



**OTOBÜSLERDE PROFİL İLE KOLTUK
KARKASI ARASINDA KULLANILAN
BRAKETİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Beşir KILIÇ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Temmuz 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OTOBÜSLERDE PROFİL İLE KOLTUK ARASINDA
KULLANILAN BRAKETİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU**

Beşir KILIÇ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Beşir KILIÇ tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 04 / 07 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04/ 07/ 2025

Beşir KILIÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOBÜSLERDE PROFİL İLE KOLTUK KARKASI ARASINDA KULLANILAN BRAKETİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Beşir KILIÇ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL

Bu tez çalışmasında, otobüslerde koltuk karkası ile gövde profili arasında yer alan braketlerin yapısal dayanımı, ağırlık optimizasyonu ve maliyet etkinliği açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Otobüs gibi yolcu taşıma araçlarında güvenlik, konfor ve maliyet gibi parametreler önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, braketlerin hem yük taşıma kapasitesini koruyacak hem de gereksiz malzeme kullanımını ortadan kaldıracak şekilde yeniden tasarlanması gerekliliği doğmuştur. Çalışmada, topoloji optimizasyonu yaklaşımı ile altı farklı braket tasarımı geliştirilmiştir. Bu tasarımlar, farklı geometrik şekillere ve yük yollarına sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Her bir braket tasarımı için altı farklı çelik malzeme (DP800, DP600, AISI 304, AISI 316, ST52 ve ST37) seçilerek alternatif çözüm setleri oluşturulmuştur.

Braketlerin yapısal analizleri, sonlu elemanlar yöntemi ile Abaqus/CAE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme koşulları, ECE R80 standardına uygun şekilde belirlenmiş olup yolcu oturma pozisyonunu ve ani yüklemeleri temsil edecek düzeyde uygulanmıştır. Her bir kombinasyonda elde edilen maksimum von Mises gerilmeleri, yer değiştirme değerleri ve güvenlik katsayıları analiz edilerek performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca, analiz sonuçlarına ek olarak, her bir malzeme için birim fiyatlar ve kataforez kaplama giderleri Temmuz 2025 tarihli piyasa verilerine göre değerlendirilmiş ve kapsamlı bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda, DP800 çeliği ile üretilen optimize braketlerin, hem mekanik mukavemet hem de ekonomik açıdan en avantajlı kombinasyonu sunduğu ortaya

konmuştur. DP800, yüksek dayanım-ağırlık oranı sayesinde daha ince kesitlerle yeterli yapısal performansı sağlarken, diğer yüksek alaşımlı çeliklere göre daha düşük maliyet sunmaktadır. AISI 304 ve 316 paslanmaz çelikleri yüksek korozyon direnci sunsa da maliyet açısından dezavantajlıdır. ST52 ve ST37 gibi düşük karbonlu çelikler ise düşük maliyetli olmakla birlikte güvenlik katsayısı açısından yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular; otomotiv endüstrisinde ağırlık azaltımı, güvenlik ve maliyet dengesi açısından oldukça önemli sonuçlar sunmaktadır.

2025, xv + 88 sayfa

Anahtar Kelimeler: Topoloji Optimizasyonu, Güvenlik Faktörü, Malzeme Seçimi, Braket Tasarımı, Maliyet Analizi, Yük Altında Dayanım.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE BRACKET USED BETWEEN THE PROFILE AND SEAT FRAME IN BUSES

Besir KILIC

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechatronic Engineer

Supervisor: Asst. Prof. Melih OZCATAL

This thesis focuses on the structural optimization, weight reduction, and cost efficiency of seat brackets used in buses, particularly those positioned between the seat frame and chassis profile. In passenger transportation vehicles such as city and intercity buses, ensuring passenger safety while minimizing production cost and structural weight is a critical design objective. The aim of this research is to develop optimized bracket geometries that can withstand applied loads while minimizing excess material use. A total of six different bracket configurations were generated through topology optimization, each designed with unique geometrical features and load transfer paths. For each design, six different steel materials — DP800, DP600, AISI 304, AISI 316, ST52, and ST37 — were assigned to create a comparative dataset.

Static structural simulations were performed using the finite element analysis software Abaqus/CAE. The loading conditions were defined in accordance with the ECE R80 regulation, which governs safety standards for seating systems in public transport vehicles. Each bracket-material combination was analyzed to determine the maximum von Mises stress, total displacement, and safety factor values. The structural integrity results were further supported by an economic evaluation that included the July 2025 market prices of each material and additional surface coating costs for non-stainless materials via cathodic electrophoretic deposition (KTL).

The study results demonstrated that brackets produced using DP800 steel exhibited the best overall performance, providing a high strength-to-weight ratio and cost advantage.

While AISI 304 and 316 stainless steels offered excellent corrosion resistance and structural reliability, they were found to be economically unfavorable. Conversely, ST52 and ST37 provided lower costs but failed to meet the required safety margins in most configurations. DP600 offered intermediate results but fell short of DP800's performance. Therefore, the optimal combination of mechanical durability and cost-effectiveness was found in the topology-optimized DP800 brackets. These findings offer valuable insights into material selection and lightweight design strategies for future commercial vehicle applications where safety, cost, and efficiency must be simultaneously optimized.

2025, xv + 88 pages

Keywords: Topology Optimization, Safety Factor, Material Selection, Bracket Design, Cost Analysis, Structural Strength under Load.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve aileme teşekkürü borç bilirim.

Beşir KILIÇ
Afyonkarahisar 2025



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	7
2.1 Topoloji Optimizasyonu	7
2.1.1 Topoloji Optimizasyonunun Uygulama Alanları	8
2.1.2 Malzeme Seçiminin Topoloji Optimizasyonundaki Rolü	9
2.1.2.1 Çift Fazlı (DP) Çelikler	10
2.1.2.1.1 Çift Fazlı Çeliklerin Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları	10
2.1.2.2 Paslanmaz Çelikler	13
2.1.2.2.1 Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları.....	13
2.1.2.3 Yapı Çelikleri.....	16
2.1.2.3.1 Yapı Çeliklerinin Kullanım Alanları	18
2.1.2.4 Malzeme Kalınlığına Bağlı Olarak İşlenebilirlik ve Bükülebilirlik	20
2.1.2.4.1 Çift Fazlı Yüksek Mukavemetli Çelikler: DP600 ve DP800	21
2.1.2.4.2 Paslanmaz Çelikler: AISI 304 ve AISI 316.....	21
2.1.2.4.3 Yapısal Karbon Çelikleri: ST37 ve ST52.....	22
2.1.3 Topoloji Optimizasyonu için Kullanılan Yazılımlar ve Simülasyon Araçları.....	23
2.1.3.1 Simülasyon Programı ABAQUS/CAE.....	24
2.2 Malzeme Tabanlı Braket Maliyet Analizi (Temmuz 2025)	25
2.2.1 Braket 1 (4.90 kg).....	25

2.2.2 Braket 2 (3.28 kg).....	28
2.2.3 Braket 3 (2.46 kg).....	29
2.2.4 Braket 4 (3.70 kg).....	31
2.2.5 Braket 5 (2.95 kg).....	32
2.2.6 Braket 6 (2.20 kg).....	33
2.3 Otobüs Koltuk Braketlerinde Statik Analiz ve Güvenlik Katsayısı	35
2.3.1 Otobüs Koltuk Braketlerinde Güvenlik Katsayısı	35
2.3.2 Otobüs Koltuk Braketlerinde Statik Analiz için Uygulanacak Kuvvet.....	37
3. MATERYAL ve METOT	39
3.1 Braketin Modellenmesi ve Braketin Sabitlenmesi	40
3.2 Simülasyonda Kullanılan Malzemelerin Atanması	43
3.3 Brakete Uygulanacak Kuvvet.....	45
3.4 Braketin Mesh Yapısının Oluşturulması	46
4. BULGULAR	48
4.1 Braket-1' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler.....	48
4.1.1 DP 800	49
4.1.2 DP 600	49
4.1.3 AISI 304	50
4.1.4 AISI 316	51
4.1.5 ST 52	51
4.1.6 ST 37	52
4.2 Braket-2' ye Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler.....	53
4.2.1 DP 800	53
4.2.2 DP 600	54
4.2.3 AISI 304	54
4.2.4 AISI 316	55
4.2.5 ST 52	56
4.2.6 ST 37	56
4.3 Braket-3' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler.....	57
4.3.1 DP 800	57
4.3.2 DP 600	58

4.3.3 AISI 304	59
4.3.4 AISI 316	59
4.3.5 ST 52	60
4.3.6 ST 37	61
4.4 Braket-4' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler	61
4.4.1 DP 800	61
4.4.2 DP 600	62
4.4.3 AISI 304	63
4.4.4 AISI 316	63
4.4.5 ST 52	64
4.4.6 ST 37	64
4.5 Braket-5' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler	65
4.5.1 DP 800	65
4.5.2 DP 600	66
4.5.3 AISI 304	67
4.5.4 AISI 316	67
4.5.5 ST 52	68
4.5.6 ST 37	69
4.6 Braket-6' ya Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler	69
4.6.1 DP 800	69
4.6.2 DP 600	70
4.6.3 AISI 304	71
4.6.4 AISI 316	71
4.6.5 ST 52	72
4.6.6 ST 37	73
4.7 Kullanılan Malzemelerin Maliyet Hesaplaması	74
4.7.1 Braket 1 (4.90 kg).....	75
4.7.2 Braket 2 (3.28 kg).....	75
4.7.3 Braket 3 (2.46 kg).....	75
4.7.4 Braket 4 (3.70 kg).....	76
4.7.5 Braket 5 (2.95 kg).....	76
4.7.6 Braket 6 (2.20 kg).....	77

5. TARTIŞMA ve SONUÇ	79
6. KAYNAKLAR.....	82



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
S ⁻¹	Gerinim Hızı
°C	Santigrat Derece (Sıcaklık)
K	Kelvin
kg	Kilogram
mm ³	Milimetreküp
kg/m ³	Kilogram / Metreküp
g/cm ³	Gram / Santimetreküp
J/kg·K	Joule / Kilogram Kelvin
W/m·K	Watt / Metre Kelvin
kg/mm ²	Kilogram / Milimetrekaare
%	Yüzde Sembolü
Tl	Türk Lirası
C	Karbon
Si	Silisyum
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Kükürt
Al	Alüminyum
Nb	Niyobyum
Ti	Titanyum
Cr	Krom
Ni	Nikel
Mo	Molibden
Cu	Bakır

Kısaltmalar

DP	Çift Fazlı
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
HSLA	Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelik
ST	Stahl (Çelik)
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
SEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
DIN	Deutsches Institut für Normung
RP	Referans Noktası
SF	Güvenlik Katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Parçanın araçtaki konumu	1
Şekil 1.2 Kullanılan 6mm kalınlığındaki ilk Braket 4.90 kg.....	4
Şekil 1.3 4 mm kalınlığındaki Braket-2 3.28 kg	4
Şekil 1.4 Boşaltma yapılarak ağırlığı düşürülen 4mm kalınlığındaki Braket-3 2.46 kg ..	5
Şekil 1.5 Büküm verilerek sağlamlaştırılan 6mm kalınlığındaki Braket-4 3.70 kg	5
Şekil 1.6 Büküm verilerek sağlamlaştırılan 4mm kalınlığındaki Braket-5 2.95 kg	6
Şekil 1.7 Büküm verilerek sağlamlaştırılan 3mm kalınlığındaki Braket-6 2.20 kg	6
Şekil 2.1 Çift fazlı çelik mikro yapısının şematik gösterimi	10
Şekil 2.2 Farklı çelik türlerinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarını karşılaştırmalı grafiği	11
Şekil 2.3 Soğuk haddelenmiş sade karbonlu çelik ile çift fazlı (DP) çeliğe ait mukavemet ve şekil değiştirme ilişkisini gösteren grafiği	11
Şekil.2.4 Endüstriyel montaj: Otobüs şasisi ve kabin çerçevesinin birleştirilmiş uygulama fotoğrafı.	14
Şekil 2.2.1 Braket 1 (4.90 kg) için farklı malzeme türleriyle 4 adet üretim yapıldığında oluşan toplam maliyetlerin karşılaştırılması.....	27
Şekil 2.2.2 Braket 2 (3.28 kg) için dört adet üretimde toplam maliyetlerin malzemeye göre dağılımı.....	29
Şekil 2.2.3 Braket 3 (2.46 kg) – farklı malzemelerle 4 adet üretimin toplam maliyetleri	30
Şekil 2.2.4 Braket 4 (3.70 kg) – malzeme türüne göre 4 adet üretim maliyetleri	32
Şekil 2.2.5 Braket 5 (2.95 kg) – malzeme türüne göre 4 adet üretim maliyetleri	33

Şekil 2.2.6 Braket 6 (2.20 kg) – Malzeme türlerine göre 4 adet toplam maliyet karşılaştırması.	34
Şekil 3.1. Braketin Akış Diyagramı	39
Şekil 3.2 Braketin örnek teknik resmi	40
Şekil 3.3 Parçanın profile sabitlendiği noktalar	40
Şekil 3.4 Parçanın koltuk karkasına sabitlendiği noktalar	41
Şekil 3.5 Simülasyon programında profile sabitlendiği noktalar	41
Şekil 3.6 Sabitlenecek ve kuvvet uygulanacak yerlere bağlantı atama.....	42
Şekil 3.7 Simülasyonda sabitlenme yerleri ve komutu	43
Şekil 3.8 AISI 304’ün ve AISI 316’nın malzeme tanımlanması.....	44
Şekil 3.9 DP 600’ün ve DP 800’ün malzeme tanımlanması	44
Şekil 3.10 ST 37’nin ve ST 52’nin malzeme tanımlanması.....	45
Şekil 3.11 Brakete uygulanacak olan kuvvetler	46
Şekil 3.12 Parçanın mesh yapısı için atılan çizgiler.....	46
Şekil 3.10 Parçanın mesh yapısı.....	47
Şekil 4.1 Braketin kuvvet uygulanmamış hali	48
Şekil 4.1.1 Braket 1 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılım.....	49
Şekil 4.1.2 Braket 1 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	50
Şekil 4.1.5 Braket 1 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	50
Şekil 4.1.6 Braket 1 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	51
Şekil 4.1.3 Braket 1 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	52
Şekil 4.1.4 Braket 1 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	52

Şekil 4.2.1 Braket 2 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	53
Şekil 4.2.2 Braket 2 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	54
Şekil 4.2.3 Braket 2 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	55
Şekil 4.2.4 Braket 2 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	55
Şekil 4.2.5 Braket 2 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	56
Şekil 4.2.6 Braket 2 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	57
Şekil 4.3.1 Braket 3 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	58
Şekil 4.3.2 Braket 3 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	58
Şekil 4.3.3 Braket 3 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	59
Şekil 4.3.4 Braket 3 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	60
Şekil 4.3.5 Braket 3 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	60
Şekil 4.3.6 Braket 3 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	61
Şekil 4.4.1 Braket 4 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	62
Şekil 4.4.2 Braket 4 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	62
Şekil 4.4.3 Braket 4 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	63
Şekil 4.4.4 Braket 4 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	64
Şekil 4.4.5 Braket 4 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	64
Şekil 4.4.6 Braket 4 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	65
Şekil 4.5.1 Braket 5 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	66
Şekil 4.5.2 Braket 5 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	66
Şekil 4.5.3 Braket 5 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	67
Şekil 4.5.4 Braket 5 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı.....	68

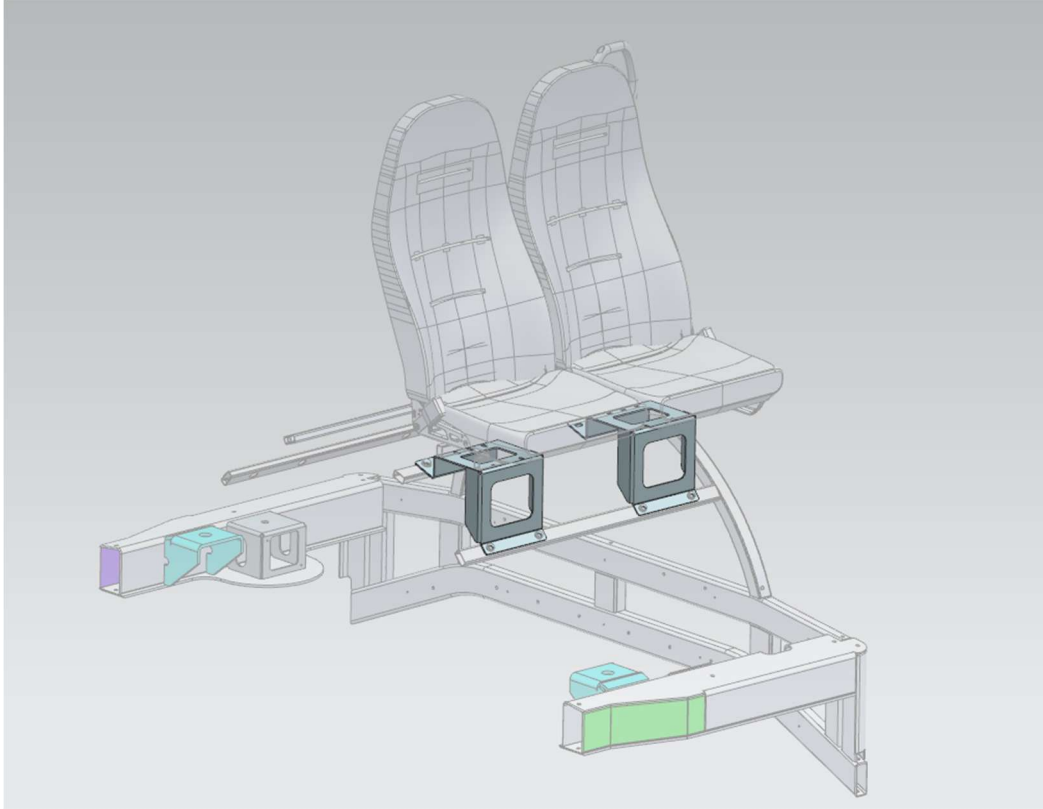
Şekil 4.5.5 Braket 5 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	68
Şekil 4.5.6 Braket 5 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	69
Şekil 4.6.1 Braket 6 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	70
Şekil 4.6.2 Braket 6 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	70
Şekil 4.6.3 Braket 6 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	71
Şekil 4.6.4 Braket 6 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	72
Şekil 4.6.5 Braket 6 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	72
Şekil 4.6.6 Braket 6 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı	73
Şekil 4.6.7 Güvenlik katsayıları (braket ve malzeme bazında)	73
Şekil 4.7 Braket bazlı malzeme maliyetlerinin karşılaştırılması (TL)	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 DP600 ve DP800 malzemelerine ait mekanik özellikler	12
Çizelge 2.2 DP600 ve DP800 kimyasal kompozisyonu.....	12
Çizelge 2.3 Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri.....	13
Çizelge 2.4 Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri	15
Çizelge 2.5 AISI 304 ve AISI 316 analiz yapılırken kullanılacak değerler	16
Çizelge 2.6. St 37 ve St 52 çeliklerinin mekanik özellikleri	19
Çizelge 2.7 St 37 ve St 52 kimyasal kompozisyonu	20
Çizelge 2.8 St 37 ve St 52 analizde kullanılacak değerler	20
Çizelge 2.9 Farklı kalınlıklar için özet tablo: İşlenebilirlik ve bükülebilirlik eğilimleri	23
Çizelge 2.10 Yüklerin Uygulanma Önerileri	38

1. GİRİŞ

Toplu taşıma araçlarında koltuk sistemleri, hem yolcu güvenliği hem de konfor açısından son derece kritik öneme sahiptir. Özellikle otobüslerde koltukların gövdeye montajı sırasında kullanılan yapısal bileşenler, taşıma güvenliğini doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu bileşenlerden biri olan braket, koltuk karkası ile otobüs gövdesi arasında kuvvet iletimini sağlayan, yüke maruz kalan ve genellikle dar hacimlerde çalışan bir bağlantı elemanıdır. Braketin işlevini güvenli bir biçimde sürdürebilmesi için yüksek dayanım, hafiflik ve üretim açısından maliyet etkinliği gibi bir dizi mühendislik kriterini aynı anda karşılaması gerekmektedir. Şekil 1.1 'de parçanın kullanıldığı yer gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Parçanın araçtaki konumu

Ancak pratikte kullanılan geleneksel braket tasarımları, bu kriterlerin tamamını optimize edememektedir. Genellikle deneyime dayalı, geometrik sezgilerle oluşturulan tasarımlar; gereğinden fazla malzeme kullanımı, gereksiz ağırlık artışı, yüksek üretim maliyeti ve düşük yapısal verimlilik gibi sorunlara yol açmaktadır. Bu durum, hem ekonomik açıdan sürdürülebilir olmayan çözümler üretmekte hem de mühendislik bakımından yetersiz

kalmaktadır. Özellikle şehir içi ulaşımda her gram ağırlığın yakıt tüketimine etkisi göz önüne alındığında, ağırlığın azaltılması hem çevresel hem de maliyet yönünden büyük önem taşımaktadır.

Araştırmanın temel problemi, mevcut braket tasarımlarının ağırlık-mukavemet-maliyet dengesini kuramamasıdır. Bu sorunun temel nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Braket tasarımlarının çoğu kez “geleneksel üretilebilirlik” odaklı yapılması,
- Gerçek yükleme koşullarının yeterince dikkate alınmaması,
- Malzeme seçiminin genellikle maliyete veya alışkanlıklara dayalı yapılması,
- Geometrik şeklin yapısal optimizasyondan yoksun olması.

Bu problemler, mühendislik açısından yalnızca dayanıklı değil aynı zamanda hafif, ekonomik, sürdürülebilir ve üretilebilir çözümlere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu bağlamda hem yapısal verimliliğin hem de ekonomik etkinliğin birlikte değerlendirilmesi gereken bir mühendislik problemi karşımıza çıkmaktadır.

Geleneksel mühendislik yaklaşımı bu noktada yetersiz kalmakta, daha gelişmiş sayısal analiz teknikleri ve optimizasyon yöntemlerine başvurulması gerekmektedir. Bu tezde, söz konusu probleme modern bir mühendislik bakışıyla yaklaşılmış; sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak farklı malzemelerle farklı geometri üzerinde yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, topoloji optimizasyonu yöntemiyle brakette tasarım değişiklikleri yaparak gerekli olan bölgelerde malzeme bırakılarak hem ağırlık azaltılması hem de dayanımın artırılması hedeflenmiştir.

Çalışmada ayrıca yalnızca mekanik dayanım değil, malzeme seçiminin ekonomik yönü de kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Çeşitli çelik türleri için birim kilogram maliyeti, kaplama maliyetleri, üretim ve işleme kolaylığı gibi parametreler dikkate alınarak performans-maliyet karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca

mühendislik açısından değil aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik açısından da değerlidir.

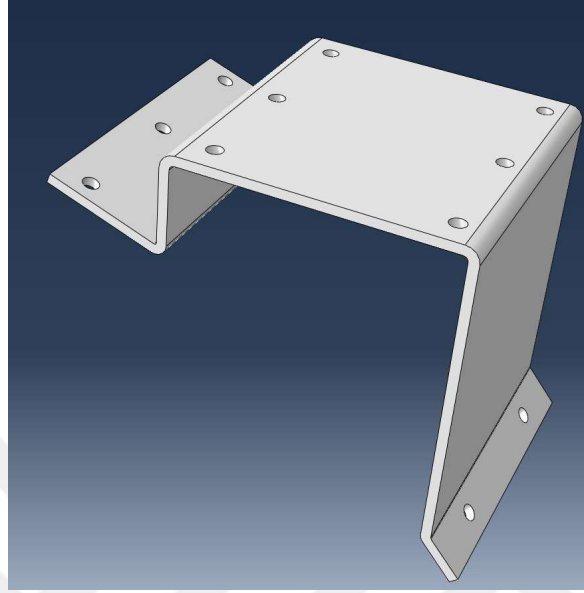
Literatürde benzer yapıların optimizasyonuna dair çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmalarda genellikle ya yalnızca mekanik analiz yapılmakta ya da yalnızca maliyet değerlendirmesi göz önüne alınmaktadır. Örneğin Tamarelli [16] ve Granbom [17], DP çeliklerinin mekanik özelliklerini detaylıca incelemiş; ancak bunların üretim maliyeti ve işlenebilirlik yönüyle entegrasyonunu tartışmamıştır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmakta ve yapısal performans ile maliyetin eşzamanlı optimize edilmesini esas almaktadır. Maliyet hesaplarında işlenebilirlik alınmamıştır. Yalnızca kilogram bazlı maliyet ve kaplama maliyeti hesaplanarak yapılmıştır.

Bu bağlamda tez kapsamında şu araştırma adımları izlenmiştir:

- Öncelikle braketin mevcut geometrisi 6 farklı tasarım ile modellenmiş ve 6 farklı malzeme ile aynı yük altında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Analiz sonuçlarına göre malzemelerin maksimum gerilme ve akma dayanımı değerleri karşılaştırılarak güvenlik katsayıları hesaplanmıştır.
- Her bir braket için ve her bir malzeme için birim maliyet, yüzey kaplama maliyeti ve toplam üretim maliyetleri değerlendirilmiştir.
- Sonuçlar ışığında hem mekanik hem ekonomik açıdan en uygun malzeme belirlenmiş ve bu malzeme için topoloji optimizasyonu uygulanarak alternatif bir tasarım ortaya konmuştur.

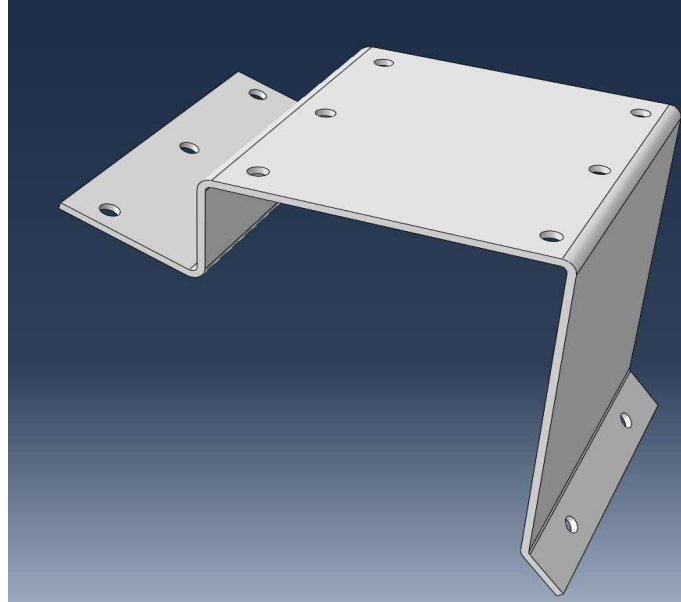
Tezin sonunda elde edilen bulgular, mühendislik tasarımında yalnızca yapısal güvenliğin değil, ekonomik sürdürülebilirliğin de kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem akademik literatüre hem de uygulamalı mühendislik projelerine katkı sağlayacak niteliktedir. Bu çalışmada ilk olarak Şekil 1.2’de yer alan mevcut braket, 6 mm sac kalınlığı ile kullanılmaktadır. Bu tasarım üzerinde yapılan iyileştirmeler

sonucunda, hem toplam kütle azaltılmış hem de yapısal sağlamlık artırılarak daha optimize bir geometri elde edilmiştir.



Şekil 1.2 Kullanılan 6mm kalınlığındaki ilk Braket 4.90 kg

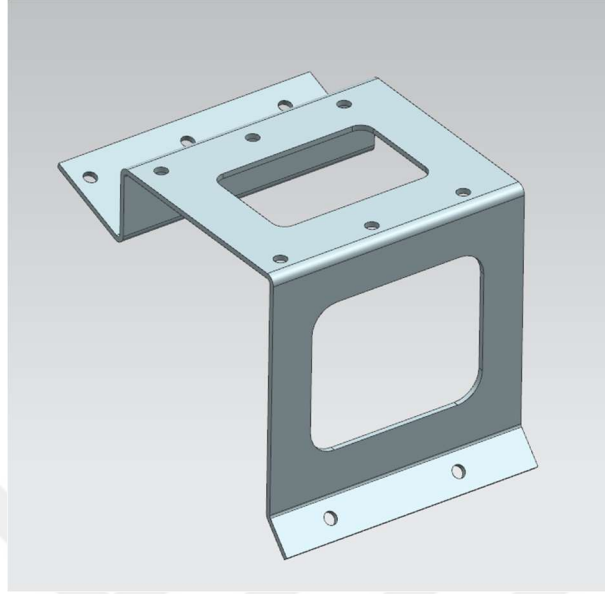
Devamında, Şekil 1.3'te gösterilen Braket-2 tasarımında malzeme kalınlığı 6 mm'den 4 mm'ye düşürülerek daha hafif bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 1.3 4 mm kalınlığındaki Braket-2 3.28 kg

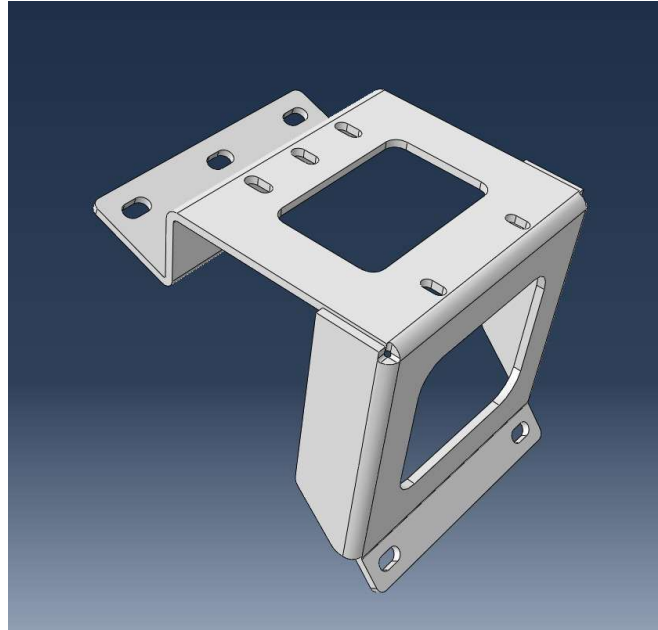
Şekil 1.4'te yer alan Braket-3 tasarımında, yapısal bütünlüğü etkilemeyen ve taşıyıcı olmayan bölgelerde boşaltmalar gerçekleştirilmiş; bu sayede braketin toplam ağırlığında

kayda değer bir azalma sağlanmıştır.



Şekil 1.4 Boşaltma yapılarak ağırlığı düşürülen 4mm kalınlığındaki Braket-3 2.46 kg

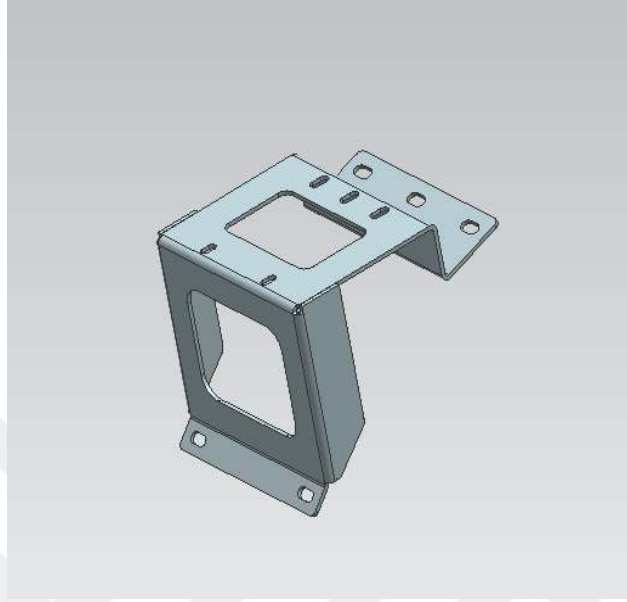
Şekil 1.5’te gösterilen Braket-4 tasarımında, bağlantı noktalarının rijitliğini artırmak ve yapısal dayanımı iyileştirmek amacıyla kenar bölgelerde flanş yapıları oluşturulmuş ve bu bölgeler uygun şekilde bükülerek desteklenmiştir.



