

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

ARAÇ ÇATISININ EZİLMESİ DURUMUNDA B SÜTUNU
TASARIM OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAYFUN BAŞKARA

DENİZLİ, OCAK - 2022

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**ARAÇ ÇATISININ EZİLMESİ DURUMUNDA B SÜTUNU
TASARIM OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAYFUN BAŞKARA

DENİZLİ, OCAK - 2022

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

TAYFUN BAŞKARA

İMZA

ÖZET

**ARAÇ ÇATISININ EZİLMESİ DURUMUNDA B SÜTUNU TASARIM
OPTİMİZASYONU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TAYFUN BAŞKARA
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ İSMAİL ÖZTÜRK)**

DENİZLİ, OCAK - 2022

Bu çalışmada, araç B sütununun sonlu elemanlar modeli, yatay düzlemde iki farklı komponente ayrılmış ve sonrasında üç farklı sıcaklıkta şekillendirilmiş, üç boron çeliği tek ve kombinasyon halinde araç B sütununda kullanılmıştır. Boron çeliği malzeme parametreleri Johnson Cook malzeme modeli ile tanımlanmış ve Johnson kopma modeli de eklenmiştir. FMVSS 216 standartlarında çatı ezilmesi analizi gerçekleştirilen aracın IIHS standartlarında mukavemet-kütle oranı (SWR) ve spesifik enerji absorpsiyonu (SEA) incelenmiştir. Araç modeli olarak, Altair'ın sonlu elemanlar modelini hazırlamış olduğu Dodge Neon modeli seçilmiştir ve tekerlekler haricinde hiçbir komponent silinmemiştir. Araç çatısı ezilmesi analiz modeli Hyperworks ön çözücüsü yazılımıyla hazırlanmış, Radioss çözücüsüyle çözdürülmüştür. Analiz sonuçları HyperStudy yazılımına aktarılmış ve toplam tepki kuvveti ve spesifik enerji absorpsiyonunu arttırmaya yönelik deney tasarımı kurulmuştur. Deney tasarımı tam faktöriyel ve 4 seviyede çözdürülmüş sonrasında en uygun eğri uydurma yöntemiyle deney tasarımı fonksiyonları çıkarılmıştır. Tek amaçlı optimizasyonda maksimum toplam tepki kuvveti için bir kısıt belirlenmiş ve maksimum spesifik enerji absorpsiyonu için amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Tek amaçlı optimizasyon çalışmasında, Adaptif Yanıt Yüzey Metodu ve Kabul Edilebilir Yönler Metodu ile B Sütununun alt ve üst parçası için optimum kalınlık değerleri bulunmuştur. Çok amaçlı optimizasyon çalışmasında toplam maksimum tepki kuvveti ve toplam maksimum spesifik enerji absorpsiyonu değerlerinin maksimum olması amaçlanmış ve Çok Amaçlı Global Yanıt Yüzey Metodu ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemleriyle Pareto Grafiği elde edilerek kullanıcıya geniş bir tasarım alanı sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Çatı Ezilmesi Analizi, B Sütunu tasarım optimizasyonu, Sonlu elemanlar yöntemi, Yanıt yüzey, Bölgesel sıcak şekillendirilmiş çelikler

ABSTRACT

B PILLAR DESIGN OPTIMIZATION IN CASE OF CRUSHING OF VEHICLE ROOF

MSC THESIS

TAYFUN BAŞKARA

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

AUTOMOTIVE ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. İSMAİL ÖZTÜRK)

DENİZLİ, JANUARY 2022

In this study, the finite element model of the vehicle B pillar was divided into two different components in the horizontal plane and then three boron steels that shaped at three different temperatures were used in the vehicle B Pillar as a single or in combination. Boron steel material parameters are defined with Johnson Cook material model and Johnson failure model is also added. The strength to weight ratio (SWR) and specific energy absorption (SEA) of the vehicle, that roof crush analysis was performed in FMVSS 216 standards, were examined in IIHS standards. Dodge Neon model that Altair has prepared the finite element model, has been chosen as the vehicle model and no components have been deleted except for the wheels. Vehicle roof crush analysis model was prepared with Hyperworks preprocessor software and solved with Radioss solver. Analysis results were imported to HyperStudy software and an design of experiment (DOE) was established to increase the total resultant force and specific energy absorption. Design of experiment was solved in full factorial and for 4 levels, then experimental design curves were fitted with the most appropriate curve fitting method. In the single objective optimization, a constraint was determined for the maximum total resultant force and an objective function is established for the maximum specific energy absorption. In the single objective optimization study, optimum thickness values were found for the lower and upper part of the B Pillar with the Adaptive Response Surface Method and the Method of Feasible Directions. In the multi objective optimization study, it was aimed to maximize the total maximum resultant force and total maximum specific energy absorption values, and a wide design area was presented to the user by obtaining the Pareto Chart with the Multi Objective Global Response Surface Method and Multi Objective Genetic Algorithm method.

KEYWORDS: Roof Crush Analysis, B Pillar design optimization, Finite Element Method, Response Surface, Hot Forming Steels

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
2. ARAÇ GÜVENLİĞİ TARİHİ	5
2.1 Ölümlü İlk Trafik Kazası	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
3. ARAÇ GÜVENLİK SİSTEMLERİ	6
3.1 Aktif Güvenlik Sistemleri	6
3.1.1 Kilitlenme Önleyici Fren Sistemi (ABS)	7
3.1.2 Elektronik Denge Kontrolü (ESC)	7
3.1.3 Adaptif Seyir Kontrol Sistemi (ACC)	8
3.1.4 Lastik Basınç Monitörü (TPM)	8
3.1.5 Şerit Takip Sistemi (LDW)	9
3.1.6 Kör Nokta Uyarı Sistemi (BSM)	10
3.1.7 Sürücü Takip Sistemi (OSM)	10
3.1.8 Otonom Acil Frenleme (AEB)	11
3.2 Pasif Güvenlik Sistemleri	12
3.2.1 Hava Yastıkları	12
3.2.1.1 Ön Hava Yastıkları	13
3.2.1.2 Yan Hava Yastıkları	13
3.2.1.3 Diz Hava Yastıkları	13
3.2.1.4 Merkeze Monte Hava Yastıkları	14
3.2.1.5 Perde Hava Yastıkları	14
3.2.1.6 Yaya Hava Yastıkları	15
4. YÖNTEM	16
4.1 Araç Çatısı Ezilmesi Testi	17
4.1.1 Statik Yükleme Cihazı	20
4.1.2 Rijit Test Platformu	21
4.1.3 Kuvvet Ölçüm Cihazı	22
4.1.4 Sapma Ölçüm Cihazı	22
4.2 B1500HS Boron Çeliği.....	22
4.3 Çatı Ezilmesi Analizi	24
4.4 Deney Tasarımı, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Optimizasyon	31
4.4.1 Deney Tasarımı	32
4.4.2 Yanıt Yüzey Yöntemi	32
4.4.2.1 En Küçük Kareler Regresyonu (Least Squares Regressions LSR)	
.....	34
4.4.2.2 Hareketli En Küçük Kareler Methodu (Moving Least Squares	
Method MLSM)	35
4.4.2.3 HyperKriging (HK)	35
4.4.2.4 Radyal Temelli Fonksiyon (Radial Basis Function RBF)	36

4.4.3	Tek Amaçlı Optimizasyon	38
4.4.3.1	Adaptif Yanıt Yüzey Metodu (Adaptive Response Surface Method ARSM)	39
4.4.3.2	Global Yanıt Yüzey Metodu (Global Response Surface Method GRSM)	40
4.4.3.3	Kabul Edilebilir Yönler Metodu (Method of Feasible Directions MFD)	41
4.4.3.4	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm GA)	42
4.4.4	Çok Amaçlı Optimizasyon	43
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER	45
6.	KAYNAKLAR	59
7.	ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Ükelere göre 100.000 kişi başına trafik kazalarından ölüm oranları .	1
Şekil 3.1: ABS çalışma mantığı	7
Şekil 3.2: ESC Çalışma Mantığı	8
Şekil 3.3: TPM'in kadran üzerindeki sembolü	9
Şekil 3.4: Şerit takip sistemi	9
Şekil 3.5: Kör nokta uyarı sistemi	10
Şekil 3.6: Sürücü takip sistemi	11
Şekil 3.7: Otonom acil frenleme sistemi	12
Şekil 3.8: Ön hava yastıkları	13
Şekil 3.9: Diz hava yastıkları	14
Şekil 3.10: Merkeze monte hava yastıkları	14
Şekil 3.11: Perde Hava Yastıkları	15
Şekil 3.12: Yaya hava yastıkları.....	15
Şekil 4.1: Yöntem	16
Şekil 4.2: İki farklı aracın SWR değeri	18
Şekil 4.3: Çatı Ezilmesi Testi Blok Diyagramı	19
Şekil 4.4: Bir araç için örnek kuvvet-deplasman grafiği.....	20
Şekil 4.5: Test Cihazının Aracın Sol Tarafından Konumu	21
Şekil 4.6: Test Cihazının Aracın Ön Tarafından Konumu	21
Şekil 4.7: B1500HS gerilme-gerinim eğrileri	24
Şekil 4.8: Çalışmada kullanılan B Sütunu	25
Şekil 4.9: Test cihazını temsil eden plaka ve önden açısı	26
Şekil 4.10: Test cihazını temsil eden plaka ve soldan açısı	26
Şekil 4.11: Zorlanmış deplasman grafiği	27
Şekil 4.12: O25-T25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali	28
Şekil 4.13: O25-T400 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali	28
Şekil 4.14: T25-O25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali	29
Şekil 4.15: T25-T400 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali	29
Şekil 4.16: T400-O25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali	30
Şekil 4.17: T400-T25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali	30
Şekil 4.18: Klasik optimizasyon ve Metamodel Optimizasyon iş akışı	33
Şekil 4.19: Deney tasarımı noktalarının LSR, MLSM, HyperKriging ve RBF yöntemleri sonucunda ortaya çıkan eğri.....	36
Şekil 4.20: Adaptif Yanıt Yüzey Metodu iş akışı	39
Şekil 4.21: Global Yanıt Yüzey Metodu iş akışı	41
Şekil 4.22: Kabul Edilebilir Yönler Yöntemi iş akışı	42
Şekil 4.23: Genetik Algoritma iş akışı	43
Şekil 4.24: Çok amaçlı optimizasyon için amaç fonksiyonu ve Pareto alanı ...	44

Şekil 5.1: T400-T25 Kombinasyonu uygulanmış B Sütunu için enerji absorpsiyonu	46
Şekil 5.2: T400-T25 Kombinasyonu uygulanmış B Sütunu için toplam spesifik enerji absorpsiyonu.	46
Şekil 5.3: Tüm araç tepki kuvveti.	47
Şekil 5.4: Analiz sonucu çıkan SWR grafiği ile gerçek test sonucunda çıkan SWR değerlerinin karşılaştırılması	48
Şekil 5.5: MO-GRSM yöntemiyle elde edilen Pareto Noktaları	54
Şekil 5.6: MO-GA yöntemiyle elde edilen Pareto Noktaları	54
Şekil 5.7: Araç şasisinin analiz öncesi render görüntüsü	55
Şekil 5.8: Araç şasisinin analiz sonrası render görüntüsü	55
Şekil 5.9: t _{üst} :1,92 mm ve t _{alt} :1,5 mm için sağlama analizindeki enerji absorpsiyonu	56
Şekil 5.10: t _{üst} :1,92 mm ve t _{alt} :1,5 mm için sağlama analizindeki toplam SEA	56
Şekil 5.11: t _{üst} :1,92 mm ve t _{alt} :1,5 mm için sağlama analizindeki toplam tepki kuvveti	56

