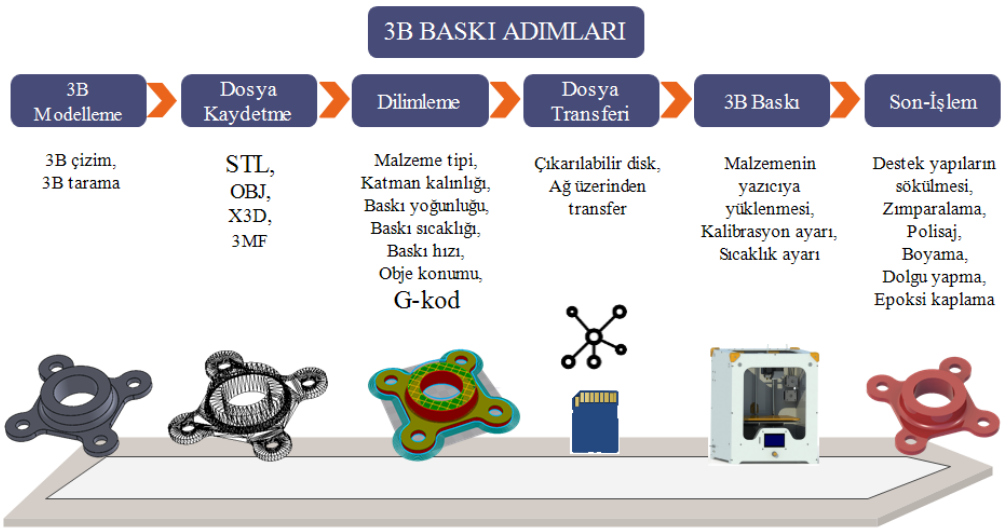
gerçekleştirilir. Eklemeli imalat son zamanlarda metal tozlarıyla yapılan üretim süreçleri sayesinde hızla büyüyen bir sektör halini almıştır. Günümüzde eklemeli imalat, uzay ve havacılık, otomotiv, enerji, tıp, endüstriyel ürünler gibi çeşitli sektörlerde hem tasarım anlayışında hem de üretim süreçlerinde önemli bir ölçüde değişim ve dönüşüm sağlamaktadır.

Çeşitli teknolojileri bünyesinde barındıran 3B baskı, dijital ortamda tasarlanmış olan modellerin fiziksel nesnelere hızla dönüştürülmesini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Talaşlı imalatta, malzeme bir bloktan belirli bölümler çıkarılarak şekil verilirken, eklemeli imalatta model, üst üste eklenen katmanlar aracılığıyla oluşturulur. Bu yöntem sayesinde, üretim sürecinde daha az malzeme tüketilirken, kalıp, fikstür ve imalat için gerek duyulan işlemlere olan ihtiyaç da ortadan kalkar. Bu da, özellikle hızlı ve nispeten düşük maliyetli üretim yapılmasına olanak sağlar. Eklemeli imalatın avantajlarından biri de, masaüstü 3B yazıcıların geliştirilmesiyle birlikte, yüksek hassasiyet ve çözünürlükte üretimin yaygınlaşmasıdır. Serbest formlu tasarımlara sahip objelerin üretilmesine olanak sağlayan bu teknoloji, aynı zamanda bulut tabanlı üretimi destekleyerek üretim süreçlerini daha esnek hale getirmektedir. Gelen siparişler doğrudan yazıcıya iletilerek, herhangi bir kalıp ya da üretim hattına gerek kalmadan nesneler hızla imal edilebilmektedir.

Bu imalat yönteminin avantajları olduğu kadar dezavantajları ve geliştirilmesi gereken yönleri de vardır. Özellikle seri üretim süreçlerinde bir kısım geleneksel imalat yöntemlerine göre ekonomik olmaması, üretim hızının nispeten düşük kalması ve yazıcı boyutlarının üretilebilecek parçalar için bir kısıtlama oluşturması, bu teknolojinin günümüzdeki eksikliklerinden bazılarıdır. Ayrıca, kullanılan malzeme çeşitliliği de halen belirli sınırlar içerisindedir. Ancak günümüzde, plastik, metal, kompozit ve organik malzemelerin üç boyutlu baskı süreçlerine entegrasyonunu mümkün kılan yeni teknolojiler geliştirilmekte ve bu alan giderek daha da genişlemektedir.

### 1.3.1 Eklemeli İmalat Proses Adımları

Doğrudan tasarımdan üretime geçişi mümkün kılan 3B baskı prosesi genel olarak altı temel adımdan oluşur (Şekil 1.1).




**Şekil 1. 1** Eklemeli imalat işlem adımları [20]

Öncelikle, üretilecek objenin üç boyutlu modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması gerekir. Ardından, bu model dilimleme yazılımı tarafından işlenebilecek uygun bir formata dönüştürülür. Daha sonra, dilimleme yazılımına aktarılan model, katmanlara ayrıştırılarak veriler elde edilir. Elde edilen veriler, 3B yazıcıya aktarılır ve baskı sürecine geçilmeden önce yazıcının gerekli ayarları yapılırak baskı işlemi başlatılır. Son proseste ise basılan parça, destek yapılarından temizlenir ve gerekli son işlem adımları uygulanarak parça beklenilen haline getirilir.

3 boyutlu baskı sürecinin ilk aşaması, üretilecek parçanın dijital ortamda üç boyutlu modelinin oluşturulmasıdır. Bu model, farklı bilgisayar destekli tasarım yazılımları kullanılarak hazırlanabileceği gibi, lazer, optik 3 boyutlu tarama sistemleri ile de elde edilebilir. Modelleme aşamasında, kullanılacak yazıcının teknik özellikleri, baskı yöntemi ve hassasiyet seviyeleri dikkate alınarak tasarım yapılması, daha kaliteli ve verimli neticeler elde edilmesini sağlar.

Bazı baskı teknolojileri, destek yapıları gerektirebilir. Tasarım sürecinde 45°C kuralı önemli bir nokta olarak kabul edilmektedir. Bu kurala göre, 45°C altındaki açılı yüzeyler destek yapısına ihtiyaç duyulmadan üretilebilirken, bu açının üzerindeki kısımlar içinse destek yapıları gerekmektedir. Bu prensibe uygun modelleme yapılması hem malzeme israfını önlemekte hem de üretim süresinde avantaj sağlamaktadır. Ayrıca tek seferde üretilmesi planlanan montaj

bileşenlerinde, hareketli bileşenler arasındaki toleransların, yazıcının teknik özellikleri doğrultusunda belirlenmesi büyük önem oluşturur. Eğer parça, bir tarama sistemi kullanılarak oluşturulmuşsa, baskı alınmadan önce detaylı bir gözden geçirme yapılmalı, yüzey hataları tespit edilerek gerekli görülen yerler düzeltilmeli ve boyut kontrolleri yapılmalıdır [20].

Model oluşturma prosesi sonrasında parçanın baskıya uygun hale getirilebilmesi için, modelin dilimleme yazılımı ile uygun hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu imalat yönteminde yaygın olarak kullanılan dosya formatı STL olup, bunun dışında farklı formatlar da birçok dilimleme yazılımı tarafından desteklenmektedir. Modelin dosya formatı dönüştürüldükten sonra, doğrudan düzenleme yapılamaz; ancak ölçeklendirme ve yönlendirme gibi işlemler uygulanabilir.

Baskı süreci öncesinde, belirli formatlarda kaydedilen katı modeller dilimleme yazılımına aktarılmalıdır. Bu yazılımın temel amacı modeli, belirlenen katman kalınlığına göre ayırarak, yazıcının parçayı katman katman oluşturmasını sağlayan dataları üretmesidir.

Dilimleme yazılımları, baskı prosesinde parçanın tabla üzerindeki konumunu ve yönünü, katman kalınlığını, malzemesini, sıcaklık ayarlarını, baskının yoğunluğunu ve baskı hızını düzenleyerek prosesin daha verimli hale gelmesini sağlar. Modelin tabla üzerindeki yerleşimi hem üretim süresi hem de malzeme kullanımı açısından kritik bir faktördür.

Parçanın konumlandırılması işlemi, gereksiz destek yapılarına olan ihtiyacı azaltarak malzemenin verimli kullanılmasını sağlayabilir. Ayrıca, baskı sonrası parçanın destek yapılarından temizlenmesi gerekli olan işçilik, modelin nasıl yerleştirildiğine bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, dilimleme prosesinde yapılan, planlamalar baskı sürecinin genel verimliliğini önemli ölçüde değiştirebilmektedir.

Dilimleme yazılımları tarafından oluşturulan datalar, yazıcıya çeşitli yöntemlerle aktarılabilir. Dosya transferi, usb bellekler, kablolu veya kablosuz ağ üzerinden gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, bir yazıcının verimli olarak kullanılabilmesi için data transfer yöntemleri göz önünde bulundurularak seçim yapılmalıdır.

Baskıya başlamadan önce, yazıcının ve yazdırma tablasının stabil ve doğru şekilde yerleştirildiğinden emin olunmalıdır. Sonrasında kalibrasyon ayarları yapılarak

baskı malzemesi yüklenmelidir. Dosya transferi tamamlandıktan sonra, verileri okuyabilen yazıcı, baskı için belirlenen sıcaklık seviyesine ulaştığında baskı sürecini başlatır. Sıcaklık ayarları, menü üzerinden manuel olarak düzenlenebilir. Baskı süreci, yazıcının teknolojisine göre farklılık gösterebilir. Baskının süresi, seçilen modelin geometrik yapısına, modelin boyutlarına, baskı hızına, malzemenin yoğunluğuna, destek malzemesinin gereksinimlerine ve hedeflenen yüzey kalitesine göre değişiklik gösterir.

Baskı tamamlandığında, üretilen parça yazıcının tablasından çıkarılır ve destek yapılarından arındırılır. Standart destek yapıları, el aletleri kullanılarak fiziksel olarak parçadan temizlenirken, çözülebilir destek yapıları suda veya özel çözücüler içinde bekletilerek temizlenir. Parçanın destek yapılarından temizlenmesinin ardından, parçanın yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla boyama işelemi, zımparalama, polisaj, dolgu uygulaması veya yüzey buharlaştırma gibi çeşitli son işlem teknikleri yapılabilir.

İkincil işlemler, üretilen parçaların uygulama gereksinimlerine uygun hale getirilmesi için yapılan işlemleri ifade eder. İkincil işlemler, yüzeyin pürüzsüzleştirilmesi için cilalama ve zımparalama gibi aşındırıcı tekniklerin yanı sıra çeşitli kaplama uygulamalarını da kapsayabilir. Uygulama türüne bağlı olarak, bazı parçalar basit düzeyde son işlem gerektirirken, bazıları yüksek hassasiyet ve kaliteli yüzey elde edebilmek için dikkatli bir şekilde uygulanmalıdır [20]. İkincil işlem uygulamalarının, metal eklemeli imalat parçalarında yüzey doku özellikleri üzerinde kritik bir etkisi vardır [21].

Yaygın olarak kullanılan ikincil işlemler arasında ultraviyole kürleme, kimyasal dağlama, talaşlı imalat, lazer yüzey işlemi, ısıl işlem, elektrokimyasal parlatma, iyon implantasyonu, kum püskürtme, ultrasonik kürleme ve termal püskürtme gibi teknikler bulunmaktadır. Bu işlemler, parçanın yüzey kalitesini iyileştirmek, mekanik dayanımını artırmak veya istenen fiziksel ve kimyasal özellikleri kazandırmak amacıyla uygulanmaktadır.

### 1.3.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat süreçleri, çok çeşitli teknikler ve malzeme seçenekleri ile geliştirilmiş olup, her biri farklı uygulama alanlarına yönelik avantajlar

sunmaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri malzeme ekstrüzyonu (FDM), fotopolimerizayon (SLA, DLP), malzeme püskürtme (PJ), sac laminasyon (LOM), toz yataklı eritme (SLS, DMLS, SLM, EBM), direk enerji depolama (LENS, EBAM), yapıştırıcı püskürtme (BJ) şeklinde kategorize edilebilir [22].

Günümüzde yaygın olarak tercih edilen katmanlı üretim yöntemlerinden biri olan eriyik yığma modelleme (FDM), hem üretim ekipmanlarının kolay erişilebilirliği hem de malzeme tedarikinin kolay olması nedeniyle öne çıkmaktadır [23]. Bu yöntemde, filament malzeme bir ısıtıcı elemana yönlendirilir. Burada belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak eriyik hale getirilen polimer, uygulanan itme kuvveti ile nozul çapına kadar düşürülerek üretim tablasına katmanlar halinde biriktirilir [24].

Yaygın olarak tercih edilen filament türleri arasında akrilonitril bütadien stiren (ABS) ile polilaktik asit (PLA) bulunmaktadır [25]. FDM yöntemi ile 0,05 mm ve 0,04 mm aralığında katman kalınlıklarına sahip parçalar üretilebilmekte olup, bu sayede yüzey pürüzlülüğü azaltılabilmektedir. Bununla birlikte, baskı işlemi sonrası gerçekleştirilen çeşitli işlemlerle yüzey kalitesini daha da iyileştirilebilmektedir [26].

Stereolitografi (SLA), eklemeli imalat teknolojileri arasında öne çıkan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, sıvı halde bulunan malzemenin, lazer ışığıyla taranarak kürleştirilmesine dayanır. Sertleşen sıvı malzeme ile yüksek boyutsal hassasiyete sahip üç boyutlu polimer yapılar oluşturulur. SLA yöntemi ile üretilen polimer yapılar, sunduğu avantajlara rağmen, mekanik özellikler açısından istenilen seviyeye ulaşamayabilir. Bu nedenle ek proses adımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Üretim sırasında gerçekleşen polimerizasyon süreci, parçanın yüzey kalitesinden mekanik dayanımına ve boyutsal doğruluğuna kadar etkili olmaktadır. SLA ile üretilen parçaların kürlenme seviyesi, termal işlem veya ultraviyole (UV) radyasyon gibi ek kürleme teknikleriyle değiştirilebilir [27]. Özellikle UV kürleme yöntemi, daha düşük deformasyon ve kabul edilebilir mekanik özellikler sağlaması nedeniyle daha fazla kullanılmaktadır [28].

SLA teknolojisi ile birçok benzer yönü bulunan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Aralarındaki en önemli fark, kullanılan ışığın kaynağıdır. Bu baskı teknolojisinde, UV lazer yerine reçine havuzunun alt kısmına yerleştirilmiş bir

projektör bulunur. SLA yönteminde proses lazer tarafından tek tek katmanları tarayacak şekilde ilerlerken, DLP teknolojisinde proses projektor tarafından tüm katman yüzeyine aynı anda etki eder. Böylece DLP yöntemi SLA yöntemine göre daha hızlı ilerler, baskı süresi kısalır. Ancak, yüksek çözünürlük gerektiren parçaların üretiminde SLA yöntemi daha avantajlıdır. Çünkü, DLP teknolojisinde katman kenarlarında küçük dörtgensel geometriler oluşur ve bu geometriler yüzey kalitesinin azalmasına neden olur [29].

Reçine malzemesi kullanılarak parça üretiminde başvurulan bir diğer eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem inkjet teknolojisi prensibiyle çalışır. Renkli parçaların üretimi amacıyla kullanılmasının yanısıra, aynı anda birden fazla malzemeyle üretim yapılmasına olanak sağlayan ve yüksek baskı hızına sahip gelişmiş bir tekniktir [30]. Bu yöntemde üretilen parçada belirli bölgelerin sert ya da yumuşak olması sağlanabilir, böylece farklı mekanik özellikler tek bir parça içerisinde sağlanabilir. Baskı sürecinde, fotopolimer reçine basım tablasına püskürtülürken UV ışığı ile kürleme işlemi gerçekleştirilir.

Temel olarak sistemin çalışması; platform, besleme mekanizması, basınç silindiri ve kesici lazer bileşenlerinden oluşmaktadır. Baskının süreci, polimer veya metal plakanın yayılması ve kesici mekanizmanın parça kesit geometrisine uygun şekilde şekillendirmesi ile ilerler. Ardından platform, katman kalınlığı kadar aşağı iner ve bu işlem her katman için tekrar edilerek üretim tamamlanır [30].

Eklemeli imalat tekniklerinden biri olan Seçici Lazer Sinterleme (SLS), toz halindeki malzemelerin hammadde olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Bu eklemeli imalat yönteminde, yatak üzerine belirli bir kalınlıkta toz tabakası yayılır ve malzeme ergime sıcaklığının altında olacak şekilde ısıtılır. Lazer tarayıcı, istenen geometriye göre tozun belirli bölgelerini tarayarak parçanın katmanlarını oluşturur. Üretim tamamlanana kadar lazer tarayıcı, katmanları bu şekilde oluşturur. Parça oluşturulduktan sonra, yüzey kalitesi ile ilgili ek işlemler yapılabilmektedir. Bu proseste sinterlenmeyen toz hammaddeler parça için destek görevini üstlenirler [31].

DMLS sürecinde, parça üretimi katmanların üst üste eklenmesiyle oluşur. Bu katmanlar, yan yana birleştirilen sinterlenmiş izlerden meydana gelir. Sinterlenmiş

izlerin sürekliliğin olmaması, katman içinde ve dolayısıyla parçanın genelinde istenen seviyede kaynaşma sağlayamaz. Bu durum, üretilen parçanın mekanik özellikleri başta olmak üzere performansını olumsuz yönde etkileyebilir. DMLS işleminde, tarama izinin sürekli olduğu bölgeler "kararlı bölgeler" olarak adlandırılırken, bunun dışında kalan alanlar "kararsız bölgeler" şeklinde tanımlanır. Bu teknoloji, mikro ölçekte kaynaştırma ve ince yapı üretimi konusunda oldukça başarılı sonuçlar vermektedir [32].

Seçici lazer ergitme (SLM) yönteminde mazleme sinterleme yerine tam bir ergitme sağlanarak parçaların üretimi yapılır. Bu yöntemde, modelin geometrisine göre bir lazer kaynağı aracılığıyla toz yatağına yayılan metal tozu belirlenen tarama yönünde eritilir ve yüksek yoğunluklu parçalar oluşturulur. SLM yönteminde, hızlı ergitme ve hızlı soğıma nedeniyle ince mikro yapıya sahip parçalar üretilir. Bu özellik sayesinde, SLM ile üretilen parçalar gelişmiş mikro yapılarıyla üstün mekanik performans sergilemektedir.

SLM ile metal parçaların istenilen kalitede üretilebilmesi için, toz yatağındaki metal tozunun ergitilip istenen şekilde katılaştırılmasını sağlayan üretim parametreleri büyük önem taşımaktadır. Bu parametreler arasında lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı, tarama deseni, inşa yönü ve toz karakteristiği gibi değişkenler yer alırken; çıkış parametreleri ise bağıl yoğunluk, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü, geometrik doğruluk ve metalürjik yapı olarak tanımlanmaktadır [33].

EBM sisteminin çalışma prensibi SLM sürecine benzerlik göstermektedir. Her iki yöntemde de enerji kaynağı, toz yatağını seçici olarak tarayarak ergime sağlamaktadır. Kullanılan enerji kaynağı elektron ışını olduğunda yöntem EBM, lazer ışını kullanıldığında ise SLM olarak tanımlanmaktadır. SLM makineleri, birden fazla lazer içerebilir ve üretim hızları, kullanılan lazerlerin sayısı ile gücüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. EBM teknolojisinde ise bir tane elektron tabancası bulunmasına rağmen, elektron demetinin sıçrayarak toz yatağında yönlendirilmesi sayesinde aynı anda birden fazla ergiyik havuzu oluşturulmaktadır. Öte yandan, SLM teknolojisinde lazerin yönlendirilmesi mekanik sistemlerle sağlandığından, sistemin tepki süresi belirli fiziksel kısıtlamalara tabidir. Buna karşılık, EBM yönteminde elektron demeti, elektron tabancasındaki lenslerin

manyetik alanının değiştirilmesiyle yönlendirildiğinden, sistemin tepki hızı çok daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Tüm katmanların birleşimiyle istenen geometri oluşturulur. EBM teknolojisinde proses vakum ortamında gerçekleştirilir. Vakum ortamı elektronların gaz molekülleriyle çarpışmasını engeller. Bu durum sürecin verimliliğini artırır. Yüksek mukavemet gerektiren parçalar için tercih edilen bir eklemeli imalat yöntemidir [34].

Bu yöntem, ince toz halindeki malzemenin belirli bir katman kalınlığında bir platform üzerine serilmesi ve ardından ink-jet yazıcı kafası aracılığıyla geometrinin gerektirdiği seçili bölgelere yapıştırıcı püskürtülerek tozların birbirine yapıştırılması prensibine dayanır. Geniş bir malzeme yelpazesiyle uyumlu olan bu teknik, metal parçaların üretilmesinde mekanik özellikler açısından toz yatak füzyonu yöntemine kıyasla daha sınırlıdır. Bununla birlikte, seramik parçaların üretimi açısından oldukça avantajlıdır. Ekonomik bir yöntem olarak öne çıkan bu eklemeli imalat yöntemi, büyük boyutlu üretim makinelerinin tasarımını kolaylaştırmaktadır. Üretilen parçaların kalitesi ise kullanılan toz malzemenin özellikleri ve boyutları, yapıştırıcının kalitesi ve baskı stratejisi gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir [35].

LENS yöntemi farklı geometrilere sahip son ürünlerin üretimini sağlayan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde, yüksek güçlü bir lazer ışını, biriktirme kafasından eş eksenli olarak beslenen metal tozunu eriterek katmanlar halinde malzeme biriktirir. Üretim sürecinde, nesnenin her bir katmanı oluşturulurken çalışma masası belirli bir desen doğrultusunda hareket eder. Her katman eklendikçe biriktirme kafası dikey olarak yukarı yönlü ilerler. Metal tozları, basınçlı taşıyıcı gaz veya yerçekimi etkisiyle kafanın etrafına dağıtılır. Bu yöntem, Seçici Lazer Sinterleme (SLS) tekniğiyle benzerlik gösterse de LENS'te metal tozu yalnızca o anda üretilmekte olan parçanın eritildiği alana uygulanır. Bu işlem, argon gazı ile doldurulmuş kapalı bir atmosfer ortamında gerçekleştirilir. Bu kontrollü ortam, işlem sırasında oksidasyonu önleyerek üretilen parçaların metalurjik kalitesini artırır. Bu yöntem diğer yöntemlerle yapılması zor ve yüksek maliyetli tamirlerde kullanılabilir [30].

EBAM yöntemi, hammadde olarak metal tozu veya metal kullanan bireklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem, vakum ortamında çalışarak ısı kaynağı olarak

elektron ışınını kullanırak metal parçalar üretmeyi amaçlar. EBAM teknolojisi, fonksiyonel parçaların, prototip bileşenlerin ve hasarlı parçaların onarımında yaygın olarak kullanılmaktadır [36].

## 1.4 Plastik Enjeksiyon

Plastik enjeksiyon, imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemi olup, sunduğu avantajlar sayesinde pek çok endüstride tercih edilmektedir. Bu yöntemin en önemli özellikleri arasında yüksek üretim hızlarına erişebilme, büyük hacimli parçaların kolay bir şekilde üretilebilmesi, üretim maliyetinin diğer üretim tekniklerine göre daha ekonomik olması ve otomasyon sistemleriyle entegre çalışarak seri üretime elverişli olması yer almaktadır. Ayrıca, plastik enjeksiyon yöntemi, yüksek yüzey kalitesi sunduğundan, ek bir işlem gerektirmeden nihai ürünün elde edilebilmesine olanak tanımaktadır. Üretim sürecinde geniş renk seçenekleri ile çalışılabilmektedir. Ayrıca mühendislik plastiklerinin geliştirilmesiyle beraber hedeflenen mekanik özellikler plastik enjeksiyon üretim yöntemiyle sağlanabilmektedir.

Plastik enjeksiyon yönteminin sektördeki üretim avantajlarının dışında kalıp üretim maliyetlerinin yüksek olması, parça revizyonlarınının işçilik ve süre olarak uzun olması, yöntemin gerektirdiği tasarım kısıtları, sektördeki yoğun rekabet nedeniyle düşük karlılık, enejeksiyon makinelerinin ve bunların yedek parçalarının pahalı olması, bu üretim yönteminin başlıca dezavantajlarıdır [37].

### 1.4.1 Plastik Hammaddeler

Plastik malzemeler genellikle sentetik yapıya sahiptir ve endüstride kullanılabilecek yapıya ulaşabilmesi için doğal petrol hammaddesinin kimyasal olarak dönüştürülmesi gerekmektedir. İşlenmiş petrol, önce monomerleri, ardından polimerleri oluşturur ve sonunda sentetik bağlarla plastik materyalleri meydana getirir. Monomerler, kimyasal moleküllerin zincir şeklinde kovalent bağlarla birleşmesi sonucu polimer yapıyı oluşturur [38].

Bağ yapıları nedeniyle plastikler; termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır [39].

Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayarak akışkan bir hale gelirler ve soğuduklarında sertleşerek katılaşırlar. Bu süreç, termoplastiklerin en önemli özelliklerinden biridir ve tekrar edilebilir. Şekillendirme sırasında, bu malzemeler herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Oda sıcaklığında katı haldedir ve geri gödönüşümlü olarak kullanılabilmeleri bu plastik grubunu avantajlı hale getirir [40].

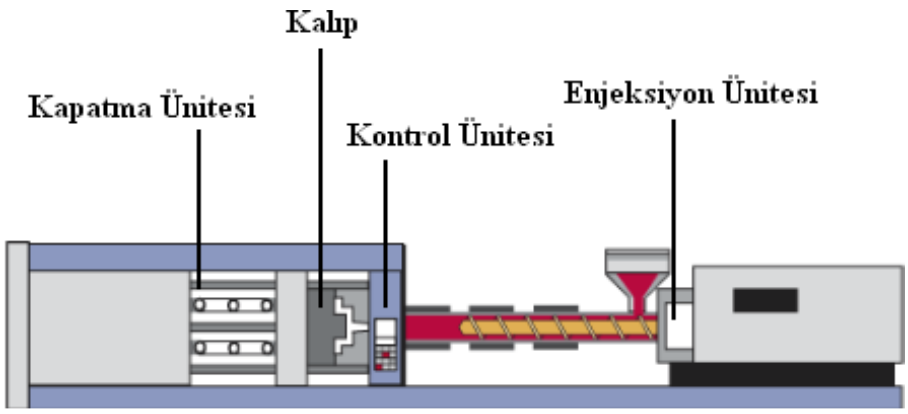
Sektörde yaygın olarak kullanılan termoplastikler başlıca ABS (Akrilonitril bütadien stiren), PC (Polikarbonat), PP (Polipropilen), PTFE (Politetrafloroetilen), PS (Polistiren), PE (Polietilen), PVC (Polivinil klorür), POM (Polioksimetilen) ve Poliamid (PA) gurubudur.

Termosetler, ısı ve basınç uygulandığında şekil alabilen malzemelerdir; ancak bu süreçte malzemenin yapısında değişiklikler meydana gelir. Isıtılarak şekil verilen bu malzeme, yeniden işlenemez veya yeniden şekillendirilemez. Termoplastiklere kıyasla daha dayanıklı, sert ve yüksek ısı direncine sahip özellikler sunmaktadır [41]. Termosetlere örnek olarak melamin formaldehit, fenol formaldehit, üre formaldehit ve poliüretanlar verilebilir.

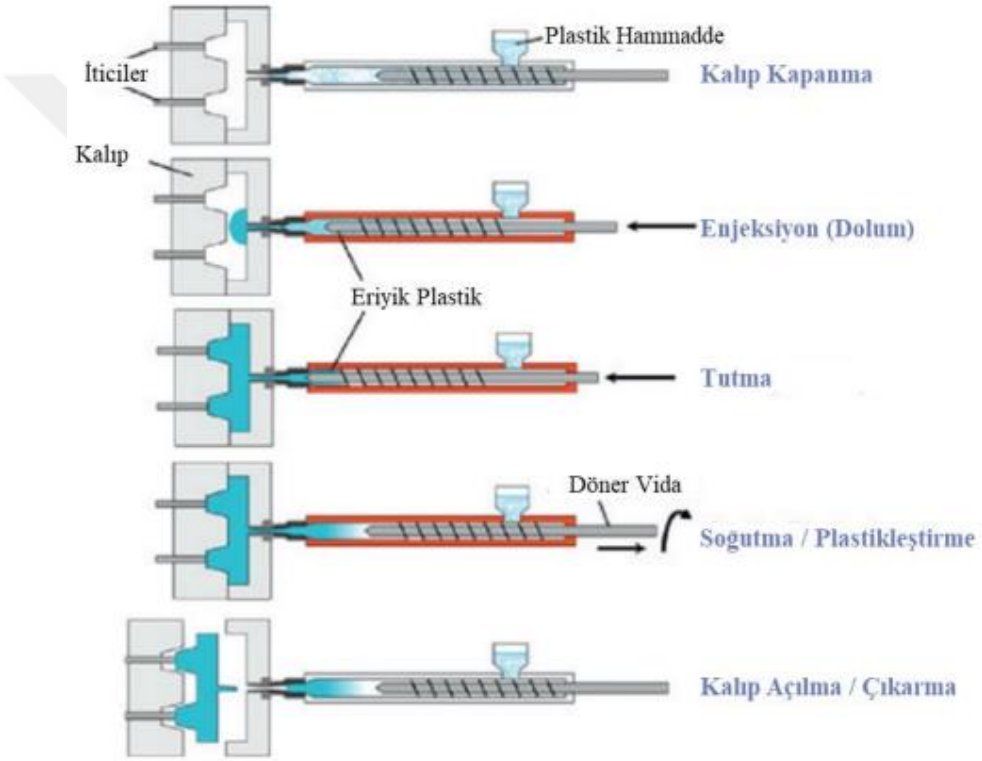
Elastomerler, oda sıcaklığında yük altında uzayabilen, esneyebilen ve bu uzama neden olan kuvvet ortadan kaldırıldığında büyük ölçüde başlangıç ölçülerine geri dönebilen plastik türleridir [42]. Genellikle kauçuk olarak adlandırılan bu esnek plastik türü kimyasal bir dönüşüm sonrasında bu kabiliyeti kazanır. Sızdırmazlık elamanları, contalar kullanım yeri olarak örnek verilebilir.

### 1.4.2 Plastik Enjeksiyon Prosesi

Plastik enjeksiyon prosesindeki çevrim, kalıptan çıkarılan iki parça arasındaki süreyi tanımlar [43]. Çevrim süresi, ürün maliyetini doğrudan etkiler ve istenen kalitedeki üretimin mümkün olan en kısa sürede gerçekleştirilmesi için önemlidir. Prosesin çevrim aşamaları; kalıbın kapanması, enjeksiyon, tutma ve ütüleme basıncının uygulanması, soğutma, kalıbın açılması ve ürünün kalıptan ayrılması olarak sıralanabilir (Şekil 1.3). Plastik enjeksiyon makinesi, dört ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; enjeksiyon ünitesi, kontrol ünitesi, makine gövdesi ve mengene ünitesidir (Şekil 1.2).




**Şekil 1. 2** Plastik enjeksiyon makinesi bölümleri [44]




**Şekil 1. 3** Plastik enjeksiyon çevrim aşamaları [45]

Mengene yani kapatma ünitesi, kalıbı kapatma prosesini yüksek basınç altında enjekte edilen plastiğin kalıp boşluğundan taşmaması amacıyla büyük kuvvetler uygulayarak gerçekleştirir. Kapama süreci, seri üretim için oldukça önemlidir. Kapama kuvveti yetersiz olursa veya mengeneler arasında paralellik sağlanamazsa, düzgün bir seri üretim süreci oluşmaz ve plastik ürünlerde çapaklar meydana gelir.