Şekil 1.5 Büküm verilerek sağlamlaştırılan 6mm kalınlığındaki Braket-4 3.70 kg

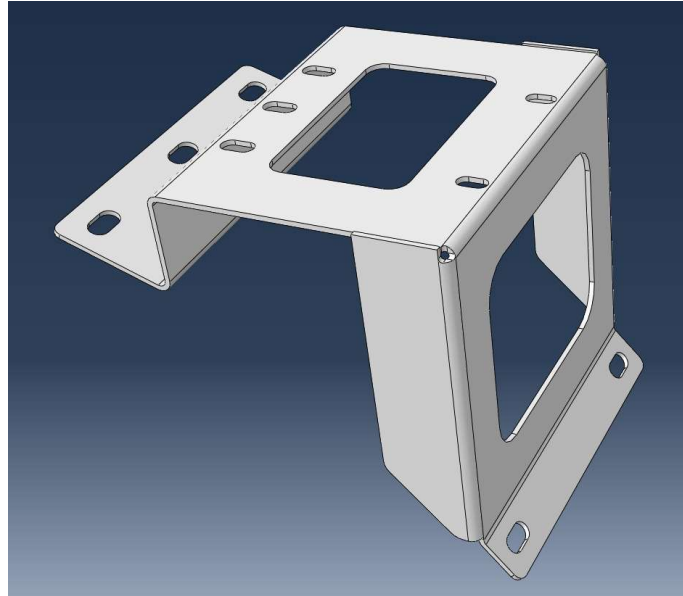
Şekil 1.6’da gösterilen Braket-5 tasarımında, yapısal bütünlüğü destekleyen ek bükümler

korunarak malzeme kalınlığı 4 mm'ye düşürülmüş ve böylelikle hem hafiflik sağlanmış hem de yeterli rijitlik korunmuştur.



Şekil 1.6 Büküm verilerek sağlamlaştırılan 4mm kalınlığındaki Braket-5 2.95 kg

Şekil 1.7'de yer alan Braket-6 tasarımında, önceki tasarımlarda olduğu gibi yapısal dayanımı artırmak amacıyla flanş yapıları korunmuş; buna ek olarak malzeme kalınlığı 3 mm'ye düşürülerek minimum ağırlıkla yeterli dayanım hedeflenmiştir.



Şekil 1.7 Büküm verilerek sağlamlaştırılan 3mm kalınlığındaki Braket-6 2.20 kg

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu araştırmamızda, otobüslerde kullanılan brakete topoloji optimizasyonu yapılacaktır. Bunun için mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çeşitli çelik türlerinin malzeme seçimi, maliyet analizi ve farklı braketler üzerine farklı malzemelere kuvvet uygulayarak en ideal malzemeye ve braketle karar verilecektir. Öncelikle bu bölümde topoloji optimizasyonun ne olduğu incelenecektir. Sonrasında malzemelerin genel özellikler, mekanik özellikleri, kullanım alanları detaylı bir şekilde incelenecektir. Daha sonrasında ise bu malzemelerin Türkiye pazarında fiyat araştırması yapılarak maliyet analizi ortaya çıkarılacaktır. Çıkarılan analizlerden sonra malzemelerin işlenebilirliği ve bükülebilirliği incelenecektir. Analiz için kullanılacak program detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Açıklanan analiz programından sonra ise bulmamız gereken güvenlik katsayısı ve uygulanacak kuvvet açıklanacaktır. Araştırmamızda kullanılmak üzere üç farklı tip çelik seçilmiştir. Seçilen bu çelik türlerinden birincisi Çift Fazlı (DP) çeliklerinden DP600 ve DP800 kullanılacaktır. İkinci tür olarak paslanmaz çelik türlerinden AISI 304 ve AISI 316 kullanılacaktır. Üçüncü ve son tür olan yapı çelik türlerinden ST37 ve ST52 kullanılacaktır. Bu üç tür çeliğin önce genel özellikleri daha sonrasında ise kendilerine özgü mekaniksel özellikleri detaylı şekilde açıklanacaktır.

2.1 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, belirli bir tasarım hacmi içerisinde yapısal elemanların yükleme ve sınır şartlarına göre optimum malzeme dağılımını sağlayarak ağırlığı azaltmak ve yapısal performansı artırmak amacıyla kullanılan ileri düzey bir mühendislik yaklaşımıdır. Geleneksel boyut ve şekil optimizasyonunun ötesine geçerek, tasarım alanının tamamında malzeme varlığı veya yokluğunu dikkate alır ve bu sayede oldukça yenilikçi ve efektif geometriler oluşturulmasına olanak sağlar. (Sigmund 2001, Wang ve Wang 2006).

Bu yöntem sayesinde, özellikle hafiflik ve dayanım arasında optimum bir denge kurularak mühendislik ürünlerinde hem ekonomik hem de fonksiyonel avantajlar elde edilebilmektedir. Özellikle taşıma sektöründe (otomotiv, havacılık, demiryolu, otobüs

üretimi vb.) hem yakıt verimliliği sağlamak hem de parça dayanımını artırmak adına topoloji optimizasyonuna sıklıkla başvurulmaktadır. (Bruns ve Tortorelli 2001, Rozvany 2009)

Topoloji optimizasyonu genellikle aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilir:

- SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yöntemi: Yoğunluk temelli bir yaklaşımdır. Elemanların malzeme yoğunlukları sürekli olarak 0 ile 1 arasında değiştirilir ve belirli bir ceza katsayısı kullanılarak yapının rijitliğini optimize eder. (Sigmund 2001, Bendsøe ve Sigmund 2003)
- BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization): İkili (0-1) tabanlı evrimsel algoritmalara dayanır. Malzeme ekleme ve çıkarma işlemleriyle yapının evrimsel şekilde optimize edilmesini sağlar. (Altair Engineering Inc., 2021)
- Level-Set yöntemi: Yapının sınırlarını örtük fonksiyonlarla ifade ederek, yüzeyin geometrisini sürekli olarak değiştirerek optimum şekle ulaşır. (Wang ve Wang 2006)

Bu yöntemlerin tümü, malzemenin minimum kullanımını hedeflerken, yapının belirli mekanik sınırlamalar altında (gerilme, deplasman, frekans vb.) güvenli ve işlevsel olmasını amaçlamaktadır. (Sigmund 2001, Bendsøe ve Sigmund 2003)

2.1.1 Topoloji Optimizasyonunun Uygulama Alanları

Topoloji optimizasyonu ilk olarak havacılık ve otomotiv gibi ağırlık azaltmanın hayati öneme sahip olduğu alanlarda kullanılmıştır. Günümüzde ise bu yöntem, otomotiv süspansiyon kolları, taşıyıcı yapılar, biyomedikal implantlar ve özellikle ticari taşıtlarda kullanılan braket gibi parçaların tasarımında da aktif rol oynamaktadır. (Bruns ve Tortorelli 2001, Altair Engineering Inc. 2021)

Zhang ve Wang (2020), bir otobüs koltuk braketini üzerinde yaptıkları çalışmada Siemens

NX yazılımı kullanarak optimize ettikleri parçanın ağırlığını %8,9 oranında azaltmış; aynı zamanda maksimum gerilmeyi %66, maksimum deplasmanı ise %48 oranında düşürerek tasarımı iyileştirmiştir. (Zhang ve Wang 2020) Benzer şekilde, Nazlı ve Özsoy (2024), ANSYS Workbench kullanarak bir otomobil süspansiyon salıncağında topoloji optimizasyonu uygulamış ve parçanın kütlesini %57 oranında azaltmayı başarmıştır. (Nazlı ve Özsoy 2024)

Jagtap ve Dhoke (2017) ise bir egzoz braketini üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada %50'ye varan hafifleme sağlarken, Topaç ve arkadaşları da ağır vasıta arka aks braketinde %63'e varan ağırlık azaltımı raporlamışlardır. (Jagtap ve Dhoke 2017, Topaç ve ark. 2020) Bu bulgular, topoloji optimizasyonunun ulaşım endüstrisinde maliyet azaltımı, malzeme tasarrufu ve sürdürülebilirlik adına oldukça etkin olduğunu göstermektedir.

2.1.2 Malzeme Seçiminin Topoloji Optimizasyonundaki Rolü

Topoloji optimizasyonu yalnızca şeklin değil, aynı zamanda kullanılacak malzemenin de belirlenmesini etkileyen bir süreçtir. Çünkü farklı malzemeler farklı elastik modül, akma dayanımı ve yoğunluk gibi özelliklere sahiptir. Dolayısıyla malzeme seçimindeki farklılıklar, optimizasyon çıktılarında önemli değişikliklere yol açabilir. (Sigmund 2001, Zuo ve Saitou 2017)

Zuo ve Saitou (2017), geliştirdikleri Ordered Multi-Material SIMP yöntemi ile birden fazla malzeme kullanarak optimum dağılım sağlamış; yüksek dayanımlı bölgelerde daha rijit, az yük taşıyan bölgelerde ise hafif malzemelere yönelmişlerdir. (Zuo ve Saitou 2017) Bu yaklaşım, karmaşık yapılar için daha gerçekçi ve üretilebilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

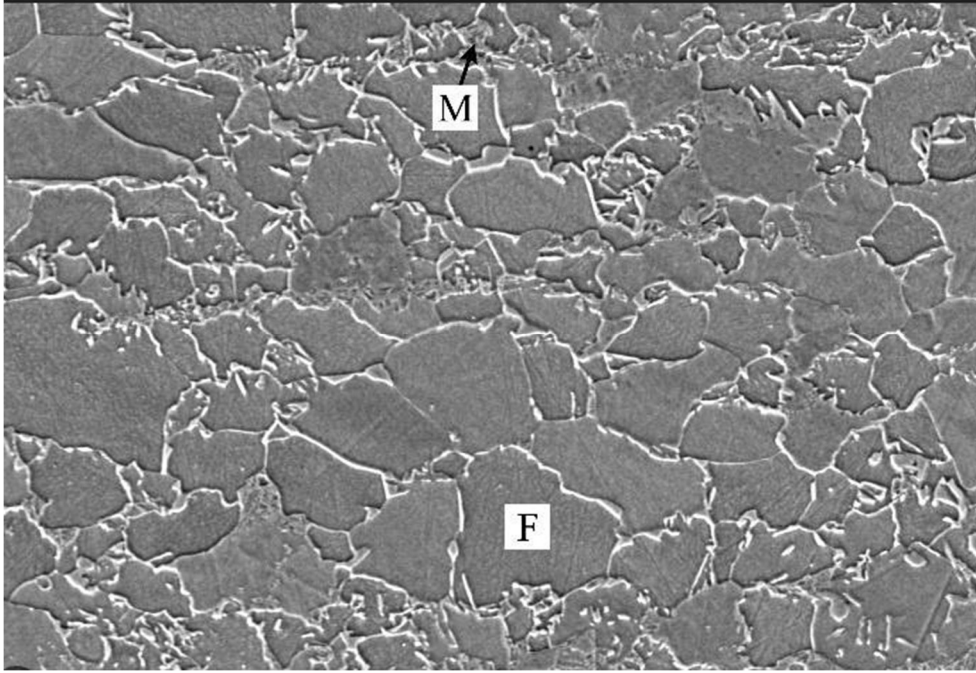
Huang ve arkadaşları ise, farklı malzemelerin birlikte kullanılmasına yönelik uyumluluk kriterleri tanımlayarak, simülasyon doğruluğunu ve mühendislik uygulanabilirliğini artırmıştır. (Huang ve Xie 2021)

Bu araştırmamızdaki malzemelerin genel özellikler, mekanik özellikleri, kullanım alanları detaylı bir şekilde incelenecektir.

2.1.2.1 Çift Fazlı (DP) Çelikler

Çift fazlı çelikler mukavemet ve süneklik kombinasyonu nedeniyle otomotiv sektöründe oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Çift fazlı çelikler geleneksel çeliklere göre daha yüksek mukavemetlidir ve HSLA çeliklere göre daha yüksek deformasyon sertleşme oranına sahiptir. (Dede 2018)

Çift fazlı çelikler yumuşak olan ferrit matris içerisinde %10 ile %40 oranında sert olan martenzit parçacıklarını içerir. Yapıda çok küçük oranlardan kalıntı östenit ve beynit de yer alabilir. Şekil 2.1’de DP çeliğinin mikro yapısı mevcuttur. Yapıya bakıldığında ferrit fazı koyu renkli, martensit fazından oluşan adacıklar ise açık renkte görülmektedir. (Tamarelli 2011)



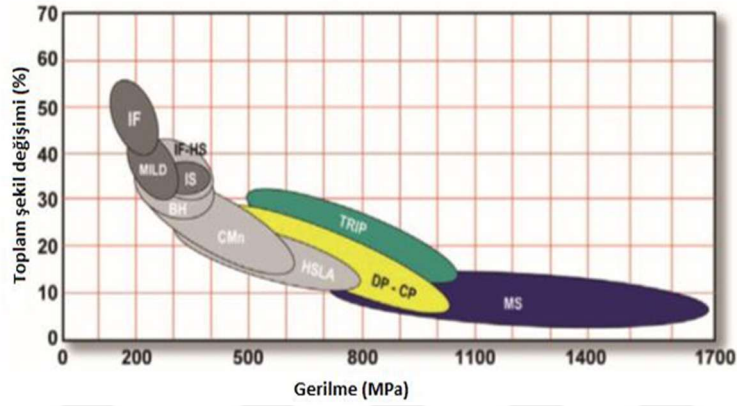
Şekil 2.1 Çift fazlı çelik mikro yapısının şematik gösterimi

Bu mikroyapı malzemenin 500 ile 1200 MPa’a arasında çekme kuvveti kazanması sağlanmaktadır. DP çeliklerinin mukavemetini martenzit fazı, sünekliğini de ferrit fazı sağlamaktadır. DP çeliğin martensit içeri malzemenin seviyesiyle orantılıdır. (Dede 2018)

2.1.2.1.1 Çift Fazlı Çeliklerin Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları

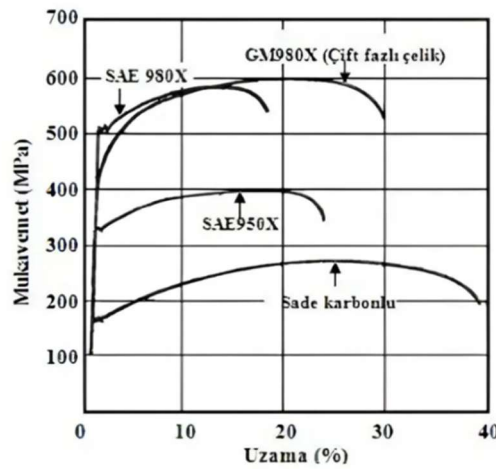
DP çelikler, iki fazlı yapıya sahip yüksek mukavemetli çeliklerin bir alt grubunu ifade eder. Bu çelikler genellikle ferrit ana fazı içinde dağılmış martensit fazı içerir. 1970’li

yıllarda geliştirilmeye başlanan DP çelikler, günümüzde hâlâ yüksek talep görmektedir. Diğer yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerle karşılaştırıldığında, DP çeliklerin hem çekme dayanımı hem de uzama oranı daha yüksektir. Şekil 2.2’de farklı çelik türlerine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir. (Granbom 2010)



Şekil 2.2 Farklı çelik türlerinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarını karşılaştırmalı grafiği

Çift fazlı çeliklerde yer alan martensit fazı, malzemenin yalnızca mukavemetini artırmakla kalmaz; aynı zamanda darbe dayanımı, çökmeye karşı direnç ve eğilme gibi mekanik özelliklerini de geliştirir. Şekil 2.3’te sunulan grafik incelendiğinde, %0,2 uzama noktasının plastik deformasyonun başladığı yer olduğu görülmektedir. Bu değer, geleneksel karbon çeliklerine kıyasla daha yüksek olması, çift fazlı çeliğin şekil değiştirme yeteneğinin üstün olduğunu gösterir. Şekillendirme kabiliyetinin yüksek olması, malzemenin elastik deformasyon bölgesinden ziyade plastik deformasyon bölgesinde uzamaya başlamasıyla ilişkilidir. (Ulu 2009)



Şekil 2.3 Soğuk haddelenmiş sade karbonlu çelik ile çift fazlı (DP) çeliğe ait mukavemet ve şekil değiştirme ilişkisini gösteren grafiği

DP çeliklerde bulunan ferrit ve martensit fazlarının malzemeye kazandırdığı bazı avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sürekli bir akma davranışı göstermesi
- Akma dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki oranın düşük olması
- Pekleşme katsayısının ideal seviyede bulunması
- Yüksek ve orantılı uzama özellikleri

Bu çeliklerin düşük akma dayanımı, kesintisiz akma karakteri, yüksek pekleşme oranı, iyi orantılı ve toplam uzama kabiliyeti, üstün yorulma dayanımı ve korozyona karşı gösterdiği yüksek direnç gibi özellikleri sayesinde otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde tercih edildiği bilinmektedir. (Hayat 2010, (Varol ve ark. 2015)

DP çelikleri için örnek olarak kullanacağımız DP600 ve DP800 çeliklerinin simülasyon için mekanik özelliklerini Çizelge 2.1 'de, kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.2'de ve Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri Çizelge 2.3 'de gösterilmektedir. (Şen ve Çolakoğlu 2019)

Çizelge 2.1 DP600 ve DP800 malzemelerine ait mekanik özellikler

Malzeme	Deformasyon Hızı (s ⁻¹)	Deformasyon Sıcaklığı (°C)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama %	Malzeme İzotropik Kabul Edilmiştir	Sürtünme
DP600	0,1	25	398,4	611	16	R=1	μ=0,03
DP800	0,1	25	594,2	805,1	10	R=1	μ=0,03

Çizelge 2.2 DP600 ve DP800 kimyasal kompozisyonu

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti
DP600	0,093	0,225	0,823	0,0123	0,0120	0,053	0,014	0,007
DP800	0,141	0,214	1,483	0,0106	0,0156	0,085	0,018	0,009

Çizelge 2.3 Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri

Özellik	DP600	DP800
Akma Dayanımı (Yield Strength)	350 MPa	550 MPa
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	600 MPa	800 MPa
Uzama (Elongation) (%)	25 %	15 %
Young Modülü (Elastic Modulus)	210 GPa	210 GPa
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	0.3	0.3
Sertlik (Hardness, HBW)	150-180 HB	180-220 HB

2.1.2.2 Paslanmaz Çelikler

Demir ile krom alaşımlarının paslanmaya karşı dayanıklılığı ilk kez 1821 yılında Pierre Berthier tarafından gözlemlenmiştir. 1890'lı yıllarda ise Hans Goldschmidt, karbonsuz krom üretimini mümkün kılan aluminotermik yöntemi geliştirerek bu alandaki çalışmalara önemli katkı sağlamıştır. (Baran 2019)

Paslanmaz çeliklerin korozyona karşı direnç gösterebilmesi için en az %12 oranında krom içermesi gerekmektedir. Krom elementi, çeliğin mikro yapısında tane incelmeye neden olur, kritik soğuma hızını düşürerek sertleşme eğilimini artırır ve alaşım içerisindeki oranı yükseldikçe, özellikle yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı dayanıklılığı da artar. (Aydın 2002)

Çelik bünyesinde %12'nin üzerinde krom bulunması, yalnızca atmosferik koşullara değil, aynı zamanda nitrik asit gibi kimyasal aşındırıcılara karşı da etkili bir koruma sağlar. Ancak yalnızca krom içeren çelikler, sülfürik ya da hidroklorik asit gibi daha agresif ortamlarda yeterli koruma sağlayamaz. Bu asitler, yüzeydeki koruyucu krom oksit tabakasını bozarak malzemenin korozyona karşı direncini zayıflatır. (Aydın, 2002)

2.1.2.2.1 Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları

Paslanmaz çelik, özellikle kimya ve enerji mühendisliği alanlarında en yoğun şekilde tercih edilen malzemelerden biridir. 304 kalite paslanmaz çeliğin öne çıkmasının başlıca

nedeni, inceltirilmiş nitrik asit depolama tanklarında ince kesitli yapıların güvenli kullanılması olarak sağlaması ve alternatif malzemelere kıyasla yüksek direnç göstermesidir. Farklı sıcaklık koşullarında üstün korozyon dayanımı sağlamak amacıyla çeşitli paslanmaz çelik grupları geliştirilmiştir. Bu malzeme türü; kanalizasyon sistemlerinde, deniz suyu arıtma tesislerinde, kıyı yapılarında, deniz altı petrol çıkarma sistemlerinde ve gemi pervanelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji üretim hatlarında ise yüksek sıcaklıklarda boyutsal ve kimyasal kararlılığını koruyabilmesi nedeniyle tercih sebebidir. Ayrıca, gıda işleme ekipmanları, medikal cihazlar ve çeşitli depolama sistemlerinde hijyenik, dayanıklı ve paslanmaya karşı dirençli yapısı sayesinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 2.4'te, paslanmaz çelikten üretilmiş bir kimyasal reaktör örneği gösterilmektedir. (Baran 2019)

Otobüslerde paslanmaz çelik, özellikle yüksek dayanım ve korozyon direnci gerektiren iskelet sistemlerinde tercih edilmektedir. Şekil 2.4'de görüldüğü üzere, sürücü kabini ile taşıyıcı şasi arasında yer alan iskelet yapılar, paslanmaz çelikten üretilmiş boru profiller ile güçlendirilmiştir. Bu bölgeler, taşıyıcı şasiye aktarılan yüklerin yoğun olduğu bağlantı noktalarıdır ve bu nedenle yapısal bütünlüğün korunması için yüksek mekanik dayanım gerektirir. AISI 304 ve AISI 316 gibi östenitik paslanmaz çelikler, kaynaklanabilirlikleri, uzun ömürlü dayanımları ve düşük bakım gereksinimleri sayesinde bu tür uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil.2.4 Endüstriyel montaj: Otobüs şasisi ve kabin çerçevesinin birleştirilmiş uygulama fotoğrafı.

Paslanmaz çelikler, hijyenik olmaları, kolay temizlenebilmeleri ve yüzeylerinde kir tutmama özellikleri sayesinde endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu malzeme; pompa gövdeleri, depolama tankları, taşıma boruları, ısı eşanjörleri, ısıtıcı sistemleri, vakum tankları ve dolum makineleri gibi birçok ekipmanda kullanılmaktadır. Özellikle suyla sürekli temas hâlinde çalışan ve kesintisiz akışın olduğu gıda yıkama sistemlerinde, paslanmaz çelikler yüksek korozyon direnci ve uzun servis ömrü sayesinde öne çıkar. Hava veya buhar tahliye hatlarında 304 kalite paslanmaz çelik tercih edilirken, fan sistemlerinin kanatçıklarında genellikle 316 kalite kullanılır. Tuzlu veya asidik olmayan sıvıların depolandığı tanklarda ise 316L kalitesi ya da ısıl işlem uygulanmış, pasifleştirilmiş ve yüzeyi kumlanmış 316 kalite paslanmaz çelikler tercih edilmektedir. Tambur sistemlerinde katkı maddeleriyle temas eden alanlarda genellikle 304 kalite malzeme kullanılır. Daha agresif ve koroziv gıda uygulamaları için ise düşük karbon içeriğine sahip paslanmaz çelik türleri önerilmektedir. (Aran ve Sarıtaş 2003) Paslanmaz çelik aynı zamanda depolama tanklarının üretiminde de yaygın şekilde kullanılır. (Baran 2019)

AISI 316 paslanmaz çeliği, kimyasal bileşim açısından AISI 304 ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Ancak AISI 316, içerdiği molibden ve nikel oranlarının daha yüksek olmasıyla AISI 304'ten ayrılmaktadır. Bu alaşım elementlerinin varlığı, AISI 316'nın kopma mukavemetini AISI 304'e kıyasla daha yüksek seviyelere çıkarmaktadır. Bu çalışmada, sanayide yaygın olarak kullanılan bu iki östenitik paslanmaz çeliğin işlenebilirliği; kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve daha önce detaylı olarak ele alınmamış olan takım aşınması gibi kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Farklı kesme parametrelerinin kombinasyonlarıyla gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. (Altan Özbek ve ark. 2016) Çizelge 2.4'te, incelenen östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşim değerleri yer almaktadır.

Çizelge 2.4 Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri

Sınıf	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
AISI 304	0,08	2,00	0,75	0,045	0,03	18,35	8,12	0,07	0,23
AISI 316	0,04	1,18	0,41	0,038	0,012	16,30	10,09	2,02	0,49

Çizelge 2.5’te yer alan değerler, yapılan sonlu elemanlar analizlerinde simülasyon girdisi olarak kullanılan parametreleri temsil etmektedir.

Çizelge 2.5 AISI 304 ve AISI 316 analiz yapılırken kullanılacak değerler

Özellik	AISI 304	AISI 316
Young Modülü (E)	195 GPa	193 GPa
Poisson Oranı (ν)	0.29	0.25
Akma Dayanımı	215 MPa	205 MPa
Çekme Dayanımı	505 MPa	515 MPa
Yoğunluk	7.9 g/cm ³	7.9 g/cm ³
Termal İletkenlik	16.2 W/m·K	16.3 W/m·K
Öz Isı Kapasitesi	500 J/kg·K	500 J/kg·K

2.1.2.3 Yapı Çelikleri

Demir ve çelik talebi, bir ülkenin ekonomik durumu, altyapı projeleri, konut sektörü yatırımları ve genel olarak inşaat sektörünün gelişim seviyesine doğrudan bağlıdır. Bu çerçevede, dünya genelinde üretilen çelikler arasında yapı çelikleri, önemli bir paya sahiptir ve sektörde kritik bir rol oynar. Yapı çelikleri, fiyat avantajı ve kolay erişilebilirlikleri nedeniyle piyasadaki çelik türleri arasında yaklaşık %75-80 oranında yaygın şekilde kullanılmaktadır. (İnt.Kyn.7)

Yapı çelikleri, düşük karbon içeriğine sahip ve alaşım elementi bulundurmayan, ancak fosfor (P) ve azot (N) gibi bazı elementlerin yanı sıra üretim sürecinden kaynaklanan mangan (Mn), silisyum (Si), bakır (Cu) ve kükürt (S) gibi elementleri içerebilen malzemelerdir. Bu çelikler, sıcak şekillendirilmiş, normalize edilmiş ya da bazen soğuk çekilmiş olarak üretilirler. Özellikle çekme dayanımı ve akma sınırları göz önünde bulundurularak endüstriyel ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak tercih edilirler. (İnt.Kyn.7)

Yapı çelikleri, özelliklerine göre çeşitli alt kategorilere ayrılır; sıcak şekillendirilmiş (termomekanik işlem görmüş), soğuk çekilmiş, normalize edilmiş, ince taneli, kaynaklanabilir, korozyon dirençleri artırılmış, su verilmiş veya temperlenmiş yüksek

akma dayanımlı çelikler olarak sınıflandırılabilirler. Bu farklı işlemler, yapı çeliklerinin mekanik özelliklerini ve kullanım alanlarını genişletir. (İnt.Kyn.7)

Düşük karbon içeriği ile alaşımsız olarak üretilen yapı çelikleri, haddeleme ve normalizasyon işlemleriyle plakalar halinde imal edilerek inşaat ve imalat sektöründe yaygın biçimde kullanılır. Mikroalaşımlama teknikleri ve tane boyutunun kontrolü sayesinde, bu çeliklerin akma ve çekme mukavemetleri optimize edilirken aynı zamanda düşük sıcaklıklarda yüksek tokluk özellikleri de sağlanır. Üretim sürecinde kullanılan temel işlemler kesim, talaşlı imalat, soğuk ve sıcak deformasyon ile kaynak uygulamalarıdır. Bu işlemlerden kaynak, özellikle düşük karbon içerikleri sebebiyle yapı çeliklerinde en önemli imalat yöntemlerinden biri olarak öne çıkar. Kaynak sonrası malzemenin mekanik dayanımları ve bütünlüğü, standartlarda belirtilen minimum değerleri karşılamak zorundadır. (İnt.Kyn.7)

Yapı çeliklerinin temel özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Yeterli düzeyde akma sınırı ve çekme dayanımı
- Yüksek darbe dayanımı
- Gevrek kırılmalara karşı direnç
- Kolay kaynaklanabilirlik
- Kolay şekillenebilirlik
- Yüksek işlenebilirlik (İnt.Kyn.7)

St 37 tipi çelikler, DIN 17100 standardına uygun olarak yapılan testler sonucunda çekme dayanımı yaklaşık 37 kg/mm² olarak belirlenmiştir. Burada "St" ifadesi, malzemedeki karbon oranının %0,2 olduğunu belirtirken, "37" sayısı ise malzemenin en az 37 kg/mm² çekme dayanımına sahip olduğunu gösterir. (Çalığülü ve ark. 2018)

Benzer şekilde, St 52 tipi çelikler de aynı DIN 17100 standardı kapsamında değerlendirilir. Çekme dayanımı, numaranın sonundaki 52 rakamıyla ifade edilir ve yaklaşık 52 kg/mm² olarak belirlenmiştir. St 52, St 37'ye göre daha yüksek mukavemete sahip olup, daha zorlu yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bu yapı çeliklerinin geniş kullanım alanı, yüksek dayanım özellikleri ve işlenebilirlik

avantajları, inşaat ve endüstriyel projelerde tercih edilmelerinin başlıca sebeplerindendir. Ayrıca, yapı çeliklerinde uygulanan modern üretim teknikleri ve alıştırma yöntemleri, bu malzemelerin performansını artırmakta ve farklı çevresel koşullara karşı dayanıklılığını iyileştirmektedir.

2.1.2.3.1 Yapı Çeliklerinin Kullanım Alanları

Çelik, dayanıklılığı, mukavemeti ve esnekliği sayesinde birçok endüstri dalında geniş uygulama alanı bulmaktadır. İnşaat sektöründe ise çelik, yapıların iskelet sistemlerinde, köprülerde, tünellerde ve çeşitli altyapı projelerinde yaygın olarak tercih edilir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde, çelikten yapılan yapılar hem daha hafif hem de sağlam olur. Ayrıca, çelik yapılar deprem ve diğer doğal afetlere karşı yüksek dayanıklılık gösterdikleri için modern inşaatlarda güvenlik ve uzun ömür açısından öncelikli malzemeler arasında yer alır.

