ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERDE KULLANILAN METAL KARKAS YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE MÜHENDİSLİK PLASTİKLERİ KULLANILARAK HAFİFLEŞTİRİLMESİ

Murat KAYA

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERDE KULLANILAN METAL KARKAS YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE MÜHENDİSLİK PLASTİKLERİ KULLANILARAK HAFİFLEŞTİRİLMESİ

Murat KAYA
0009-0008-2994-0385

Prof. Dr. Abdil KUŞ
(Danışman)
0000-0002-4626-0719

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERDE KULLANILAN METAL KARKAS YAPILARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE MÜHENDİSLİK PLASTİKLERİ KULLANILARAK HAFİFLEŞTİRİLMESİ

Murat KAYA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdil Kuş

Bu tez çalışmasında, elektrikli otobüslerde kullanılan gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin geleneksel sac metal yapıdan mühendislik plastiklerine dönüştürülmesi ve bu dönüşümün yapısal, üretimsel ve fonksiyonel etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Artan batarya kütlesi nedeniyle elektrikli araçlarda hafifletme ihtiyacı kritik hale gelmiş olup, bu bağlamda taşıyıcı bileşenlerin yeniden tasarlanması stratejik önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında sac metal referans yapı CAD ortamında modellenmiş, topoloji optimizasyonu ile yük taşıma yolları belirlenmiş ve mühendislik plastiklerine uygun yeni bir geometri elde edilmiştir.

PA6 GF60, PA6 GF30, PA66 GF30 ve PP GF30 olmak üzere dört farklı cam elyaf takviyeli termoplastik malzeme değerlendirilmiş; sonlu elemanlar yöntemi ile modal analizler gerçekleştirilerek yer değiştirme, gerilme ve doğal frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bazı mühendislik plastiklerinin metal referans yapıya kıyasla benzer veya daha iyi titreşim ve rijitlik performansı sunarken, önemli ölçüde kütle azaltımı sağladığını göstermiştir.

Ayrıca nihai tasarım için plastik enjeksiyon kalıbı oluşturulmuş ve Moldex analizleri ile dolum, basınç, çarpılma ve çevrim süresi değerlendirilmiştir. 3D baskı ile üretilen prototipler üzerinden montaj ve boyutsal doğrulama yapılmıştır. Sonuç olarak, topoloji optimizasyonu ve mühendislik plastiklerinin birlikte kullanımıyla, elektrikli otobüs gösterge paneli iskeletinde hafif, rijit ve üretilebilir bir tasarımın endüstriyel ölçekte uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Mühendislik plastikleri, Plastik enjeksiyon, Sonlu elemanlar analizi, Topoloji optimizasyonu,
2026, xvii + 74 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

LIGHTWEIGHTING OF METAL FRAME STRUCTURES USED IN ELECTRIC BUSES BY TOPOLOGY OPTIMIZATION USING ENGINEERING PLASTICS

Murat Kaya

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Abdil Kuş

This thesis investigates the structural and manufacturing feasibility of replacing a conventional sheet-metal dashboard carrier used in electric buses with engineering plastics optimized through topology optimization. Due to the increasing mass of battery systems, lightweight design has become a critical requirement for electric vehicles, making the redesign of interior load-bearing structures strategically important. In this study, the reference metal structure was modeled in a CAD environment and re-designed using topology optimization to determine the most efficient load-carrying geometry compatible with polymer-based materials.

Four glass-fiber reinforced thermoplastics—PA6 GF60, PA6 GF30, PA66 GF30, and PP GF30—were evaluated. Finite element modal analyses were conducted to compare displacement, stress, and natural frequency characteristics of the optimized polymer structures with the metal reference design. The results demonstrated that selected engineering plastics provide comparable or superior stiffness and vibration behavior while achieving significant weight reduction.

To verify manufacturing feasibility, an injection mold was designed and Moldex analyses were performed to evaluate flow behavior, pressure distribution, warpage, and cycle time. Prototypes were produced using additive manufacturing and validated through dimensional inspection and assembly tests.

The results confirm that combining topology optimization with glass-fiber reinforced engineering plastics enables the development of lightweight, stiff, and manufacturable dashboard carrier structures for electric buses, providing a viable alternative to traditional metal designs for next-generation electric vehicle architectures.

Key words: Electric vehicles, Engineering plastics, Finite element analysis, Plastic injection molding, Topology optimization,
2026 xvii + 74 pages.

TEŞEKKÜR

1501 - TÜBİTAK Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında 3241374 kodlu proje ile destek veren TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında değerli bilgi, yönlendirme ve akademik katkılarıyla bana rehberlik eden danışmanım Prof. Dr. Abdil Kuş'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Teknik paylaşımları ve yardımları ile süreçte her zaman bana destek olan Ferhat Şafak ve Barış Elagöz başta olmak üzere, Etka-d Otomotiv Plastik Kalıp San. Tic ve Ltd Şti. Ar-Ge merkezi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreç boyunca sabrı, anlayışı ve sürekli desteğiyle daima yanımda olan sevgili eşim Meliha Kaya'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Murat KAYA
14.01.2026

İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
ŞEKİLLER DİZİNİ xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ xvii
1.GİRİŞ 1
1.1.Araştırmanın Önemi 1
1.2.Tezin Hedefi ve Kapsamı 2
1.3.Çalışmanın Yeniliği 3
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 5
2.1. Otomotiv Endüstrisinde Malzeme Dönüşümü 5
2.1.1. Geleneksel malzemeler: çelik ve alüminyum alaşımlar 5
2.1.2. Hafifletme ihtiyacı ve sürdürülebilirlik 6
2.1.3. Metalden plastiğe dönüşüm trendleri 6
2.2. Topoloji Optimizasyonu 8
2.2.1. Tanımı ve temel prensipler 9
2.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile entegrasyonu 10
2.2.3. Otomotiv parçalarında uygulama örnekleri 10
2.2.4. Topoloji optimizasyonu algoritmaları ve üretim kısıtlarının entegrasyonu 11
2.3. Tasarım Süreci 12
2.3.1. Cad modelleme kuralları 12
2.3.2. Optimizasyon kriterlerinin tasarıma entegrasyonu 12
2.3.3. Montaj ve ergonomi açısından tasarım gereksinimleri 13
2.4. Sac Malzemenin Dezavantajları 13
2.4.1. Yüksek yoğunluk ve ağırlık 13
2.4.2. Korozyon ve yüzey işlemleri gereksinimi 14
2.4.3. Montaj Zorlukları ve Üretim Maliyetleri 14
2.5. Mühendislik Plastikleri 14
2.5.1. Poliamid grubu (PA6, PA66) 15
2.5.2. Polipropilen esaslı kompozitler (PP-GF) 15
2.5.3. Cam elyaf katkısı ve lif takviyesinin mekanik performansa etkileri 16
2.5.4. Metal malzemelerle kıyaslama 17
2.6. Plastik Enjeksiyon Prosesi 17
2.6.1. Prosese genel bakış 18
2.6.2. Enjeksiyon parametreleri (Sıcaklık, Basınç, Çevrim Süresi) 19
2.6.3. Prosesin avantajları ve sınırlılıkları 20
2.7. Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve İmalatı 21
2.7.1. Kalıp bileşenleri 21
2.7.2. Kalıp çeliği seçimi ve işleme teknikleri 22
2.7.3. Moldex analizlerinin tasarıma katkısı 22
2.8. Önceki Akademik Çalışmaların Literatür Taraması 23
2.8.1. Otobüs gövde yapılarında optimizasyon çalışmaları 23
2.8.2. Profil örgü / iskelet yapıların topolojik yeniden tasarımı 24
2.8.3. Taşıyıcı iskeletlerde sonlu elemanlar analizlerinin rolü 24
2.8.4. Ağırlığın enerji tüketimine (menzil/fuel) etkisi 24
2.8.5. Hafifletmenin emisyon ve operasyonel maliyete katkısı 24
2.8.6. Yapısal optimizasyon ile minimum malzeme kullanımı 25

2.8.7. Malzeme davranışı ve katkılı plastikler 25
2.8.8. Enjeksiyon parametreleri ve üretim etkileri 26
2.8.9. Literatürün Metodolojik Değerlendirmesi ve Etkileri 26
2.8.10. Sentez: literatürdeki açık noktalar 27
3.MATERYAL VE YÖNTEM 28
3.1. MATERYAL 28
3.1.1. Sac Metal referans yapı 28
3.1.2. PA6 60 GFR 30
3.1.3. PA6 30 GFR 32
3.1.4. PA66 30 GFR 33
3.1.5. PP 30 GFR 35
3.2. Yöntem 36
3.2.1. CAD modelleme ve tasarım süreci 36
3.2.2. Topoloji optimizasyonu 39
3.2.3. Sonlu elemanlar analizi 41
3.2.4. Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı 43
3.2.5. Kalıp Akış (Moldex) analizleri 45
3.2.6. Prototip üretimi 47
3.2.7. Deneysel doğrulama 49
4.BULGULAR 50
4.1. Modal Analiz Sonuçları 50
4.1.1. Genel mod şekillerinin incelenmesi 50
4.1.2. PA6 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları 52
4.1.3. PA6 GF60 malzemesi için Modal Analiz Sonuçları 53
4.1.4. PA66 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları 53
4.1.5. PP GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları 54
4.1.6. Malzemeye bağlı modal davranışın karşılaştırılması 55
4.2. Malzeme Karşılaştırmaları 55
4.2.1 Malzemelere göre yer değiştirme karşılaştırması 55
4.2.2. Malzemelere göre gerilme karşılaştırması 56
4.2.3. Malzemelere göre doğal frekans karşılaştırması 56
4.2.4. Malzeme Karşılaştırmalarının Genel Özeti 56
4.3. Prototip Üretim Ve Doğrulama Sonuçları 57
4.3.1. Prototip Üretim Sonuçları 57
4.3.2. Montaj uygunluğu ve fonksiyonel doğrulama 58
4.3.3. Geometrik ve ölçüsel doğrulama bulguları 58
4.3.4. Prototip doğrulama bulgularının genel değerlendirmesi 59
4.4. Topoloji Optimizasyonu Sonuçları 59
4.4.1. Yoğunluk dağılımı sonuçları 59
4.4.2. Kütle azaltım sonuçları 61
4.4.3. Taşıyıcı yapı üzerindeki etkiler 61
4.4.4. Topoloji optimizasyonu bulgularının genel özeti 62
4.5. Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı Sonuçları 62
4.5.1. Çekme açısı (draft) uygunluğu sonuçları 62
4.5.2. Et Kalınlığı ve Geçiş Bölgeleri Sonuçları 62
4.5.3. Nervür (rib) ve boss geometrisi sonuçları 63
4.5.4. Undercut ve kalıp mekanizması ihtiyacı sonuçları 63
4.5.5. Ayırma hattı (parting line) uygunluğu sonuçları 64

4.5.6. Kalıp tasarımı bulgularının genel özeti 65
4.6. Moldex Analizi Sonuçları 65
4.6.1. Dolum davranışı ve erime cephesi ilerlemesi 65
4.6.2. Kayma hızı dağılımı 66
4.6.3. Dolum ve sıkıştırma basıncı dağılımı 67
4.6.4. Kalıp kapama kuvveti (clamping force) 68
4.6.5. Yoğunluk dağılımı 68
4.6.6. Çarpılma (warpage) davranışı 69
4.6.7. Moldex analizi genel değerlendirmesi 69
5.TARTIŞMA ve SONUÇ 70
5.1. Bulguların Literatür ile Karşılaştırılması 70
5.2. Malzeme Seçiminin Teknik Değerlendirmesi 70
5.3. Plastik Enjeksiyon Kalıbı ve Kalıp Analizlerinin Katkısı 71
5.4. Tasarım Optimizasyonu ve Endüstriyel Katkı 71
5.5. Çalışmanın Kısıtları 71
KAYNAKLAR 72
ÖZGEÇMİŞ 74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
P	Basınç
ε	Birim uzama (Strain)
A	Büküm açısı
d	Büküm kurtarma derinliği
w	Büküm kurtarma genişliği
BA	Büküm payı (Bend Allowance)
R	Büküm yarıçapı
dk	Dakika
Xmin	Delik–büküm minimum mesafesi
Emin	Delik–kenar minimum mesafesi
f	Doğal frekans
E	Elastisite modülü
σ	Gerilme (Stress)
GPa	Gigapascal (elastisite modülü birimi)
Hz	Hertz (frekans birimi)
α	Isıl genleşme katsayısı
Smin	İki delik arası minimum mesafe
kJ	Kilojoule
F	Kuvvet
m	Kütle
MPa	Megapascal (gerilme birimi)
m^2	metrekare
mm	milimetre
Rmin	Minimum büküm yarıçapı
Lmin	Minimum flanş (kenar) boyu
K	Mutlak sıcaklık (Kelvin)
ν	Poisson oranı
k	Rijitlik
hr	saat
t	Sac kalınlığı
°C	Santigrat derece
T	Sıcaklık
μ	Viskozite
δ	Yer değiştirme
ρ	Yoğunluk
g/cm^3	Yoğunluk birimi
t	Zaman

Kısaltmalar	Açıklama
PA6-GF30	%30 cam elyaf takviyeli PA6
PA66-GF30	%30 cam elyaf takviyeli PA66
PP-GF30	%30 cam elyaf takviyeli Polipropilen
PA6-GF60	%60 cam elyaf takviyeli PA6
BIW	Body in White (araç gövde iskeleti)

CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar destekli tasarım)
CNC	Computer Numerical Control
ST37	Düşük karbonlu yapı çeliği (referans sac malzeme)
EGR	Exhaust Gas Recirculation(Egzoz gazı geri dönüşüm sistemi)
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu elemanlar analizi)
FDM	Fused Deposition Modeling(Ergiyik yığma yöntemiyle 3D baskı)
GF	Glass Fiber (Cam elyaf)
GFR	Glass Fiber Reinforced (Cam elyaf takviyeli)
HDT	Heat Deflection Temperature (Isı altında şekil değiştirme sıcaklığı)
ISO	International Organization for Standardization
CO_2	Karbondioksit
OEM	Original Equipment Manufacturer(Orijinal araç üreticisi)
PVD	Physical Vapor Deposition
PA	Poliamid
PA6	Poliamid-6
PA66	Poliamid-66
PP	Polipropilen
PCV	Pressure Control Valve (Basınç kontrol valfi)
RH	Relative Humidity (Bağıl nem)
HRC	Rockwell sertlik ölçeği
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization (Topoloji optimizasyon algoritması)
STL	Stereolithography(3D geometri değişim dosya formatı)
S-N	Stress–Number of cycles (Yorulma eğrisi)
3D	Three-Dimensional (Üç boyutlu)
TO	Topology Optimization (Topoloji optimizasyonu)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Topoloji optimizasyonu sürecinde tasarım aşamaları (Kahraman& Küçük, 2020) 8
Şekil 2.2 Topoloji optimizasyonunun tasarım ile entegrasyon şeması (Kahraman & Küçük, 2020) 9
Şekil 2.3 Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ile topoloji optimizasyonu arasındaki iteratif entegrasyon döngüsü 10
Şekil 2.4 Plastik enjeksiyon makinesi 17
Şekil 2.5 Plastik enjeksiyon makinesinin çalışma şeması 18
Şekil 2.6 Plastik enjeksiyon prosesinin temel adımları 18
Şekil 2.7 Enjeksiyon (enjekte) işleminin basamakları 19
Şekil 3.1 Sac metal referans parçanın geometrisi 29
Şekil 4.1 PA6 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları 52
Şekil 4.2 PA6 GF60 malzemesi için Modal Analiz Sonuçları 53
Şekil 4.3 PA66 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları 54
Şekil 4.4 PP GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları 54
Şekil 4.5 Nihai tasarıma ait üretilmiş prototipin genel görünümü 57
Şekil 4.6 Montajı tamamlanmış prototipin genel görünümü 58
Şekil 4.7 Başlangıç tasarımına ait yoğunluk dağılımı kesiti 60
Şekil 4.8 Optimizasyon sonrası elde edilen yoğunluk dağılımı kesiti 60
Şekil 4.9 Ana yük taşıma yolları ve taşıyıcı bölgeler 61
Şekil 4.10 Nervür ve boss bölgelerinde kalıplama yönü dışı yüzeylerin tespiti 63
Şekil 4.11 Maça açılma eksenine göre ters açılı yüzeylerin tespiti 64
Şekil 4.12 Açılı blok maça gerektiren yüzeylerin detay görünümü 64
Şekil 4.13 Dolum davranışı ve erime cephesi ilerlemesi analizi başlangıcı 66
Şekil 4.14 Dolum davranışı ve erime cephesi ilerlemesi sonucu 66
Şekil 4.15 Kayma hızı dağılımı analizi 67
Şekil 4.16 Dolum ve sıkıştırma basıncı dağılımı 67
Şekil 4.17 Enjeksiyon prosesi sırasında kalıp kapama kuvvetinin zamana bağlı değişimi 68
Şekil 4.18 Enjeksiyon sonrası parça genelinde yoğunluk dağılımı 68
Şekil 4.19 Enjeksiyon sonrası parça genelinde yoğunluk dağılımı analizi 69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Metal ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması 7
Çizelge 2.2 Üretim hacmine bağlı olarak enjeksiyon kalıplarında önerilen kalıp çeliği türleri ve performans özellikleri 22
Çizelge 3.1 ST37 Mekanik özellikleri 28
Çizelge 3.2 ST37 sac malzemede hesaplama parametreleri 30
Çizelge 3.3 Yüksek cam elyaf oranlı PA6 (GF60) için standartlara dayalı mühendislik özellikleri 31
Çizelge 3.4 %60 cam elyaf takviyeli PA6 için proses sıcaklıkları ve basınç aralıkları 32
Çizelge 3.5 %30 cam elyaf takviyeli PA6 için standartlara dayalı mühendislik parametreleri 33
Çizelge 3.6 %30 cam elyaf takviyeli PA6 için kurutma ve enjeksiyon parametreleri 33
Çizelge 3.7 %30 cam elyaf takviyeli PA66 için standartlara dayalı mühendislik parametreleri 34
Çizelge 3.8 PA66 GF30 (PA66 30 GFR) için önerilen enjeksiyon kalıplama proses parametreleri 34
Çizelge 3.9 %30 cam elyaf takviyeli PP için standartlara dayalı mühendislik parametreleri 35
Çizelge 3.10 %30 cam elyaf takviyeli PP için erime, kalıp ve basınç parametreleri. 36
Çizelge 4.1 Modal analiz sonuçları 51
Çizelge 4.2 Farklı malzemeler için modal analiz sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi 52
Çizelge 4.3 Malzemelere göre yer değiştirme karşılaştırması 55
Çizelge 4.4 Malzemelere göre gerilme karşılaştırması 56
Çizelge 4.5 Malzemelere göre doğal frekans karşılaştırması 56

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Önemi

Otomotiv endüstrisi, son on yılda yaşadığı paradigma değişimi ile birlikte, yalnızca klasik mühendislik prensiplerini değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği, enerji verimliliğini ve kullanıcı güvenliğini merkeze alan bir dönüşüm sürecine girmiştir. Özellikle elektrikli otobüslerde, batarya sistemlerinin ağırlığa getirdiği ek yük, tasarımcıları ve mühendisleri taşıyıcı yapıları yeniden gözden geçirmeye zorlamaktadır. Geleneksel yaklaşımlar, güvenliği artırmak amacıyla ağır ve rijit yapılara yönelirken, çağdaş yaklaşım ise aynı güvenlik ve dayanımı çok daha düşük kütleyle sağlamayı hedeflemektedir. Hafiflik gereksinimi sadece yakıt veya batarya sarfiyatı için değil, aynı zamanda yolcu güvenliği, konfor ve araç ömrü bakımından da önemli bir gereksinimdir. Bu bağlamda, taşıyıcı yapıların rijitlik, titreşim davranışı, doğal frekans özellikleri ve çarpışma güvenliği gibi performans ölçütlerini karşılaması büyük önem taşımaktadır.

Gösterge paneli taşıyıcı iskeleti, sürücü kabini içerisinde kritik bir konuma sahip olup, yalnızca gösterge ve kontrol elemanlarını taşımakla kalmayıp, aynı zamanda sürücü-yolcu güvenliği ve ergonomisi üzerinde de doğrudan etkili bir bileşendir. Dolayısıyla, bu yapının hem hafif hem de mukavim bir şekilde tasarlanması, elektrikli otobüslerin mühendislik açısından en kritik gereksinimlerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Gösterge paneli taşıyıcı iskeleti, çoğu zaman otomotiv tasarımında ikincil bir bileşen olarak algılansa da, gerçekte fonksiyonel olmak ile beraber güvenlik içinde kritik bir konumdadır. Bu yapı, sürücü ile araç arasında fiziksel bir arayüz oluşturarak, direksiyon kolonunu, elektronik gösterge ve kontrol bileşenlerini taşır. Aynı zamanda titreşimlerin ve yük aktarımının merkezi noktalarından biridir. Bu nedenle, yapının hafifletilmesi ancak dayanım kaybı olmaksızın mümkün olabilir.

Son yıllarda mühendislik plastiklerinin gelişimi, sac malzemelerin dezavantajlarını daha da belirgin hale getirmiştir. Sac malzemeler yoğunlukları nedeniyle ağırlık açısından dezavantajlıdır, ayrıca korozyon, yüzey işlemleri ve karmaşık üretim süreçleri nedeniyle maliyetli çözümler gerektirmektedir. Buna karşın cam elyaf takviyeli poliamid ve polipropilen bazlı kompozitler, daha düşük yoğunlukları sayesinde hafiflik sağlamakta,

ve mekanik dayanım bakımından incelendiğinde metal alaşımlara yakın performans göstermektedir. Yapılan çalışmalar, %50'ye kadar cam elyaf katkısıyla kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin, alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksek rijitlik sunabildiğini göstermektedir (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021). Tüm bu nedenlerden dolayı elektrikli otobüslerde hafif, dayanıklı ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan malzeme dönüşümü kritik bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır. Sac malzemelerin endüstride uzun yıllar boyunca baskın rol oynaması, onların otomotivde tek seçenek olarak görülmesine yol açmıştır. Ancak korozyon eğilimi, yüksek yoğunluk ve üretim süreçlerinin maliyeti, mühendisleri alternatif çözümler aramaya itmiştir. Bu bağlamda, elektrikli otobüslerde gösterge paneli iskeletinin mühendislik plastikleriyle yeniden tasarımı, sadece gündeme gelen bir ihtiyaç değil, aynı zamanda elektrikli araçlardaki plastiklere dönüşümün başlangıç adımları olarak değerlendirilmelidir.

1.2. Tezin Hedefi ve Kapsamı

Bu tezde hedeflenen çalışma, elektrikli otobüslerde kullanılan gösterge paneli taşıyıcı iskeletini geleneksel sac malzemeden mühendislik plastiklerine dönüştürerek, bu dönüşümün yapısal, üretimsel ve fonksiyonel boyutlarını bütüncül bir yaklaşımla incelemektir. Araştırmanın kapsamı yalnızca malzeme seçimi ile sınırlı kalmamış, aynı zamanda tasarım ve üretim sürecini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Öncelikle CAD tabanlı 3D modelleme yapılmış, ardından topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte HYPERMESH yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizleri yapılmış, modal analizlerle doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Bu analizler, sac malzemeden üretilmiş referans yapı ile karşılaştırmalı olarak yürütülmüş ve mühendislik plastiklerinin sağladığı avantajlar ortaya konmuştur.

Seçilen dört malzeme; PA6 60 GFR, PA6 30 GFR, PA66 30 GFR ve PP 30 GFR otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, ancak genellikle panel ve kaplama gibi ikincil bileşenlerde tercih edilen malzemelerdir. Bu tezde söz konusu malzemeler, taşıyıcı bir yapı olan gösterge paneli iskeleti özelinde değerlendirilmiştir.

Çalışmanın kapsamı içerisinde CAD tabanlı 3D modelleme yapılmış, ardından topoloji optimizasyonu ile 3D model revize edilmiş ve revize edilen model üzerinden sonlu elemanlar analizleri (modal) gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, yalnızca rijitlik ve dayanım parametreleriyle sınırlı kalmayıp, doğal frekans, titreşim davranışı ve yer değiştirme kriterlerini de kapsamıştır.