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Ülkelere göre 100.000 kişi başına trafik kazalarından ölüm oranları.	1
Tablo 4.1: SWR değerleri ve sonuçları	18
Tablo 4.2: B1500HS Boron Çeliği Spektrometre Sonuçları	23
Tablo 4.3: Farklı sıcaklıklarda şekillendirilmiş boron çeliklerinin Johnson Cook Malzeme ve Kopma parametreleri	24
Tablo 4.4: Johnson Cook malzeme parametreleri..	27
Tablo 4.5: Kombinasyon uygulanmamış çatı ezilmesi analizi sonuçları	31
Tablo 4.6: Kombinasyonlu çatı ezilmesi analizi sonuçları..	31
Tablo 5.1: Kombinasyon uygulanmamış çatı ezilmesi analizi sonuçları	45
Tablo 5.2: Kombinasyonlu çatı ezilmesi analizi sonuçları	45
Tablo 5.3: Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Sonuçları	48
Tablo 5.4: LSR yöntemiyle $m_{üst}$ (g) için eğri uydurma sonuçları.	49
Tablo 5.5: LSR yöntemiyle m_{alt} (g) için eğri uydurma sonuçları	50
Tablo 5.6: RBF yöntemiyle $E_{(SEA)}$ (j/g) için eğri uydurma sonuçları..	50
Tablo 5.7: MLSM yöntemiyle F_{total} (N) için eğri uydurma sonuçları	51
Tablo 5.8: ARSM yöntemi	52
Tablo 5.9: MFD yöntemi	52
Tablo 5.10: Sağlama analizinden çıkan sonuçların test modeli ve optimizasyon sonuçları ile karşılaştırılması	57

SEMBOL LİSTESİ

%	:	Yüzde işareti
GSMH	:	Gayrisafi Milli Hasıla
km/h	:	kilometre/saat
EGM	:	Emniyet Genel Müdürlüğü
vb.	:	ve benzeri
AMS	:	Advanced Mass Scaling
B1500HS	:	Boron Çeliği
FMVSS	:	Federal Motor Vehicle Safety Standarts
AMD	:	Advanced Micro Devices
GB	:	Gigabyte
MHz	:	Megahertz
SWR	:	Strength to weight ratio
DOE	:	Design of Experiment
E_{SEA}	:	Spesifik enerji absorpsiyonu
F_{total}	:	Toplam tepki kuvveti
MFD	:	Methods of Feasible Direction
ARSM	:	Adaptive Response Surface Method
MO-GRSM	:	Multi Objective Global Response Surface Method
MO-GA	:	Multi Objective Genetic Algorithm
ABS	:	Anti-Lock Braking System
ESC	:	Electronic Stability Control
ACC	:	Adaptive Cruise Control
TPM	:	Tire Pressure Monitoring
LDW	:	Lane Departure Warning
BSM	:	Blind Spot Monitoring
OSM	:	Occupant Safety Monitoring
AEB	:	Adaptive Emergency Braking
O25	:	25 C°'de şekillendirilip açık fırında soğutulan boron çeliği numunesi
T25	:	25 C°'de şekillendirilen boron çeliği numunesi
T400	:	400 C°'de şekillendirilen boron çeliği numunesi
FMVSS 216	:	Çatı Ezilmesi Testi Standartı
NHTSA	:	National Highway Traffic Safety Administration
IHS	:	Insurance Institute for Highway Safety
GVWR	:	Gross Vehicle Weight Rating
±	:	Artı-Eksi
C	:	Karbon
Si	:	Silisyum
Mn	:	Mangan
Cr	:	Krom
Mo	:	Molibden
B	:	Bor
C°	:	Santrigat Derece

MPa	:	Megapaskal
A	:	Akma gerilmesi
b	:	Plastik sertleşme parametresi
n	:	Plastik sertleşme üssü
d1	:	Kopmanın 1. parametresi
d2	:	Kopmanın 2. parametresi
d3	:	Kopmanın 3. parametresi
°	:	Derece
N	:	Newton
j	:	Joule
FAST	:	Fit automatically selected by training
LSR	:	Least Squares Regresions
Σ	:	Toplam sembolü
MLSM	:	Moving Least Squares Method
HK	:	HyperKriging
DACE	:	Bilgisayar Deneylerinin Tasarımı ve Analizi
RBF	:	Radial Basis Function
λ	:	Lambda
Φ	:	Fi
 	:	Mutlak Değer
<i>t_{alt}</i>	:	Alt B Sütunu Kalınlığı
<i>t_{üst}</i>	:	Üst B Sütunu Kalınlığı
SQP	:	Sequantial Quadratic Programing
g	:	Yerçekimi ivmesi
<i>m_{araç}</i>	:	Araç kütlesi
<i>m_{üst}</i>	:	Üst B Sütunu kütlesi
<i>m_{alt}</i>	:	Alt B Sütunu kütlesi

ÖNSÖZ

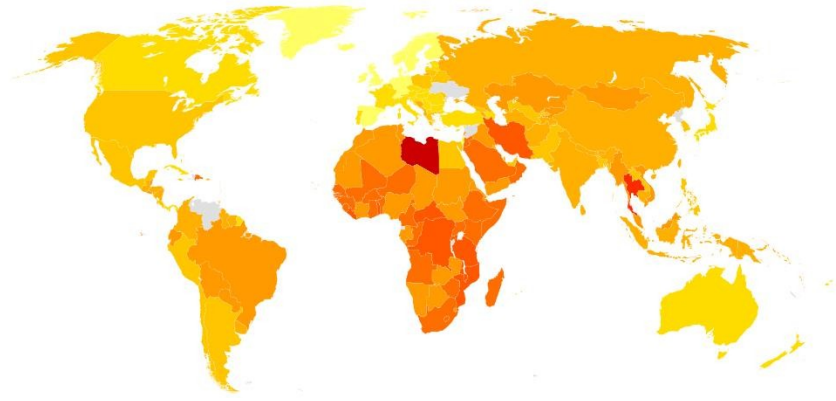
Çalışma sürecinde ve çalışma öncesinde, bana her zaman yol gösteren, tecrübelerini koşulsuz şartsız dinleyebildiğim, her zaman daha iyisi için fikirler veren ve tatil gününde olsa dahi çalışma hakkında toplantılar düzenleyebildiğim saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi İsmail ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çarpışma Testleri ve Simülasyonları hakkında içimde yatan ilgiyi, dışarıya vurmamı sağlayan lisans tezi danışmanım sayın Dr. Öğretim Üyesi Eylem YILMAZ ULU'ya teşekkür ederim.

Hayatımdaki her kararında arkamda duran, ellerinden gelen tüm desteği vererek beni motive eden ve çalışma azmimi arttıran, annem Saniye BAŞKARA'ya, babam Doğan BAŞKARA'ya ve nişanlım Aysel AKBAYLI'ya teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

5-29 yaş aralığındaki kişilerin en büyük ölüm sebebi olan trafik kazaları her gün milyonlarca insanın ulaşım rahatlığından dolayı kullanmış olduğu otomobiller sebebiyle meydana gelmektedir. Yaklaşık olarak incelenecek olursa, her yıl 1,3 milyon kişi trafik kazaları sonucu hayatını kaybetmektedir. Trafik kazalarından dolayı ortaya çıkan maddi kayıplar ise ortalama bir ülkenin yaklaşık %3'lük GSMH (Gayri Safi Milli Hasıla) denk gelmektedir. Ölümlü trafik kazalarının %93'ü az ve orta gelirli ülkelerde yaşanmaktadır ve ne yazık ki dünya üzerindeki otomobillerin %60'ı da bu ülkelerde bulunmaktadır (Pietrasik 2021).



Şekil 1.1: Ülkelere göre 100.000 kişi başına trafik kazalarından ölüm oranları (Pietrasik 2021).

Tablo 1.1: Ülkelere göre 100.000 kişi başına trafik kazalarından ölüm oranları (Pietrasik 2021).

5'ten az	15-20	30-35
5-10	20-25	35-40
10-15	25-30	40'tan fazla

Cinsiyete göre ölümlü trafik kazalarına bakılacak olursa, erkek sürücülerin karıştığı trafik kazaları kadınların karıştığı trafik kazalarına oranla daha çok ölümlü sonuçlanmaktadır. Yolda, araç hızı %2 arttığında, ölümlü kazaya %4 daha çok

yaklaşmaktadır. 65 km/h ve üzeri hızlarda yan çarpma durumlarında ölüm riski %85 ve üzerindedir (Pietrasik 2021).

Trafik.gov.tr istatistiklerine göre Türkiye’de 2020 yılında 17191 trafik kazası devrilme sebebiyle meydana gelmiştir. Devrilme sebepli kazalar, trafik kazalarının %11,4’ünü trafik kazalarındaki ölümlerin ise %33’ünü kapsamaktadır. Bu istatistikler göz ardı edilebilecek istatistikler olmadığı gibi tam aksine üzerinde çalışılma yapılması gereken istatistiklerdir. Öncelik trafik kazalarının önlenmesi gerektiği olsa da isminden de anlaşılacağı üzere bunlar kazadır. Önlenemeyen durumlarda ise en önemli konu araç güvenliğidir. Devrilme sebepli kazalarda aracın taşıyıcı sütunlarından olan B sütununun işlevi hayatidir. Tasarımsal, malzeme seçiminden ya da kötü bir montaja dayalı B sütunu, kazada hayatlara etmektedir. B sütununun mukavemeti ve enerji absorpsiyon değeri kaza sonrasında ortaya çıkacak senaryoları doğrudan etkilemektedir. Devrilme sebepli trafik kazalarında, darbe ilk olarak kafa ve boyun çevresinden alınacağı için ölüm riskinin artışı öngörülemezdir (EGM 2020).

Yakıt verimliliğini arttırmak ve gaz emisyonunu düşürmek için uygulamaya başlanan katı standartlar, araç üreticilerini oldukça zorlamaktadır. Katı standartlara uyabilmek için şirketler tasarım, malzeme, test ve simülasyonlara yönelmek durumunda kalmışlardır. Araç şasisi ve karoseri, tüm araç kütlelerinin yaklaşık %35’ini oluşturduğu için, şasi üzerindeki kütle azaltma çalışmaları, tüm araç kütlelerini azaltmada büyük bir rol oynamaktadır. Araç şasi komponentlerinin güçlendirme çalışmalarında, tasarım, malzeme seçimi, simülasyon ve optimizasyon artık büyük bir yer edinmiştir. Emisyon regülasyonlarına uymak için araç komponenti hafifletme çalışmaları yapılırken aynı zamanda güvenlik regülasyonlarına da uymak ve güvenlik derecelerini düşürmemek gereklidir. Araç şasi komponentlerini hafifletme çalışmalarında, kullanılan malzemelerin mukavemet değerini düşürmeden hafif malzemeler kullanmak için tasarım, simülasyon ve optimizasyon aşamalarında çok dikkat edilmelidir. Herhangi bir yanlış simülasyon veya yanlış optimizasyon, şirkete kalıp maliyeti, hammadde maliyeti ve çalışma saati olarak negatif yansıyacaktır. Optimizasyon çalışmaları doğru yapıldığı takdirde yeteri oranda kütle azaltmasını gerçekleştirebilir. Elde edilen optimizasyon sonuçları, gerçek bir uygulamada üretilebilirliğine göre yorumlanmalıdır. Sil baştan kalıp-prototip-test üçgenini uygulamaktansa bilgisayar üzerinde bir yazılım kullanarak tasarım optimizasyonu

gerçekleştirip sonuçlara güvenmek, zaman ve para açısından oldukça karlıdır. Tüm bu adımları gerçekleştirirken, optimizasyon yapılan parçanın, çarpışma güvenliği derecelendirmelerinde bir azalma olmamalı mümkünse artması gerekmektedir.