Hammaddenin eritilerek akışkan plastik haline gelmesi enjeksiyon makinesinin ocak kısmında gerçekleşir. Tanecik formdaki plastik granüller, enjeksiyon makinesine ait hammadde hunisine yerleştirilir. Helezonun dönmesiyle, ocağa alınan bu malzeme eritilerek itilir. Malzemenin itme işlemi helezonun doğrusal hareketi aracılığıyla gerçekleşirken, malzemenin erimesi de ocağın etrafındaki ısıtıcıların yardımıyla sağlanır. Helezon, enjeksiyon kısmına doğru akışkan haldeki malzemeyi doldurur. Enjeksiyon prosesinde eriyik plastik malzeme önce kalıbın yolluklarına daha sonra kalıbın gözlerine doldurulur. Enjeksiyon sıcaklığı, süresi, basıncı ve hızı bu proses için önemli parametrelerdir.

Kalıp içindeki hacmi eriyik malzeme ile basınç altında tam olarak doldurup katılaşana kadar uygulanan sürece tutma denir. Enjeksiyon aşamasında, malzemenin büyük bir kısmı kalıp içindeki hacmi doldurur. Enjeksiyon programı aracılığıyla önceden belirlenen bir miktar malzeme nihai parçanın tasarlanan geometri ile boyut ve şekil olarak aynı olabilmesi ve kalite problemlerinin minimize edilebilmesi için belirli bir süre boyunca ve basınç altında kalıp boşluğunu tamamen doldurur.

Plastik parçalar, kalıptan çıkarma sıcaklığına ulaşana kadar soğutma işlemine tabi tutulur. Eğer parçalar, bu sıcaklığa ulaşmadan kalıptan çıkarılırsa, çarpılma, çöküntü ve tolerans dışı ölçüler gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, bu aşama parça kalitesi ve parçanın ölçüleri için oldukça önemlidir. Soğutma süresinin uzatılması, parçanın kalitesini ve ölçülerindeki doğruluğu artırırken, enjeksiyon sürecinin de uzamasına neden olur; bu durum maliyetin artmasına yol açabilir [46].

Plastik parçanın kalıptan ayrılması, itici veya sıyırıcı adı verilen kalıp elemanları kullanılarak gerçekleştirilir. İticiler silindirik, dikdörtgen ya da özel tasarımlı olabilir ve plastik parçaların kalıptan çıkarılmasında etkili bir rol oynar. Ancak, iticiler doğrudan parçaya temas ettiklerinden dolayı parçanın üzerinde izler bırakırlar.

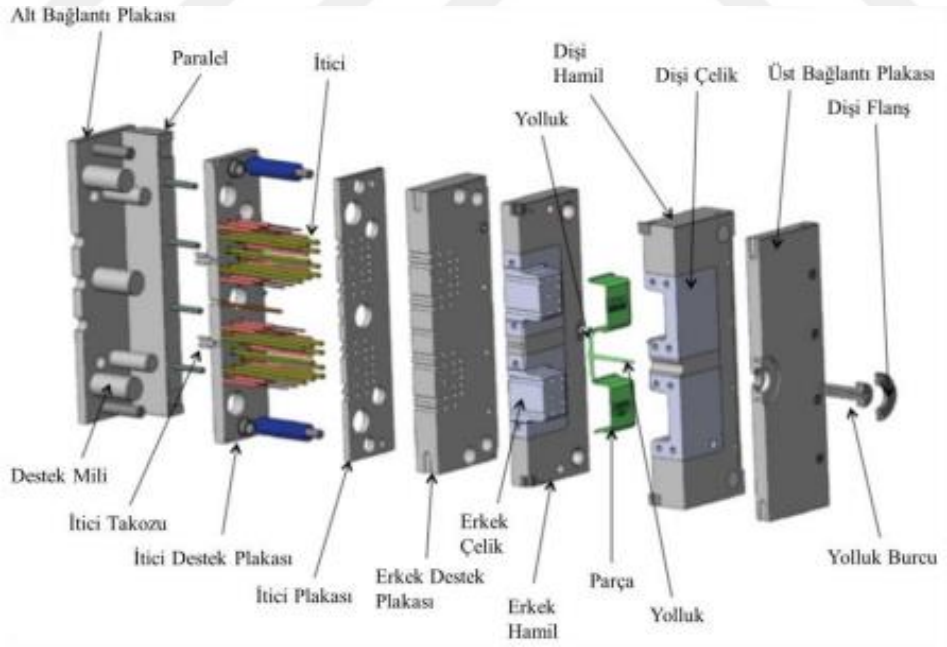
Alternatif bir yöntem olarak sıyırıcılar, parçayı kalıp yüzeyinden ayırarak çıkarma işlemini gerçekleştirir. Sıyırıcılar plastik parçanın çevresini saran bir yapıya sahiptir ve kalıptan sıyırma hareketiyle plastik parçayı serbest bırakır. Genellikle ince cidarlı ve yuvarlak formdaki ürünlerde tercih edilen bu yöntem, yüzeyde

deformasyon veya iz bırakmadan parçanın güvenli bir şekilde kalıptan alınmasını sağlar [46].

### 1.4.3 Plastik Enjeksiyon Kalıbı

Plastik enjeksiyon kalıpları, temel olarak erkek ve dişi olmak üzere bir kalıp setinden, burç ve kolon mekanizmasından, iticilerden, yolluk sistemlerinden ve gerekli ise maçalardan oluşur (Şekil 1.4). Enejeksiyon makinesine bağlanan bir plastik kalıbında sabit ve hareketli olmak üzere iki kısım vardır. Sabit kısım, enjeksiyon makinesinden gelen erimiş plastiği kalıp boşluğuna yönlendiren yolluk sistemini içerir. Hareketli kısımda mekanik bileşenleri barındırır. İtici sistemleri de bu hareketli kısımda bulunur.

Kalıpların verimli olarak çalışabilmesi için, plastik parçanın hızlı ve dengeli bir şekilde katılaşması gereklidir. Bundan dolayı plastik kalıplarda soğutma sistemi önemli bir yere sahiptir. Doğru bir ısı transferi sağlandığında ürünün kalite kusurları minimize edilmiş olur. Ayrıca plastik enjeksiyon kalıplarında çıkma açısının tersi yönünde geometriler oluşturmak için maça sistemleri kullanılır. Maça sistemleri plastik kalıbında hareketli kısımda bulunur.

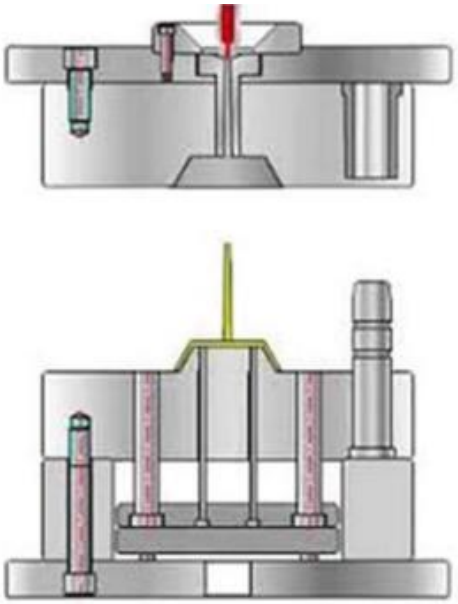



**Şekil 1. 4** Plastik enjeksiyon kalıbı parçaları [47]

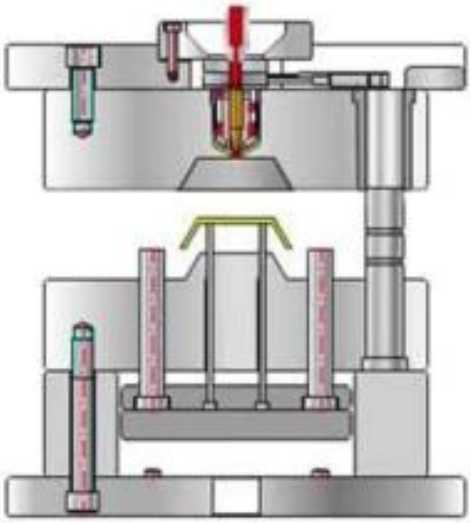
Erimiş olan plastik hammaddenin kalıp içindeki hacime dolmasında iki temel besleme yöntemi kullanılır. Bunlar, sıcak yolluk ve soğuk yolluk sistemleri olarak adlandırılır. Bu yöntemlerden hangisinin tercih edileceği, üretilmesi planlanan parçanın kalitesi, üretim miktarı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Soğuk yolluk sistemleri, genellikle küçük boyutlu plastik parçaların üretiminde kullanılır (Şekil 1.5). Bu sistemde erimiş plastik malzeme, kalıpla temas ettiği anda soğuma sürecine girer. Soğuk yolluk sistemlerinde plastik malzeme hızlı bir şekilde soğur. Ayrıca, plastiğin akış kanallarında sıcaklık kaybı ve basınç kaybı oluşur. Bu nedenle, büyük ve derin parçalarda soğuk yolluk kullanımı uygun değildir.

Sıcak yolluk sistemi kullanılan kalıplarda ise yolluklar, elektrikli ısıtıcılar kullanılarak belirli bir sıcaklıkta tutulur (Şekil 1.6). Sıcak yolluk kullanılan kalıpların tasarımı karmaşık olup bu sistemlerin kullanımı uzmanlık gerektirir. Sıcak yolluk sistemlerinin kullanımı çapak ve yolluk temizleme ihtiyacının azaltır ve üretim sürecini daha verimli hale getirir. Sıcak yolluk sistemleri ile dengeli malzeme akışı ve ısıl stabilizasyon sağlanarak yüksek kaliteli ürünler elde edilir. Sıcak yolluk sistemleri, kalıp gözlerinin aynı şartlar altında dolmasını sağlayarak oluşabilecek kalite farklarını en azaltır. Daha düşük basınçlarla çalışma imkanı tanıdığından plastik parçalarda oluşabilecek iç gerilmeleri azaltır.



**Şekil 1. 5** Soğuk yolluk sistemi [48]



**Şekil 1. 6** Sıcak yolluk sistemi [44]

Enjeksiyon kalıplarında, özellikle estetik beklentilerin yüksek olduğu sektörlerde, doğrudan giriş yerine farklı yolluk giriş tiplerinin kullanılması gerekebilir. Seçilen yolluk girişinin hem işlevsel hem de görsel gerekliliklere uygun olması önemlidir. Özellikle görselliğin kritik olduğu uygulamalarda, yolluk giriş tasarımı ürünün estetiği ve kalitesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Parçanın işlevi ve estetik gerekliliklerine göre sektörde yaygın olarak direkt yolluk, kenar yolluk, fan yolluk, tünel yolluk, muz yolluk, halka yolluk ve iticiden kırma yolluk olarak çeşitli yolluk tipleri kullanılmaktadır [49].

## 1.5 Yapısal Optimizasyon

Optimizasyon, mevcut kaynakların en verimli şekilde kullanılması anlamı taşımaktadır. Matematiksel olarak, bir sürecin belirli bir hedef doğrultusunda en düşük veya en yüksek seviyede değerlendirilmesi anlamına gelmektedir. Bir sistem içerisinde kullanılan kaynakların en etkin biçimde yönetilmesi, maliyetlerin azaltılması, karlılığı arttırılması, kapasite kullanımının iyileştirilmesi ve verimliliğin yükseltilmesi gibi hedeflere ulaşmayı sağlayan bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [50].

Gelişen teknolojiyle birlikte, yüksek performanslı ve düşük ağırlıklı ürünlere olan ilgi ve ihtiyaç artmıştır. Bu ilgi ve ihityaça karşılık olarak üretim süreçlerinde yapısal optimizasyon yöntemleri kullanılarak ürünlerin ideal yapıya ulaşması

hedeflenmektedir. Yapısal optimizasyon; boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olmak üzere üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Bu yöntemler arasında topoloji optimizasyonu, tasarımcılar için önceden belirlenmiş bir tasarıma ihtiyaç duymadan yeni tasarım alternatifleri sunması nedeniyle başvurulan optimizasyon yöntemlerinin başında gelir [51].

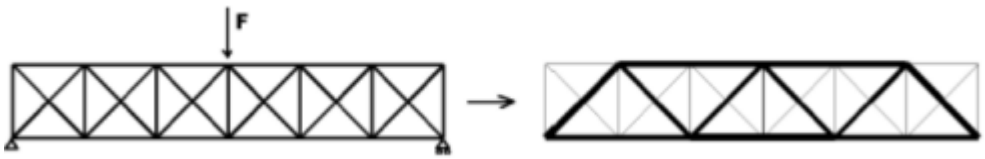
Boyut optimizasyonu, tasarlanan parça için en uygun kesit alanını belirleyerek boyutsal düzenlemeler yapmayı amaçlarken; şekil optimizasyonu, sistemin bağlantı noktalarına müdahale etmeden dış geometrisini iyileştirmeye odaklanmaktadır. Topoloji optimizasyonu ise bileşenlerin en uygun bağlantılarını nasıl oluşturabileceğini belirleyen bir süreçtir [52].

### 1.5.1 Boyut Optimizasyonu

Boyut optimizasyonu, bir yapının boyutsal bileşenlerinin belirli kriterler doğrultusunda ayarlanarak en verimli hale getirilmesi sürecidir. Bu optimizasyon türünün temel amacı, ilgili parçadaki gerilimi azaltarak mukavemeti artırmaktır. Örneğin, bir sac parçasının kalınlığının artırılması veya bir kirişin kesit alanının azaltılması boyut optimizasyonuna örnek olarak verilebilir [52].

Yapısal optimizasyon yöntemleri arasında en temel ve basit olan yaklaşımlardan biri boyut optimizasyonudur (Şekil 1.7). Bu yöntemde optimize edilen parametreler genellikle yükseklik, genişlik, kalınlık ve atalet momenti olabilir [53].

Boyut optimizasyonu yapılırken, yapının sınır ölçüleri ve delikler üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmaz. Ayrıca, yapının eleman sayısı ve koordinatları gibi değişkenler üzerinde herhangi bir düzenleme gerçekleştirilmez [54].




**Şekil 1. 7** Boyut optimizasyonu [55]

### 1.5.2 Şekil Optimizasyonu

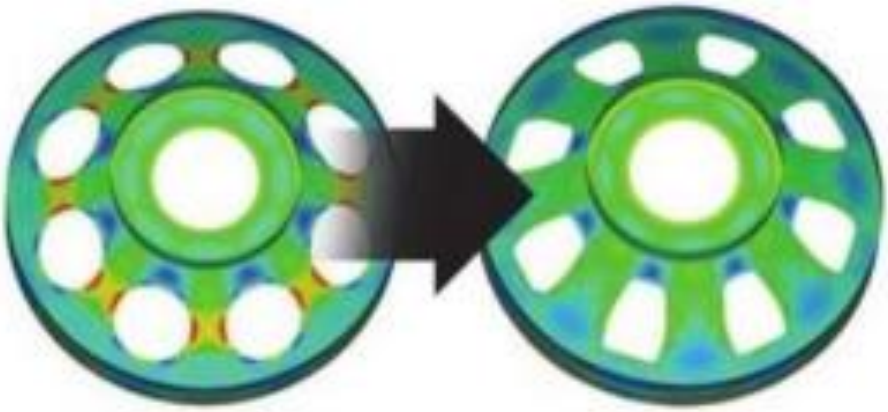
Şekil optimizasyonu, parçanın geometrik özelliklerinin belirli kriterler doğrultusunda ayarlanarak en uygun hale getirilmesini ifade eder (Şekil 1.8). Bu

süreçte, parçanın genel formunda değişiklikler yapılarak üzerindeki gerilmelerin minimum seviyeye indirilmesi amaçlanır. Şekil optimizasyonu yapılarak parçanın pah, delik çapı ve delik şekli gibi parametreler değiştirilebilir [55].

Şekil optimizasyonu yapılan parçada yeni geometriler oluşturulmaz, mevcut geometriler değiştirilir. Örneğin, bir yapı üzerindeki deliklerin çapının artırılması veya şeklinde değişiklik yapılması şekil optimizasyonuna örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, toplam delik sayısında herhangi bir değişiklik yapılmaz [56].

Yapılan birçok araştırma, şekil optimizasyonunun boyut optimizasyonuna kıyasla daha etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Örneğin, delik bölgelerinde gerilme yığılmalarının olduğu bir parçada, gerilme yığılmalarının azaltılması için yapılan geometri değişikliği, şekil optimizasyonu uygulamalarına örnek olarak verilebilir.

Boyut optimizasyonu kullanılarak, parçanın ilgili geometrisine yakın kesitlerin kalınlığı artırılabilir ve bu sayede bölgesel gerilim birikimi azaltılabilir. Ancak, şekil optimizasyonu sayesinde, ilgili geometrinin çevresindeki bölgenin formu iyileştirilerek daha ideal bir çözüm sağlanabilir. Bu iki optimizasyon yöntemi uygulanırken, geometrinin topolojisinde herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir [57].



**Şekil 1. 8** Şekil optimizasyonu [58]

### 1.5.3 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, belirli sınır koşulları ve yükler altında tasarım alanındaki malzeme dağılımını düzenleyerek, yapı içindeki elemanların birbirleriyle en

verimli şekilde nasıl bağlantı kuracağını optimize etmeyi amaçlar. Yer, yüzey ve uzay bağlamında ele alınan topoloji kavramı, matematiğin temel dallarından biridir. Bu kavram, cisimlerin şekil ve büyüklükten bağımsız olarak niteliksel özelliklerini ve bağıl konumlarını inceler. Topoloji optimizasyonu, uygulamalı matematik alanında geliştirilmiş olup, yapısal optimizasyon yöntemleri arasında görece yeni ve hızla gelişen bir araştırma alanıdır. Mühendislik disiplinlerinde, özellikle makine, otomotiv, inşaat ve havacılık sektörlerinde, bu yönteme dayalı çeşitli uygulama örnekleri bulunmaktadır [59].

Topoloji optimizasyonu, bir yapının belirlenen dış boyutlarını ve rijitliğini koruyarak, belirli alanlardan malzeme azaltılması yoluyla en verimli tasarımı elde etmeyi amaçlayan bir süreçtir. Bu yöntemde, yükleme koşullarına bağlı olarak malzemenin azaltılacağı bölgeler belirlenir ve yapının yeniden düzenlenmesi hedeflenir [60].

Tasarım sürecinde, belirlenen kısıtlamalar doğrultusunda en düşük kütle, hacim veya ağırlık gibi hedeflere ulaşmak için çok sayıda iterasyon gerçekleştirilerek amaçlanan tasarıma ulaşılır. Kullanılan optimizasyon yazılımları, belirlenen kriterler karşılanana kadar model üzerinde malzeme azaltma işlemlerini sürdürerek en verimli yapı formunu ortaya çıkarır [61].

Diğer optimizasyon tekniklerine kıyasla daha esnek ve avantajlı olan topoloji optimizasyonu, temel olarak iki aşamada ilerler. İlk olarak, tasarım alanı içinde malzemenin en uygun şekilde nasıl konumlandırılacağı analiz edilir, ardından yapının dayanıklılığını ve performansını doğrudan etkileyen malzeme dağılımı optimize edilir. Bununla birlikte, ortaya çıkan geometrik formlar, geleneksel üretim yöntemleriyle imalat açısından zorluklar yaratabilir. Ancak, son yıllarda gelişen eklemeli iamalat teknolojileri sayesinde, bu tür optimize edilmiş tasarımların uygulanabilirliği artmıştır [62].

Akademik çalışmaların yanı sıra endüstriyel uygulamalarda da giderek daha fazla benimsenen topoloji optimizasyonu, özellikle hesaplamalı mekanik alanında hızlı bir gelişim göstermektedir. Yapısal hafifletme ve verimli tasarım süreçlerinde önemli bir rol oynayan bu yöntem, mühendisler ve araştırmacılar için güçlü bir araç haline gelmiştir [63].

Topoloji optimizasyonu, hacim kısıtlamaları doğrultusunda bir amaç fonksiyonunun en iyi hale getirilmesini sağlayarak, malzeme dağılımını belirli bir tasarım uzayı içerisinde düzenler. Belirlenen sınır koşulları altında, önceden tanımlanmış yükler yapıya uygulanır ve yük taşıma kapasitesi analiz edilerek yapısal bütünlüğe en az katkı sağlayan bölgeler tespit edilir. Ağırlığın azaltılması hedefi doğrultusunda belirlenen bu bölgeler yapıdan çıkarılarak malzeme dağılımı optimize edilir. Bu yöntemle, yükleri etkin bir şekilde taşıyabilen, daha hafif ve verimli bir yapı elde edilir [64]. Topoloji optimizasyonuna ait örnekler Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'da gösterilmiştir.

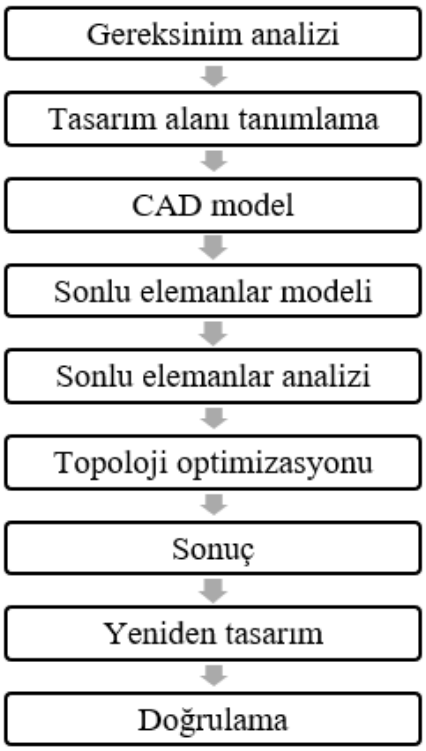


**Şekil 1. 9** Menteşe destek parçasının topoloji optimizasyonu [65]



**Şekil 1. 10** Bir yarış aracına ait parçanın topoloji optimizasyonu [66]

Topoloji optimizasyonu için önerilen yöntem adımları Şekil 1.11'de verilmiştir.




**Şekil 1. 11** Topoloji optimizasyonu için önerilen yöntem adımları [67]

# 2
# YÖNTEM VE METOT

Taşıma arabaları, özellikle depolama, lojistik, market ve ofis gibi alanlarda ağır yüklerin taşınmasını kolaylaştırmak amacıyla kullanılan fonksiyonel araçlardır. Farklı taşıma kapasitelerine uygun çeşitli boyut ve tekerlek seçenekleri vardır. Kullanım sırasında fiziksel zorlanmayı en aza indiren bu arabalar, iş süreçlerinde hem hız hem de güvenlik sağlar. Havalı tekerlekli versiyonlar engebeli zeminlerde rahat hareket edebilirken, dolgu tekerlekli olanlar delinmelere karşı daha dayanıklıdır. Ergonomik tutma yerleri ve dengeli taşıma yüzeyi sayesinde, tek bir kişi tarafından rahatlıkla kullanılabilir. Bu yönüyle taşıma arabaları, iş yükünü hafifletmenin yanı sıra, operasyonel verimliliği de önemli ölçüde artırır.

Endüstriyel taşıma ekipmanlarının performansını artırmak ve istikrarını sağlamak için özel olarak tasarlanmış pnömatik tekerlekler dayanıklılık ve çeşitli taşıma kapasiteleri sunar. Pnömatik tekerleklerin sağladığı avantajlar arasında iyi sürüş özellikleri, kuvvetli çekiş kabiliyeti ve zahmetsiz yol tutuşu bulunmaktadır. Pnömatik tekerlerde yük taşıma işlevi, lastik içerisindeki hava basıncıyla sağlanır. Esnek yapıları sayesinde ani darbe ve titreşimleri etkili şekilde sönümleyerek denge kurarlar; bu özellikleri sayesinde bozuk ve engebeli zeminlerde ideal bir tercih haline gelirler. Yumuşak taban yapısı ve darbe emici özellikleri, sürüş sırasında hem konforu artırır hem de daha sessiz bir kullanım sunar.

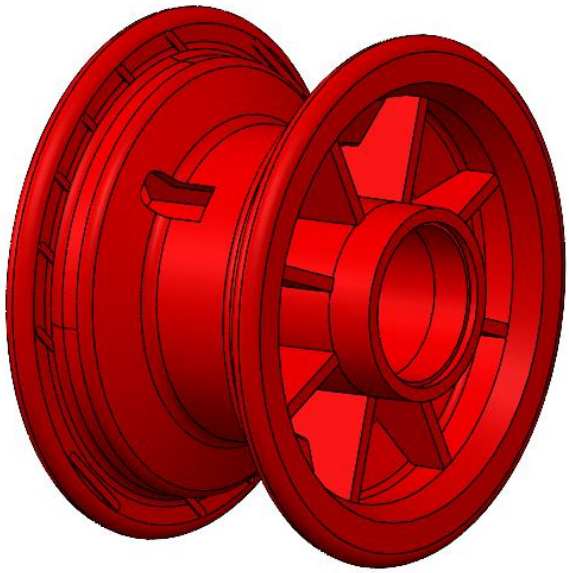
Yaklaşık 20 kg ağırlığındaki taşıma arabasının, 80 kg yük taşıma kapasitesiyle birlikte toplam ağırlığı 100 kg'dır. Taşıma arabalarında ikişer adet kullanılan endüstriyel pnömatik tekerlekler, her biri 75 kg yük taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.1). Bu tekerleklerin lastik taban genişliği ve yanak yüksekliği 76,0 mm, jant çapı ise 101,6 mm olup, her bir tekerlek 50 kg yük taşımaktadır. Plastik enjeksiyon yöntemiyle PP hammaddeden üretilen plastik tekerlek jantının ağırlığı 157,880 gramdır. Çalışmada; 3D bilgisayar destekli tasarım için Solidworks, sonlu elemanlar analizi için Ansys Workbench ve topoloji optimizasyonu için nTopology yazılımları kullanılmıştır.



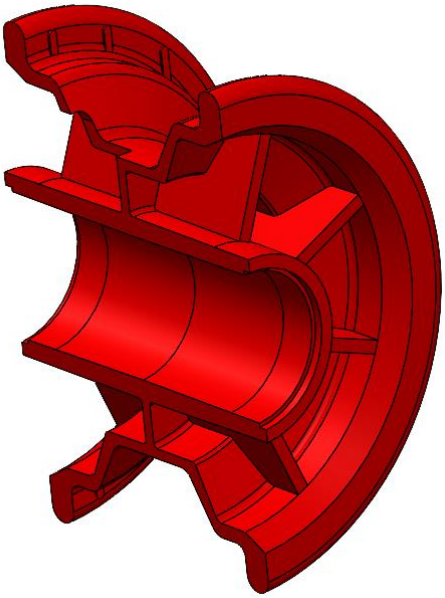

**Şekil 2. 1** Taşıma arabası ve endüstriyel pnömatik tekerlek

## 2.1 Plastik Jantın Modellenmesi ve Analizi

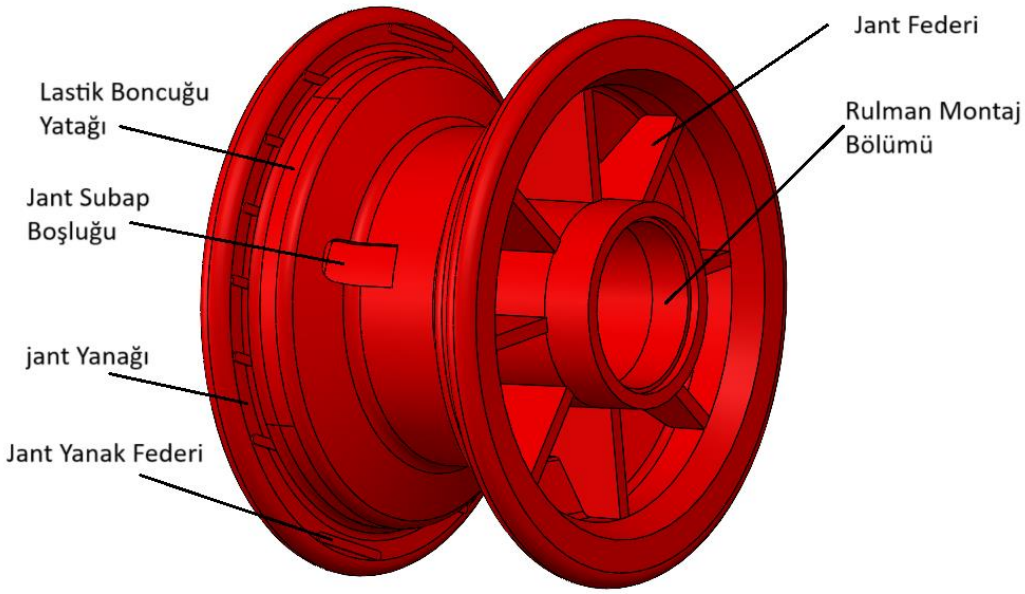
Pnömatik tekerlek jantı, plastik bir ürün olup, yaygın bir geleneksel imalat yöntemi olan plastik enjeksiyon yöntemiyle PP hammaddeden üretilmektedir. Ürün tasarımı, bilgisayar destekli tasarım yazılımı Solidworks kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2). Plastik jantın kesit görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.



**Şekil 2. 2** Plastik jantın modeli



**Şekil 2. 3** Plastik jantın izometrik kesit görünümü




**Şekil 2. 4** Plastik jantın bölümleri

Plastik jantın bölümleri Şekil 2.4'te verilmiştir. Jant federleri, jantın esneklik ve dayanıklılığını artıran önemli bileşenlerdir. Bu federler, jantın yapısal dayanımını güçlendirerek, oluşabilecek deformasyonları engellemeye yöneliktir. Jant üzerindeki rulman montaj bölümü, tekerleğin sabit bir mil üzerinde dönmesini sağlayan rulmanların montajlandığı kısımdır. Lastik boncuğu yatağı, kauçuk

lastiğinin janta temas ettiği yüzeyi ifade eder. Jant subap boşluğu, lastik subabının plastik janttan geçerek jant içerisinden erişilebilir olmasını sağlayan boşluktur. Jant yanağı, lastik içindeki hava basıncının oluşturduğu yanal kuvvetlere karşı koyan bölümdür. Son olarak, jant yanak federleri, lastiğin jant üzerinde kaymasını engelleyerek, güvenli bir montaj sağlar (Şekil2.5).