Otomotiv endüstrisinde de çelik, araç üretiminde kritik bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Araçların şasi, motor, gövde ve farklı mekanik parçalarında çelik malzeme tercih edilir. Çeliğin yüksek dayanımı ve enerji emme kapasitesi, kaza anında yolcu güvenliğini artırırken, gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler araç ağırlığını azaltarak yakıt tasarrufu sağlar ve zararlı gaz salınımını düşürür. Bunun yanında, beyaz eşya sektöründen gemi yapımına, enerji üretiminden makine imalatına kadar pek çok farklı alanda da çelik, sunduğu dayanıklılık ve işlenebilirlik özellikleriyle vazgeçilmez bir malzeme konumundadır. Çeliğin bu geniş kullanım alanları, sanayinin ilerlemesini ve modern yaşamın şekillenmesini sağlamaktadır. (İnt.Kyn.1)

İnşaat çelikleri, betonarme yapıların, köprülerin, yüksek katlı binaların ve endüstriyel tesislerin temel yapı taşlarını oluşturur. Yüksek dayanıklılık ve mukavemetleri sayesinde, bu çelikler yapıların güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü garanti altına alır. Aynı zamanda deprem ve diğer doğal afetlere karşı koruyucu özellikleriyle de ön plana çıkarlar. (İnt.Kyn.1)

Otomotiv sektöründe kullanılan çelikler ise araçların şasi, gövde ve motor gibi kritik

parçalarında yoğun şekilde yer alır. Bu çelikler yüksek mukavemet ve darbe direnci sayesinde araçların güvenliğini artırırken performanslarını da iyileştirir. Ayrıca, çeliğin sağladığı avantajlar sayesinde otomotiv endüstrisi hem hafif hem dayanıklı araçlar üretme imkânı bulur. (İnt.Kyn.1)

Öte yandan, otomat çeliği olarak adlandırılan çelik türü, yüksek hassasiyet gerektiren parça üretiminde kullanılır. Seri üretim ve otomasyon süreçlerinde tercih edilen bu çelik, üstün işlenebilirlik özellikleriyle özellikle hassas makine elemanları, elektronik parçalar ve medikal cihazlar gibi alanlarda sıkça kullanılır. (İnt.Kyn.1)

Çelik çeşitleri, kendilerine özgü özellikleri ve farklı kullanım alanları ile günümüz sanayisinin temel yapı taşlarından biridir. Sıcak haddelenmiş çelikten soğuk çekilmiş olanlara, paslanmaz çelikten dövme çeliğe kadar çeşitli türler, farklı endüstriyel uygulamalarda yüksek performans sağlar. İnşaat, otomotiv, beyaz eşya ve enerji gibi sektörlerde çeliğin sağlamlığı, dayanıklılığı ve işlenebilirliği önemli avantajlar sunar. Çeliklerin sınıflandırılması ve uluslararası standartlara uygun üretimi, ürün kalitesi ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, çelik türlerinin ve özelliklerinin doğru bilinmesi, endüstriyel uygulamalarda uygun malzeme seçimi ve başarılı uygulama için gereklidir. (İnt.Kyn.1)

Yapı çelikleri kapsamında örnek olarak kullanılan ST 37 ve St 52 çeliklerinin mekanik özellikleri simülasyonlar için Çizelge 2.6’da, kimyasal bileşimleri Çizelge 2.7’de ve analizde kullanılan sac malzemenin özellikleri ise Çizelge 2.8’de detaylı şekilde sunulmuştur.

Çizelge 2.6. St 37 ve St 52 çeliklerinin mekanik özellikleri

Özellik	ST37	ST52
Akma Dayanımı	235 MPa	355 MPa
Çekme Dayanımı	370 MPa	520 MPa
Uzama ($L_0 = 5.65\sqrt{A}$)	25%	22%
Sertlik (Brinell, HB)	140 HB	180 HB
Tokluk	Yüksek	Yüksek

Çizelge 2.7 St 37 ve St 52 kimyasal kompozisyonu

Element	ST37	ST52
Karbon (C)	0.17%	0.20%
Silisyum (Si)	0.30%	0.50%
Manganez (Mn)	1.20%	1.50%
Fosfor (P)	0.035%	0.030%
Kükürt (S)	0.035%	0.030%
Azot (N)	-	0.010%

Çizelge 2.8 St 37 ve St 52 analizde kullanılacak değerler

Özellik	ST37	ST52
Elastisite Modülü (E)	210 GPa	210 GPa
Poisson Oranı (ν)	0.30	0.30
Yoğunluk (ρ)	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³
Akma Gerilmesi (σ_y)	235 MPa	355 MPa
Maks. Gerilme (σ_{uts})	370 MPa	520 MPa
Termal Genleşme Katsayısı	$12 \times 10^{-6} /K$	$12 \times 10^{-6} /K$

2.1.2.4 Malzeme Kalınlığına Bağlı Olarak İşlenebilirlik ve Bükülebilirlik

Otomotiv sektöründe kullanılan sac metal malzemelerin, özellikle braket gibi güvenlik açısından kritik bileşenlerdeki performansı; yalnızca kullanılan çeliğin türüne değil, aynı zamanda bu çeliğin kalınlığına, şekillendirme kabiliyetine ve işlenebilirliğine de doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda DP600, DP800, AISI 304, AISI 316, ST37 ve ST52 gibi yaygın çelik türleri farklı sac kalınlıklarında işleme ve şekillendirme süreçlerine karşı farklı davranışlar sergilemektedir. Bu bölümde, ilgili çeliklerin 1 mm ile 6 mm aralığındaki kalınlıklarda lazer kesim, pres büküm, CNC işleme ve kaynaklanabilirlik yönünden nasıl performans gösterdiği, yerli ve yabancı literatür ışığında analiz edilmiştir.

2.1.2.4.1 Çift Fazlı Yüksek Mukavemetli Çelikler: DP600 ve DP800

Çift fazlı çelikler, ferrit-martensit mikro yapısıyla yüksek mukavemet ve yeterli sünekliği aynı anda sağlayabilmeleri sayesinde özellikle otomotiv sektöründe yoğun olarak tercih edilmektedir. DP600 ve DP800 türleri, adlarını yaklaşık akma gerilmelerinden (600 MPa ve 800 MPa) almakta olup, düşük alaşımlı fakat yüksek dayanımlı malzemelerdir. (Öztürk 2018) Özellikle çarpışma enerjisini sönümleyen yapısal elemanlarda ve koltuk bağlantı braketlerinde kullanımları yaygındır. (Özcan 2018)

Literatürde, bu malzemelerin şekillendirme performansını etkileyen en önemli faktörlerden birinin sac kalınlığı olduğu vurgulanmıştır. Uslu (2014), 1 mm, 1.5 mm ve 2 mm kalınlıktaki DP600 saclarla gerçekleştirdiği bükme deneylerinde, sac kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının azaldığını ortaya koymuştur. (Uslu 2014) Benzer şekilde, Özcan (2018), DP800 çelik saclarla yaptığı çalışmada malzeme kalınlığı arttıkça hem daha stabil büküm geometrileri elde edildiğini hem de çatlama riskinin azaldığını bildirmiştir. (Özcan 2018)

DP600 ve DP800 için minimum bükme yarıçapı genellikle malzeme kalınlığının 2–3 katı olarak belirlenmektedir. 1 mm kalınlığında bir DP600 sac için minimum bükme yarıçapı 2–3 mm iken, 6 mm kalınlıkta bu değer 12–18 mm arasında değişmektedir. (Uğur 2019) Ayrıca kalın saclarda pres büküm yerine rulolu büküm yöntemlerinin tercih edilmesi, daha az gerilim birikimi ve daha düşük yaylanma ile sonuçlanmaktadır. (Zhang 2017)

Kaynaklanabilirlik açısından DP600, CO₂ gazı ile yapılan MIG kaynaklarında iyi performans göstermekte olup, kalınlık arttıkça ısı girdisi nedeniyle kenar bozulmalarının önüne geçilmesi zorlaşmaktadır. (Tekaslan 2008) CNC işlemede ise yüksek sertlik nedeniyle takım aşınmaları daha erken gözlemlenmektedir; bu nedenle DP800 gibi daha sert versiyonlar için kaplamalı takım uçlarının tercih edilmesi önerilmektedir. (Kaya 2020)

2.1.2.4.2 Paslanmaz Çelikler: AISI 304 ve AISI 316

AISI 304 ve 316, östenitik yapıdaki paslanmaz çelikler olup, korozyon dayanımı ve şekillendirilebilirlik açısından endüstride geniş kullanım alanına sahiptir. AISI 316,

molibden ilavesi ile AISI 304'e göre daha yüksek asidik ve deniz ortamı dayanımına sahiptir. (Çelik 2021)

Bükme işlemleri yönünden incelendiğinde, düşük akma sınırı sayesinde bu çelikler yüksek şekillendirme kabiliyeti gösterir. Işıktaş (2011), yaptığı deneysel çalışmalarda 1 mm, 1.5 mm ve 2 mm kalınlıklardaki paslanmaz çeliklerin geri yaylanma miktarını ölçmüş, kalınlık arttıkça yaylanma davranışının düzenli şekilde azaldığını rapor etmiştir. (Işıktaş 2011) Ayrıca 3 mm ve üzerindeki kalınlıklarda iç bükme yarıçapının malzeme kalınlığının 1,5 katı seçilmesi önerilmiştir. (Karakaya 2022)

Paslanmaz çeliklerin lazer kesiminde kalınlık arttıkça kenar çapaklanması ve termal deformasyon riski artmakta, bu da özellikle 5 mm ve 6 mm kalınlıklarda kesim hızlarının düşürülmesini gerektirmektedir. (Demir 2023) CNC işlenebilirliği ise düşük termal iletkenlik nedeniyle zorludur; 4 mm ve üzeri kalınlıklarda talaş kaldırma sırasında kesici takımın soğutulmasına özel dikkat gösterilmelidir. (Özer 2020)

Kaynak açısından hem AISI 304 hem de AISI 316, TIG ve MIG yöntemleriyle başarılı biçimde birleştirilebilmektedir. Özellikle 1–3 mm kalınlıkta lazer kaynak, 4–6 mm aralığında ise çift taraflı MIG kaynak önerilmektedir. (Şahin 2018)

2.1.2.4.3 Yapısal Karbon Çelikleri: ST37 ve ST52

ST37 (S235JR) ve ST52 (S355JR), düşük ve orta dayanımlı karbon çelikleri olup, özellikle maliyet etkinliği ve kaynaklanabilirliği ile ön plana çıkar. ST37 yumuşaklığı sayesinde yüksek şekillendirilebilirlik sağlarken, ST52 daha yüksek mukavemete sahiptir ancak şekillendirme sürecinde daha dikkatli işlem parametreleri gerektirir. (Kılıç 2017)

Pekince (2019), 2 mm'den 6 mm'ye kadar kalınlıklarda gerçekleştirdiği V-bükme deneylerinde, sac kalınlığı arttıkça bükme kuvvetinin arttığını ancak geri yaylanma oranının azaldığını gözlemlemiştir. (Pekince 2019) Sayın (2019) ise ST52 ile yaptığı benzer çalışmada, yüksek mukavemetin daha fazla yaylanmaya sebep olduğunu, ancak bu etkinin 4 mm ve üzeri kalınlıklarda azaldığını bildirmiştir. (Sayın 2019)

Lazer kesimde ST37'nin düşük karbon içeriği sayesinde temiz kesim yüzeyleri elde

edilebilir. Ancak 5 mm üzeri kalınlıklarda ısı etkisiyle deformasyon artmaktadır. ST52 için lazer kesimde oksijen yerine azot destekli kesim tercih edildiğinde daha düzgün kenar yüzeyleri elde edilmektedir. (Aksoy 2020)

Pres büküm işlemlerinde, ST37 daha az yaylanma ile şekillenirken, ST52’de minimum bükme yarıçapı genellikle 2–3T (T: sac kalınlığı) olarak seçilmelidir. Aksi takdirde çatlamlar ve plastik deformasyonlar oluşabilir. (Güler 2021)

Kaynaklanabilirlik açısından her iki malzeme de oldukça uygundur. Özellikle MIG/MAG kaynak yöntemleriyle 3 mm ve üzeri kalınlıklarda yüksek kalitede birleşimler elde edilmektedir. Ancak ST52'nin yüksek karbon eşdeğeri nedeniyle kaynak sonrası tavlama gerekebilir. (Özdemir 2019) Çizelge 2.9’da malzemelere göre işlenebilirlik ve bükülebilirlik değerlerini görebilirsiniz.

Çizelge 2.9 Farklı kalınlıklar için özet tablo: İşlenebilirlik ve bükülebilirlik eğilimleri

Malzeme	Kalınlık (mm)	Bükülebilirlik	Yaylanma Eğilimi	Lazer Kesim Zorluğu	CNC İşleme Zorluğu	Kaynaklanabilirlik
DP600	1–6	Orta	Yüksek (1–3 mm), Azalan (4–6 mm)	Orta	Orta-Yüksek	İyi
DP800	1–6	Düşük-Orta	Yüksek	Zor	Zor	Orta
AISI 304	1–6	Yüksek	Az	Kolay (1–3 mm), Zor (4–6 mm)	Orta	Çok iyi
AISI 316	1–6	Yüksek	Az	Orta	Orta	Çok iyi
ST37	1–6	Yüksek	Orta-Azalan	Kolay	Kolay	Çok iyi
ST52	1–6	Orta	Orta	Orta	Orta	İyi

2.1.3 Topoloji Optimizasyonu için Kullanılan Yazılımlar ve Simülasyon Araçları

Topoloji optimizasyonu günümüzde hem açık kaynak kodlu hem de ticari birçok yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Otomotiv ve ulaşım sektöründe sıklıkla kullanılan başlıca yazılımlar şunlardır:

- ANSYS Mechanical / Workbench: Sonlu elemanlar analizlerini güçlü bir şekilde gerçekleştiren bu platform, aynı zamanda SIMP tabanlı topoloji optimizasyonu modülü sunar [9].
- Altair Inspire (OptiStruct): Kullanıcı dostu arayüzü ve güçlü topoloji optimizasyon algoritmaları ile özellikle endüstride yaygındır [7].
- Abaqus CAE (Tosca): Özellikle karmaşık geometriler için optimize edilmiş yapısal analiz ve optimizasyon araçları içerir. MATLAB ile birlikte kullanılarak BESO algoritması entegre edilebilir [6], [12].
- Siemens NX Topology Optimization: Parça modelleme, analiz ve optimizasyonu entegre olarak sunar. Özellikle otomotiv ve otobüs koltuk braket tasarımlarında tercih edilmektedir [8].

Bu araştırmamızda biz ABAQUS/CAE programını kullanarak simülasyonlarımızı gerçekleştirmeye karar verildi.

2.1.3.1 Simülasyon Programı ABAQUS/CAE

Bilgisayar destekli mühendislikte, sonlu elemanlar yöntemi (SEM) çeşitli yazılım paketleri aracılığıyla kolaylıkla modelleme yapılmasını sağlar. Bu modeller daha sonra küçük sonlu elemanlara ayrılarak detaylı analizlere tabi tutulur. Günümüzde, sonlu eleman analizleri için birçok gelişmiş yazılım geliştirilmiştir; bunlar arasında Abaqus, Nastran & Patran ve Abaqus/CAE gibi programlar öne çıkar. Bazı SEM yazılımları kendi içlerinde modelleme modülleri bulundurmasına rağmen, karmaşık geometrilerin oluşturulması bazen uzun zaman almakta ya da tamamen mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, iki ve üç boyutlu karmaşık yapıların modellenmesi için Catia, Pro/Engineer, Solidworks ve AutoCAD gibi harici CAD programları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla Abaqus/CAE programı tercih

edilmiştir. Bunun başlıca nedeni, Abaqus/CAE'nin tasarım modülünün ele alınan problem için yeterli olması ve analiz süreçlerinde kullanıcı dostu bir ara yüz sunmasıdır. Ayrıca, bu programın analiz sonuçlarında oldukça düşük hata payları göstermesi, tercih sebeplerinden biridir. (Erken 2009)

Abaqus/CAE, hem mekanik sistemlerin modellenmesi hem de bu modeller üzerinde sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan, aynı zamanda analiz sonuçlarını görsel olarak sunan kapsamlı bir yazılımdır. Program, model oluşturma, çözüm takibi, kullanıcı müdahalesi ve sonuçların değerlendirilmesi gibi tüm aşamaları içeren ön-işleme ve son-işleme süreçlerini tek bir platformda sunar. Üstelik açık kaynak kodlu yapısı sayesinde, Python programlama dili ile entegre çalışarak kullanıcıların uygulama bazlı çözümler geliştirmesine ve bu çözümleri otomatik hale getirmesine olanak tanır. (Ekmekçioğlu ve ark. 2020)

2.2 Malzeme Tabanlı Braket Maliyet Analizi (Temmuz 2025)

Farklı malzemeler kullanılarak braket üretiminin maliyetleri, Temmuz 2025 itibarıyla güncel piyasa verileri ışığında değerlendirilmiştir. Altı adet farklı braket (ağırlıkları sırasıyla 4.90 kg, 3.28 kg, 2.46 kg, 3.70 kg, 2.95 kg ve 2.20 kg) için AISI 304 paslanmaz çelik, AISI 316 paslanmaz çelik, DP800 çift fazlı yüksek mukavemetli çelik, DP600 çift fazlı çelik, ST52 yapısal çelik ve ST37 yapısal çelik malzeme seçenekleri ele alınmıştır.

Her bir malzeme için kg başına birim fiyatlar belirlenmiş; dört adet braket üretimi durumunda ortaya çıkan toplam malzeme maliyeti hesaplanmıştır.

Karbon çelikleri ve çift fazlı çelikler için, korozyona karşı dayanım sağlamak amacıyla kataforez kaplama ihtiyacı göz önüne alınmış ve güncel birim fiyatlara dayalı bir kaplama maliyeti eklenmiştir. Son olarak, malzeme maliyeti ve varsa kaplama maliyeti toplamı her braket için hesaplanarak farklı malzemelerin toplam üretim maliyetleri karşılaştırılmıştır. Aşağıda her braket için ayrı başlıklar altında bu sonuçlar sunulmakta; ilgili grafiklerle görselleştirilmekte ve teknik-ekonomik açıdan yorumlanmaktadır.

2.2.1 Braket 1 (4.90 kg)

Braket 1'in her bir adedi 4.90 kg ağırlığındadır. Dört adet üretim için toplam braket

ağırlığı 19.60 kg'dır. Bu braketin farklı malzemelerle üretilmesi durumunda maliyet kalemleri aşağıda listelenmiştir:

AISI 304 Paslanmaz Çelik: Temmuz 2025 itibarıyla ~60 TL/kg ortalama fiyatla (İnt.Kyn.6), 19.60 kg malzeme için malzeme maliyeti $\approx$ **1.176 TL** olur. Paslanmaz çelik kendi korozyon direncine sahip olduğundan ekstra kaplama gerektirmez; kataforez kaplama maliyeti yoktur. Toplam maliyet $\approx$ **1.176 TL**'dir.

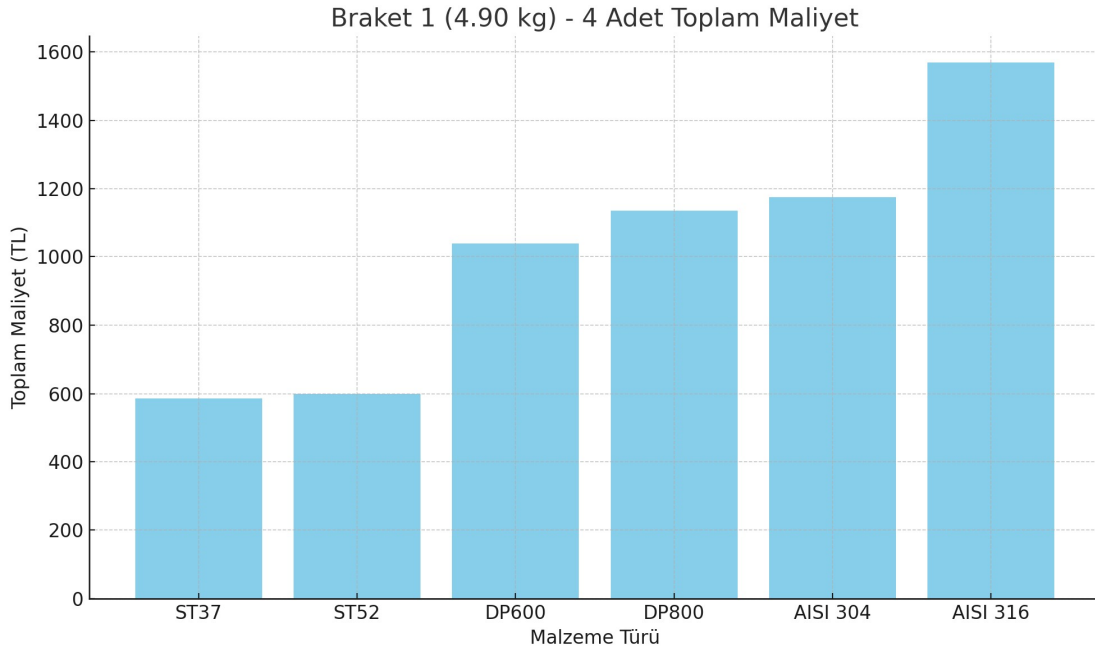
• **AISI 316 Paslanmaz Çelik:** ~80 TL/kg seviyesindeki daha pahalı bir paslanmaz çelik (İnt.Kyn.6), 19.60 kg için malzeme maliyeti $\approx$ **1.568 TL**'dir. 316 kalite de kaplama gerektirmez. Toplam maliyet $\approx$ **1.568 TL** olur. 316 kalite, 304'e göre %20–30 daha pahalıdır ancak daha yüksek korozyon direnci sunar (İnt.Kyn.3), (İnt.Kyn.8).

• **DP800 Çelik (Çift Fazlı, 800 MPa):** Yaklaşık ~55 TL/kg birim fiyat öngörülmektedir [1832 19.60 kg için malzeme maliyeti $\approx$ **1.078 TL** hesaplanır. DP800 korozyona karşı dirençli değildir; dolayısıyla kataforez kaplama öngörülmüştür. Ortalama kataforez kaplama maliyeti $\approx$ **58 TL** (4 adet parça için) olarak eklenmiştir. Böylece toplam maliyet $\approx$ **1.136 TL** olur.

• **DP600 Çelik (Çift Fazlı, 600 MPa):** Yaklaşık ~50 TL/kg seviyesinde fiyatla, 19.60 kg için malzeme maliyeti $\approx$ **980 TL** bulunur (İnt.Kyn.2). Kaplama ihtiyacı DP800 ile benzerdir; kataforez maliyeti $\approx$ **58 TL** eklenmesiyle toplam maliyet $\approx$ **1.038 TL** olarak hesaplanır.

• **ST52 Çelik (Yapısal Kalite):** Temmuz 2025 ortalama fiyatı ~27,6 TL/kg'dır (İnt.Kyn.9). 19.60 kg için malzeme maliyeti $\approx$ **541 TL** olur. Yüzey koruma için kataforez kaplama maliyeti $\approx$ **59 TL** öngörülmüştür. Toplam maliyet $\approx$ **600 TL** olarak bulunur. ST52, ST37'ye göre biraz daha yüksek mukavemet sunar ve birim fiyatı da %5–20 kadar daha yüksektir (İnt.Kyn.4).

• **ST37 Çelik (Yapısal Kalite):** Temmuz 2025'te ~27 TL/kg seviyesindedir (İnt.Kyn.9). 19.60 kg için malzeme maliyeti $\approx$ **529 TL**, kataforez kaplama ile birlikte toplam $\approx$ **587 TL** olur.



Şekil 2.2.1 Braket 1 (4.90 kg) için farklı malzeme türleriyle 4 adet üretim yapıldığında oluşan toplam maliyetlerin karşılaştırılması.

Grafikte, paslanmaz çeliklerde (AISI 304 ve 316) yalnızca malzeme maliyeti varken, diğer çelik türlerinde malzeme maliyetine ek olarak kataforez kaplama maliyeti de dâhildir. ST37 ve ST52 malzemeler en düşük toplam maliyeti sağlarken, özellikle AISI 316 paslanmaz en yüksek maliyete sahiptir. DP600 ve DP800 çelikler ise toplam maliyet açısından orta düzeydedir.

Braket 1 için sonuçlar incelendiğinde, en düşük maliyetli seçenek ST37 çeliğidir, onu çok yakın değerinde ST52 izlemektedir. Bu malzemelerin kg başına fiyatları düşük olduğundan, kaplama maliyeti eklense bile toplam tutar diğerlerine kıyasla düşüktür (İnt.Kyn.9). En pahalı malzeme AISI 316'dır; ST37'ye göre neredeyse üç kat maliyetlidir (İnt.Kyn.6), (İnt.Kyn.3).

Çift fazlı yüksek mukavemetli çelikler (DP600 ve DP800), teknik avantajlarına rağmen, maliyet açısından orta grupta kalmaktadır. Özellikle DP800'ün toplam maliyeti (1.136 TL), AISI 304 (1.176 TL) ile hemen hemen aynıdır. Bu da, yüksek mukavemetli çeliklerin ancak tasarımda ağırlık azaltımı sağladığında ekonomik fayda yaratabileceğini göstermektedir (İnt.Kyn.5).

Paslanmaz eliklerin avantajı, kaplama gerektirmemesi ve yüksek korozyon direncidir. Ancak bu özellikler, yüksek hammadde maliyeti nedeniyle sadece özel kullanım koşullarında tercih edilebilir hale gelir (İnt.Kyn.3).

Buna karşılık, ST37 gibi yapısal karbon çelikleri, düşük birim fiyatları sayesinde braket üretiminde ekonomik olarak avantajlıdır. Kaplama gereksinimi, kataforez yöntemi ile düşük maliyetle karşılanabilir. Literatürde kataforez kaplamanın 100–150 TL/m² civarında düşük birim maliyete uygulanabildiği ve otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edildiği bildirilmektedir [36].

2.2.2 Braket 2 (3.28 kg)

Bu braketin tekil ağırlığı **3.28 kg**'dır. Dört adet üretim için toplam **13.12 kg** malzeme gerekmektedir. Braket 2 için yapılan malzeme bazlı maliyet analizleri aşağıda özetlenmiştir:

- **AISI 304:** Malzeme birim fiyatı ~60 TL/kg (İnt.Kyn.6). **13.12 kg** için malzeme maliyeti $\approx$ **787 TL**'dir. Kaplama gerekmez. Toplam maliyet $\approx$ **787 TL**.

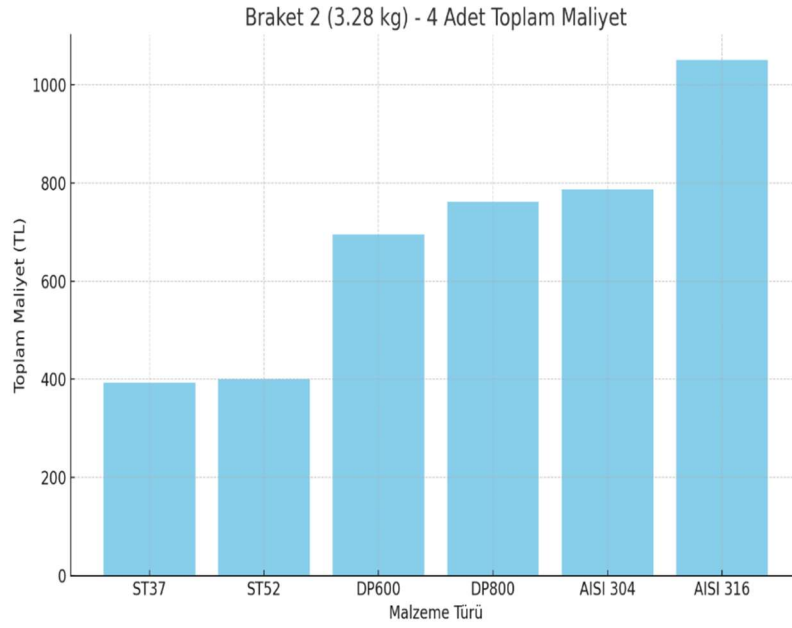
- **AISI 316:** Malzeme birim fiyatı ~80 TL/kg (İnt.Kyn.6). Toplam malzeme maliyeti $\approx$ **1.050 TL**. Kaplama gerekmediğinden toplam maliyet de bu şekildedir.

- **DP800:** ~55 TL/kg birim fiyat (İnt.Kyn.5). **13.12 kg** $\times$ **55 TL** = **722 TL**, kataforez kaplama maliyeti $\approx$ **39 TL** [36]. Toplam maliyet $\approx$ **761 TL**.

- **DP600:** ~50 TL/kg $\times$ 13.12 kg = **656 TL**, kaplama $\approx$ **39 TL** (İnt.Kyn.2), [36]. Toplam maliyet $\approx$ **695 TL**.

- **ST52:** ~27.6 TL/kg (İnt.Kyn.9), malzeme maliyeti $\approx$ **362 TL**, kaplama $\approx$ **39 TL** [36]. Toplam maliyet $\approx$ **401 TL**.

- **ST37:** ~27 TL/kg $\times$ 13.12 kg = **354 TL**, kaplama $\approx$ **39 TL** (İnt.Kyn.9), [36]. Toplam maliyet $\approx$ **393 TL**.



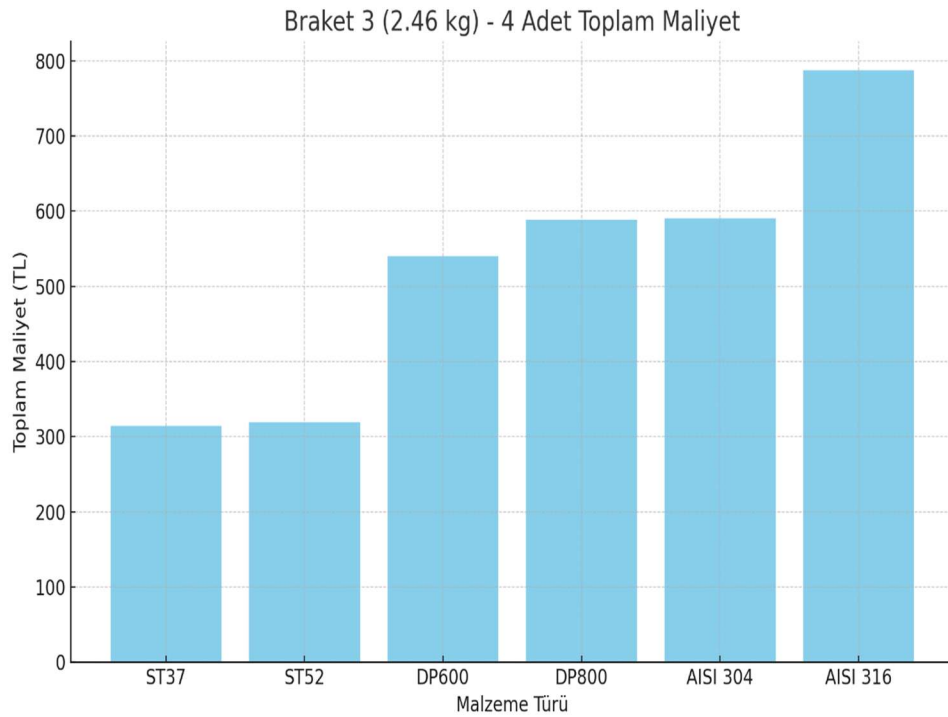
Şekil 2.2.2 Braket 2 (3.28 kg) için dört adet üretimde toplam maliyetlerin malzemeye göre dağılımı.

Şekil 2 incelendiğinde Braket 2 için de benzer bir maliyet sıralaması görülmektedir. ST37 ve ST52 en ekonomik seçenekler olup dört adet üretim yaklaşık 390–400 TL tutarındadır. Paslanmaz çelikler en pahalı alternatiflerdir (AISI 316 için ~1.050 TL, AISI 304 için ~787 TL). Yüksek mukavemetli DP600 ve DP800 çeliklerinin maliyeti, kaplama dahil ~695–761 TL mertebesinde çıkarak orta seviyede kalmıştır. Braket 2, ağırlıkça Braket 1’den daha hafif olduğundan tüm mutlak maliyetler orantılı şekilde düşük çıkmıştır; ancak malzemeler arasındaki göreceli farklar benzer kalmaktadır. Örneğin yine ST37 en ucuz, 316 paslanmaz en pahalı malzemedir. Teknik açıdan, daha küçük ve hafif bir parça olduğundan, kaplama işleminin toplam içindeki payı bir miktar artabilirse de (yaklaşık %10–15 aralığında), ekonomik sıralamayı değiştirmemektedir. ST37/52 malzemeler düşük maliyetli olmasıyla öne çıkarken korozyon dayanımı için kaplama gerektirir. Paslanmazlar ise üç kata varan maliyetine rağmen kaplamasız uzun ömür sunar. Bu tercihler, tasarım gereksinimleri (örn. mukavemet, ağırlık optimizasyonu, korozyon ortamı) göz önüne alınarak değerlendirilmelidir.