Otomotiv şasi komponentlerinin optimizasyonundaki ana amaç güvenlik değerlerini arttırarak ya da sabit tutarak, şekil, malzeme parametreleri, kalınlık vb. parametreleri üzerindeki değişikliklerle hafifletme çalışmasını tamamlamaktır. Yapılacak olan optimizasyon çalışmaları, gerçek test maliyetine göre daha kısa sürecek ve daha az parçaya mal olacaktır. Yeni nesil iş istasyonlarının da sürekli geliştirilmesiyle, simülasyon süreleri de azalmaktadır. Aynı zamanda daha iyi bir sonlu elemanlar yapısı oluşturularak daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

Analiz süreci öncesinde, sonlu elemanlar modeli doğrusal olmayan çarpışma analizlerinin parametrelerine uygun bir şekilde hazırlandıktan sonra, bağlantılar malzeme kartları varsa kopma modelleri, özellik ve temas tanımlamalarını doğru modellemek önemlidir. Bu tanımlamaların yanlış yapılması sonucu, analizi yapılan araç gerçeğe uygun bir şekilde davranış göstermeyecektir. Özellik tanımlarken yapılacak hatalar sıfır enerji modlarını ortaya çıkarabilmektedir. Eğer model üzerinde ileri kütle ölçekleme (AMS) uygulanacaksa, zorlanmış zaman adımı değeri analiz modeline uygun girilmediği takdirde, kütle hatası ve enerji hatası fazla çıkacaktır ve gerçeklikten uzak olacaktır. İleri kütle ölçekleme (AMS), Radioss çözücüsünde yarı statik analizler için önerilmektedir ve yüksek ivme değerlerinin olduğu analiz modellerinde kesinlikle kullanılmamalıdır.

Bu tez çalışmasında, analiz modeline uygulanan malzeme parametreleri gerçek testlerden elde edilmiştir. Testler ve sonuçları (Tang ve diğ. 2019)'nin yapmış olduğu çalışmadan alınmıştır. Altair sitesinde de bulunabilecek olan yaklaşık 300.000 elemana sahip Dodge Neon modeli analiz için seçilmiştir (<https://altairuniversity.com/modeling/model-repository/>). Çatı ezilmesine uygun sonlu eleman parametrelerine uygun bir şekilde sonlu elemanlarda düzenlemeler yapıldı. Çalışma için oldukça önemli olan şasi komponentleri, olabildiğince iyi bir sonlu elemanlar yapısına sahip olacak şekilde düzenlenmiştir. Çalışmada, çatı ezilmesi güvenlik standartları için en önemli komponent olan B sütunu için tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Dodge Neon modelinin malzeme kartlarının akma değeri oldukça düşük olduğu için B sütunu haricinde bazı çatı komponentlerine de çift

fazlı çelik malzeme parametreleri tanımlanmıştır. Bölgesel sıcak şekillendirmeyi temsil edebilmek için B sütunu gerçeğe uygun şekilde, yatay düzlemde ikiye bölünmüştür ve B1500HS çeliğinin farklı sıcaklıklarda şekillendirilmesi sonucu ortaya çıkan parametreler kullanılmıştır. FMVSS 216 standartlarına uygun çatı ezilmesi analiz modeli kurulmuştur ve AMD Ryzen 7 3700x işlemci ve 32 GB 3200 MHz belleğe sahip bilgisayarda 75 dakikada analiz gerçekleştirilmiştir. Çatı ezilmesi testlerinde, rijit bir piston araç çatısından, B sütununa hizalı bir şekilde 127 mm (5 inç) ezerken ortaya çıkan kuvvet dikkate alınmaktadır. Gerçek bir kazada devrilen aracın ağırlığı, ortaya çıkacak ezilme kuvvetini doğrudan etkilemektedir. Test sonucu ortaya çıkan kuvvet, araç brüt ağırlığına bölünerek SWR (strength to weight ratio, mukavemet- ağırlık oranı) değeri elde edilmektedir ve güvenlik skalası olarak kabul edilmektedir.

Optimizasyon çalışmaları için iki farklı komponente bölünen B sütununun, alt ve üst komponentlerinin kalınlık parametreleri belirlenmiştir. İki farklı komponente bölündüğü için 4 seviye için 16 farklı analiz gerçekleştirilmiştir ve belirli aralıklarda değerler bulunmuştur. DOE sonuçlarının en uygun eğri uydurma metoduyla eğri uydurması gerçekleştirilerek fonksiyonlar elde edilmiştir. Tek amaçlı optimizasyon çalışması modeli, maksimum toplam SEA'yı elde ederken toplam tepki kuvveti kısıdının da karşılanması oldu. MFD ve ARSM yöntemlerinden optimum sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen optimum kalınlık değerleri ile sonuç doğrulama analizi gerçekleştirildi ve optimizasyon çalışması doğrulandı. Optimizasyon çalışması sonrasında B sütunu toplam kütlelerinden %13,3 tasarruf edildi. Tek amaçlı optimizasyon çalışması sonrasında SWR değeri 5,03'ten 5,04'e, E_{SEA} ($\frac{j}{g}$) değeri 0,158 j/g'dan 0,176 j/g'ya ve F_{total} (N) değeri 48831 N'dan 48918,304 N'a yükselmiş oldu.

Çok amaçlı optimizasyon modeli maksimum toplam SEA ve maksimum toplam tepki kuvvetini elde etmek için kuruldu ve bu kapsam MO-GRSM ve MO-GA metodları ile Pareto Grafikleri elde edilerek kullanıcıya geniş bir tasarım alanı sunuldu.

2. ARAÇ GÜVENLİĞİ TARİHİ

Otomobilin icat edilmesi yaşayan herkesin hayatına etki etmiştir. Yürümekten daha hızlı bir ulaşım sağlamasından dolayı, yaşamın her alanına yeni fırsatlar getirmiştir. Ancak tehlikeler kısa sürede gün yüzüne çıkmaya başladı. 1910'lu yıllar boyunca hız, dikkatsiz sürüş sebebi ile oluşan kazalar ve yaya ölümleri, çözüm gerektiren yeni sorunlardı. Otomotiv endüstrisi, kaza raporları üzerinde incelemeler gerçekleştirerek, öne çıkan ölüm nedenlerini araştırmaktaydı. Otomotiv endüstrisi, araçların uygun şekilde sürülmeleri durumunda kazaya sebep olmayacaklarını savunmaktaydı. Ancak araç kazaları, Dünya üzerinde ölüm sebeplerinin önde gelenlerinden olmuştur.

2.1 Ölümlü İlk Trafik Kazası

Ölümlü ilk trafik kazası 152 yıl önce, 31 Ağustos 1869'da İrlanda'da meydana geldi. Bilim insanı olan Mary Ward, bilim insanı olarak tarihte adını duyurmasına karşılık, dünyada, trafik kazasında hayatını kaybeden ilk kişi olarak da bilinmektedir. Mary Ward, kaza hangi sebeple olduğu bilinmese bile, araçtan fırlamış ve boynu tekerleklerin altında kalmasına bağlı kırıldıktan sonra hayatını kaza yerinde kaybetmiştir (Kean 2019).

Washington Post gazetesine göre, trafik kazalarında ilk yaya ölümü 17 Ağustos 1896'da meydana geldi. Bridget Driscoll, Londra'da bir arabanın ona çarpması sonrası hayatını kaybetmiştir (Kunkle 2018).

3. ARAÇ GÜVENLİK SİSTEMLERİ

Sağlam bir araç şasisi, koruma sistemleri ve aktif güvenlik destek teknolojilerinin birleşimi, bir çarpışmada en iyi hayatta kalma şansını sağlamaktadır. Yaralanmayı ve ölümleri en aza indirmektedir. İnsan hayatı söz konusu olduğunda, araç güvenliğini arttırmaya yönelik odak her zaman artmak zorundadır. Ancak hayat kurtaran teknolojilerin kullanılabilirliği ve kullanıma açılması ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Ekonomik olarak gelişmiş ülkeler, bu teknolojileri çeşitli binek ve ticari araç segmentlerinde yüksek oranda kullanabilmektedir.

Bir aracın şasisinin mukavemet değeri çarpışma sonrası ortaya çıkan enerjinin ne kadarını absorbe ettiğine bağlıdır. Bu, markadan markaya ve modelden modele büyük ölçüde değişmektedir. Araç mukavemetini arttıran parçaların tasarımı, bu parçalar için seçilen malzemeler, üretim yöntemleri ve araca nasıl montajlandığı yapısal güvenlik için en önemli faktörlerdir. Aynı ayrı hepsinin güvenlik faktörlerinde etkisi vardır. Bu sebeple yüksek mukavemetli malzemelerin geliştirilmesiyle ilgili, yapısal tasarımlar ile ilgili ve bu uygulamaların testleri ve simülasyonları ile ilgili yapılan çalışmalarda hata yapılmamalı veya hata en aza indirilmelidir (ANCAP.com 2020).

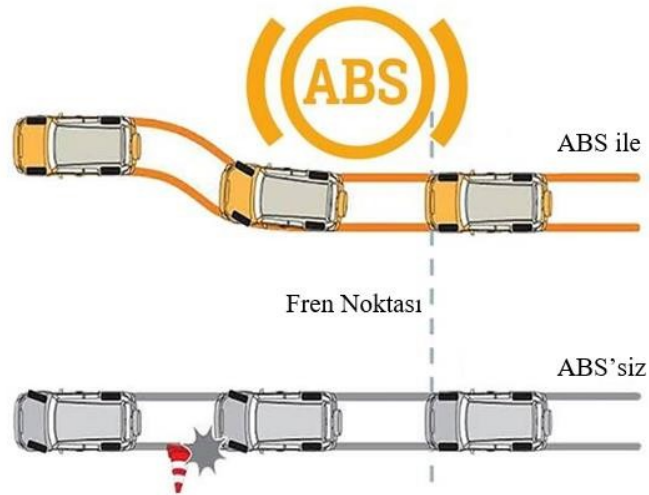
3.1 Aktif Güvenlik Sistemleri

Sürücünün bir çarpışmadan kaçınmasına veya şiddetini azaltmasına yardımcı olan yarı otonom ve otonom güvenlik teknolojileridir.

Aktif Güvenlik Sistemleri, önceden uyarı vererek veya sürücüyü aracı yönlendirmede ek yardım sağlayarak çarpışmaları azaltmada önleyici bir rol oynamaktadır. Bu tür güvenlik sistemleri, kaza esnasında ya da kaza sonrasında değil, kazayı önlemek ve sürüş konforunun kaybedilmemesi amacıyla devreye girmektedir. Bu sistemlerin bazıları, şoför eliyle devre dışı bırakılabilir ama bu asla önerilmemektedir. Böyle bir durumda araç garanti ve sigorta kapsamından çıkarılmaktadır (ANCAP.com 2020).