**Şekil 2. 5** Plastik Jant, rulman ve lastik montajı

## 2.2 Plastik Janta Etkiyen Yükler

Stearns ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, otomobil jantları üzerine etkiyen şişirme basıncı ve radyal yüklerin oluşturduğu gerilme ve yer değiştirme dağılımları ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Araştırmada, jantların güvenli tasarımı açısından özellikle lastik boncuk yatağının en yüksek gerilmelere maruz kalan kritik bölge olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, şişirme basıncının ve radyal yüklerin jant üzerindeki gerilme durumunu doğrudan etkilediği tespit edilmiştir [68]. Bu bulgular, plastik jantlarda da yük taşıma performansının değerlendirilmesinde benzer bir analitik yaklaşımın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

### 2.2.1 Radyal Yük

Radyal yük, taşınan ağırlıktan kaynaklanan ve tekerlek ile yol yüzeyi arasındaki temas noktasından dikey yönde janta aktarılan kuvvettir. Radyal yük, (2.1) eşitliği

yardımıyla hesaplanır. Bu yük, tekerleğin dönerken yapısal olarak maruz kaldığı en önemli kuvvetlerden biridir [69].

$$F_r = F_v \cdot k \tag{2.1}$$

$F_r$ : Radyal yük

$k$: Test faktörü, emniyet katsayısı

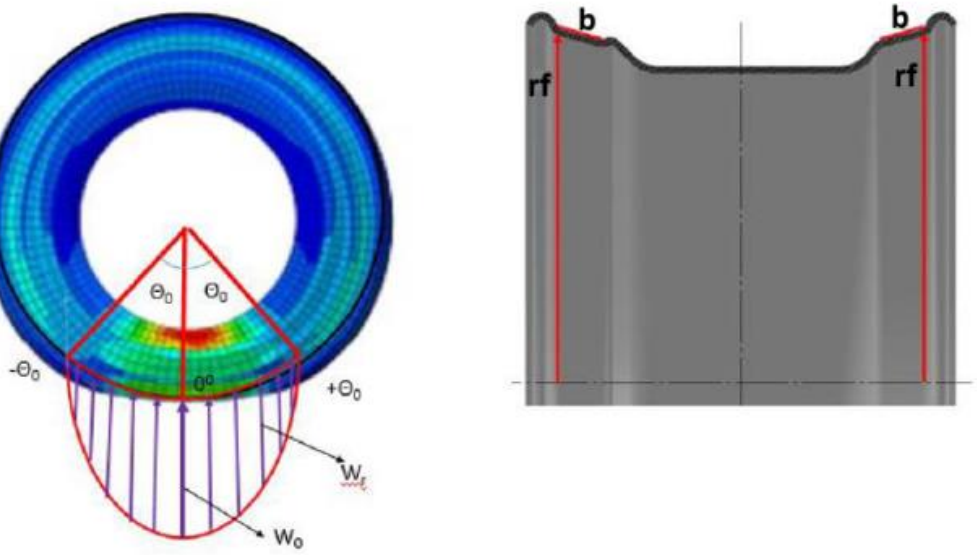
$F_v$ : Lastik üzerindeki maksimum yük

$$F_v = 50\ kg \cdot 9{,}81\ \frac{m}{s^2} = 490{,}5\ N \tag{2.2}$$

$$k = \frac{75kg}{50kg} = 1{,}5 \tag{2.3}$$

$$F_r = 490{,}5 \cdot 1{,}5 = 735{,}75\ N \tag{2.4}$$

Radyal yükte, janta iletilen kuvvet lastik aracılığıyla aktarılmaktadır. Yapılan çalışmalar, bu kuvvetin jant yüzeyine yaklaşık 80° ila 90°'lik bir açı aralığında yayılan parabolik bir dağılım şeklinde uygulandığını göstermektedir [58] [66].




**Şekil 2. 6** Lastiğe etkiyen düşey kuvvetin gösterimi [69]

Uygulamada, radyal yük lastikle birlikte doğrudan jantın lastik boncuk oturma bölgelerine etki eder. Bu nedenle, yapılan analizde kullanılan modelde söz konusu basınç, doğrudan boncuk yatağına dağıtılmış şekilde uygulanmıştır (Şekil 2.6).

Çevresel yönde, basıncın bir kosinüs fonksiyonu dağılımı izlediği varsayılmıştır. Bu doğrultuda, dağıtılmış basınç Wr, (2.5) eşitliği şeklinde tanımlanır.

b: Lastik boncuk yatağının genişliği (6,20 mm)

rf: Jant flanşı yükleme noktası yarıçapı (48,90 mm)

$\Theta_0$: Yükleme açısı (45° olarak alındı)

$W_0$: Yükleme açısında lastiğe etkiyen basınç

$$W_r = W_0 . cos\left(\frac{\pi}{2} . \frac{\Theta}{\Theta_0}\right) \tag{2.5}$$

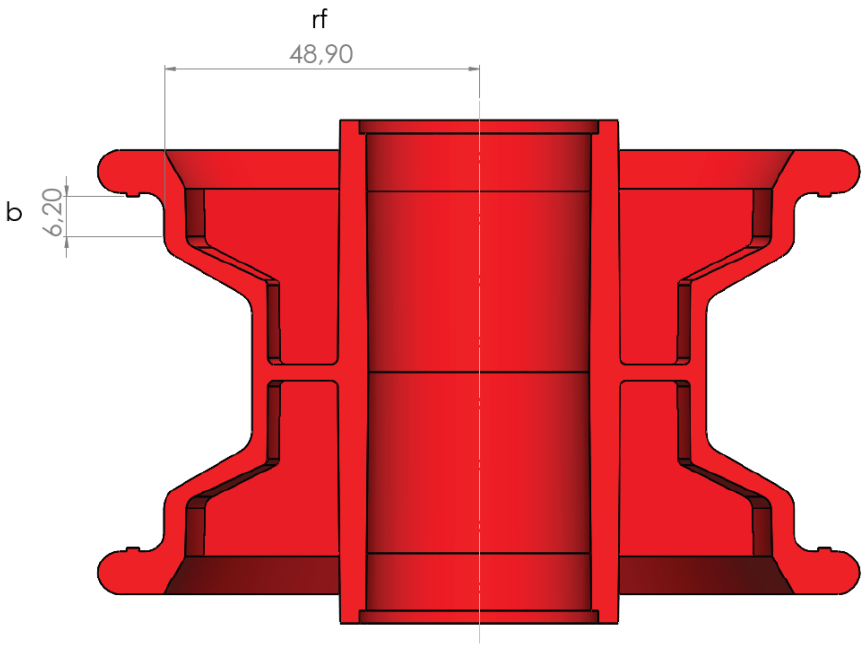
$$F_r = 2b \int_{-\Theta_0}^{\Theta_0} W_r . r_f . d\Theta \tag{2.6}$$

$$F_r = 8 . b . r_f . \Theta_0 . \frac{W_0}{\pi} \tag{2.7}$$

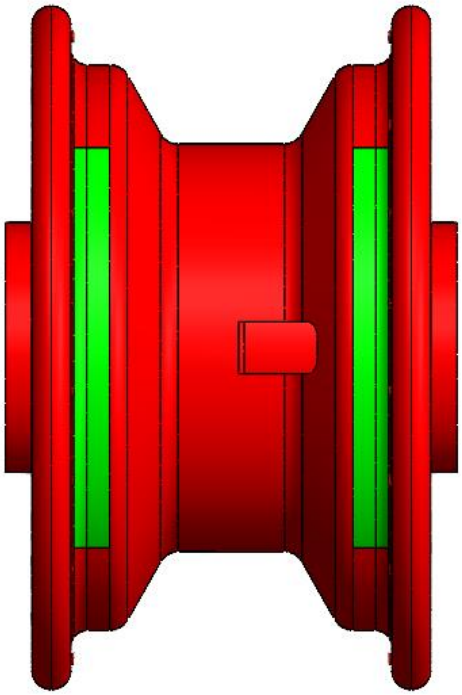
$$W_0 = \frac{F_r . \pi}{8 . b . r_f . \Theta_0} \tag{2.8}$$

$$W_0 = \frac{735{,}75 \, . \, \pi}{8 \, . 6{,}20 \, . 48{,}90 \, . \frac{\pi}{4}} \tag{2.9}$$

$W_0$, (2.8) eşitliği yardımıyla hesaplandığında 90°'lik bir alan için 1,21 MPa değeri elde edilir. Radyal yükün jant üzerine etki ettiği alan Şekil 2.8'de gösterilmiştir.




**Şekil 2. 7** Radyal yük hesabı için b ve rf ölçüleri

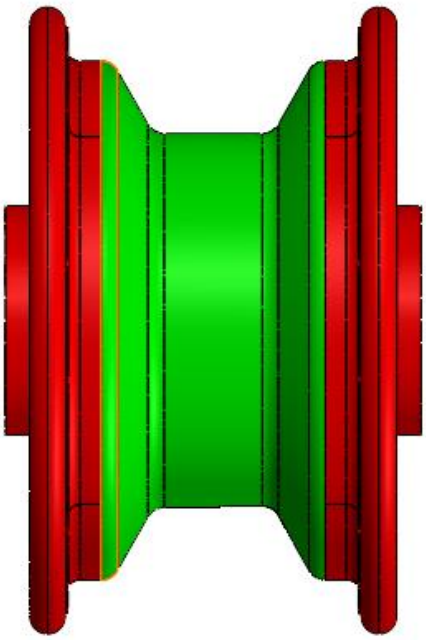


**Şekil 2. 8** Radyal yükün jant üzerinde etkilediği alan

### 2.2.2 Lastik İç Hava Basıncının Oluşturduğu Yük

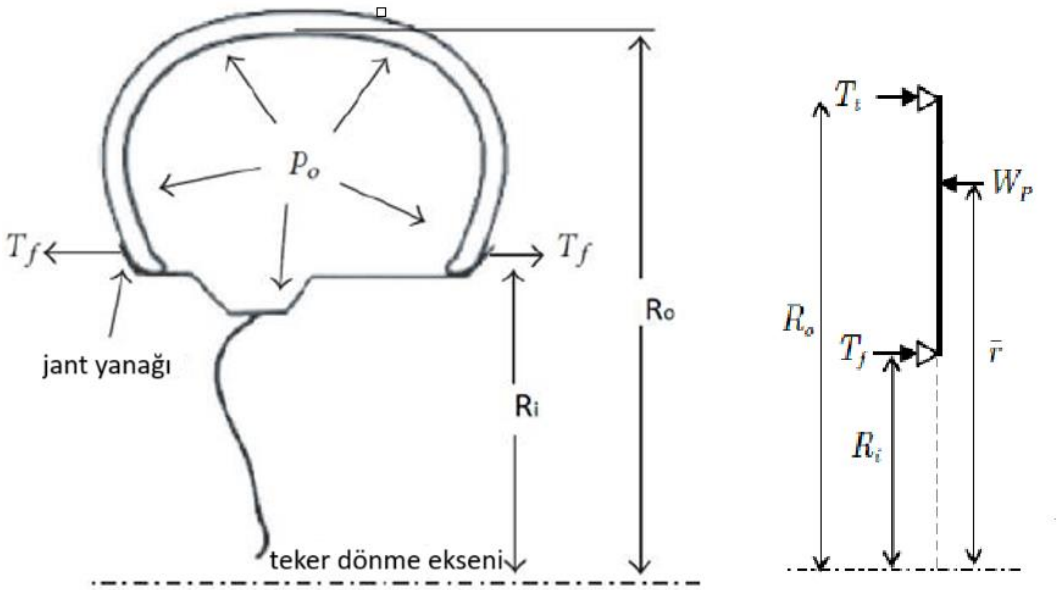
Lastik içerisindeki hava basıncı çoğu zaman sabit ve dönmeye etkisiz bir yük olarak düşünülse de, jant üzerinde oluşturduğu yapısal gerilmeler açısından göz ardı edilmemesi gereken bir etkendir. Bu iç basınç, jantın hem iç yüzeyine doğrudan hem de lastiğin yan duvarları üzerinden dolaylı olarak janta iletilir. Tekerleğin dönmesiyle birlikte meydana gelen eğilme ve radyal yük kaynaklı değişken gerilmeler, bu sabit basınç etkisinin üzerine eklenerek karmaşık bir gerilme durumu oluşturur. Bu durum, uzun süreli kullanımda jant yapısının yorulma davranışını etkileyebilir. Dolayısıyla, jant tasarımında yalnızca dış kuvvetlerin değil, aynı zamanda iç hava basıncının oluşturduğu sürekli yükün de dikkate alınması büyük önem taşır. Endüstriyel tip kauçuk lastiğin optimum performans ve yapısal stabilite sağlaması için yaklaşık 30 PSI basınçla şişirilmesi gerekmektedir. O halde, $P_0$ yani lastik iç hava basıncı, (2.10) eşitliği yardımıyla elde edilir.

$$P_0 = 2{,}068\ bar\ .100000\ Pa = 0{,}2068\ MPa \qquad (2.10)$$



**Şekil 2. 9** Lastik iç hava basıncının jant üzerinde etkilediği alan

Lastik içerisindeki basınç, yalnızca radyal doğrultuda değil, aynı zamanda jant yapısı üzerinde eksenel yönde de kuvvetler oluşturmaktadır. Bu durum, özellikle jantın yanak bölgelerinde önemli gerilmelerin meydana gelmesine neden olur. Lastik içindeki hava, yanak duvarlarını dışa doğru iterek jant yanaklarına yanal bileşenli kuvvetler aktarır. Bu yanal kuvvet, jant yanaklarının mekanik bütünlüğü açısından kritik bir etkendir; çünkü yanaklar, hem lastiğin janttan ayrılmasını önleyen fiziksel bariyer görevini üstlenmekte hem de iç basınçla oluşan kuvvetleri sürekli olarak karşılamaktadır. Bu nedenle, jantın yanak bölgelerinde oluşan yanal yüklerin doğruluğu için analitik yöntemlerle birlikte sonlu elemanlar tabanlı sayısal analizlerin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Lastik iç hava basıncının jant üzerinde etkilediği alan Şekil 2.9'da oluşturduğu yanal kuvvet ve etkiledği bölgelerin şematik gösterimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.




**Şekil 2. 10** Lastik iç hava basıncının oluşturduğu yanal kuvvet ve etkilediği bölgelerin şematik gösterimi [68] [69]

$\bar{r}$: Lastik kütle merkezinin eksene olan uzaklığı

$R_0$: Lastik dış yarıçapı (126,80 mm)

$R_i$: Jant anma yarıçapı (48,90 mm)

$$\bar{r} = \frac{\sum A_r}{\sum A} = \frac{\int_{R_i}^{R_0} 2\,\pi r.rdr}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \tag{2.11}$$

$$\bar{r} = \frac{2(R_0^3 - R_i^3)}{3(R_0^2 - R_i^2)} \tag{2.12}$$

$\bar{r}$ değeri, (2.12) eşitliğine göre lastik kütle merkezinin dönme eksenine olan uzaklığı 93,60 mm olarak bulunur.

$W_p$: Lastik yan yüzeyine etkiyen toplam yanal kuvvet

$$W_p = \pi(R_0^2 - R_i^2)P_0 \tag{2.13}$$

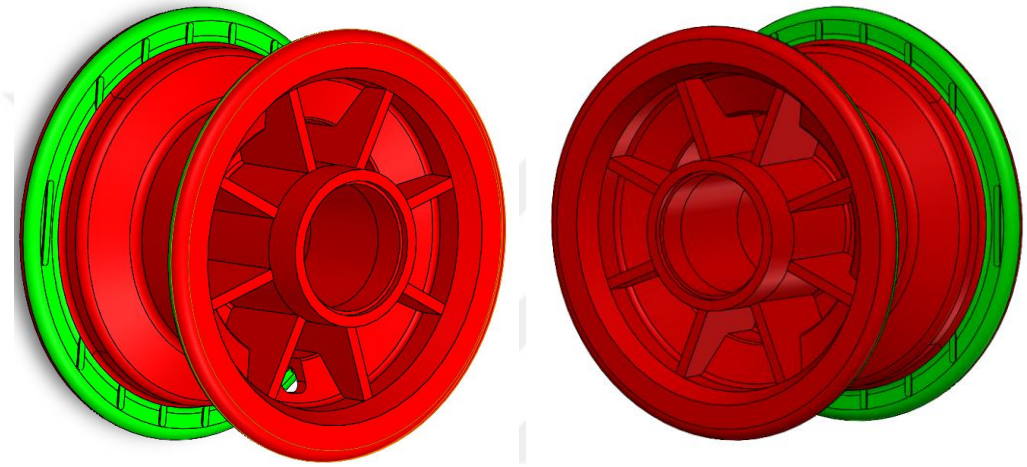
$W_p$ değeri, (2.13) eşitliği kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda, toplam yanal kuvvetin büyüklüğü yaklaşık 8892,22 N olarak elde edilmiştir.

$T_f$: Jant yanağına uygulanan yanal kuvvet

$$T_f = \frac{W_p(R_0 - \bar{r})}{R_0 - R_i} \tag{2.14}$$

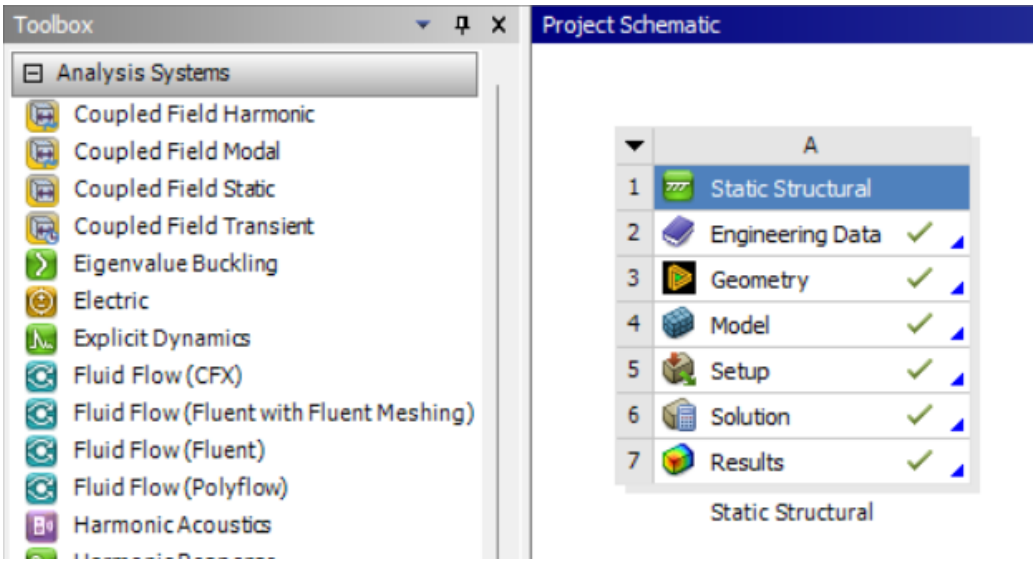
$$T_f = \frac{8892{,}22(126{,}80 - 93{,}60)}{(126{,}80 - 48{,}90)} \tag{2.15}$$

Yukarıdaki işlemler (2.14) eşitliği kullanılarak hesaplandığında $T_f$ değeri yaklaşık olarak 3789,75 N olarak bulunur. Bu kuvvet jant yanağı üzerinde 3837,37 $mm^2$'lik bir alana etki eder. Bu etki jant yanağı üzerinde 0,9875 MPa değerinde bir basınç etkisi oluşturur (Şekil 2.11).



**Şekil 2. 11** Lastik iç hava basıncının jant yanaklarını etkilediği alan

Plastik jant üzerine etkiyen yüklerin hesaplanmasının ardından, jant modelinin yapısal davranışını incelemek amacıyla Ansys Workbench sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Ansys Workbench, mühendislik disiplinlerinde karşılaşılan karmaşık fiziksel problemlerin sayısal ortamda modellenmesine ve çözümlenmesine imkan tanıyan bütünleşik bir analiz platformudur. Bu çalışmada tercih edilen Static Structural modülü, zamana bağlı olmayan yükleme koşulları altında geometrilerin mekanik tepkilerinin belirlenmesini amaçlayan bir çözücü modüldür (Şekil 2.12). Bu kapsamda, modele uygulanan kuvvet, basınç gibi yüklemeler altında meydana gelen gerilme dağılımları, yer değiştirme miktarları ve şekil değişimleri hesaplanmıştır. Malzeme tanımlamaları, sınır koşullarının belirlenmesi ve uygun ağ yapısının oluşturulması gibi temel analiz adımlarının ardından elde edilen sonuçlar doğrultusunda, plastik jantın yapısal güvenliği mühendislik kriterleri çerçevesinde değerlendirilmiştir.




**Şekil 2. 12** Plastik jantın statik yapısal analizinin proje adımları

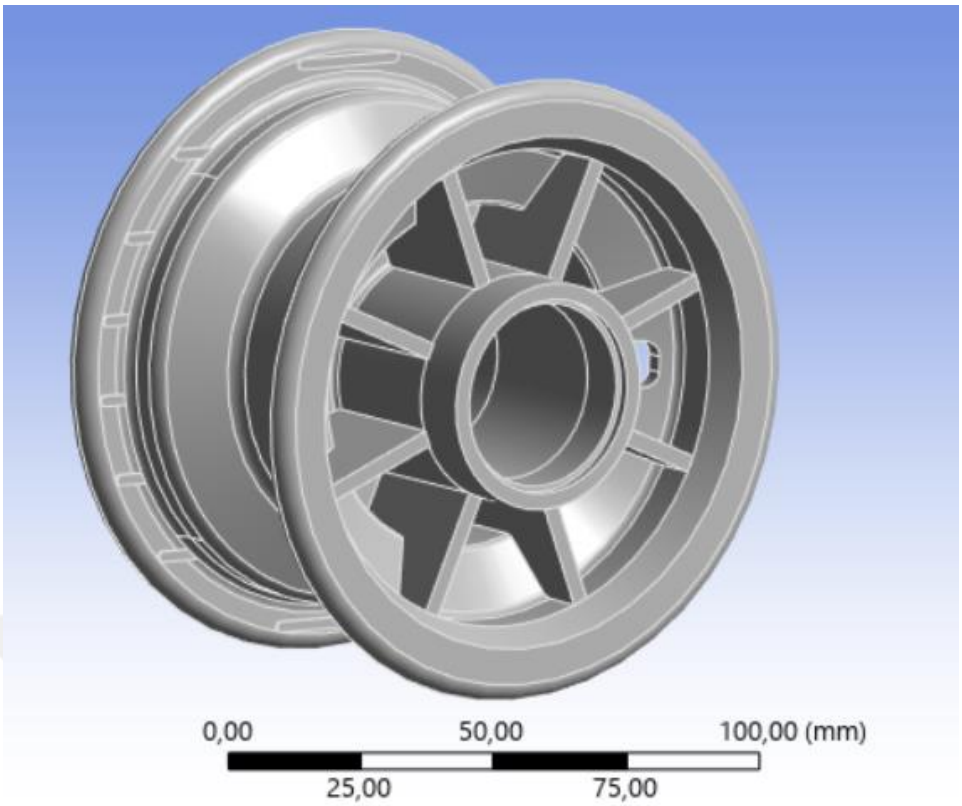
Plastik jantın üretiminde kullanılan hammadde polipropilendir ve bu malzemenin yoğunluğu 0,905 $g/cm^3$, young modülü 1750 MPa, akma dayanımı 37 MPa ve poisson oranı 0,42 dir. Malzeme bilgilerini kütüphaneye doğru bir şekilde girmek, analizlerin doğruluğu için kritik öneme sahiptir (Şekil 2.13).

Properties of Outline Row 3: PP

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | | |
| 3 | Density | 0,905 | g cm^-3 | | |
| 4 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 5 | Derive from | Young's... | | | |
| 6 | Young's Modulus | 1750 | MPa | | |
| 7 | Poisson's Ratio | 0,42 | | | |
| 8 | Bulk Modulus | 3,6458E+09 | Pa | | |
| 9 | Shear Modulus | 6,162E+08 | Pa | | |
| 10 | Tensile Yield Strength | 37 | MPa | | |

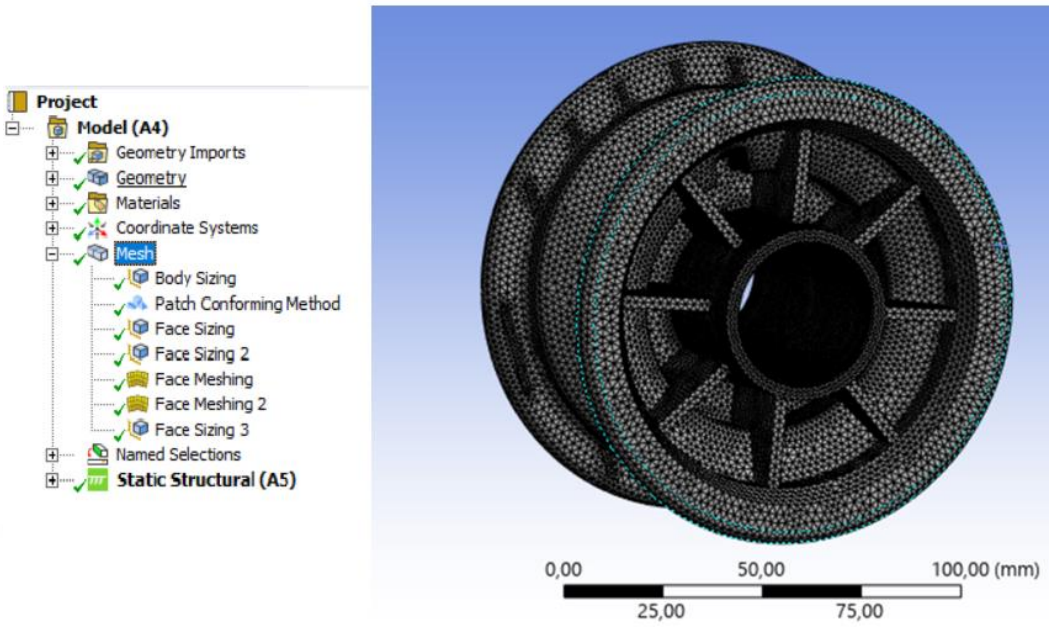
**Şekil 2. 13** PP hammaddenin kütüphaneye kayıt edilmesi

Bu çalışmada, geometri parasolid formatında analiz ortamına aktarılmıştır. Parasolid, özellikle karmaşık katı modellerin yüksek doğrulukla dışa aktarılmasını sağlayan bir dosya formatı olup, analiz için uygun bir temel oluşturur. Geometri, parasolid formatında dışa aktarıldıktan sonra, geometry modülüne import edilir (Şekil 2.14).

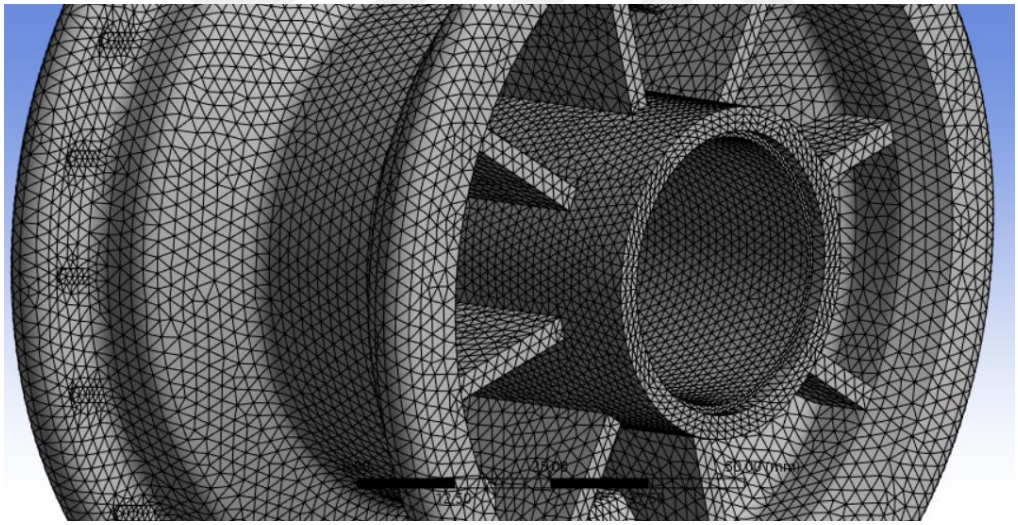



**Şekil 2. 14** Plastik jantın analiz ortamına aktarılması

Plastik jant modelinin sonlu elemanlar analizi için tetrahedron yapıda elemanlar seçilmiştir. Tetrahedral elemanlar, özellikle karmaşık ve amorf geometrilerde etkili bir çözüm sunduğu için tercih edilmiştir. Bu elemanlar, dört yüzeyli ve üçgen tabanlı prizmatik yapılar olup, düzensiz geometriye sahip modellerde düzgün bir mesh yapısının oluşturulmasını sağlar. Mesh oluşturma sürecinde, çözüm doğruluğunu artırmak amacıyla bir dizi farklı yöntem kullanılmıştır. Body sizing yöntemi, modelin belirli bölgelerindeki eleman boyutlarını hassas bir şekilde kontrol etmeye olanak tanımıştır, bu da gerilme yoğunluklarının yüksek olduğu alanlarda daha küçük elemanlar kullanarak çözüm doğruluğunu sağlamıştır. Patch conforming metodu, yüzeyin geometrisine uyum sağlayarak, yüzey üzerindeki elemanların düzgün ve hatasız bir şekilde oluşturulmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, Face sizing yöntemi ile yüzeylerin belirli kısımlarında eleman boyutu ayarlanmış, böylece modelin kritik bölgelerindeki çözünürlük artırılmıştır. Son olarak, face meshing yöntemi, yüzeylerin daha homojen bir mesh yapısına sahip olmasını sağlayarak çözümün stabilitesini ve doğruluğunu güçlendirmiştir (Şekil 2.15).



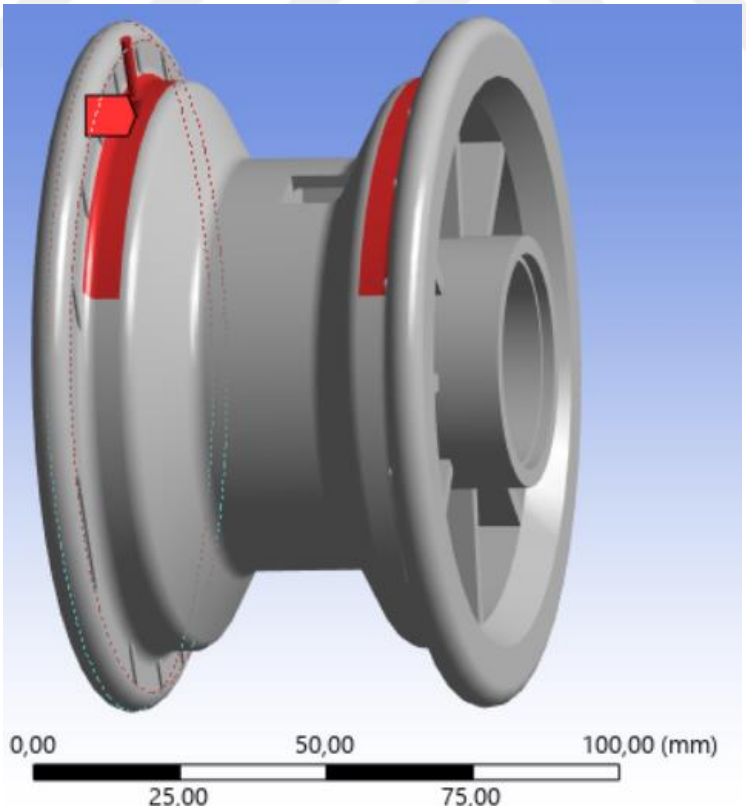

**Şekil 2. 15** Plastik jantın mesh modellemesi



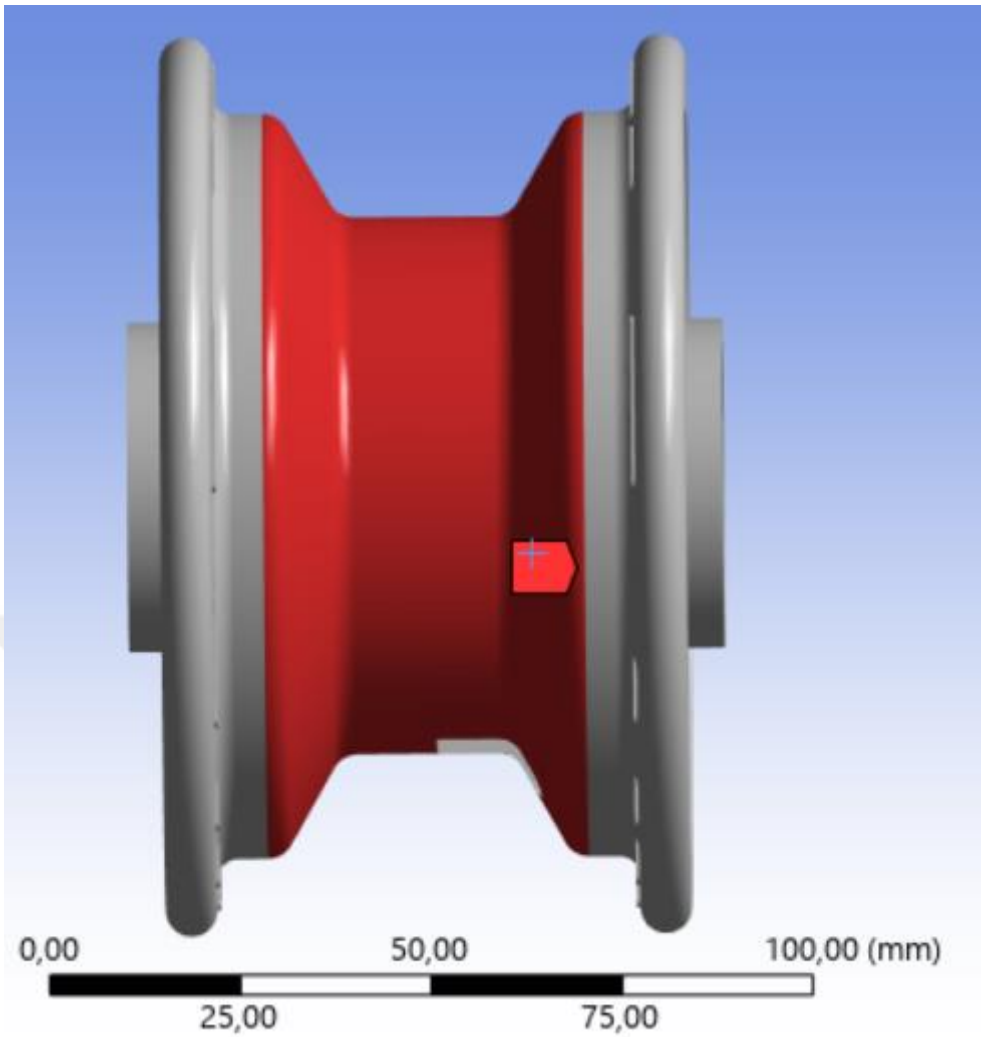
**Şekil 2. 16** Plastik jantın mesh modellemesi detay görünüm

Plastik jant modelinin sonlu elemanlar analizine uygun hale getirilmesi amacıyla gerçekleştirilen meshleme işlemi sonucunda, model üzerinde toplam 265331 adet eleman ve 419174 adet düğüm noktası oluşturulmuştur. Bu mesh yoğunluğu, karmaşık yüzey geometrilerinin doğru temsil edilmesini sağlarken, özellikle gerilme birikim bölgelerinde çözüm hassasiyetini artırmaya yönelik olarak tercih edilmiştir (Şekil 2.16).