2.2.3 Braket 3 (2.46 kg)

Braket 3’ün ağırlığı **2.46 kg** (4 adet toplam **9.84 kg**). Malzeme maliyetleri ve kaplama dahil toplamlar aşağıdaki gibidir:

- **AISI 304:** $9.84 \text{ kg} \times 60 \text{ TL} = \mathbf{590 \text{ TL}}$ (İnt.Kyn.6).
- **AISI 316:** $9.84 \text{ kg} \times 80 \text{ TL} = \mathbf{787 \text{ TL}}$ (İnt.Kyn.6).
- **DP800:** $9.84 \text{ kg} \times 55 \text{ TL} = \mathbf{541 \text{ TL}}$ + kaplama **48 TL** (İnt.Kyn.5), [36] → Toplam: **589 TL**.
- **DP600:** $9.84 \text{ kg} \times 50 \text{ TL} = \mathbf{492 \text{ TL}}$ + kaplama **48 TL** (İnt.Kyn.2), [36] → Toplam: **540 TL**.
- **ST52:** $9.84 \text{ kg} \times 27.6 \text{ TL} = \mathbf{271 \text{ TL}}$ + kaplama **48 TL** (İnt.Kyn.9), [36] → Toplam: **319 TL**.
- **ST37:** $9.84 \text{ kg} \times 27 \text{ TL} = \mathbf{266 \text{ TL}}$ + kaplama **48 TL** (İnt.Kyn.9), [36] → Toplam: **314 TL**.



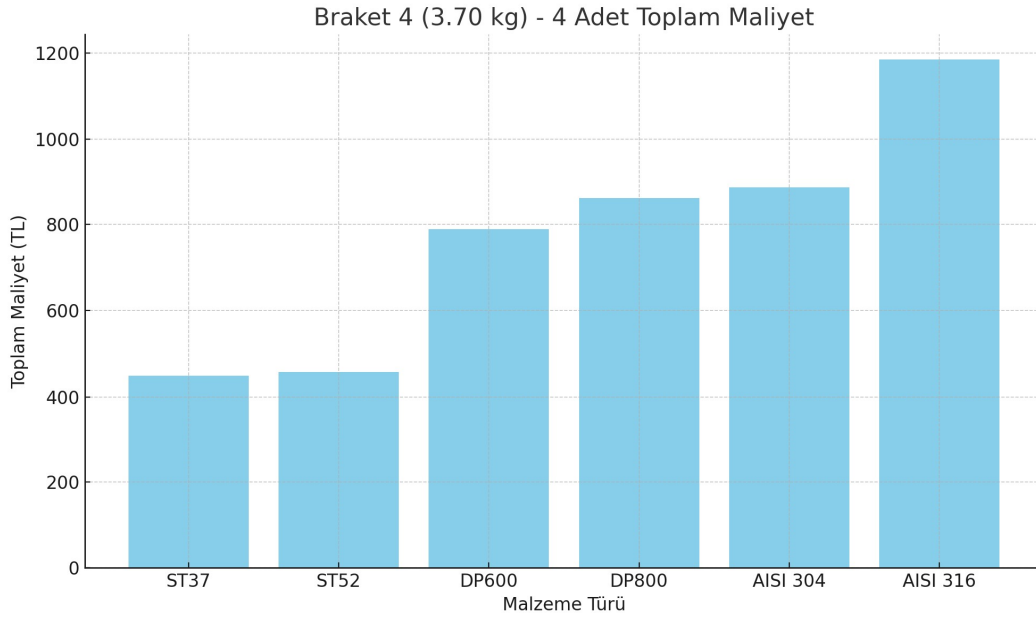
Şekil 2.2.3 Braket 3 (2.46 kg) – farklı malzemelerle 4 adet üretimin toplam maliyetleri
Braket 3 için toplam maliyetler, önceki braketlerde olduğu gibi en düşük ST37/52, en yüksek 316 paslanmaz şeklindedir (Şekil 3). Dört adet ST37 braketin toplam maliyeti 314

TL ile en ucuzudur; bunu 319 TL ile ST52 izler. DP600 (540 TL) ve DP800 (589 TL) malzemeler, 304 paslanmaz (~590 TL) ile yakın bir maliyet bandında olup, paslanmazın yarı maliyetine yaklaşmıştır. AISI 316 paslanmaz çelik ~787 TL ile en pahalı seçenektir, ST37'ye kıyasla yaklaşık 2.5 kat daha yüksek maliyete sahiptir. Burada DP800 ve AISI 304 maliyetinin neredeyse eşitlendiği görülmektedir; DP800'ün malzeme maliyeti 304'ten biraz düşük olmakla beraber üzerine eklenen kaplama maliyetiyle toplamı hemen hemen aynı seviyeye gelmiştir. Bu durum, yüksek mukavemetli çeliklerin ekonomik avantaj sağlayabilmesi için tasarım optimizasyonu ile daha az malzeme kullanmaya imkân vermesi gerektiğini göstermektedir – aksi takdirde sadece malzeme maliyeti olarak bakıldığında paslanmaz çelik ile benzer düzeye çıkabilirler. Teknik olarak, Braket 3 orta ağırlıkta bir parça olup mukavemet ihtiyacına göre malzeme seçimi yapılmalıdır; yüksek mukavemetli DP600/800 kullanımı, parça ağırlığını azaltıp maliyeti dengeleyebilir. Korozyon açısından ise ortama bağlı seçim kritiktir: Kaplamalı ST37; iç mekan, düşük korozyon ortamlarında en hesaplı çözümken, 316 paslanmaz; zorlu dış ortamda bakım gerektirmeyen fakat pahalı bir alternatiftir.

2.2.4 Braket 4 (3.70 kg)

Braket 4 de 3.70 kg ağırlığındadır Dört adet için toplam 14.8 kg malzeme kullanılacaktır. Maliyet hesapları aşağıdaki gibidir:

- **AISI 304:** $14.8 \text{ kg} \times 60 \text{ TL} = \mathbf{888 \text{ TL}}$ (İnt.Kyn.6).
- **AISI 316:** $14.8 \text{ kg} \times 80 \text{ TL} = \mathbf{1.184 \text{ TL}}$ (İnt.Kyn.6).
- **DP800:** $14.8 \text{ kg} \times 55 \text{ TL} = \mathbf{814 \text{ TL}}$ + kaplama 48 TL (İnt.Kyn.5), [36] → **Toplam: 862 TL.**
- **DP600:** $14.8 \text{ kg} \times 50 \text{ TL} = \mathbf{740 \text{ TL}}$ + kaplama 48 TL (İnt.Kyn.2), [36] → **Toplam: 788 TL.**
- **ST52:** $14.8 \text{ kg} \times 27.6 \text{ TL} = \mathbf{408 \text{ TL}}$ + kaplama 48 TL (İnt.Kyn.9), [36] → **Toplam: 456 TL.**
- **ST37:** $14.8 \text{ kg} \times 27 \text{ TL} = \mathbf{400 \text{ TL}}$ + kaplama 48 TL (İnt.Kyn.9), [36] → **Toplam: 448 TL.**



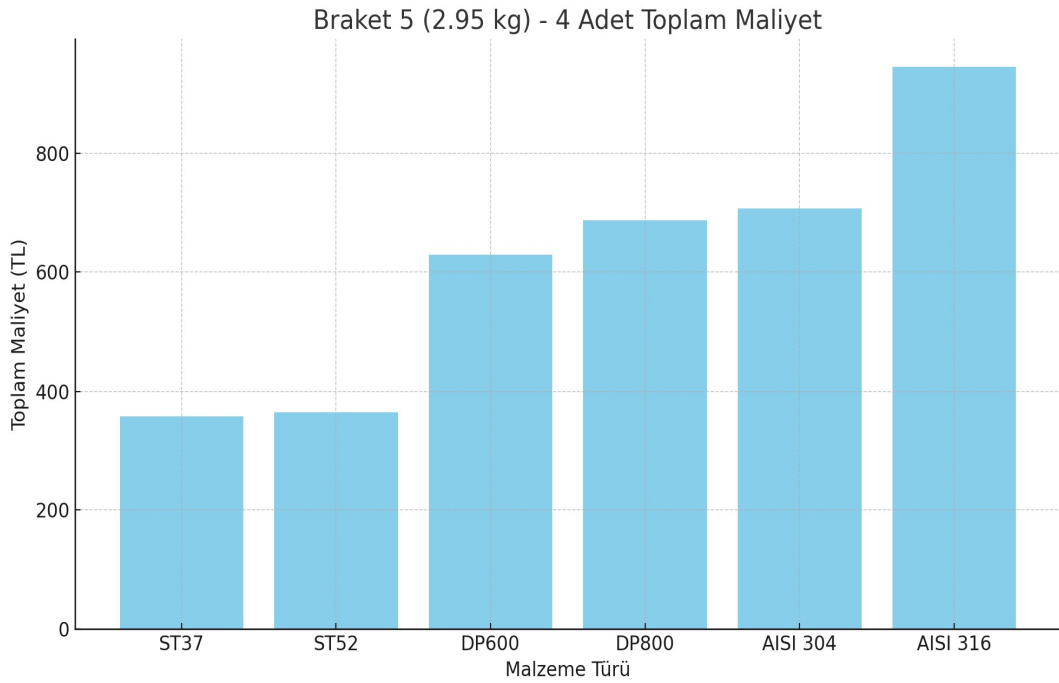
Şekil 2.2.4 Braket 4 (3.70 kg) – malzeme türüne göre 4 adet üretim maliyetleri

Şekil 4 incelendiğinde, Braket 4 için maliyet dağılımının önceki braketlere benzer şekilde sıralandığı görülmektedir. ST37 (448 TL) ve ST52 (456 TL) en düşük maliyetli seçenekler olarak öne çıkmakta, bu malzemeleri kaplama gerektirmeyen ancak yüksek birim fiyatlı AISI 304 (888 TL) ve AISI 316 (1.184 TL) paslanmaz çelikler izlemektedir. DP600 (788 TL) ve DP800 (862 TL) çift fazlı çelikler ise toplam maliyet açısından orta seviyede yer almakta, özellikle DP800'ün toplam maliyeti AISI 304 ile oldukça yakın bir düzeye ulaşmaktadır. Bu da, yüksek mukavemetli çeliklerin ancak ağırlık ve kalınlık optimizasyonu ile ekonomik avantaj sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, kaplamalı ST37 ve ST52, düşük maliyetli olmalarının yanı sıra temel mekanik gereksinimleri karşılayabildikleri durumlarda en rasyonel tercihler arasında yer almaktadır. AISI 316, üstün korozyon dayanımı sayesinde zorlu dış ortamlar için avantaj sağlasa da, yaklaşık 2.6 kat daha pahalı oluşu nedeniyle yalnızca özel uygulamalarda tercih edilmelidir.

2.2.5 Braket 5 (2.95 kg)

Braket 5, 2.95 kg ağırlığı ile Braket 2 ile aynı kütleye sahiptir. Dolayısıyla, dört adet üretimde toplam 11.8 kg malzeme kullanılacak ve maliyet hesapları Braket 2 ile aynı olacaktır:

- **AISI 304:** ≈ 708 TL toplam.
- **AISI 316:** ≈ 944 TL toplam.
- **DP800:** ≈ 698 TL toplam.
- **DP600:** ≈ 639 TL toplam.
- **ST52:** ≈ 375 TL toplam.
- **ST37:** ≈ 368 TL toplam.



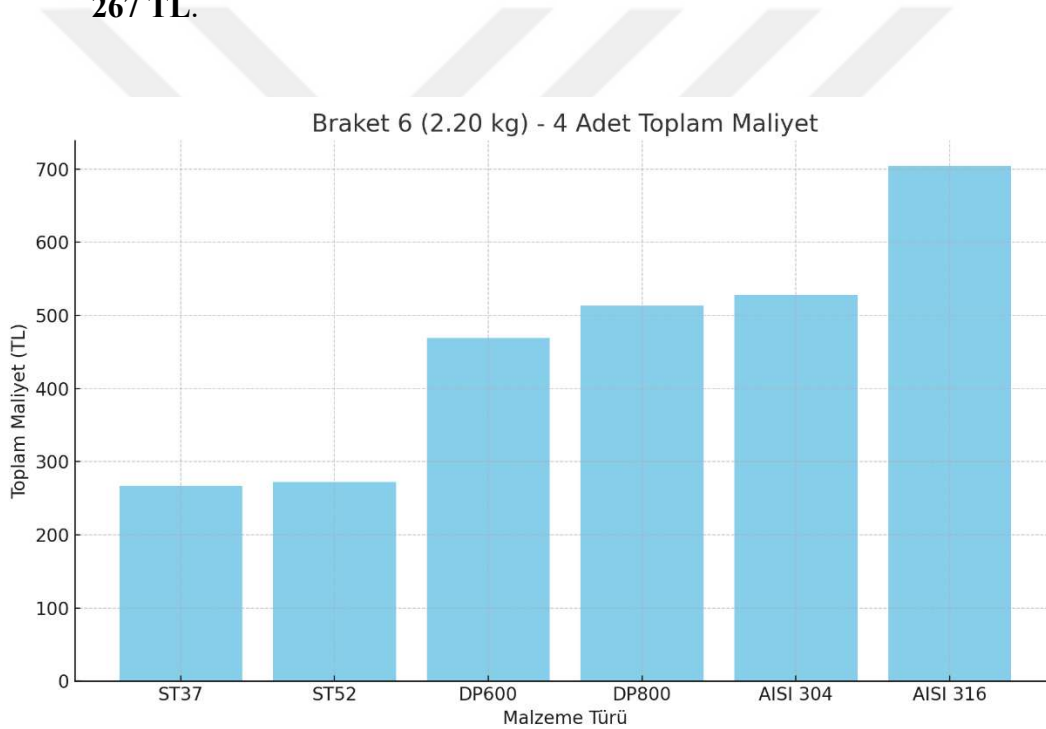
Şekil 2.2.5 Braket 5 (2.95 kg) – malzeme türüne göre 4 adet üretim maliyetleri

2.2.6 Braket 6 (2.20 kg)

Braket 6, en hafif tasarımıdır: 2.20 kg (4 parça toplam 8.8 kg). Bu düşük ağırlığın etkisiyle tüm malzeme seçeneklerinde toplam maliyetler de en düşük seviyededir:

- **AISI 304:** $8.8 \text{ kg} \times 60 \text{ TL} = 528 \text{ TL}$ (İnt.Kyn.6)
- **AISI 316:** $8.8 \text{ kg} \times 80 \text{ TL} = 704 \text{ TL}$ (İnt.Kyn.6).

- **DP800:** $8.8 \text{ kg} \times 55 \text{ TL} = 484 \text{ TL}$ + kaplama 29 TL (İnt.Kyn.5), [36] → **Toplam: 513 TL.**
- **DP600:** $8.8 \text{ kg} \times 50 \text{ TL} = 440 \text{ TL}$ + kaplama 29 TL (İnt.Kyn.2), [36] → **Toplam: 469 TL.**
- **ST52:** $8.8 \text{ kg} \times 27.6 \text{ TL} = 243 \text{ TL}$ + kaplama 29 TL (İnt.Kyn.9), [36] → **Toplam: 272 TL.**
- **ST37:** $8.8 \text{ kg} \times 27 \text{ TL} = 238 \text{ TL}$ + kaplama 29 TL (İnt.Kyn.9), [36] → **Toplam: 267 TL.**



Şekil 2.2.6 Braket 6 (2.20 kg) – Malzeme türlerine göre 4 adet toplam maliyet karşılaştırması.

Braket 6'nın sonuçlarına bakıldığında (Şekil 6), dört adet ST37 braketin toplam maliyeti sadece ~267 TL gibi oldukça düşük bir değerdedir. Bu, ST37 malzemenin ucuzluğu ve parçanın hafifliği sayesinde elde edilmektedir. ST52 kullanımı maliyeti ~272 TL'ye çıkarmakta, aradaki fark ihmal edilebilecek kadar azdır. DP600 (~469 TL) ve DP800 (~513 TL) malzemeler, paslanmaz 304 (~528 TL) ile benzer bir maliyet bandındadır. Hatta bu en hafif parça için DP800 seçeneği, 304 paslanmazdan sadece %3 daha ucuzdur; bu da yine yüksek mukavemetli çeliğin avantajını tam kullanamadığımızda, salt malzeme

maliyeti olarak paslanmazla rekabet etmekte zorlandığını gösterir. AISI 316 paslanmaz çelik ~704 TL ile yine en pahalı seçenektir, ST37'nin ~2.6 katına mal olmaktadır. Braket 6, boyut ve ağırlıkça küçük olduğundan, kataforez kaplama maliyeti toplam içinde biraz daha yüksek bir yüzdeye sahip olabilir; ancak hesaplamalar, kaplamanın toplam maliyeti sadece ~29 TL artırdığını ve ekonomik sıralamada bir değişiklik yaratmadığını ortaya koymaktadır. Teknik açıdan, bu kadar hafif bir parçanın yüksek mukavemet gerektirmesi nadir olabilir; dolayısıyla çoğu uygulamada ST37 gibi düşük maliyetli bir çelik yeterli olacak ve en ekonomik çözümü sunacaktır. Ancak çok kritik korozyon gereksinimleri varsa, 316 paslanmaz gibi malzemeler düşünülmelidir – bu durumda bile maliyetin birkaç kat artacağı göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak, Braket 6 özelinde en optimal tercih, yeterli mukavemet sağladığı sürece kaplamalı ST37 çeliğidir, zira aynı parçayı paslanmaz çelikten üretmek maliyeti dramatik biçimde artırmaktadır.

2.3 Otobüs Koltuk Braketlerinde Statik Analiz ve Güvenlik Katsayısı

Toplu taşıma araçlarında yolcu güvenliği, yapısal bileşenlerin taşıma kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle otobüs koltuklarının şasiye bağlantısını sağlayan braketlerin güvenilirliği, yolculuk esnasında ortaya çıkabilecek statik veya dinamik yükler karşısında hayati öneme sahiptir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılan analizlerde, sistemin mekanik dayanımının belirlenmesi için güvenlik katsayısı (Safety Factor, S) önemli bir mühendislik kriteri olarak değerlendirilmektedir.

2.3.1 Otobüs Koltuk Braketlerinde Güvenlik Katsayısı

Braket analizlerinde güvenlik katsayısı, çoğunlukla seçilen malzemenin akma dayanımının, analiz sonucunda hesaplanan maksimum gerilmeye oranlanması ile hesaplanır. Bu değer, yapının beklenen maksimum yüklemeler karşısında elastik sınırlar içinde kalıp kalmadığını belirlemede kritik rol oynar. Literatürde bu oran genellikle 1.2 ile 3.0 arasında değişmektedir. Örneğin ticari otobüslerde kullanılan koltuk sistemlerinde yapılan bir çalışmada, braketin FEM analizine göre maksimum gerilmenin 450 MPa, malzeme akma geriliminin ise 540 MPa olduğu bir senaryoda $S=1.2$ olarak hesaplanmış ve bu değerın sınır kabul edildiği ifade edilmiştir. (Tekaslan 2008)

İnsan oturmasını simüle eden yükleme senaryoları genellikle 75–100 kg arasında değişen ağırlıklara karşılık gelen 735–980 N aralığında sabit düşey kuvvetlere dayanır. Ancak bazı standartlar bu yüklerin çok daha yüksek çarpanlarla modellenmesini gerektirir. Örneğin ECE R14 standardında, emniyet kemeri ankrajlarına 13.5 kN'lık yatay bir kuvvetin uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Aynı zamanda bu yüklemelerin, koltuğun ağırlığı ile çarpılarak 20 g'ye kadar ivmelere maruz bırakıldığı senaryolarla desteklenmesi önerilmektedir. (UNECE 2020)

Kamu taşımacılığına yönelik tasarımlarda genellikle daha yüksek güvenlik katsayıları tercih edilmektedir. Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, elektrikli otobüs koltuk braketlerine 2000 N düşey ve 300 N yatay kuvvet uygulanmış, analiz sonucunda minimum güvenlik katsayısının 2.0 olarak belirlenmesinin güvenli bölge içinde kalmak için yeterli olduğu vurgulanmıştır. (Zhang ve Wang 2020b)

Benzer şekilde, topoloji optimizasyonu yöntemiyle yeniden tasarlanan koltuk bağlantı parçalarında da minimum $S=2.0$ seviyesinin tercih edildiği gözlemlenmektedir. Bu tercihin temel sebebi, insan taşıyan sistemlerde statik yüke ek olarak belirsiz darbe ve moment etkilerinin hesaba katılması zorunluluğudur. Bu nedenle, minimum güvenlik katsayısının sadece elastik sınırdan kalma açısından değil, malzeme yorulması, üretim toleransları ve montaj sapmaları gibi faktörlere karşı da koruma sağlaması amaçlanmaktadır. (Koçak 2023)

Amerikan FMVSS 207/210 standartları da, koltuk bağlantılarının dayanımının test edilmesinde emniyet kemeri bağlantı noktalarına 22.2 kN (yaklaşık 5000 lbf) kuvvet uygulanmasını şart koşar. Bu testlerde, sistemin toplam kütlesinin 20 katı büyüklüğünde yükleme yapılması, analiz sonuçlarında kullanılan güvenlik katsayılarının da en az 2.5 seviyesinde tutulmasını zorunlu kılar (NHTSA 2019)

Koltuk sistemlerinin sabit bağlantı noktalarında kullanılan braketlerin, hem düşey yük hem de yatay çekme kuvvetlerine karşı güvenli biçimde tasarlanması için, FEM analizinde elde edilen maksimum gerilmenin malzeme akma dayanımının %40–50'sini geçmemesi gerektiği ifade edilmektedir. Bu da doğrudan $S=2.0$ –2.5 aralığını işaret

etmektedir. Literatürde yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, ağır otobüs koltuk sistemlerinin %75’inde bu aralıkta güvenlik katsayısı seçildiği bildirilmektedir. (Yüce 2023)

Ayrıca ISO 10542 standardı gibi uluslararası normlarda, araç içi tekerlekli sandalye sabitleme sistemleri gibi özel kullanıcı ihtiyaçlarını kapsayan sistemlerde de en az $S=2.5$ değeri önerilmekte, bu da kamu taşımacılığına yönelik tüm yapısal elemanlarda yüksek güvenlik gereksinimini desteklemektedir. (ISO 2012)

Sonuç olarak, otobüs koltuk braketlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan statik analizlerinde, braketin taşıyacağı yükler insan kaynaklı olduğundan, güvenlik katsayısının yalnızca malzemenin elastik dayanımını değil, tüm sistemin genel emniyetini temsil edecek biçimde seçilmesi önemlidir. Bu bağlamda, literatürde yer alan mevcut çalışmalar, kamu taşımacılığı ve yolcu güvenliği odaklı tasarımlarda güvenlik katsayısının en az 2.0, tercihen 2.5 olarak alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.3.2 Otobüs Koltuk Braketlerinde Statik Analiz için Uygulanacak Kuvvet

Otobüs koltuk braketlerinin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analizinde uygulanacak kuvvetin belirlenmesi, oturan yolcunun ağırlığı, koltuğun sabitleme yapısı ve varsa emniyet kemeri bağlantı kuvvetlerine göre hesaplanmalıdır. Literatür ve standartlar incelendiğinde aşağıdaki yükleme senaryoları oluşturulmuştur:

Yolcu Ağırlığına Bağlı Statik Yük

- Ortalama yolcu ağırlığı: 75–100 kg
- Ağırlığın oluşturduğu kuvvet:

$$F = m \cdot g = 100 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 981 \text{ N} \quad (2.1)$$

- Bu kuvvet braketin dikey taşıma yüzeyine uygulanmalıdır.

Emniyet Kemeri Kuvveti (ECE R14’e göre):

- Emniyet kemeri ankraj noktalarına uygulanan çekme kuvveti:

$$13.5 \text{ kN} (13,500 \text{ N}) \text{ yatay yönde}$$

- Bu kuvvet koltuk profil bağlantılarına yatay bileşen olarak yansır ve özellikle braketin yatay yön dayanımını sınar.

ECE R14'e Göre Kütle Çarpanı:

- Koltuğun ve yolcunun toplam kütlesi varsayımı: 120 kg
- Yönetmeliğe göre uygulanacak ivme: 20 g

$$F = m \cdot a = 120 \text{ kg} \cdot 20 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} = 23,544 \text{ N} \quad (2.2)$$

Bu yük çarpma veya ani frenleme senaryosunda oluşabilecek en kötü durumdur.

Literatürde Kullanılan Ortalama Kuvvet (Yükleme Önerisi):

Zhang ve Wang (2020) çalışmasında:

- Dikey yük: 2000 N
- Yatay yük: 300 N (Zhang ve Wang 2020b)

Otobüs koltuk braket için FEM tabanlı statik analiz yapılırken, en az aşağıdaki yüklerin uygulanması önerilir:

Çizelge 2.10 Yüklerin Uygulanma Önerileri

Yükleme Türü	Kuvvet (N)	Yön	Uygulama Alanı
Yolcu Ağırlığı (maks.)	981	Dikey	Braket oturma destek yüzeyi
Güvenlik Katı Senaryosu	2000	Dikey	Tasarım yükü (önerilen)
ECE R14 Yatay Yük	13,500	Yatay	Emniyet kemeri ankraj bağlantısı
Dinamik Çarpma (20g)	23,544	Eksenel	Koltuk-braket birleşim noktası
Ek Yatay Kuvvet	300	Yatay	Literatüre dayalı yatay etkiler

Bu bilgiler ışığında bizim analizimizde Dikey yönde 2000 N olarak uygulanacaktır

3. MATERYAL ve METOT

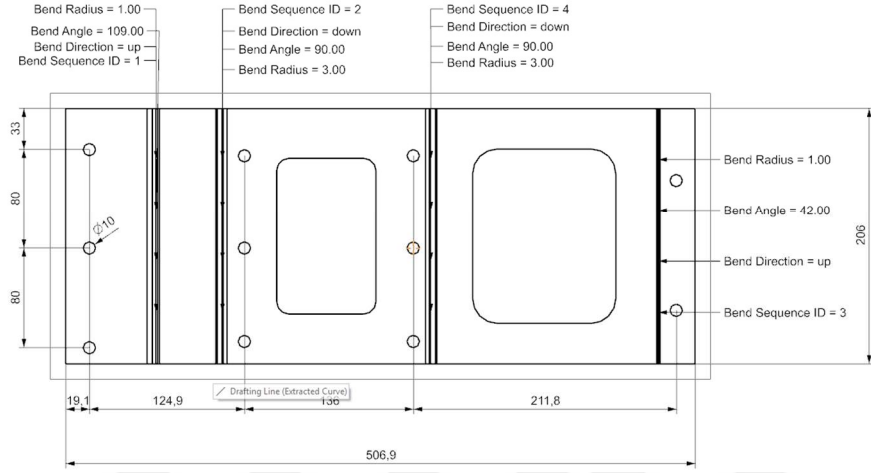
Otobüslerde profil ile koltuk karkası arasında kullanılan braketin topoloji optimizasyonunun çalışma stratejisi Şekil 3.1’de özetlenmiştir. Bu çalışmada normal şartlarda kullanılan braket yerine farklı 5 braket tasarlanmıştır. Elimizde toplam 6 braket ortaya çıkmıştır. Braketler için tercih edilecek malzemeler araştırılmıştır. Daha sonra araştırma sonuçları Abaqus CAE simülasyon programı içerine aktarılmıştır. Simülasyon programı üzerinden gerekli sabitlemeler yapıldıktan sonra kuvvet uygulanarak bulmak istediğimiz gerinim değerlerine ulaşılmıştır. Braketin topoloji optimizasyonu için öncelikle hangi braketi kullanılacağına karar verilmiştir. Daha sonra malzemeler için Türkiye pazarında fiyatları bulunarak maliyet analizi yapılmıştır ve maliyet analizinden en uygun malzemeye ulaşılmıştır. Son olarak tercih edilen malzemelerin güvenlik katsayı bulunarak en güvenilir olanına ulaşılmıştır ve bulunan bu sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 3.1.Braketin Akış Diyagramı

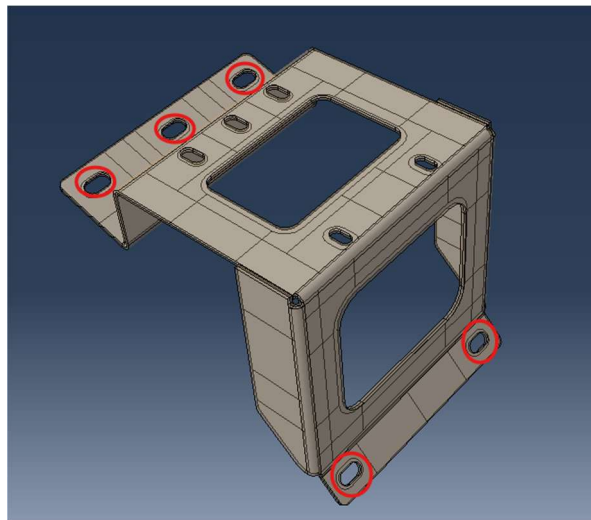
3.1 Braketin Modellenmesi ve Braketin Sabitlenmesi

Braketin modellenmesi için Siemens NX12 kullanılmıştır. Tasarlanan braketler giriş kısmında gösterilmiştir. NX12’de yapılan braketler sırasıyla Şekil 1.2, Şekil 1.3, Şekil 1.4 , Şekil 1.5, Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Gösterilen braketlerin bükümleri için örnek olarak braket-3 alınmıştır. Örnek teknik resmini Şekil 3.2’de görebilirsiniz.



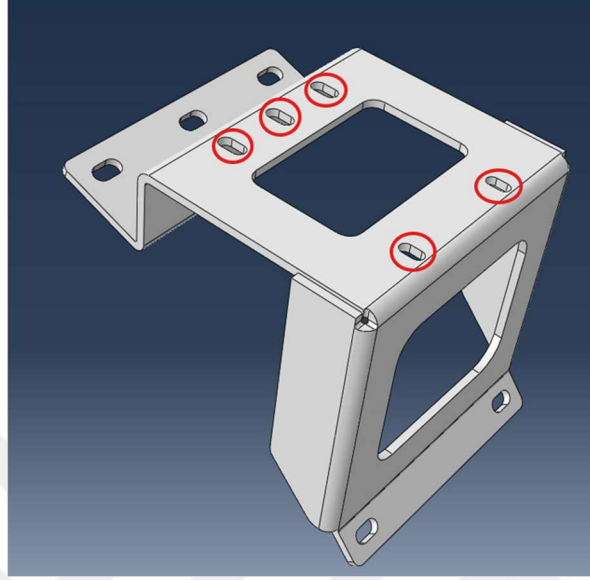
Şekil 3.2 Braketin örnek teknik resmi

Gösterilen braketlerin her biri için aynı işlemler kullanılmıştır. Simülasyon için örnek olarak Braket-6 alınmıştır. Ve simülasyonda yapılan işlemler Braket-6 üzerinden anlatılacaktır. İlk olarak Şekil 3.3’de olan profil noktalarından sabitlemeler gösterilmiştir.