3.1.1 Kilitlenme Önleyici Fren Sistemi (ABS)

Kilitlenmeyi Önleyici Fren Sistemleri (ABS), fren pedalına uygulanan basınçtan meydana gelebilecek tekerlek kilitlenmelerini önlemekte ve kaymamayı sağlamaktadır. Ani fren pedalına basışlarda ve kısa mesafede durma denemelerinde devreye girmektedir. Kilitlenmeyi Önleyici Fren Sistemlerine sahip olmayan ya da devre dışı bırakılan araçlarda, ani bir şekilde yapılan frenlemeden sonra araç kızak gibi kayma eğilimi göstermektedir. Sürücünün direksiyon kontrolünü kaybetmemesini sağlayarak savrulmayı ve çekiş kaybını önleyerek, frenleme sonrasında aracın güvenli bir şekilde yoluna devam etmesini sağlamaktadır. Kilitlenmeyi Önleyici Fren Sistemleri, özellikle sıcak asfaltlarda veya ıslak koşullarda efektif çalışmaktadır (Kartik 2019).

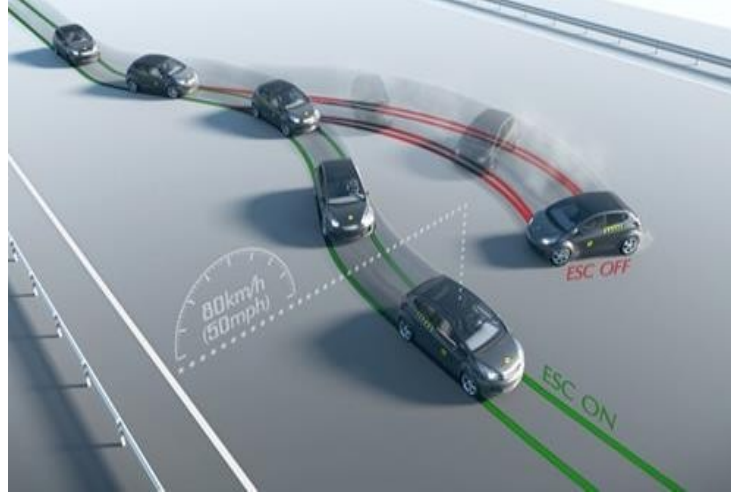


Şekil 3.1: ABS çalışma mantığı (Kartik 2019).

3.1.2 Elektronik Denge Kontrolü (ESC)

ESC, sürücünün araç kontrolünü elinde tutmasına yardımcı olmakta oldukça etkilidir, böylece olası kaza durumundaki çarpışmaları önlemekte veya kaza sonrası etkilerini azaltmaktadır. ESC, araçtaki çekiş kaybını algılar ve çekiş kaybını azaltarak aracın dengesini artırarak stabil bir sürüş deneyimine olanak tanımaktadır. Sürücünün araç kontrolünü kaybettiği ve savrulmaya başladığı durumlarda devreye girmektedir.

Bir sürücünün önüne ani bir engel çıktığında, doğal refleksi, engelle çarpışmaktan kaçınmak için hızla engelden uzaklaşmaya çabalamaktır. Bu ani hareket, aracın bir yöne keskin bir şekilde yönelmesine ve ardından kontrolünü kaybederek, tam tersi yöne savrulmasıyla sonuçlanmaktadır. Aracın kaymasına veya yuvarlanmasına neden olarak çoğu zaman ciddi bir çarpışmaya sebep olmaktadır. ESC bu durumun önlenmesine yardımcı olmaktadır (Wang ve diğ. 2018).



Şekil 3.2: ESC Çalışma Mantığı (EuroNCAP.com 2013).

3.1.3 Adaptif Seyir Kontrol Sistemi (ACC)

ACC, aynı şeritte ilerleyen araçların hızlarını tespit etmek için radar veya benzeri bir teknoloji kullanır ve güvenli seyahat mesafesini korumak için araç hızını kontrol etmektedir. Aracın, önündeki araca hızlı bir şekilde yaklaşması durumunda otomatik olarak frenleyerek mesafeyi korumasını sağlamaktadır (Yu ve Wang 2021).

3.1.4 Lastik Basınç Monitörü (TPM)

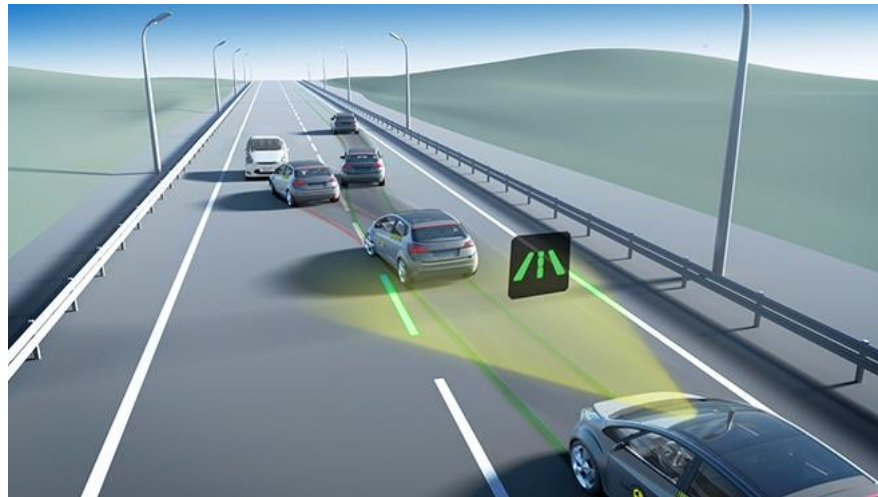
TPM sistemleri, lastik basıncı belirlenen basıncın altına düştüğünde sürücüyü uyarmak için sensörler kullanır ve bunu kadran ekranı veya konsol ekranına yansıtmaktadır (Bridgestonetire.com 2021).



Şekil 3.3: TPM'in kadran üzerindeki sembolü (Bridgestonetire.com 2021).

3.1.5 Şerit Takip Sistemi (LDW)

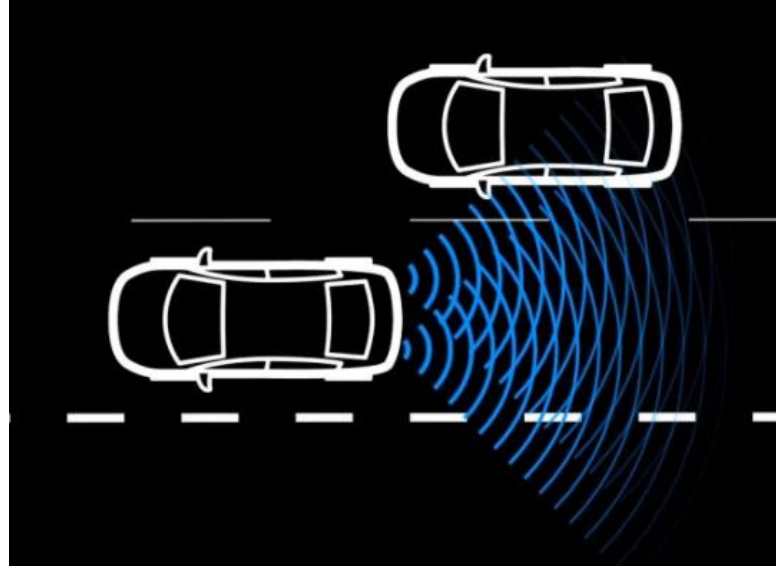
Ani bir şekilde yapılan şerit değişikliklerinden dolayı birçok kaza gerçekleşmiştir ve gerçekleşmeye devam etmektedir. Araçlar kontrolden çıkmış ve dikkatsizliğin de etkisiyle kazalar yaşanmıştır. Şerit Takip Sistemi, şeridinden çıkan bir aracın yönünü düzeltmeye yardımcı olmaktadır. Çoğu zaman, sürücüyü aracın yolunu düzeltmeye çalışmak için bir uyarı verilir, ancak bu sistemler, aracın şeridinden ayrılmasını durdurmak için az miktarda da olsa direksiyonu oynatmaktadır. Yalnızca kritik bir durum tespit edildiğinde çok daha sert bir şekilde direksiyona müdahale etmekte ve aracın şeridine dönmesini sağlamaktadır (Penmetsa ve diğ. 2018).



Şekil 3.4: Şerit takip sistemi (EuroNCAP 2020).

3.1.6 K r Nokta Uyarı Sistemi (BSM)

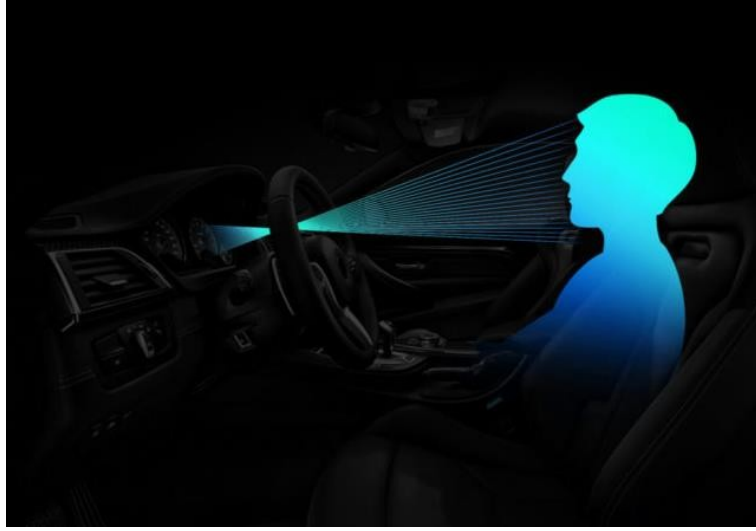
BSM, sistemleri, aracın bitişindeki şeritteki, sürücünün "k r noktasını" izler ve sürücünün k r noktasında eğer bir araç varsa görsel, sesli bir alarm veya direksiyon simidinin titreşimi ile sürücüyü uyarılmaktadır (Choksey 2021).



Şekil 3.5: K r nokta uyarı sistemi (Choksey 2021).

3.1.7 Sürücü Takip Sistemi (OSM)

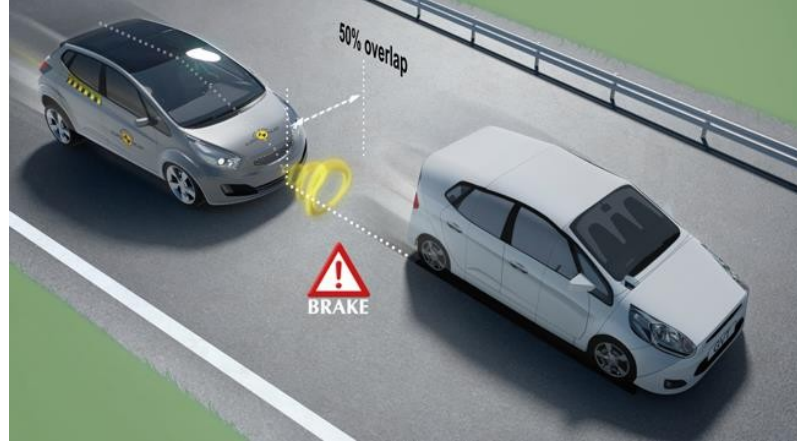
Bu güvenlik sistemi, sürücüyü izleyebilmek için kızılötesi sensörler kullanılmaktadır. Kadranın hemen üzerine yerleştirilmiş olan sensörler ile sürücünün gözlerini takip etmekte ve sürücü yola devam edemeyecek hale geldiğini tespit ettiğinde sürücüyü uyarılmaktadır (Lampinen 2020)



Şekil 3.6: Sürücü takip sistemi (Lampinen 2020).