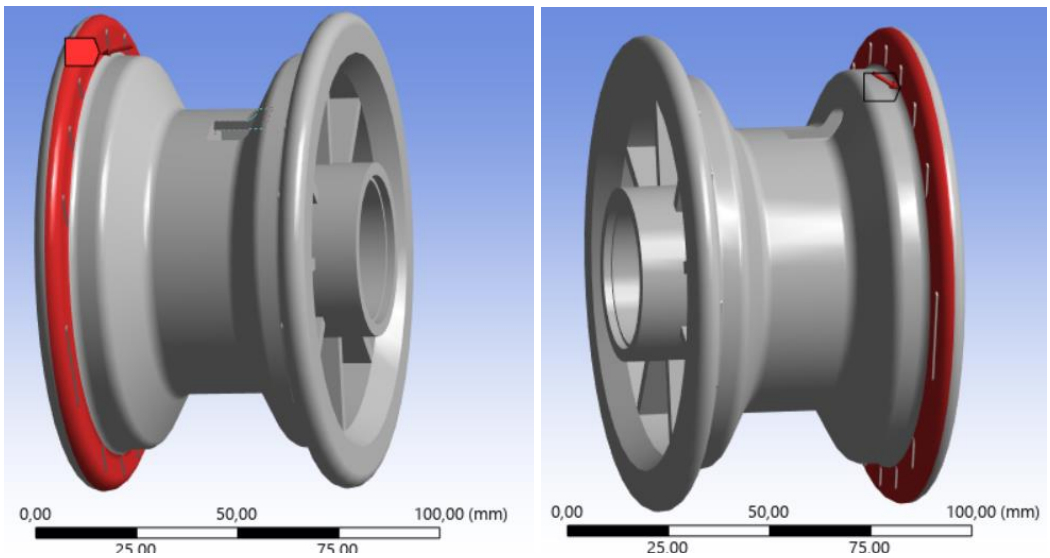
Sonlu elemanlar analizinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, yüklerin ve sabitleme yüzeylerinin doğru tanımlanması büyük önem taşır. Bu kapsamda, plastik jant modeline etki eden kuvvetler, gerçek çalışma koşullarını temsil edecek şekilde belirlenmiş ve ilgili yüzeylere uygulanmıştır. Sabitleme koşulları ise, jantın sistem içerisindeki konumunu ve hareket kısıtlamalarını doğru şekilde yansıtacak biçimde seçilmiş, yapının sınır tepkilerinin doğru modellenmesi sağlanmıştır. Plastik jant üzerine etki eden farklı kuvvetlerin doğru şekilde tanımlanabilmesi ve analize uygun yük yüzeylerinin belirlenebilmesi amacıyla, 3D modelleme sürecinde split komutu kullanılarak ilgili yüzeyler birbirinden ayrılmıştır. Bu işlem sayesinde, jantın belirli bölgelerine farklı yükleme koşulları uygulanabilmiş ve yük dağılımı daha kontrollü bir şekilde modellenmiştir. Radyal yükün plastik janta uygulanması Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Lastik iç hava basıncının plastik janta uygulanması Şekil 2.18'de, jant yanaklarına uygulanması Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Jant sabitleme yüzeyleri ise Şekil 2.20'de gösterilmiş olup tüm bu yüklerin ve sabitleme yüzeylerinin jant üzerindeki uygulamaları Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



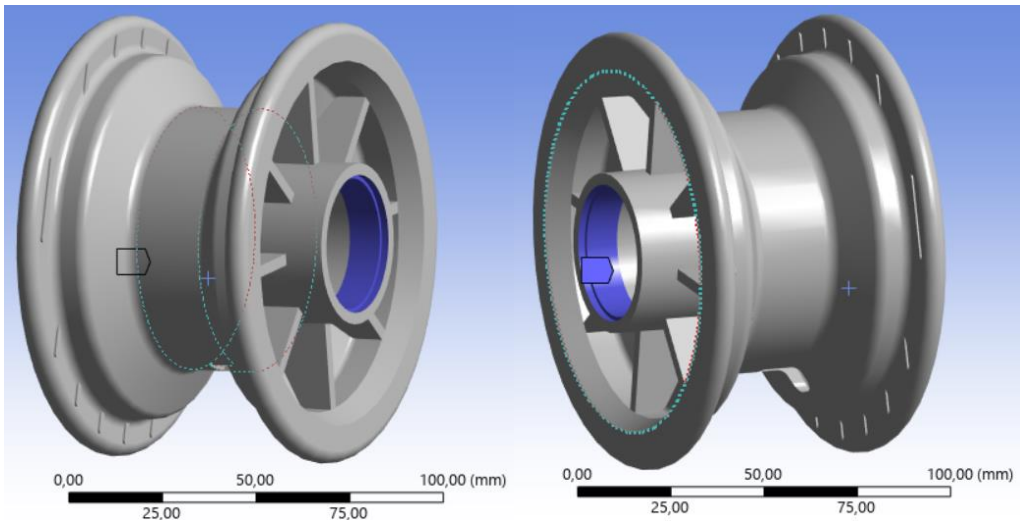

**Şekil 2. 17** Radyal yükün plastik janta uygulanması



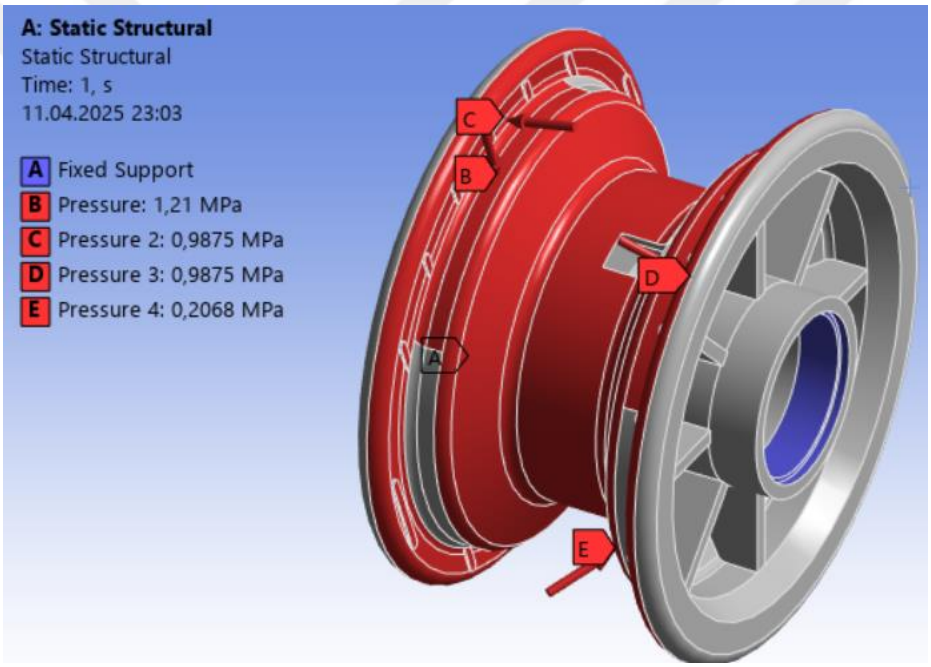

**Şekil 2. 18** İç hava basıncının plastik janta uygulanması




**Şekil 2. 19** Jant yanaklarına gelen yükün uygulanması



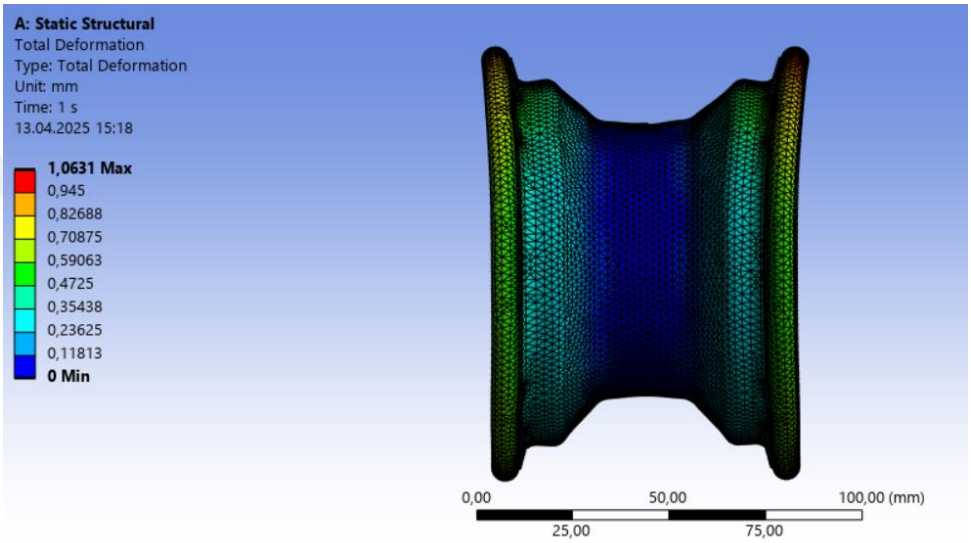

**Şekil 2. 20** Jant sabitleme yüzeylerinin tanımlanması



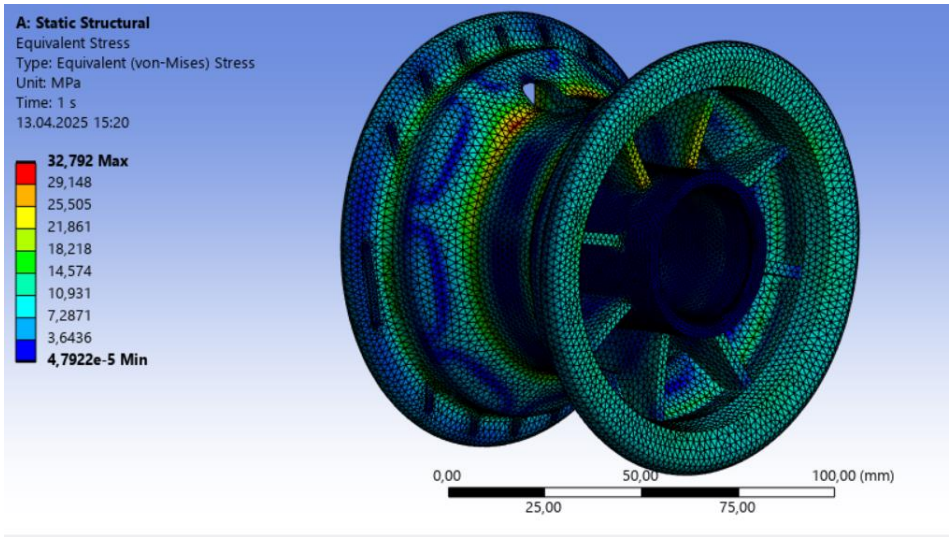

**Şekil 2. 21** Jant sabitleme ve yükleme yüzeylerinin gösterimi

Ansy workbench result modülü, sonlu elemanlar analizinin çıktılarının görselleştirilmesi ve değerlendirilmesi için önemlidir. Bu modül, model üzerinde oluşan gerilme, deformasyon ve diğer mühendislik parametrelerini renkli konturlar, deformasyon animasyonları ve sayısal veriler aracılığıyla analiz etmeyi sağlar. Plastik jant gibi karmaşık yapılar için, uygulanan yükler altında jantın gösterdiği toplam deformasyon, jantın genel şekil değiştirmesini ve yapının işlevsel bütünlüğünü gösterir. Bu parametre, yapının zayıf noktalarını ve potansiyel hasar bölgelerini belirlemede önemlidir. Eşdeğer Von Mises Gerilmesi ise, malzemenin

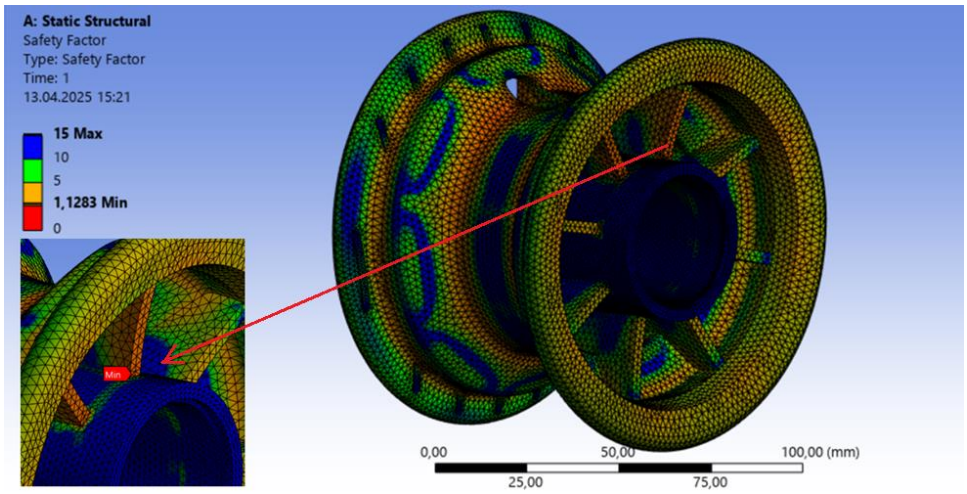
farklı eksenlerdeki gerilmelerini tek bir değere indirger ve malzemenin plastisite sınırına ne kadar yaklaştığını belirler. Von Mises gerilmesi, plastik jantın dayanıklılığını değerlendirirken, yapının güvenlik sınırlarını belirlemede önemli bir parametre olarak kullanılır. Son olarak, güvenlik katsayısı, malzemenin taşıma kapasitesinin maksimum yük altında maruz kaldığı gerilmelerle karşılaştırılmasını sağlar ve jantın güvenliğini test etmede kritik bir rol oynar. Yüksek bir güvenlik katsayısı, jantın güvenli bir şekilde işlevini yerine getirebileceğini gösterirken, düşük bir katsayı, yapının güçlendirilmesi gerektiğini belirtir.




**Şekil 2. 22** Plastik jantın toplam deformasyonu




**Şekil 2. 23** Plastik jantın eşdeğer gerilmesi



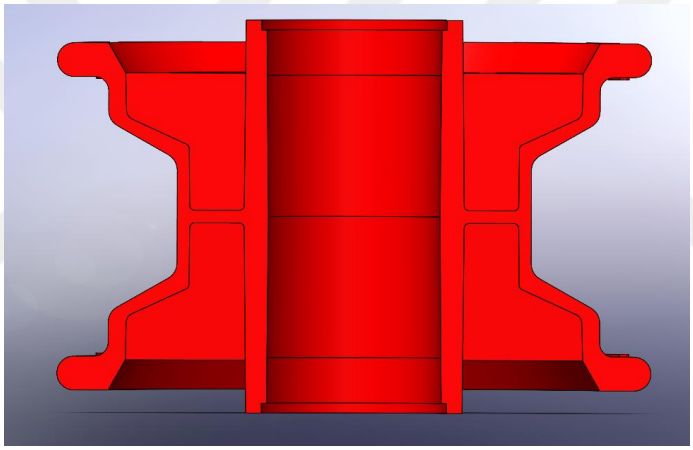

**Şekil 2. 24** Plastik jantın güvenlik katsayısı

Elde edilen sonuçlara göre, plastik jantın analizinde toplam deformasyon 1,0631 mm olarak hesaplanmış olup, bu değer jantın yük altında hangi bölgelerinin ne kadar şekil değiştirdiğini göstermektedir (Şekil 2.22). Özellikle, yük altında jantın yanakları 1,0631 mm dışa doğru açılmıştır. Eşdeğer Von Mises gerilmesi ise 32,792 MPa olarak belirlenmiş olup, bu değer, jantın maruz kaldığı gerilmenin malzemenin akma gerilmesinden düşük olduğunu ve tasarımın güvenli sınırlar içinde olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 2.23). Şekil 2.24'de gösterildiği gibi güvenlik katsayısı 1,1283 olarak hesaplanmış olup, bu değer, plastik jantın tasarımının yeterli güvenlik payına sahip olduğunu ve olası yükleme koşullarında yapısal hasar meydana gelmeden işlevini sürdürebileceğini göstermektedir. Ayrıca, jant federlerinin jantın göbeği ile birleştiği noktada emniyet katsayısının en düşük değer olduğu gözlemlenmiştir, bu da o bölgedeki gerilmelerin kritik seviyeye yaklaştığını ortaya koymaktadır. Bu bölgede yapılan iyileştirmelerle birlikte, tasarımın ağırlığı fazla artmadan güvenlik performansının artırılabileceği ifade edilebilir.

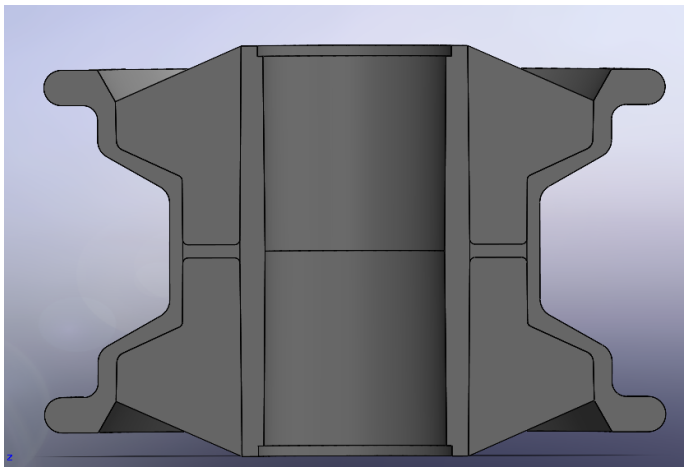
## 2.3 Plastik Jant Tasarımının İyileştirilmesi

Plastik jant tasarımının iyileştirilmesi sürecinde, yapısal analiz sonuçları doğrultusunda en düşük güvenlik katsayısının jant federlerinin, jant göbeğine bağlandığı bölgede olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle yük aktarımının doğrudan gerçekleştiği bu birleşim noktasının yapısal açıdan kritik bir bölge olduğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu alan hem dinamik hem de 6003 2RS tip

rulmanın montaj kaynaklı gerilmelerin birleşim noktası olup, güvenlik katsayısının düşük çıkması, bu bölgenin tasarımsal olarak yeniden ele alınmasını gerekli kılmıştır (Şekil 2.25). Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, jant federlerinin uç noktaları, jant göbeğine montaj edilen rulman yatağına kadar uzatılmıştır (Şekil 2.26). Feder uzantılarının rulman yatağına kadar ulaşması, sadece mukavemeti artırmakla kalmayıp aynı zamanda feder ile göbek arasındaki yük aktarımının daha dengeli ve rijit bir biçimde gerçekleşmesini de sağlamayı amaçlamıştır. Bununla birlikte, söz konusu yapısal iyileştirmenin yalnızca feder bölgesine uygulanmasının temel nedeni, jantın toplam kütlesinde gereksiz bir artışa yol açmaktan kaçınılmasıdır. Tasarım sürecinde, dayanımı artırırken hafiflik ilkesinin de korunması gözetilmiş, bu nedenle yalnızca gerilme açısından zayıf olduğu tespit edilen feder bölgesine müdahale edilmiştir.



**Şekil 2. 25** Plastik jantın kesit görünümü

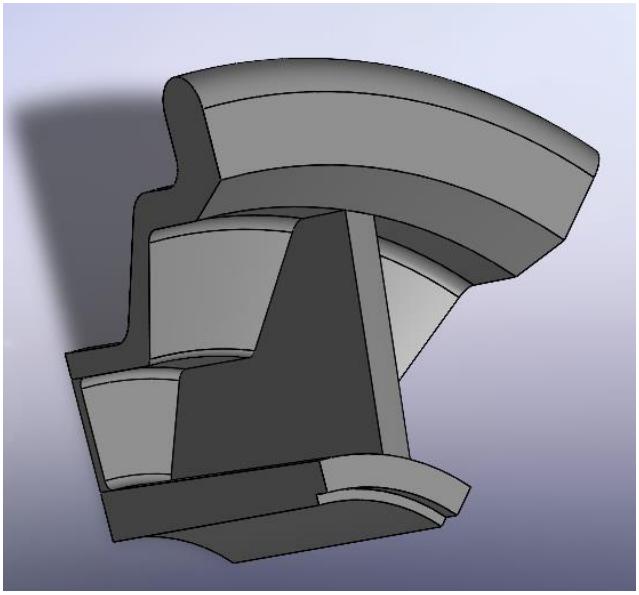


**Şekil 2. 26** İyileştirilmiş plastik jantın kesit görünümü

Yeniden tasarlanan modelin hacmi 180818,68 mm³ ve ağırlığı 168,161gram olarak hesaplanmıştır. Önceki modele ait hacim değeri 174453,038 mm³, ağırlığı ise 157,880 gramdır. Bu verilere göre yeni tasarım, önceki modele kıyasla daha fazla kütleye sahiptir. Bu ağırlık artışı, yapısal bütünlüğün artırılması amacıyla özellikle jant federlerinin göbeğe bağlandığı bölgede yapılan iyileştirme sonucunda ortaya çıkmıştır.

## 2.4 Plastik Jantın Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu çalışmasına başlanmadan önce, plastik jant geometrisi üzerinde gerekli düzenlemelerin yapılması planlanmıştır. Bu süreçte, yapının kullanım senaryoları ve üretim sonrası montaj koşulları göz önünde bulundurularak, optimizasyonun yalnızca feder bölgesine uygulanmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Özellikle plastik jantın kauçuk lastik ile montajı sırasında, jatın dış çeperinde elastik şekil değişimiyle birlikte kasılma meydana gelmekte ve bu sırada öngörülemeyen montaj kuvvetleri oluşmaktadır. Benzer şekilde, jant göbeği kısmında rulmanın sıkı geçme yöntemiyle monte edilmesi sonucunda bu bölgede ilave gerilmeler meydana gelmekte ve çatlama riski oluşmaktadır. Bu tür lokal yüklemelerin doğru şekilde modellenmesi oldukça güç olduğundan, topoloji optimizasyonunun bu alanlara uygulanması yapısal güvenlik açısından riskli görülmüştür. Bu nedenle optimizasyonun yalnızca feder bölgesi ile sınırlandırılması tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, jantın toplam geometrisi üzerinde büyük hacim veya kütle değişiklikleri oluşturmadan, yerel malzeme dağılımının mühendislik kriterlerine göre yeniden düzenlenmesini mümkün kılacaktır. Jantın genel simetrik yapısı dikkate alınarak, model 16 eşit dilime bölünmüş ve işlem süresini optimize etmek amacıyla yalnızca bir dilim üzerinde topoloji optimizasyonu yapılması planlanmıştır (Şekil 2.27). Elde edilecek yeni feder geometrisinin simetrik olarak çoğaltılmasıyla tüm jant modeline uygulanarak hem işlem süresi azaltılacak hem de yapısal bütünlük korunarak fonksiyonel bir tasarım elde edilmesi hedeflenmiştir.

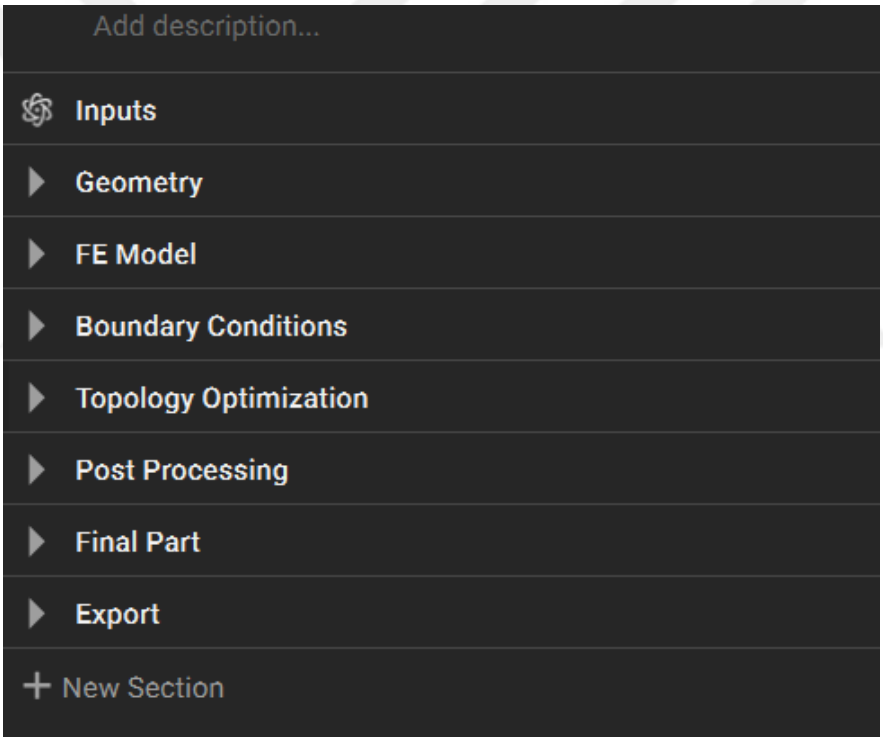


**Şekil 2. 27** Plastik jantın optimizasyon için dilimlenmesi

Topoloji optimizasyon süreci, nTopology yazılımı aracılığıyla belirli mühendislik adımlarına uygun şekilde sistematik olarak yürütülmüştür. Bu süreçte ilk olarak, tasarım problemine uygun geometrik modelleme gerçekleştirilmiştir. Geometri oluşturulurken, optimize edilmesi hedeflenen hacim ile birlikte yapının yük taşıyan veya korunması gereken bölgeleri net bir biçimde tanımlanmıştır. İkinci adımda, bu geometri üzerinde analiz yapılabilmesi amacıyla sonlu eleman (FE) modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada, yapının fiziksel davranışını doğru yansıtacak şekilde uygun eleman tipi, ağ yoğunluğu ve çözüm hassasiyeti belirlenmiştir. Üçüncü adımda ise, yapıya etki eden kuvvetler ve sistemin çevresel koşulları dikkate alınarak farklı sınır koşulları tanımlanmıştır; bu koşullar, modelin fiziksel gerçekliğe uygun davranmasını sağlamıştır. Dördüncü adım olan topoloji optimizasyonu sürecinde, belirli bir hedef fonksiyon doğrultusunda yapının içerisindeki malzeme dağılımı yeniden şekillendirilmiştir. Bu aşamada, yazılımın sağladığı iteratif algoritmalar aracılığıyla verimsiz bölgelerdeki malzeme elenmiş, yalnızca yük taşımada etkin olan bölgelerde yoğunlaşmıştır. Ardından gelen son işlemler (post processing) aşamasında, elde edilen yapılar hem görsel olarak hem de mühendislik açısından iyileştirilmiştir. Sürecin son adımı olan nihai parçaların oluşturulması ve dışa aktarımı (export) kapsamında ise, optimize edilen yapılar dışa aktarılmış ve ek yüzey düzeltmeleri ve geometrik sadeleştirmeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.28). Bu bütünsel yöntem, tasarım sürecinde hem

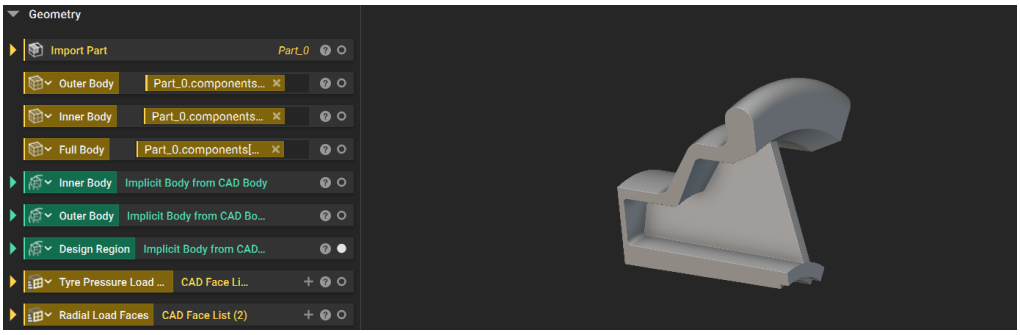
mühendislik doğruluğunu koruyan hem de üretim süreçleriyle uyumlu, yüksek verimlilik sağlayan yapılar elde edilmesini sağlamıştır.

Son olarak, nTopology yazılımı aracılığıyla topoloji optimizasyonu gerçekleştirilerek elde edilen geometrik modeller, yapısal performanslarının doğrulanabilmesi amacıyla yeniden analiz sürecine tabi tutulacaktır. Bu kapsamda, optimize edilmiş modeller Ansys workbench ortamına aktarılacak ve burada statik yapısal analiz uygulanacaktır. Gerçekleştirilecek analizlerde, özellikle gerilme dağılımı, yer değiştirme miktarları ve güvenlik katsayısı gibi kriterler dikkate alınarak, optimize edilmiş tasarımların mekanik dayanımı değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlar, çalışmanın başlangıcında kullanılan ve topoloji optimizasyonuna tabi tutulmamış olan ilk plastik jant modeli ile karşılaştırılacaktır.




**Şekil 2. 28** Plastik jantın topoloji optimizasyonu adımları

Topoloji optimizasyonuna başlamadan önce, jantın yalnızca bir dilimini içeren 3D modeli, parasolid formatında yazılıma aktarılmıştır. Bu model, simetriden yararlanmak amacıyla tam jant yerine bir dilim olarak seçilmiştir. Ardından, optimizasyona açık olacak bölgeyi tanımlamak için design region oluşturulmuştur (Şekil 2.29). Bu bölge, malzeme dağılımının değişmesine izin verilen hacmi temsil eder.