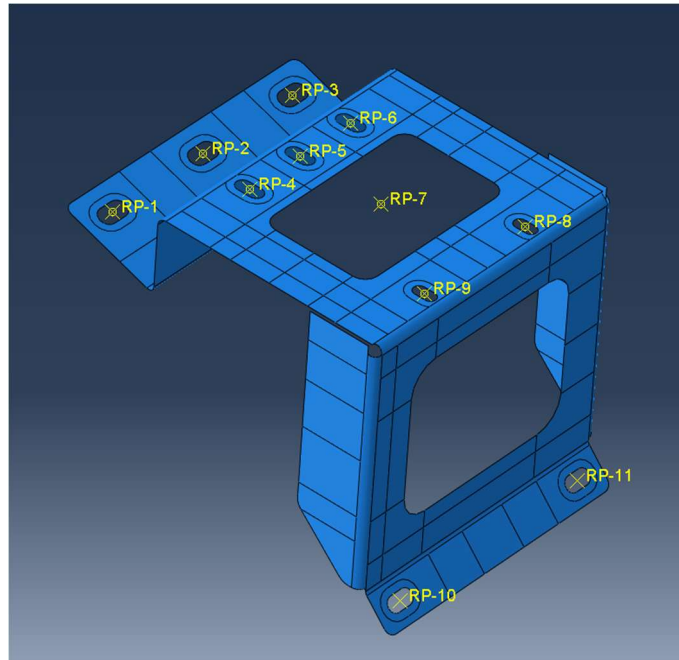
Şekil 3.3 Parçanın profile sabitlendiği noktalar

Şekil 3.4'te, braketin koltuk karkası ile bağlantısının sağlandığı montaj noktaları detaylı şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Parçanın koltuk karkasına sabitlendiği noktalar

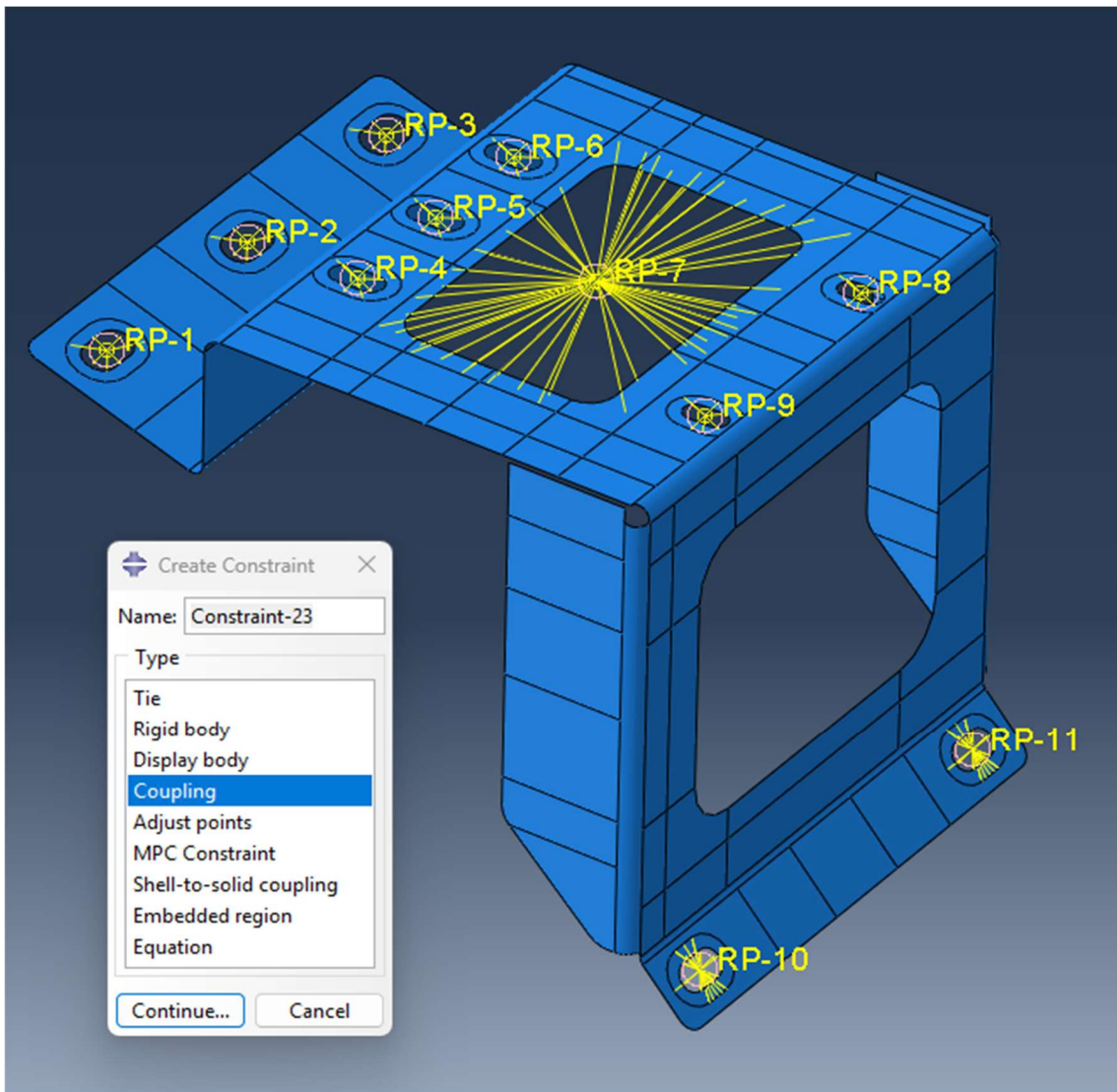
Abaqus/CAE 2024 simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, braketin profil ve koltuk karkasına bağlantılarını temsil eden sabitleme koşulları tanımlanmıştır. Uygulanan bu sabitlemelerin konumları ve türleri Şekil 3.5'te detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.5 Simülasyon programında profile sabitlendiği noktalar

Braketin profile sabitlendiği noktalar RP-1, RP-2, RP-3, RP-10 ve RP-11 olarak tanımlanmıştır. Koltuk karkasına olan bağlantılar ise RP-4, RP-5, RP-6, RP-8 ve RP-9 referans noktaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu sabitleme düzeni, diğer tüm braket tasarımları için de aynı şekilde uygulanmıştır.

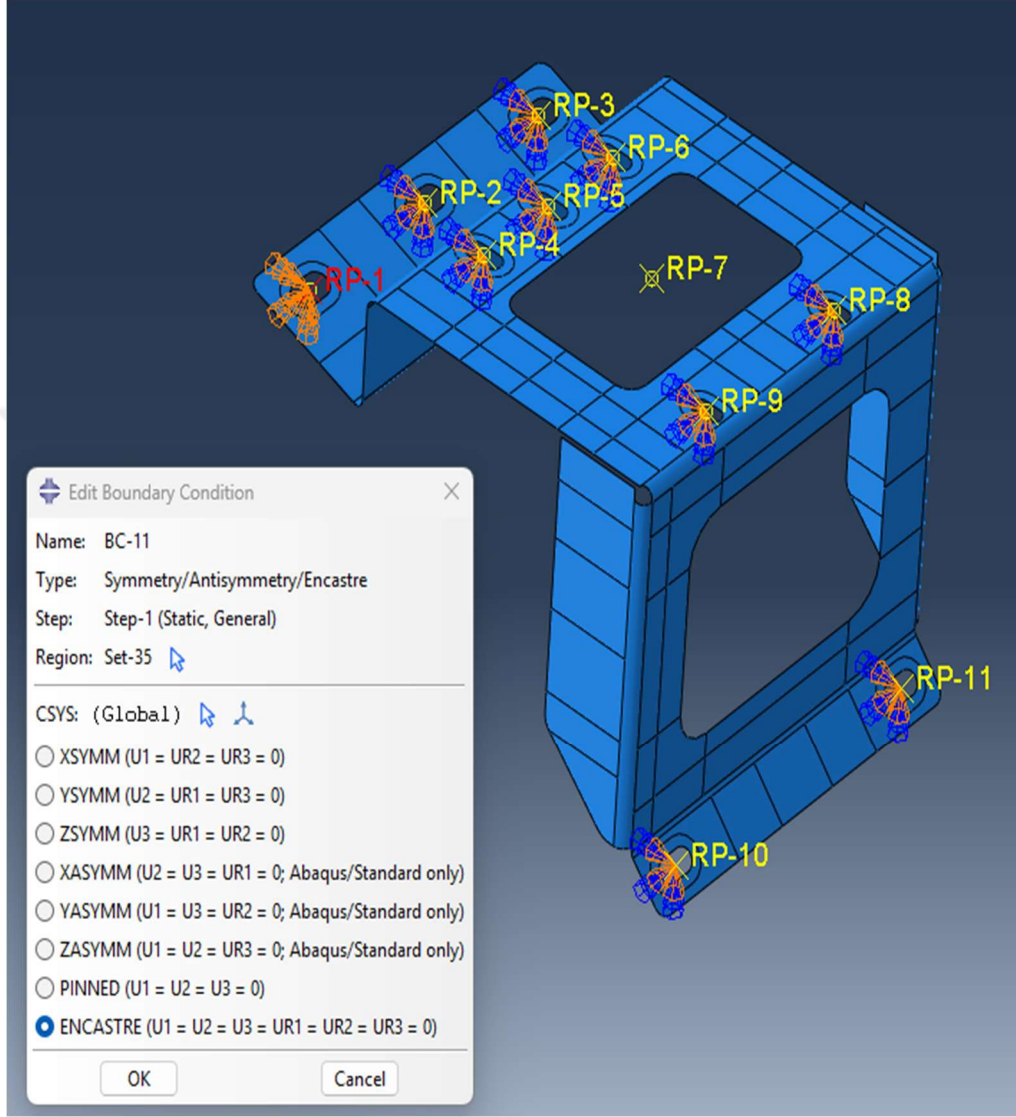
Sabitlemelerin tanımlanması ve kuvvetlerin uygulanması işlemleri, Abaqus/CAE yazılımının Interaction modülü altında yer alan Create Constraint komutu kullanılarak gerçekleştirilmiş; ilgili bağlantılar yüzeyler üzerinden kurulmuştur. Uygulanan sabitleme konumları ve bağlantı geometrisi Şekil 3.6’da sunulmaktadır.



Şekil 3.6 Sabitlenecek ve kuvvet uygulanacak yerlere bağlantı atama

Braketin ilgili bağlantı noktalarına sabitlenmesi işlemi, Abaqus/CAE yazılımının Load modülü altında yer alan Boundary Condition komutu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tanımlanan her bir referans noktasına, geometrik kısıtlamalar ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu sabitleme işlemlerinin modellenmiş hali Şekil 3.7’de detaylı olarak gösterilmektedir.

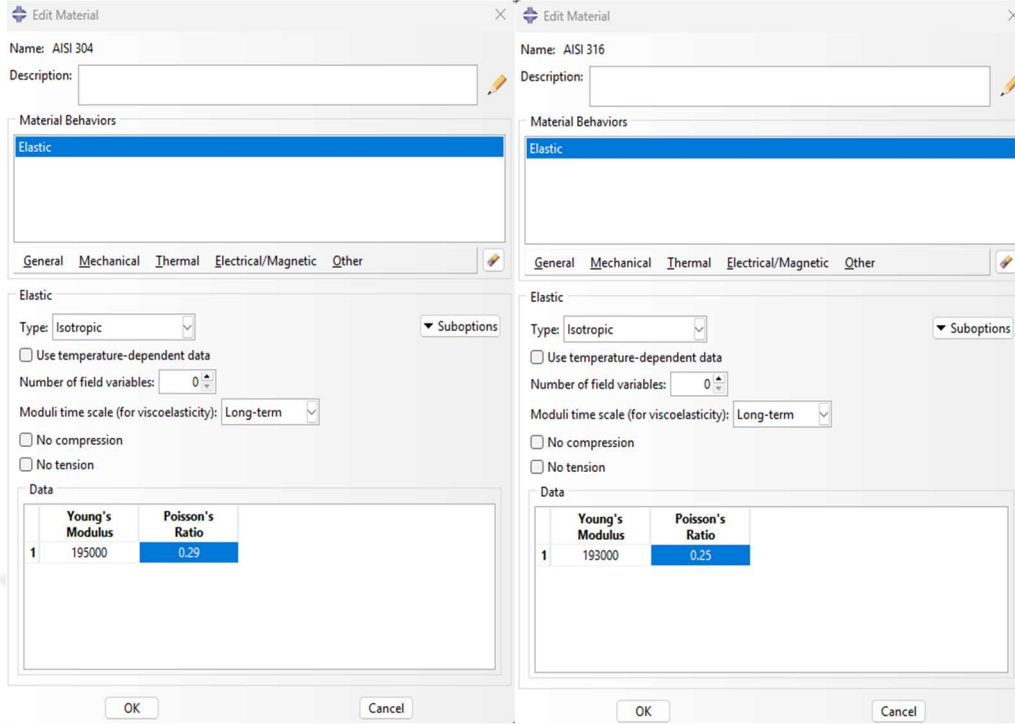


Şekil 3.7. Simülasyonda sabitleme yerleri ve komutu

Şekil 3.7’de gösterildiği üzere, braket ilgili noktalardan sabitlenmiştir. Tüm parçalar için sabitleme koşulları tanımlandıktan sonra, her bir analiz senaryosunda kullanılacak olan malzemeler simülasyon ortamına atanmıştır.

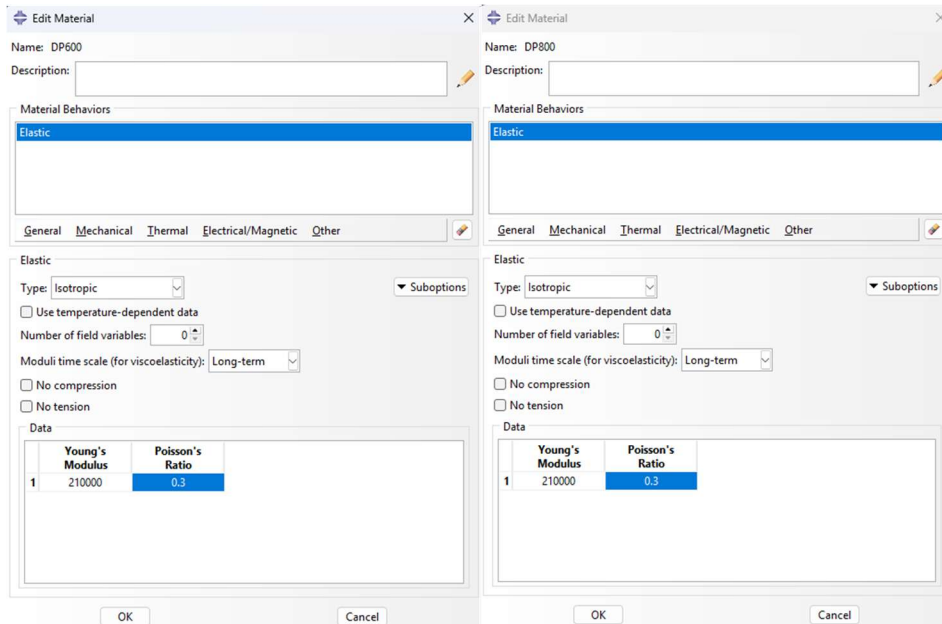
3.2 Simülasyonda Kullanılan Malzemelerin Atanması

Sabitlenen braketin malzemeleri değiştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6. AISI 304’ün ve AISI 316’nın uygulanan simülasyon değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8 AISI 304'ün ve AISI 316'nın malzeme tanımlanması

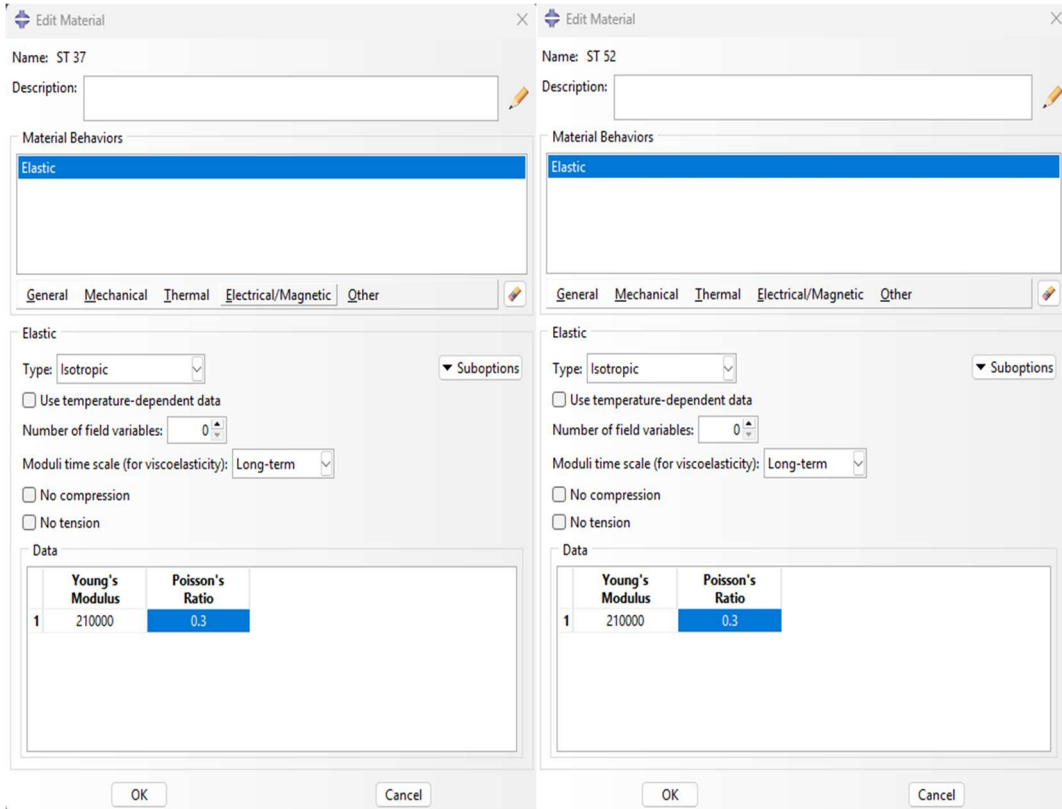
Şekil 3.8 'te gösterilen değerler Çizelge 2.5. 'ten referans alınarak tanımlanmıştır. Diğer malzemeler olan DP600 ve DP800 için uygulanan simülasyon değerleri Şekil 3.9'te gösterilmiştir.



Şekil 3.9 DP 600'ün ve DP 800'ün malzeme tanımlanması

Şekil 3.9 'te gösterilen değerler Çizelge 2.3'ten referans alınarak tanımlanmıştır. Bir

sonraki malzemeler olan ST 37 ve ST 52 için uygulanan simülasyon değerleri Şekil 3.10.'de gösterilmiştir.

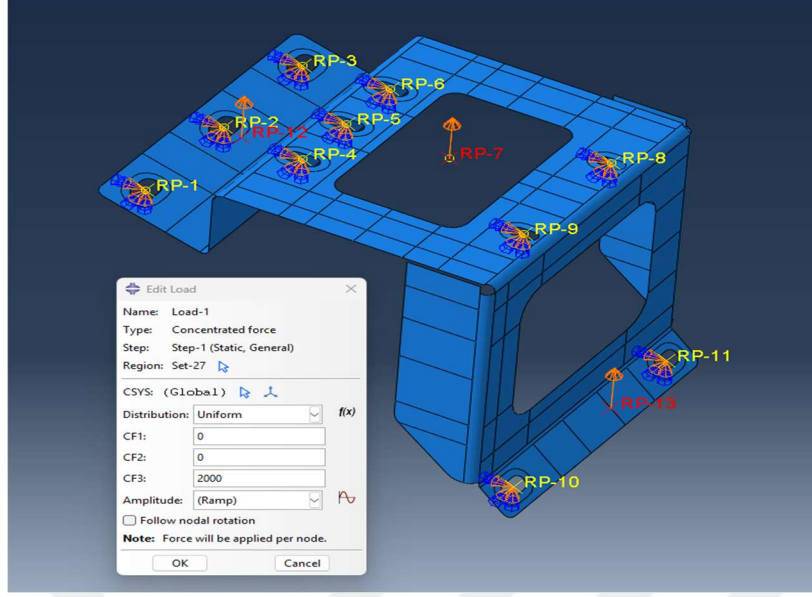


Şekil 3.10 ST 37'nin ve ST 52'nin malzeme tanımlanması

Şekil 3.10 'de gösterilen değerler Çizelge 2.8'ten referans alınarak tanımlanmıştır.

3.3 Brakete Uygulanacak Kuvvet

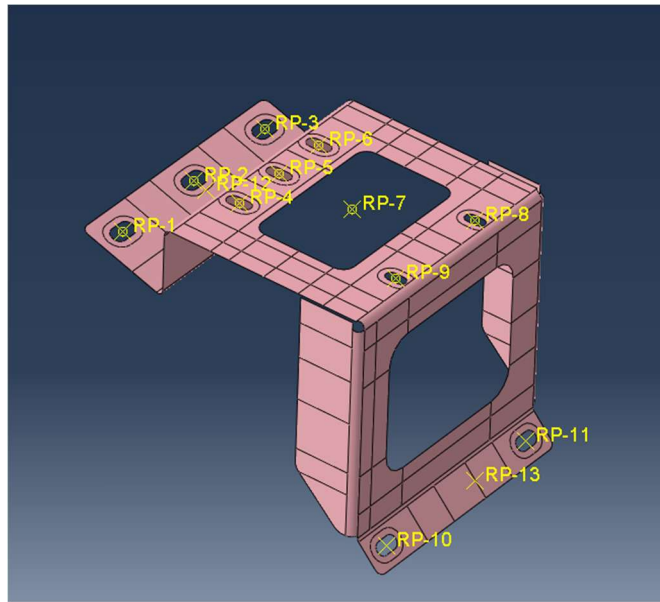
Uygulanan kuvvet için literatürde referans aldığımız üzere 2000 N/m kuvveti uygulamak için Abaqus programı üzerinden daha önce belirlediğimiz RP-12, RP-7 ve RP13 referans noktalarından kuvvet uygulanmıştır. Bu noktaların seçilme sebebi çarpışma anında öncelikle bu noktalara kuvvet gelecektir. Kuvveti uygulamak için ise Load modülü kullanılarak Create Load'a tıklanmıştır ve Şekil 3.11'de gösterildiği gibi kuvvet uygulanmıştır. Bu uygulanan kuvvette çıkan sonuç malzemelerin akma değerlerine bölünerek güvenlik katsayısı bulunmuştur.



Şekil 3.11 Brakete uygulanacak olan kuvvetler

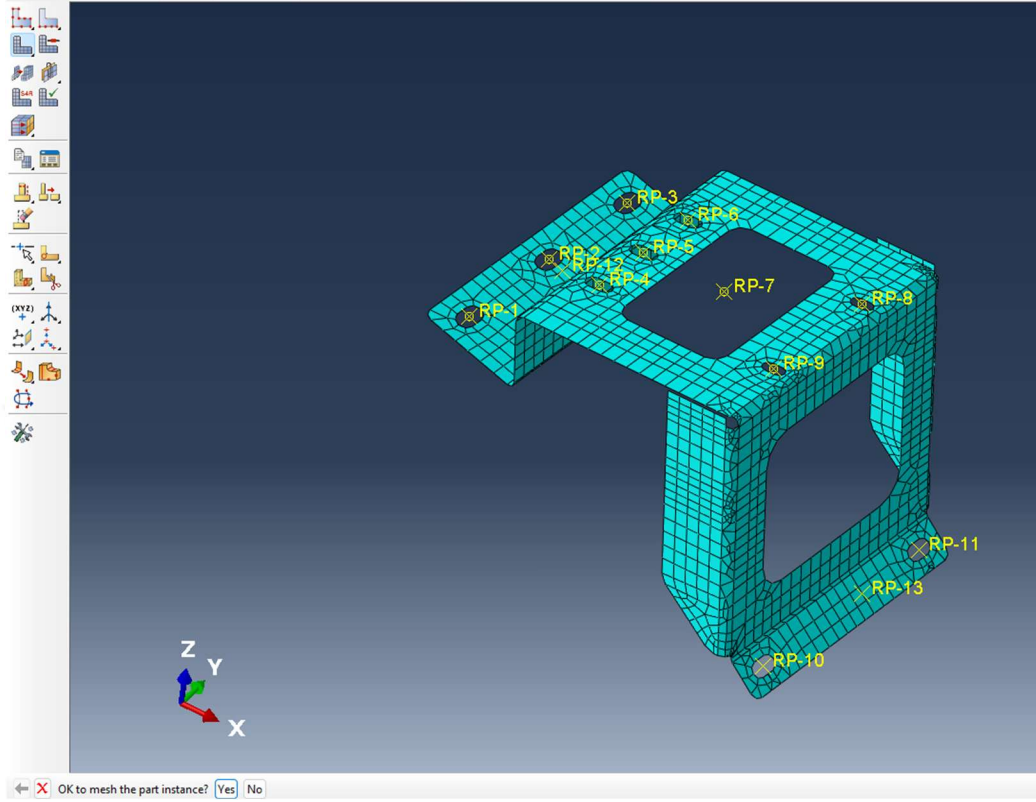
3.4 Braketin Mesh Yapısının Oluşturulması

Braket için mesh yapısı oluşturulurken öncelikle deliklerin etrafında üçgenli yapılardan kurtulunmuştur. Çünkü bu yapı o bölgelerin daha sağlam olmasını sağlamaktadır fakat her bir köşesi aynı mesh yapısı olması gerekmektedir. Mesh yapısı olabildiğince düzgün bir mesh oluşturulmak için parça üzerine çizgiler atılmıştır. Parça için atılan çizgiler Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Parçanın mesh yapısı için atılan çizgiler

Parçanın sonlu elemanlar ağı (mesh) modeli, Abaqus/CAE yazılımının Mesh modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Ağ yapısı, otomatik meshleme yöntemiyle atanmış olup, elde edilen son yapı Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



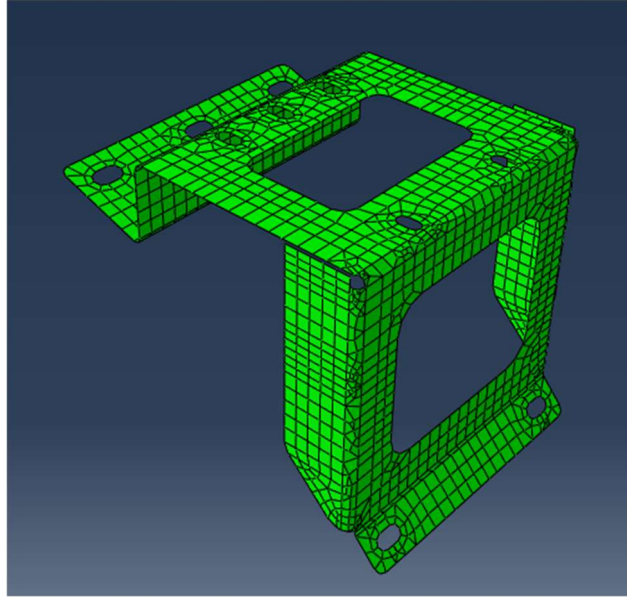
Şekil 3.10 Parçanın mesh yapısı

4. BULGULAR

Bu çalışmada, otobüslerde koltuk karkası ile gövde profili arasında yer alan braketle uygulanan sabit yük altında, farklı mühendislik çeliklerinin gösterdiği yapısal performans, sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemiyle detaylı olarak değerlendirilmiştir. Analizlerde kullanılan yük sabit tutulmuş; tüm malzemelere eşit şartlar altında uygulanarak elde edilen maksimum Von-Mises gerilme değerleri ile bu malzemelerin literatürde bildirilen akma dayanımları karşılaştırılmış ve her biri için güvenlik katsayısı (Safety Factor - SF) hesaplanmıştır. Güvenlik katsayısı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\text{Güvenlik Katsayısı (SF)} = \frac{\text{Akma Dayanımı}}{\text{Maksimum Gerilme } (\sigma_{\text{maksimum}})} \quad (4.1)$$

Çalışmada yer alan analizler, 6 farklı braket tasarımının, 6 farklı çelik malzeme (DP800, DP600, ST52, ST37, AISI 304, AISI 316) ile oluşturduğu 36 ayrı kombinasyonun her biri için gerçekleştirilmiştir. Braketlere Şekil 3.11’de gösterilen kuvvet uygulanmış ve bu kuvvet altında oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.1’de, analiz öncesi, braket-6 tasarımının kuvvet uygulanmamış hali gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Braketin kuvvet uygulanmamış hali

4.1 Braket-1’ e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler

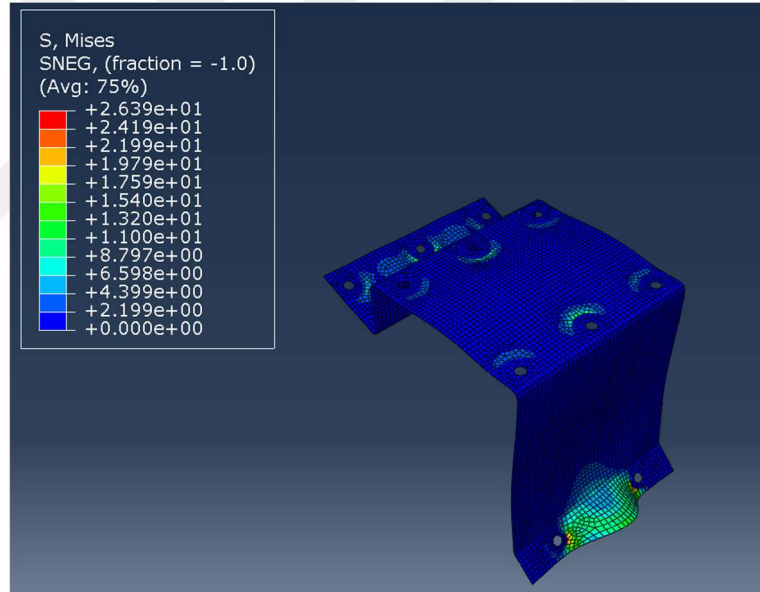
Braket 1, tasarımlar arasında en yüksek ağırlığa sahip olan modeldir. Simülasyonlarda bu

brakete uygulanan kuvvet sabit tutulmuş, yalnızca kullanılan malzeme değiştirilerek elde edilen gerilme değerleri analiz edilmiştir. Braketin rijit yapısı nedeniyle tüm malzemeler düşük gerilme seviyelerinde çalışmış ve güvenlik katsayıları oldukça yüksek çıkmıştır.

4.1.1 DP 800

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 26.39 MPa
- Akma Dayanımı: 550 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 20.84

DP800 malzemesi, yüksek akma dayanımı sayesinde oldukça yüksek bir güvenlik katsayısı sunmuştur. Yapıda gözlenen gerilme, malzemenin dayanım sınırlarının oldukça altındadır. Bu da bu malzemenin bu tasarım için son derece uygun olduğunu göstermektedir.