3.1.8 Otonom Acil Frenleme (AEB)

Arkadan çarpmalar, yollarda en sık denk gelinen kazalardan birisidir. Bu tip kazalar, sürücünün dikkatinin dağıldığı ve önündeki trafiğin durduğunu, durma noktasına geldiğini fark edemediği bir şehir ortamında veya çevre yollarında meydana gelmektedir. AEB sistemleri, aracın önünde potansiyel bir tehlikenin varlığını tespit etmek ve sürücünün bunu zamanında yapmadığı durumlarda, bir çarpışmayı önlemek, şiddetini azaltmak amacıyla fren yapmak için sensörler kullanmaktadır. Tipik olarak kullanılan sensörler kameralar, radarlar ve lidarlardır. Çoğu sistem, otonom frenlemeyi önden çarpışma uyarısıyla birleştirmekte ve bu uyarı, sürücüyü harekete geçmesi için zamanında potansiyel bir tehlikeye karşı hareketine teşvik etmektedir. Sürücü zamanında frenleme yapmaz ise, sistem acil frenleme yapmak için araca müdahale etmektedir (Wang ve diğ. 2018).



Şekil 3.7: Otonom acil frenleme sistemi (EuroNCAP.com 2020).

3.2 Pasif Güvenlik Sistemleri

Hava yastıkları, emniyet kemerleri ve emniyet kemeri ön gergi sistemi gibi zorunlu güvenlik sistemleri, çarpışma kuvvetlerini önlemeye yardımcı olmaktadır.

Pasif Güvenlik Sistemleri, herhangi bir çarpışma/kaza durumunda sürücü, yolcu ve yayalarda meydana gelebilecek yaralanmaların ve ölümlerin sınırlandırılmasına hizmet etmektedir. Çarpışma öncesinde değil çarpışma sırasında çalışmaktadırlar.

3.2.1 Hava Yastıkları

Hava yastığı, şişebilir bir kumaştan oluşan bir araç güvenlik cihazıdır. Hava yastığı modülü, bir çarpışma sırasında hızla şişecek ve çarpışma sırasında yolculara ek koruma ve kısıtlama sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Hava yastıkları havalandırma deliklerine sahiptirler. Kontrollü bir hava tahliyesine izin vererek, yolcular arasında ve otomobillerin içinde bir enerji emici yüzey sağlamaktadırlar. Orta hava yastıkları, yan darbeye sürücü ve ön yolcu arasında şişer, böylece yolcuların otomobilin diğer tarafına savrulma mesafesini azaltır ve bazı durumlarda kafa teması gibi yolcudan yolcuya yaralanmalara karşı koruma sağlamaktadır. Hava yastıkları yalnızca emniyet kemerleri takılıysa etkilidirler (Wang ve diğ. 2018).

3.2.1.1 Ön Hava Yastıkları

Ön hava yastıkları, çarpışma kuvvetinin 25 km/h'den daha yüksek bir hızda çarpışmalarda açılmaktadır. Ön hava yastığı, çarpışma sırasında, yolcuların iç konsola doğru savrulurken ki hızını yavaşlatmaktadır. Darbeyi minimize etmekte ve ön hava yastıkları genellikle çarpışmadan sonra sönmektedirler (Nambiar 2021)



Şekil 3.8: Ön hava yastıkları (Nambiar 2021).

3.2.1.2 Yan Hava Yastıkları

Yan hava yastıkları, kavşaklarda veya aracın yan panellerinden çarpması gibi durumlarda yolcuları korumak için açılır. Yan hava yastıkları hem ön hem de arka koltuktaki yolcuların başını ve gövdesini korumaktadır. Bu hava yastıkları ayrıca devrilme kazalarında koruma sağlayabilmektedir (D'Elia ve diğ. 2013)

3.2.1.3 Diz Hava Yastıkları

Diz hava yastıkları, konsol ile direksiyonun arasında hizalanacak şekilde konumlandırılmıştır. Diz sağlığını korumak için aktif olurlar ve dizlerin direksiyon ve konsolun alt hizasına sıkışmasından dolayı oluşabilecek yaralanmaları minimize etmektedir (Bansal 2019).



Şekil 3.9: Diz hava yastıkları (Bansal 2019).

3.2.1.4 Merkeze Monte Hava Yastıkları

Yandan çarpma veya devrilme kazalarında ön koltukta oturan iki kişinin kafaları arasında darbeyi önlemek için tasarlanmıştır. Bu hava yastıkları sürücü koltuğunun yanından açılmaktadır. Boyun ve omurga yaralanmalarını en aza indirmesi amaçlanmıştır (Yirka 2011).



Şekil 3.10: Merkezi monte hava yastıkları (Yirka 2011).

3.2.1.5 Perde Hava Yastıkları

Perde hava yastıkları, önde veya arkada oturan yolcuların başları için ek güvenlik sağlamaktadır. Direkler ve ağaçlar gibi çapı dar cisimlerle çarpışmaya karşı

Özellikle etkilidirler. n hava yastıklarının aksine, perde hava yastıkları çarpmadan sonra ŐiŐmiŐ halde kalır ve devrilme kazasında emniyet kemeri takmamıŐ bir yolcunun araçtan fırlama riskini azaltır (IIHS 2021).



Şekil 3.11: Perde hava yastıkları (IIHS 2021).

3.2.1.6 Yaya Hava Yastıkları

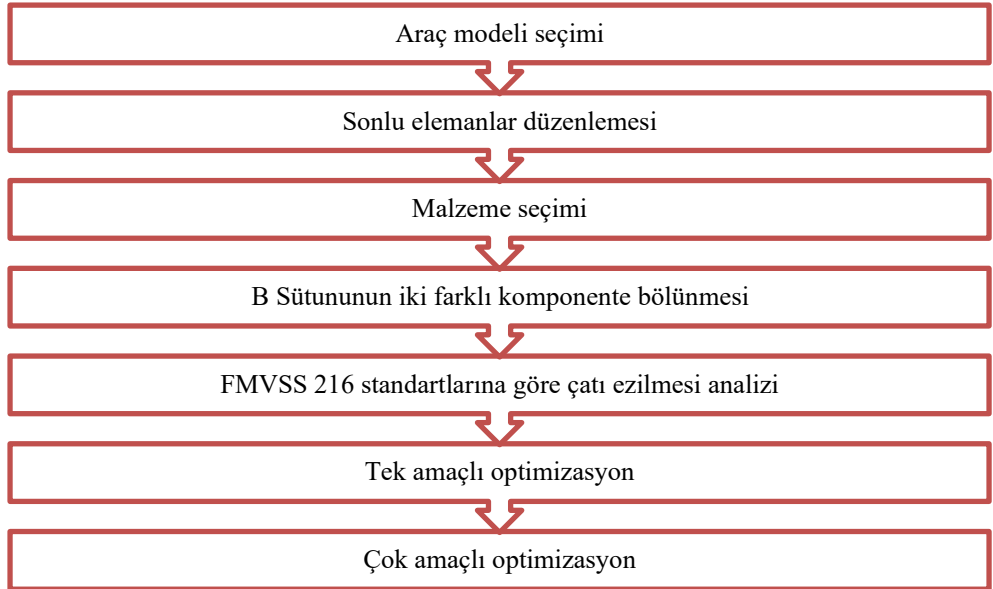
n camın tabanına harici olarak monte edilen yaya hava yastıkları, yetiŐkin bir yayanın başını korumak için tasarlanmıştır. Yaya hava yastıkları, n camın alt kısmını ve n cam silecekleri gibi sert bileŐenleri kapsayacak Şekilde Şişer ve 20 ila 50 km/s arasındaki hızlarda açılmaktadır (Yang ve diğ. 2015).



Şekil 3.12: Yaya hava yastıkları (Volvocars.com 2020).

4. YÖNTEM

Bu çalışmada çatı ezilmesi analizi sonucu B sütunu tasarım optimizasyonunun nasıl gerçekleştirilebileceği incelenmiştir. B sütunu çarpışma dayanıklılığı için tek ve çok amaçlı optimizasyonlar kurulmuştur. Bu kapsamda, çatı ezilmesi analizi ve optimizasyon yöntemleriyle ilgili çalışmalar aşağıda bulunmaktadır. Malzeme testleri ve parametreleri (Tang ve diğ. 2019)'nin çalışmasından alıntılıdır. Çalışma gerçekleştirilirken ilk olarak Şekil 4.1'deki yol haritası oluşturuldu. Oluşturulan yol haritası çalışma gerçekleştirilirken referans olarak kullanıldı. İlk olarak kullanılacak olan araç modeli belirlendi. Tam araç modeli için seçilmiş olan Dodge Neon sonlu elemanlar modelinde sonlu elemanlar düzenlemeleri gerçekleştirildi ve analiz zaman adımının büyümesi sağlandı.



Şekil 4.1: Yöntem.

Farklı sıcaklıklarda şekillendirilmiş boron çeliği için literatür taraması yapıldı ve Radioss doğrusal olmayan açık yöntem çözücüsüne uygun Johnson Cook Parametrelerine sahip, sıcak şekillendirilebilir B1500HS çeliğinde karar kılındı. Üç farklı sıcaklıkta şekillendirilmiş boron çeliği için malzeme parametreleri seçildi. Farklı sıcaklıklarda şekillendirmenin B Sütunu çatı ezilmesi performansına etkisini gözlemleyebilmek için B Sütunu yatay düzlemde ikiye bölünerek iki farklı komponent oluşturuldu. İki farklı komponente ayrılan B Sütununun alt ve üst parçasına farklı malzeme parametreleri tanımlandı. Yarı statik çatı ezilmesi analizi yapıldı. O25 olarak

adlandırılan ısıtıl işlem görmüş numune, ferritik ve perlitik fazların bir karışımını göstermektedir. Açık fırın ile soğutulan numune olan O25 numunesi için gerilme-gerinim eğrisi, şekillendirme uygulanmadan önceki sac numunesi B1500HS'ninkine benzerdir. T25 numunesinin, tamamen martenzitik bir mikroyapıda olduğu tespit edilmiştir. T400 numunesinin mikroyapısı, ferritik, martenzit ve beynit kombinasyonlarından oluşmaktadır. T400 numunesinin düzgün uzaması minimumdur ve en zayıf sünekliği göstermektedir. Numunelerin isimlerinde yer alan sayılar şekillendirme sıcaklıklarını betimlemektedir. Enerji absorpsiyonu ve toplam tepki kuvveti için en ideal davranışı T400-T25 kombinasyonlu B sütunu gösterdi. İkiye bölünmüş olan B sütununun üst parçası T400 ve alt parçasına T25 parametreleri uygulandı. Toplam tepki kuvvetini belirli bir kısıtın üstünde olması, enerji absorpsiyonunun maksimum olması için tek amaçlı optimizasyon çalışması yapıldı. Toplam tepki kuvveti ve enerji absorpsiyonunun maksimum olması için çok amaçlı optimizasyon çalışması yapıldı ve Pareto Optima grafiği elde edildi.