Kapsamın önemli bir diğer boyutu da üretim süreçleridir. Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı yapılmış, Moldex analizleri ile akış, çarpılma, soğutma ve çevrim süresi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, 3D yazıcı ile prototip üretimi yapılmış, parçalar üzerinde boyutsal ölçüm ve montaj testleri gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamlı yaklaşım sayesinde tez çalışması, malzeme dönüşümünü hem teorik analizler hem deneysel doğrulama hem de üretim süreçleri açısından bütüncül bir çerçevede incelemektedir. Literatürde genellikle farklı farklı araştırmalar ile incelenmiş olan bu süreçlerin tek bir araştırma altında birleştirilmiş olması; çalışmanın, yalnızca teorik bir araştırma olmaktan çıkıp, sanayiye uygulanabilirliği olan bir çözüm modelini ortaya koymuştur.

1.3. Çalışmanın Yeniliği

Literatürde mühendislik plastiklerinin otomotiv sektöründe etkin olduğunu belirten araştırmalar yapılmış olsa da bu çalışmalar genellikle sınırlı ölçekli veya tek boyutlu incelemelerle sınırlıdır. Çoğu araştırma yalnızca malzeme özelliklerinin incelenmesine veya yalnızca topoloji optimizasyonu simülasyonlarına odaklanmıştır. Bu tez çalışmasının yeniliği, tüm bu süreçleri entegre ederek; tasarım, analiz, üretim, prototip doğrulama boyutlarını birlikte ele almasıdır.

Çalışmanın en önemli yeniliklerinden biri, malzeme dönüşümünün yalnızca analitik düzeyde kalmaması, aynı zamanda kalıp tasarımı, moldex analizleri ve prototip doğrulama süreçlerini kapsayacak şekilde bütünleşik olarak ele alınmasıdır. Literatürde pek çok çalışma ağırlık azaltma ve yapısal optimizasyon üzerine yoğunlaşmış olsa da bu çalışmaların büyük çoğunluğu üretim süreçleriyle entegrasyonu göz ardı etmiştir.

Bu tez, malzeme seçimi ve topoloji optimizasyonunu doğrudan kalıp üretim süreçleriyle ilişkilendirerek literatürdeki boşluğu doldurmakta ve bütüncül bir model ortaya koymaktadır.

Bir diğer yenilik, sac yapı ile mühendislik plastiklerinin sistematik karşılaştırmasıdır. Yapılan analizler sonucunda, mühendislik plastiklerinin yalnızca ağırlık azaltma için değil, aynı zamanda yapısal dayanımı arttırmak içinde güvenilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Bir diğer yenilik, bu çalışmanın yalnızca simülasyonlarla sınırlı kalmayıp plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı ve Moldex analizleri ile üretim sürecini de kapsamasıdır. Çalışmada yapılan Moldex analizleri, enjeksiyon sırasında akış hatalarının, çarpılma eğilimlerinin ve çevrim sürelerinin nasıl optimize edileceğini göstermektedir. Bu sayede, tasarım aşamasında elde edilen teorik başarımların üretim sürecinde karşılaşılabilecek sorunlarla çelişmediği kanıtlanmıştır. Bu yaklaşım, mühendislik plastiklerinin taşıyıcı yapılarda endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğine dair güvenilir bir metodoloji sunmaktadır.

Ayrıca bu çalışmada kullanılan dört farklı mühendislik plastiğinin karşılaştırmalı analizi, endüstriyel uygulamalar için malzeme seçiminde rehberlik kapsama sahip olduğunu göstermektedir. PA6 60 GFR yüksek rijitliğiyle öne çıkarken, PP 30 GFR maliyet ve işlenebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır. Bu farklılıklar, endüstriyel ölçekte malzeme seçiminin mekanik performans ile beraber maliyete ve üretim verimliliğine de etki ettiğini göstermektedir.

İlave bir çıkarım yapacak olursak, bu çalışmanın yeniliği yalnızca akademik katkıyla sınırlı değildir; aynı zamanda doğrudan endüstriyel uygulama potansiyeli taşımaktadır. Elde edilen bulgular, elektrikli otobüslerde mühendislik plastiklerinin kritik taşıyıcı yapılarda kullanılabileceğini deneysel ve üretim boyutlarıyla ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu tez, sanayide uygulanabilirliği olan yeni bir tasarım paradigması ile pratik ve uygulanabilir bir yol haritası sunmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde elektrikli otobüslerde kullanılan yapısal bileşenlerde malzeme seçimi, hafifletme stratejileri, topoloji optimizasyonu yaklaşımı, tasarım ilkeleri, plastik enjeksiyon prosesi ve kalıp üretim teknikleri kuramsal bir çerçevede ele alınmaktadır. Ayrıca literatürde yer alan güncel çalışmalar incelenerek bu çalışmanın bilimsel dayanakları ve literatürde doldurmayı hedeflediği boşluk ortaya konulmaktadır.

2.1. Otomotiv Endüstrisinde Malzeme Dönüşümü

Otomotiv endüstrisi, uzun yıllar boyunca çelik gibi metal esaslı malzemelere dayalı yapısal tasarım yaklaşımını benimsemiştir. Çelik; yüksek dayanım, rijitlik, yorulma ömrü ve kaynaklanabilirlik gibi avantajları nedeniyle taşıyıcı elemanlarda temel malzeme olarak kullanılmıştır. Ancak elektrikli araç platformlarının yaygınlaşmasıyla birlikte taşıt toplam kütlesinin enerji tüketimi ve menzil üzerinde doğrudan belirleyici olması, malzeme seçimini stratejik bir karar alanı hâline getirmiştir (Karamert & Demir, 2022).

Bu yaklaşım, elektrikli araçlar için yeni kısıtlar doğurmaktadır. Otomotiv endüstrisi artık yalnızca dayanım ve maliyet ekseninde değil, aynı zamanda enerji verimliliği, karbon ayak izi, geri dönüştürülebilirlik ve üretim çevrim süresi kriterleri doğrultusunda malzeme dönüşüm sürecini yönetmektedir.

2.1.1. Geleneksel malzemeler: çelik ve alüminyum alaşımlar

Çelik, mekanik dayanım ve üretim maliyetleri açısından avantajlı olduğundan taşıyıcı yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek yoğunluğu özellikle elektrikli araçlarda ağırlık/enerji tüketimi dengesini olumsuz etkilemektedir.

Alüminyum ise daha düşük yoğunluk sunmasına rağmen; dövme/ekstrüzyon süreç maliyetleri, kaynaklanabilirlik sınırlılıkları ve yorulma davranışındaki değişkenlik gibi faktörler nedeniyle her uygulamada ideal değildir (Kahraman & Küçük, 2020). Dolayısıyla her iki malzeme, özellikle büyük gövdeli taşıtlarda ağırlık azaltma hedefleri karşısında belirli sınırlılıklar barındırmaktadır.

2.1.2. Hafifletme ihtiyacı ve sürdürülebilirlik

Elektrikli otobüslerde batarya paketleri toplam kütlenin büyük bir bölümünü oluşturduğundan araç gövdesi ve iç taşıyıcı elemanlarda hafifletme, menzil kapasitesini doğrudan iyileştiren kritik bir parametredir. (Albak, 2019), hafifletilmiş taşıt bileşenlerinin enerji tüketimini anlamlı şekilde düşürdüğünü raporlamıştır.

Bunun yanında hafifletme; motor yükünü azaltarak bileşen ömrünü uzatır, daha küçük batarya kullanımıyla üretim maliyetlerini azaltır, toplam yaşam döngüsü boyunca karbon emisyonlarını düşürür. Bu nedenle hafifletme, sadece mühendislik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerinin de merkezindedir.

2.1.3. Metalden plastiğe dönüşüm trendleri

Son yıllarda mühendislik termoplastiklerinin, özellikle cam elyaf katkısı ile güçlendirilmiş PA ve PP türevlerinin; rijitlik, boyutsal stabilite ve yorulma dayanımı açısından metal bileşenlerle rekabet edebilecek seviyeye ulaştığı görülmektedir. (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021), cam elyaf takviyeli hibrit polimer matris yapılar ile döküm alüminyum parçaların yerini alabilecek düzeyde yük taşıma kapasitesi elde edilebildiğini deneysel olarak doğrulamıştır.

Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitler, otomotiv taşıyıcı sistemlerinde ağırlık azaltımı ve yüksek mukavemet gereksinimlerini aynı anda karşılayabilen malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen kompozit şase uygulamalarında, yüksek basma mukavemeti ve düşük ağırlık değerleri elde edilmiştir. Bu tür yapılar, elektrikli araçlarda menzil artışı ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Elektrikli otobüslerde bu dönüşüm özellikle: gösterge paneli taşıyıcı iskeletleri, konsol alt destek yapıları, iç kabin bağlantı braketleri gibi çok parçalı metal montajların bulunduğu bölgelerde hızla yaygınlaşmaktadır. (Ünlü, 2022)

Metal malzemelerden mühendislik plastiklerine geçiş, otomotiv üretiminde sadece kütle azaltımını değil, aynı zamanda montaj süreçlerinin köklü bir şekilde sadeleştirilmesini ifade eder. Geleneksel olarak, sac veya alüminyumdan üretilen büyük taşıyıcı yapılar (örneğin gösterge paneli iskeletleri), kesme, bükme, birleştirme (kaynak) ve işleme gibi çok sayıda operasyonla üretilen birden fazla parçanın montajını gerektirir. Bu çok aşamalı süreç; işçilik yoğunluğunu, montaj hassasiyeti ihtiyacını ve toplam üretim maliyetini artırmaktadır.

Çizelge 2.1 Metal ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması

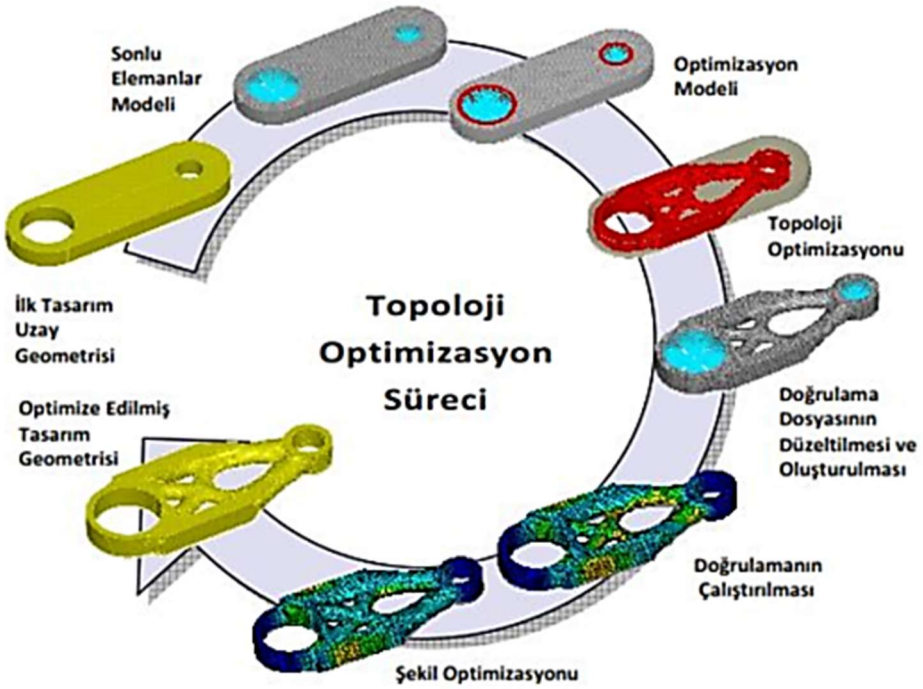
Özellik	Sac Malzemeler	Alüminyum Malzemeler	Kompozit Malzemeler
Yoğunluk	Yüksek (Ağır)	Düşük (Hafif)	Çok Düşük (Çok Hafif)
Dayanım	Orta - Yüksek	İyi	Düşük
Korozyon Direnci	Düşük (Korunması Gerekir)	İyi (Doğal Oksit Tabakası)	Mükemmel
Yorulma Ömrü	İyi	İyi	Çok İyi
Tasarım Esnekliği	Düşük - Orta	Orta	Çok Yüksek (Karmaşık Şekiller Tek Parça)
Üretim Prosesi	Karmaşık ve çok basamaklı	Döküm/İşleme	Enjeksiyon kalıbı ile kısa sürede ,istenen tüm formlarda yekpare üretim
Sönümleme Yeteneği	Düşük	Orta	Çok Yüksek

Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ise, karmaşık geometriye sahip bu işlevlerin tamamının tek bir parça içerisinde bütünleşik olarak elde edilmesine olanak tanır. Bu duruma fonksiyonel entegrasyon veya parça konsolidasyonu adı verilir. Konsol alt destek yapıları veya iç kabin bağlantı braketleri gibi çok parçalı metal montajların, tek bir enjeksiyon kalıplı plastik bileşenle değiştirilmesi, montaj süresini ve iş gücü gereksinimini önemli ölçüde azaltır. Bu dönüşüm, elektrikli otobüslerde hedeflenen üretim yalınlığı ve toplam maliyet yönetimi hedefleri için kritik bir stratejik avantaj sağlamaktadır.

Bu doğrultuda metalden mühendislik plastiklerine geçiş, yalnızca malzeme değişimi değil; yük yolunun yeniden tanımlanması, optimizasyon tabanlı geometri oluşturma, üretim teknolojisinin uyarlanması ve doğrulama test süreçlerinin yeniden yapılandırılması anlamına gelmektedir.

2.2. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, bir yapının belirli yükleme, sınır koşulları ve performans gereksinimleri altında malzeme dağılımını yeniden tanımlayarak en az malzeme ile en yüksek yapısal verimliliğin elde edilmesini amaçlayan ileri düzey bir tasarım yaklaşımıdır. Klasik tasarım yöntemlerinden farklı olarak, topoloji optimizasyonu tasarımcının önceden belirlediği geometrik şekil varsayımlarına dayanmaz; malzemenin yapı içindeki yerleşimini matematiksel olarak yeniden organize eder. Böylece yapı, yük taşıma yollarının gerektirdiği şekilde kendiliğinden oluşur. Bu yaklaşım özellikle hafiflik ve dayanım dengesinin kritik olduğu elektrikli araç uygulamalarında stratejik bir rol üstlenmektedir.



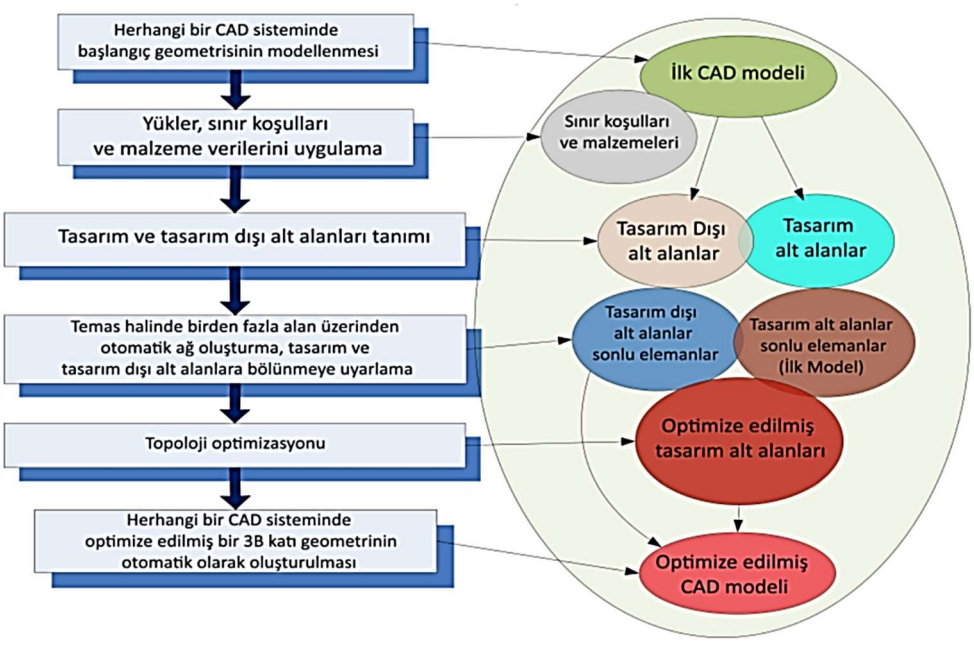
Şekil 2.1 Topoloji optimizasyonu sürecinde tasarım aşamaları (Kahraman & Küçük, 2020)

2.2.1. Tanımı ve temel prensipler

Topoloji optimizasyonunda temel amaç, belirli bir tasarım hacmi içinde hangi bölgelerde malzemenin zorunlu olduğu, hangi bölgelerde ise yük taşımaya katkı sağlamadığı için kaldırılabileceğinin belirlenmesidir. Bu süreç iteratif şekilde yürütülür: her iterasyonda sonlu elemanlar çözümü ile yük taşıma yolları yeniden değerlendirilir, malzeme dağılımı güncellenir ve yapı giderek en verimli taşıyıcı iskelet formuna yaklaşır. Optimizasyon süreci genellikle şu hedef fonksiyonları üzerinden gerçekleştirilir:

- Ağırlığın minimize edilmesi
- Rijitliğin maksimize edilmesi
- Gerilme yoğunluklarının dengelenmesi
- Doğal frekansın kritik rezonans alanlarından uzaklaştırılması

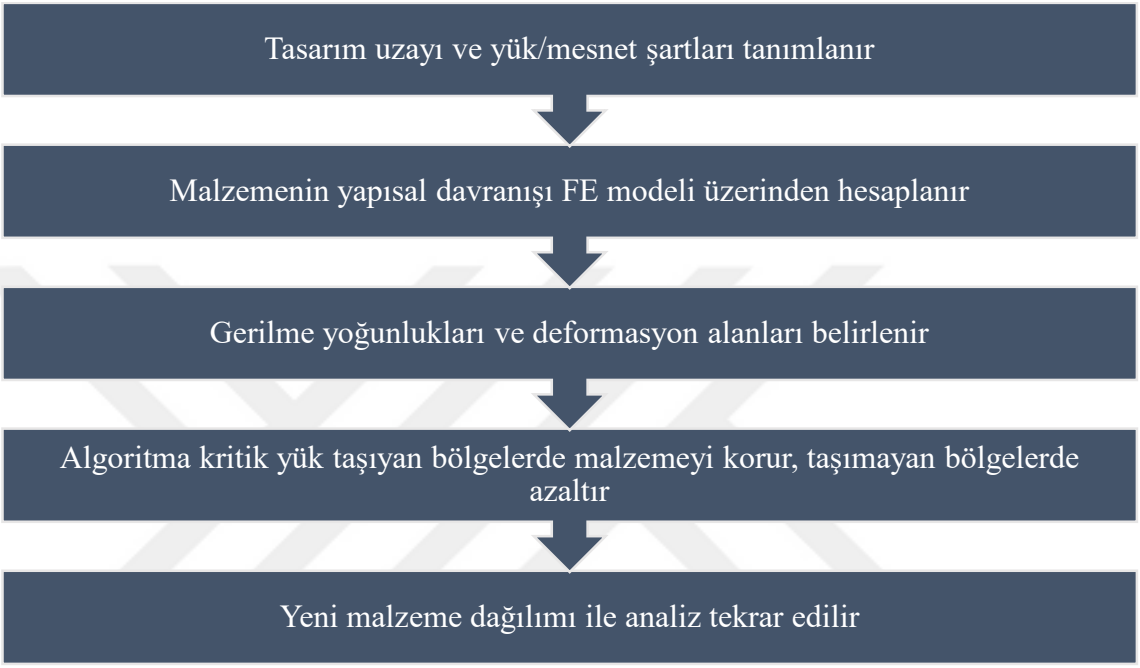
Topoloji optimizasyonunun karakteristik çıktıları çoğu zaman organik, eğrisel ve geleneksel talaşlı üretime uygun olmayan geometrilerdir. Bu nedenle optimizasyon sonrası CAD yeniden-modelleme, geometri temizliği ve üretilebilirlik adaptasyonu zorunlu bir aşamadır.



Şekil 2.2 Topoloji optimizasyonunun tasarım ile entegrasyon şeması (Kahraman & Küçük, 2020)

2.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile entegrasyonu

Topoloji optimizasyonu, temel olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEA) ile iç içe çalışan bir hesaplama döngüsüdür. Süreç aşağıdaki adımlarla ilerler ve bu döngü, belirlenen yakınsama kriterine ulaşılıncaya kadar devam eder.



Şekil 2.3 Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ile topoloji optimizasyonu arasındaki iteratif entegrasyon döngüsü

(Nazlı & Özsoy, 2024), topoloji optimizasyonu ile elde edilen tasarımın güvenilir olabilmesi için FEA doğrulamasının yalnızca tasarım aşamasında değil, nihai üretim sonrası prototip testleri ile desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır.

2.2.3. Otomotiv parçalarında uygulama örnekleri

Topoloji optimizasyonu otomotiv sektöründe özellikle, taşıyıcı iskelet yapıları, süspansiyon bağlantı elemanları, konsol ve panel destek yapıları ve yük taşıyan montaj braketleri gibi bileşenlerde kullanılmaktadır. Bu alanlar; titreşim, yorulma, rijitlik ve montaj toleransı açısından hassas bölgeler olduğundan optimizasyonun etkisi doğrudan performansa yansımaktadır.

Elektrikli otobüslerde kullanılan gösterge paneli iskeleti, hem yol düzensizliklerinden doğan titreşim yüklerine maruz kalmakta hem de kabin içi montaj sistemlerinde boyutsal stabilite ve rezonans kontrolü gerektirmektedir. Bu nedenle bu bileşen optimizasyon tabanlı tasarım için uygun bir uygulama alanıdır.

(Karamert & Demir, 2022), ticari otobüs gövde yapılarında uyguladıkları topoloji optimizasyonu ile yapı kütlesinde anlamlı azalma elde edildiğini, ancak üretilebilirlik adaptasyonunun kritik bir aşama olduğunu belirtmiştir.

2.2.4. Topoloji optimizasyonu algoritmaları ve üretim kısıtlarının entegrasyonu

Topoloji optimizasyonu (TO), bir tasarım hacmi içinde malzeme yoğunluğunun dağılımını matematiksel olarak yeniden tanımlar. Bu süreçte yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasında, malzemenin boşluk ve dolu durumunu ara yoğunluklarla modelleyen SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yöntemi öne çıkmaktadır. Ancak, topoloji optimizasyonu çıktısı olan organik, eğrisel geometriler çoğu zaman geleneksel üretim yöntemleri (özellikle enjeksiyon kalıplama) için doğrudan uygun değildir. Bu nedenle, optimizasyon döngüsü sırasında üretim kısıtlarının (manufacturing constraints) algoritmaya entegre edilmesi gereklidir.

Enjeksiyon kalıplamaya özgü kısıtlar şunlardır:

- Minimum Duvar Kalınlığı: Kalıbın dolumu ve malzemenin bütünlüğü için gereken en düşük kalınlığın korunması.
- Çekme Açısı (Draft Angle): Parçanın kalıptan kolaylıkla ayrılabilmesi için dik yüzeylere verilmesi gereken eğimin sağlanması.
- Simetri ve Maça (Core/Slider) Gereksinimleri: Özellikle kalıplama yönüne dik karmaşık detayların oluşumunu yönetmek

Bu kısıtların optimizasyon problemine dahil edilmesiyle, algoritma teorik olarak en verimli değil, aynı zamanda üretilebilir (manufacturing-aware) olan bir sonuca ulaşmaya yönlendirilir.

2.3. Tasarım Süreci

Tasarım süreci, topoloji optimizasyonu ile elde edilen yapısal formun üretilebilir ve montaj gereksinimleriyle uyumlu hale getirilmesini amaçlar. Elektrikli otobüslerde gösterge paneli iskeleti gibi taşıyıcı bileşenler, hem mekanik yük transferlerini güvenli şekilde sağlayabilmeli hem de kabin içi ergonomi ve kullanım konforuna uygun olmalıdır. Bu nedenle tasarım aşaması yalnızca geometrik modellemeden ibaret değil; malzeme davranışı, üretim yöntemi, kalıp kısıtları ve montaj toleransları gibi çok boyutlu mühendislik parametrelerinin birlikte değerlendirildiği bütünleşik bir süreçtir.