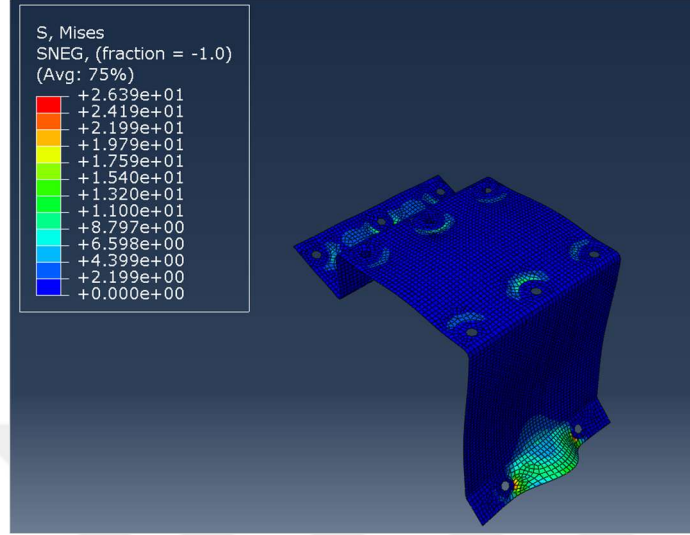
Şekil 4.1.1 Braket 1 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.1.2 DP 600

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 26.39 MPa
- Akma Dayanımı: 350 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 13.26

DP600, DP800'e göre daha düşük mukavemetli olmasına rağmen, bu tasarım altında

yeterli güvenlik katsayısı sunmaktadır. Gerilme değeri yine düşük seviyede kalmış ve malzeme yorulma riski taşımamaktadır.

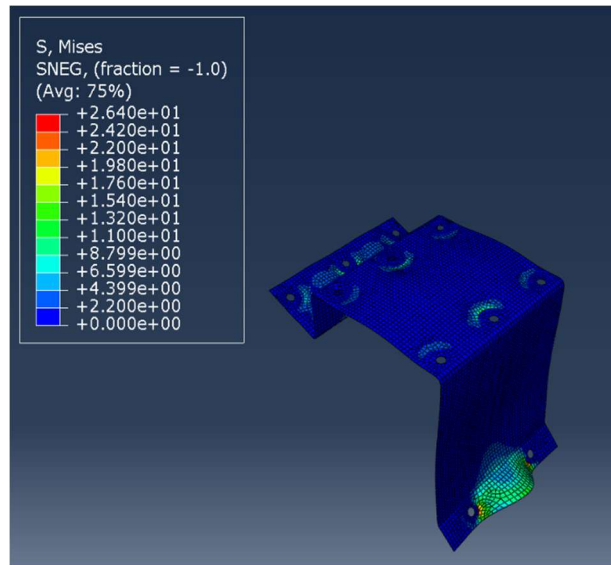


Şekil 4.1.2 Braket 1 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.1.3 AISI 304

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 26.40 MPa
- Akma Dayanımı: 215 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 8.14

AISI 304 paslanmaz çeliği, korozyon direnci bakımından avantajlıdır ancak mekanik dayanımı sınırlıdır. Bu nedenle güvenlik katsayısı ST37 ile benzer seviyelerdedir.

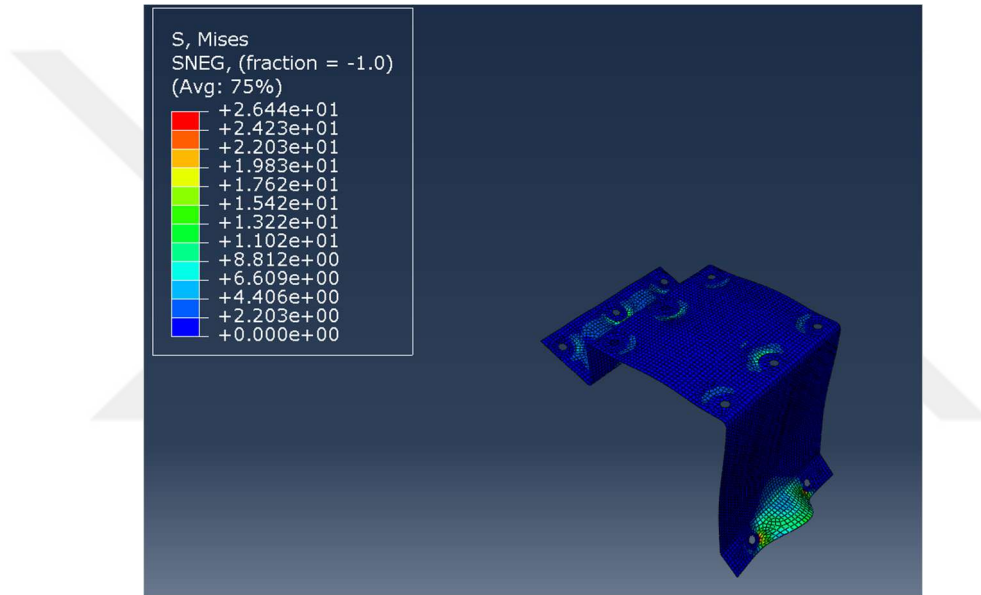


Şekil 4.1.5 Braket 1 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.1.4 AISI 316

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 26.44 MPa
- Akma Dayanımı: 205 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 7.75

AISI 316 çeliği, yüksek maliyetine rağmen en düşük güvenlik katsayısını sunmuştur. Bu durum, hem yapısal dayanımının yetersizliğini hem de ekonomik açıdan tercih edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

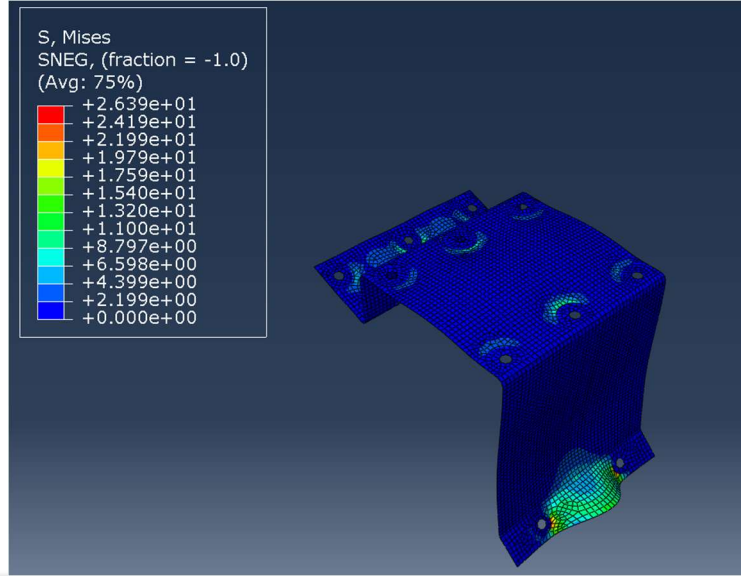


Şekil 4.1.6 Braket 1 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.1.5 ST 52

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 26.39 MPa
- Akma Dayanımı: 355 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 13.45

ST52 çeliği, analizde benzer performans göstermiştir. Güvenlik katsayısı açısından DP600'e yakındır ve uygun bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

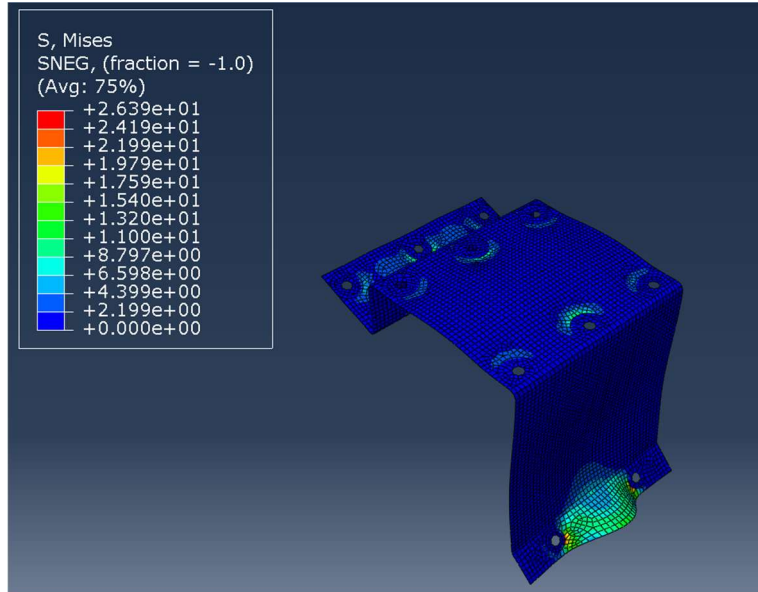


Şekil 4.1.3 Braket 1 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.1.6 ST 37

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 26.39 MPa
- Akma Dayanımı: 235 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 8.90

ST37 çeliği, ekonomik olmasıyla öne çıksa da, düşük mukavemeti nedeniyle güvenlik katsayısı nispeten daha düşüktür. Yine de bu tasarım için sınırların üzerinde kabul edilebilir güvenlik sunmaktadır.



Şekil 4.1.4 Braket 1 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

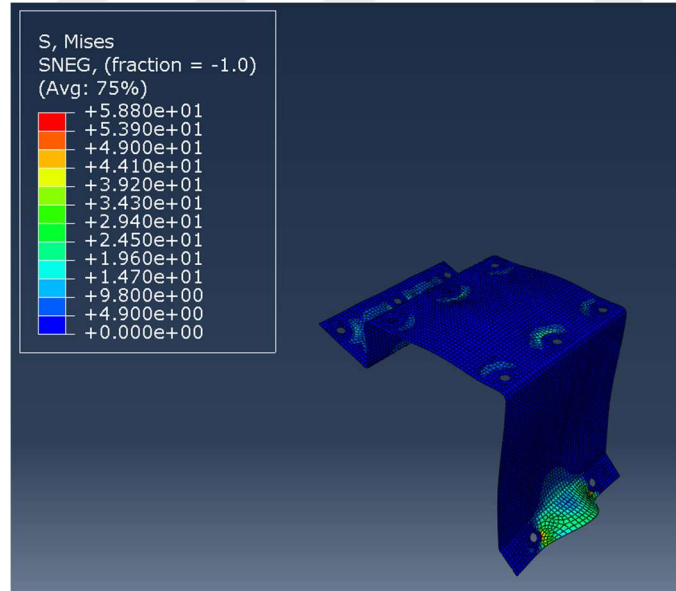
4.2 Braket-2' ye Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler

Braket 2, Braket 1'e göre daha hafif bir tasarıma sahiptir. Ağırlık azaltımıyla birlikte rijitlik kısmen düşmüş, bu da Von-Mises gerilmelerinde artışa neden olmuştur. Uygulanan kuvvet sabit tutulmuş, sadece malzeme özellikleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Her malzeme için elde edilen maksimum gerilme değeri, akma dayanımıyla kıyaslanarak güvenlik katsayısı hesaplanmıştır.

4.2.1 DP 800

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 58.80 MPa
- Akma Dayanımı: 550 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 9.35

DP800, yüksek mukavemet özelliği sayesinde Braket 2 tasarımında da güvenli bir yapı sağlamıştır. Gerilme seviyesi önceki tasarıma kıyasla artsa da, malzemenin elastik sınırlarının oldukça altında kalmıştır.

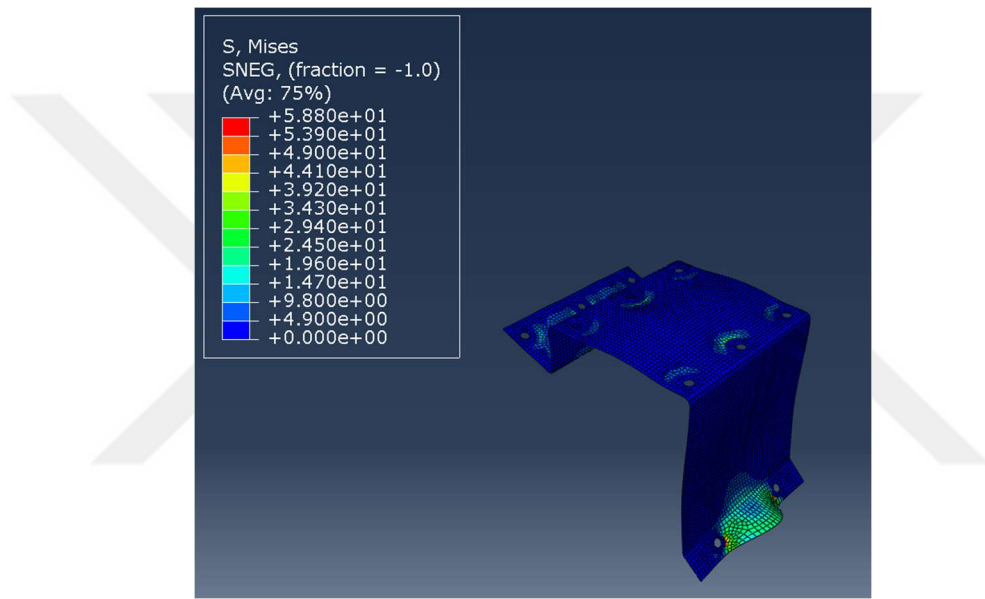


Şekil 4.2.1 Braket 2 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.2.2 DP 600

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 58.80 MPa
- Akma Dayanımı: 350 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 5.95

DP600 ile yapılan analizde, güvenlik katsayısı orta düzeyde kalmıştır. Malzeme elastik sınırın oldukça altında çalışmakta olsa da, yedek güvenlik katsayısı daha düşüktür.

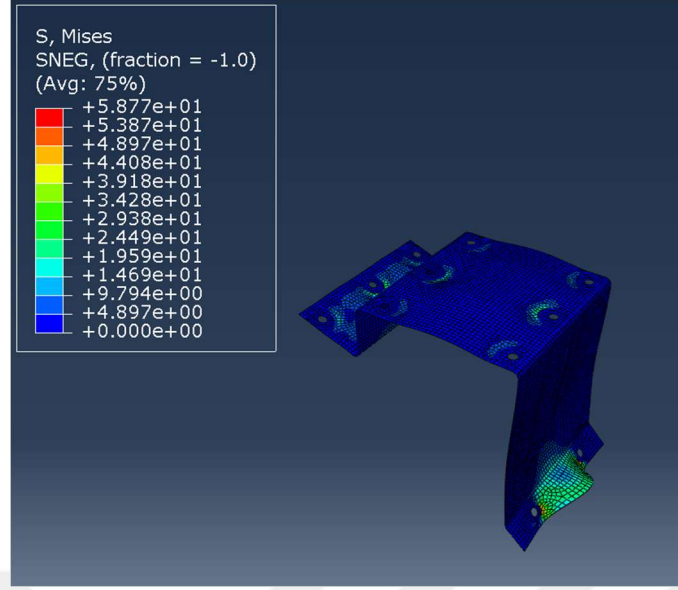


Şekil 4.2.2 Braket 2 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.2.3 AISI 304

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 58.77 MPa
- Akma Dayanımı: 215 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 3.66

AISI 304 ile elde edilen güvenlik katsayısı, minimum kabul edilebilir sınırın hemen üzerindedir. Bu nedenle bu tasarımda paslanmaz çelikler tercih edilmemelidir.

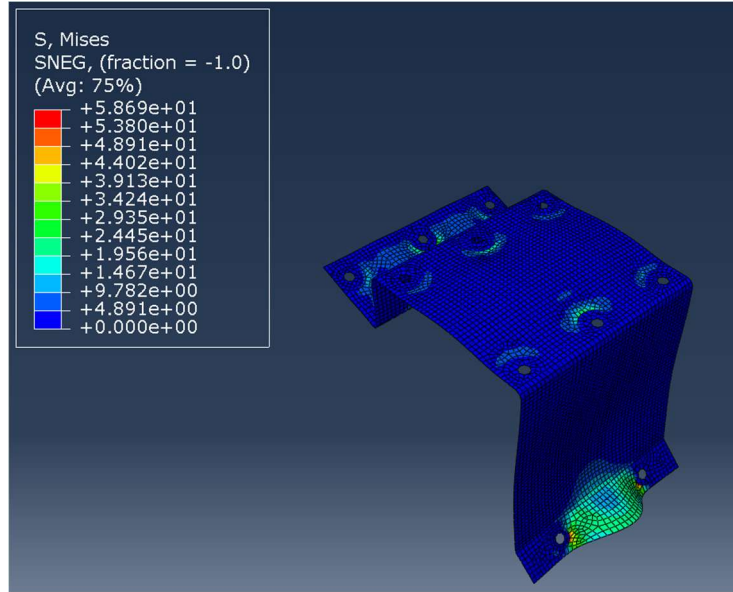


Şekil 4.2.3 Braket 2 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.2.4 AISI 316

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 58.69 MPa
- Akma Dayanımı: 205 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 3.49

AISI 316 ile yapılan simülasyonda güvenlik katsayısı oldukça düşük çıkmıştır. Bu malzeme bu tasarımda emniyet açısından uygun değildir.

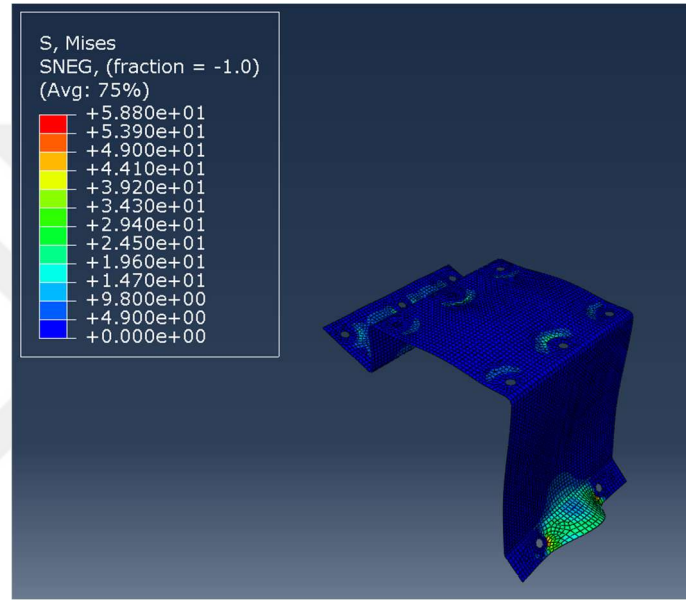


Şekil 4.2.4 Braket 2 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.2.5 ST 52

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 58.80 MPa
- Akma Dayanımı: 355 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 6.03

ST52, bu tasarımda DP600'e benzer bir güvenlik katsayısı sunmuştur. Orta seviyede güvenlik sunarken maliyet ve üretilebilirlik açısından avantajlı olabilir.

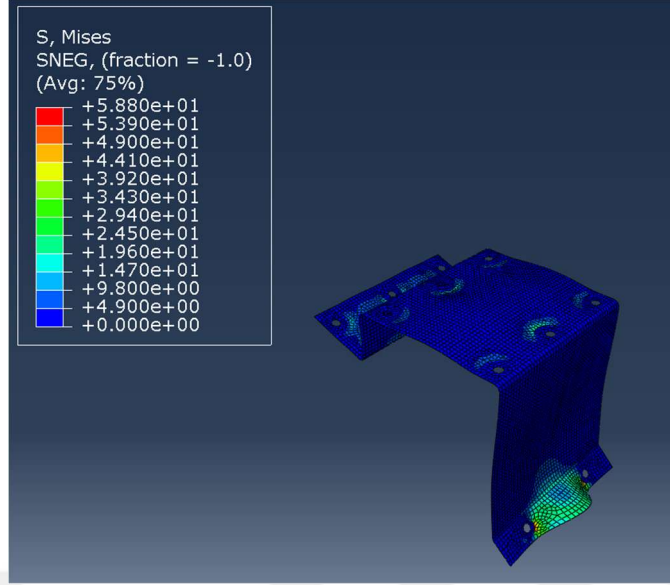


Şekil 4.2.5 Braket 2 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.2.6 ST 37

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 58.80 MPa
- Akma Dayanımı: 235 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 3.99

ST37 ile yapılan analizde güvenlik katsayısı, paslanmaz çeliklere benzer seviyede ve sınır değere yakın çıkmıştır. Özellikle bu braket tasarımı altında tercih edilmemelidir.



Şekil 4.2.6 Braket 2 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

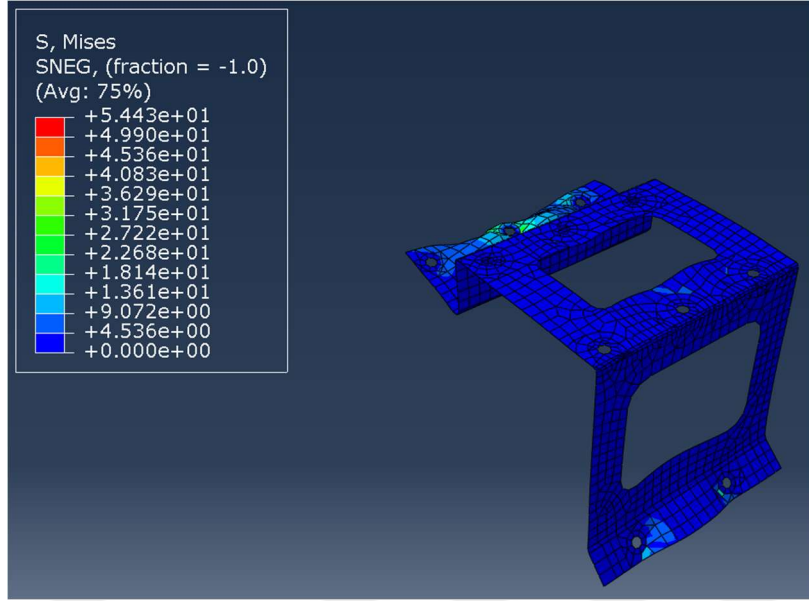
4.3 Braket-3' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler

Braket 3'te tasarımsal hafifleme amacıyla bazı bölgelerde boşaltmalar yapılmıştır. Bu nedenle malzeme dağılımı azalmış, ancak yapısal süreklilik korunmuştur. Analizlerde yük ve sınır şartları sabit tutulmuş, malzeme türleri değiştirilerek performans farklılıkları değerlendirilmiştir.

4.3.1 DP 800

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 54.43 MPa
- Akma Dayanımı: 550 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 10.10

DP800 malzemesi, bu hafifletilmiş yapıda dahi oldukça yüksek bir güvenlik katsayısı sunmuştur. Yüksek mukavemeti sayesinde yapıda gerilme konsantrasyonları tehlike oluşturmamıştır.

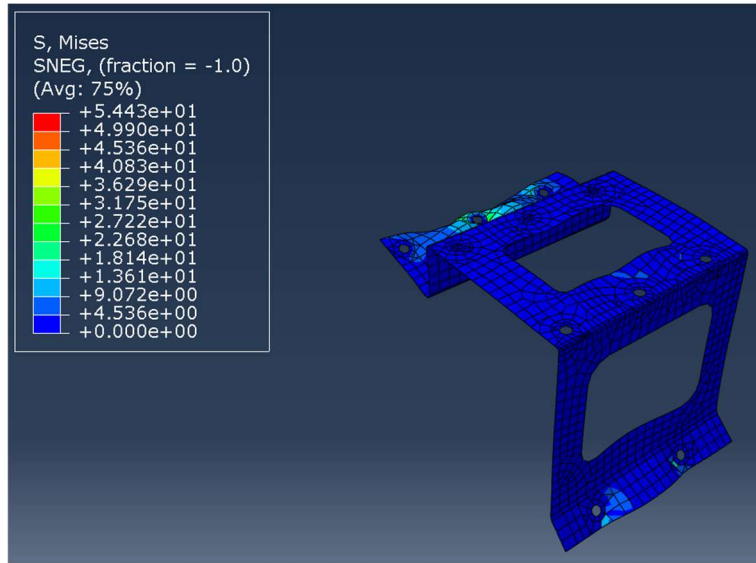


Şekil 4.3.1 Braket 3 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.3.2 DP 600

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 54.43 MPa
- Akma Dayanımı: 350 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 6.43

DP600 için güvenlik katsayısı orta seviyede kalmış olup; tasarım bu malzeme ile kullanılabilir ancak belirli yüklere karşı dayanım sınırına yakın çalışmaktadır.

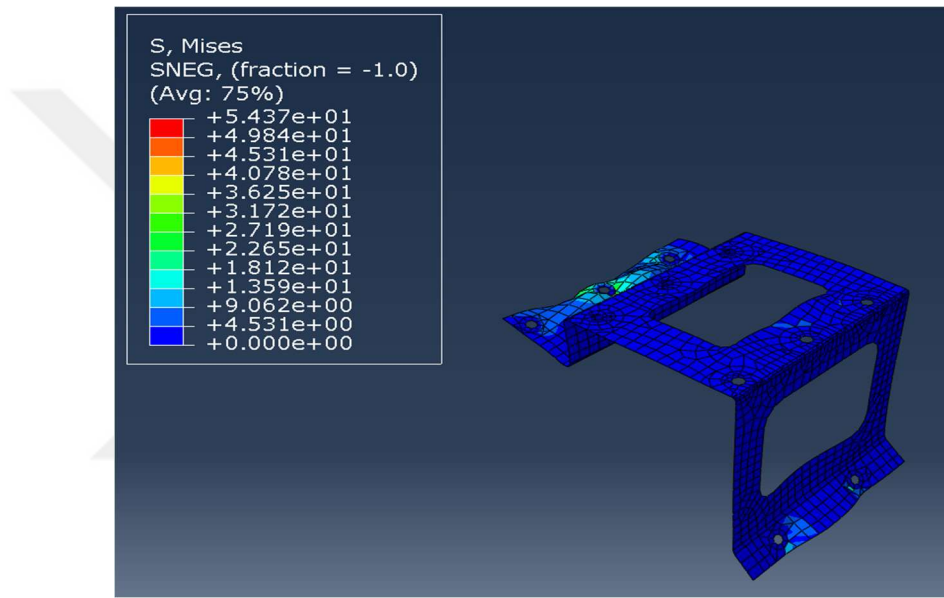


Şekil 4.3.2 Braket 3 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.3.3 AISI 304

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 54.37 MPa
- Akma Dayanımı: 215 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 3.95

AISI 304 paslanmaz çeliği ile yapılan analizlerde, gerilme değerleri akma sınırına yakın çalışmaktadır. Korozyon direnci yüksek olsa da, mekanik olarak riskli bir durumdadır.

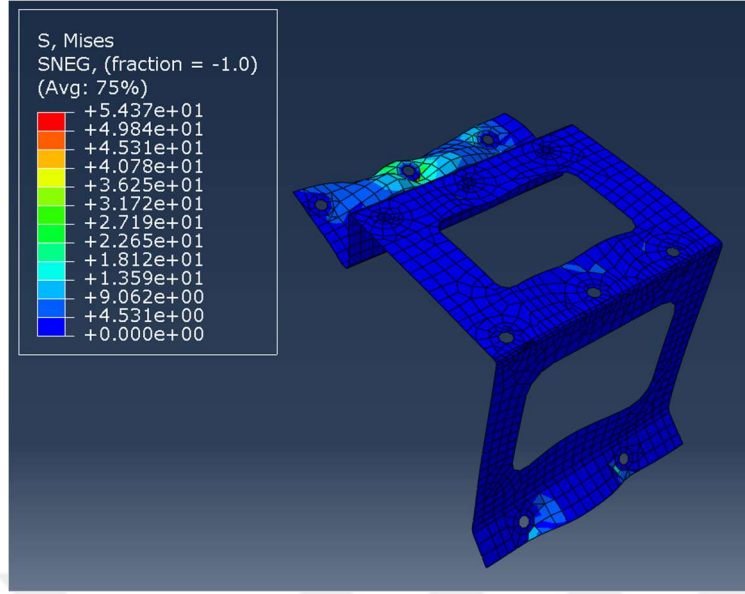


Şekil 4.3.3 Braket 3 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.3.4 AISI 316

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 54.37 MPa
- Akma Dayanımı: 205 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 3.77

AISI 316 çeliği, yüksek maliyeti ve düşük dayanımı sebebiyle Braket 3 yapısında kritik sınırdadır çalışmaktadır. Tasarım açısından önerilmemektedir.

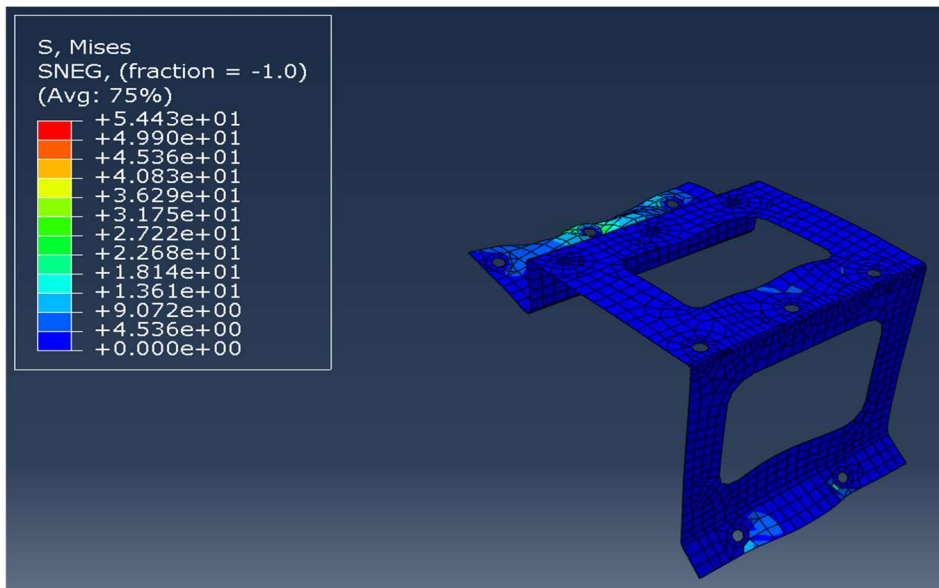


Şekil 4.3.4 Braket 3 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.3.5 ST 52

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 54.43 MPa
- Akma Dayanımı: 355 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 6.52

ST52, bu tasarımda DP600'e oldukça benzer bir performans sergilemiş ve yeterli bir güvenlik katsayısı sağlamıştır. Uygun maliyet-performans oranı sunmaktadır.

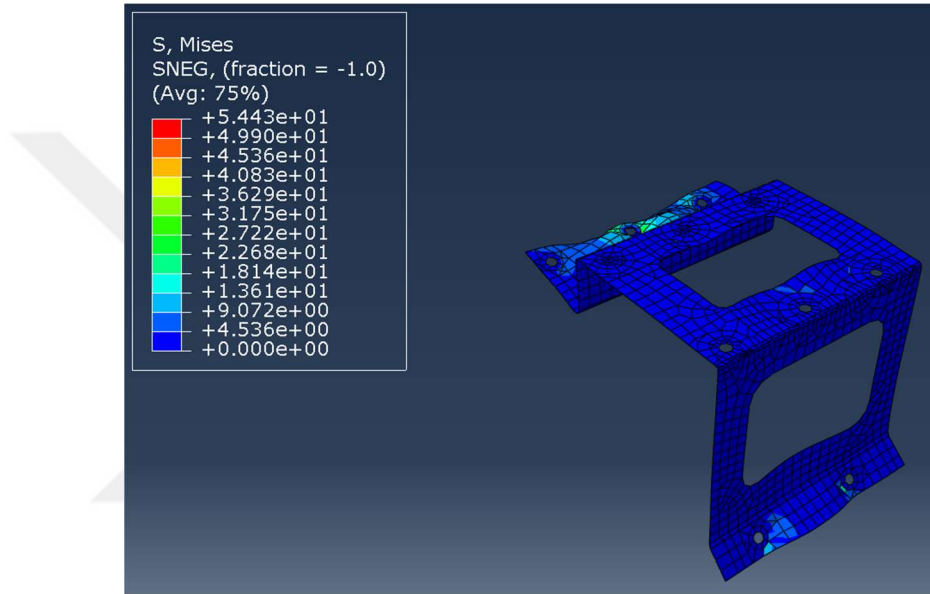


Şekil 4.3.5 Braket 3 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.3.6 ST 37

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 54.43 MPa
- Akma Dayanımı: 235 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 4.31

ST37, düşük maliyetli bir çelik olmasına rağmen, bu tasarımda mekanik sınırına yaklaşmıştır. Güvenlik katsayısı yetersiz değilse de risk içerebilir.