4.1 Araç Çatısı Ezilmesi Testi

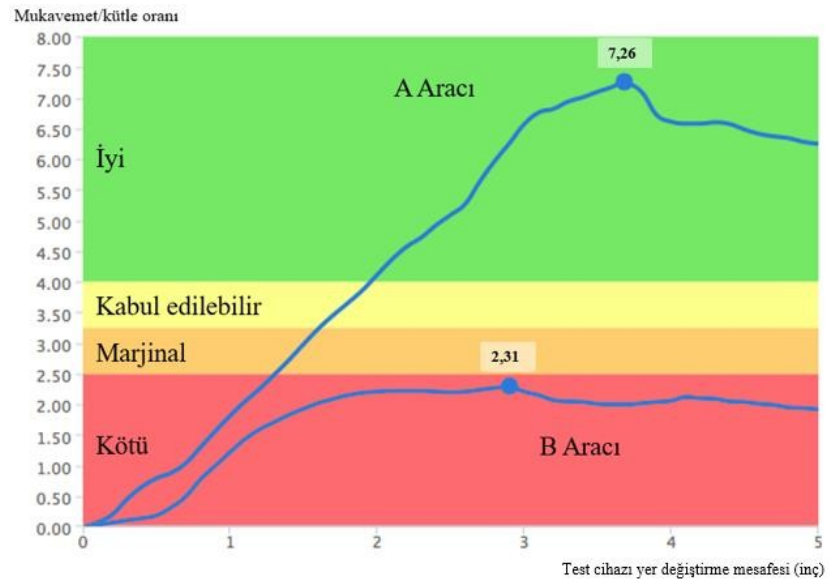
Trafik.gov.tr istatistiklerine göre Türkiye'de 2020 yılında yaklaşık 17191 trafik kazası, devrilme sebebiyle meydana geldi. Devrilme sebepli kazalar, trafik kazalarının %11,44'ünü trafik kazalarındaki ölümlerin %33'ünü kapsamaktadır. Devrilme durumunda, araç çatısı deforme olma eğilimindedir ve deformasyon yönü yolcuya doğrudur. Yolcunun hayatta kalması için yaşam alanı daralmış olur. Bu sebeple devrilme kazalarında her zaman için daha güçlü bir araç çatısı gereklidir.

FMVSS 216 (Federal Motor Vehicle Safety Standarts) standartlarında çatı darbe testleri, 1829x762 (mm) ölçülü bir pistonun, kuvvet merkezi B Sütununa göre hizalandıktan sonra, 5 inç (127 mm) yer değiştirme içerisinde ortaya çıkan en büyük kuvveti belirlemek amacıyla yapılmaktadır (NHTSA 2009).

NHTSA ortaya çıkan kuvvetin, aracın 3 kat ağırlığına eşit veya daha fazla olmalı şeklinde yorumlarken, IIHS ortaya çıkan kuvveti, araç ağırlığına bölerek SWR (mukavemet/kütle oranı) oranı oluşturmaktadır. 2.5 SWR altındaki değerler kötü, 2.5-3.25 SWR arası değerler marjinal, 3.25-4 SWR arası değerler kabul edilebilir ve 4 SWR üstü değerler iyi olarak yorumlanmaktadır (IIHS 2016).

Tablo 4.1: SWR değerleri ve sonuçları (IIHS 2016).

SWR	SONUÇ
$SWR < 2.5$	Kötü
$2.5 < SWR < 3.25$	Marjinal
$3.25 < SWR < 4$	Kabul Edilebilir
$SWR > 4$	İyi



Şekil 4.2: İki farklı aracın SWR değeri (IIHS 2016).

Binek araçlar için devrilmeye karşı dayanıklılık şu anda FMVSS 216 standartlarında çatı ezilmesi testi ile değerlendirilmektedir. IIHS tarafından daha önce yürütülen araştırmalar, bir aracın SWR değeri ile gerçek dünyadaki yaralanma potansiyeli arasında genel bir ilişki olduğunu göstermektedir (NHTSA 2009).

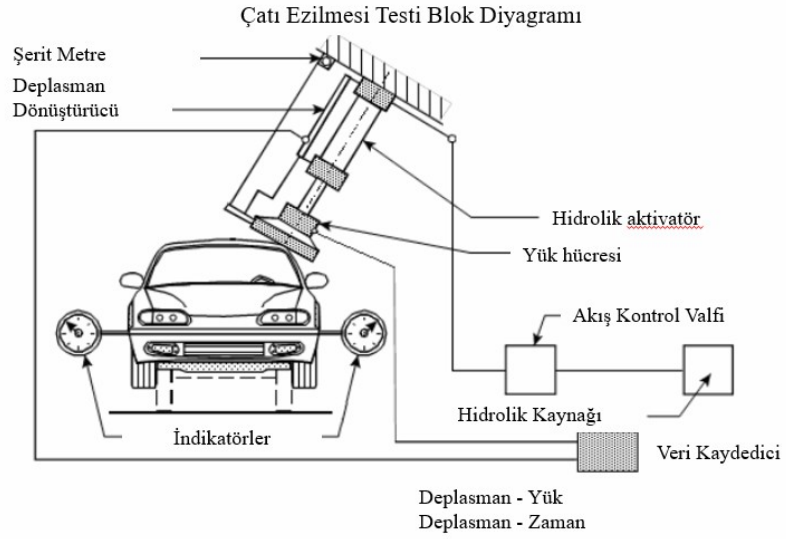
FMVSS 216, araç çatısı ezilme test protokolü, 2722 kilogram veya daha düşük GVWR yani brüt araç ağırlığı sahip binek otomobillerin, çok amaçlı binek araçların, kamyonların ve otobüslerin yolcu kabini çatısı için dayanıklılık gerekliliklerini belirlemektedir (NHTSA 2009).

Standartın amacı devrilme kazalarında, tavanın yolcu bölmesine çarpması sonucu meydana gelen ölüm ve yaralanmaları azaltmaktır. Öngörülen statik yükleme cihazı, 762 milimetre x 1.829 milimetre olan sert, deforme olmayan dikdörtgen bir bloktur. Bir aracın B sütununa göre çatısında hizalandıktan sonra kuvvet

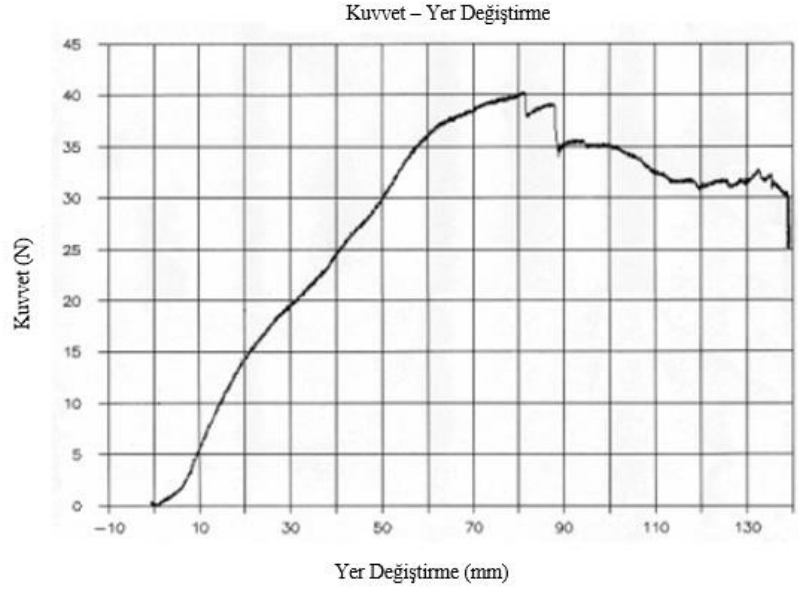
uygulanđında, aracın tepki yükünü elde etmek için 127 milimetreden fazla hareket etmemelidir (NHTSA 2009).

Araç çatı yapısının hem sol hem de sağ bölgeleri, çatı ezilmesi testi gereksinimlerini karşılayabilecek kapasitede olmalıdır. Ancak Şekil 4.3'deki çatı ezilmesi testi blok diyagramından da anlaşılabilir üzere bir araç tek bir bölgesinden test edildikten sonra aynı aracın diğer bölgesine de test uygulanmasına gerek yoktur. Araç, test için rijit yatay bir platform üzerine yerleştirilmeli ve sabitlenmelidir. Aracın camları kapatılmalı ve kapılar kilitlenmelidir. Varsa açılır tavanlar kapatılmalı ve çıkarılabilir çatı yapısı, yolcu bölmesi üzerinde yerine sabitlenmelidir (NHTSA 2009).

Kuvvet, statik yükleme cihazının araç çatısını 5 inç (127 mm) ezmesine kadar uygulanmalıdır. Statik yükleme cihazının alt yüzeyine dik olarak aşığı yönde, saniyede 13 milimetreden fazla olmayan bir hızda uygulanmalıdır. Herhangi bir aracın çatısı sadece bir taraftan test edilmektedir. Aracın sol veya sağ tarafı test edilebilir. Her bir araç çatısına test uygulanırken, yüke karşı deplasman, zamana karşı deplasman ve alt panellerdeki araç hareketi verileri kaydedilmelidir (NHTSA 2009).



Şekil 4.3: Çatı Ezilmesi Testi Blok Diyagramı (NHTSA 2009).



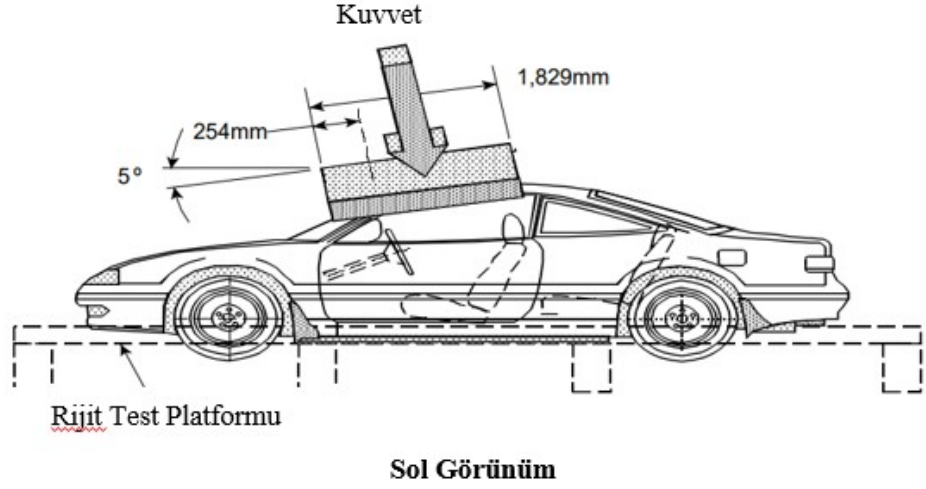
Şekil 4.4: Bir araç için örnek kuvvet-deplasman grafiği (NHTSA 2009).

Şekil 4.4’de gerçek bir test sonucundan elde edilen Yer Değiştirme-Kuvvet grafiği görülmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen çatı ezilmesi analizlerinde de Şekil 5.4’de görülebileceği üzere buna benzer bir grafik elde edilmiştir.