2.3.1. Cad modelleme kuralları

Topoloji optimizasyonu sonrası elde edilen ilk şekil genellikle üretime doğrudan uygun değildir. Bu nedenle optimizasyon çıktısı, CAD ortamında yeniden işlenerek üretilebilir bir geometrik forma dönüştürülür. Modelleme sırasında duvar kalınlığı sürekliliğinin sağlanması, gerilme birikimlerini azaltmak için keskin kenarların radyus geçişleriyle yumuşatılması ve yapısal dayanımı artırmak amacıyla nervür ve destek yüzeylerinin doğru konumlandırılması önem taşır. Cam elyaf takviyeli mühendislik plastiklerinde lif yönlenmesi enjeksiyon akış hattına bağlı olarak değiştiği için, parça geometrisi malzeme akış yolunu yönlendirecek biçimde tasarlanır. Böylece hem mekanik performans hem de üretim sonrası boyutsal kararlılık güvence altına alınır. Bu aşamada oluşturulan CAD modeli, sonlu elemanlar analizleri için temel referans niteliğindedir.

2.3.2. Optimizasyon kriterlerinin tasarıma entegrasyonu

Topoloji optimizasyonu, parçanın hangi bölgelerinin yük taşıma işlevini üstlendiğini ve hangi bölgelerde malzeme tasarrufu yapılabileceğini gösterir. Ancak bu form çoğu zaman üretim ve kalıp koşullarını doğrudan karşılamaz. Bu nedenle optimizasyon sonucunda elde edilen yapısal iskelet, mühendislik tasarım prensipleri doğrultusunda yeniden yorumlanır. Yük taşımayan bölgeler inceltilir, kritik yük aktaran yüzeyler güçlendirilir ve rijitlik artırıcı iç dolgu veya nervür yapıları uygun konumlarda eklenir. Bu süreç tamamen iteratiftir; her revizyon sonlu elemanlar analizleriyle doğrulanır ve nihai geometri, yapısal davranış hedeflerini sağladığında tasarım süreci tamamlanır.

2.3.3. Montaj ve ergonomi açısından tasarım gereksinimleri

Gösterge paneli iskeleti yalnızca taşıyıcı bir bileşen değil, aynı zamanda sürücü kabini içinde doğrudan kullanıcı etkileşimine sahip bir yapıdır. Bu nedenle tasarımda sürücünün görüş alanı, kontrol paneline erişimi ve kabin içi titreşim konforu gibi ergonomik koşullar dikkate alınır. Montaj sürecinin hızlı ve tekrarlanabilir şekilde gerçekleştirilebilmesi için bağlantı noktaları standardize edilir, toleranslar kontrol altında tutulur ve parçanın şasi veya kabin bileşenleriyle olan referans yüzeyleri açık biçimde tanımlanır. Böylece tasarlanan yapı yalnızca yapısal açıdan değil, montaj kolaylığı ve kullanım ergonomisi açısından da ideal performansı sunar.

2.4. Sac Malzemenin Dezavantajları

Sac malzemeler, uzun yıllar boyunca otomotiv endüstrisinde dayanım, şekillendirilebilirlik ve montaj kolaylığı gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak elektrikli otobüslerde enerji verimliliği ve hafiflik gereksinimlerinin ön plana çıkması, sac tabanlı yapıların bazı temel sınırlılıklarını görünür hale getirmiştir. Özellikle batarya kütlesinin araç toplam ağırlığına önemli bir yük getirdiği elektrikli araç sistemlerinde, yapısal bileşenlerin hafifletilmesi stratejik bir tasarım parametresi haline gelmiştir. Bu nedenle sac malzemelerin kullanımına ilişkin mekanik, ekonomik ve işletme koşullarının yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.4.1. Yüksek yoğunluk ve ağırlık

Sac malzemeler, mühendislik plastikleri ve kompozitlere kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Toplam araç kütlesinin artması ise elektrik tüketimini doğrudan yükselterek menzil kapasitesini düşürmektedir. (Karamert & Demir, 2022) otobüs gövde iskeletinde yapılan hafifletme uygulamalarının enerji verimliliğini anlamlı ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu nedenle malzeme yoğunluğu, elektrikli araç tasarımında yalnızca bir malzeme seçimi ölçütü değil, aynı zamanda doğrudan işletme performansını belirleyen kritik bir tasarım girdisidir.

2.4.2. Korozyon ve yüzey işlemleri gereksinimi

Sac yapılar kullanım süresi boyunca çevresel koşullardan etkilenerek korozyona uğrayabilir. Bu nedenle boya, kaplama ve yüzey işlem uygulamaları zorunlu hale gelir ve bu durum bakım maliyetlerini artırır. Şehir içi toplu taşımada nem, tuzlu yol yüzeyleri, sıcaklık değişimleri ve titreşim gibi faktörler korozyon sürecini hızlandıran etkenlerdir. (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021), mühendislik plastiklerinin ve kompozitlerin korozyon gerektirmeyen yapısı sayesinde uzun dönem bakım maliyetlerinde belirgin düşüş sağladığını belirtmektedir. Dolayısıyla korozyon dayanımı, malzeme seçiminde ekonomik sürdürülebilirlikle doğrudan ilişkilidir.

2.4.3. Montaj Zorlukları ve Üretim Maliyetleri

Sac tabanlı yapıların üretiminde bükme, kesme, lazer işleme ve kaynak operasyonları gibi çok aşamalı işlemler bulunmaktadır. Bu süreçler, işçilik yoğunluğu ve tolerans hassasiyeti gerektirdiği için üretimin hem maliyetini hem süresini artırmaktadır. (Kahraman & Küçük, 2020), sac konstrüksiyonlu sistemlerin montaj tekrarlanabilirliğinin plastik enjeksiyonla üretilen tek parça yapılara göre daha düşük olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca metal yapıların her bir bağlantı noktasının ayrı bir işleme veya montaj gerektirmesi, seri üretimde verimliliği sınırlayan bir faktördür. Bu nedenlerle sac malzemeler elektrikli otobüslerde hedeflenen hafiflik ve üretim yalınlığı hedeflerini çoğu durumda tam olarak karşılayamamaktadır.

Bu değerlendirmeler, elektrikli otobüslerde mühendislik plastikleri gibi daha hafif, korozyona dayanıklı ve üretim açısından daha bütünleşik çözümlere yönelmenin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2.5. Mühendislik Plastikleri

Elektrikli otobüslerde yapısal bileşenlerin hafifletilmesi, enerji tüketimi, menzil süresi ve işletme maliyetleri gibi temel performans göstergelerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılan malzemenin yoğunluğu, mekanik dayanımı ve üretilebilirlik özellikleri kritik tasarım ölçütleri arasında yer almaktadır.

Mühendislik plastikleri, metal malzemelere kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olmaları, cam elyaf gibi takviyeler ile güçlendirilebilmeleri ve enjeksiyon kalıplama sayesinde karmaşık geometrilerin tek parça halinde üretilebilmesine olanak tanımaları nedeniyle son yıllarda elektrikli araç uygulamalarında alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, doğru tasarım ve proses parametreleri ile desteklendiğinde taşıyıcı yapılarda gereken rijitlik, darbe dayanımı ve yorulma ömrünü sağlayabilmektedir.

2.5.1. Poliamid grubu (PA6, PA66)

Poliamidler, yarı kristalin moleküler yapıları sayesinde yüksek çekme dayanımı, darbe tokluğu ve yorulma direnci sunan mühendislik plastikleridir. PA66, PA6'ya kıyasla daha yüksek kristalinlik derecesine sahip olduğu için termal stabilite ve mekanik dayanım açısından üstün performans göstermektedir. (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021), cam elyaf takviyeli PA66 kompozitlerin, belirli tasarım koşulları sağlandığında döküm alüminyum parçaların yerini alabilecek seviyede mekanik dayanım ve hafiflik kombinasyonu sunduğunu göstermiştir. Bu özellikler PA66-GF serilerini özellikle titreşim ve yorulma etkilerinin yüksek olduğu taşıyıcı uygulamalar için uygun hale getirmektedir.

2.5.2. Polipropilen esaslı kompozitler (PP-GF)

Polipropilen, düşük yoğunluğu ve kolay işlenebilirliği nedeniyle otomotiv iç trim elemanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak saf PP’nin mekanik dayanımı sınırlıdır. Bu nedenle cam elyaf katkısı ile güçlendirilmiş PP-GF kompozitler, elastik modül ve çekme dayanımı artışı sayesinde yapısal uygulamalar için daha uygun hale getirilmektedir. (Gençsoy, 2022) tarafından yapılan çalışmalarda, cam elyaf oranının artırılmasının malzemenin rijitlik ve kırılma dayanımı üzerinde doğrudan iyileştirici etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. PP-GF serileri özellikle titreşim sönümleme ve darbe dayanımının önemli olduğu bölgelerde tercih edilmektedir.

2.5.3. Cam elyaf katkısı ve lif takviyesinin mekanik performansa etkileri

Cam elyaf, polimer matris içerisinde yük taşıma görevini üstlenen takviye fazı olarak çalışmakta ve kompozitin mekanik davranışını doğrudan belirlemektedir. Elyaf miktarı, lif uzunluğu ve lif yönlenmesi; çekme dayanımı, elastik modül ve yorulma performansı üzerinde kritik rol oynar.

(Kayalı, 2022) enjeksiyon parametrelerinin cam elyaf dağılımını etkileyerek yerel mekanik özelliklerde farklılık oluşturduğunu belirtmektedir. Bu nedenle mühendislik plastiklerinin yapısal uygulamalarda güvenilir performans göstermesi yalnızca malzeme formülasyonu ile değil, aynı zamanda enjeksiyon süreci ve kalıp tasarımının bütüncül olarak optimize edilmesine bağlıdır.

Plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen cam elyaf takviyeli polipropilen parçalarda, elyaf oranının artışı kalıpta çekme ve çarpılma miktarlarını belirgin biçimde azaltmaktadır. Yapılan deneysel ve sayısal analizler, %20 cam elyaf katkılı polipropilen malzemelerin boyutsal kararlılık açısından optimum denge sunduğunu göstermektedir.

Elyaf takviyesi, kalıplama sonrası ölçüsel sapmaları azaltarak parça geometrisinin korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle taşıyıcı ve montaj hassasiyeti gerektiren otomotiv bileşenleri için kritik önem taşımaktadır. (Dağlı, Demirer, & Yumat, 2025)

Lif takviyeli polimer kompozitlerde lif türü ve lif oranı, malzemenin hem fiziksel hem de mekanik özellikleri üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır. Cam, karbon ve polipropilen liflerin farklı oranlarda kullanıldığı çalışmalarda, lif oranının artmasıyla eğilme ve basma mukavemetlerinde kayda değer iyileşmeler sağlandığı görülmüştür. Ancak lif oranının belirli bir seviyenin üzerine çıkması, işlenebilirlik ve homojen dağılım açısından sınırlayıcı etki yaratabilmektedir. Bu nedenle optimum lif oranının, hedeflenen mekanik performans ile üretilebilirlik kriterleri birlikte değerlendirilerek belirlenmesi gerekmektedir. (Topsakal & Özel, 2018)

2.5.4. Metal malzemelerle kıyaslama

Metal malzemeler yüksek dayanım ve rijitlik sunmalarına rağmen yüksek yoğunlukları nedeniyle elektrikli araçlarda menzil kaybına ve enerji tüketiminde artışa sebep olmaktadır. Örneğin çelik yapıya kıyasla PA66-GF30'un yoğunluğu çok daha düşüktür. Ayrıca mühendislik plastikleri enjeksiyon kalıplama yoluyla tek parça halinde üretilebilirken, metal malzemeler çoğunlukla birden fazla parçanın kesme, bükme ve kaynak işlemleriyle bir araya getirilmesini gerektirir. Bu durum plastik bileşenlerin hem üretim süresini kısaltmasını hem de montaj maliyetlerini azaltmasını sağlar. Dolayısıyla mühendislik plastikleri yalnızca ağırlık azaltımı açısından değil, üretim verimliliği ve toplam maliyet yönetimi açısından da önemli avantaj sunmaktadır.

Sonuç olarak, mühendislik plastikleri elektrikli otobüs gösterge paneli iskeleti gibi yapısal uygulamalarda hafiflik, mekanik dayanım, üretilebilirlik ve sürdürülebilirlik hedeflerinin aynı anda sağlanmasına imkân tanıyan stratejik malzeme alternatifleri olarak değerlendirilmelidir.

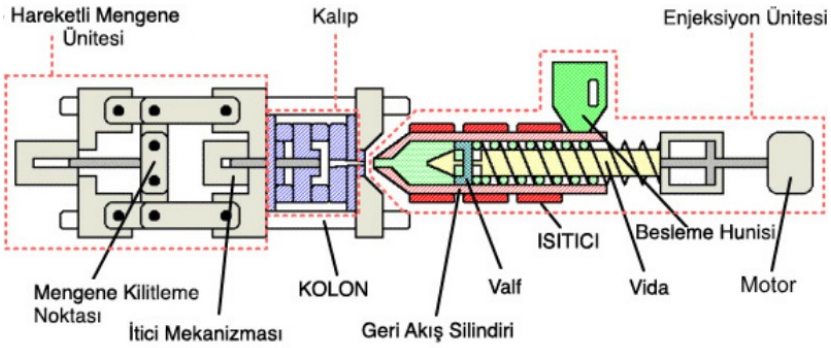
2.6. Plastik Enjeksiyon Prosesi

Plastik enjeksiyon, termoplastik malzemelerin ısıtılarak ergitilmesi ve basınç altında kalıp boşluğuna aktarılması prensibine dayanan yüksek hacimli üretim yöntemidir. Elektrikli otobüslerde kullanılan mühendislik plastiklerinin seri üretiminde bu prosesin tercih edilmesinin temel nedeni; boyutsal tekrarlanabilirlik, üretim hızı, yüzey kalitesi ve geometrik karmaşıklığın tek parça halinde elde edilebilmesidir.



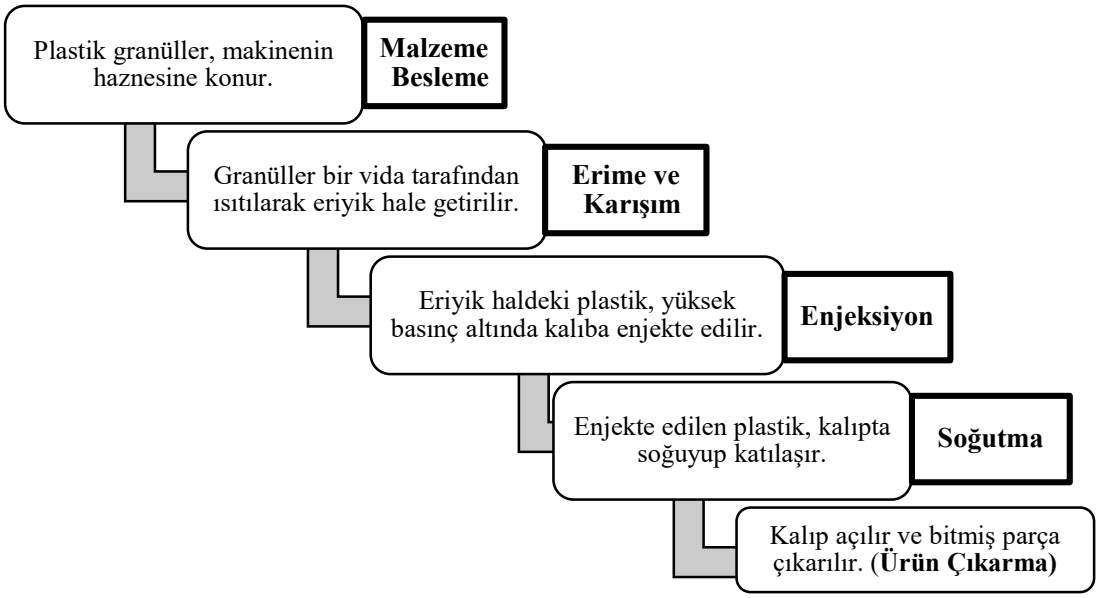
Şekil 2.4 Plastik enjeksiyon makinesi

2.6.1. Prosese genel bakış



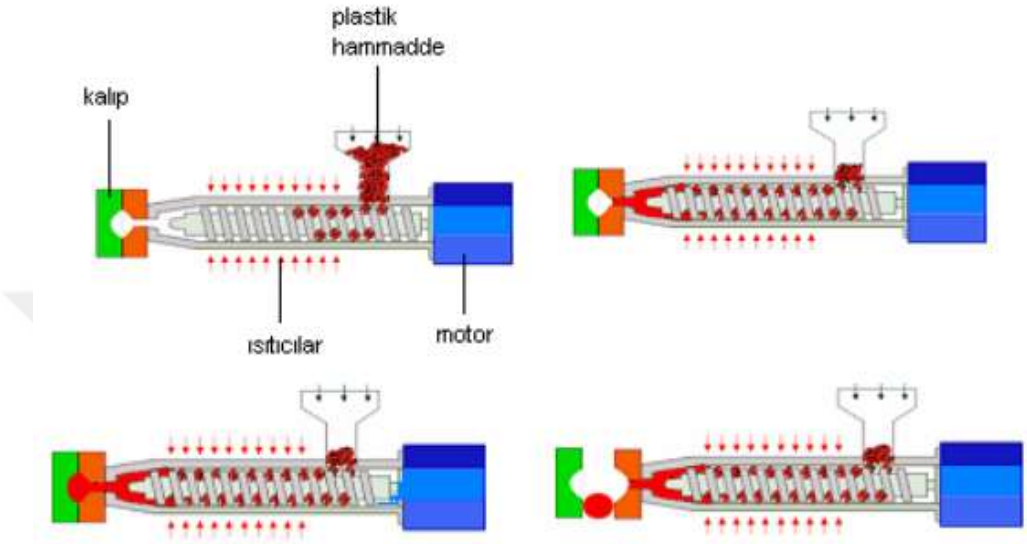
Şekil 2.5 Plastik enjeksiyon makinesinin çalışma şeması

Plastik enjeksiyon süreci, granül formdaki hammaddenin besleme haznesinden vidalı plastikleştirme ünitesine aktarılmasıyla başlar. Vidalı yapı boyunca kontrollü olarak ısıtılan malzeme ergiyik faza ulaşır ve belirlenen enjeksiyon basıncı altında kalıp boşluğuna doldurulur. Kalıp içerisinde malzemenin soğuması ile parça katılaşır ve enjeksiyon sistemi yardımıyla kalıptan çıkarılır.



Şekil 2.6 Plastik enjeksiyon prosesinin temel adımları

Şekil 2.6'da belirtilen işlem döngüsel olarak tekrarlanır ve yüksek üretim adetleri için kısa çevrim süreleri elde edilir. Sürecin her aşaması, parçanın hem boyutsal doğruluğunu hem de iç yapısal özelliklerini etkilediğinden, enjeksiyon hattı parametrelerinin kontrol altında tutulması kritik önem taşımaktadır.



Şekil 2.7 Enjeksiyon (enjekte) işleminin basamakları

2.6.2. Enjeksiyon parametreleri (Sıcaklık, Basınç, Çevrim Süresi)

Enjeksiyon prosesinin nihai parça kalitesi üzerindeki en belirleyici faktörleri; ergitme sıcaklığı, enjeksiyon hızı, tutma basıncı, kalıp sıcaklığı ve soğutma süresi oluşturmaktadır. (Kayalı, 2022), cam elyaf takviyeli polimerlerde bu parametrelerin fiber yönlenmesi ve iç gerilme dağılımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve bunun parçanın çekme dayanımı ile boyutsal kararlılığını belirlediğini göstermiştir.

Cam elyaf takviyeli polimerlerin enjeksiyon kalıplama sürecinde fiber yönlenmesi, nihai parçanın mekanik davranışını doğrudan etkilemektedir. Kalıp sıcaklığı, ergiyik sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi proses parametrelerinin optimize edilmesiyle, akış yönüne paralel fiber yönlenmesinin arttığı kayma tabakası kalınlığı kontrol edilebilmektedir.

Fiberlerin akış yönüne paralel hizalanması, depolama modülü ve kayıp modülü değerlerinde artış sağlayarak parçanın dinamik mekanik performansını iyileştirmektedir. (Altan & Eryıldız, 2018)

Özellikle PA66-GF30 gibi yüksek cam elyaf içeren mühendislik plastikleri için:

- Ergime sıcaklığının 260–290°C aralığında stabil tutulması,
- Kalıp sıcaklığının malzeme kristallenme davranışını destekleyecek düzeyde kontrol edilmesi,
- Tutma basıncının ise iç boşluk ve çökme risklerini önleyecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.
- Bu nedenle enjeksiyon parametreleri yalnızca proses kontrolü değil, aynı zamanda malzeme-mekanik performans ilişkisinin aktif bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

2.6.3. Prosesin avantajları ve sınırlılıkları

Plastik enjeksiyon yönteminin en belirgin avantajları; tek parça üretime imkan tanıyan geometrik özgürlük, seri üretimde yüksek tekrarlanabilirlik, ve iş gücü gereksiniminin düşük olmasıdır. Sac veya metal konstrüksiyonlarda birden fazla parçanın kesme, bükme ve kaynak ile birleştirilmesi gerekirken, enjeksiyon prosesinde tasarımda öngörülen tüm fonksiyonlar tek kalıp içerisinde bütünleşik olarak elde edilebilmektedir.

Ancak prosesin bazı sınırlılıkları bulunmaktadır:

- Kalıp maliyetleri ilk yatırım aşamasında yüksektir.
- Cam elyaf katkısı, akış yönüne paralel lif yönlenmesi nedeniyle mekanik anizotropi oluşturabilir.
- Tasarım aşamasında duvar kalınlığı sürekliliği, çekme-çarpılma kontrolü ve yolluk yerleşimi mutlaka dikkate alınmalıdır.

Dolayısıyla enjeksiyon kalıplama yalnızca bir üretim süreci değil, tasarım–malzeme–proses entegrasyonu gerektiren mühendislik odaklı bir sistemdir.

2.7. Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve İmalatı

Plastik enjeksiyon kalıp tasarımı, üretilecek bileşenin geometrik bütünlüğünü, mekanik performansını, yüzey kalitesini ve seri üretim tekrar edilebilirliğini doğrudan etkileyen ileri düzey bir mühendislik sürecidir. Elektrikli otobüslerde kullanılan gösterge paneli iskeleti gibi taşıyıcı yarı-yapısal bileşenlerde, kalıp tasarımı yalnızca bir üretim araç tasarımı değil, malzeme–geometri–proses etkileşimini yöneten stratejik bir tasarım karar süreci olarak değerlendirilir. Bu nedenle kalıp tasarımı, parça tasarımı ve malzeme seçimi ile eş zamanlı yürütülmeli; lif yönlenmesi, soğutma verimliliği, dolum dengesi ve çarpılma davranışı gibi parametreler tasarımın ilk aşamalarından itibaren gözetilmelidir.

2.7.1. Kalıp bileşenleri

Enjeksiyon kalıpları, temel olarak yolluk sistemi, kalıp boşluğu geometrisi (cavity–core), soğutma devreleri, hareketli mekanizmalar ve enjeksiyon sistemlerinden oluşur.

1. **Yolluk sistemi,** ergiyik polimerin kalıp boşluğuna dengeli ve türbülans oluşturmadan iletilmesini sağlar. Yolluk kesiti, konumlandırma ve giriş noktası, cam elyaf içeren polimerlerde lif yönlenmesini belirlediği için mekanik performansı ve kırılma davranışını doğrudan etkiler.
2. **Cavity–core tasarımı,** parçanın nihai geometrik formunu, yüzey kalitesini ve tolerans hassasiyetini belirler. Cavity yüzeylerinde yapılan mikro düzey yüzey iyileştirmeleri, cam elyaf aşındırıcılığına karşı kalıp ömrünü uzatır.
3. **Soğutma sistemi,** çevrim süresinin belirlenmesinde kritik faktördür. Düzgün soğutma, parçanın çarpılma ve ölçüsel çekme davranışını minimize ederken; düzensiz soğutma gölge bölgeleri, iç gerilme birikimleri ve deformasyonlar oluşturabilir.
4. **Enjeksiyon sistemi**, parçanın kalıptan kontrollü ve hasarsız ayrılmasını sağlar. Cam elyaf takviyeli mühendislik plastiklerde, yüksek modül ve düşük elastiklik nedeniyle enjeksiyon izi, çentiklenme ve deformasyon riskleri yüksektir. Bu nedenle enjektör pimi dağılımı, destek yüzeyleri ve itme kuvveti hesaplamaları titizlikle yapılmalıdır.

2.7.2. Kalıp çeliği seçimi ve işleme teknikleri

Kalıp malzemesi, üretilecek parça adedi, polimerin cam elyaf oranı, enjeksiyon sıcaklığı ve aşınma etkileri göz önünde bulundurularak belirlenir. Cam elyaf takviyeli PA66 ve PP kompozitlerin yüksek abrazyon etkisi, kalıp çeliğinin sertlik ve yüzey dayanımı açısından yüksek performans göstermesini gerektirir.