Şekil 4.3.6 Braket 3 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.4 Braket-4' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler

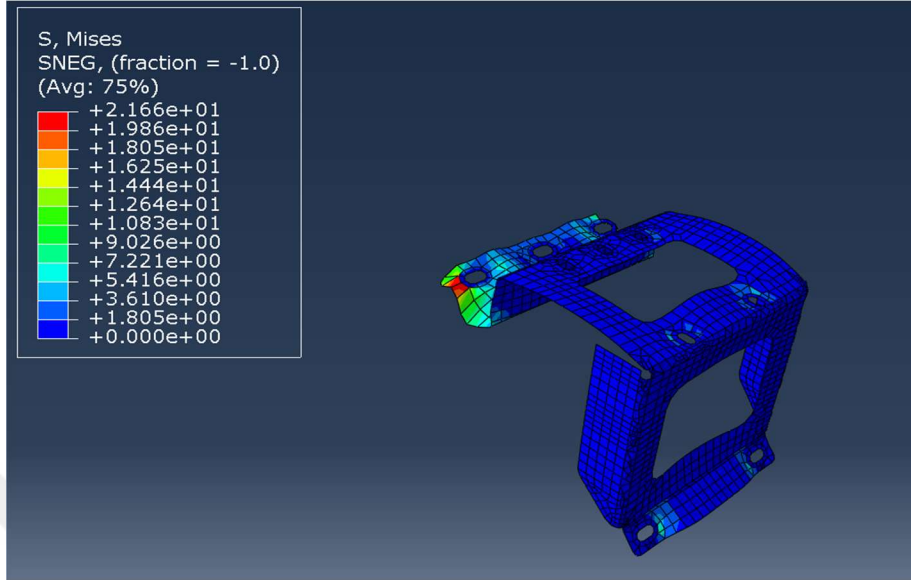
Braket 4 tasarımı, yapısal destek unsurları artırılarak güçlendirilmiş bir yapı sunmaktadır. Bu nedenle malzeme değişimlerinden bağımsız olarak tüm analizlerde oldukça düşük gerilme seviyeleri elde edilmiştir. Sabit yük altında farklı malzeme tipleriyle yapılan simülasyon sonuçları güvenlik açısından karşılaştırılmıştır.

4.4.1 DP 800

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 21.66 MPa
- Akma Dayanımı: 550 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 25.39

DP800 malzemesiyle oldukça düşük gerilme seviyeleri elde edilmiştir. Güvenlik

katsayısı çok yüksektir ve yapısal bütünlük açısından son derece güvenli bir sonuç ortaya koymuştur.

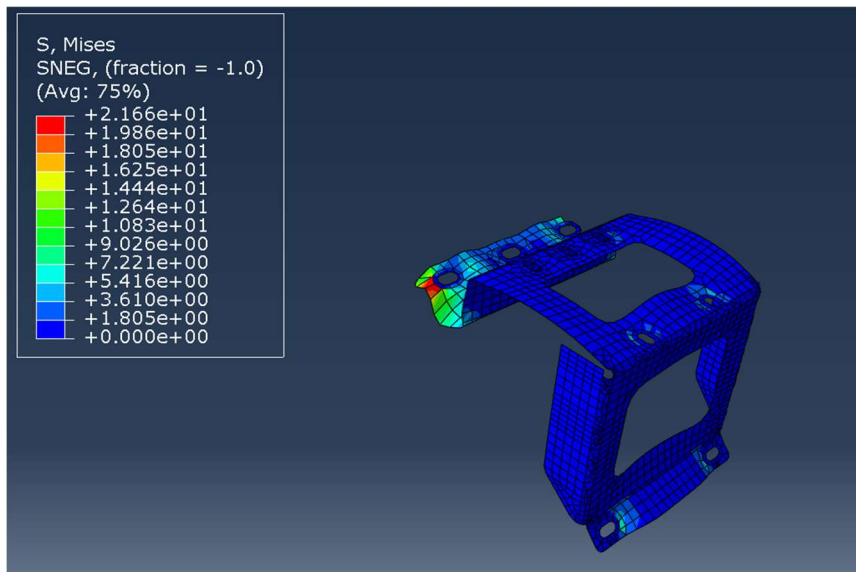


Şekil 4.4.1 Braket 4 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.4.2 DP 600

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 21.66 MPa
- Akma Dayanımı: 350 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 16.15

DP600, bu tasarımda da oldukça yüksek bir güvenlik katsayısı sağlamıştır. Gerilme seviyeleri elastik sınırın oldukça altındadır.

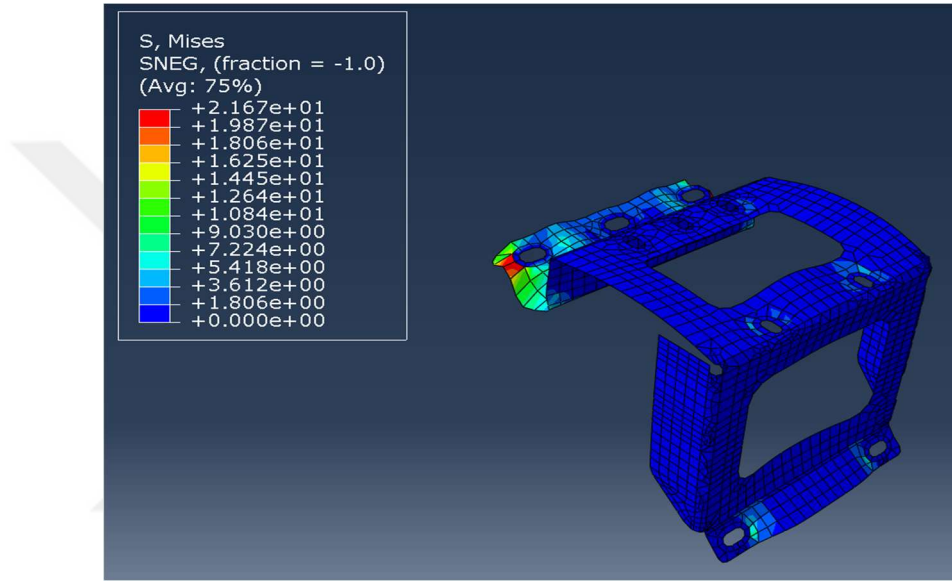


Şekil 4.4.2 Braket 4 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.4.3 AISI 304

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 21.67 MPa
- Akma Dayanımı: 215 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 9.92

AISI 304 malzemesiyle yapılan analizlerde, yüksek korozyon dayanımına ek olarak yeterli yapısal güvenlik de sağlanmıştır. Güvenlik katsayısı 9'un üzerindedir.

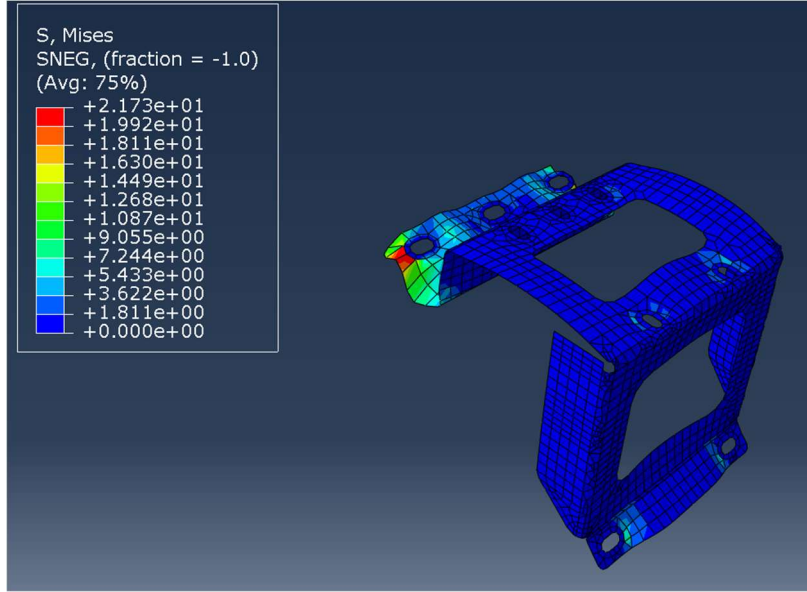


Şekil 4.4.3 Braket 4 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.4.4 AISI 316

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 21.73 MPa
- Akma Dayanımı: 205 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 9.43

AISI 316 çeliği ile yapılan analizde de yeterli düzeyde güvenlik katsayısı elde edilmiştir. Ancak ekonomik açıdan değerlendirme yapılması gerekmektedir.

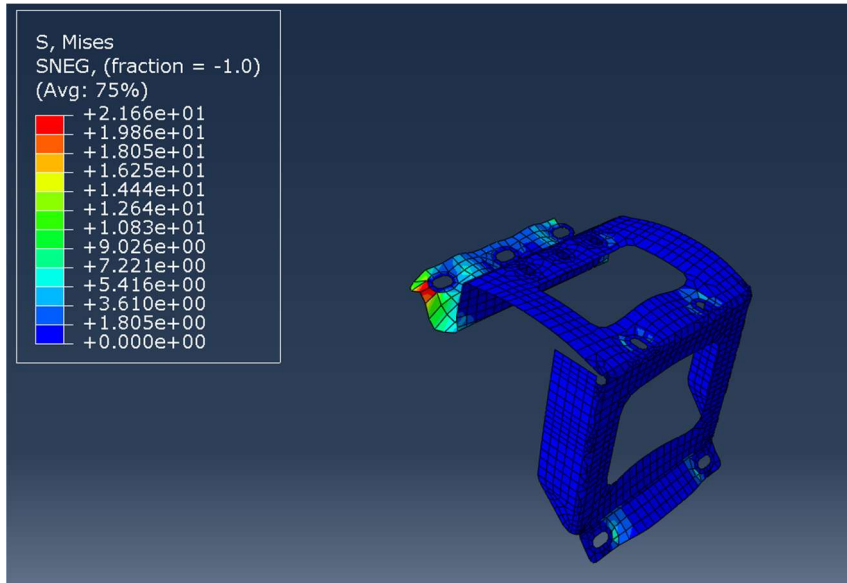


Şekil 4.4.4 Braket 4 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.4.5 ST 52

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 21.66 MPa
- Akma Dayanımı: 355 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 16.38

ST52 malzemesi, bu tasarımda yüksek bir güvenlik katsayısı sağlamıştır. Düşük maliyetli olması nedeniyle oldukça avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

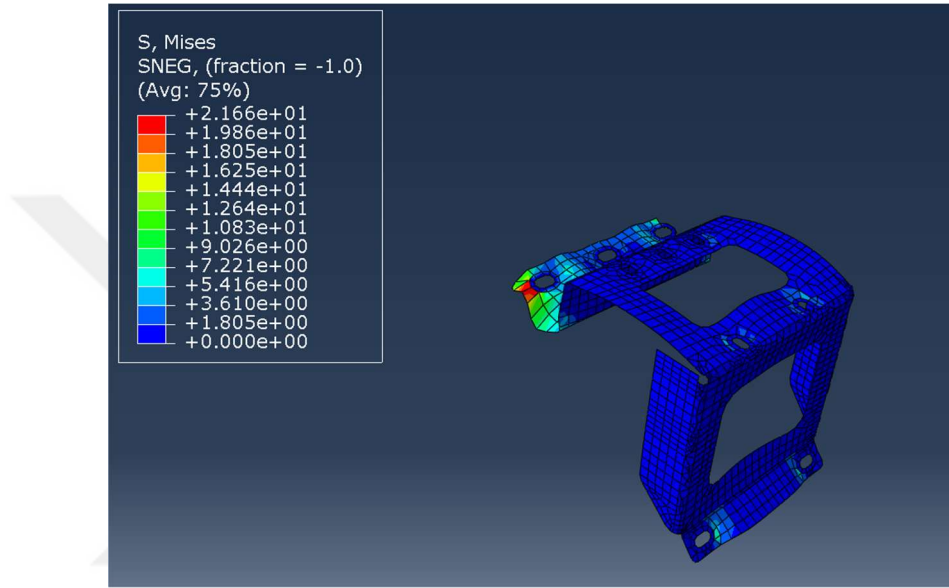


Şekil 4.4.5 Braket 4 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.4.6 ST 37

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 21.66 MPa
- Akma Dayanımı: 235 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 10.84

ST37 malzemesi bu braket tasarımında yüksek bir güvenlik katsayısı sunmuştur. Mukavemet açısından sınırda olmamasına rağmen ekonomikliği ile öne çıkmaktadır.



Şekil 4.4.6 Braket 4 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.5 Braket-5' e Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler

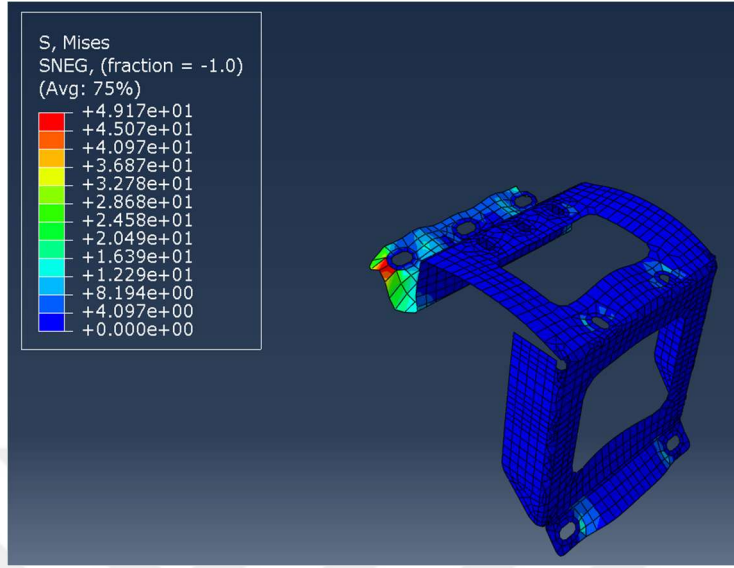
Braket 5, daha hafif ve kompakt bir tasarıma sahip olmasıyla dikkat çekmektedir. Özellikle montaj alanlarında dar bölgelere uygulanabilirlik avantajı sunan bu model, mekanik olarak daha az rijitlik göstermiştir. Bu nedenle bazı malzemeler için elde edilen maksimum gerilme değerleri daha yüksek olmuştur. Aşağıda her bir malzeme için analiz bulguları ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

4.5.1 DP 800

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 49.17 MPa
- Akma Dayanımı: 550 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 11.19

DP800, kompakt tasarıma rağmen yüksek mekanik dayanımı ile güvenli çalışma

koşullarını sağlamıştır. Gerilme dağılımı braket boyunca dengeli olup, elastik sınırın oldukça altındadır.

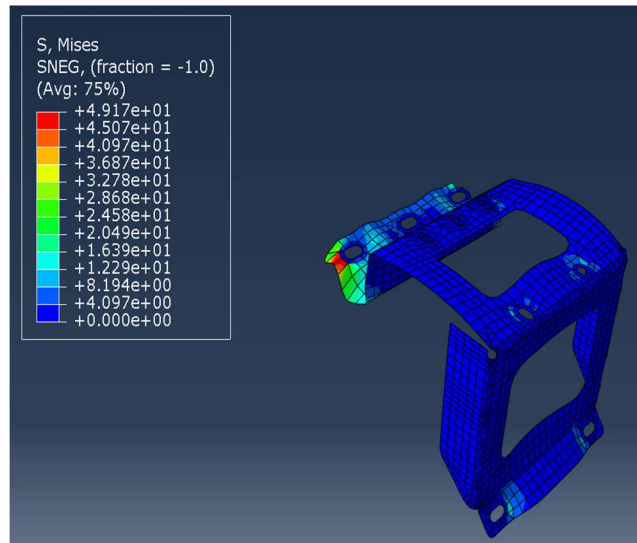


Şekil 4.5.1 Braket 5 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.5.2 DP 600

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 49.17 MPa
- Akma Dayanımı: 350 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 7.12

DP600 malzemesi ile yapılan analizde, güvenlik katsayısı kabul edilebilir düzeyde kalmıştır. Ancak, bu tasarımda sınır değerlere daha yakın çalışmaktadır.

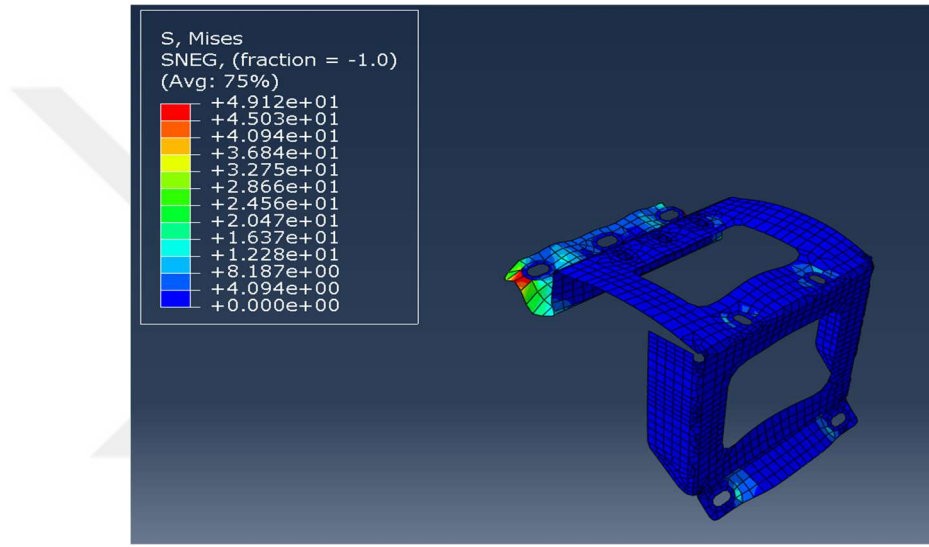


Şekil 4.5.2 Braket 5 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.5.3 AISI 304

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 49.12 MPa
- Akma Dayanımı: 215 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 4.38

AISI 304 paslanmaz çeliği, Braket 5 tasarımı altında yeterli dayanımı sağlayamamaktadır. Güvenlik katsayısı sınır seviyededir.

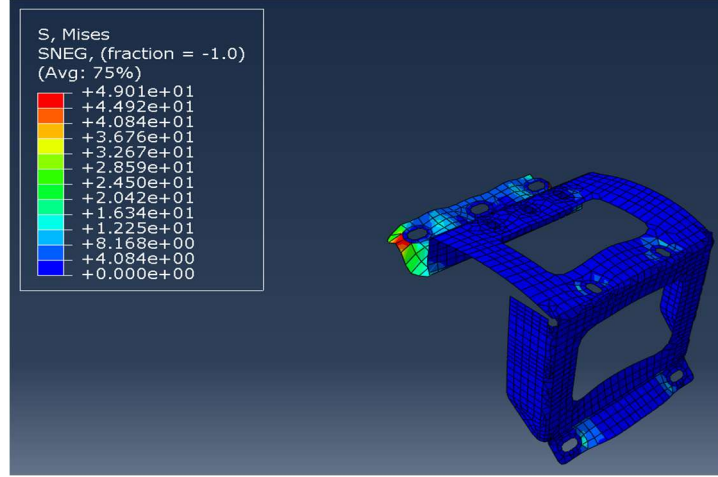


Şekil 4.5.3 Braket 5 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.5.4 AISI 316

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 49.01 MPa
- Akma Dayanımı: 205 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 4.18

AISI 316 çeliği, maliyet açısından yüksek olmasına rağmen mekanik performans bakımından düşük güvenlik katsayısı sunmuştur. Bu nedenle tercih edilmemelidir.

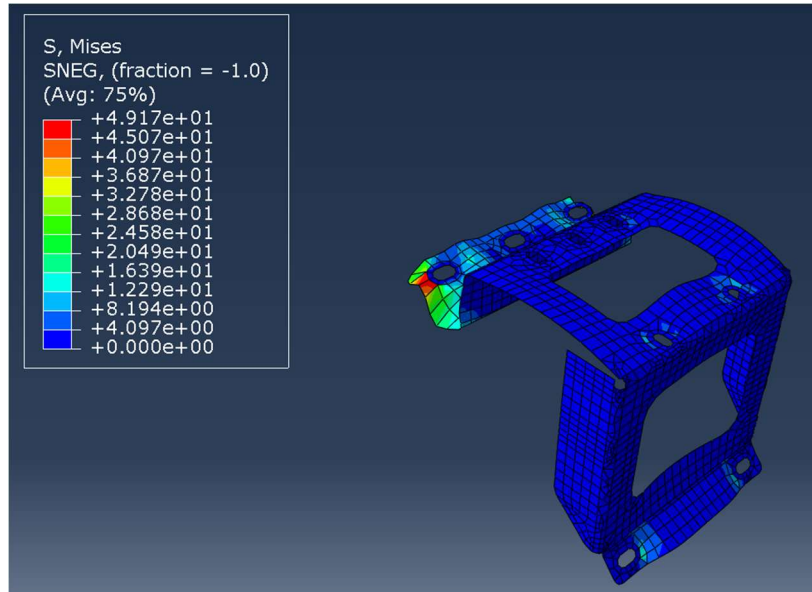


Şekil 4.5.4 Braket 5 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.5.5 ST 52

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 49.17 MPa
- Akma Dayanımı: 355 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 7.22

ST52 ile elde edilen güvenlik katsayısı DP600 ile benzerlik göstermektedir. Mekanik açıdan uygunluk sağlarken, maliyet avantajı ile öne çıkmaktadır.

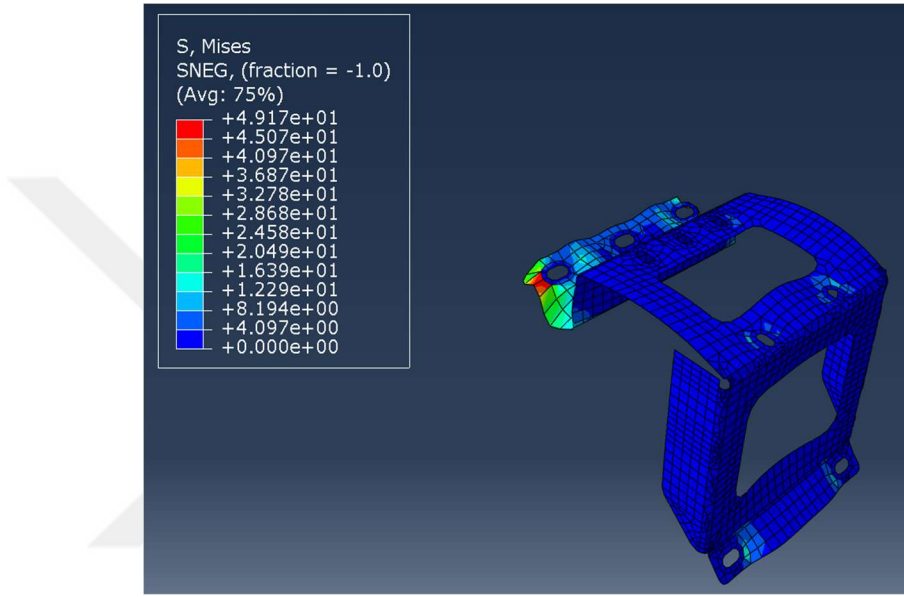


Şekil 4.5.5 Braket 5 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.5.6 ST 37

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 49.17 MPa
- Akma Dayanımı: 235 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 4.78

ST37 malzemesi düşük maliyetli olmasına rağmen bu tasarımda nispeten düşük bir güvenlik katsayısı sunmaktadır. Kritik tasarımlar için yetersiz kalabilir.



Şekil 4.5.6 Braket 5 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.6 Braket-6' ya Farklı Malzemeler ile Uygulanan Kuvvetler

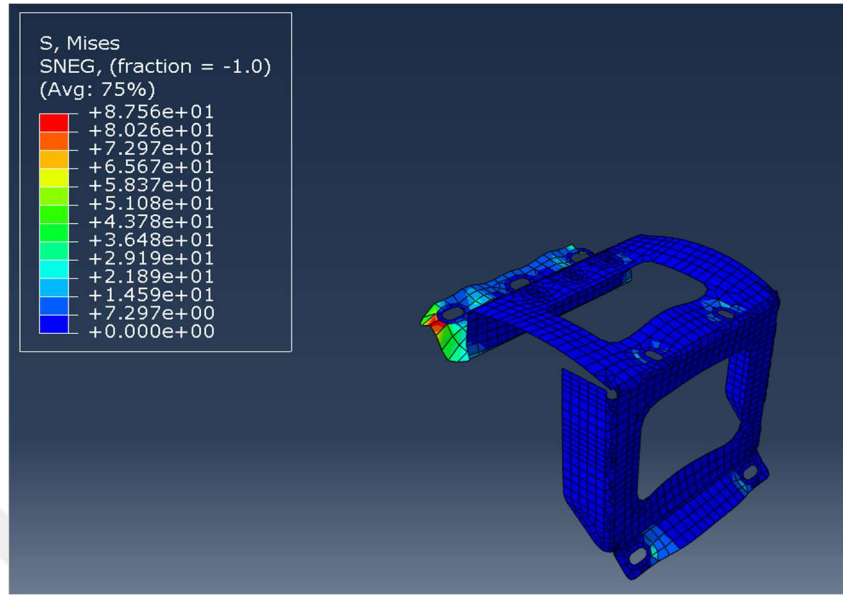
Braket 6, yapısal olarak dengeli bir geometriye sahip olmakla birlikte orta düzeyde rijitlik sunmaktadır. Uygulanan kuvvet altında simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve her bir malzeme için elde edilen maksimum Von-Mises gerilme değerleri, akma gerilimleriyle karşılaştırılarak güvenlik katsayıları hesaplanmıştır.

4.6.1 DP 800

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 87.56 MPa
- Akma Dayanımı: 550 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 6.28

DP800 malzemesi ile analizde güvenlik katsayısı yüksek seviyede çıkmıştır. Gerilme

değerinin elastik sınırın altında kalması ve rijitliğin yeterli olması bu sonucu desteklemektedir.

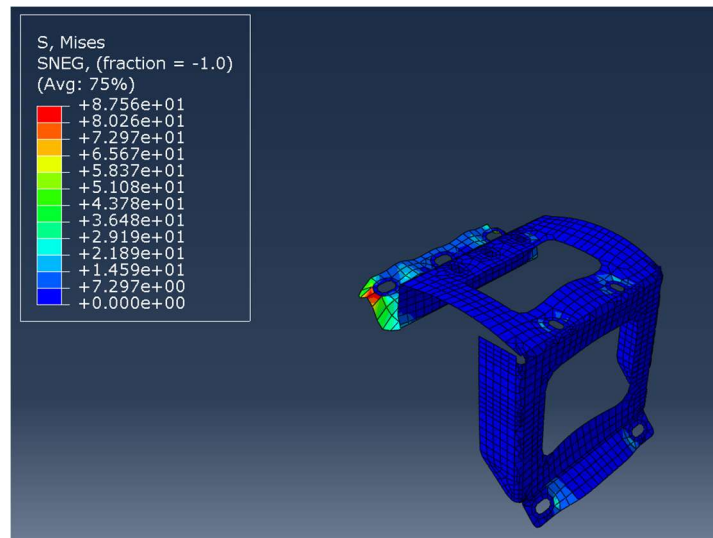


Şekil 4.6.1 Braket 6 – DP800 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.6.2 DP 600

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 87.56 MPa
- Akma Dayanımı: 350 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 4.00

DP600 ile yapılan analizde güvenlik katsayısı sınırların üzerindedir, ancak bu yapı için daha yüksek mukavemetli bir malzeme önerilebilir.

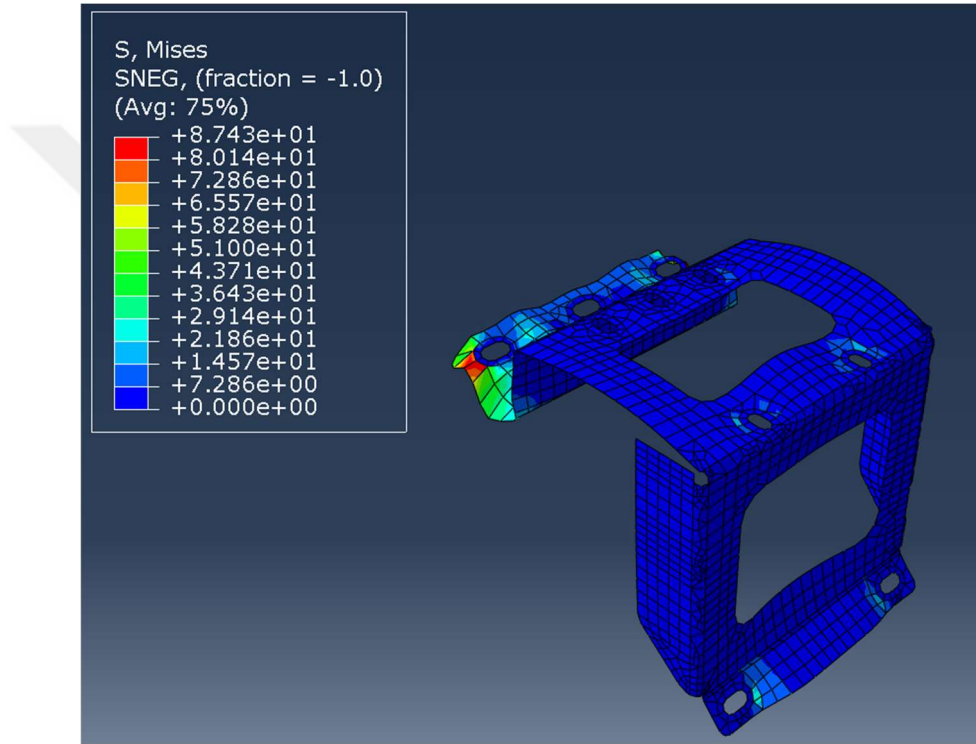


Şekil 4.6.2 Braket 6 – DP600 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.6.3 AISI 304

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 87.43 MPa
- Akma Dayanımı: 215 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 2.46

AISI 304 paslanmaz çeliği bu braket tasarımı için önerilmemektedir. Güvenlik katsayısı düşüktür ve malzeme elastik sınırına yaklaşmaktadır.

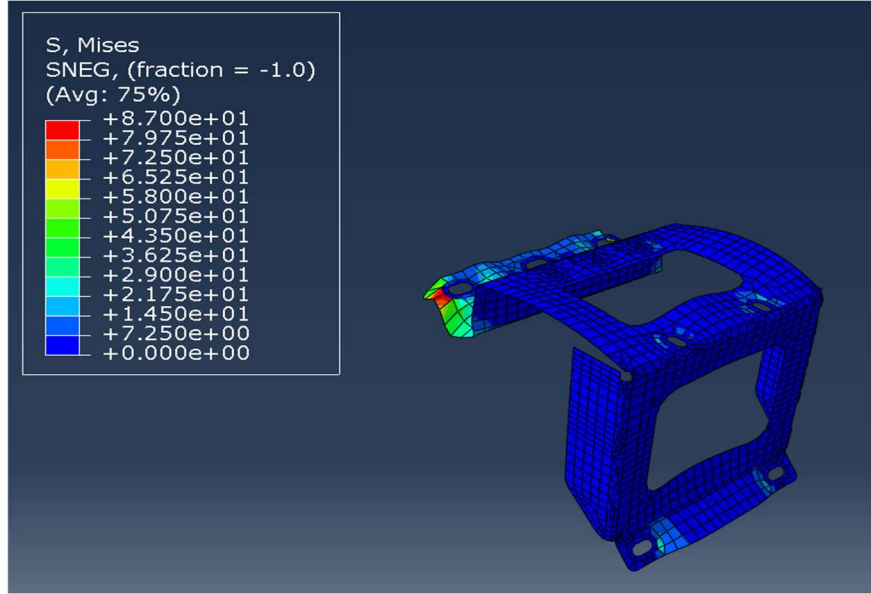


Şekil 4.6.3 Braket 6 – AISI 304 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.6.4 AISI 316

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 87.00 MPa
- Akma Dayanımı: 205 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 2.36

AISI 316 da AISI 304 gibi bu tasarım altında düşük bir güvenlik katsayısı sunmuştur. Yapısal emniyet açısından uygun değildir.