4.1.1 Statik Yükleme Cihazı

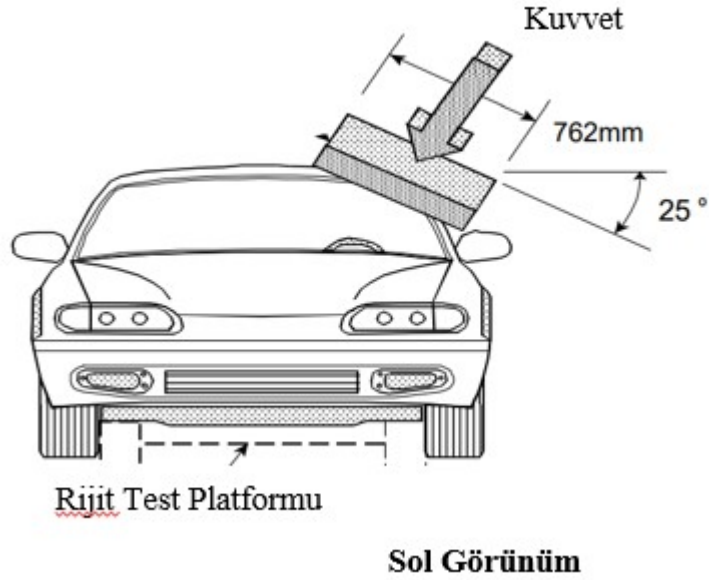
Statik Yükleme Cihazı, alt yüzeyi 762 milimetreye 1829 milimetre düz bir dikdörtgen şeklinde oluşturulmuş sert, deforme olmayan bir piston bloktan oluşmaktadır. Yük, mekanik veya hidrolik olarak uygulanabilmektedir. Statik yükleme cihazı, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterildiği gibi test aracı çatısına göre konumlandırılmalıdır. Deplasman, 127 milimetreye ulaşana kadar saniyede 13 milimetreden fazla olmayan bir hızda hareket etmelidir (NHTSA 2009).

Test Cihazının Araca Hizalanması



Şekil 4.5: Test Cihazının Aracın Sol Tarafından Konumu (NHTSA 2009).

Test Cihazının Araca Hizalanması



Şekil 4.6: Test Cihazının Aracın Ön Tarafından Konumu (NHTSA 2009).

4.1.2 Rijit Test Platformu

Test sırasında aracın sabitlenmesini ve hareketini kısıtlayan, araç ağırlığını ve test sırasında uygulanan yükleri kaldırabilecek, rijit, yatay bir platforma kullanılmaktadır. Araç platforma bağlanmadan önce yüksüz araç ağırlığını belirlemek için tartmak, herhangi bir açılır tavanın kapalı konuma getirilmesi veya çıkarılabilir

çatının yerine sabitlenmesi ve araç tekerleklerinin platforma engel olmaması için demonte edilmesi gerekmektedir (NHTSA 2009).

4.1.3 Kuvvet Ölçüm Cihazı

Yükü ölçmek için $\% \pm 0,25$ doğrulukta uygun kapasiteye sahip bir yük hücresi kullanılmalı ve araç tavanına iletilen gerçek yükü ölçecek şekilde yükleme sistemine yerleştirilmelidir (NHTSA 2009).

4.1.4 Sapma Ölçüm Cihazı

Yükleme cihazının sapması, bir uca sabitlenmiş ve karşı ucu yükleme cihazına bağlı bir lineer yer değiştirme potansiyometresi kullanılarak ± 1.5 milimetreye kadar hassas bir şekilde ölçülmelidir (NHTSA 2009).

4.2 B1500HS Boron Çeliği

Otomotiv Endüstrisinde enerji tasarrufu ve emisyon azaltma zorunluluklarını karşılamak için araç ağırlığının azaltılması amacıyla daha hafif tasarımlara yönelinmiştir. Gündemde ana başlık şu an için parçaların hafifletilirken güvenlik değerlerinin de azalmamasıdır. Yeni malzemelerin geliştirilmesi, malzemelerin kimyasal kompozisyonlarının optimizasyonu ve geleneksel perçinleme yerine yapıştırıcı uygulamaları gibi otomobil ağırlığını azaltmanın birçok yolu vardır. Tüm bu işlemleri yaparken aracın mukavemetinde düşüş görülmemelidir. Güvenlik değerleri her zaman maksimum olmalıdır.

Bilim adamları, spesifik mekanik özelliklere sahip malzemeleri elde edebilmek için yoğun uğraşlar vermişlerdir. Östenitleme işleminden sonra belirli bir alanı martenzit faza hızlı soğutmuşlar ve geride kalan alanı büyük plastik deformasyona izin vermek için östenitlemeden bırakmışlardır.

Sacı yerel elektrik dirençli ısıtma yoluyla östenitlemişlerdir. Fakat bu diğer yöntemlere nazaran daha pahalı bir yöntemdir. Özel ısıl işlem görmüş boron

çeliklerinin deformasyon özelliklerini araştırmak için, ilk önemli husus deformasyon sırasındaki tepkilerini doğru saptamaktır. Fazlar arası geçişin olduğu bölgelerde deformasyon davranışını anlayabilmek çok önemlidir.

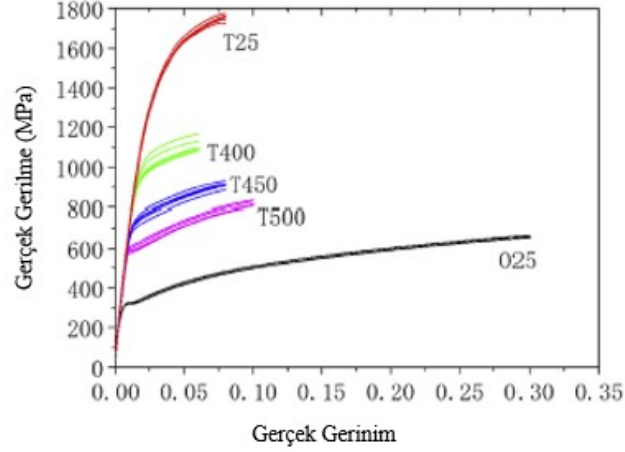
Faz geçiş bölgelerinde, gerinim sertleşmesinin (strain hardening) kırılma başlangıcında önemli bir rol oynadığını bulmuşlardır. Bu nedenle, su verilmiş boron çeliğinin kırılma özelliklerini dikkate almadan önce uygun bir elastoplastik yapısal model elde etmek gerekmektedir.

Beş takım boron çeliği sac, sıcak şekillendirmeye tabi tutulmuştur. Malzeme parametreleri, yarı statik gerinim oranlarında ve oda sıcaklığında, standart tek eksenli çekme testleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Johnson-Cook kopma modeli, bor çeliği olan B1500HS'in kopma davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır. Simülasyonu koşturulmuş, kuvvet-yer değiştirme eğrileri, deney grafikleri ile karşılaştırılmıştır ve oldukça iyi bir örtüşme göstermiştir (Tang ve diğ. 2019).

Tablo 4.2: B1500HS Boron Çeliği Spektrometre Sonuçları (Tang ve diğ. 2019).

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	B
Kütle Yüzdesi	0.23	0.25	1.35	0.19	0.04	0.0032

Analiz kolaylığı için, kalıp sıcaklığı 400 C° ve 25 C° koşulları sırasıyla T400 ve T25 olarak belirtilmiştir. Açık fırında soğutma durumu O25 olarak adlandırılmıştır. Adlandırılmada geçen sayılar şekillendirilme sıcaklıklarını temsil etmektedir. O25 olarak adlandırılan ısıtma işlemi görmüş numune, ferritik ve perlitik fazların bir karışımını göstermektedir. Açık fırın ile soğutulan numune olan O25 numunesi için gerilme-gerinim eğrisi, şekillendirme uygulanmadan önceki sac numunesi B1500HS'ninkine benzerdir. T25 numunesinin, tamamen martenzitik bir mikro yapıda olduğu tespit edilmiştir. T25 numunesi, Şekil 4.7'de görülebileceği üzere, küçük gerinim aralıklarında hızlı gerilme artışına sahiptir. T400 numunesinin mikroyapısı, ferritik, martenzit ve beyrit kombinasyonlarından oluşmaktadır. T400 numunesinin gerinimi minimumdur ve en zayıf sünekliği göstermektedir. Gerilme-gerinim eğrileri, standart tek eksenli çekme deneylerinden elde edilebilmektedir. Farklı ısıtma tabi tutulmuş boron çeliği B1500HS'in gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4.7'de belirtilmiştir. Hepsi farklı kalıp sıcaklıklarında şekillendirilmiş sac numuneleri için 5 farklı eğri vardır.



Şekil 4.7: B1500HS gerilme-gerinim eğrileri (Tang ve diğ. 2019).

Sonuçlar, şekillendirme sıcaklığının artmasıyla birlikte malzemenin mukavemet değerinin azaldığı ve gerinim sertleşme üssünün arttığını göstermektedir. Yavaş bir şekilde soğutulan numune olan O25 numunesi için gerilme-gerinim eğrisi, şekillendirme uygulanmadan önceki sac numunesi B1500HS'ninkine benzerdir.

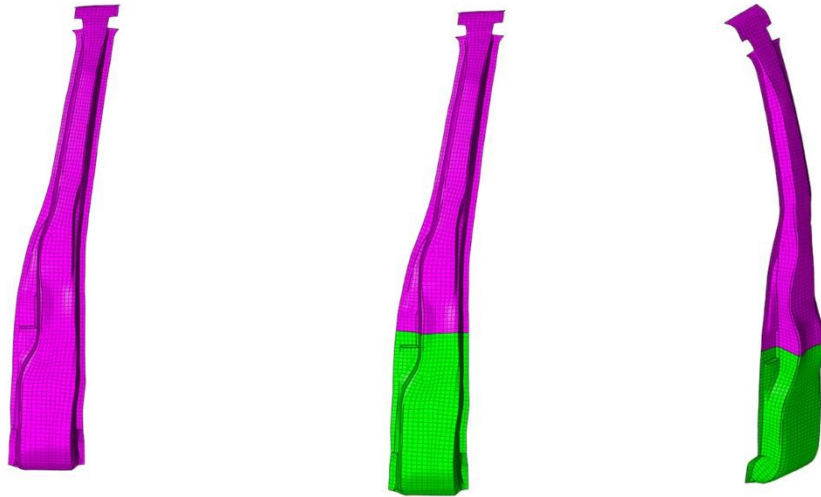
Tablo 4.3: Farklı sıcaklıklarda şekillendirilmiş boron çeliklerinin Johnson Cook Malzeme ve Kopma parametreleri (Tang ve diğ. 2019).