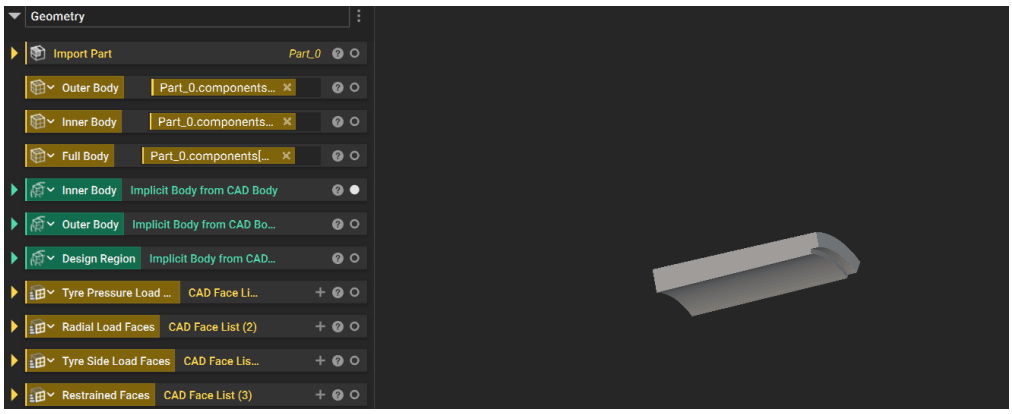



**Şekil 2. 29** Plastik jant diliminin tasarım bölgesi (design region)

Topoloji optimizasyonu sürecinin sonunda üretime uygun bütünleşik bir geometri elde edebilmek amacıyla, jantın dış çemberi ve göbek bölgesi sırasıyla outer body (Şekil 2.30) ve inner body (Şekil 2.31) olarak ayrı katı cisimler halinde tanımlanmıştır. Bu bölgeler, yapısal bütünlük açısından kritik oldukları ve optimizasyon sonrası doğrudan kullanılacakları için topoloji optimizasyonuna dahil edilmemiş, yalnızca sabit bileşenler olarak korunmuştur. Optimizasyon yalnızca jant federi üzerinde gerçekleştirilmiş, işlem sonunda elde edilen topolojik veri, bu sabit bölgelerle birleştirilerek tam ve üretilebilir bir jant geometrisi oluşturulmuştur.




**Şekil 2. 30** Plastik jant diliminin dış çember bölgesi (outer body)

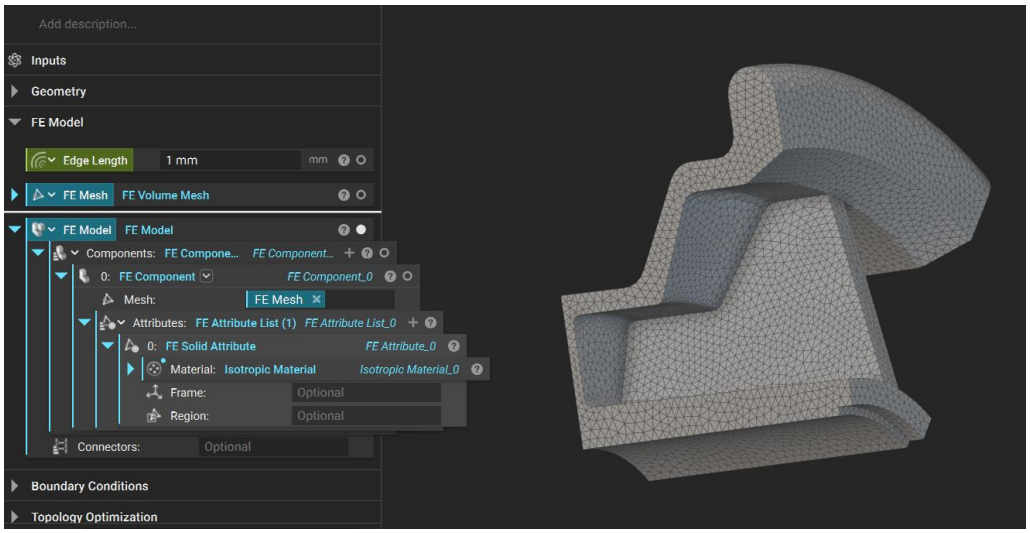



**Şekil 2. 31** Plastik jant diliminin göbek bölgesi (inner body)

Topoloji optimizasyonu sürecinde, plastik jant diliminin sonlu elemanlar (FE) modeli oluşturulurken, ilk olarak geometri sonlu eleman analizine uygun hale getirilir ve ağ yapısı (meshing) oluşturulur (Şekil 2.32). Bu işlem, jant diliminin doğru şekilde analiz edilebilmesi için gereklidir. Ardından, malzeme özellikleri izotropik lineer elastik özellikler kullanılarak, malzemenin her yönde aynı mekanik özelliklere sahip olduğu varsayılır. Bu özellikler arasında elastik modül, Poisson oranı ve malzeme yoğunluğu yer alır. Son olarak, FE solid attribute kullanılarak, malzeme özellikleri sonlu elemanlar modeline atanır. Bu adımlar, jant diliminin fiziksel davranışını doğru bir şekilde temsil ederek, optimizasyon sürecinin sonunda elde edilen geometriyi güvenilir bir şekilde analiz etmeye olanak tanır.

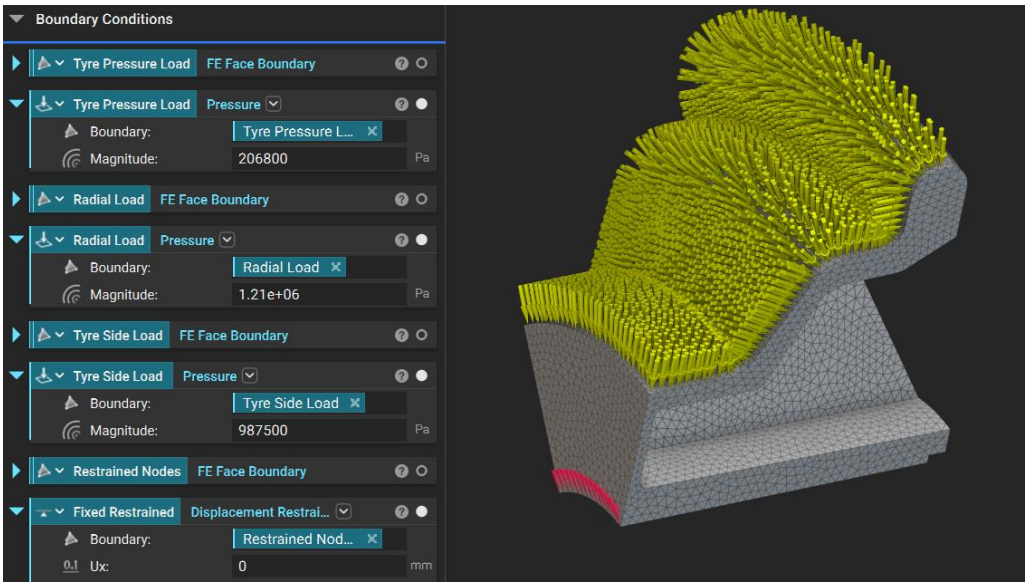
Bu çalışmanın neticesinde, PA12 toz hammadde ile eklemeli imalatta numune üretimi planlanmaktadır. PA12 hammaddesi, poliamid 12 olarak bilinen bir termoplastik olup, yüksek mekanik dayanım, esneklik ve mükemmel kimyasal direnç özellikleri ile dikkat çeker. Uygulanacak olan topoloji optimizasyonuna malzeme bilgisi olarak EOS marka toz PA12 hammaddesinin mekanik özellikleri girilmiştir. Bu malzemenin yoğunluğu 0,93 g/cm$^3$, young modülü 1650 MPa, akma dayanımı 48 MPa ve poisson oranı 0,47 dir. Malzeme bilgilerini kütüphaneye doğru bir şekilde girmek, analizlerin doğruluğu için kritik öneme sahiptir.

FE modelde eleman büyüklüğü, analiz doğruluğu ve hesaplama süresi açısından önemli bir parametredir. Küçük elemanlar daha hassas sonuçlar sağlar ancak hesaplama süresini artırır; büyük elemanlar ise daha hızlı analiz imkanı sunar fakat doğruluk düşebilir. Özellikle gerilme yoğunluklarının beklendiği bölgelerde daha küçük eleman boyutu tercih edilmelidir. Doğru eleman boyutu seçimi, hem güvenilir sonuçlar hem de verimli analiz süreci için gereklidir. Plastik jantın sadece feder bölgesinde optimizasyon uygulamak istediğimizden dolayı bu çalışmada elaman büyüklüğü 1 mm olarak mesh modellemesi yapılmıştır.




**Şekil 2. 32** Plastik jant diliminin sonlu elemanlar modeli

Topoloji optimizasyonu sürecinde boundary condition (sınır şartları) adımı, plastik jant diliminin gerçek çalışma koşullarını yansıtacak şekilde detaylı biçimde tanımlandı (Şekil 2.33). Bu kapsamda, janta etki eden çeşitli kuvvetler ayrı ayrı modellenerek optimizasyona dahil edildi. İlk olarak, lastik iç hava basıncının jant yüzeyine uyguladığı kuvvet tanımlandı. Ardından, lastik iç hava basıncının jant yanaklarına uyguladığı basınç modele eklendi. Üçüncü olarak ise, radyal yük tanımlanarak jantın dış çemberine doğrudan etki eden kuvvetler topoloji ortamına aktarıldı. Bu yük değerleri, daha önce plastik janta etki eden kuvvetlerin hesaplandığı bölümde elde edilen sayısal veriler kullanılarak optimize edilecek modelin giriş parametreleri olarak girildi. Böylece analiz, daha önce yapılan hesaplamalarla doğrudan ilişkilendirilmiş oldu ve fiziksel gerçekliğe dayalı bir optimizasyon sağlandı. Ayrıca, jantın göbek bölgesinde yer alan rulman montaj bölgesi, sabit bölge olarak tanımlandı. Sabitlenen bölgenin düğüm noktalarının tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılarak, yapının referans noktası oluşturuldu.

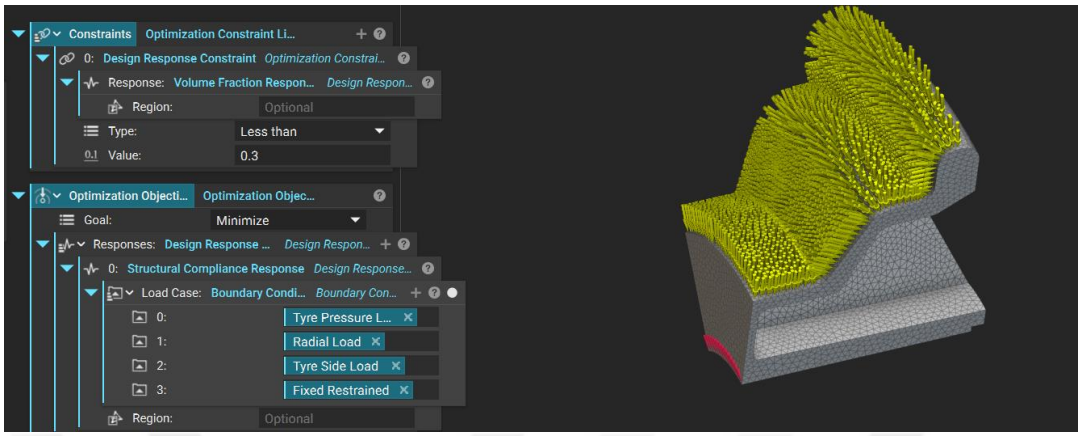



**Şekil 2. 33** Plastik jant diliminin sınır koşullarının gösterimi

Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu sürecinde, constraint (kısıtlama) ve optimization objective (optimizasyon hedefi) belirli parametrelerle tanımlanmış ve yapının performansı en verimli şekilde yönlendirilmiştir. Bu çalışmada, volume fraction response (hacim kesiri yanıtı), kısıtlama olarak kullanılmıştır (Şekil 2.34). Hacim kesri, jant diliminin toplam hacminin ne kadarının malzeme ile doldurulacağına karar veren bir parametredir. Hacim kesiri değeri, jantın yapısal dayanıklılığı ve ağırlığını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Farklı hacim kesiri değerleri (0.3, 0.4, 0.5) kullanılarak, malzeme kullanımının ne ölçüde optimize edileceği ve jantın performansının nasıl şekilleneceği test edilmiştir. Bu kısıtlama, jantın belirli yük taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını sağlamak için belirli sınırlar içinde kalmasını temin ederken, aynı zamanda daha hafif ya da daha dayanıklı yapılar oluşturulması hedeflenmiştir.

Optimizasyon hedefi olarak ise structural compliance response (yapısal uyum yanıtı) kullanılmıştır. Yapısal uyumluluk yapının deformasyonuna karşı gösterdiği dirençle ilgilidir. Yapısal uyum, yapının uygulanan yükler altında ne kadar deformasyona uğrayacağını ölçer. Bu hedef, yapının dayanıklılığını en üst düzeye çıkarmayı amaçlar. Yükler uygulandığında, yapının deformasyonunun minimuma indirilmesi istenmiştir. Yani, yapının rijitliğini artırarak, taşıma kapasitesini ve genel performansını iyileştirmek amaçlanmıştır. Bu iki parametre (hacim kesiri ve yapısal uyum) birlikte çalışarak, jant diliminin hem dayanıklılığını hem de

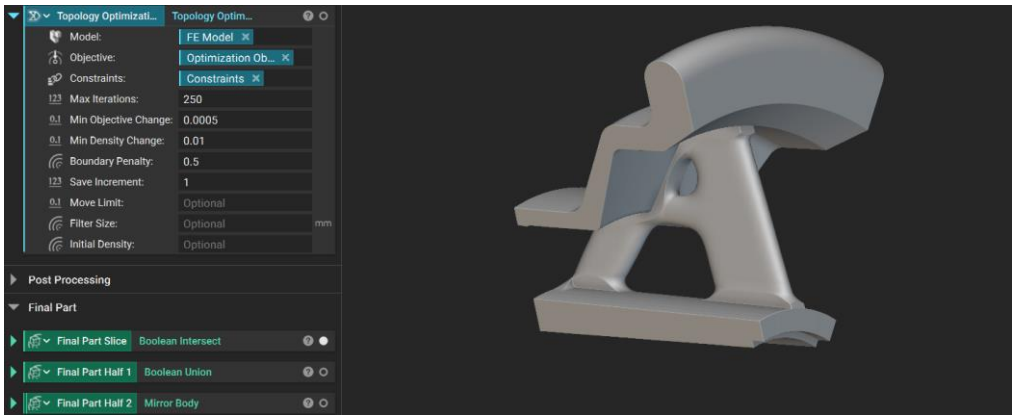
verimliliğini optimize etmeyi hedeflemiştir. Hacim kesiri ile malzeme dağılımı ve dayanıklılık, structural compliance ile de yapının rijitliği ve performansı optimize edilmiştir.



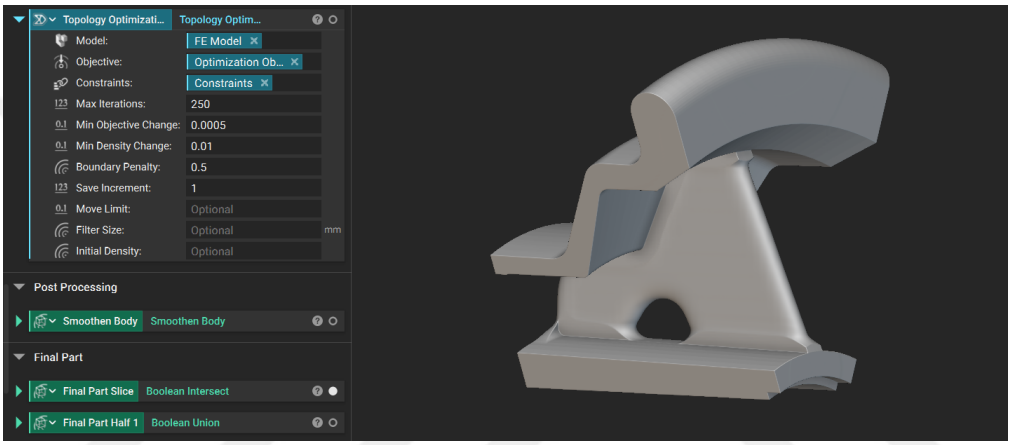

**Şekil 2. 34** Plastik jant dilimine 0.3 hacim kesiri kısıtı uygulaması

Topoloji optimizasyonu sonrası, jant diliminin tasarımında post processing aşamasında önemli bir işlem olan smoothen body (yüzey düzleştirme) uygulanır. Bu işlem, optimizasyon süreci sonrasında ortaya çıkan geometrik pürüzleri ve keskin köşeleri yumuşatarak tasarımın daha düzgün ve üretilebilir olmasını sağlar. Plastik jant dilimi için bu uygulama, üretim sürecinde karşılaşılabilecek zorlukları en aza indirir ve estetik açıdan daha uyumlu bir tasarım oluşturur. Yüzey düzleştirme işlemi ayrıca, malzeme akışını iyileştirerek yapı üzerindeki stresin daha homojen dağılmasına olanak tanır ve bu sayede mukavemetin artmasına yardımcı olur.

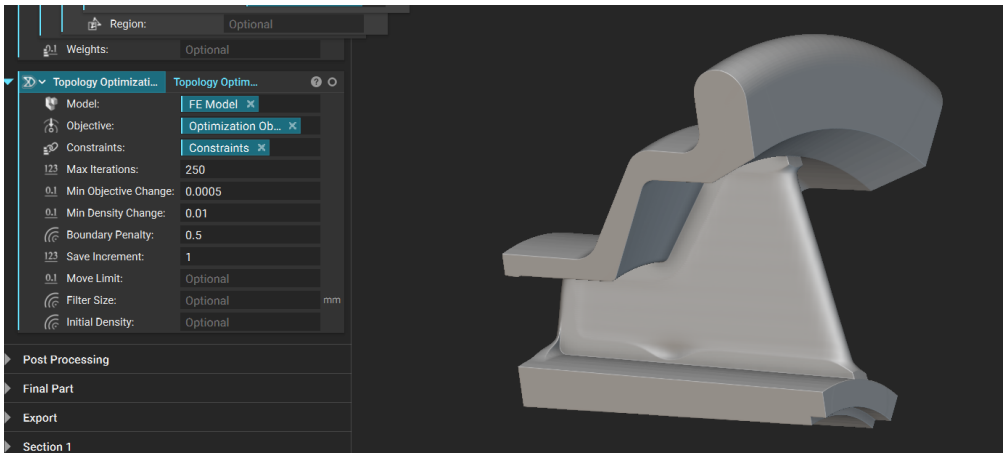
Tasarımın son aşamasında, inner body ve outer body olarak tanımlanan jant diliminin iki ayrı bölümü, optimize edilen geometrilerle boolean union bişrleştirme komutu kullanılarak birleştirilmiştir. Bu komut, her iki parçayı tek bir bütün haline getirir ve birleşim yüzeylerinde herhangi bir boşluk veya geçiş hatası oluşumunu engeller. Böylece, iki bölüm arasındaki bağlantılar güçlendirilmiş olur ve tasarımın dayanıklılığı ile üretilebilirliği artırılmıştır. Topoloji optimizasyonu sonrası 0.3 hacim kesiri kısıtı uygulanmış model Şekil 2.35'te, 0.4 hacim kesiri kısıtı uygulanmış model Şekil 2.36'da, 0.5 hacim kesiri kısıtı uygulanmış model Şekil 2.37'de gösterilmiştir.




**Şekil 2. 35** Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu (0.3 hacim kesiri kısıtı)



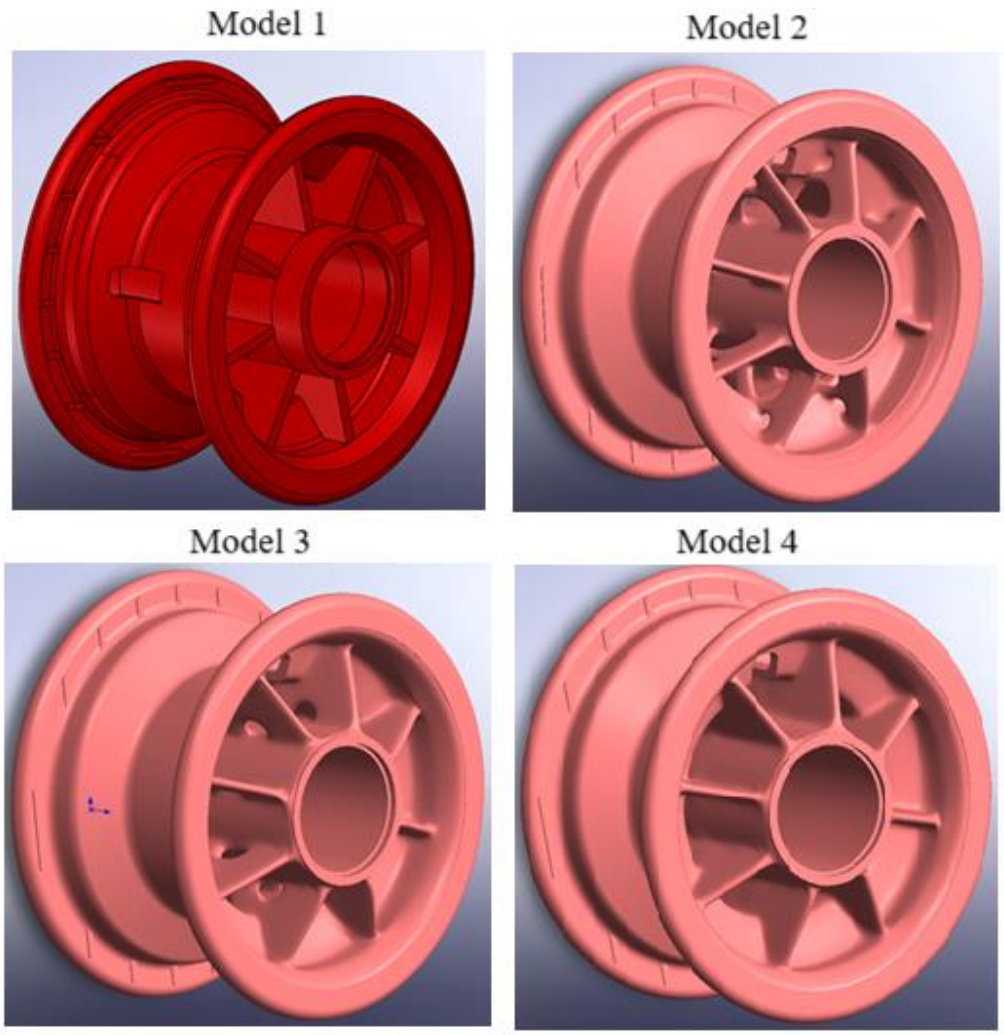

**Şekil 2. 36** Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu (0.4 hacim kesiri kısıtı)




**Şekil 2. 37** Plastik jant diliminin topoloji optimizasyonu (0.5 hacim kesiri kısıtı)

Topoloji optimizasyonu sürecinin sonunda, üç farklı optimizasyon sonucu elde edilen plastik jant dilimleri, çoğaltılarak farklı ana jant modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, her bir optimizasyon sonucunun farklı parametreler ve malzeme

dağılımı ile nasıl performans gösterdiğini görmek amacıyla çeşitlendirilmiştir. Toplamda dört farklı model elde edilmiştir: topoloji optimizasyonu uygulanmamış modele plastik jant model 1, 0.3 hacim kesri kısıtı modeli uygulanmış modele plastik jant model 2, 0.4 hacim kesri kısıtı modeli uygulanmış modele plastik jant model 3 ve 0.5 hacim kesri kısıtı modeli uygulanmış modele plastik jant model 4 denilmiştir. Bu yeni plastik jant modelleri Şekil 2.38'de gösterilmiştir. Son aşamada, tüm bu jant modelleri parasolid formatında dışa aktarılmıştır. Bu işlem, tasarımın üretim süreçlerine geçmeden önce gerekli doğrulamalar ve iyileştirmeler için hazır hale getirilmesini sağlamıştır.




**Şekil 2. 38** Plastik jant modellerinin görselleri

## 2.5 Numune İmalatı

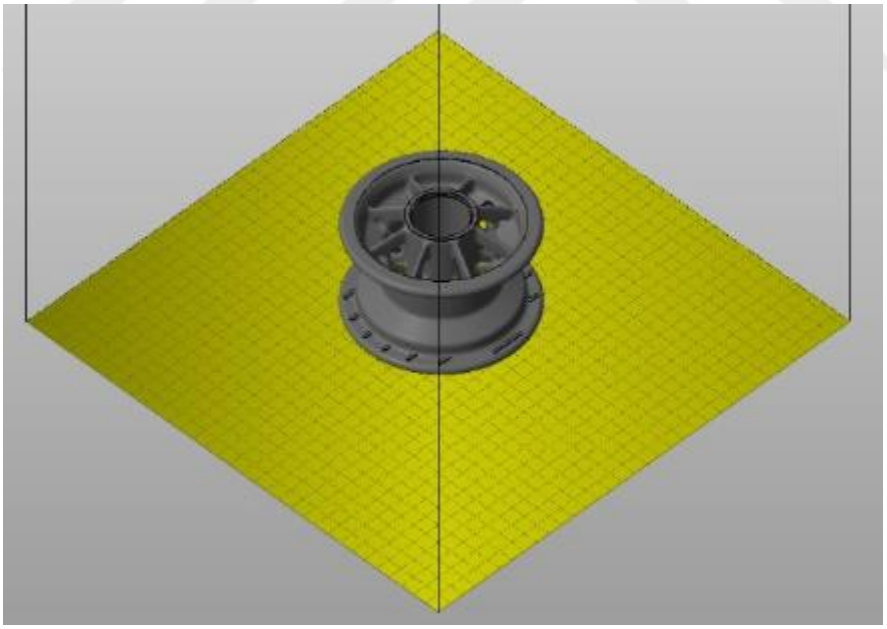
Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu uygulanan plastik jant tasarımı sonucunda elde edilen üç farklı modelin yapısal performansları analiz edilmiş ve güvenlik katsayıları bakımından tamamının, optimizasyon uygulanmamış referans modele (model 1) kıyasla daha güvenli aralıkta yer aldığı tespit edilmiştir. Söz konusu modellerin birbirlerine göre yapısal mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı analizi ise bulgular bölümünde detaylı olarak sunulmuştur. Bu doğrultuda, güvenlik açısından kabul edilebilir düzeyde kalmakla birlikte en düşük kütleye sahip olan ve jant feder bölgesinde %50'nin üzerinde malzeme tasarrufu sağlayan model 2, üretim adımına taşınmak üzere seçilmiştir. Üretim yöntemi olarak, polimer esaslı malzemelerin üç boyutlu üretiminde kullanılan toz yatak füzyon teknolojisine dayalı seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi tercih edilmiştir. Bu amaçla, EOS firmasına ait EOS P396 adlı SLS makinesi kullanılarak model 2'nin fiziksel prototipi üretilmiştir. EOS P396, yüksek boyutsal hassasiyet, iyi mekanik özellikler ve karmaşık geometrilerin destek yapılarına ihtiyaç duymadan üretilebilmesine olanak tanıyan ileri düzey bir eklemeli imalat makinesidir (Şekil 2.39). Söz konusu makine, poliamid 12 (PA12) başta olmak üzere farklı polimer malzemeleri işleyebilme kapasitesiyle, fonksiyonel prototip ve düşük hacimli son kullanım parça üretimi için oldukça uygundur.




**Şekil 2. 39** EOS P396 seçici lazer sinterleme makinesi

Numune imalatının poliamid 12 (PA 12) hammadesi ile yapılması planlandı. Poliamid 12 malzemesi dengeli mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Eklemeli imalat teknolojilerinde, özellikle seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemiyle, fonksiyonel prototiplerin ve son kullanım parçalarının üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. PA12 üretim maliyetleri, mekanik dayanım, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk gibi birçok kriter arasında optimum denge sağlayarak farklı geometrilere ve gereksinimlere sahip parçaların üretimine olanak tanımaktadır [70].

STL formatındaki model 2'ye ait optimize edilmiş jant geometrisinin üretim öncesi yerleşim ve oryantasyon işlemleri, Netfabb Professional 4.9 yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.40). Söz konusu yazılım, eklemeli imalat süreçlerinde geometrik doğruluk, minimum destek ihtiyacı ve termal deformasyon riskini azaltmak amacıyla parça yerleşimini optimize etmeye olanak tanımaktadır. Jant modeli, yapı alanı içerisinde üretim sonrası işleme gereksinimi en düşük olacak şekilde konumlandırılmıştır. Oryantasyon işlemlerinin tamamlanmasının ardından, nihai üretim verileri SLS tabanlı eklemeli imalat makinesine aktarılmıştır.



**Şekil 2. 40** Model 2 jantın eklemeli imalat hazırlığı

Üretim sürecinde kullanılan işlem parametreleri, PA12 malzemesinin özelliklerine uygun olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, lazer gücü 40 W, tarama hızı 4000 mm/s, tarama aralığı 0,3 mm ve katman kalınlığı 120 µm olacak şekilde

ayarlanmıştır. Belirlenen bu parametreler, hem parçanın mekanik özelliklerini optimize etmek hem de yüzey kalitesi ile boyutsal doğruluğu artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Katman kalınlığının 120 µm olması, üretim süresinin etkinliği ile parça hassasiyeti arasında denge kurulmasını sağlamış; yüksek tarama hızı ise üretim sürecinin verimliliğini artırmıştır. Yeni jant modeli eklemeli imalat ile yaklaşık 3 saatte üretilmiştir (Şekil 2.41). Üretim sonrası yeni jant modeli, yüzey kalitesini artırmak amacıyla kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işlemi, aşındırıcı taneciklerin basınçlı hava yardımıyla yüzeye uygulanmasıyla gerçekleştirilen bir yüzey iyileştirme yöntemidir (Şekil 2.42). Bu yöntemle, seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisiyle üretilmiş parçaların yüzeyindeki pürüzlülük azaltılarak daha düzgün bir yapı elde edilir. Aynı zamanda üretim sürecinden kalan sinterlenmemiş tozların temizlenmesine olanak sağlar.



**Şekil 2. 41** Model 2 jantın eklemeli imalat ile üretimi



**Şekil 2. 42** Model 2 jantın kumlama işlemi

Yeni jant modelinin tasarımında, üretim sürecinde herhangi bir destek yapısına ihtiyaç duyulmadan imalat gerçekleştirilmiştir. PA12 toz hammaddesinin sinterlenmeyen kısımları, yapı içerisinde doğal bir destek ortamı oluşturarak ilave destek yapısı kullanımını gereksiz kılmıştır. Bu durum hem üretim sürecini sadeleştirmiş hem de malzeme israfını önlemiştir. Bu özellik, SLS teknolojisinin yüksek geometrik hassasiyet ve işlem sonrası gereksinimi azaltma avantajlarını yansıtarak, üretim sürecinin toplam verimliliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, yeni jant modeli montaj aşamasına geçiş için hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.43).



**Şekil 2. 43** Model 2 jantın görseli

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yeni model jant, kauçuk lastik ve iki adet 6003 2RS rulman ile montajlanarak ömür testi için hazırlanmıştır (Şekil 2.44). Rulmanlar, jant göbeğine pnömatik piston yardımıyla monte edilmekte ve bu işlemle jant sabitlenmektedir. Kauçuk lastik, lastik üreticisi tarafından bildirilen basınç değeri olan 30 PSI' ye şişirilip, subap kapağı takıldıktan sonra ömür testi için hazır hale getirilmiştir (şekil 2.45). Montaj işlemleri plastik enjeksiyon ile üretilen mevcut jant modeline de uygulanmıştır.