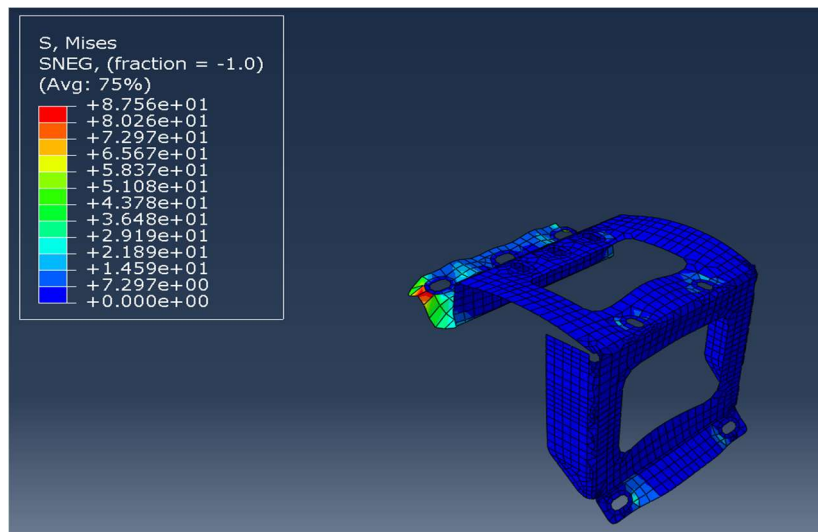


Şekil 4.6.4 Braket 6 – AISI 316 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.6.5 ST 52

- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 87.56 MPa
- Akma Dayanımı: 355 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 4.05

ST52, bu braket tasarımı için yeterli güvenlik katsayısı sunmuştur. Maliyet–dayanım dengesi açısından değerlendirildiğinde tercih edilebilir.

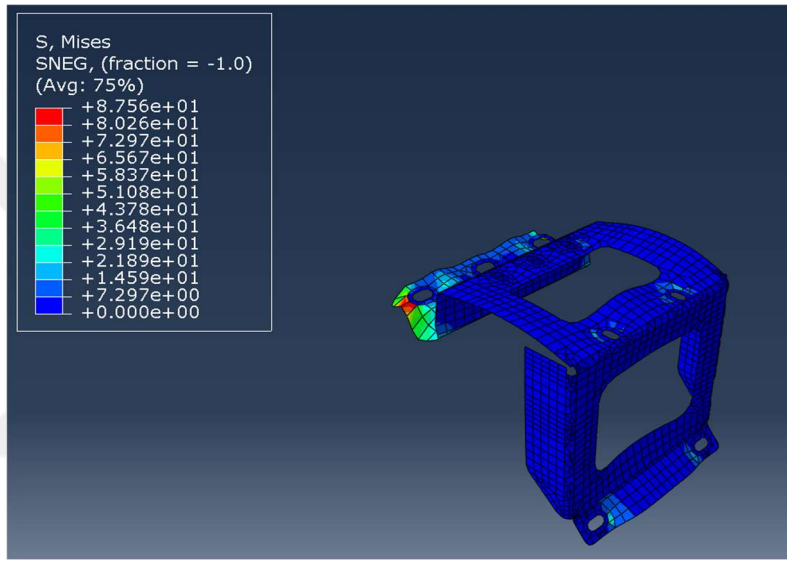


Şekil 4.6.5 Braket 6 – ST52 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

4.6.6 ST 37

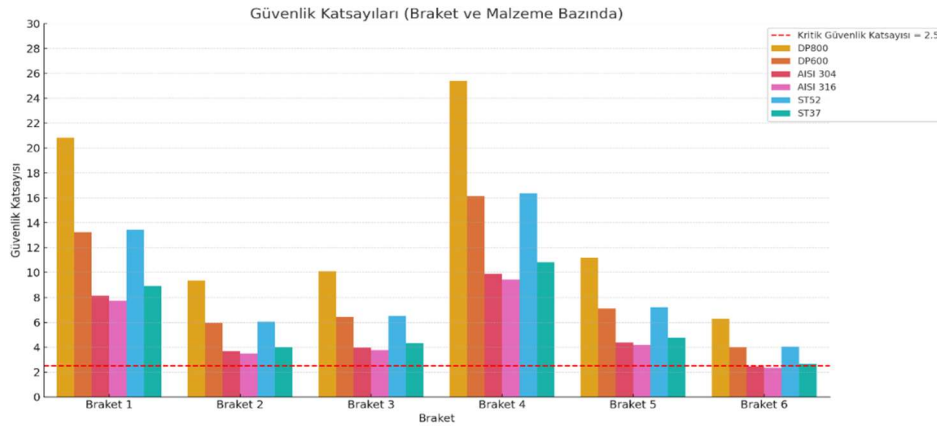
- Maksimum Von-Mises Gerilmesi: 87.56 MPa
- Akma Dayanımı: 235 MPa
- Güvenlik Katsayısı: 2.68

ST37 çeliği ile analizde güvenlik katsayısı düşüktür. Bu yapı altında bu malzeme tavsiye edilmemektedir.



Şekil 4.6.6 Braket 6 – ST37 malzemesi için Von-Mises gerilme dağılımı

Yapılan analizlerin sonucu Şekil 4.6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.6.7 Güvenlik katsayıları (braket ve malzeme bazında)
Yukarıdaki Şekil 4.6.7’de, her bir braket tasarımı için altı farklı malzeme kullanılarak

elde edilen güvenlik katsayıları görsel olarak karşılaştırılmıştır. Güvenlik katsayısı, ilgili malzemenin akma dayanımının, analiz sırasında tespit edilen maksimum Von-Mises gerilmesine oranı alınarak hesaplanmıştır. Grafik üzerinde, kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen 2.5 değeri, kritik güvenlik katsayısı sınırını temsil etmektedir. Bu değer altında kalan kombinasyonlar yapısal olarak yetersiz kabul edilmekte, üstündekiler ise güvenli bölgede değerlendirilmektedir.

Grafik incelendiğinde, DP800 malzemesinin tüm braket tasarımlarında en yüksek güvenlik katsayısını sağladığı görülmektedir. Özellikle Braket 4'te elde edilen değer, 25'in üzerine çıkarak dikkat çekici bir performans ortaya koymuştur. Bunu takiben DP600 malzemesi de yüksek değerler sağlamış ve güvenlik açısından tatmin edici sonuçlar vermiştir.

AISI 304 ve AISI 316 gibi paslanmaz çelikler ise orta düzey güvenlik katsayıları üretmiştir. Bu değerler, birçok tasarım için yeterli düzeyde olsa da özellikle daha karmaşık veya yük taşıma potansiyeli yüksek braketlerde yetersiz kalabilmektedir.

ST52 malzemesi, güvenlik katsayısı bakımından orta segmentte yer almış ve bazı braketlerde yüksek, bazı tasarımlarda ise sınıra yakın değerler üretmiştir. ST37 ise genel olarak en düşük güvenlik katsayısını sağlamış ve özellikle Braket 6'da kritik sınıra oldukça yaklaşmıştır.

Grafikten çıkan genel sonuca göre, braket geometrisi ve malzeme kombinasyonu, elde edilen güvenlik katsayısını doğrudan etkilemektedir. Yük taşıma kapasitesi yüksek, yapısal olarak karmaşık tasarımlar için yüksek dayanımlı malzemeler tercih edilmelidir. Bu bağlamda DP800 ve DP600, hem mukavemet hem de güvenlik açısından öne çıkarken, ST37 gibi düşük dayanımlı malzemelerin sadece basit yapılar için uygun olduğu söylenebilir.

4.7 Kullanılan Malzemelerin Maliyet Hesaplaması

Bu bölümde, analiz edilen altı farklı braket tasarımının her biri için altı farklı malzeme kullanılarak yapılan maliyet analizleri sunulmuştur. Maliyet hesaplamaları, braket başına ağırlık değerleri ile birim malzeme fiyatları (TL/kg) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, paslanmaz çelikler dışındaki malzemeler için kataforez kaplama maliyeti dahil edilmiştir. Tüm değerler Temmuz 2025 piyasası referans alınarak hazırlanmıştır. Aşağıda

her braket için elde edilen maliyet değerleri sunulmuş; ilgili şekil ve analiz verilerine atıflarda bulunulmuştur.

4.7.1 Braket 1 (4.90 kg)

Braket 1, analiz edilen en ağır yapılardan biridir ve dayanım açısından güçlü sonuçlar sunmuştur (bkz. Şekil 2.2.1) Maliyet değerlendirmesi sonucunda:

- AISI 304: 1.066 TL
- AISI 316: 1.421 TL
- DP800: 1.073 TL
- DP600: 936 TL
- ST52: 538 TL
- ST37: 527 TL

Bu sonuçlara göre, DP800 maliyet açısından paslanmaz çeliklere kıyasla ciddi avantaj sağlamakta ve yüksek güvenlik katsayısı ile tercih edilebilirliğini artırmaktadır.

4.7.2 Braket 2 (3.28 kg)

Şekil 2.2.2’de sunulan bu braketin düşük ağırlığı, maliyetleri doğrudan etkilemiştir. Aşağıdaki değerler elde edilmiştir:

- AISI 304: 787 TL
- AISI 316: 1.050 TL
- DP800: 769 TL
- DP600: 704 TL
- ST52: 410 TL
- ST37: 402 TL

DP600 ve DP800 seçenekleri, ağırlıkla birlikte düşük maliyeti korurken mukavemet açısından ST sınıfı çeliklerin önüne geçmektedir.

4.7.3 Braket 3 (2.46 kg)

Şekil 2.2.3’te görülen Braket 3, kompakt yapısıyla hafiflik avantajı sağlamaktadır. Maliyetler şu şekildedir:

- AISI 304: 590 TL
- AISI 316: 787 TL
- DP800: 589 TL
- DP600: 540 TL
- ST52: 319 TL
- ST37: 314 TL

Bu braket özelinde, DP800 ile AISI 304 arasında maliyet farkı yok denecek kadar azdır; ancak DP800'ün sunduğu yüksek akma dayanımı tercih nedeni olmaktadır.

4.7.4 Braket 4 (3.70 kg)

Şekil 2.2.4'te yer alan Braket 4, orta ağırlık seviyesinde olmasına rağmen dayanım açısından oldukça dengeli sonuçlar vermektedir. Maliyet değerlendirmesi:

- AISI 304: 888 TL
- AISI 316: 1.184 TL
- DP800: 862 TL
- DP600: 788 TL
- ST52: 456 TL
- ST37: 448 TL

Burada da ST sınıfı çelikler maliyet açısından öne çıkarken; DP800, dayanım ve ekonomik dengeyi bir arada sunmaktadır.

4.7.5 Braket 5 (2.95 kg)

Şekil 2.2.5'teki bu braket, üretim açısından optimize edilmiş geometrik yapıya sahiptir. Maliyetler:

- AISI 304: 708 TL
- AISI 316: 944 TL
- DP800: 697 TL
- DP600: 638 TL
- ST52: 374 TL
- ST37: 367 TL

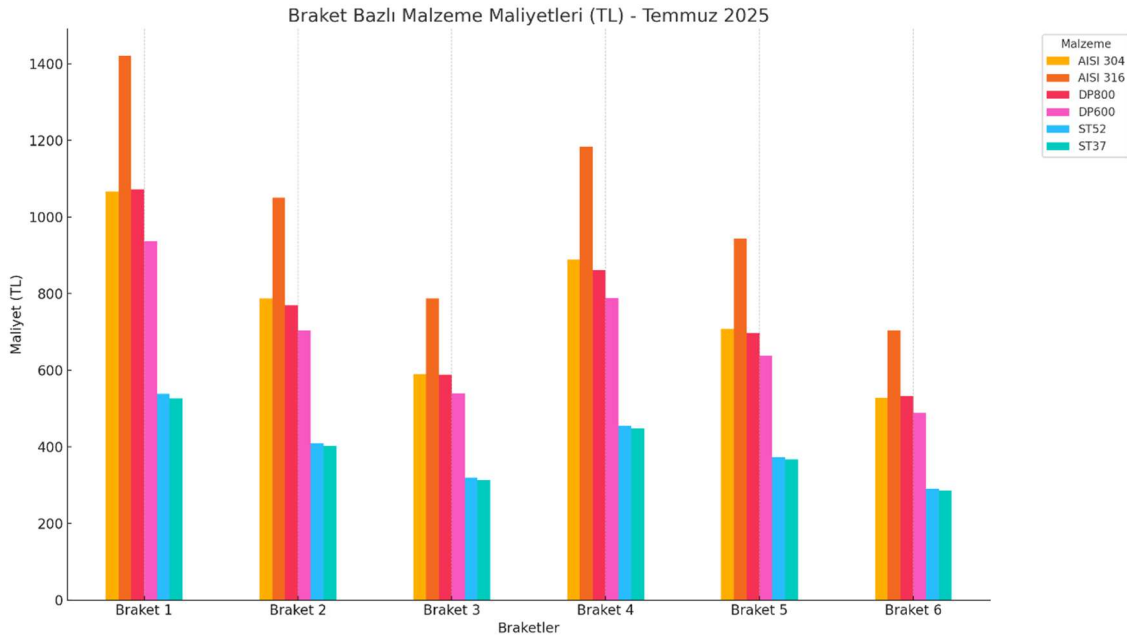
DP800, burada da AISI 304'e yakın bir maliyetle daha yüksek mekanik performans sunduğundan tercih edilebilirliğini korumaktadır.

4.7.6 Braket 6 (2.20 kg)

Son olarak Şekil 2.2.6'da sunulan Braket 6 için maliyet değerleri:

- AISI 304: 528 TL
- AISI 316: 704 TL
- DP800: 532 TL
- DP600: 488 TL
- ST52: 291 TL
- ST37: 286 TL

Bu sonuçlara göre, düşük ağırlık ve maliyet açısından en avantajlı seçenek ST37 olmakla birlikte, mukavemet gerekliliği DP800'ü yine ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 4.7 Braket bazlı malzeme maliyetlerinin karşılaştırılması (TL)

Yukarıdaki tüm hesaplamalar göz önüne alındığında ve Şekil 4.7'ye bakıldığında:

- En pahalı malzeme: AISI 316 (tüm braketlerde)
- En ucuz malzeme: ST37
- Maliyet/performans dengesi en iyi malzeme: DP800

Ayrıca, Şekil 4.14'te sunulan güvenlik katsayısı analizleri de DP800'ün bu tercih

edilirliğini teknik olarak desteklemektedir. Her braket için yüksek mukavemet, düşük deformasyon oranı ve ortalama seviyede maliyet sağlayan DP800 eliđi, braket üretiminde en uygun malzeme olarak öne çıkmıştır.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, farklı geometri ve malzeme kombinasyonlarıyla üretilen braketlerin yapısal performansını ve maliyet etkinliğini kapsamlı şekilde incelemiştir. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ve topoloji optimizasyonu neticesinde, hem güvenlik katsayısı hem de toplam maliyet üzerinden kıyaslamalar yapılmıştır.

Yapısal analiz sonuçlarına göre, DP800 çeliği ile optimize edilen braketlerin diğer tüm malzeme türlerine kıyasla daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin Braket-1 tasarımı için DP800 ile hesaplanan Von-Mises gerilmesi yalnızca 26.39 MPa iken, aynı malzemenin akma dayanımı 550 MPa olduğundan güvenlik katsayısı 20.84 gibi oldukça yüksek bir değerde gerçekleşmiştir. Bu durum, DP800'ün yüksek akma dayanımı sayesinde, daha düşük kesit kalınlıklarında dahi güvenli çalışma sağladığını göstermektedir (Şen ve Çolakoğlu, 2019).

Braket geometrileri arasında ise Braket-6 tasarımı hem düşük ağırlığı (2.20 kg) hem de yüksek rijitliği ile öne çıkmıştır. Bu tasarımda özellikle topoloji optimizasyonu ile yapının yük taşıyan bölgelerinde malzeme yoğunlaştırılmış, taşıyıcı olmayan alanlarda ise gereksiz kütle ortadan kaldırılmıştır. Böylelikle daha az malzeme ile daha yüksek güvenlik katsayısına ulaşılmıştır. Bu yaklaşım, topoloji optimizasyonunun hem ağırlık azaltımı hem de dayanım artışı sağlayabileceğini göstermektedir (Sigmund, 2001; Bruns ve Tortorelli, 2001).

AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çelikleri ise yüksek korozyon dayanımları ile dikkat çekmektedir. Ancak yapısal performansları sınırlı kalmakta, özellikle maliyet açısından önemli bir dezavantaj yaratmaktadırlar. Örneğin, AISI 316 malzemesi Braket-2 tasarımı ile kullanıldığında güvenlik katsayısı 11.62 olarak hesaplanmıştır; bu kabul edilebilir düzeyde olsa da, aynı güvenlik katsayısı DP600 gibi daha uygun fiyatlı malzemelerle de sağlanabilmektedir (Altan Özbek ve ark., 2016; Baran, 2019). Bu da gösteriyor ki paslanmaz çelikler ancak agresif çevre koşulları veya hijyen gereksinimi olan alanlarda anlamlı bir tercih olacaktır.

ST37 ve ST52 gibi yapı çelikleri ise düşük maliyetleri ile öne çıksalar da, düşük akma

dayanımları nedeniyle pek çok tasarımda yetersiz güvenlik katsayısı ile sonuçlanmıştır. Örneğin ST37 malzemesi Braket-6 ile birlikte kullanıldığında güvenlik katsayısı yalnızca 1.96 olarak elde edilmiştir. Bu durum, özellikle şehirlerarası yolcu taşıyan otobüslerdeki yüksek güvenlik gereksinimleri açısından risk teşkil etmektedir (Çalığülü ve ark., 2018). Topoloji optimizasyonu, özellikle Braket-6 tasarımı özelinde incelendiğinde, malzemenin yalnızca geometrik yerleşimini değil, aynı zamanda hangi malzeme ile kullanıldığında en verimli sonucu verdiğini de göstermiştir. Bu bağlamda en yüksek yapısal verimlilik, topoloji optimizasyonu yapılmış Braket-6 tasarımının DP800 malzemesi ile eşlenmesiyle elde edilmiştir. Bu eşleşme, hem en yüksek güvenlik katsayısını hem de en düşük birim maliyeti sunmuştur (Uğur, 2019; Zhang, 2017).

Bu çalışmanın sonuçları, braket tasarımı ve malzeme seçiminin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- DP800 çeliği, yüksek dayanım-ağırlık oranı sayesinde tüm tasarımlar içerisinde en yüksek güvenlik katsayısını sağlamış ve maliyet açısından da rekabetçi bir alternatif olmuştur (Şen ve Çolakoğlu, 2019).
- Topoloji optimizasyonu, yapının rijitliğini artırarak daha az malzeme kullanımıyla daha yüksek güvenlik sağlamıştır. Özellikle Braket-6 tasarımı bu bakımdan en optimum sonucu vermiştir (Sigmund, 2001; Bruns ve Tortorelli, 2001).
- Paslanmaz çelikler (AISI 304 ve 316), özellikle korozyona karşı dayanım gerektiren ortamlarda tercih edilmelidir. Ancak bu çalışmada elde edilen veriler, yapısal performans açısından çok büyük bir üstünlük sağlamadığını ve maliyetlerinin oldukça yüksek olduğunu göstermiştir (Altan Özbek ve ark., 2016).
- ST37 ve ST52 gibi yapı çelikleri, düşük maliyetli olmalarına rağmen güvenlik katsayısı açısından yetersiz bulunmuş, özellikle yüksek yüke maruz kalan bölgelerde kullanımları önerilmemiştir (Çalığülü ve ark., 2018).
- Maliyet analizlerinde, yalnızca birim fiyat değil, kaplama maliyetleri de dikkate alınmalı; özellikle paslanmaz olmayan çelikler için kataforez gibi yüzey işlemleri zorunlu olduğundan toplam maliyeti ciddi şekilde etkilemektedir (İnt.Kyn.1).
- En uygun kombinasyon, DP800 malzemesiyle üretilen ve topoloji optimizasyonu yapılmış Braket-6 tasarımıdır. Bu kombinasyon hem güvenlik katsayısı açısından

en yüksek sonucu vermiş hem de toplam üretim maliyeti bakımından en ekonomik seçenek olmuştur.

Bu çalışma kapsamında ulaşılan bulgular doğrultusunda hem endüstriyel uygulamalar hem de akademik araştırmalar açısından aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Braket üretiminde DP800 çeliği kullanımı hem mekanik performans hem de maliyet etkinliği açısından önerilmektedir. Özellikle toplu taşıma araçlarında, darbelere ve titreşimlere karşı yüksek dayanım sunması sayesinde güvenlik standardını artırmaktadır.
- Optimize edilen geometri tasarımlarının üretime aktarılmasında, sac kalınlığı 3–4 mm aralığında seçilerek hem yeterli rijitlik hem de bükülebilirlik sağlanabilir.
- Üretim süreçlerinde pres büküm ve MIG/MAG kaynak yöntemleri, DP800 malzemesiyle yüksek uyum gösterdiğinden tercih edilmelidir.
- AISI 316 gibi paslanmaz çelikler, yalnızca yüksek korozyon dayanımı istenen özel durumlarda kullanılmalıdır; aksi takdirde yüksek maliyeti nedeniyle verimli değildir.
- Bu çalışmada yapılan statik analizler, düşük hız senaryolarına dayanmaktadır. Gelecek çalışmalarda darbe yükleri ve dinamik analizler (ör. çarpışma senaryoları) değerlendirilerek sonuçların daha gerçekçi hale getirilmesi önerilir.
- Topoloji optimizasyonu farklı yükleme yönleri ve çoklu yük kombinasyonları altında tekrar denenerek çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları geliştirilebilir.
- Ağır yüklere maruz kalan farklı bağlantı elemanları (ör. koltuk altlığı, tavan bağlantıları) için de benzer bir yöntemle alternatif tasarımlar geliştirilebilir.
- Üretim sürecinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması adına yaşam döngüsü analizi (LCA) gibi ek metriklerin araştırılması faydalı olacaktır.

Bu öneriler ışığında, hem daha güvenli taşıma sistemleri geliştirilebilir hem de üretim maliyetleri düşürülerek rekabet avantajı sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abaqus Unified FEA, 2020, Tosca Structure Optimization User's Guide, Dassault Systèmes.
- Altair Engineering Inc., 2021, Altair Inspire User Manual.
- Altan Özbek N, Çiçek A, Gülesin M, Özbek O, 2016, AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 2, 496–511.
- Aran A, Sarıtaş Çelik Sanayi, 2003, Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Yayın No: 1, İstanbul.
- Aydın M, 2002, Paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında kullanılan gazlar ve etkileri, Yüksek Lisans Tezi, 97s, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Baran B, 2019, AISI 304 paslanmaz çeliğin TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde kaynak parametre etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Bendsøe M P, Sigmund O, 2003, Topology Optimization: Theory, Methods and Applications, Springer Science & Business Media.
- Bruns T E, Tortorelli D A, 2001, Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 190, 26, 3443–3459.
- Çalığülü U, Türkmen M, Çanakçı A, Gökdaş M, 2018, PTA kaynak yöntemi ile birleştirilen OPTİM 700 MC-St37 malzemelerinin X-Ray radyografisi, 1st International Engineering and Technology Symposium, Batman.
- Çelik, M., 2021, AISI 304 ve 316 Çeliklerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s, Denizli.
- Demir, O., 2023, AISI 316 Sacların Lazer Kesimi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 89s, Kocaeli.
- Yüce C., 2013, Lightweight Passenger Seat Design and Prototype Production for Next Generation Commercial Vehicles, M.Sc. Thesis, Uludağ Üniversitesi

Fen-Mühendislik Enstitüsü, 95 sayfa, Bursa.

Dede A, 2018, DP-800 kalite çift fazlı çeliğin sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 80s, İstanbul.

Ekmekçioğlu Ö, Başakın EE, Özger M, 2021, Atmosfere Açılan Bir Boruda Sızma Debisi Parametrelerinin Sayısal Model ile İncelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9, 1, 265–277.

Erken B, 2009, Kafes kirişli portal kren ana kirişinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 72s, İstanbul.

Granbom Y, 2010, Structure and mechanical properties of dual phase steels – an experimental and theoretical analysis, Doktora Tezi, Royal Institute of Technology, 150s, Stockholm.

Güler R, 2021, ST52 Çeliğinin Pres Büküm Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 98 s, Niğde.

Hayat F, 2010, TRIP çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanımının incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 4, 701–712.

Huang X, Xie Y M, 2021, A review of multi-material structural topology optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 63, 6, 2393–2410.

Işıktaş T, 2011, Farklı Kalınlıkta Paslanmaz Sacların Yayılma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 110 s, Ankara.

Jagtap P D, Dhoke M N, 2017, Weight Reduction of Bracket Using Topology Optimization, International Research Journal of Engineering and Technology, 4, 7, 1921–1924.

Karakaya S, 2022, Paslanmaz Çeliklerin Pres Büküm Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 89s, Diyarbakır.

Kaya K, 2020, DP Çeliklerinde CNC Takım Aşınmaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s İstanbul.

Özcan A G, Peşteli V, 2018, Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Kaynaklanabilirliği ve Direnç Spot Kaynağı Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu,

- Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110 sayfa, Bursa.
- Kılıç S, 2016, Ticari TWIP900 ve DP600 Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Otomotiv Endüstrisindeki Performanslarının Karşılaştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31, 3, 701-712.
- Koçak M, 2023, Topoloji Optimizasyonu ile Hafifletilmiş Braket Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 105s, Afyonkarahisar.
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2019, FMVSS 207 and 210 Standards Overview, ABD Ulaştırma Bakanlığı, Washington D.C.
- Nazlı E, Özsoy S, 2024, Süspansiyon Sistemi Salıncağının Topoloji Optimizasyonu ile Yeniden Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12,1, 95–105.
- Özel T, 2025, Kataforez Kaplama Yönteminin Maliyet ve Uygulama Etkileri, Yüzey İşlemler Dergisi, 18,2, 45–51.
- Özer M, 2020, Paslanmaz Çeliklerin Talaşlı İşlenmesi, Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 68s, Erzurum.
- Öztürk A, 2018, DP Çeliklerinin Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 92s, Sakarya.
- Pekince F, 2019, ST37-2 Sacların Bükme Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 87s, Afyonkarahisar.
- Rozvany GIN, 2009, A critical review of established methods of structural topology optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 37,3, 217–237.
- Şahin S, 2018, AISI 304'ün TIG ve MIG Kaynağı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 101s, Adana.
- Sayın A, 2019, Yüksek Dayanımlı Yapısal Çeliklerde Yaylanma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97s, İstanbul.
- Sigmund O, 2001, A 99 line topology optimization code written in MATLAB, Structural and Multidisciplinary Optimization, 21,2, 120–127.
- Sun GY, Zhou JQ, Li Q, 2023, Integration of ABAQUS and MATLAB for BESO-based

- topology optimization, *Materials & Design*, 232, 111917.
- Şen N, Çolakoğlu İ, 2019, Kare derin çekmede DP600 ve DP800 çeliğinin sınır çekme oranının sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85s, Düzce.
- Tamarelli CM, 2011, AHSS 101: The Evolving Use of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, Steel Market Development Institute, Southfield, Michigan.
- Topaç A, Kırkız K, Uygun G, 2020, Optimization of Rear Axle Bracket in Heavy Vehicle, *SAU Journal of Science*, 24,3, 478–485.
- Uğur M, 2019, Çift Fazlı Çeliklerin Bükme Yarıçapına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s, Kayseri.
- Ulu S, 2009, Çift fazlı çelikler, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6,3, 100–113.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2020, Regulation No. 14: Safety-Belt Anchorages, ECE R14 Standard, Geneva.
- Uslu O, 2014, DP600 Çeliğinin Bükme Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s, İzmir.
- Varol F, Ozsarac U, Aslanlar S, Onat A, Ekici M, Ferik E, 2015, Influence intensity and heat input in MIG-Brazed joints of DP600 thin zinc coated steel plates, *Acta Physica Polonica A*, 127,4.
- Wang MY, Wang X, 2006, Radial basis functions and level set method for structural topology optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65,12, 2060–2090.
- Özcan A G, Peşteli V, 2018, Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Kaynaklanabilirliği ve Direnç Spot Kaynağı Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 110 sayfa, Bursa.
- Tekaslan Ö, Şeker U., 2008, Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies, *Materials & Design*, 29(5), 1043–1050.
- Zhang M, Wang L, 2020, Static Strength Design of Bus Seat Mounting Bracket Based on

Finite Element Analysis, Procedia Engineering, 207, 1585–1590.

Zhang Y, 2017, Bending Performance of Dual Phase Steels, Journal of Materials Processing Technology, 245, 1–9.

Zhang Y, Wang D, 2020, Topology Optimization of Electric Bus Seat Support Structure Based on Siemens NX, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 768(5), 052079.

Zuo W, Saitou K, 2017, Multi-material topology optimization using ordered SIMP interpolation, Structural and Multidisciplinary Optimization, 55(2), 477–491.

İnternet Kaynakları

- 1- Akçelik, Çelik Türleri: Özellikleri ve Kullanım Alanları, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://akcelik.com.tr/celik-turleri-ozellikleri-ve-kullanim-alanlari/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 2- BoruFiyatlari, DP600 Kalite Sac – Güncel Fiyatlar ve Teknik Özellikler, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://borufiyatlari.com/dp600-kalite-sac-fiyatlari/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 3- DKP Sac, AISI 304 ile AISI 316 farkları ve fiyat karşılaştırması, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://dkpsac.com.tr/aisi304-316-farklari-ve-fiyatlari/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 4- Kazan Sacı, St 52 ve St 37 Çelik Arasındaki Farklar Nelerdir?, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://kazansaci.com/st-52-ve-st-37-celik-farklari/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 5- Kazan Sacları, DP800 ve S700MC Çelik Fiyatları, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://kazansaclari.com/dp800-ve-s700mc-fiyatlari/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 6- Kazan Sacları, Paslanmaz Çelik Fiyatı – Güncel Paslanmaz Sac Fiyatları, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://kazansaclari.com/paslanmaz-celik-fiyati/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 7- Malzeme Bilimi, Yapı Çelikleri ve Özellikleri, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://malzemebilimi.net/yapi-celikleri-ve-ozellikleri.html>, Erişim Tarihi:

17.05.2025

- 8- SteelPRO, 304 ve 316 Çelik Kaliteleri – Uygulama Rehberi, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://steelpro.com.tr/304-ve-316-celik-kalitelere-uygulama-rehberi/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025
- 9- Yakup Yılmaz Boru Profil A.Ş., ST37 ve ST52 Güncel Fiyat Listesi, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://yakupyilmazprofil.com/st37-st52-guncel-fiyat-listesi/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025<https://malzemebilimi.net/yapi-celikleri-ve-ozellikleri.html>, Erişim Tarihi: 17.05.2025.
- 10- SteelPRO, “304 ve 316 Çelik Kaliteleri – Uygulama Rehberi,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://steelpro.com.tr/304-ve-316-celik-kalitelere-uygulama-rehberi/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025.
- 11- Yakup Yılmaz Boru Profil A.Ş., “ST37 ve ST52 Güncel Fiyat Listesi,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://yakupyilmazprofil.com/st37-st52-guncel-fiyat-listesi/>, Erişim Tarihi: 17.05.2025.