Çizelge 2.2 Üretim hacmine bağlı olarak enjeksiyon kalıplarında önerilen kalıp çeliği türleri ve performans özellikleri

Üretim Hacmi	**Önerilen Kalıp Çeliği**	**Özellik**	**Not**
Orta	1.2312 / P20	Ön sertleştirilmiş, işlenebilirlik yüksek	Estetik yüzey hassas değilse uygundur
Yüksek	1.2343 / H13 + Isıl işlem	Yüksek aşınma direnci, sıcaklık dayanımı	Cam elyaflı polimerlerde önerilir
Çok yüksek	1.2379 / D2 + Kaplama	En yüksek yüzey dayanımı	Seri otobüs komponentlerinde ideal

İşleme sürecinde CNC frezeleme, tel erozyon ve yüksek hassasiyetli yüzey taşlama teknikleri kullanılır. Kalıp ömrünü artırmak amacıyla PVD kaplama, nitrürleme ve yüzey mikropolaj işlemleri uygulanır. Yüzey kalitesindeki her iyileşme, cam elyaf kaynaklı mikro aşınmayı geciktirerek kalıp bakım döngülerini uzatır.

2.7.3. Moldex analizlerinin tasarıma katkısı

Moldex analizleri, enjeksiyon sürecini sayısal modelleme ve simülasyon yoluyla sanal olarak değerlendirmeyi mümkün kılar.

Bu analizler sayesinde:

- Ergiyik akış yolları,
- Lif yönlenmesi (Fiber Orientation Tensor),
- Dolum hızı ve basınç profili,
- Soğutma homojenliği,
- Çökme ve çarpılma risk haritaları

Bu durum yalnızca tasarım doğruluğunu artırmakla kalmaz, aynı zamanda:

- Kalıp deneme sayısını azaltır,
- Parça reddetme oranını düşürür,
- Çevrim süresini optimize eder,
- Uzun vadeli boyutsal stabiliteyi güvence altına alır.

Elektrikli otobüs gösterge paneli iskeletleri gibi geniş, asimetrik ve rijitlik kritik parçalarda Moldex analizi zorunludur, tercihe bağlı bir aşama değildir.

2.8. Önceki Akademik Çalışmaların Literatür Taraması

Bu alt bölüm, elektrikli otobüsler ve benzeri ticari taşıtlarda yapısal hafifletme, topoloji optimizasyonu uygulamaları, mühendislik plastiklerinin yapısal kullanımı ve plastik enjeksiyon üretim süreçlerine ilişkin mevcut literatürü tematik olarak ele almaktadır.

2.8.1. Otobüs gövde yapılarında optimizasyon çalışmaları

(Karamert & Demir, 2022) ticari otobüs gövdesi ölçeğinde topoloji optimizasyon uygulamalarını sunarak, gövde kısımlarında malzeme azaltımı ile rijitlik korunmasının metodolojik zorluğunu göstermiştir. Çalışma, otobüs gövdesinin kompleks yükleme senaryolarında topolojik yeniden dağıtımın pratik etkilerini detaylandırmakta ve optimizasyon sonuçlarının üretim uygulanabilirliğinin incelenmesinin gerekliliğine dikkat çekmektedir.

Benzer şekilde, çalışmaların çoğu (Kahraman & Küçük, 2020) (Albak, 2019) topoloji optimizasyonunu ağırlık azaltmada etkili bir araç olarak doğrulamış, ancak uygulamaların çoğunun hacim kısıtlaması ve tekil yük senaryoları ile sınırlı kaldığı ve üretim (kalıp/imalat) kısıtlarının çoğunlukla ikinci aşamada ele alındığı görülmüştür. Bu durum, otobüs ölçeğindeki parçalarda hem statik hem de dinamik davranışın birlikte doğrulanmasını zorunlu kılmaktadır (Karamert & Demir, 2022)

2.8.2. Profil örgü / iskelet yapıların topolojik yeniden tasarımı

Profil örgü ve kafes yapı uygulamaları, yüksek özgül rijitlik ve enerji emilimi hedeflenen alanlarda literatürde sıkça yer alır. (Shao & Zhou, 2024) ile (Mete & Başak, 2024) gibi çalışmalar, topoloji optimizasyonu çıktılarının kafes yapıya dönüştürülerek hem malzeme verimliliği hem de üretim kolaylığı sağlanabileceğini göstermiştir. Ancak bu yaklaşımın doğrudan enjeksiyonla seri üretime çevrilebilmesi sınırlıdır; kafes / örgü geometresi genellikle metal işleme veya ileri imalat yöntemleri (ör. 3D baskı) ile ilişkilendirildiğinden, enjeksiyon için tasarım adaptasyonuna ihtiyaç vardır.

2.8.3. Taşıyıcı iskeletlerde sonlu elemanlar analizlerinin rolü

(Nazlı & Özsoy, 2024)FEA tabanlı modal ve yorulma analizlerinin optimizasyon sonrası doğrulamada kullanılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, literatürde S-N yorulma verilerinin plastik malzemeler için optimizasyon döngüsüne entegre edilmesi hâlen sınırlı olup, plastik parça davranışının uzun süreli güvenilirliği konusunda daha geniş deneysel doğrulamaya ihtiyaç vardır.

2.8.4. Ağırlığın enerji tüketimine (menzil/fuel) etkisi

Ağırlık ile enerji tüketimi arasındaki doğrudan ilişki birçok çalışmada teyit edilmiştir. Otobüs ve ticari taşıtlardaki spesifik çalışmalar (Karamert & Demir, 2022) tarafından, taşıt kütlesinin azaltılmasının menzil ve enerji tüketimi üzerinde doğrudan katkı sağladığı nicel ifadelerle ortaya konmuştur. Literatür ayrıca, küçük parça seviyesindeki ağırlık azaltımlarının bile toplamdaki enerji tüketiminde anlamlı etkiler gösterebileceğini belirtmektedir; özellikle şehir içi dur-kalk koşullarında kütle azalması frenleme ve yeniden hızlanma döngülerinde enerji tasarrufu sağlar.

2.8.5. Hafifletmenin emisyon ve operasyonel maliyete katkısı

(Yıldız, 2017) plastik malzemelere geçişin hem karbon ayak izi hem de bakım/işletme maliyetleri açısından avantajlarını tartışmaktadır. Akademik çalışmalar ise hafifletmenin doğrudan CO_2 emisyon azaltımına katkısını, aracın kullanım ömrü ve geri dönüşüm bağlamında ele alarak daha bütüncül bir değerlendirme gerekliliğini vurgulamaktadır.

2.8.6. Yapısal optimizasyon ile minimum malzeme kullanımı

Topoloji optimizasyonu ve parametrik tasarım yöntemleri minimum malzeme kullanımı hedefini doğrudan gerçekleştirir; bununla birlikte literatürdeki pek çok çalışma (Kahraman & Küçük, 2020) (Albak, 2019) (Shao & Zhou, 2024) optimizasyonun pratik üretilebilirlik sorunlarına (ör. ince duvar kalınlıkları, iç gerilmeler, kalıp akış sorunları) dikkati çekmiştir. Bu sorunlar, optimizasyon aşamasında üretim kısıtlarının (manufacturing constraints) ve proses parametrelerinin doğrudan modele dahil edilmemesinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, hem akademik hem sektör çalışmalarında üretim-kısıtlı optimizasyon yaklaşımları (manufacturing-aware topology optimization) geliştirilmektedir; fakat enjeksiyon kalıbı spesifik kısıtların (çarpılma, akış yönleri, maça gereksinimleri) optimizasyon döngüsüne etkisini kapsamlı biçimde ele alan çalışmalar hâlâ sınırlıdır.

2.8.7. Malzeme davranışı ve katkılı plastikler

(Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021) ile (Gençsoy, 2022) cam elyaf katkılı polimerlerin mekanik davranışlarını inceleyerek, yüksek cam elyaf oranlarının rijitlik ve çekme dayanımını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Ancak artan takviye oranları aynı zamanda kırılganlık ve akış/işlenebilirlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir; dolayısıyla optimum katkı oranı belirlenmesi uygulama bazlı dengelemeleri gerektirir. Bu çalışmalar, PA6/PA66-GF serilerinin özellikle taşıyıcı uygulamalarda metal alternatifleriyle kıyaslanabilir mekanik performans gösterebildiğini kanıtlamaktadır, fakat malzeme yoğunluğu ve yorulma davranışı konusunda daha fazla uzun dönem veriye ihtiyaç vardır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, elyaf hacim oranının artırılmasıyla birlikte çekme dayanımı, elastik modül ve darbe dayanımı değerlerinde anlamlı artışlar gözlemlenmiştir. Elyafların yük taşıma kapasitesini artırması ve matris–elyaf ara yüzey etkileşiminin güçlenmesi, bu mekanik iyileşmenin temel nedenleri arasında yer almaktadır. Özellikle %50 ve üzeri elyaf oranlarında kompozit malzemelerin rijitlik açısından metal alternatiflere yaklaşabildiği raporlanmaktadır. (Çakır & Berberoğlu, 2018)

2.8.8. Enjeksiyon parametreleri ve üretim etkileri

(Kayalı, 2022) enjeksiyon parametrelerinin (sıcaklık, basınç, dolum hızı, soğuma süresi) parça mikroyapısı ve mekanik davranış üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamış; özellikle cam elyaf dağılımı ve lif yönlenmesinin bölgesel mekanik performansı etkilediğini göstermişlerdir.

(Çelik, 2010)tarafından geliştirilen kalıp modelleme paketleri ile (Uçar, 2022)ve (Tuna, 2021) gibi çalışmalarda kalıp maliyet tahminleri, soğutma kanalı optimizasyonu, dolum homojenliği gibi pratik problemler ele alınmıştır.
Bu çalışmaların ortak mesajı, başarılı bir malzeme dönüşümünün (metal → plastik) enjeksiyon prosesinin parametre optimizasyonu ve kalıp tasarımına sıkı entegrasyonuna bağlı olduğudur.

2.8.9. Literatürün Metodolojik Değerlendirmesi ve Etkileri

1. **Metodolojik çeşitlilik ve eksiklikler:** Literatürde topoloji optimizasyonu, FEA doğrulaması, malzeme seçim çalışmaları ve enjeksiyon/kalıp analizleri sıklıkla ayrı ayrı ele alınmıştır. Birçoğu optimizasyonun teorik yönüne ağırlık verirken üretim-kısıtlı optimizasyon ve üretim sonrası doğrulama kısımlarını sınırlandırmaktadır. (Kahraman & Küçük, 2020) (Shao & Zhou, 2024)
2. **Malzeme verisi ve uzun dönem performans**: PA-GF serileri için kısa süreli mekanik veriler yeterli olsa da, yorulma, çevresel yaşlanma ve titreşim altındaki uzun dönem güvenilirlik verileri literatürde sınırlıdır. (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021) (Gençsoy, 2022)
3. **Üretim-kısıtlı optimizasyon ihtiyacı:** Enjeksiyon üretimine özgü kısıtların topoloji optimizasyon süreçlerine entegre edilmesinin eksikliği literatürde tekrarlanan bir noktadır. (Kayalı, 2022) (Çelik, 2010)
4. **Dinamik performans ve modal doğrulama**: Optimizasyon sonrası modal (doğal frekans) ve yorulma analizlerinin hem simülasyon hem de deneysel prototip ile doğrulanması gereken bir adım olmasına rağmen bu doğrulamalar sınırlı sayıda çalışma tarafından tam kapsamlı yapılmıştır. (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021)

2.8.10. Sentez: literatürdeki açık noktalar

Toplanan literatür, topoloji optimizasyonunun hafifletmede yüksek potansiyel taşıdığını ve mühendislik plastiklerinin yeterli mekanik performans sağlama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Ancak şu üç alanda belirgin boşluklar mevcuttur:

- Topoloji optimizasyon çıktılarının enjeksiyon için üretilebilir tasarımlara (duvar kalınlıkları, maça/çekici ayrımları, soğutma hattı entegrasyonu) dönüştürülmesi ve bu dönüşümün optimizasyon sürecine geri beslenmesi;
- Optimizasyon sonrası analiz ile deneysel prototip testlerinin geniş kapsamlı karşılaştırması;
- Malzeme-proses-tasarım üçgeninin (PA66-GF30 / PP-GF30 vs.) birlikte değerlendirilmesi: hem de performans-çevresel etki değerlendirmesi.

Bu tez çalışması tam da bu boşlukları hedeflemektedir: otobüs gösterge paneli iskeleti özelinde topoloji optimizasyonu ile elde edilen geometriyi mühendislik plastiklerine (PA, PP takviyeli) uygulayarak, enjeksiyon kalıp tasarımı (soğutma, yolluk, maça düzeni) ile üretilebilirlik analizlerini entegre edecek; sonrasında 3D prototipler, mekanik testler, modal analiz ve proses simülasyonları ile simülasyon-deney karşılaştırmasını sağlayacaktır. Böylece literatürde genellikle ayrı ele alınan aşamalar tek bir bütünleşik çalışma altında toplanmış olacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Sac Metal referans yapı

Sac metal, özellikle düşük karbonlu çelik türleri üzerinden şekillendirilen ve otomotiv sektörünün neredeyse tüm ana gövde bileşenlerinde kullanılan en köklü mühendislik malzemelerinden biridir. Modern binek araçlarda metal yoğunluğunun hâlâ yüksek olmasının nedeni, çelik malzemelerin: yorulma dayanımı yüksek olması, darbe emme kapasitesinin iyi olması, maliyet avantajı sunması, üretim proseslerinin çok oturmuş olması gibi parametrelerdir.

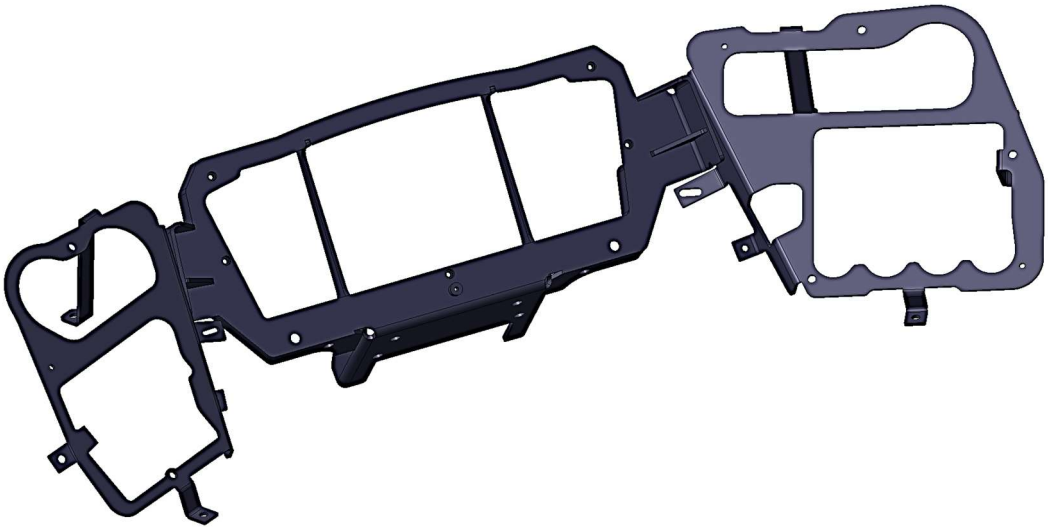
Ayrıca otomotiv üretiminde BIW (Body-in-White) olarak bilinen gövde iskeletinin neredeyse tamamı sac levha şekillendirme teknikleriyle elde edilmektedir. Bu nedenle bu tezde kullanılan referans yapı, sektörde en çok bilinen ve halen yaygın kullanılan bir sac metal geometri üzerinden değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.1 ST37 Mekanik özellikleri

Özellik	Tipik Değer
Elastisite Modülü	210–215 GPa
Akma Dayanımı	180–280 MPa
Çekme Dayanımı	300–420 MPa
Yoğunluk	7.80–7.85 g/cm³
Poisson Oranı	0.30
Isıl Genleşme Katsayısı	11–12 × 10^{-6} /K

Bu özellikler metal malzemeleri rijitlik açısından plastiklere göre çok güçlü yaparken, yoğunluk değerinin yüksek oluşu özellikle hafiflik odaklı modern otomotiv yaklaşımlarında önemli bir dezavantaj hâline gelmiştir.

Sac metalin enerji absorpsiyonu, dışarıdan gelen kinetik enerjinin kontrollü plastik deformasyon ve katlanma yoluyla sönümlenmesi sürecidir; ST37 gibi sünek malzemeler akma sınırını aştıktan sonra şekil değiştirerek enerjiyi dağıtır ve kuvvet–yer değiştirme eğrisi altındaki alan kadar işi ısıya dönüştürerek darbe etkisini azaltır.



Şekil 3.1 Sac metal referans parçanın geometrisi

(Mete & Başak, 2024) (Kara, Taşkın, & Demirhan, 2022) (Karamert & Demir, 2022) topoloji optimizasyonunun sac-metal parçaları hafifletmede yetersiz kaldığını, bu nedenle alternatif malzemelere geçişin zorunlu hâle geldiğini göstermektedir.

Sac metalin en belirgin sınırlılık gösterdiği durum; geometrik kısıtlarıdır. Pres ve kalıp geometrisi şu sınırlamaları doğurur:

- Çok derin oyuklar üretilemez.
- Keskin iç radyuslar çatlamaya yol açar.
- Malzeme akışı non-uniform olduğu için yırtılma riski vardır.
- Çok ince cidarlı yapı üretmek zordur.
- Birleştirme noktaları kaynak, perçin, cıvata gerektirdiği için ağırlık artar.

Bu nedenle sac metal referans parçalarda karmaşık iç kanallar, içi boşlaştırılmış işlevsel boşluklar ve optimize edilmiş malzeme dağılımı yapılamaz. Buna karşın plastik enjeksiyon kalıplama, istenirse monoblok bir yapıda çok daha kompleks ve içi oyulmuş geometrileri kolaylıkla üretir.

Bu durum literatürde “sac metal geometrik kısıt problemi” olarak geçer ve topoloji optimizasyonu yapılan metal parçaların çoğunda çözüm yolu plastik kompozite geçiştir.

Çizelge 3.2 ST37 sac malzemede hesaplama parametreleri

Tasarım Unsuru	Sembol	Formül-Standart Değer	Açıklama
Min. Büküm Radyusu	Rmin	R=1·t	Malzemenin çatlamasını engeller.
Min. Flanş (Kenar) Boyu	Lmin	L=3·t+R	Sacın kalıba güvenli oturmasını sağlar.
Delik - Büküm Mesafesi	Xmin	X=2·t+R	Deliğin büküm sırasında ovalleşmesini önler.
Delik - Kenar Mesafesi	Emin	E=1.5·t	Kenarda yırtılma ve şişmeyi önler.
İki Delik Arası Mesafe	Smin	S=2·t	Malzeme köprü bütünlüğünü korur.
Büküm Kurtarma Genişliği	w	w=1·t	Büküm kenarındaki kontrolsüz yırtılmayı önler.
Büküm Kurtarma Derinliği	d	d=R+0.5·t	Bükümün temiz bir şekilde sonlanmasını sağlar.
Büküm Payı	BA	BA=180π·A ·(R+K·t)	Sacın büküm bölgesindeki gerçek uzunluğudur.

3.1.2. PA6 60 GFR

PA6 60 GFR, metal yerine kullanılabilecek en yüksek performanslı termoplastiklerden biridir. Cam elyafı oranı yüksek olduğundan mekanik özellikleri bazı alüminyum sınıflarıyla dahi rekabet edebilir.PA6 GF60 malzemesi, sahip olduğu yüksek termal stabilite ve mekanik dayanım sayesinde global OEM standartlarını karşılamaktadır. Malzeme, özellikle motor bölgesi ve yapısal komponentler için kritik olan şu spesifikasyonlar çerçevesinde değerlendirilmektedir;

1. Volkswagen Grubu : VW TL 52682 (Poliamid 6, cam elyaf takviyeli) standardına uygunluk göstererek motor kapakları ve emme manifoldlarında tercih edilir.
2. BMW Grubu: BMW GS 93016 (Plastics in the Engine Compartment) kapsamında yüksek ısı yaşlandırma testlerinden geçmektedir.
3. Renault/Dacia: Renault D47 1300 (Nem emilimi ve boyutsal kararlılık) ve Renault D41 1003 (Çekme dayanımı) spesifikasyonlarına göre onaylanmaktadır.
4. Stellantis/Fiat: ISO 1043 ve Fiat 55232 normlarına uygun olarak yapısal braketlerde metal muadili olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.3 Yüksek cam elyaf oranlı PA6 (GF60) için standartlara dayalı mühendislik özellikleri

Özellik Grubu	Parametre	Koşul	Değer	Birim	Standart
Genel	Kısaltma	-	PA6 GF60	-	ISO 1043
	Yoğunluk	-	1,7	g/cm3	ISO 1183
	Nem İçeriği	-	< 0,2	%	ISO 15512
	Nem Emilimi	50% RH, 23°C	1,2	%	ISO 62
Mekanik	Kopma Mukavemeti	+23°C	200	MPa	ISO 527
	Kopma Uzaması	+23°C	2	%	ISO 527
	Elastisite Modülü	+23°C	20000	MPa	ISO 527
Termal	Erime Sıcaklığı	10 K/min	223	°C	ISO 11357

Cam elyaf oranı yükseldikçe: elastisite modülü doğrusal olmayan şekilde artar, çekme dayanımı yükselir, darbe dayanımı orta seviyede korunur, creep (sürünme) değeri düşer, termal kararlılık artar, çarpılma azalır.

Bu durum, literatürde özellikle hafif yapısal braketler üzerinde yapılan çalışmalarda net şekilde gösterilmektedir. Mesela (Shao & Zhou, 2024), PA6 60 GFR'nin çelik braket yerine kullanıldığı bir çalışmada: %68 ağırlık azaltma, %5 daha yüksek doğal frekans, %37 daha düşük maksimum gerilme elde edildiğini raporlamıştır. Bu nedenle PA6 60 GFR, bu tezde performans adaylarından biri olarak değerlendirilmiştir.

Lif yönlenmesi FEA analizleri için kritik bir parametredir. Yükler lif doğrultusuna paralel geldiğinde malzeme: çok sert, çok dayanıklı davranır. Ancak liflerin dik doğrultusunda elastisite modülü %50'ye kadar düşebilir. Bu nedenle HYPERMESH optimizasyonunun sonuçlarıyla Moldex fiber yön tahmini birlikte değerlendirilmelidir. Literatürde (Yıldız, 2017) (Karamert & Demir, 2022) fiber yönlenmesinin optimize edilmediği parçalarda: warpage'ın, zonal deformasyonun, stres birikimlerinin önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir.

60% GFR malzemeler:

- Yüksek viskoziteye sahiptir yani büyük yolluk ve soğutma gerektirir.
- Kalıp içi basınçları yüksektir bu sebeple kalıp rijitliği kritik hâle gelir.
- Aşınma yüksek olduğu için kalıp çeliği minimum 48–52 HRC olmalıdır.
- Soğutma kanalları özel tasarlanmalıdır çünkü sıcak noktalar çarpılmaya sebep olur.

Bu nedenle malzemenin seçilmesi, yalnızca analiz değil üretim fizibilitesi açısından da ciddi mühendislik gerektirmektedir.

Çizelge 3.4 %60 cam elyaf takviyeli PA6 için proses sıcaklıkları ve basınç aralıkları

Proses parametresi	**Değer**	**Birim**
Kurutma	80/2-4	°C/hr
Besleme Boğazı Sıcaklığı	60-80	°C
İşleme Sıcaklığı	250-270	°C
Kalıp Sıcaklığı	60-100	°C
Basınç Tutma	50-100	Mpa
Geri Basınç	Düşük	
Enjeksiyon Hızı	Yüksek	

3.1.3. PA6 30 GFR

PA6 30 GFR cam elyafı oranı yüksek sınıfa göre daha iyi akışkanlık, daha düşük maliyet ve daha kolay üretilebilirlik sunar. 30% GF takviyeli PA6 malzemelerde: yoğunluk 1.35 g/cm³ olması metalin yalnızca %17'si olduğunu gösterir ve ağırlık avantajı sağlar. Çekme dayanımı 120 MPa'ya kadar çıkabilir ve bu değer belirli braketler için yeterli olur. Darbe dayanımı iyidir, yorulma dayanımı yüksektir.