**Şekil 2. 44** Model 2 jantın montajı



**Şekil 2. 45** Montajı tamamlanmış model 2 jantın görseli

## 2.6 Dayanım ve Ömür Testi

Teker ömür test cihazı, test edilecek tekerin döner hareket altındaki mekanik dayanımını ve uzun süreli yük taşıma performansını değerlendirmek amacıyla tasarlanmış bir sistemdir (Şekil 2.46). Test edilecek olan teker, teker yatağına 20 mm çapındaki bir mil vasıtasıyla monte edilir. Pnömatik bir piston, yukarıdan aşağıya hareket ederek tekeri, belirlenen hızda dönen palet düzeneği üzerine bastırır. Sistem, pnömatik piston, valf, basınç regülatörü ve yük hücresi (loadcell) gibi bileşenlerden oluşur. Piston aracılığıyla tekerin merkezine, kg cinsinden tanımlanmış sabit bir yük uygulanır. Piston ucunda yer alan loadcell, uygulanan kuvveti sürekli olarak ölçerek elde edilen verileri PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) sistemine aktarır. Uygulanan yükte herhangi bir sapma ya da sistem dışı bir durum meydana geldiğinde, cihaz otomatik olarak durur ve piston, tekeri palet yüzeyinden uzaklaştırarak yukarı yönde geri çeker. Bu sistem, tekerin farklı yük koşulları altındaki davranışlarını izlemeye olanak tanır ve yapısal bütünlüğü hakkında kritik veriler sağlar.



**Şekil 2. 46** Tekerlek dayanım ve ömür test cihazı

Bu test cihazı, uygulanan yükü kilogram (kg), test hızını kilometre/saat (km/s), kat edilen mesafeyi kilometre (km) ve test süresini saat (s) ve dakika (d) cinsinden ölçebilmektedir (Şekil 2.47). Test kapsamında, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş yeni jant modeline sahip teker ile plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş tekerin, sistem duruncaya kadar teste tabi tutulması planlanmıştır. Testin sona ermesini takiben, jantların yapısal bütünlüğü ve hasar durumu değerlendirilecektir. Bu doğrultuda, hedef kilometre sınırı olarak cihaz arayüzüne yazılabilecek en yüksek değer olan 999 km girilmiştir. Teker üzerine uygulanan yük, 75 kg radyal yük olarak ayarlanmıştır. Normal bir insanın yürüme hızı genellikle 4-5 km/s arasında değişmektedir. Murtagh ve arkadaşlarının sağlıklı bireyler üzerinde yaptığı sistematik derleme çalışmasında, açık alanda sergilenen normal yürüyüş hızının ortalama 1,31 m/s (yaklaşık 4,7 km/s) olduğu belirtilmiştir [71]. Bu nedenle, test sisteminin kullanılacağı taşıma arabasının bir yaya tarafından manuel olarak hareket ettirileceği göz önünde bulundurularak, cihazın çalışma hızı bu değere en yakın hız olan 5 km/s olarak tercih edilmiştir. Bu seçim, gerçek kullanım senaryosunu yansıttığı gibi, literatürde rapor edilen insan yürüyüş verileriyle de örtüşmektedir. Model 1 (Şekil 2.49) ve model 2 (Şekil 2.48) jantlar, aynı parametreler kullanılarak ve aynı test cihazında sırasıyla test edilmiş olup, elde edilen veriler bulgular bölümünde sunulmuştur.




**Şekil 2. 47** Test parametrelerinin ayarlanması



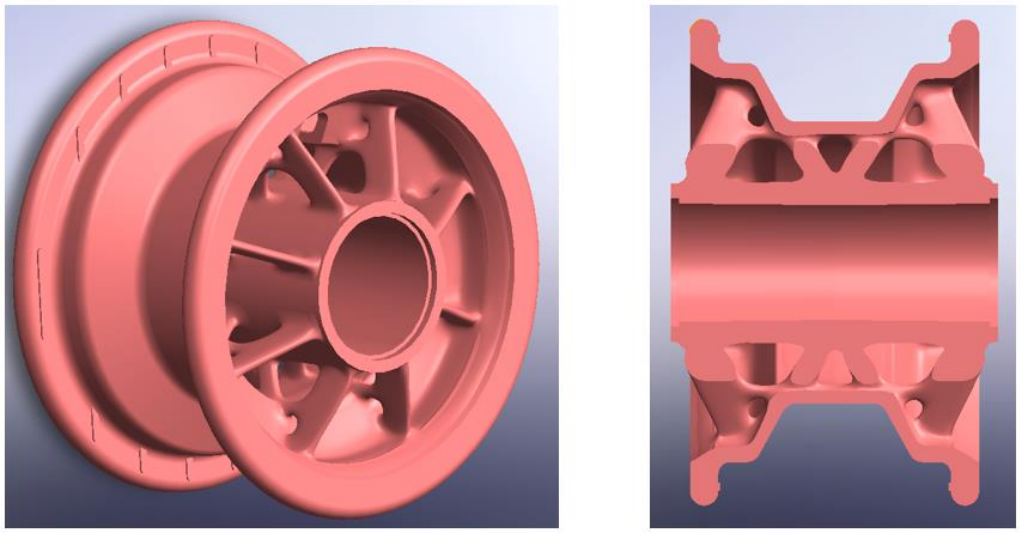
**Şekil 2. 48** Model 2 jantın dayanım ve ömür testi



**Şekil 2. 49** Model 1 jantın dayanım ve ömür testi

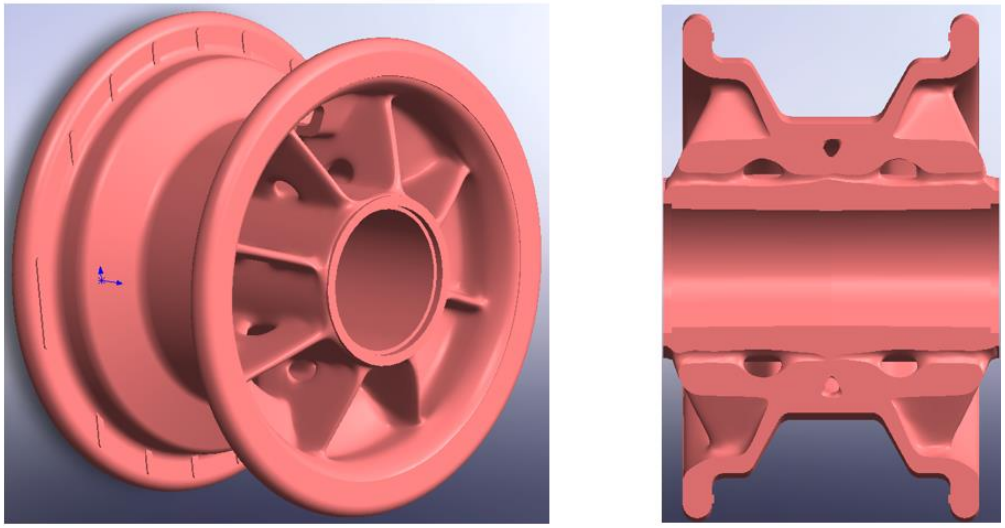
# 3
# BULGULAR

Topoloji optimizasyonu sonrası plastik jant model 2 165870,967 mm³ hacime ve 154,260 gr ağırlığa sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.1).



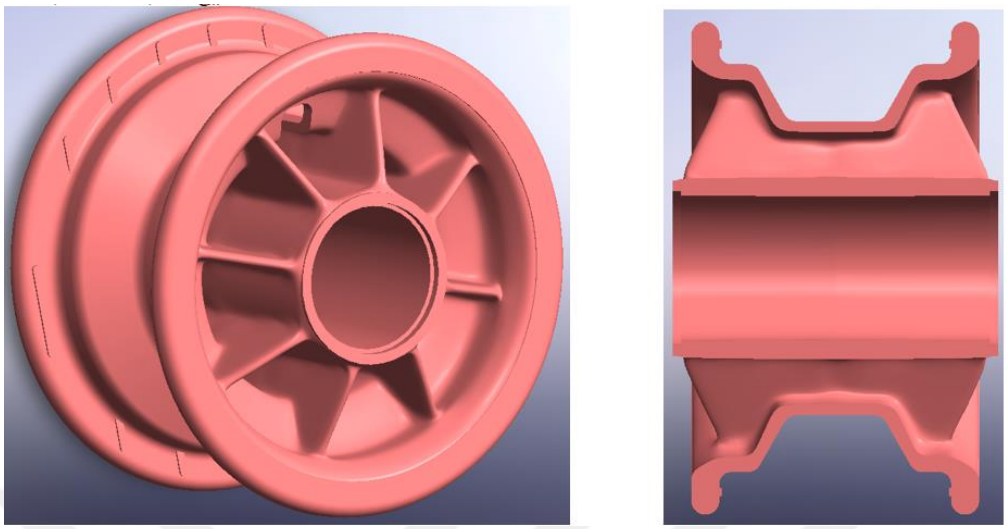
**Şekil 3. 1** Topoloji optimizasyonu sonucu plastik jant model 2

Topoloji optimizasyonu sonrası plastik jant model 3' ün 173019,41 mm³ hacime ve 160,889 gr ağırlığa sahip olduğu hesaplanmıştır (Şekil 3.2).



**Şekil 3. 2** Topoloji optimizasyonu sonucu plastik jant model 3

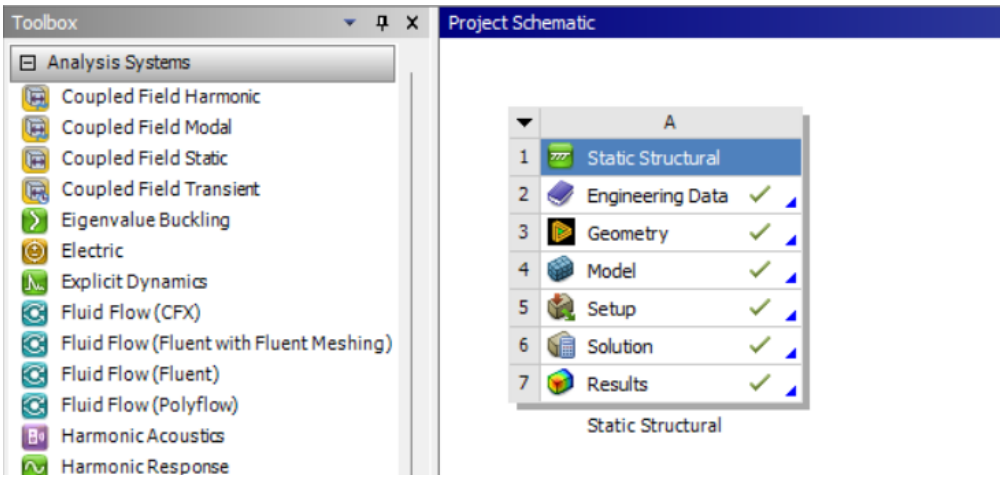
Topoloji optimizasyonu sonrası plastik jant model 4' ün ise 175985,49 mm³ hacime ve 163,700 gr ağırlığa sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.3).



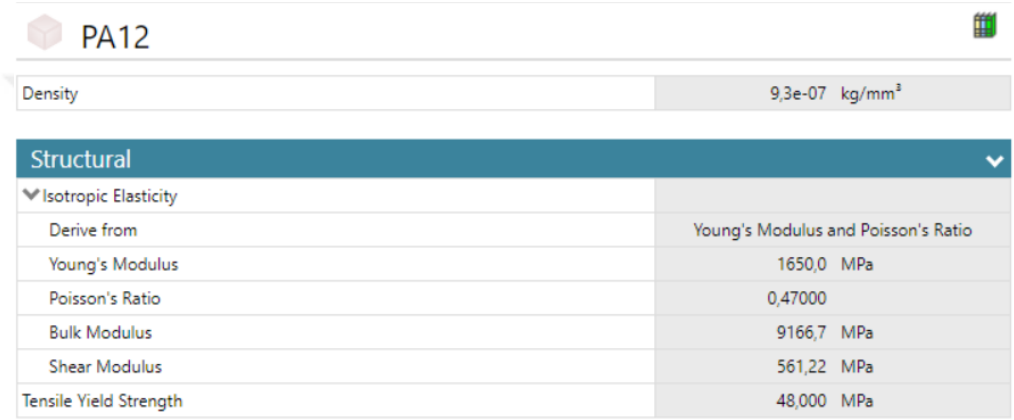
**Şekil 3. 3** Topoloji optimizasyonu sonucu plastik jant model 4

## 3.1 Yeni Plastik Jant Modellerinin Doğrulanması

Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yeni plastik jant modellerinin yapısal performanslarının doğrulanabilmesi amacıyla, analiz çalışmaları yeniden Ansys Workbench ortamında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Bu aşamada, her bir optimize edilmiş jant modeline daha önce uygulanan sınır şartları ve yükleme koşulları tekrar uygulanmış, böylece farklı tasarım varyasyonlarının mekanik davranışları karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Ayrıca, üretimde kullanılacak olan PA12 hammaddesi için gerekli mekanik özellikler Ansys malzeme kütüphanesine tanımlanarak analizler bu yeni hammaddenin mekanik özellikleri ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Böylece hem optimize edilmiş geometrilerin hem de üretim malzemesinin etkisi birlikte değerlendirilmiştir.

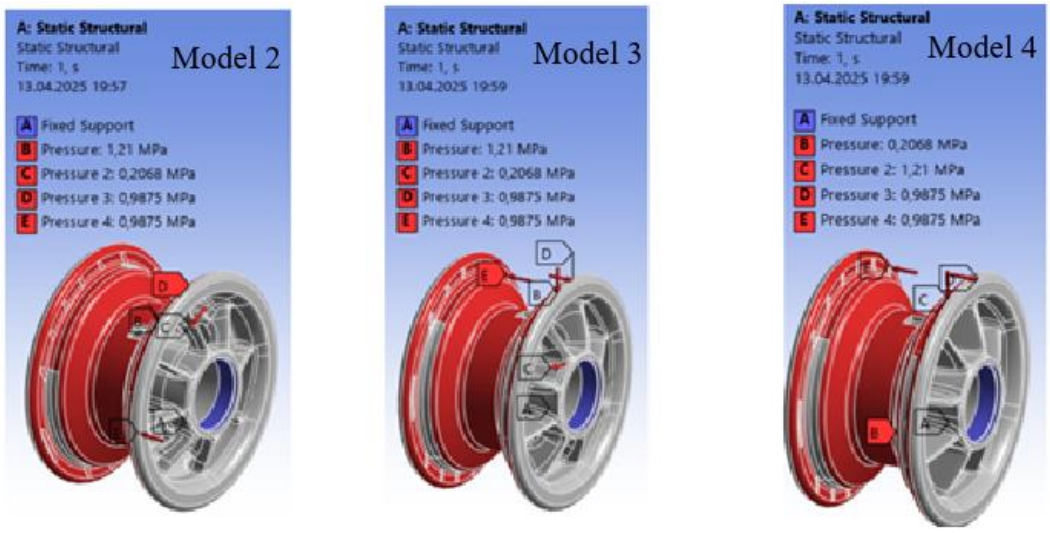



**Şekil 3. 4** Yeni jant modellerinin statik yapısal analizi proje adımları




**Şekil 3. 5** PA12 hammaddenin kütüphaneye kayıt edilmesi

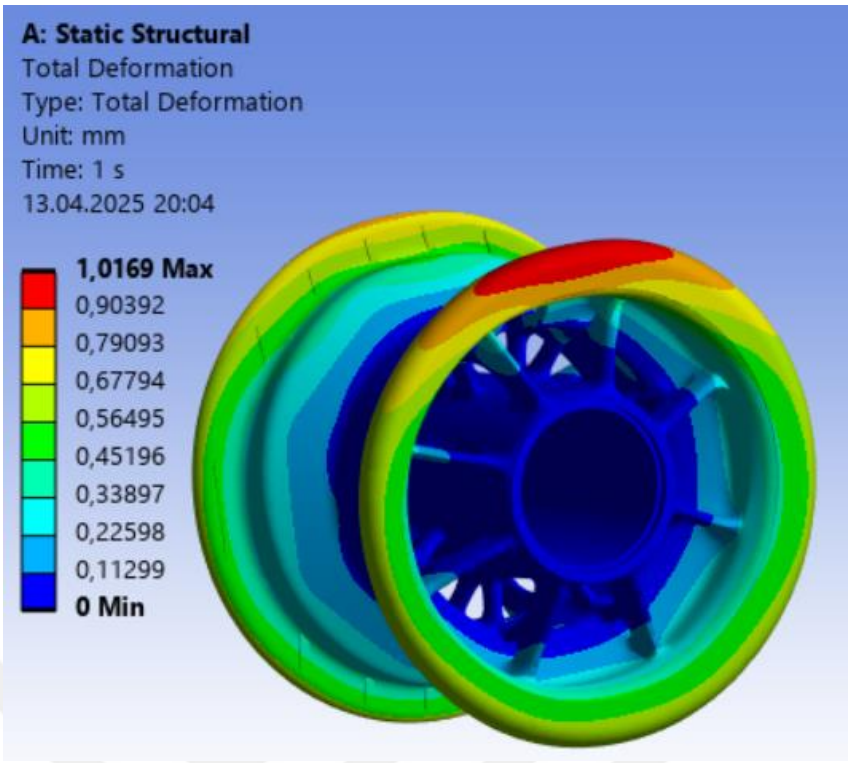
Yeni optimize edilmiş plastik jant modelleri üzerinde yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, daha önce uygulanan yükleme ve sabitleme adımları yeniden kullanılmıştır (Şekil 3.6). Gerçek çalışma koşullarını yansıtacak şekilde tanımlanan kuvvetler ve sınır şartları, optimize edilen geometrilere uygun olarak tekrar modellenmiştir. Ayrıca, yük yüzeylerinin doğru şekilde ayrıştırılabilmesi amacıyla önceki modelleme sürecinde kullanılan split komutu, yeni jant modellerinde de uygulanarak farklı bölgelere özgü yüklemelerin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, yeni tasarımların yapısal tepkilerinin doğru ve güvenilir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır.



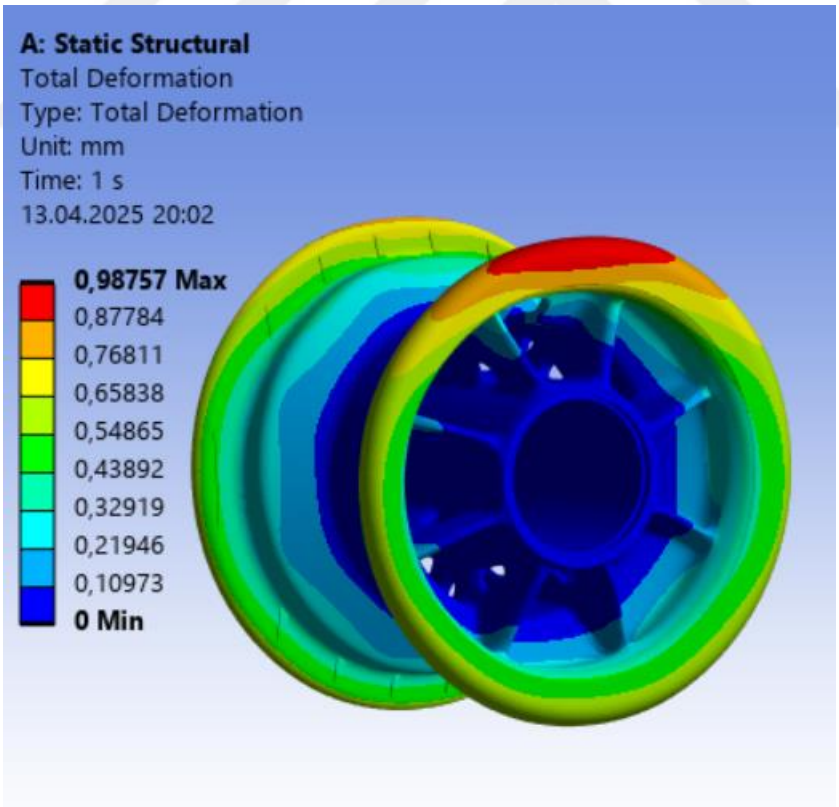

**Şekil 3. 6** Yeni model jantların sabitleme ve yükleme yüzeylerinin gösterimi

Yeni model jantlara, Ansys workbench sonuç modülünde kullanılan aynı analiz yöntemleri uygulanmıştır. Plastik jantların toplam deformasyon, eşdeğer Von Mises gerilmesi ve güvenlik katsayısı gibi mühendislik parametreleri değerlendirilerek, yükler altındaki performansları incelenmiştir. Bu analizler, jantların şekil değiştirmesini, malzemenin plastisite sınırına yaklaşımını ve güvenlik seviyelerini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, jantların dayanıklılığı ve güvenliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

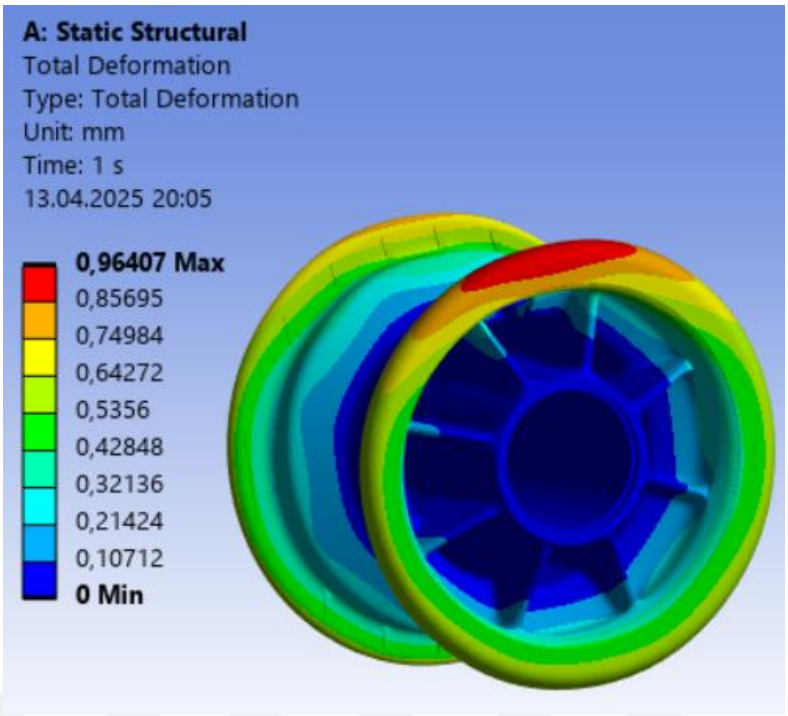
Analiz sonuçlarına göre maksimum toplam deformasyon miktarları plastik jant model 2' de 1,0169 mm (Şekil 3.7), model 3' te 0,98757 mm (Şekil 3.8), model 4' te 0,96407 mm (Şekil 3.9) olarak jant yanaklarında meydana gelmiştir.




**Şekil 3. 7** Plastik jant model 2'nin toplam deformasyonu

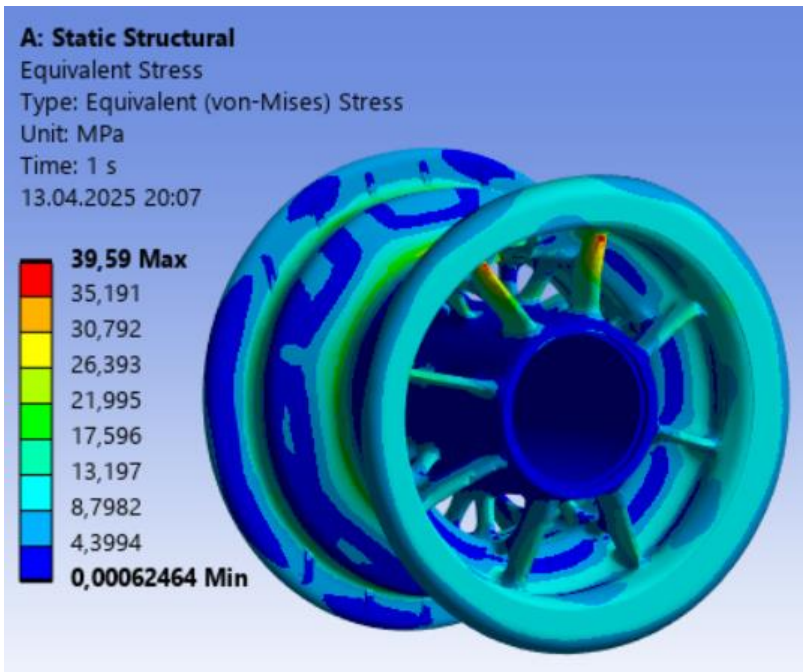



**Şekil 3. 8** Plastik jant model 3'ün toplam deformasyonu

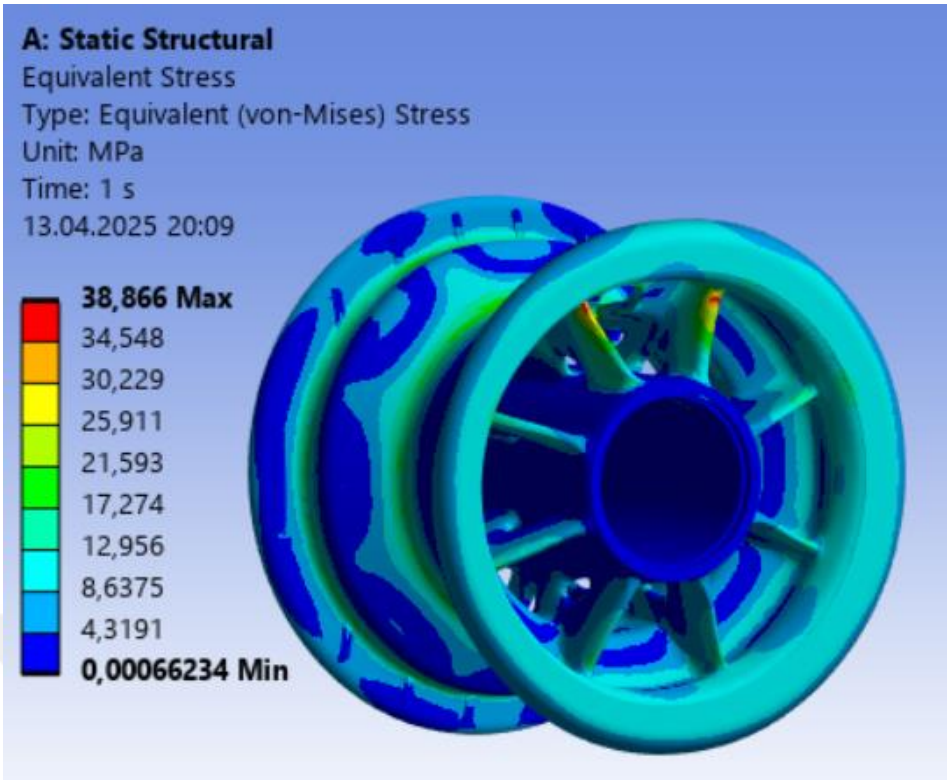



**Şekil 3. 9** Plastik jant model 4'ün toplam deformasyonu

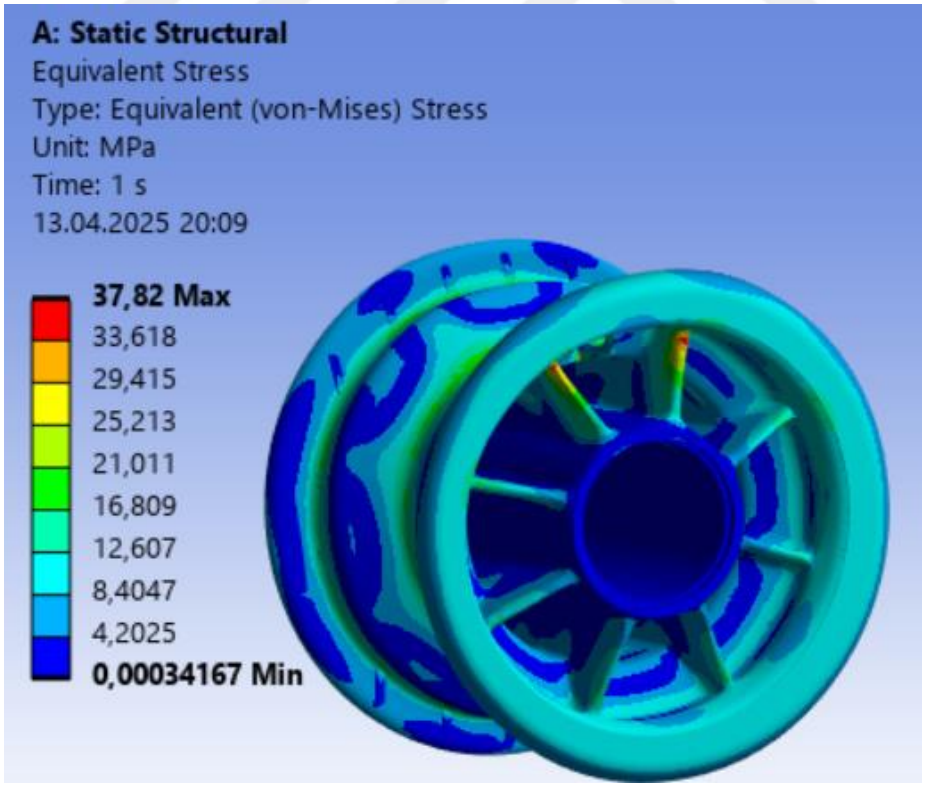
Analiz sonuçlarına göre jant modellerinin maksimum eş değer gerilmeleri jant model 2'de 39,590 MPa (Şekil 3.10), model 3'te 38,866 MPa (Şekil3.11), model 4'te 37,820 MPa (Şekil3.12) olarak jant federlerinin jantın dış çemberiyle birleştiği noktalarda oluşmaktadır.




**Şekil 3. 10** Plastik jant model 2'nin eş değer gerilmesi

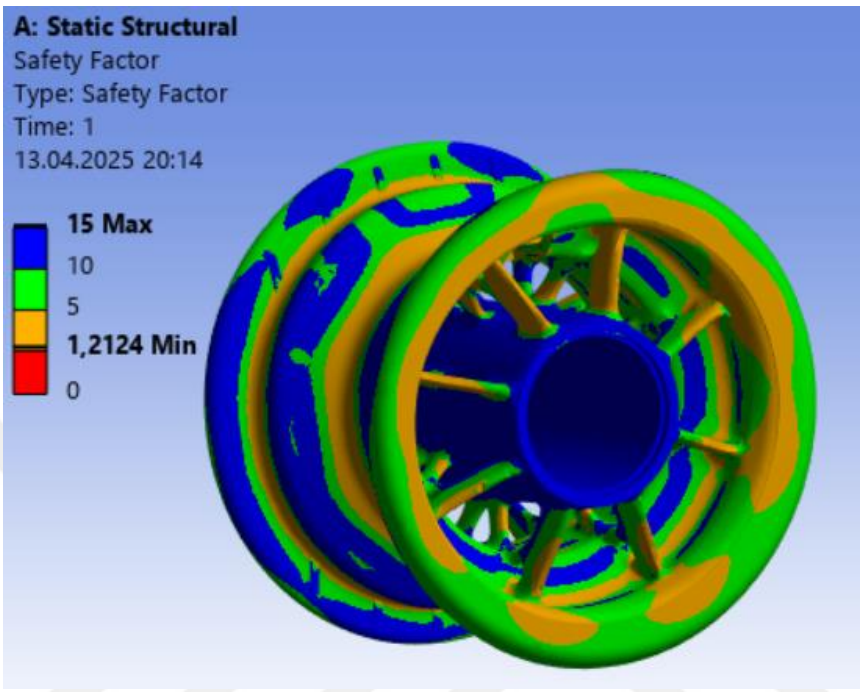



**Şekil 3. 11** Plastik jant model 3'ün eş değer gerilmesi

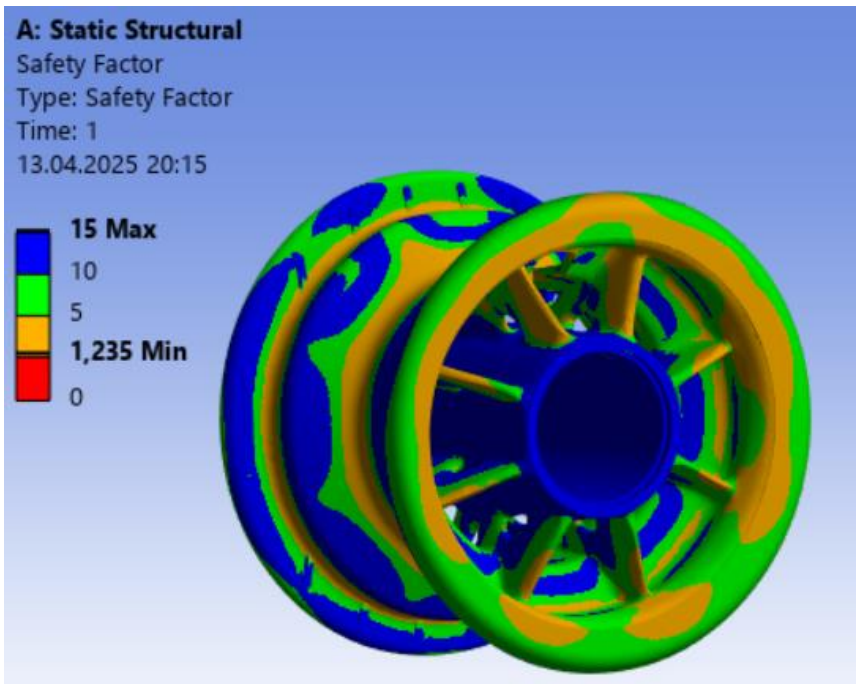



**Şekil 3. 12** Plastik jant model 4'ün eş değer gerilmesi

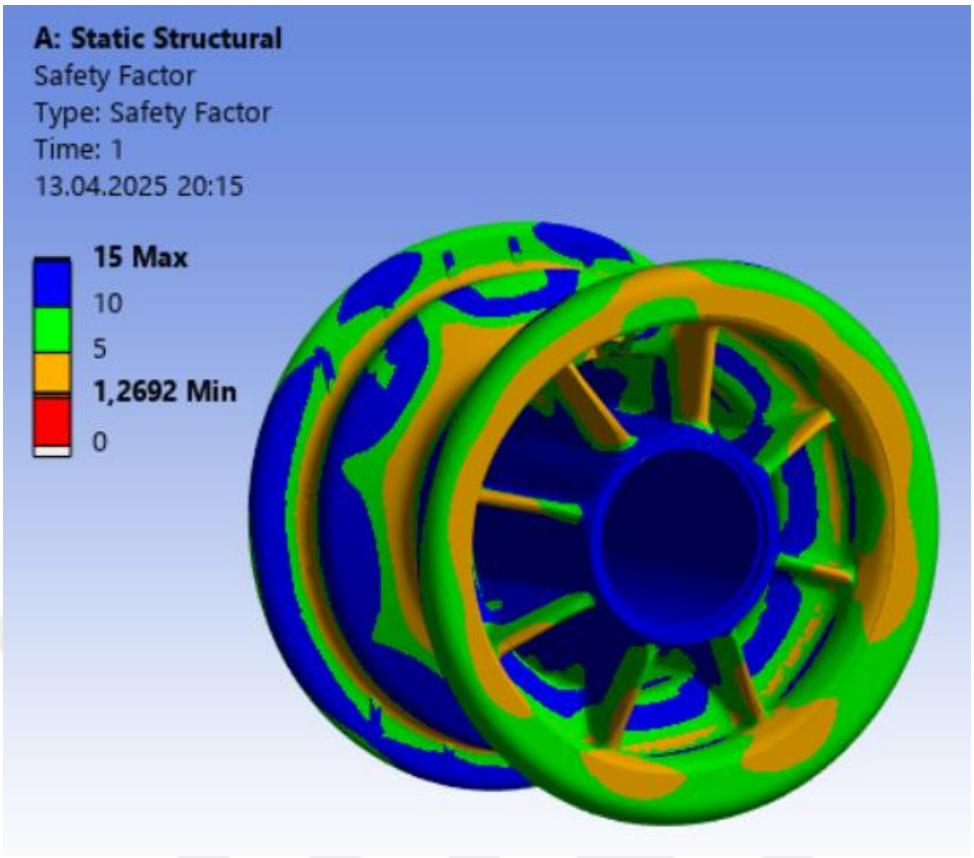
Analiz sonuçlarına göre, jant modellerinin minimum güvenlik katsayıları sırasıyla model 2'de 1,2124 (Şekil 3.13), model 3'te 1,2350 (Şekil3.14) ve model 4'te 1,2692 (Şekil 3.15) olarak elde edilmiştir. Hacim kesiri oranı arttıkça minimum güvenlik katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir.




**Şekil 3. 13** Plastik jant model 2'nin güvenlik katsayısı

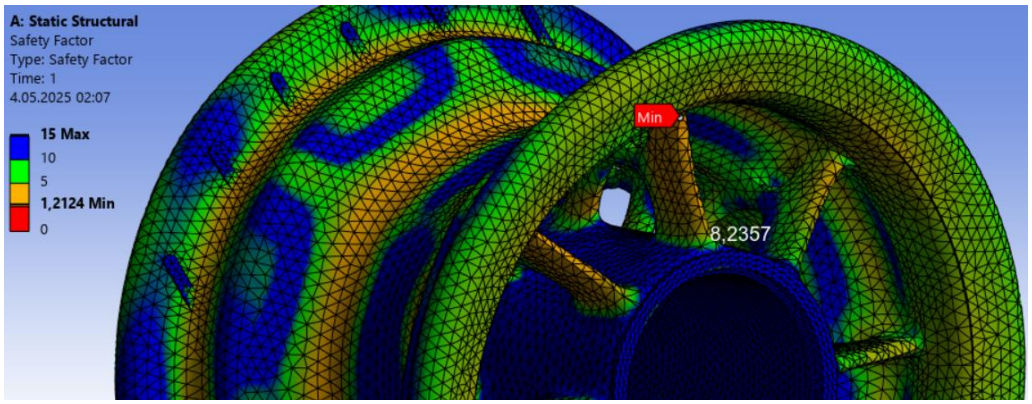



**Şekil 3. 14** Plastik jant model 3'ün güvenlik katsayısı




**Şekil 3. 15** Plastik jant model 4'ün güvenlik katsayısı

Feder bölgesinde yapılan tasarım iyileştirmesi sonucunda, yaklaşık bu bölgedeki güvenlik katsayısı 8,2357 olarak ölçülmüştür. Minimum güvenlik katsayısının oluştuğu bölgenin ise, federin jantın dış çemberine bağlandığı nokta olduğu görülmüştür (Şekil3.16).



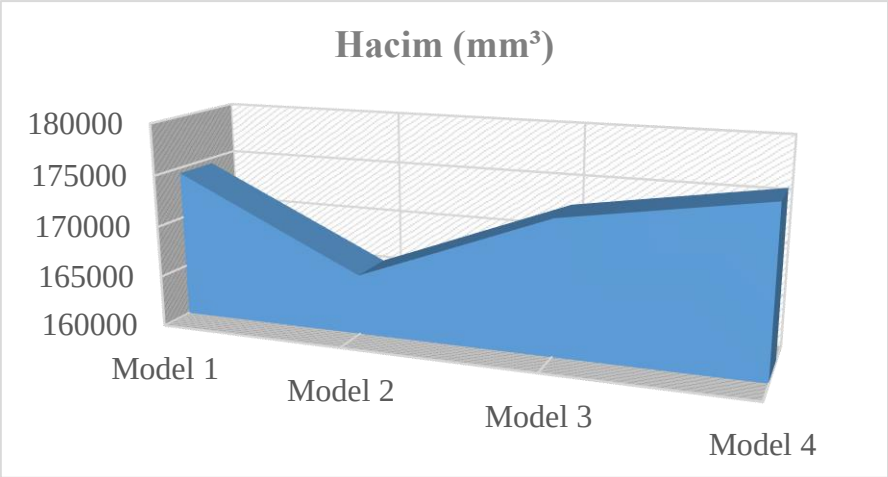

**Şekil 3. 16** Model 2 jantın feder bölgesindeki güvenlik katsayıları

**Tablo 3. 1** Tüm jant modellerinin yapısal parametrelerinin kıyaslanması

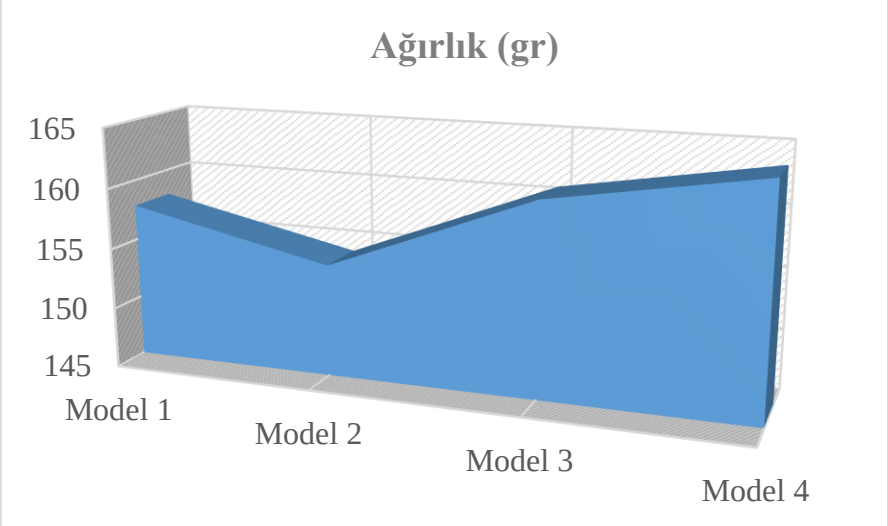
| **Yapısal parametreler** | **Model 1** | **Model 2** | **Model 3** | **Model 4** |
|---|---|---|---|---|
| Hacim ($mm^3$) | 174453,038 | 165870,967 | 173019,410 | 175985,490 |
| Ağırlık (gr) | 157,880 | 154,260 | 160,889 | 163,700 |
| Toplam Deformasyon (mm) | 1,0631 | 1,0169 | 0,98757 | 0,96407 |
| Maksimum Eşdeğer Gerilme (MPa) | 32,792 | 39,590 | 38,860 | 37,820 |
| Güvenlik Katsayısı | 1,1283 | 1,2124 | 1,2350 | 1,2692 |

Tüm jant modellerinin yapısal parametreleri Toblo 3.1'de kıyaslanmıştır. Ayrıca plastik jant model 1'in tasarım iyileştirme çalışması neticesinde revize edilen model 180818,68 $mm^3$ hacime ve 168,161 gr ağırlığa sahip olduğu bilinmektedir. Yani topoloji optimizasyonu uygulanan model, plastik jant model 1'in revize edilmiş versiyonudur.

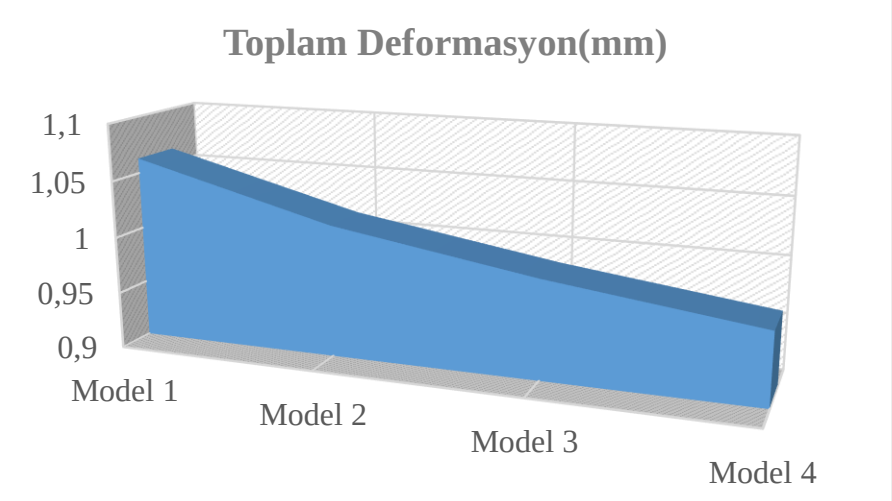
Tüm jant modellerinin hacim değişimleri Şekil 3.17'de, ağırlık değişimleri Şekil 3.18'de, toplam deformasyon değişimleri Şekil 3.19'da, maksimum eşdeğer gerilme değerlerinin değişimi Şekil 3.20'de, güvenlik katsayısı değişimleri Şekil 3.21'de grafik olarak verilmiştir.



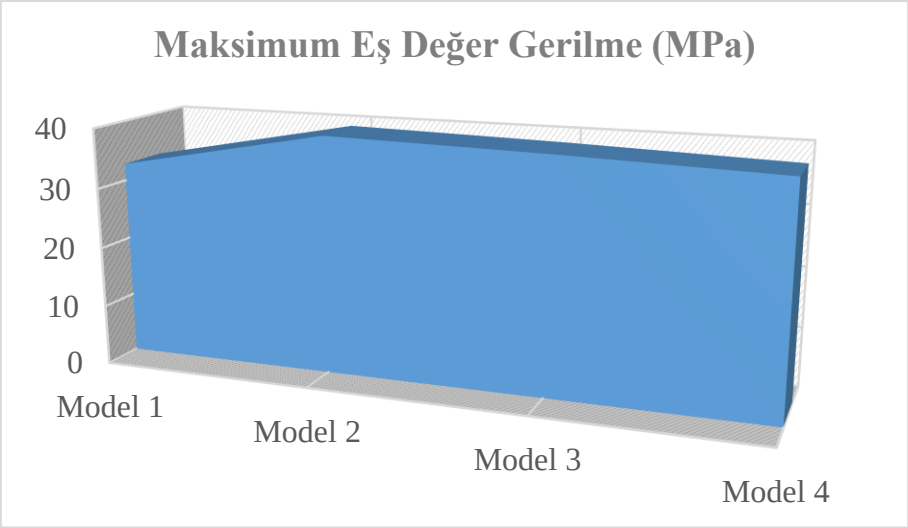

**Şekil 3. 17** Tüm jant modellerinin hacim değişimleri



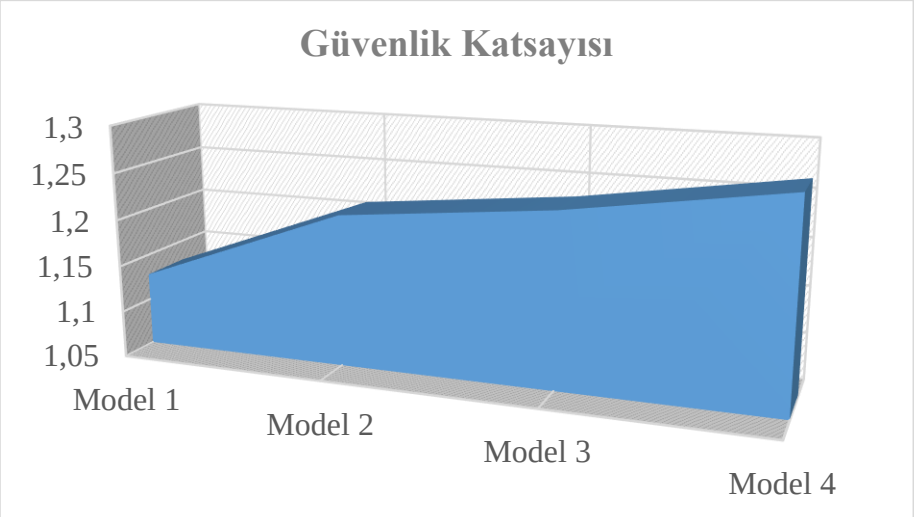

**Şekil 3. 18** Tüm jant modellerinin ağırlık değişimleri




**Şekil 3. 19** Tüm jant modellerinin toplam deformasyon değişimleri

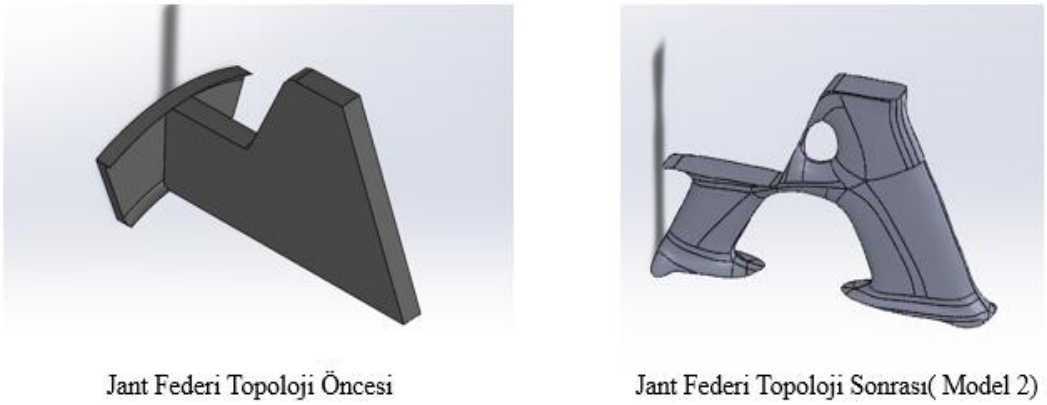



**Şekil 3. 20** Tüm jant modellerinin maksimum eşdeğer gerilme değerlerinin değişimi




**Şekil 3. 21** Tüm jant modellerinin güvenlik katsayısı değişimleri

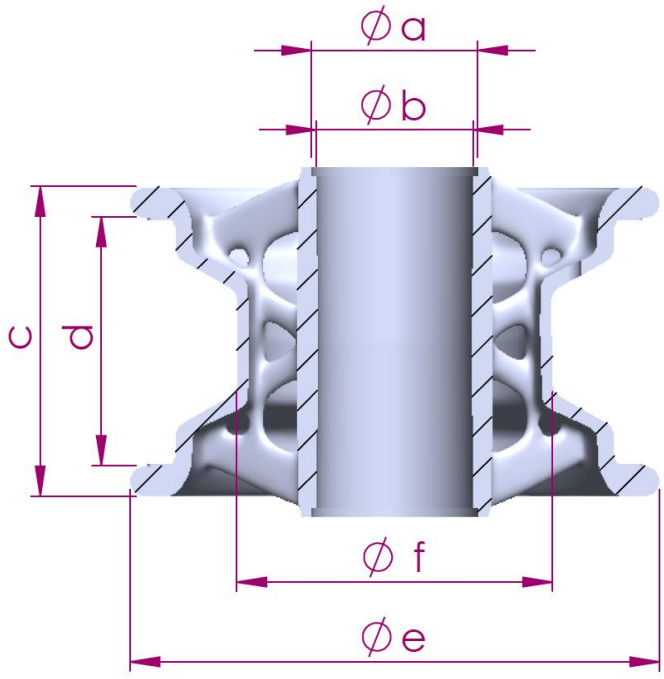
Bu çalışmada uygulanan topoloji optimizasyonu, plastik jant geometrisinin yalnızca feder bölgeleriyle sınırlandırılmıştır. Jantın dış çemberi ve jant göbeği, yapısal bütünlük ve montaj işlevlerinin korunması amacıyla optimizasyon sürecine dahil edilmemiştir. Feder bölgesine uygulanan topoloji optimizasyonu sonucunda, plastik jant model 2 için bu alanda %50,59 oranında hammadde tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir (Şekil 3.22).




**Şekil 3. 22** Topoloji öncesi ve sonrası jant federi değişimi

## 3.2 Numune İmalatı

Yapılan analizler sonucunda, tüm optimize edilmiş jant modellerinin güvenlik katsayısı açısından yeterli düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu modeller arasında, özellikle en düşük ağırlığa sahip olan model 2, üretim süreci için tercih edilmiştir. Ayrıca, model 2'nin güvenlik katsayısının referans model olan model 1'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Seçici lazer sinterleme yöntemiyle üretilen yeni jant modelinin üretim sonrası genel ölçüleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.




**Şekil 3. 23** Model 2 janta ait genel ölçüler

**Tablo 3. 2** Model 2 jantın test öncesi ölçüm sonuçları

| Ölçüler | Tasarım ölçüleri (mm) | Model 2 jantın ölçüleri (mm) | Ölçüm sapma yüzdesi (%) |
|---|---|---|---|
| a | 37,00 | 36,97 | -0,081 |
| b | 34,95 | 34,90 | -0,143 |
| c | 69,00 | 68,92 | -0,115 |
| d | 55,50 | 55,44 | -0,108 |
| e | 118,20 | 118,08 | -0,101 |
| f | 70,50 | 70,42 | -0,113 |

**Tablo 3. 3** Model 1 jantın test öncesi ölçüm sonuçları

| Ölçüler | Tasarım ölçüleri (mm) | Model 2 jantın ölçüleri (mm) | Ölçüm sapma yüzdesi (%) |
|---|---|---|---|
| a | 37,00 | 37,03 | 0,081 |
| b | 34,95 | 34,99 | 0,114 |
| c | 69,00 | 69,08 | 0,130 |
| d | 55,50 | 55,56 | 0,108 |
| e | 118,20 | 118,31 | 0,093 |
| f | 70,50 | 70,57 | 0,099 |

Model 2 jant ile model 1 jant arasındaki tasarım farklılıkları yalnızca jantın feder bölgesinde olduğundan, test numunesi olan model 1 jantın genel ölçüleri, model 2 jantta belirtilen genel ölçüler (Şekil 3.23) referans alınarak belirlenmiş ve aşağıdaki tabloda sunulmuştur (Tablo 3.3).

## 3.3 Dayanım ve Ömür Testi

Dayanım ve ömür testlerinin gerçekleştirilmesinde, öncelikle topoloji optimizasyonu uygulanmış olan model 2 jant, ardından ise referans jant modeli olan model 1 jant test edilmiştir. Test süreci boyunca her iki model de aynı koşullar altında değerlendirilmiştir. Test çalışmasında, tekerlek modellerine 75 kilogramlık radyal yük uygulanmış ve test sırasında dönme hızı yaklaşık 5 km/s olarak sabitlenmiştir. Test, sistemin tamamen durmasına kadar kesintisiz olarak devam ettirilmiş; böylece her iki modelin yapısal dayanımı ve ömür performansı gerçekçi çalışma koşullarına benzer bir ortamda karşılaştırmalı olarak gözlemlenmiştir.

Testler sonucunda, topoloji optimizasyonu uygulanmış ve PA12 (poliamid 12) hammaddesi kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş olan model 2 jant, 75 kg radyal yük ve 5 km/s sabit hız altında toplam 27 saat 49 dakika boyunca kesintisiz olarak çalışmış; bu süre zarfında 139,08 kilometre yol kat ettikten sonra test cihazı durmuştur (Şekil 3.24). Öte yandan, plastik enjeksiyon yöntemiyle PP (polipropilen) malzemeden üretilmiş olan model 1 jant ise aynı test parametreleri altında 20 saat 44 dakika boyunca dayanabilmiş ve bu süre içinde 103,67 kilometrelik bir mesafe kat edilmiştir (Şekil 3.25).




**Şekil 3. 24** Model 2 jantın test sonuç ekranı




**Şekil 3. 25** Model 1 jantın test sonuç ekranı

Model 1 ve model 2 jantlara yönelik gerçekleştirilen testlerin her ikisi de, loadcell tarafından anlık olarak ölçülen tekerleğe uygulanan radyal yükte ani bir değişim tespit edilmesi üzerine, test cihazı tarafından otomatik olarak sonlandırılmıştır. Testlerin ardından her iki model üzerinde kapsamlı fiziksel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan gözlemler doğrultusunda, her iki jant modelinde de göbek bölgesine sıkı geçme yöntemiyle monte edilen 6003 3RS rulmanların, ömür testi boyunca maruz kaldıkları yüklemeler sonucunda göbek içerisinde gevşeyerek pozisyonlarını kaybettikleri ve yerlerinden çıktıkları belirlenmiştir. Ayrıca rulmanlar ile test cihazına bağlanan mil üzerinde belirgin bir sıcaklık artışı gözlemlenmiş, bu sıcaklık artışı jant göbeğinde elle hissedilebilir düzeyde fark edilmiştir. Bunun yanı sıra, her iki jant üzerinde çeşitli düzeylerde deformasyonlar, malzeme yüzeylerinde şekil bozulmaları ve bazı bölgelerde kırılmalar tespit edilmiştir. Bu yapısal bozulmalar, özellikle test sırasında uygulanan yüklerin zamana bağlı oluşturduğu yorulma ile ilişkilendirilmektedir.

Testin ardından model 2 jant üzerinde yapılan detaylı incelemelerde, feder ile jantın dış çemberinin birleşim noktalarında belirgin çatlaklar ve kırılmalar tespit edilmiş, bu durum jantın genel yapısal bütünlüğünün bozulmasına yol açmıştır (Şekil 3.27). Özellikle, subap boşluğunun bulunduğu bölgede yer alan federlerde meydana gelen deformasyonlar daha belirgin olup, bu bölge yapılan analizlerde en düşük güvenlik katsayısına sahip noktalar olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, jant üzerindeki yüklerin ve gerilmelerin feder ve subap boşluğu çevresinde yoğunlaştığını ve bu nedenle yorulma hasarının burada başladığını göstermektedir. Ayrıca, jant

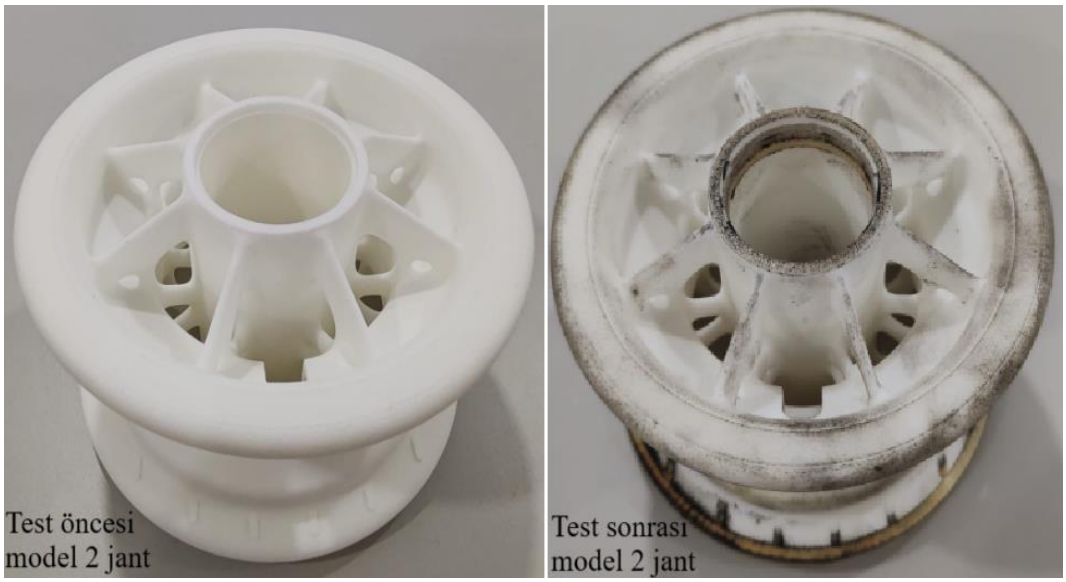
göbeğinde yer alan ve rulmanın montajlandığı iç çapta genişleme meydana gelmiş olup rulmanın bu bölgeye boşluklu bir şekilde oturduğu belirlenmiştir (Şekil 3.26). Bu gevşeme, rulmanın hem radyal hem de eksenel hareketliliğini artırarak, yapısal stabiliteyi olumsuz yönde etkilemiştir.



**Şekil 3. 26** Model 2 jantın ömür testi sonrası genel görünümü



**Şekil 3. 27** Model 2 jant federlerinin deformasyonu




**Şekil 3. 28** Test öncesi ve sonrası model 2 jant görünümü

Model 2 jantın test öncesi ve sonrası görünümü Şekil 3.28'de verilmiştir. Model 2 jant numunesi üzerinde gerçekleştirilen ömür testi sonrasında yapılan ölçüm çalışmaları kapsamında, test öncesi ve sonrası alınan boyutsal veriler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve bu ölçümler arasındaki sapmalar ile yüzde değişim oranları Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, jant göbek bölgesinde rulman ile montajın gerçekleştirildiği iç çap (b ölçüsü), test süresince maruz kaldığı yüklemeler ve termal etkiler sonucunda belirgin şekilde genişlemiş ve %1,862 oranında bir artış göstermiştir. Bu artışa karşılık gelen mutlak ölçü farkı 0,65 mm olarak kaydedilmiştir. Bu durum, rulmanın oturduğu bölgede gevşeme oluştuğuna ve sıkı geçme toleransının test sonrası bozulduğuna işaret etmektedir.

Benzer şekilde, rulman flanşının yerleştiği iç çap (a ölçüsü) de test sonrası %1,244 oranında artmış ve bu bölgede de yapısal bir genişleme gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, jantın yanak bölgesinde iç hava basıncı ve uygulanan radyal yük etkisiyle dışa doğru esneme meydana gelmiş; bu esneme sonucunda jant yanakları arasındaki mesafe (c ölçüsü) %1,828 oranında artış göstererek maksimum 70,18 mm olarak ölçülmüştür. Jant yanaklarının içten içe olan mesafesi (d ölçüsü) de aynı yönde genişleme göstermiş olup, bu bölgedeki artış oranı %1,713 olarak hesaplanmıştır. Jant yanaklarının dış çapı (e ölçüsü) ile jantın dış çember çapı (f ölçüsü) ise, test süresince oluşan yapısal deformasyonlar nedeniyle dairesellik özelliklerini kısmen

kaybetmiş; bu bölgelerde ölçülen en küçük çap değerleri tabloda belirtilmiştir (Tablo 3.4).

**Tablo 3. 4** Model 2 jantın test sonrası ölçüm sonuçları

| **Ölçüler** | **Model 2 jantın test öncesi ölçüleri (mm)** | **Model 2 jantın test sonrası ölçüleri (mm)** | **Ölçüm sapma yüzdesi (%)** |
|---|---|---|---|
| a | 36,97 | 37,43 | 1,244 |
| b | 34,90 | 35,55 | 1,862 |
| c | 68,92 | 70,18 | 1,828 |
| d | 55,44 | 56,39 | 1,713 |
| e | 118,08 | 117,97 | -0,093 |
| f | 70,42 | 70,24 | -0,255 |

Test sonrası gerçekleştirilen detaylı incelemeler sonucunda, model 1 jant numunesinde, özellikle feder ile jantın iç göbek birleşim noktalarında belirgin çatlaklar ve kırılmalar tespit edilmiştir (Şekil 3.30). Bu hasarlar, jantın genel yapısal bütünlüğünün bozulmasına yol açmış olup, jantın yük taşıma kapasitesinin azaldığını göstermektedir. Özellikle model 2 jantta da benzer şekilde, subap boşluğunun bulunduğu bölgede yer alan federlerde meydana gelen deformasyonlar daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu bölge, yapılan analizler sonucunda en düşük güvenlik katsayısına sahip alan olarak öne çıkmakta ve bu durum, yüklerin ve gerilmelerin feder ve subap boşluğu etrafında yoğunlaştığını, dolayısıyla bu bölgedeki yorulma hasarının başlangıç noktasını işaret etmektedir.