Bu durum PA6 30 GFR'yi özellikle: taşıyıcı fakat kritik olmayan yapısal parçalarda, oluşan yük seviyesinin orta derecede olduğu noktalarda, tasarım özgürlüğü gereken geometrilerde, titreşim sönümleme gereken bağlantılarda ideal hâle getirmiştir.

Çizelge 3.5 %30 cam elyaf takviyeli PA6 için standartlara dayalı mühendislik parametreleri

Özellik Grubu	Parametre	Test Standardı	Test Şartları	Değer / Birim
Fiziksel	Yoğunluk	ISO 1183-1	22±1∘C	1,36 g/cm3
	Nem Miktarı	ISO 15512	130 °C, 15 dk.	< %0,2 (maks.)
	Kül Miktarı	ISO 3451-1	800∘C, 15 dk.	%30 (maks.)
Mekanik	Çekme Dayanımı	ISO 527-2	22±1 °C, 50 mm/dk	170 MPa
	Elastisite Modülü	ISO 527-2	22±1 °C	8000 MPa
	Kopmada Uzama	ISO 527-2	22±1 °C, 50 mm/dk	< %5
	Izod Çentikli Darbe	ISO 180	22±1∘C	15 kJ/m2
	Izod Çentiksiz Darbe	ISO 180	22±1∘C	80 kJ/m2

(Nazlı & Özsoy, 2024), PA6 30 GFR kullanarak otomobil salıncağının topoloji optimizasyonunda %45 ağırlık azaltma elde etmiş ve çelik eşdeğerinin yorulma performansını yakalamayı başarmıştır.

1. Motor üst kapak bağlantıları – yüksek ısıl bölgeler için yeterlidir
2. Gösterge paneli destek braketleri – yüksek dinamik yük gerektirmez
3. Koltuk mekanizma bağlantı parçaları – darbe almayan bölgeler için uygundur
4. Kablo taşıyıcı kanal elemanları – hafiflik ön plandadır
5. Far yuvaları ve modül tutucular – titreşim sönümleme avantajı vardır

Çizelge 3.6 %30 cam elyaf takviyeli PA6 için kurutma ve enjeksiyon parametreleri

Parametre	Değer / Birim
Ön Kurutma Süresi	2 - 4 saat
Ön Kurutma Sıcaklığı	80 - 120 °C
Proses Sıcaklığı	220 - 280 °C
Enjeksiyon Basıncı	9–14 MPa

3.1.4. PA66 30 GFR

PA66 poliamid ailesinin en yüksek performanslı ve en mühendislik odaklı türüdür. PA6'ya göre: daha yüksek kristalin oranı, daha iyi termal dayanım, daha düşük sürünme, yüksek darbe dayanımı, kimyasallara karşı daha yüksek direnç gibi avantajlara sahiptir.

Çizelge 3.7 %30 cam elyaf takviyeli PA66 için standartlara dayalı mühendislik parametreleri

Özellik Grubu	Özellik	Test Metodu	Birim	Değer
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk (23°C)	ISO 1183	g/cm3	1,37
	Kalıp Çekme (Paralel/Normal)	ISO 294-4	%	0,3 / 0,8
Mekanik Özellikler	Çekme Modülü	ISO 527-2	MPa	10200
	Kopma Mukavemeti	ISO 527-2	MPa	190
	Kopma Uzaması	ISO 527-2	%	3
	Eğilme Modülü	ISO 178	MPa	8800
	Eğilme Dayanımı	ISO 178	MPa	275
	Izod Çentikli Darbe (23∘C)	ISO 180/1A	kJ/m2	12
	Izod Çentiksiz Darbe (23∘C)	ISO 180/1U	kJ/m2	75

Çizelge 3.8 PA66 GF30 (PA66 30 GFR) için önerilen enjeksiyon kalıplama proses parametreleri

Parametre	Tavsiye Edilen Değer
Ön Kurutma Sıcaklığı	80 - 85 °C
Ön Kurutma Süresi	4 Saat
Maksimum Nem Oranı	< %0,1
Eriyik Sıcaklığı	< 300 °C
Kalıp Sıcaklığı	90 - 110 °C (Takviyeli sınıflar için)
Enjeksiyon Basıncı	70 - 120 MPa
Ütüleme Basıncı	~ 90 MPa

PA66 30 GFR'nin 260°C üzeri HDT değeri özellikle motor içi parçalar için kritiktir. Modern Euro 6d motorlarında sıcaklık: turboya yakın bölgelerde 220–240°C'ye, Egzoz hattı yakınlarında 280°C'ye kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle PA66 30 GFR, motor bölmesi içindeki: sensör braketleri, PCV valf bağlantıları, Turbo borusu destekleri, EGR mekanizma braketleri gibi parçalar için idealdir.

PA66'nın su absorpsiyonu PA6 ve PP'ye göre yüksektir. Bu durum: boyutsal toleransları etkiler, fiber yönlenmesiyle birleştiğinde warpage'a sebep olabilir, nemli ortamda modül düşer ve yorulma dayanımı değişir, kalıp sonrası sehimenin artmasına sebep olur. Literatürde bu durum için kullanılan çözüm yöntemleri: kalıp tasarımında çekme payının daha yüksek belirlenmesi, parça geometrisine nem telafisi eklemek üretim öncesi kurutmadır.

3.1.5. PP 30 GFR

PP esaslı polimerler, otomotiv parçalarında 1990'lardan bu yana yaygın şekilde kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli versiyonu olan PP 30 GFR, hem maliyet avantajı hem hafiflik avantajı nedeniyle özellikle ticari araç üreticileri tarafından tercih edilmektedir.PP 30 GFR'nin yoğunluğu 1.1 g/cm³ civarındadır. Bu değer: çeliğe göre %86 daha hafif, PA6/PA66'ya göre %20–30 daha hafiftir. Bu nedenle toplam maliyet hedefi olan projelerde PP 30 GFR ciddi bir avantaj sağlamaktadır.

PP 30 GFR'nin en sınırlılıkları: elastisite modülünün düşük olması, yük taşıma kapasitesinin sınırlı olması, sürünme deformasyonunun yüksek olması, düşük sıcaklıklarda gevrekleşme göstermesidir. Bu nedenle PP 30 GFR yalnızca şu durumlarda tercih edilmelidir: dinamik yük düşükse, yalnızca geometri taşıyıcı ise, montaj yükleri düşükse, şekil karmaşık ama yük hafifse, maliyet en kritik parametre ise PP 30 GFR malzeme olarak değerlendirilebilir. Bu çalışma kapsamında PP 30 GFR bir alternatif malzeme olarak değerlendirilmiş, fakat nihai seçim PA grubu üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

Çizelge 3.9 %30 cam elyaf takviyeli PP için standartlara dayalı mühendislik parametreleri

Grup	Özellik	Test Şartları	Standart	Birim	Değer
MEKANİK	Katkı Oranı	750∘C±50∘C	ISO 3451	%	28-32
	Yoğunluk	+23∘C	ISO 1183	g/cm3	1,12-1,16
	Erime Akış İndisi	230∘C / 2,16 kg	ISO 1133	gr/10'	02-06
	Kalıp Çekmesi	Paralel	ISO 294-4	%	0,10-0,40
	Nem Miktarı	-	ISO 15512	%	<0,10
	Çekme Mukavemeti	+23∘C	ISO 527-2	MPa	70-85
	Kopmadaki Uzama	+23∘C	ISO 527-2	%	>2
	Elastite Modülü	+23∘C	ISO 527-2	MPa	5.000-6.000
TERMAL	Vikat Yumuşama Sıcaklığı	10 N	ISO 306	°C	160
	HDT (Deformasyon Sıcaklığı)	0,45 MPa	ISO 75-2/B	°C	145
	Erime Noktası	10°C/dk	ISO 11357	°C	165

Çizelge 3.10 %30 cam elyaf takviyeli PP için erime, kalıp ve basınç parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Ön Kurutma Sıcaklığı	°C	80
Ön Kurutma Süresi	Saat	1-2 saat
Erime Sıcaklığı	°C	210-230
Meme Sıcaklığı	°C	230
Ön / Orta Bölge Sıcaklığı	°C	200-240
Arka Bölge Sıcaklığı	°C	150-180
Kalıp Sıcaklığı	°C	40-70
Tutma Basıncı	MPa	50-100

3.2. Yöntem

Bu bölümde, çalışmanın kapsamını oluşturan tasarım–analiz–optimizasyon–üretim bütünlüğü akademik bir çerçevede sunulmuş; hem metal referans parça hem de PA6, PA66 ve PP esaslı polimer kompozit malzemeler için izlenen metodolojik yaklaşım sistematik olarak açıklanmıştır. Kullanılan yöntemler; CAD modelleme, topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizi, enjeksiyon kalıbı tasarımı, Moldex tabanlı akış analizleri, prototip üretimi ve deneysel doğrulama olmak üzere yedi ana basamaktan oluşmaktadır.

Bu yaklaşım güncel literatürle uyumludur. Özellikle 2020 sonrası çalışmalarda, topoloji optimizasyonunun CAD tasarımla doğrudan entegre edilmesi ve kompozit malzemeler için üretilebilirlik kriterlerinin CAD aşamasında belirlenmesi zorunlu hâle gelmiştir (Mete & Başak, 2024) (Yıldız, 2017). Bu bölümde izlenen süreç, literatürde önerilen bu yeni nesil metodolojiye uyum göstermektedir.

3.2.1. CAD modelleme ve tasarım süreci

CAD modelleme süreci, çalışmanın analitik ve üretimsel temelini oluşturmakta; bu kapsamda elektrikli otobüs gösterge paneli taşıyıcı iskeleti CAD ortamında modellenerek mühendislik plastiklerine uygun biçimde yeniden tasarlanmıştır. Bu süreç, yalnızca geometriyi değil yük aktarımı, montaj, üretim yöntemi ve malzeme davranışını da kapsayan bütüncül bir tasarım aşaması olarak ele alınmıştır.

Çalışmada başlangıç geometrisi olarak, hâlihazırda seri üretimde kullanılan sac metal gösterge paneli taşıyıcı iskeleti referans alınmıştır. Bu referans yapı, araç içerisindeki konumu, direksiyon kolonu, elektronik gösterge elemanları ve trim parçaları ile olan montaj ilişkileri dikkate alınarak incelenmiştir. Mevcut yapının taşıyıcı karakteri, yük aktardığı bölgeler ve montaj eksenleri tespit edilmiş; mühendislik plastiklerine geçiş sürecinde korunması gereken fonksiyonel isterler bu aşamada belirlenmiştir.

CAD modelleme sürecinde öncelikli hedef, sac metal tasarımda birden fazla parçanın kaynak ve büküm prosesleri ile birleştirilmesi sonucu elde edilen taşıyıcı yapının, plastik enjeksiyon yöntemi ile tek parça (yekpare) olarak üretilebilir hale getirilmesidir. Bu doğrultuda tasarım, plastik enjeksiyon prosesine özgü kısıtlar göz önünde bulundurularak yeniden ele alınmıştır. Özellikle minimum duvar kalınlığı sürekliliği, ani kesit değişimlerinden kaçınılması ve kalıplanabilirlik kriterleri CAD tasarımının temel belirleyicileri olmuştur.

Cam elyaf takviyeli mühendislik plastiklerinin mekanik özellikleri, lif yönlenmesine bağlı olarak anizotropik davranış sergilemektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında yalnızca geometrik dayanım değil, aynı zamanda enjeksiyon sırasında oluşacak akış yönleri de dikkate alınmıştır. Parça geometrisi, enjeksiyon akışının mümkün olduğunca taşıyıcı doğrultularda ilerlemesini sağlayacak şekilde yönlendirilmiş; bu sayede cam elyafların kritik yük taşıyan bölgelerde hizalanması hedeflenmiştir. Literatürde cam elyaf takviyeli termoplastiklerde lif yönlenmesinin rijitlik ve yer değiştirme davranışı üzerinde belirleyici olduğu belirtilmektedir (Mutlu, Yeğin, Şen, & Dirikolu, 2021).

Tasarım sürecinde, gerilme yığılmalarının önüne geçmek amacıyla keskin köşe ve geçişlerden kaçınılmış, tüm bağlantı bölgelerinde uygun radyüs geçişleri tanımlanmıştır. Ayrıca sac metal tasarımda doğal olarak rijitlik sağlayan kıvrım ve flanş bölgeleri, plastik tasarımda nervür ve kaburga yapıları ile ikame edilmiştir. Bu nervürler, hem rijitliği artırmak hem de enjeksiyon sonrası oluşabilecek çarpılma risklerini azaltmak amacıyla simetrik ve dengeli bir şekilde konumlandırılmıştır.

CAD modelleme sürecinin bir diğer kritik boyutu, montaj toleranslarının kontrol altına alınmasıdır. Sac metal yapılarda büküm ve kaynak proseslerinden kaynaklanan tolerans sapmaları, plastik enjeksiyon yöntemiyle tek parça üretimde büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Bu avantajdan yararlanabilmek amacıyla montaj noktaları, referans yüzeyler ve bağlantı eksenleri CAD ortamında yüksek hassasiyetle tanımlanmıştır. Böylece parça, araç içerisindeki montaj elemanları ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır.

Sonuç olarak CAD modelleme ve tasarım süreci, bu tez çalışmasının temelini oluşturan ve sonraki analiz, optimizasyon ve üretim adımlarını doğrudan etkileyen kritik bir aşama olarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada elde edilen model, mühendislik plastiklerine geçişin yalnızca geometrik değil; yapısal, üretimsel ve montaj odaklı olarak ele alındığını göstermektedir.

Referans sac metal parçanın geometrisinin doğru modellenmesi, yük analizi, topoloji optimizasyonu ve enjeksiyon kalıbı tasarımı için başlangıç niteliğindedir. Bu nedenle CAD aşaması yalnızca bir çizim süreci olarak değil, veriyi optimizasyona hazırlayan mühendislik altyapı süreci olarak ele alınmıştır.

Çalışmada CAD modelleme için Siemens NX tercih edilmiştir. Bunun başlıca nedenleri şunlardır:

- Parametrik modelleme kabiliyeti yüksek olduğu için tasarım değişiklikleri hızlı yapılabilir.
- HYPERMESH ile çift yönlü veri uyumluluğu sağladığı için optimizasyon sonuçlarının CAD üzerinde güncellenmesi kolaydır.
- NX–Moldwizard modülü sayesinde enjeksiyon kalıp tasarımı, CAD modeli üzerinden doğrudan yapılabilir.
- Parçanın sac metal versiyonu için gerekli büküm radyüsü, nötr eksen hesaplaması, incelme tahmini gibi sac metal fonksiyonları gelişmiştir.

3.2.2. Topoloji optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, bu tez çalışmasında sac metal esaslı referans gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin, mühendislik plastiklerine uygun olacak şekilde yapısal verimliliğinin artırılması ve kütlesinin azaltılması amacıyla kullanılan temel yöntemlerden biridir. Bu aşamada optimizasyon, yalnızca geometrik bir sadeleştirme aracı olarak değil; metalden plastiğe dönüşümünün mühendislik açısından gerekçelendirilmesini sağlayan analitik bir tasarım yöntemi olarak ele alınmıştır.

Topoloji optimizasyonu, metal parçanın geometrisini tamamen yeniden şekillendirerek malzeme kullanımını minimum yaparken yapısal performansı maksimum seviyede tutmayı hedefleyen bir süreçtir. Bu çalışma, özellikle literatürdeki elektrikli otobüs braketleri, pedal sistemleri, şasi bağlantı elemanları üzerine yapılmış optimizasyonlarla metodolojik uyum içindedir (Mete & Başak, 2024) (Kahraman & Küçük, 2020).

Bu çalışmada topoloji optimizasyonunun temel amacı;

- Taşıyıcı yapı üzerindeki yük aktarım yollarının belirlenmesi,
- Yük taşımaya katkısı olmayan bölgelerde malzeme miktarının azaltılması,
- Rijitlik kaybı oluşturmadan toplam kütlenin minimize edilmesi,
- Plastik enjeksiyon yöntemine uygun, yük odaklı bir iskelet formunun elde edilmesi olarak belirlenmiştir.

Topoloji optimizasyonu öncesinde, CAD ortamında oluşturulan referans model üzerinden tasarım uzayı (design space) belirlenmiştir. Tasarım uzayı tanımlanırken; montaj noktaları, bağlantı yüzeyleri, direksiyon kolonu ve gösterge elemanları ile temas eden bölgeler korunması gereken alanlar (non-design region) olarak tanımlanmıştır. Bu bölgeler optimizasyon sürecinde malzeme kaldırılmasına kapatılmıştır.

Buna karşılık, yük aktarımına katkı sağlaması öngörülen ancak geometrik olarak sadeleştirilebilecek bölgeler optimizasyona açık alanlar olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde optimizasyon, rastgele bir malzeme dağılımı yerine, fonksiyonel sınırları net çizilmiş bir tasarım problemi olarak kurgulanmıştır.

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar yöntemi ile entegre çalışan yoğunluk tabanlı optimizasyon yaklaşımı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde hedef fonksiyon, belirli bir hacim oranı altında maksimum rijitliğin sağlanması olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon algoritması, her iterasyonda: gerilme ve yer değiştirme dağılımlarını hesaplamakta, yük taşımayan bölgelerde malzeme yoğunluğunu azaltmakta, kritik yük taşıyan bölgelerde malzemeyi korumaktadır. Bu iteratif süreç, belirlenen yakınsama kriterlerine ulaşılıncaya kadar devam ettirilmiştir. Literatürde belirtildiği üzere, bu yöntem özellikle karmaşık yükleme durumlarına sahip otomotiv bileşenlerinde etkin sonuçlar vermektedir (Nazlı & Özsoy, 2024)

Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen geometri, sac metal referans tasarıma kıyasla belirgin biçimde farklılaşmış; yük aktarım yolları daha net ve süreklilik arz eden bir iskelet formu ortaya çıkmıştır. Özellikle: yük yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde malzeme birikimi, yük taşımayan alanlarda boşluk oluşumu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, yapının yük taşıma karakterinin optimize edildiğini ve malzemenin yalnızca gerekli bölgelerde kullanıldığını göstermektedir. Ancak optimizasyon çıktılarının doğrudan üretime uygun olmadığı, organik ve keskin geçişler içeren bir form sunduğu tespit edilmiştir.

Topoloji analizi sonucunda yük aktarım hatları, gerilme yığılma bölgeleri, minimum kalınlık gerektiren kritik kolonlar, monoblok kalması gereken alanlar ve optimize edilerek boşaltılacak bölgeler detaylı şekilde belirlenmiştir. Bu bölgeler CAD'e aktarılmış ve parça "optimizasyon-temelli tasarım" hâline getirilmiştir. Literatürde bu yöntem Design-from-Topology olarak geçer (Shao & Zhou, 2024). Bu aşamada; organik yüzeyler sadeleştirilmiş, duvar kalınlığı sürekliliği sağlanmış, plastik enjeksiyon kalıplamaya uygun geometrik formlar oluşturulmuştur. Bu yeniden modelleme süreci, optimizasyon ile elde edilen teorik verimliliğin, üretilebilir bir tasarıma dönüştürülmesini sağlamıştır. Böylece topoloji optimizasyonu, yalnızca analiz odaklı bir adım olmaktan çıkarılarak, tasarım ve üretim süreçleriyle bütünleşik hale getirilmiştir.

3.2.3. Sonlu elemanlar analizi

Bu tez çalışmasında, CAD modelleme ve topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen nihai gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin yapısal yeterliliğinin değerlendirilmesi amacıyla sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, tasarlanan yapının gerçek çalışma koşulları altında maruz kalacağı yükler karşısındaki gerilme, yer değiştirme ve rijitlik davranışının sayısal olarak incelenmesine olanak tanıyan temel mühendislik araçlarından biridir. Bu kapsamda analizler, yalnızca tasarımın dayanım açısından yeterliliğini doğrulamak amacıyla değil; aynı zamanda metalden mühendislik plastiklerine geçişin yapısal açıdan güvenilirliğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan geometrik model, topoloji optimizasyonu sonrası CAD ortamında yeniden modellenmiş ve plastik enjeksiyon üretimine uygun hale getirilmiş nihai tasarım üzerinden oluşturulmuştur. Analiz modelinde, tasarımın tüm geometrik detayları korunmuş; ancak çözüm süresini ve hesaplama verimliliğini olumsuz etkileyecek, yapısal davranış üzerinde ihmal edilebilir etkiye sahip küçük geometrik detaylar sadeleştirilmiştir.

Model, üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Eleman boyutları, gerilme gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde daha küçük, düşük gerilme bölgelerinde ise daha büyük olacak şekilde adaptif olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, analiz sonuçlarının doğruluğu artırılırken hesaplama maliyeti kontrol altında tutulmuştur. Ağ (mesh) bağımsızlık çalışmaları yapılarak, sonuçların eleman boyutuna duyarlılığı değerlendirilmiş ve seçilen ağ yapısının sonuçları temsil etme yeterliliği doğrulanmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri, cam elyaf takviyeli mühendislik plastiklerine ait literatür verileri esas alınarak tanımlanmıştır. Analizlerde malzeme davranışı, elastik bölgede lineer kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, taşıyıcı yapının servis yükleri altında plastik deformasyona girmeyecek şekilde tasarlanması hedefiyle uyumludur.

Analizlerde uygulanan sınır koşulları, gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin araç içerisindeki gerçek montaj durumunu temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Yapının araç gövdesine bağlandığı montaj noktaları, sabit mesnetler olarak modellenmiştir. Bu mesnetler, montaj sırasında parça üzerinde oluşabilecek kısıtlamaları ve yük aktarımını temsil etmektedir.

Yükleme durumları, taşıyıcı yapı üzerine etki eden servis yükleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu yükler; direksiyon kolonu, gösterge paneli ve ilgili elektronik bileşenlerin ağırlıkları ile sürüş esnasında oluşabilecek statik yükleri temsil etmektedir. Yüklerin, gerçek kullanım senaryolarını yansıtacak şekilde dağıtılmış yük (distributed load) olarak uygulanmasına özen gösterilmiştir. Bu yaklaşım, noktasal yüklemelere kıyasla daha gerçekçi gerilme dağılımları elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri, temel olarak modal analizler ile sınırlandırılmıştır. Modal analizler, taşıyıcı yapının servis koşulları altındaki gerilme ve yer değiştirme davranışını incelemek için yeterli görülmüştür.

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde aşağıdaki kriterler esas alınmıştır:

- Maksimum eşdeğer (von Mises) gerilme değerleri
- Maksimum yer değiştirme miktarları
- Yapının genel rijitlik davranışı

Elde edilen maksimum gerilme değerleri, ilgili mühendislik plastiklerinin izin verilen gerilme sınırları ile karşılaştırılmıştır. Yer değiştirme değerleri ise montaj toleransları ve fonksiyonel gereksinimler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, yapının işlevini olumsuz etkileyecek seviyede deformasyona uğramaması temel kabul kriteri olarak belirlenmiştir.

Doğal frekans testi aşağıdaki amaçlarla gerçekleştirilmiştir:

- Titreşim kaynaklı yorulma riskini görmek
- Parça üzerindeki rezonans tehlikesini belirlemek
- Metal–plastik karşılaştırmasını yapmak

3.2.4. Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı

Bu tez çalışmasında, sonlu elemanlar analizleri ile yapısal yeterliliği doğrulanan gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin endüstriyel ölçekte üretilebilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı, yalnızca parçanın geometrik olarak kalıplanabilirliğini değil; aynı zamanda üretim kalitesi, çevrim süresi, boyutsal kararlılık ve proses tekrarlanabilirliğini doğrudan etkileyen kritik bir aşama olarak ele alınmıştır.

Bu bağlamda kalıp tasarımı, tasarım–analiz aşamalarında elde edilen teorik kazanımların, gerçek üretim koşullarında karşılığının olup olmadığını ortaya koyan bir doğrulama adımı niteliği taşımaktadır.

Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımına geçilmeden önce, parça geometrisi enjeksiyon kalıplamaya özgü tasarım kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Bu kriterler; minimum ve maksimum duvar kalınlığı, duvar kalınlığı sürekliliği, çekme açıları (draft angle), kesit geçişleri ve maça gereksinimleri gibi parametreleri kapsamaktadır.

Cam elyaf takviyeli mühendislik plastiklerinde ani kesit değişimleri ve kalınlık farkları, akış dengesizliği ve çarpılma riskini artırabilmektedir. Bu nedenle parça üzerinde mümkün olduğunca homojen bir duvar kalınlığı dağılımı sağlanmış, lokal kalınlık artışları nervür yapıları ile dengelenmiştir. Nervürler, hem yapısal rijitliği artırmak hem de kalıplama sırasında soğuma sürecinin dengeli ilerlemesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.

Kalıp tasarımının temel aşamalarından biri, kalıp ayırma yüzeyinin ve kalıp açılma yönünün doğru şekilde belirlenmesidir. Kalıptan çıkış esnasında parça yüzeyinde hasar oluşmasını engellemek amacıyla, kalıp açılma yönüne paralel yüzeylerde uygun çekme açıları tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, kalıptan sorunsuz parça çıkarılmasını sağlayarak üretim sürekliliğini ve kalıp ömrünü artırmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada kalıp açılma yönü, parçanın geometrik özellikleri ve montaj yüzeyleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Amaç, mümkün olan en az maça kullanımı ile parçanın tek hareketli kalıp sistemi içerisinde üretilebilmesidir.

Kalıp ayırma yüzeyi, parça üzerindeki kritik montaj yüzeylerine ve estetik gereksinimlere zarar vermeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Özellikle araç içerisinde görünen yüzeylerde ayırma izlerinin minimize edilmesine özen gösterilmiştir. Bu tercih, yalnızca estetik açıdan değil; aynı zamanda montaj hassasiyeti ve parça fonksiyonelliği açısından da önem taşımaktadır.

Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımında yolluk sistemi, eriyik plastiğin kalıp boşluğuna dengeli ve kontrollü bir şekilde iletilmesini sağlayan en kritik unsurlardan biridir. Bu çalışmada yolluk sistemi tasarlanırken, parça geometrisinin büyüklüğü ve karmaşıklığı dikkate alınmıştır.

Eriyik akışının parça hacmine dengeli şekilde dağılması ve lif yönlenmesinin taşıyıcı doğrultularda gerçekleşmesi amacıyla, giriş noktaları stratejik olarak belirlenmiştir. Giriş noktalarının konumu, parça üzerinde oluşabilecek kaynak hatları (weld line) ve akış birleşme bölgeleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle cam elyaf takviyeli malzemelerde mekanik zayıflıklara neden olabilecek akış hatlarının kritik bölgelerden uzak tutulmasını amaçlamaktadır.

Enjeksiyon kalıplama sürecinde soğutma aşaması, çevrim süresi ve parça boyutsal kararlılığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle kalıp tasarımında soğutma kanalları, parça geometrisine uygun olacak şekilde planlanmıştır. Soğutma kanallarının konumlandırılmasında, parça üzerindeki kalın kesitli bölgeler ve nervür yoğunlukları dikkate alınmıştır. Amaç, kalıp içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamak ve diferansiyel soğuma kaynaklı çarpılma riskini minimize etmektir.

Bu tez çalışmasında plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı, mühendislik plastiklerine geçiş sürecinin yalnızca teorik olarak değil; üretim açısından da uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Kalıp tasarımı ile birlikte, topoloji optimizasyonu ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen tasarımın, gerçek üretim koşullarında karşılaşılabilecek kısıtlar ile çelişmediği gösterilmiştir. Bu aşama, izleyen bölümde gerçekleştirilen kalıp akış (Moldex) analizleri için temel girdi niteliği taşımakta ve üretim sürecinin sayısal olarak doğrulanmasına zemin hazırlamaktadır.

3.2.5. Kalıp Akış (Moldex) analizleri

Bu tez çalışmasında, plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilmesi planlanan gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin üretim sürecindeki davranışının öngörülmesi amacıyla kalıp akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalıp akış analizleri, enjeksiyon sırasında eriyik malzemenin kalıp boşluğu içerisindeki ilerleyişini, basınç ve sıcaklık dağılımlarını, lif yönlenmesini ve üretim sonrası oluşabilecek şekil değişimlerini sayısal olarak modelleyen, uluslararası düzeyde standartlaşmış bir mühendislik yöntemidir.

Bu çalışmada kalıp akış analizleri, Moldex yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Moldex, plastik enjeksiyon prosesinin dolum, soğutma ve çarpılma aşamalarını bütünleşik olarak ele alan ve literatürde yaygın biçimde kullanılan bir simülasyon aracıdır.

Kalıp akış analizlerinde kullanılan geometrik model, plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı aşamasında elde edilen nihai üç boyutlu CAD modeli esas alınarak oluşturulmuştur. Analiz modeli; parça geometrisi, yolluk sistemi ve giriş noktalarını içerecek şekilde hazırlanmıştır. Model, enjeksiyon sürecinde akış davranışını doğru temsil edebilmek amacıyla üç boyutlu hacimsel ağ (3D solid mesh) yapısı ile ayrıklaştırılmıştır.

Ağ yapısı oluşturulurken, parça üzerindeki değişken duvar kalınlıkları, nervürlü bölgeler ve uzun akış yolları dikkate alınmış; bu bölgelerde yeterli çözünürlük sağlanacak şekilde ağ yoğunluğu artırılmıştır. Bu yaklaşım, analiz sonuçlarının proses davranışını temsil etme doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır.

Kalıp akış analizlerinde kullanılan malzeme modeli, cam elyaf takviyeli mühendislik plastiklerine ait malzeme kartları kullanılarak tanımlanmıştır. Malzeme davranışı; sıcaklığa ve kayma hızına bağlı viskozite değişimi, lif yönlenmesi ve büzülme etkilerini içerecek şekilde modellenmiştir.

Enjeksiyon sıcaklığı, dolum süresi, paketleme basıncı ve soğutma koşulları, yazılımın malzeme veri tabanında yer alan öneriler ve literatürde belirtilen tipik değerler esas alınarak belirlenmiştir.

Enjeksiyonla şekillendirme prosesinde yüzey kalitesini olumsuz etkileyen çökme izlerinin önlenebilmesi için tutma basıncı ve tutma süresinin optimum değerlerde ayarlanması büyük önem taşımaktadır.

Dolum ve paketleme aşamaları ayrı ayrı modellenmiş; her iki aşama için basınç, hız ve sıcaklık değişimleri zaman bağımlı olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, enjeksiyon sürecinin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında kalıp akış analizleri kapsamında aşağıdaki analiz türleri gerçekleştirilmiştir:

- Dolum analizi
- Kayma hızı dağılımı
- Dolum ve sıkıştırma basıncı dağılımı
- Kalıp kapama kuvveti
- Yoğunluk dağılımı
- Çarpılma davranışı

Bu analizler, enjeksiyon sürecinin farklı aşamalarında meydana gelen fiziksel olayların ayrı ayrı incelenmesine olanak tanımaktadır. Analizlerin her biri, üretim sürecinde karşılaşılabilecek potansiyel problemlerin öngörülmesi amacıyla kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında kalıp akış analizleri, plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilecek gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin üretilebilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan temel yöntemlerden biridir. Bu yöntem sayesinde, tasarım ve kalıp aşamalarında alınan kararların, enjeksiyon süreci üzerindeki etkileri üretim öncesinde sayısal olarak incelenmiştir.

Kalıp akış analizleri, izleyen aşamada gerçekleştirilecek prototip üretimi için gerekli proses parametrelerinin belirlenmesine metodolojik bir altyapı sağlamış ve tasarım–analiz–üretim zincirinin bütüncül bir şekilde ilerlemesine katkıda bulunmuştur.

3.2.6. Prototip üretimi

Bu tez çalışmasında, tasarım ve sayısal analiz süreçleri sonucunda elde edilen gösterge paneli taşıyıcı iskeletinin fiziksel bir modelini üretmek amacıyla prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi, sayısal modelin üretim sürecine uygunluk ve montaj doğrulamasını sağlamak için kullanılan yöntemlerin uygulamalı bir sınavı niteliğindedir. Bu aşama, yalnızca tasarımın sanal ortamda değerlendirilmesini değil, aynı zamanda gerçek üretim sürecindeki olası geometrik uyum problemlerinin erken tespiti ve ürün–üretilen parça entegrasyonunun ön görülebilmesini amaçlamaktadır.

Prototip üretimi, endüstriyel prototiplemede yaygın olarak kullanılan Fused Deposition Modeling (FDM) tabanlı üretim teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu teknoloji, katmanlı üretim süreçleri arasında üretim kolaylığı, malzeme erişilebilirliği ve yüksek hacimli prototiplerin üretimine uygunluk avantajları nedeniyle tercih edilmiştir.

Prototip üretiminde, Stratasys markasına ait F770 3D Yazıcı kullanılmıştır. F770, endüstriyel sınıf bir FDM sistemidir ve geniş üretim hacmi sayesinde büyük ölçekli parçaların yüksek doğrulukla prototiplenmesine olanak tanır. Bu sistem, özellikle yapısal parçaların prototip üretiminde tercih edilen yüksek mekanik performanslı termoplastik filamentler ile uyumlu çalışmaktadır. Stratasys F770'in üretim hacmi ve katman hassasiyeti, taşıyıcı yapı gibi büyük ve fonksiyonel parçalarda prototip üretimi için uygun bir altyapı sunmaktadır.

Prototip parçanın üretiminde kullanılan malzeme, üretim prosesini temsil etme açısından seçilmiş olup, mühendislik plastiklerinin karakteristik özelliklerini taklit edebilecek termoplastik filamentler arasından tercih edilmiştir. Malzeme seçimi yapılırken; üretim kolaylığı, boyutsal kararlılık, mekanik davranış benzeşimi, termal özelliklerin toleransı gibi kriterler dikkate alınmıştır.

Bu bağlamda, kullanılan filamentin 3D baskı parametreleri, üretim sürecinin tekrarlanabilirliği ve prototipin sonradan yapılacak montaj ve deneysel testler için yeterli sağlamlıkta olması hedeflenmiştir.

CAD ortamında oluşturulan nihai parça modeli, Stratasys F770 için uygun üretim formatına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sürecinde model, STL (Stereolithography) formatına çevrilmiş ve dilimleme (slicing) yazılımı aracılığıyla üretim katmanlarına ayrılmıştır. Dilimleme sürecinde aşağıdaki parametreler kontrol edilmiş ve optimize edilmiştir:

- Katman kalınlığı
- Doldurma (infill) yoğunluğu
- Destek malzemesi yapılandırması
- Yazdırma hızı ve sıcaklık profilleri

Bu parametreler, prototipin üretim sürecindeki mekanik sürekliliği ve yüzey kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle taşıyıcı yapının gerilme taşıyan bölgelerinde yeterli dolgu (infill) seçimi yapılmıştır; bu sayede prototip, yapısal yük testleri ve montaj kontrolleri için uygun hale getirilmiştir.

Stratasys F770 sistemi üzerinde gerçekleştirilen üretim sürecinde, dilimleme sonrası oluşturulan G-kod tabanlı üretim verisi makineye aktarılmıştır. Üretim sırasında aşağıdaki aşamalar takip edilmiştir:

1. Tabla hazırlığı ve yüzey temizliği
2. Filament beslemesi ve nozul ısıtma
3. Katman katman üretim
4. Parça soğutma ve çıkarma

Prototip üretimi tamamlandıktan sonra; destek malzemeleri uzaklaştırılmış, yüzey temizliği yapılmış ve gerekli görülen yerlerde hafif yüzey işlemleri uygulanmıştır. Bu aşama, prototip parçanın montajı ve deneysel uygulamalarda kullanılacak düzeye getirilmesi açısından önemlidir. Prototip üzerinde; ölçüm doğruluğu kontrolü, montaj yüzey uyumu, fonksiyonel nominal boyutlar açısından ön tetkikler gerçekleştirilmiştir.

Prototip üretim süreci, izleyen bölümde gerçekleştirilecek deneysel testlerin hazırlık aşaması olarak yapılandırılmış olup, tasarım–analiz–üretim bütünlüğünü sağlamlaştıran kritik bir yöntemsel aşama olarak konumlandırılmıştır.

3.2.7. Deneysel doğrulama

Bu tez çalışmasında, tasarım, sayısal analiz ve prototip üretimi aşamalarında elde edilen bulguların fiziksel ortamda doğrulanması amacıyla deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel doğrulama, sayısal analizlerle öngörülen yapısal davranışın, gerçek bir fiziksel numune üzerinde sınanmasını sağlayan temel bir yöntemsel adımdır. Bu aşama, geliştirilen taşıyıcı yapının yalnızca teorik olarak değil, pratik uygulama koşullarında da beklenen davranışı sergileyip sergilemediğinin incelenmesini amaçlamaktadır. Deneysel çalışmalar, prototip üretimi tamamlanan gösterge paneli taşıyıcı iskeleti üzerinde gerçekleştirilmiş ve sayısal analizlerde tanımlanan yükleme senaryoları esas alınarak kurgulanmıştır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel doğrulamanın temel amacı;

- Sonlu elemanlar analizlerinde tanımlanan sınır koşullarının fiziksel ortamda temsil edilebilirliğini incelemek,
- Prototip parça üzerindeki deformasyon davranışını gözlemlemek,
- Tasarımın montaj uyumluluğunu ve geometrik sürekliliğini doğrulamak olarak belirlenmiştir.

Bu doğrultuda deneyler, taşıyıcı yapının servis koşullarını temsil edecek şekilde seçilmiş ve nicel ölçüm yapılmasına olanak sağlayacak biçimde planlanmıştır. Deneylerde kullanılan numune, Stratasys F770 3D yazıcı ile üretilmiş olan prototip taşıyıcı iskelettir. Deney öncesinde prototip parça üzerinde;

- Destek malzemelerinin tamamen uzaklaştırılması,
- Görsel kusur kontrolü,
- Nominal ölçülere uygunluk kontrolü

işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Numune, deney sırasında ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek serbestlikleri ortadan kaldırmak amacıyla sabitlenmiş ve test düzeneğine uygun şekilde konumlandırılmıştır. Deneysel doğrulama, çalışmanın yalnızca simülasyon temelli kalmamasını sağlamış; tasarım–analiz–üretim–doğrulama zincirinin tamamlanmasına katkıda bulunan son yöntemsel adım olarak yapılandırılmıştır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler, deneysel doğrulamalar ve üretim temelli incelemeler sonucunda elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bulgular; geliştirilen plastik taşıyıcı yapının mekanik davranışı, dinamik karakteristikleri, malzeme performansı, üretilebilirliği ve kalıp uygunluğu açısından değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde düzenlenmiştir.

Bu kapsamda modal analiz, malzeme karşılaştırmaları, prototip üretimi ve doğrulama çalışmaları, topoloji optimizasyonu sonuçları, plastik enjeksiyon kalıp tasarımı ve Moldex analizlerinden elde edilen veriler alt başlıklar halinde sunulmuştur. Bölüm içerisinde yalnızca analiz ve deney çıktıları raporlanmış; sonuçlara ilişkin yorumlar ve literatür karşılaştırmaları izleyen bölümde ele alınmak üzere bu bölüm dışında tutulmuştur.

4.1. Modal Analiz Sonuçları

Bu bölümde, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının dinamik davranışını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen modal (doğal frekans) analizlerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Modal analizler, nervürlü ve bal peteği geometrisinin bulunduğu İkinci tasarım varyantı(Topoloji optimizasyonu yapılmış) CAD modeli esas alınarak gerçekleştirilmiş; tüm analizlerde aynı sınır koşulları korunmuştur. Böylece farklı malzeme konfigürasyonları için elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır. Modal analiz kapsamında, taşıyıcı yapının doğal frekans değerleri incelenmiştir. Analizler, farklı cam elyaf takviyeli ve takviyesiz termoplastik malzemeler için ayrı ayrı yürütülmüştür.

4.1.1. Genel mod şekillerinin incelenmesi

Elde edilen modal analiz sonuçlarına göre, taşıyıcı yapının ilk modlarında baskın deformasyonların ağırlıklı olarak ana taşıyıcı kirişler boyunca ve serbest uç bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. İlk mod şekillerinde, yapının global eğilme karakterinin ön plana çıktığı; daha yüksek modlarda ise lokal titreşim davranışlarının ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Montaj noktalarına yakın bölgelerde, sınır koşullarının etkisiyle yer değiştirme genliklerinin düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, analizlerde tanımlanan mesnet koşullarının dinamik davranışı doğru şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Bu bölümde, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının ikinci tasarım varyantı için gerçekleştirilen modal (doğal frekans) analizlerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Modal analizler ile, farklı hammadde seçeneklerinin dinamik davranış üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

İkinci tasarım varyantı için elde edilen mod şekilleri incelendiğinde, taşıyıcı yapının ilk modlarında baskın deformasyonların ana taşıyıcı kirişler boyunca ve serbest uç bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Montaj noktalarına yakın bölgelerde, sınır koşullarının etkisiyle yer değiştirme genliklerinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Daha yüksek modlarda ise lokal titreşim davranışlarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Mod şekilleri, taşıyıcı yapının genel geometrisi ile uyumlu bir dağılım sergilemiştir.

Farklı malzemeler için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yer değiştirme ve doğal frekans değerlerinin malzeme türüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Cam elyaf oranı yüksek olan malzemelerde yer değiştirme değerlerinin daha düşük seviyelerde gerçekleştiği, buna karşılık daha düşük elastisite modülüne sahip malzemelerde deformasyon miktarının arttığı belirlenmiştir. Doğal frekans değerlerinde ise malzeme türüne bağlı olarak farklılıklar gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1 Modal analiz sonuçları

Malzeme	Yer Değiştirme (mm)	Gerilme (MPa)	Doğal Frekans (Hz)
PA66 GF 30	1.19	0.11	24.18
PP GF 30	2.05	0.01	29.17
PA6 GF30	1.51	0.11	27.6
PA6 GF60	0.67	0.116	24.1

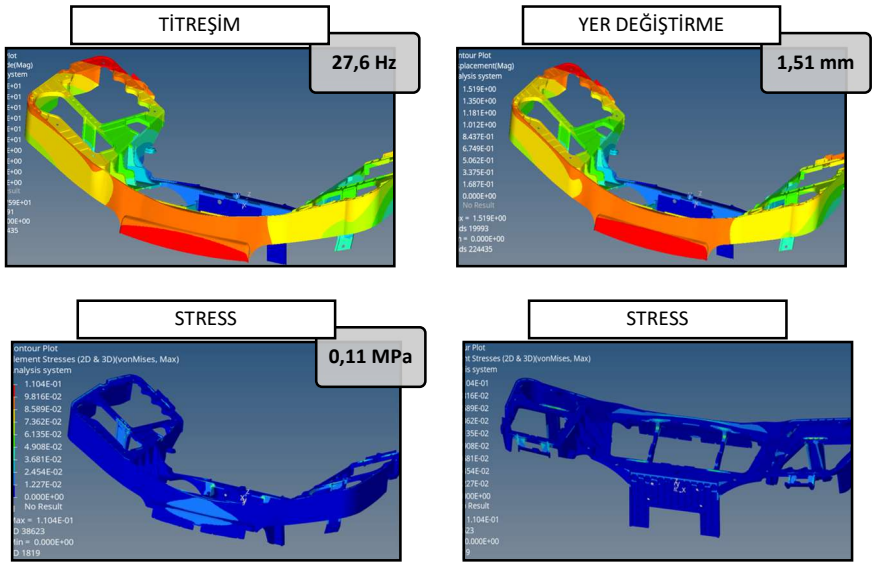
Tabloda sunulan sonuçlara göre, ikinci tasarım varyantında tüm malzemeler için gerilme değerlerinin düşük seviyelerde kaldığı, yer değiştirme miktarlarının ise malzeme rijitliğine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Doğal frekans değerleri, taşıyıcı yapının dinamik karakteristiğinin malzemeye bağlı olarak farklılaştığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.2 Farklı malzemeler için modal analiz sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi

Malzeme	Doğal Frekans Seviyesi	İlk Mod Davranışı	Rijitlik Eğilimi	Titreşim Yayılımı
PA6 GF60	Yüksek	Düşük genlik	Çok yüksek	Lokal
PA66 GF30	Orta–yüksek	Global eğilme	Orta–yüksek	Kısmi
PA6 GF30	Orta	Global eğilme	Orta	Dengeli
PP GF30	Düşük	Belirgin global eğilme	Düşük	Yaygın

4.1.2. PA6 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları

PA6 %30 cam elyaf takviyeli malzeme kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerde, doğal frekans değerlerinin orta seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. İlk modlarda global eğilme davranışı baskın olup, mod şekilleri taşıyıcı yapının genel geometrisi ile uyumlu bir dağılım sergilemiştir.

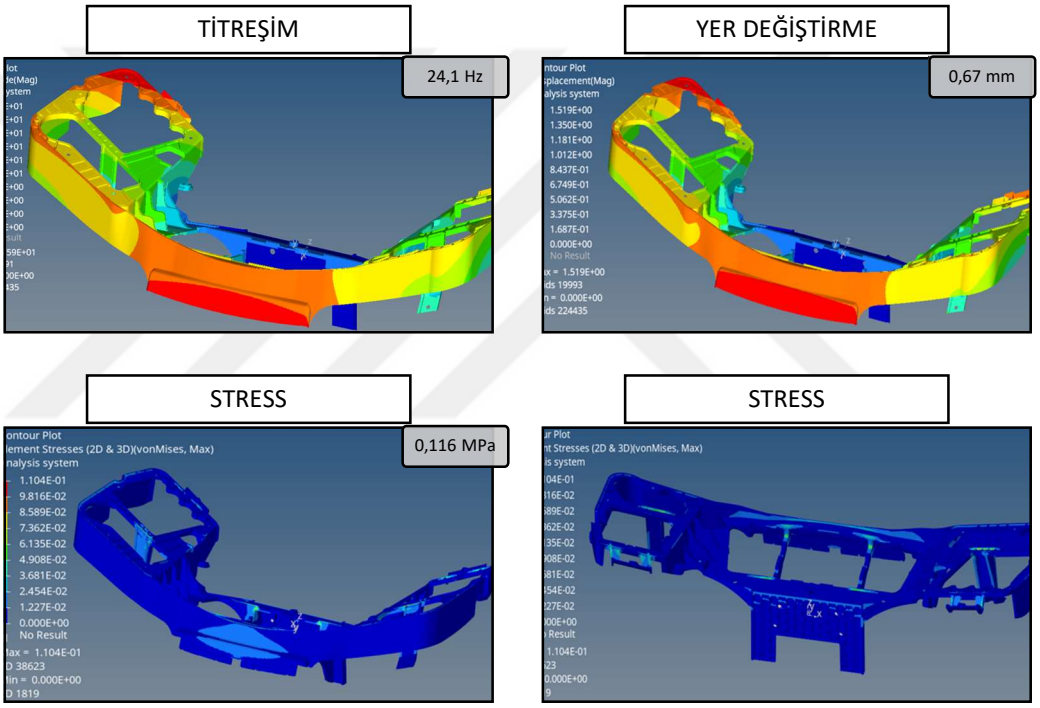


Şekil 4.1 PA6 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları

4.1.3. PA6 GF60 malzemesi için Modal Analiz Sonuçları

PA6 %60 cam elyaf takviyeli malzeme için gerçekleştirilen analizlerde, doğal frekans değerlerinin diğer malzeme seçeneklerine kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde, yapının global rijitliğinin arttığı ve titreşim genliklerinin daha sınırlı alanlarda yoğunlaştığı görülmüştür.

İlk modlarda, taşıyıcı yapının bütüncül hareket ettiği; daha yüksek modlarda ise lokal deformasyonların ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

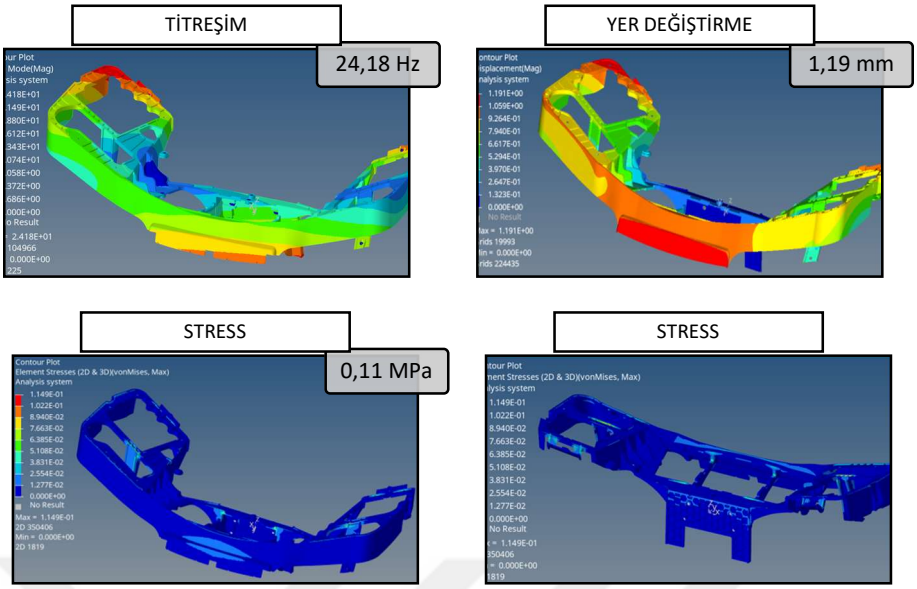


Şekil 4.2 PA6 GF60 malzemesi için Modal Analiz Sonuçları

4.1.4. PA66 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları

PA66 %30 cam elyaf takviyeli malzeme ile yapılan modal analizlerde, doğal frekans değerlerinin PA6 GF30 malzemesine yakın seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Mod şekilleri, özellikle ana taşıyıcı kirişler ve bağlantı bölgeleri çevresinde yoğunlaşmıştır.