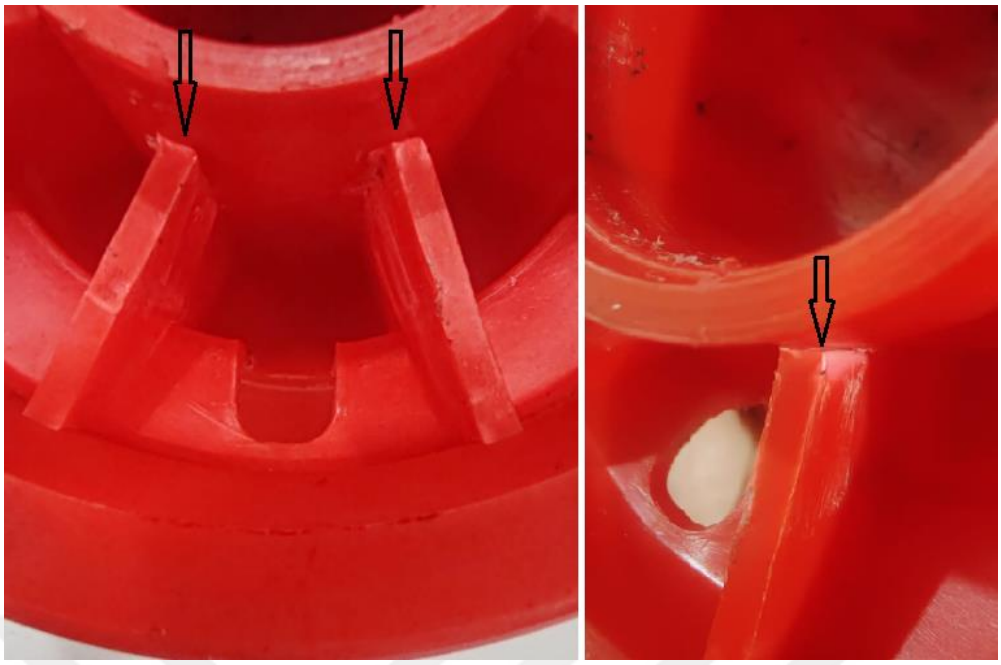
Ayrıca, jant göbeğinde yer alan rulman montajının yapıldığı iç çapta, model 2 jantta gözlemlenen genişleme aynı şekilde meydana gelmiş ve rulman bu bölgeye boşluklu bir şekilde oturduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.29). Bu gevşeme, rulmanın

hem radyal hem de eksenel yönde hareket etmesine neden olmuş ve bu durum, jantın yapısal stabilitesini olumsuz yönde etkileyerek uzun süreli kullanımda daha büyük sorunların yaşanma potansiyelini artırmıştır.

Ek olarak, jantın dış çemberinde, özellikle form geçiş bölgelerindeki radyüslerde, radyal yükler ve lastik iç hava basıncının etkisiyle yükleme meydana gelmiş ve bu etkileşim sonucunda plastik deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bu deformasyonlar, jant yüzeyinde kalıcı renk değişimlerine yol açmış olup, renk geçişi kırmızıdan beyaza doğru belirginleşmiştir (Şekil 3.31). Bu renk değişimi, malzeme üzerinde meydana gelen plastik deformasyonların görsel bir göstergesi olarak kabul edilmiştir ve jant üzerinde kalıcı yapısal deformasyonların oluştuğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 3. 29** Model 1 jantın ömür testi sonrası genel görünümü



**Şekil 3. 30** Model 1 jant federlerinin deformasyonu



**Şekil 3. 31** Model 1 jant dış çemberindeki deformasyon izleri

Model 1 jantın test öncesi ve sonrası görünümü Şekil 3.32'de verilmiştir. Model Model 1 jant numunesi üzerinde gerçekleştirilen ömür testleri sonrasında, test öncesi ve sonrası alınan boyutsal veriler detaylı bir şekilde karşılaştırılmış ve ölçümler ile yüzdelik değişim oranları Tablo 3.4'te gösterilmiştir. Elde edilen

verilere göre, jantın göbek kısmında bulunan iç çap (b ölçüsü), rulman montajı sırasında yaşanan yüklemeler ve termal etkiler nedeniyle model 2 jantta olduğu gibi belirgin bir şekilde genişleyerek %2,372 oranında bir artış göstermiştir. Bu artış, 0,83 mm'lik bir fark olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, rulmanın yerleştiği bölgede gevşeme meydana geldiğini ve sıkı geçme toleranslarının test sonunda bozulduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan, rulman flanşının yerleştiği iç çap (a ölçüsü) test sonrasında %1,782 oranında bir büyüme göstermiştir. Ayrıca, jantın yanak kısmında, iç hava basıncı ve uygulanan radyal yük etkisiyle dışa doğru esneme meydana gelmiş ve bu nedenle yanaklar arasındaki mesafe (c ölçüsü) %2,258 oranında artmıştır. En yüksek ölçüm ise 70,64 mm olarak ölçülmüştür. Jant yanaklarının iç kısmındaki mesafe (d ölçüsü) de benzer şekilde genişleyerek %1,889 oranında bir artış göstermiştir.

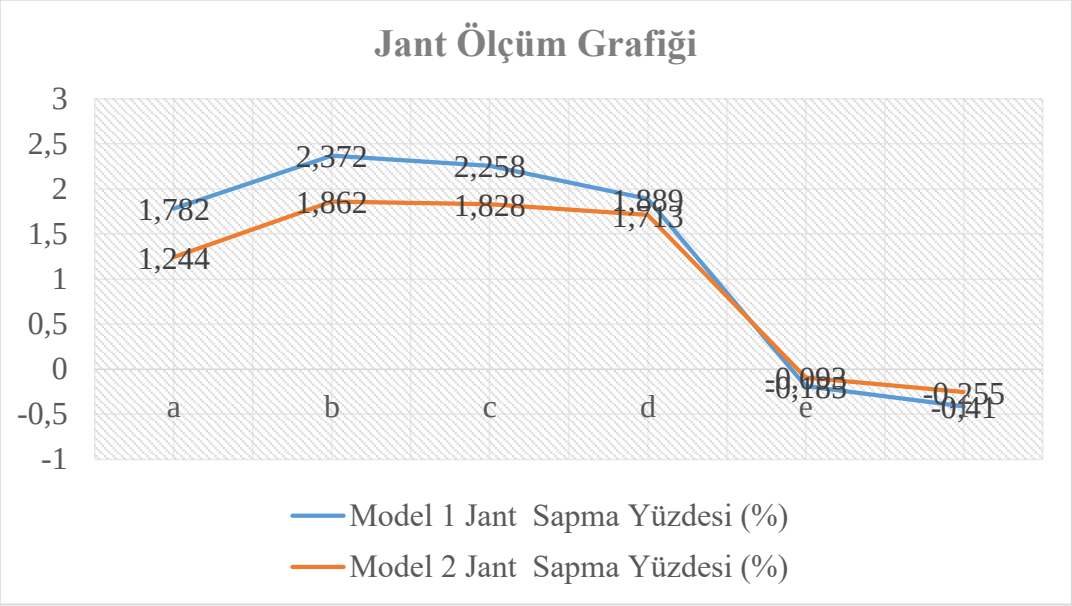
Son olarak, jantın dış çapı (e ölçüsü) ve dış çember çapı (f ölçüsü) ise, test sırasında yaşanan yapısal deformasyonlar nedeniyle daireselliklerini kısmen kaybetmiş ve bu bölgedeki en küçük çap ölçümleri tabloda belirtilmiştir (Tablo3.5).

**Tablo 3. 5** Model 1 jantın test sonrası ölçüm sonuçları

| **Ölçüler** | **Model 1 jantın test öncesi ölçüleri (mm)** | **Model 1 jantın test sonrası ölçüleri (mm)** | **Ölçüm sapma yüzdesi (%)** |
|---|---|---|---|
| a | 37,03 | 37,69 | 1,782 |
| b | 34,99 | 35,82 | 2,372 |
| c | 69,08 | 70,64 | 2,258 |
| d | 55,56 | 56,61 | 1,889 |
| e | 118,31 | 118,09 | -0,185 |
| f | 70,57 | 70,28 | -0,410 |




**Şekil 3. 32** Test öncesi ve sonrası model 1 jant görünümü




**Şekil 3. 33** Model 1 ve model 2 jantların ölçüm sapma yüzdeleri

Test öncesi ve test sonrası yapılan ölçüm sonuçlarına göre model 1 ve model 2'ye ait ölçüm sapma yüzlerinin grafiksel karşılaştırması Şekil 3.33'te verilmiştir.

## 3.4 Maliyet Analizi

Bu çalışmada yer alan model 1 jant, geleneksel plastik enjeksiyon yöntemiyle PP hammaddeden üretilmiş olup, kalıplı üretim süreçlerine özgü maliyetleri içermektedir. Öte yandan, model 2 jant ise kalıba ihtiyaç duymayan eklemeli imalat

teknolojilerinden biri olan seçici lazer sinterleme yöntemi kullanılarak PA12 hammadde ile üretilmiştir. Model 1 jantın birim maliyetleri belirlenirken, ilgili plastik enjeksiyon üretim tesisine ait üretim verileri dikkate alınmıştır. Model 1 jantın üretiminde, tek gözlü enjeksiyon kalıbı ve 160 ton kapasiteli plastik enjeksiyon makinesi kullanıldığı; kalıbın yaklaşık 500.000 adet baskı ömrüne ve çevrim süresinin 45 saniyeye sahip olduğu dikkate alınarak, tek bir personel ile gerçekleştirilen üretime ait yaklaşık maliyet kalemleri oluşturulmuştur (Tablo 3.6). Baskı maliyeti; bakım maliyetleri, sarf giderleri, enerji tüketimi, üretim tesisine ait genel giderler ve işçilik maliyetleri gibi, birim jant maliyetine etki edebilecek kalemlerden oluşmaktadır. Buna karşılık, model 2 jantın maliyeti, seçici lazer sinterleme yöntemiyle gerçekleştirilen üretim esas alınarak; baskı tablasına tekrarlı olarak yerleştirilebilen 42 parçalık bir üretimden elde edilen güncel seri üretim birim satın alma maliyeti ile tek bir numune için hesaplanan birim satın alma maliyeti referans alınarak karşılaştırılmıştır (Tablo 3.7).

**Tablo 3. 6** Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimin maliyeti

| **Maliyetler** | | **Birim Fiyat** | **Jant Birim Maliyeti** |
|---|---|---|---|
| Numune Üretimi | Kalıp Maliyeti | 320.000,00 TL/adet | 320.000,00 TL/adet |
| | Hammadde Maliyeti | 88,00 TL/kg | 16,67 TL/adet |
| | Baskı Maliyeti | 900,00 TL/saat | 11,25 TL/adet |
| | Toplam Maliyet | | 320.027,92 TL/adet |
| Seri Üretim | Kalıp Maliyeti | 320.000,00 TL/adet | 0,64 TL/adet |
| | Hammadde Maliyeti | 88,00 TL/kg | 16,67 TL/adet |
| | Baskı Maliyeti | 900,00 TL/saat | 11,25 TL/adet |
| | Toplam Maliyet | | 28,56 TL/adet |

**Tablo 3. 7** Eklemeli imalat yöntemi ile üretimin maliyeti

| **Maliyetler** | **Birim Fiyat** |
|---|---|
| Seri Üretim | 1500,00 TL/adet |
| Numune Üretimi | 8000,00 TL/adet |

Yapılan maliyet karşılaştırmasına göre, arge aşamasında ürün geliştirme süreci sonucunda elde edilen modelin numune üretimi ve doğrulama testlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, geleneksel imalat yöntemi olan plastik enjeksiyonla üretilebilmesi için gerekli kalıp maliyetinin önemli bir gider kalemi oluşturduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, doğrulama testleri ve arge süreci için numune üretiminde eklemeli imalat yönteminin tercih edilmesi durumunda, maliyetin geleneksel imalata kıyasla yaklaşık 1/40 oranında olduğu görülmüştür. Diğer yandan, seri üretim açısından kıyaslama yapıldığında, geleneksel imalat yöntemi olan plastik enjeksiyonun, eklemeli imalata kıyasla daha düşük maliyetli bir yöntem olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedenleri; enjeksiyon kalıplarının bir kez üretildikten sonra yüksek adetli üretime olanak sağlaması ve parça başına üretim süresinin oldukça kısa olmasıdır.

# 4
# SONUÇ

## 4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan geleneksel imalat yöntemlerinden biri olan plastik enjeksiyon yöntemiyle, PP (polipropilen) hammaddeden üretilen endüstriyel pnömatik tekerlek jantı, eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu tasarım serbestliği avantajından yararlanılarak yeniden tasarlanmıştır. Eklemeli imalatla numune olarak üretilecek jant tasarlanırken, farklı hacim kesri kısıtları altında topoloji optimizasyonu uygulanmış ve bu sayede çeşitli tasarım alternatifleri elde edilmiştir. Elde edilen modellerin yapısal parametreleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen yapısal analiz çalışmaları doğrultusunda, uygulanan topoloji optimizasyonlarında hacim kesri oranının artmasıyla birlikte jant modellerinde birtakım belirgin değişiklikler tespit edilmiştir. Hacim kesri oranındaki artış, doğrudan modelin toplam hacmini ve dolayısıyla ağırlığını arttırmaktadır. Bununla birlikte, yapısal performans açısından değerlendirildiğinde, toplam deformasyon değerlerinde azalma meydana gelmekte; bu da jantın rijitliğinde iyileşmeye işaret etmektedir. Aynı şekilde, maksimum eşdeğer gerilme değerlerinde de düşüş gözlenmiş olup, bu durum hacim kesri oranı arttıkça gerilme yoğunlaşmalarının azaldığını ve yapının daha dengeli bir şekilde yük taşıdığını göstermektedir. Bu parametrelerdeki olumlu değişimlerin bir sonucu olarak, hacim kesri oranı arttıkça modellerin güvenlik katsayılarında artış görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, literatürde havacılıkta kullanılan bir braket üzerinde farklı hacim kesri kısıt oranlarıyla gerçekleştirilen topoloji optimizasyonları sonucunda elde edilen modellere uygulanan yapısal analiz sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir. Söz konusu çalışmada, hacim kesri oranı arttıkça parçanın toplam hacminde artış, maksimum eşdeğer gerilme değerlerinde ise azalma gözlemlenmiştir [72].

Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yeni jant tasarımları arasından, en düşük ağırlığa sahip olan ve aynı zamanda yapısal olarak yeterli güvenlik katsayısını sağlayan model 2 jant, prototip üretim için tercih edilmiştir. Seçilen bu jantın numune imalatı, seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. İmalat sürecinde, mekanik dayanımı yüksek olan poliamid 12 (PA12) hammaddesi tercih edilmiş ve böylece modelin fiziksel olarak üretilebilirliği test edilmiştir.

Model 2 jantın imalatında kullanılan poliamid 12 hammaddesinin yoğunluğunun polipropilen hammaddesine göre %2,76 daha fazla olmasına rağmen, topoloji optimizasyonu sonrası model 2 jantın toplam ağırlığı %2,26 oranında azalmıştır. Bu durum, kullanılan hammaddenin daha yüksek yoğunluğuna rağmen, yapılan yapısal iyileştirmeler ve optimize edilmiş tasarımın, jantın ağırlığını hafifletmeye olanak tanıdığını göstermektedir.

Bunun yanı sıra, model 2 jantın güvenlik katsayısında %7,45 oranında bir artış kaydedilmiştir. Bu artış, jantın yapısal dayanıklılığının ve güvenlik performansının iyileştiğini, yük taşıma kapasitesinin arttığını ve daha güvenli bir yapı ortaya konduğunu işaret etmektedir. Ayrıca, yapılan analizlerde model 2 jantın maksimum eşdeğer gerilme değeri, %20,73 oranında bir artış göstermiştir. Öte yandan, maksimum toplam deformasyon değerinde ise %4,34 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, jantın rijitliğinin arttığını ve dolayısıyla yapısal stabilitenin iyileştiğini göstermektedir.

Topoloji optimizasyonu öncesinde, model 1 jantının feder bölgesinde yapılan tasarım iyileştirmeleri sonucunda ağırlık toplamda %6,51 oranında artmışken, topoloji optimizasyonunun bu iyileştirilmiş model üzerinden toplam ağırlık azaltmaya katkısı %8,24 olarak görülmüştür. Ayrıca, topoloji optimizasyonunun jantın tamamına değil, yalnızca feder bölgesine lokal olarak uygulanması sonucunda, sadece bu bölgedeki ağırlık azaltmaya katkısının %50,59 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, topoloji optimizasyonu uygulamalarının, parçanın belirli, istenen lokal bölgelerine odaklanarak uygulanabileceğini ve aynı zamanda bu odaklanmanın yapısal iyileştirmelere olan katkısının yanı sıra, parçanın ağırlığının da azaltılabileceğini göstermektedir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen model 2 jant ile plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen model 1 jant, eşit test koşulları altında dayanım ve ömür testlerine tabi tutulmuştur. Test süreci, ani yük değişimlerinden kaynaklanan sistemsel müdahale nedeniyle test cihazı tarafından otomatik olarak sonlandırılmıştır. Yapılan testler

sonucunda, model 2 jantın, model 1 janta kıyasla %34,15 oranında daha uzun mesafe kat ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, test sonrası gözlemlenen deformasyon bölgeleri, yapılan sayısal analizlerle tutarlılık göstermiştir. Model 2 jantta deformasyonlar, federlerin jantın dış çemberiyle birleştiği bölgelerde yoğunlaşırken; model 1 jantta ise federlerin jant göbeğiyle birleştiği noktalarda deformasyon meydana gelmiştir. Bu durum, her iki jant tasarımının yük aktarımı ve yapısal zayıflık bölgeleri açısından farklı davrandığını ve sayısal analizlerin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda test öncesi ve sonrası jantlar üzerinden alınan ölçümler karşılaştırıldığında, model 2 jantın uygulanan yükler altında formunu daha iyi koruduğu ve bu doğrultuda yapısal dayanımının model 1 janta kıyasla daha yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Ayrıca, gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda, daha fazla sayıda ve farklı hacim kesri kısıtları uygulanarak çeşitli topoloji optimizasyonu senaryoları geliştirilebilir; böylece daha geniş bir model yelpazesi karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir. Eklemeli imalat sonrasında elde edilen numune jantlarda oluşan deformasyonların görsel olarak daha kolay tespit edilebilmesi için, numunelerin test öncesinde boyanması önerilmektedir. Bu uygulama, plastik deformasyon bölgelerinin boyanmış yüzeyler üzerinde daha belirgin hale gelmesini sağlayarak değerlendirme sürecine katkı sunacaktır. Öte yandan, jant göbeği bölgesine sıkı geçme yöntemiyle yerleştirilen rulmanın, test süresince bu bölgede meydana gelen boyutsal genişlemeler nedeniyle hareket etmesi, bu alanın yalnızca mekanik etkilerden değil, aynı zamanda zamana bağlı ısıl değişimlerden de etkilendiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, ileride yapılacak analizlerde zamana bağlı termal etkilerin de dikkate alınması, daha bütüncül bir yapısal değerlendirme yapılmasına olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Araştırmalar, eklemeli imalatın endüstriyel uygulamalarda yapısal performansı artırma potansiyelini net bir şekilde göstermektedir. Bu üretim yöntemiyle elde edilen parçalar, geleneksel tasarım anlayışının ötesine geçerek, tasarım süreçlerine daha esnek, yenilikçi ve işlevsel bir yaklaşım kazandırmaktadır. Bu doğrultuda, genellikle düşük adetli üretimlerde ve arge süreçlerinde ekonomik olan eklemeli imalatın, sistem geliştiriciler tarafından seri üretime daha uygun hale getirilmesi ve geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha ekonomik sistemler geliştirilmesine

yönelik çalışmaları, söz konusu teknolojinin gelecekte endüstride çok daha yaygın olarak kullanılmasına ve doğrudan nihai parça üretiminde tercih edilmesine zemin hazırlayacağı düşünülmektedir.

# KAYNAKÇA


[1] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, s. 1-3, 2015.

[2] S. Kumar and N. Kumar, "Limitations of traditional manufacturing methods in complex part design," *Journal of Manufacturing Processes*, cilt 39, s. 96-108, 2019.

[3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, cilt 143, s. 172-196, 2018.

[4] L. Zhao, L. Zhang, and S. Yang, "Topology optimization for additive manufacturing: Advances and challenges," *Engineering*, cilt 6, sayı 1, s. 34–45, 2020.

[5] S. Junk, B. Klerch, L. Nasdala, and U. Hochberg, "Topology optimization for additive manufacturing using a component of a humanoid robot," *Procedia CIRP*, cilt 70, s. 102–107, 2018.

[6] K. F. Patham, "Redesigning dynamic components for additive manufacturing using topology optimization," *Journal of Micromanufacturing*, cilt 12, sayı 4, s. 234–245, 2024.

[7] W. Wang, C. Zheng, F. Tang, and Y. Zhang, "A practical redesign method for functional additive manufacturing," *Journal of Additive Manufacturing*, cilt 45, sayı 1, s. 1–12, 2023.

[8] A. Al-Zuhairi, "Systematical redesign method for topology optimized results using 3D printing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, cilt 127, sayı 5–6, s. 2719–2734, 2023.

[9] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, "Designing for additive manufacturing," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, cilt 134, sayı 6, s. 061016, 2012.

[10] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, and P. Young, "Lightweight design for additive manufacturing: A topology optimization approach," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, cilt 136, sayı 6, s. 061015, 2014.

[11] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, and F. Martina, "Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals*, cilt 65, sayı 2, s. 737–760, 2016.

[12] A. T. Gaynor and J. K. Guest, "Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, cilt 54, sayı 5, s. 1157–1172, 2016.

[13] S. Sun, T. A. Moreira, and B. Rankouhi, "Topology optimization, additive manufacturing and thermohydraulic testing of high-temperature heat exchangers," *Journal of Mechanical Design*, cilt 144, sayı 5, s. 051703, 2022.

[14] G. He, Y. Zhou, Z. Han, Z. Xu, and H. Lv, “Dragonfly-like wing structure enabled by a novel skeleton-reinforced neural style transfer assisted topology optimization and additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, cilt 77, s. 103991, 2024.

[15] Y. Gao, L.-q. Xia, H. Cong, and L. Pan, “Innovative design and process simulation of aviation bracket based on topology optimization and additive manufacturing,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, cilt 127, sayı 5–6, s. 1373–1388, 2023.

[16] S. Akilan and K. J. Reddy, “Design improvement of steering knuckle through topology optimization for additive manufacturing,” *Materials Today: Proceedings*, cilt 45, s. 6723–6728, 2021.

[17] M. E. Şaşmaz, “Multi-objective optimization of ventilation hole on steel wheel,” Yüksek Lisans Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 2023.

[18] W. Tong, J. Wu, and Y. Weng, “Topology optimization to eliminate cavities and internal supports in AM-produced formwork for functional structure fabrication,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, cilt 68, sayı 4, s. 76, 2025.

[19] S. Shin, B. Goh, Y. Oh, and H. Chung, “Topology optimization for multi-axis additive manufacturing considering overhang and anisotropy,” *Additive Manufacturing*, cilt 63, p. 103441, 2025.

[20] H. K. Sürmen, “Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, cilt 24, sayı 2, s. 373–392, 2019.

[21] B. Sagbas, “Post-processing effects on surface properties of direct metal laser sintered AlSi10Mg parts,” *Metals and Materials International*, cilt 26, s. 143–153, 2020.

[22] A. S. T. M. Standard et al., “Standard terminology for additive manufacturing technologies,” *ASTM International*, standard no. F2792-12a, s. 1–9, 2012.

[23] G. Kumar, G. Pavan, and S. P. Regalla, “Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM),” *Applied Mechanics and Materials*, cilt 110, s. 2245–2251, 2012.

[24] A. M. Pinar, B. Ergene, G. Atlıhan, A. A. Mağatlı, F. Kaya, B. Karahan ve M. E. Nişancı, “Statistical evaluation of the screw pull out forces of PLA parts manufactured by fused deposition modeling,” *Gazi Journal of Engineering Sciences*, cilt 9, sayı 2, s. 310–321, 2023.

[25] D. Yılmaz, *Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları*, Sektör Değerlendirme Raporu, Thinktech STM Future Technology Institute, Ağustos 2016.

[26] S. Kuş, “Ofis koltuğu kolçağının eklemeli imalat yöntemine göre tasarım ve analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2020.

[27] D. Karalekas and A. Aggelopoulos, “Study of shrinkage strains in a stereolithography cured acrylic photopolymer resin,” *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 136, sayı 1–3, s. 146–150, 2003.

[28] G. V. Salmoria, C. H. Ahrens, V. E. Beal, A. T. N. Pires, and V. Soldi, "Evaluation of post-curing and laser manufacturing parameters on the properties of SOMOS 7110 photosensitive resin used in stereolithography," *Materials & Design*, cilt 30, sayı 3, s. 758–763, 2009.

[29] L. J. Hornbeck, "U.S. Patent 5,061,049," Washington, DC, ABD, 1991.

[30] K. V. Wong and A. Hernandez, "A review of additive manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, cilt 2012, 2012.

[31] A. Berkem, B. Özbay ve M. E. Bulduk, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, cilt 36, sayı 1, s. 421–431, 2021.

[32] B. Duman and M. Cengiz Kayacan, *SDU International Journal of Technological Science*, cilt 9, sayı 3, s. 15–32, 2017.

[33] Y. Siyambaş and Y. Turgut, *Gazi University Journal of Science, Part C*, cilt 10, sayı 2, s. 368–390, 2022.

[34] B. Şen, "Elektron demeti ile ergitme işleminde üretim oryantasyonunun mekanik özelliklere etkisinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2020.

[35] H. Bas, F. Yapici, and I. Inanc, "Yapışkan püskürtme yöntemimde üretim parametrelerinin önemi ve örnek uygulama," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, cilt 10, sayı 4, s. 1354–1361, 2022.

[36] W. E. Frazier, "Metal additive manufacturing: a review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, cilt 23, sayı 6, s. 1917–1928, 2014.

[37] Y. Boztoprak, "Enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçalarda oluşan yönlenme ve artık gerilmelerin polarize ışık mikroskobu yardımıyla incelenerek kritik noktaların belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.

[38] G. Aslan, "Farklı malzemelerden plastik enjeksiyon yöntemi ile makine parçası üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, 2011.

[39] A. B. Kuldaşlı, "Plastik enjeksiyon yöntemi ile parça imalatı, imalat hataları ve hata tespiti," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2005.

[40] E. Topçu, "Bilgisayar destekli plastik enjeksiyon kalıp tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2010.

[41] C. Cemaloğullarından, "Farklı üretim parametreleri için plastik enjeksiyon parçasının akış analizi ve deneysel karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2020.

[42] İ. Cengiz, "Polietilen ve polipropilen esaslı ürünlerin plastik enjeksiyon işlem parametreleri ve termodinamik yöntemlerle ısıl yayılımının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 2012.

[43] R. A. Malloy, *Plastic Part Design for Injection Molding*, Hanser Publications, 2010.

[44] E. Pınar, “Plastik enjeksiyon yöntemiyle imalatta hataların tespiti ve proses şartlarının optimizasyon uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.

[45] S. Chen and L. Turng, *Advanced Injection Molding Technologies*, Hanser Publications, 2016.

[46] T. Uslu, “Geleneksel ve metal eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen plastik enjeksiyon çekirdekleri arasındaki soğutma performansı karşılaştırması,” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 2024.

[47] A. Küçükoğlu, S. Vargelci, and A. Acar, “A study for detecting flow lines on the aesthetic plastic parts during design phases as using material flow analysis programs,” *European Mechanical Science*, cilt 3, sayı 2, s. 63–67, 2019.

[48] X. R. Xu and E. Sachs, “Rapid thermal cycling with low thermal inertia tools,” *Polymer Engineering and Science*, cilt 49, sayı 2, s. 305–316, 2009.

[49] C. B. Hırçal, “Plastik Enjeksiyon Yönteminde Yolluk Tasarımının Parça Kalitesine Etkileri,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2024.

[50] M. Türkay, *Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metodları*. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://home.ku.edu.tr/~mturkay/indr501/Optimizasyon.pdf (Erişim tarihi: 12-Mar-2024).

[51] S. Liu, Q. Li, J. Liu, W. Chen, and Y. Zhang, "A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures," *Engineering*, cilt 4, sayı 2, s. 277–285, 2018.

[52] P. W. Christensen and A. Klarbring, *An introduction to structural optimization*, cilt 153, Springer Science & Business Media, 2008.

[53] Y. L. Lee, J. Pan, R. B. Hathaway, and M. E. Barkey, *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2014.

[54] M. Poyraz, "Bir kamyon şasisinin yapısal optimizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.

[55] M. Hatipoğlu, "Topoloji Optimizasyon Metodu ve Otomotiv Braketinin Optimizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.

[56] M. P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology Optimization, Theory, Methods and Applications*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2003.

[57] M. Matsimbi, P. K. Nziu, L. M. Masu, and M. Maringa, “Topology optimization of automotive body structures,” *International Journal of Engineering Research and Technology*, cilt 13, sayı 12, s. 4282–4296, 2020.

[58] Y. Düzcan, “Yapısal optimizasyon teknikleri ile taşıt süspansiyon bileşenlerinin geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2019.

[59] B. Erol, “Uçak komponentlerinin bilgisayar destekli malzeme seçimi ve topoloji optimizasyonu ile tasarımı,” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, 2019.

[60] H. E. Enginar, "Ağır taşıt jantının topoloji optimizasyonu yardımıyla optimum tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, 2014.

[61] Y. Düzcan, "Yapısal optimizasyon teknikleri ile taşıt süspansiyon bileşenlerinin geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa, 2019.

[62] Y. Okur, "Çift yönlü evrimsel topoloji optimizasyonu yöntemi ile bir motor braketinin doğal frekanslarının en iyileştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2019.

[63] M. Arslan, "Yeni nesil yapısal optimizasyon teknikleri ile yüksek performanslı yolcu koltuğu komponentlerinin geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa, 2018.

[64] E. Mete, "Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Rot Başı Tasarımı, Analizi ve Doğrulanması," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2022.

[65] T. Saraçyakupoğlu, "Usage of additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in the aviation industry," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, cilt 6, sayı 2, s. 815–820, 2021.

[66] T. Y. Pang and M. Fard, "Reverse engineering and topology optimization for weight-reduction of a bell-crank," *Applied Sciences*, cilt 10, sayı 23, s. 8568, 2020.

[67] D. S. Nguyen and F. Vignat, "Topology optimization as an innovative design method for additive manufacturing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, s. 304–308, 2017.

[68] J. Stearns, T. S. Srivatsan, X. Gao, and P. C. Lam, "Understanding the influence of pressure and radial loads on stress and displacement response of a rotating body: The automobile wheel," *International Journal of Rotating Machinery*, cilt 2006, Article ID 060193, 8 pages, 2006.

[69] Ç. Ünal, İ. Böğrekçi, and P. Demircioğlu, "Modeling with finite element analysis and testing of commercial vehicle wheels," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, cilt 4, sayı 2, s. 86–96, 2020.

[70] P. Obsta, M. Launhardt, D. Drummer, P. V. Osswald, and T. A. Osswald, "Failure criterion for PA12 SLS additive manufactured parts," *Additive Manufacturing*, cilt 36, s. 101456, 2020.

[71] E. M. Murtagh, J. L. Mair, E. J. Aguiar, C. Tudor-Locke, and M. H. Murphy, "Outdoor walking speeds of apparently healthy adults: A systematic review and meta-analysis," *Sports Medicine*, cilt 51, sayı 1, s. 125–141, 2021.

[72] O. U. Tip, "Hava Aracı Yapısallarına Yönelik Alüminyum Alaşımlı Bileşenlerin Eklemeli İmalat Yöntemine Uygun Tasarımı, Optimizasyonu ve Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Ocak 2023.

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

**Konferans Bildirileri**

**1.** İ. Aytimur ve B. Sağbaş, "Eklemeli İmalatta Fonksiyonel Parça Tasarımı ve Optimizasyonu", *13. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi (Özet Bildiriler)*, s. 467, İstanbul, Türkiye, 20 Nisan 2025.