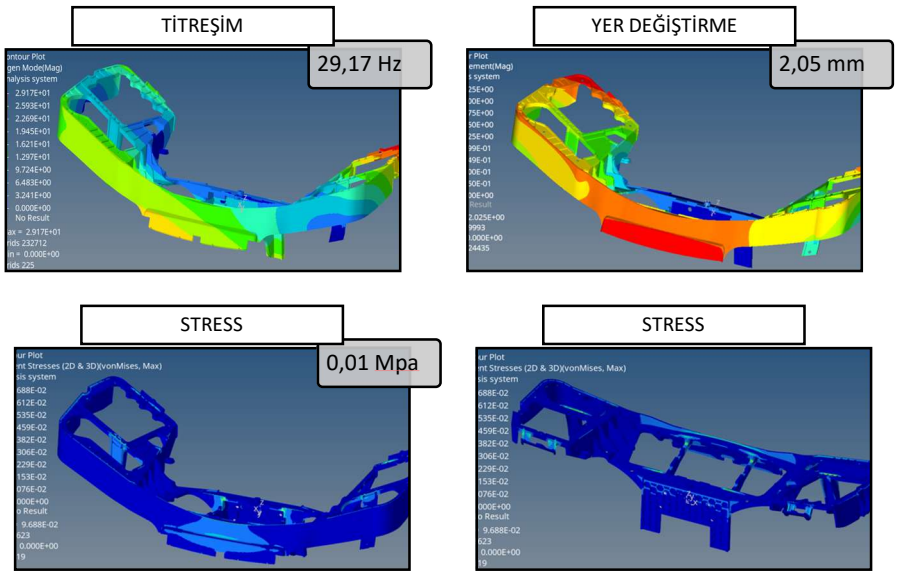
Serbest uç bölgelerinde titreşim genliklerinin arttığı, sabitlenen montaj noktalarında ise sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 PA66 GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları

4.1.5. PP GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları

PP %30 cam elyaf takviyeli malzeme kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerde, doğal frekans değerlerinin diğer cam elyaf takviyeli poliamid esaslı malzemelere kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde, global eğilme davranışının daha belirgin olduğu ve titreşim genliklerinin geniş alanlara yayıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 PP GF30 malzemesi için modal analiz sonuçları

4.1.6. Malzemeye bağlı modal davranışın karşılaştırılması

Farklı malzeme seçenekleri için elde edilen modal analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, cam elyaf oranı arttıkça doğal frekans değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Elastisite modülü yüksek olan malzemelerde, titreşim modlarının daha rijit bir davranış sergilediği; elastisite modülü daha düşük olan malzemelerde ise titreşim genliklerinin arttığı belirlenmiştir. Tüm malzeme konfigürasyonlarında, mod şekillerinin taşıyıcı yapının geometrik özellikleri ile uyumlu olduğu ve analizlerin tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

4.2. Malzeme Karşılaştırmaları

Bu bölümde, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının ikinci tasarım varyantı için farklı hammadde seçenekleri kullanılarak elde edilen analiz ve test sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırmalar, tüm analizlerde aynı geometrik model ve sınır koşulları korunarak gerçekleştirilmiş; böylece malzeme türünün yapısal ve dinamik davranış üzerindeki etkileri doğrudan gözlemlenebilmiştir. Malzeme karşılaştırmaları kapsamında; yer değiştirme, eşdeğer gerilme, doğal frekans ve mekanik test sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. İncelenen malzemeler; PA6 GF30, PA6 GF60, PA66 GF30 ve PP GF30 olarak belirlenmiştir.

4.2.1 Malzemelere göre yer değiştirme karşılaştırması

İkinci tasarım varyantı için elde edilen yer değiştirme sonuçları, malzemelerin rijitlik özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Cam elyaf oranı yüksek olan malzemelerde daha düşük yer değiştirme değerleri elde edilirken, elastisite modülü daha düşük olan malzemelerde deformasyon miktarının arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.3 Malzemelere göre yer değiştirme karşılaştırması

Malzeme	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
PA6 GF60	0.67
PA66 GF30	1.19
PA6 GF30	1.51
PP GF30	2.05

4.2.2. Malzemelere göre gerilme karşılaştırması

Eşdeğer gerilme sonuçları incelendiğinde, tüm malzeme seçenekleri için hesaplanan gerilme değerlerinin düşük seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. Gerilme dağılımlarının, ağırlıklı olarak bağlantı bölgeleri ve yük aktarımının yoğunlaştığı alanlarda toplandığı görülmüştür. Malzemeler arasında maksimum gerilme değerleri açısından sınırlı farklılıklar oluşmuştur.

Çizelge 4.4 Malzemelere göre gerilme karşılaştırması

Malzeme	Maksimum Gerilme (MPa)
PA6 GF60	0.116
PA66 GF30	0.11
PA6 GF30	0.11
PP GF30	0.01

4.2.3. Malzemelere göre doğal frekans karşılaştırması

Modal analiz sonuçlarına göre, doğal frekans değerlerinin malzeme türüne bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Bazı malzemelerde daha yüksek doğal frekans değerleri elde edilirken, bazı malzemelerde daha düşük frekans seviyeleri gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.5 Malzemelere göre doğal frekans karşılaştırması

Malzeme	Doğal Frekans (Hz)
PP GF30	29.17
PA6 GF60	24,1
PA66 GF30	24.18
PA6 GF30	27.6

4.2.4. Malzeme Karşılaştırmalarının Genel Özeti

İkinci tasarım varyantı için gerçekleştirilen malzeme karşılaştırmaları sonucunda, farklı hammadde seçeneklerinin taşıyıcı yapının mekanik ve dinamik davranışı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu ortaya konmuştur. Yer değiştirme, gerilme ve doğal frekans değerleri bakımından malzemeler arasında ölçülebilir farklılıklar elde edilmiştir.

4.3. Prototip Üretim Ve Doğrulama Sonuçları

Bu bölümde, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının fiziksel prototip üretimi ve doğrulama çalışmaları kapsamında elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Prototip üretimi, Bölüm 3'te tanımlanan yöntem doğrultusunda gerçekleştirilmiş; üretim sonrası montaj ve ölçüsel kontroller ile modelin fiziksel olarak doğrulandığı bulgular raporlanmıştır.

4.3.1. Prototip Üretim Sonuçları

Nihai CAD modeli esas alınarak üretilen prototip parçalar, seçilen üretim teknolojisi ile tekil bileşenler halinde imal edilmiştir. Üretim sürecinin tamamlanmasının ardından, parçaların yüzey sürekliliği, geometrik bütünlüğü ve detayların okunabilirliği görsel olarak incelenmiştir. Prototip üzerinde nervürler, montaj delikleri, bağlantı yüzeyleri ve fonksiyonel boşlukların tasarım ile uyumlu şekilde elde edildiği gözlemlenmiştir.

Üretim sırasında, tasarımda tanımlanan et kalınlıklarının ve geçiş bölgelerinin fiziksel prototip üzerinde korunabildiği belirlenmiştir. Parçalar üzerinde üretimden kaynaklı belirgin deformasyon, çatlak veya kopma gözlenmemiştir.



Şekil 4.5 Nihai tasarıma ait üretilmiş prototipin genel görünümü

4.3.2. Montaj uygunluğu ve fonksiyonel doğrulama

Üretilen prototip parçalar, tasarımda öngörülen montaj sırasına uygun olarak bir araya getirilmiştir. Montaj işlemi sırasında, bağlantı noktalarının konumlarının uyumlu olduğu ve parçalar arasında beklenmeyen hizalama problemi oluşmadığı tespit edilmiştir. Montajlı prototip üzerinde, ana taşıyıcı yapı ile alt bileşenlerin birbiriyle geometrik olarak örtüştüğü görülmüştür.

Montaj sonrası yapılan incelemelerde, bağlantı bölgelerinde boşluk oluşumu veya zorlamaya bağlı uyumsuzluk gözlenmemiştir. Bu durum, tasarım aşamasında belirlenen toleransların fiziksel üretimde karşılandığını göstermektedir.



Şekil 4.6 Montajı tamamlanmış prototipin genel görünümü

4.3.3. Geometrik ve ölçüsel doğrulama bulguları

Prototip üzerinde gerçekleştirilen ölçüsel kontroller sonucunda, kritik montaj noktaları ve referans yüzeylerde elde edilen ölçülerin CAD modeli ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Özellikle montaj delikleri, bağlantı yüzeyleri ve taşıyıcı kirişler üzerindeki ölçümlerde, tasarımda öngörülen geometrinin korunduğu tespit edilmiştir. Üretim sonrası yapılan kontrollerde, prototipin genel formunun bozulmadığı ve taşıyıcı yapının tasarlanan geometrik bütünlüğü sağladığı gözlemlenmiştir.

4.3.4. Prototip doğrulama bulgularının genel değerlendirmesi

Prototip üretimi ve doğrulama çalışmaları sonucunda, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının fiziksel olarak üretilebilir olduğu ve montaj açısından tasarıma uygunluk gösterdiği belirlenmiştir. Üretim, montaj ve ölçüsel doğrulama süreçlerinden elde edilen bulgular, sayısal analizler ile oluşturulan tasarımın fiziksel ortamda karşılığının bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bölümde sunulan prototip üretim ve doğrulama sonuçları, izleyen bölümlerde yapılacak kalıp tasarımı, kalıp akış analizleri ve genel değerlendirmeler için temel oluşturmaktadır.

4.4. Topoloji Optimizasyonu Sonuçları

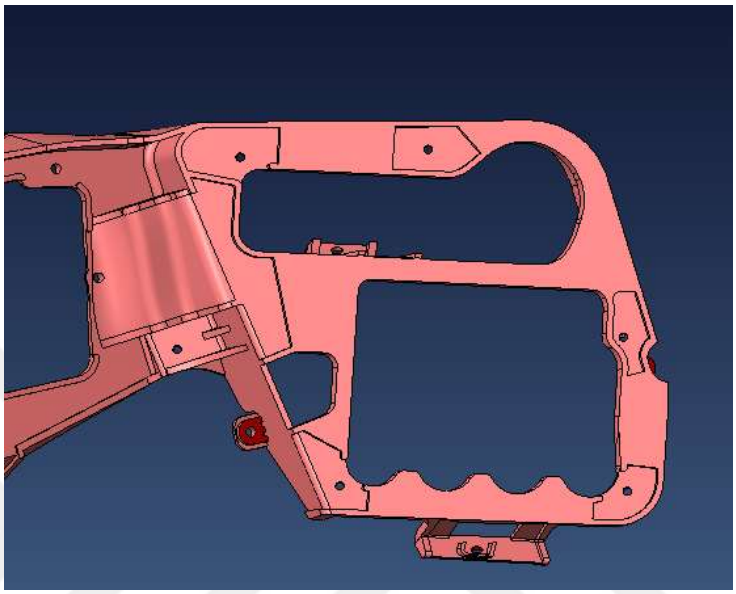
Bu bölümde, plastik taşıyıcı yapının kütle verimliliğini artırmak ve yük taşıma kapasitesini korumak amacıyla gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmalarından elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Topoloji optimizasyonu, sınır koşulları ve yükleme senaryoları esas alınarak yürütülmüş; optimizasyon sürecinde nihai CAD modeli referans geometri olarak kullanılmıştır.

Optimizasyon çalışmaları kapsamında, yapı üzerinde malzeme yoğunluk dağılımları, yük aktarım yolları ve taşıyıcı kirişlerin etkinliği incelenmiştir. Sonuçlar, yoğunluk temelli raporlanmıştır.

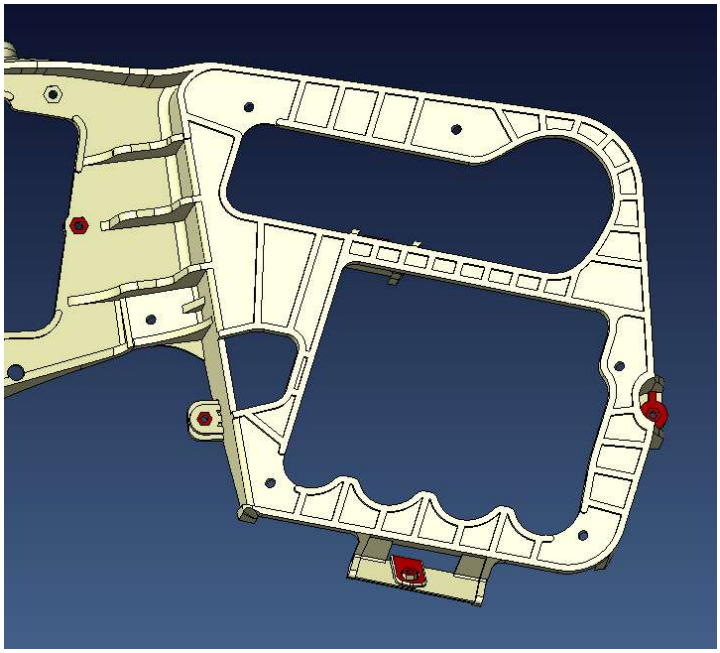
4.4.1. Yoğunluk dağılımı sonuçları

Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen yoğunluk dağılımı haritaları incelendiğinde, taşıyıcı yapı üzerinde yük aktarımının yoğunlaştığı bölgelerde yüksek yoğunluk değerlerinin korunduğu, yük taşımaya katkısı sınırlı olan bölgelerde ise malzeme yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Özellikle ana taşıyıcı kirişler, bağlantı bölgeleri ve montaj noktaları çevresinde yoğunluk değerlerinin yüksek seviyelerde kaldığı belirlenmiştir.

Buna karşılık, geniş yüzey alanlarına sahip ve yük aktarımının sınırlı olduğu bölgelerde yoğunluk değerlerinin düşürüldüğü ve bu alanların kütle azaltımına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen yoğunluk dağılımları, yapının temel yük taşıma yollarını açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7 Başlangıç tasarımına ait yoğunluk dağılımı kesiti



Şekil 4.8 Optimizasyon sonrası elde edilen yoğunluk dağılımı kesiti

4.4.2. Kütle azaltım sonuçları

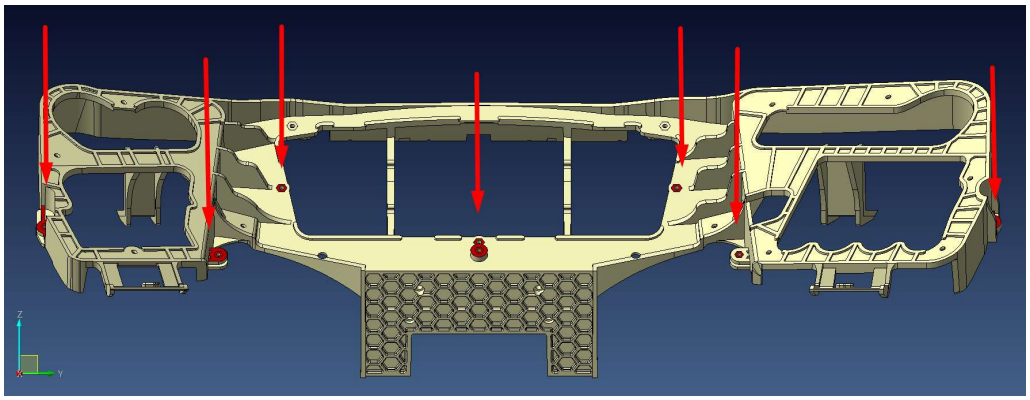
Topoloji optimizasyonu çıktıları doğrultusunda, referans CAD modeline kıyasla belirli bölgelerde malzeme miktarının azaltılabildiği tespit edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen kütle dağılımı, taşıyıcı yapının yapısal bütünlüğünü koruyacak şekilde yeniden organize edilmiştir.

Optimizasyon sürecinde belirlenen hedef kütle oranı doğrultusunda, gereksiz malzeme bölgelerinin elimine edildiği ve yük taşıma açısından kritik bölgelerin korunarak tanımlandığı görülmüştür. Bu durum, optimizasyon algoritmasının tanımlanan sınır koşulları çerçevesinde kararlı bir çözüm ürettiğini göstermektedir.

4.4.3. Taşıyıcı yapı üzerindeki etkiler

Yoğunluk dağılımı sonuçları incelendiğinde, topoloji optimizasyonunun taşıyıcı yapı üzerinde ana yük yollarını belirginleştirdiği ve kiriş benzeri yapıların ön plana çıktığı gözlemlenmiştir. Nervürlü bölgelerin, optimizasyon çıktıları ile uyumlu bir şekilde yük taşımaya katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Optimizasyon sonrası elde edilen yapı formu, montaj noktaları ve bağlantı bölgeleri ile geometrik olarak uyumlu bir dağılım sergilemiştir. Böylece optimizasyon çıktılarının, sonraki tasarım aşamalarında uygulanabilir nitelikte olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.9 Ana yük taşıma yolları ve taşıyıcı bölgeler

4.4.4. Topoloji optimizasyonu bulgularının genel özeti

Topoloji optimizasyonu çalışmaları sonucunda, plastik taşıyıcı yapının yük taşıma açısından kritik bölgeleri net biçimde tanımlanmış; kütle azaltımına olanak tanıyan alanlar belirlenmiştir. Elde edilen yoğunluk dağılımları ve kütle değişim sonuçları, tasarımın bir sonraki aşamasında yapılacak geometrik sadeleştirme ve üretilebilirlik çalışmaları için temel veri niteliği taşımaktadır.

Bu bölümde sunulan topoloji optimizasyonu sonuçları, izleyen kalıp tasarımı ve kalıp akış analizleri ile birlikte değerlendirilmek üzere bulgu olarak raporlanmıştır.

4.5. Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı Sonuçları

Bu bölümde, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının enjeksiyon kalıbı tasarımına uygunluğu kapsamında gerçekleştirilen incelemelerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Kalıp tasarımına yönelik çalışmalar, Bölüm 3'te tanımlanan yöntem doğrultusunda yürütülmüş; üretilebilirliği doğrudan etkileyen geometrik ve yapısal unsurlar değerlendirilmiştir.

4.5.1. Çekme açısı (draft) uygunluğu sonuçları

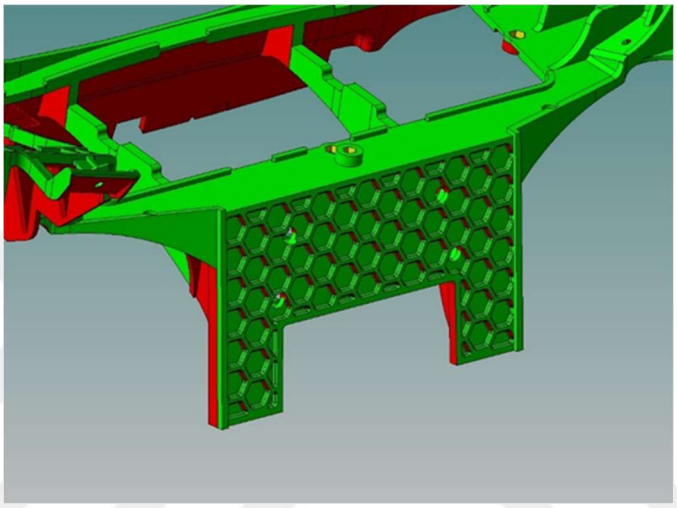
Kalıptan çıkış yönü esas alınarak gerçekleştirilen çekme açısı kontrolleri sonucunda, düşey yüzeylerin kalıp açma yönü ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Kritik yüzeylerde negatif çekme açısı tespit edilmemiş; kalıp ayırma yönüne paralel yüzeylerde minimum çekme açılarının sağlandığı görülmüştür. Bu sonuçlar, parçanın kalıptan hasarsız ve ilave mekanizma gerektirmeden çıkarılabileceğini göstermektedir.

4.5.2. Et Kalınlığı ve Geçiş Bölgeleri Sonuçları

Et kalınlığı analizleri sonucunda, parça genelinde et kalınlıklarının kontrollü ve dengeli bir dağılım sergilediği belirlenmiştir. Ani kalınlık değişimlerinin bulunduğu bölgelerde, geçişlerin yumuşatıldığı ve keskin süreksizliklerin giderildiği tespit edilmiştir. Bu durum, büzülme, çökme ve iç gerilme oluşumu risklerinin sınırlandığını göstermektedir.

4.5.3. Nervür (rib) ve boss geometrisi sonuçları

Nervür ve boss bölgelerine yönelik yapılan incelemelerde, nervür kalınlıklarının ana duvar kalınlığı ile uyumlu oranlarda tasarlandığı belirlenmiştir. Nervür–gövde birleşim bölgelerinde malzeme yığılmasına yol açabilecek geometrik süreksizliklerin giderildiği görülmüştür. Boss çevresindeki destek yapılarının, montaj gereksinimlerini karşılayacak şekilde konumlandırıldığı tespit edilmiştir.

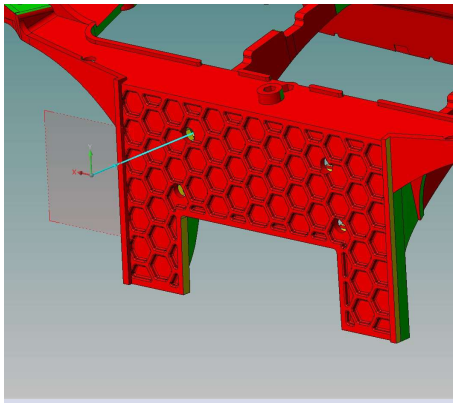


Şekil 4.10 Nervür ve boss bölgelerinde kalıplama yönü dışı yüzeylerin tespiti

Kalıplama ekseninin dışında olan yüzeyler belirlendi. Görselde de görüldüğü üzere hem kırmızı yem yeşil yüzeyler oluştuğu için bu yüzeyler kalıplama açısının dışında kalan yüzeylerdir. Bu bölgelerde maça çalışılması gerekmektedir.

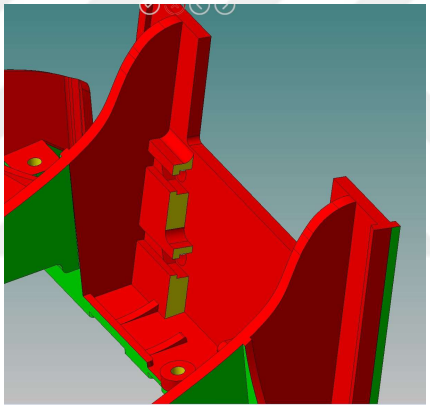
4.5.4. Undercut ve kalıp mekanizması ihtiyacı sonuçları

Parça geometrisi üzerinde yapılan incelemelerde, kalıptan çıkışı engelleyecek ters açı (undercut) içeren bölgelerin minimize edildiği belirlenmiştir. Bu sonuç, kalıp tasarımının sade ve üretim açısından uygulanabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11 Maça açılma eksenine göre ters açılı yüzeylerin tespiti

Maçalar için ,maça açılma ekseni belirlendi ve bu eksene göre yüzey açılımı yapılıp maçanın çalışacağı yüzeyler tespit edildi.(maça 1)



Şekil 4.12 Açılı blok maça gerektiren yüzeylerin detay görünümü

Kalıplama açısının dışında kalan görseldeki yüzeyde açılı blok maça(maça2) çalışacaktır

4.5.5. Ayırma hattı (parting line) uygunluğu sonuçları

Ayırma hattı analizleri sonucunda, kalıp ayırma hattının fonksiyonel ve estetik açıdan kritik yüzeylerden uzak bölgelerde konumlandırıldığı belirlenmiştir. Ayırma hattının, montaj yüzeyleri ve görünür alanlarla çakışmadığı; çapak oluşumu riskinin düşük olduğu bölgelerden geçirildiği tespit edilmiştir.

- Kalıp açılım yüzeyleri yapıldı.
- Dişi ve erkek çelik yüzeyleri belirlendi.
- Kırmızı yüzeyler dişi çelik (sabit çeliğin yüzeylerini oluşturacaktır)
- Yeşil olan erkek çelik(hareketli çeliğin yüzeylerini oluşturacaktır)
- Boşluk ve çekirdek mantığına göre değerlendirilmiştir.
- Kırmızı olan yüzey boşluk yeşil olan ise çekirdek olarak değerlendirilmiştir.

4.5.6. Kalıp tasarımı bulgularının genel özeti

Plastik enjeksiyon kalıp tasarımına yönelik yapılan incelemeler sonucunda, geliştirilen taşıyıcı yapının üretilebilirlik açısından kalıp tasarımına uygun olduğu belirlenmiştir. Çekme açıları, et kalınlığı dağılımı, nervür ve boss geometrileri ile ayırma hattı konumlandırması bakımından parça geometrisinin kalıp tasarım kriterlerini karşıladığı görülmüştür. Bu bulgular, izleyen bölümde sunulan kalıp akış analizleri için uygun bir geometrik altyapının sağlandığını ortaya koymaktadır.

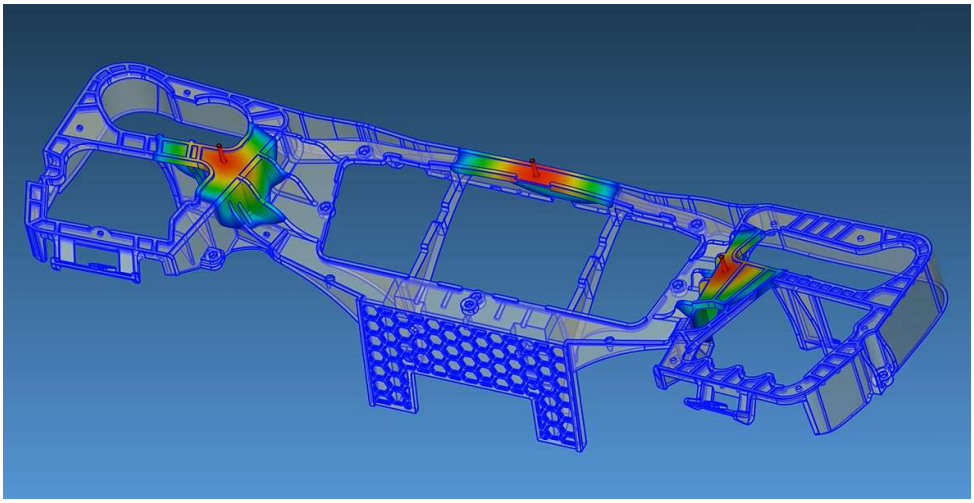
4.6. Moldex Analizi Sonuçları

Bu bölümde, plastik taşıyıcı yapının enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilebilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen Moldex analizlerinden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Analizler; dolum davranışı, kayma hızı dağılımı, basınç gereksinimleri, kalıp kapama kuvveti, yoğunluk dağılımı ve çarpılma eğilimleri açısından ele alınmıştır.

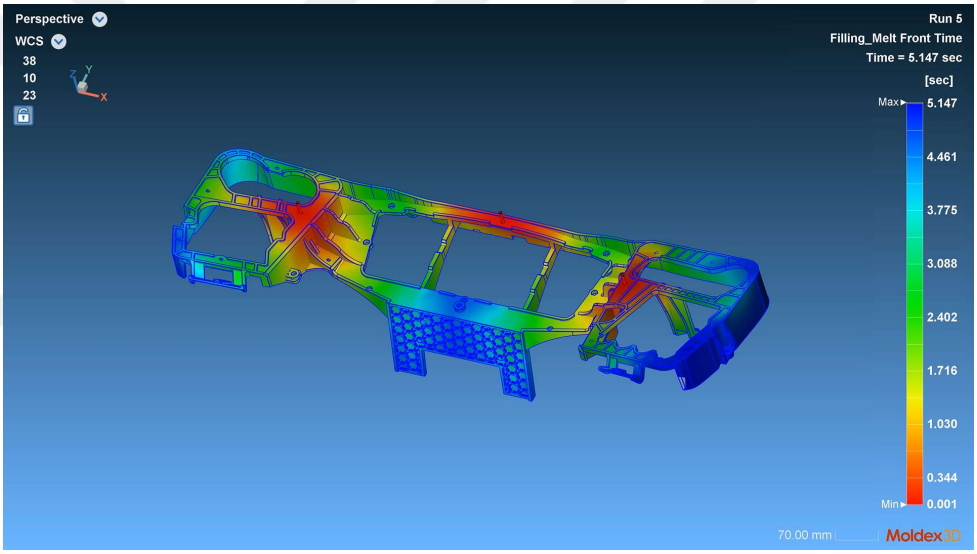
4.6.1. Dolum davranışı ve erime cephesi ilerlemesi

Dolum analizleri sonucunda, erimiş polimerin kalıp boşluğu içerisinde süreklilik gösteren ve dengeli bir akış karakteri sergilediği belirlenmiştir. Erime cephesinin kalıp girişinden itibaren ana taşıyıcı bölgeler boyunca kademeli ve simetrik şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir.

Parça geometrisinin karmaşıklığına rağmen dolumun kısa süre içerisinde tamamlandığı ve özellikle ince cidarlı, nervürlü ve hücresel yapılara sahip bölgelerde erken donma veya eksik dolum oluşmadığı tespit edilmiştir. Dolum sürecinin, kalıp hacminin tamamında kontrollü bir şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 4.13 Dolum davranışı ve erime cephesi ilerlemesi analizi başlangıcı

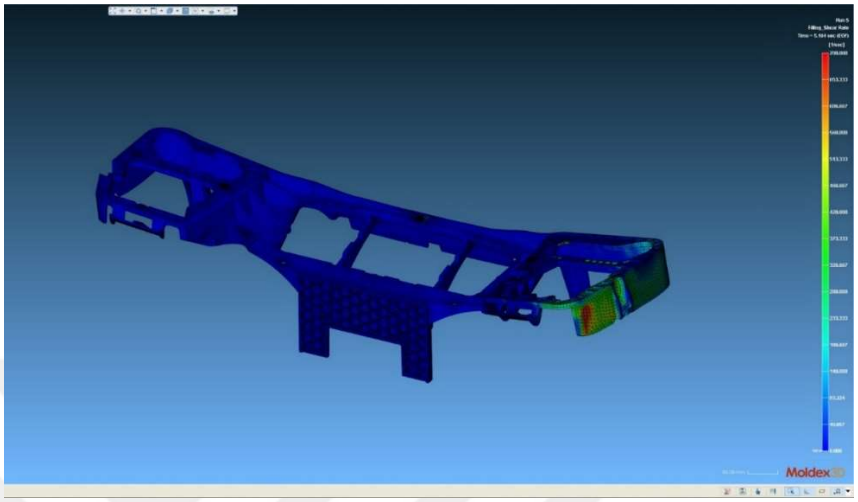


Şekil 4.14 Dolum davranışı ve erime cephesi ilerlemesi sonucu

4.6.2. Kayma hızı dağılımı

Kayma hızı dağılımları incelendiğinde, en yüksek değerlerin kalıp girişine yakın bölgelerde ve kesit geçişlerinin bulunduğu alanlarda yoğunlaştığı görülmüştür. Parça genelinde ise kayma hızlarının büyük oranda düşük ve orta seviyelerde kaldığı belirlenmiştir.

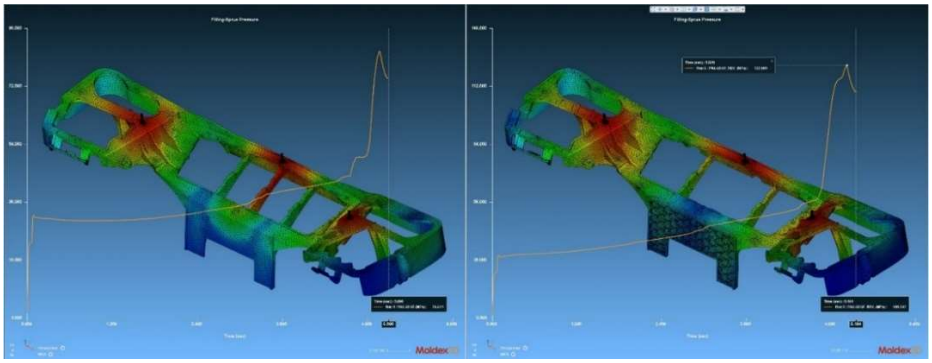
Özellikle ana taşıyıcı yüzeyler ve geniş kesitli bölgelerde kayma hızlarının homojen dağıldığı, malzeme bozunmasına veya lif yönlenmesine olumsuz etki edebilecek aşırı kayma hızlarının oluşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.15 Kayma hızı dağılımı analizi

4.6.3. Dolum ve sıkıştırma basıncı dağılımı

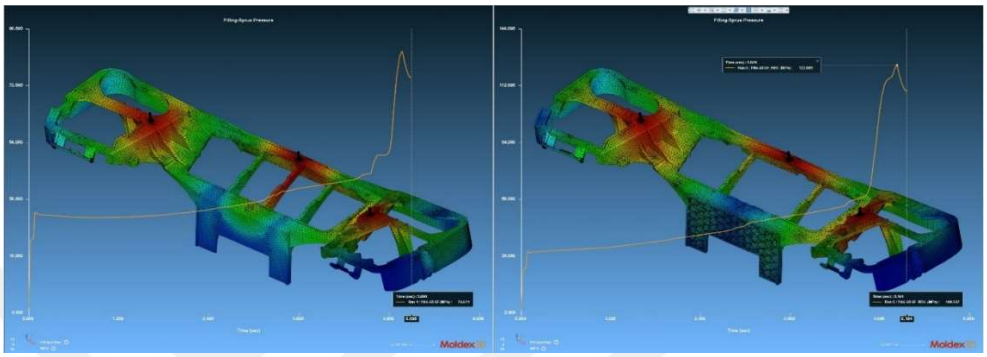
Dolum basıncı sonuçlarına göre, basınç değerlerinin kalıp girişine yakın bölgelerde daha yüksek olduğu ve akış yolunun uzamasıyla birlikte kademeli olarak arttığı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarında maksimum dolum basıncının yaklaşık 122 MPa seviyesine ulaştığı görülmüştür. Basınç dağılımının parça genelinde ani sıçramalar göstermediği, kritik bölgelerde kontrollü bir basınç gradyantı oluştuğu tespit edilmiştir. Elde edilen basınç seviyelerinin, endüstriyel enjeksiyon kalıplama prosesleri için kabul edilebilir aralıkta olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.16 Dolum ve sıkıştırma basıncı dağılımı

4.6.4. Kalıp kapama kuvveti (clamping force)

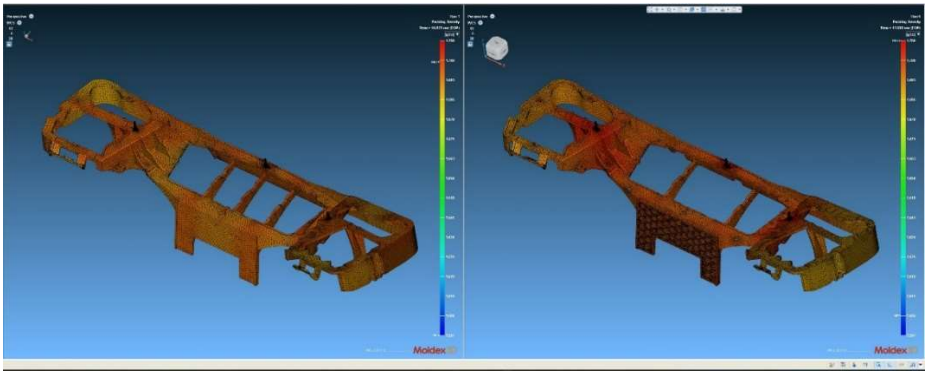
Kalıp kapama kuvveti analizleri sonucunda, dolum ve sıkıştırma evreleri boyunca kapama kuvvetinin zamanla arttığı ve maksimum değere dolumun son safhasında ulaştığı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre maksimum kapama kuvveti yaklaşık 1000 ton seviyesindedir. Bu değer, parça için öngörülen enjeksiyon pres kapasitesi ile uyumludur.



Şekil 4.17 Enjeksiyon prosesi sırasında kalıp kapama kuvvetinin zamana bağlı değişimi

4.6.5. Yoğunluk dağılımı

Yoğunluk dağılımı analizleri, parça genelinde homojen bir yoğunluk profili elde edildiğini göstermektedir. Ana taşıyıcı bölgeler, nervürlü yapılar ve hücresel alanlar incelendiğinde, yoğunluk farklarının sınırlı olduğu belirlenmiştir. Büzülmeye bağlı iç boşluk veya lokal yoğunluk düşüşü oluşturabilecek kritik alanların oluşmadığı gözlemlenmiştir.

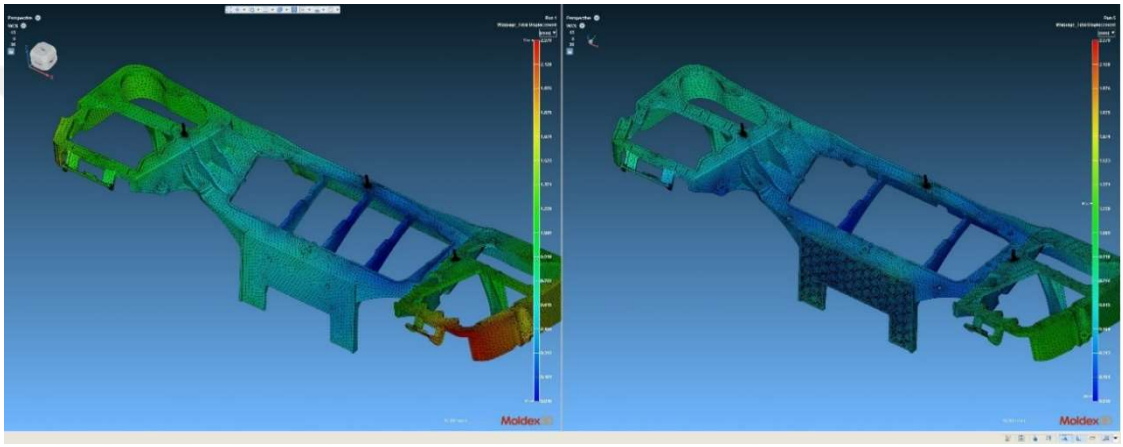


Şekil 4.18 Enjeksiyon sonrası parça genelinde yoğunluk dağılımı

4.6.6. Çarpılma (warpage) davranışı

Çarpılma analizleri sonucunda, toplam yer değiştirme değerlerinin parça genelinde düşük seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. En yüksek çarpılma değerlerinin serbest kenar bölgelerinde ve geometrik süreksizliklerin bulunduğu alanlarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

Montaj ve fonksiyon açısından kritik bölgelerde çarpılma miktarlarının sınırlı olduğu ve geometrik bütünlüğü bozacak seviyelere ulaşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.19 Enjeksiyon sonrası parça genelinde yoğunluk dağılımı analizi

4.6.7. Moldex analizi genel değerlendirmesi

Moldex analizlerinden elde edilen sonuçlar, geliştirilen plastik taşıyıcı yapının enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilebilir olduğunu göstermektedir. Dolum davranışı, basınç gereksinimleri, kalıp kapama kuvveti, yoğunluk dağılımı ve çarpılma eğilimleri birlikte değerlendirildiğinde, parça geometrisinin ve belirlenen proses parametrelerinin birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Bu bulgular, tasarlanan yapının seri üretime yönelik kalıp tasarımı açısından uygulanabilir bir altyapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, elektrikli araç uygulamaları için geliştirilen plastik taşıyıcı bir yapının mekanik, dinamik ve üretim temelli performansı çok yönlü olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen modal analizler, farklı malzeme alternatiflerinin karşılaştırılması, topoloji optimizasyonu uygulamaları, prototip üretimi ve doğrulama çalışmaları ile plastik enjeksiyon kalıp tasarımı ve Moldex analizleri sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde bütüncül olarak ele alınmıştır.

5.1. Bulguların Literatür ile Karşılaştırılması

Elde edilen modal analizlerde elde edilen doğal frekans değerlerinin, otomotiv iç mekân bileşenleri için literatürde belirtilen titreşim sınırlarının üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durum, geliştirilen yapının çalışma sırasında rezonans riskini azaltacak bir dinamik davranış sergilediğini göstermektedir.

Topoloji optimizasyonu sonuçları, literatürde bildirilen kütle azaltma–rijitlik korunumu yaklaşımı ile paralellik göstermekte; özellikle düşük gerilme bölgelerinden malzeme uzaklaştırılmasıyla taşıyıcı performansın korunabildiğini ortaya koymaktadır.

5.2. Malzeme Seçiminin Teknik Değerlendirmesi

Malzeme karşılaştırmaları sonucunda, cam elyaf oranı artan polimerlerin rijitlik ve doğal frekans değerlerini artırdığı, ancak buna bağlı olarak enjeksiyon basıncı ve kalıp kapama kuvveti gereksinimlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Bu bulgular, malzeme seçiminde yalnızca mekanik performansın değil, üretim sürecine etkilerin de birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Seçilen malzemenin, titreşim davranışı ve üretilebilirlik açısından dengeli bir performans sunduğu görülmüştür. Bu denge, çalışmanın hedeflediği hafiflik ve fonksiyonel yeterlilik kriterleriyle örtüşmektedir.

5.3. Plastik Enjeksiyon Kalıbı ve Kalıp Analizlerinin Katkısı

Plastik enjeksiyon kalıp tasarımına yönelik yapılan incelemeler, geliştirilen geometrinin çekme açıları, et kalınlığı dağılımı, nervür yerleşimleri ve ayırma hattı konumlandırması açısından üretilebilir olduğunu göstermiştir. Moldex analizleri ile bu geometrik uygunluk, sayısal olarak da doğrulanmıştır.

Dolum davranışının dengeli olması, maksimum dolum basıncının yaklaşık 122 MPa seviyesinde kalması ve kapama kuvveti gereksiniminin 1000 ton civarında olması, parça tasarımının endüstriyel üretim koşullarıyla uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Çarpılma analizlerinde elde edilen düşük yer değiştirme değerleri ise kalıp tasarımının parça geometrik stabilitesini desteklediğini göstermektedir.

5.4. Tasarım Optimizasyonu ve Endüstriyel Katkı

Topoloji optimizasyonu, geleneksel tasarıma kıyasla daha hafif ve yük taşıma açısından etkin bir yapı elde edilmesine olanak sağlamıştır. Optimizasyon sonrası elde edilen geometrinin, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilebilirliğinin korunmuş olması, çalışmanın endüstriyel uygulanabilirliğini güçlendiren önemli bir çıktıdır.

Bu yönüyle çalışma, elektrikli araçlarda ağırlık azaltma hedeflerine katkı sağlayabilecek, plastik taşıyıcı yapıların tasarım ve doğrulama sürecine bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

5.5. Çalışmanın Kısıtları

Çalışmada kullanılan sayısal analizler, malzeme davranışının izotropik ve ideal koşullar altında tanımlandığı varsayımlara dayanmaktadır. Gerçek üretim koşullarında oluşabilecek lif yönlenmesi, proses kaynaklı artık gerilmeler ve sıcaklık değişimleri analizlere birebir yansıtılamamıştır.

Üretilen prototipler, seri üretim kalıpları yerine hızlı prototipleme ve sınırlı üretim koşullarında elde edilmiştir. Bu durum, yüzey kalitesi ve mikroyapısal özellikler açısından seri üretim parçalarından farklılıklar oluşturabilmektedir.

KAYNAKLAR

Albak, E. İ. (2019). Formula Sae Aracında Ağırlık Azaltılmasına Yönelik Fren Pedalinin Topoloji Optimizasyonu Yöntemiyle Optimum Tasarımı. *International Journal of Engineering Research and Development, 11*(1), 328-334. doi:10.29137/umagd.467057

Altan, M., & Eryıldız, M. (2018). Cam Fiber Takviyeli Polimerlerin Plastik Enjeksiyonunda Fiber Yönlenmesinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18*, 692-700. doi:10.5578/fmbd.66987

Çakır, M., & Berberoğlu, B. (2018). E-Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Elyaf Oranındaki Artış ile Mekanik Özellik Değişimleri. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 5*(3), 734-740. doi:10.31202/ecjse.415482

Çelik, Y. H. (2010). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Modellenmesi İçin Bir Paket Programin Geliştirilmesi Ve Optimizasyonu.* Fırat Üniversitesi. Elazığ: Fırat Üniversitesi Kurumsal Akademik Arşivi.

Dağlı, M., Demirer, A., & Yumat, E. (2025). Enjeksiyonla Şekillendirilmiş Polipropilen Kompozit Kilitleme Halkasında Cam Elyaf Takviyesinin Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31*(6), 912-921. doi:10.5505/pajes.2025.22866

Dönerkaya, S. (2022). *Plastik Malzemelerin Enjeksiyon Parametrelerinin Optimizasyonunun İncelenmesi.* Necmettin Erbakan Üniversitesi. Konya: YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Gençsoy, E. N. (2022). *Plastik Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Farklı Oranlarda Cam Fiber Takviyeli Polimerlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.* Başkent Üniversitesi. Ankara: YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Kadirhan, F. (2022). *Otomotiv Plastik Enjeksiyon Proseslerinde Endüstriyel Otomasyonun Üretime Ve Karlılığa Etkisi: Örnek Bir Uygulama.* Amasya Üniversitesi. Amasya: YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Kahraman, F., & Küçük, M. (2020). Otomotiv Endüstrisinde Topoloji Optimizasyonu Ile Ağirlik Azaltma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 20*(20), 623-631. doi:10.31590/ejosat.789424

Kara, R., Taşkın, V., & Demirhan, P. A. (2022). Direksiyon Mafsal Parçasının Statik Analizi Ve Topoloji Optimizasyonu. *Trakya University Journal of Engineering Sciences, 23*(2), 109-119.

Karamert, S., & Demir, A. (2022). Ticari Otobüs Gövde Yapısında Topoloji Optimizasyonu Çalışması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 34*(2), 229-234. doi:10.7240/jeps.988228

Kayalı, O. (2022). *Plastik Enjeksiyon Kalıplamanın Mekanik Davranış Üzerindeki Etkisinin Incelenmesi.* İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul: YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Mete, E., & Başak, H. (2024). Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Rot Başı Tasarımı, Analizi Ve Doğrulanması. *POLİTEKNİK DERGİSİ, 27*(3), 1055-1068. doi:10.2339/politeknik.1198353

Mutlu, T., Yeğin, S. K., Şen, G., & Dirikolu, M. (2021). Desıgn And Implementatıon Of A Glass Fıber Reınforced Hybrıd Polymer Matrıx Composıte Washıng Machıne Drum Support Replacıng Cast Alumınum Alloy. *Composites Theory and Practice, 21*(1-2), 54-58.

Nazlı, A., & Özsoy, N. (2024). Bir Otomobil Salıncağının Topoloji Optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 29*(2), 607-622. doi:10.17482/uumfd.1431634

Shao, S., & Zhou, Z. (2024). Design And Fabrication Of Lightweight Structures Using Topology Optimization Techniques. *International Journal of Machine Tools and Maintenance Engineering, 5*(1), 28-31.

Topsakal, A., & Özel, C. (2018). Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerde Lif Türü ve Oranının Etkisi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 5*(1), 107-116.

Tuna, S. (2021). *Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı Ve Soğutma Analizi.* Marmara Üniversitesi. İstanbul: YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Uçar, M. S. (2022). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Uygulamalı Olarak Kalıp Maliyetinin Tahmini.* Zonguldak Üniversitesi. Zonguldak: YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Ünlü, S. (2022). Polimer Matrisli Kompozit Elektrikli Otomobil Şasesi (RE-VOLT). *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12*(1), 23-33. doi:10.17714/gumusfenbil.853049

Yıldız, A. R. (2017). Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri İle Optimum Tasarımı. *POLİTEKNİK DERGİSİ, 20*(2), 319-323. doi:DOI: 10.2339/2017.20.2