Parametre	O-25	T-400	T-25
A (MPa)	305	730	890
B	610	830	1150
n	0,42	0,36	0,22
d1	0,08	0,04	0,31
d2	0,35	0,13	0,033
d3	0,32	0,22	0,1

4.3 Çatı Ezilmesi Analizi

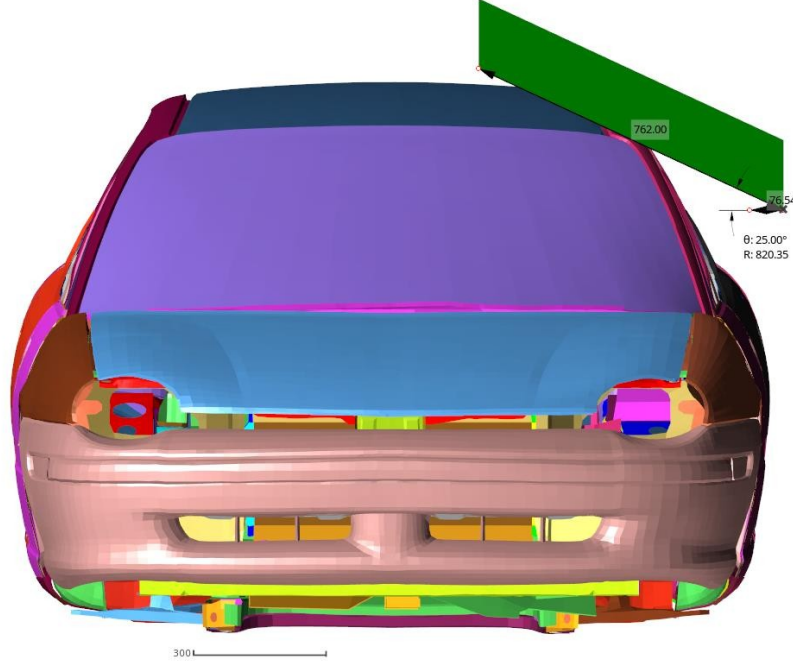
Devrilme durumunda, araç çatısı deforme olma eğilimindedir ve deformasyon yönü yolcuya doğrudur. Yolcunun hayatta kalması için yaşam alanı daralmış olmaktadır. Bu sebeple devrilme kazalarında her zaman için daha güçlü bir araç çatısı gerekmektedir.

Altairuniversity.com kaynağından açık erişimde olan Dodge Neon modeli, çatı ezilmesi analizini gerçekleştirmek için seçildi. Modelin, üzerinde düzenleme yapılmamış hali 300.000 eleman içermektedir. Zaman adımı kavramı açık analizler için çok önemlidir. Analizin ne kadar sürede çözüleceğini zaman adımı kavramı belirlemektedir. Malzeme parametreleri ve sonlu elemanın en küçük uzunluğuna göre değişmektedir ve hesaplanmaktadır. B Sütunu ve çevresinde, daha doğru sonuçlar elde edebilmek için sonlu eleman düzenlemeleri çarpışma kriterlerine göre Altair HyperWorks 2021 yazılımında yapıldı. Arta kalan bölgelerde zaman adımını çok küçük hale getiren elemanlarda tespit edilip zaman adımını ideal seviyesine getirebilmek için tekrar sonlu eleman örüldü. Araç, gerçek testte, altından platforma sabitlendiği için, analiz sonucuna etkisi olmayacağı düşünülen tekerlekler model üzerinden çıkarıldı. Bu işlemlerin ardından tüm model üzerindeki eleman sayısı 321.371 olarak hesaplandı.

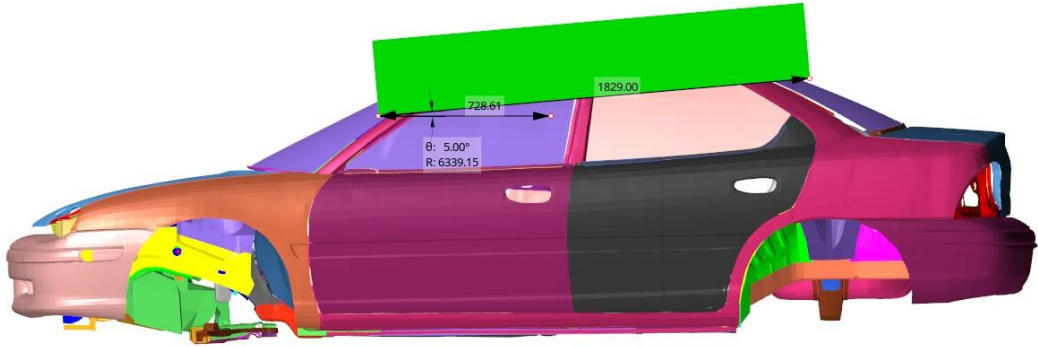


Şekil 4.8: Çalışmada kullanılan B Sütunu.

Şekilde B sütununun ikiye bölünmeden önce ve sonrası görülmektedir. B Sütununun kalınlığı 2 mm olarak belirlendi. Sonlu eleman düzenlemelerinden sonra analizi gerçek teste uyarlayabilmek için test cihazı görevi göreceğ olan bir 2D elemanlı plaka modellemesi gerçekleştirildi ve teste uygun bir şekilde araca konumlandırıldı. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görülebileceği üzere, araca önden baktığımızda 25°, yandan baktığımızda 5° olacak şekilde konumlandırma gerçekleştirildi. Modellenen plakanın düğümleri referans alınarak rijit cisim oluşturuldu ve analiz süresince deforme olmaması sağlandı.

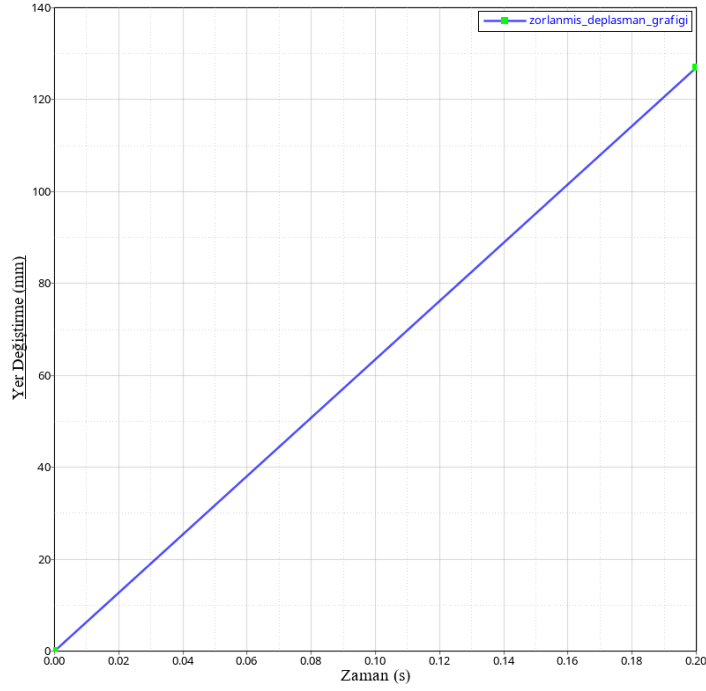


Şekil 4.9: Test cihazını temsil eden plaka ve önden açısı.



Şekil 4.10: Test cihazını temsil eden plaka ve soldan açısı.

Rijit plakanın, araç modeline hizalanmasından sonra, plakaya zorlanmış deplasman Şekil 4.11'deki grafik referans olarak uygulandı. Aracın kendi içerisinde ve rijit plakayla arasında Tip 7 genel kullanım temas tanımlamaları gerçekleştirilmiştir ve sürtünme katsayısı 0,2 olarak belirlenmiştir. Araç modelinin en alt kısmında akslar arasında kalan düğümler ile, test platformunu temsil etmek amacıyla tüm serbestlik dereceleri kısıtlı olan rijit cisim oluşturuldu.



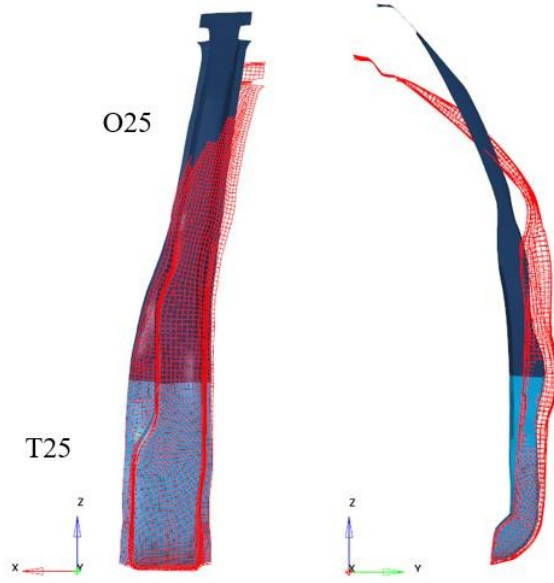
Şekil 4.11: Zorlanmış deplasman grafiği.

Şekillendirme sıcaklıklarına göre isimlendirilmiş olan O25, T25 ve T400 için Johnson Cook malzeme parametreleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

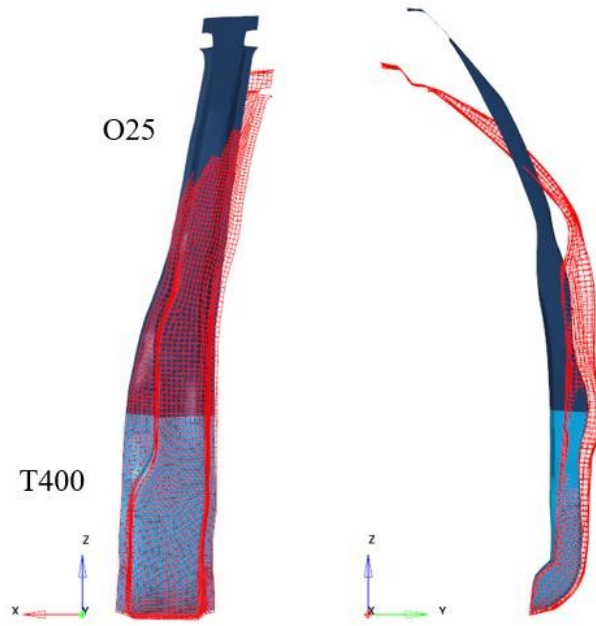
Tablo 4.4: Johnson Cook malzeme parametreleri.

Parametre	O-25	T-400	T-25
A (MPa)	305	730	890
B	610	830	1150
n	0,42	0,36	0,22

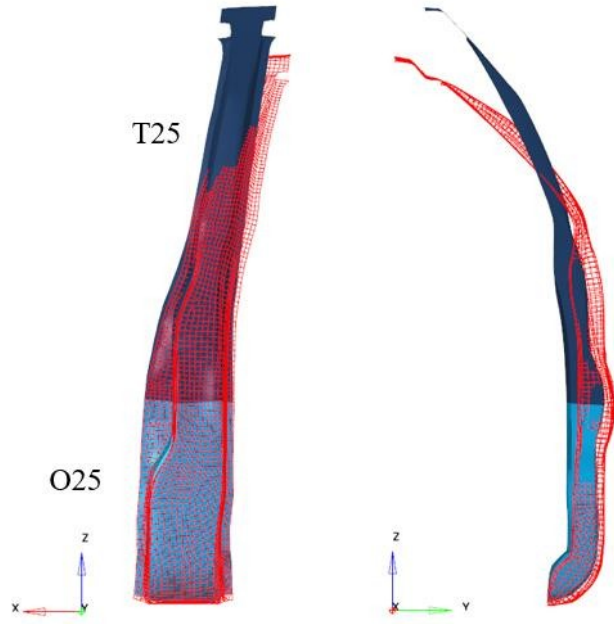
Bu çalışma kapsamında, 9 farklı çatı ezilmesi analizi gerçekleştirildi. B Sütunu iki farklı komponente bölünmeden önce O25, T25 ve T400 malzeme parametreleri için analizler koşturuldu. İkiye bölünme işleminden sonra, O25-T25, O25-T400, T25-O25, T25-T400, T400-O25 ve T400-T25 kombinasyonları için analizler koşturuldu. Burada ismi ilk geçen parametre ikiye bölünen B Sütununun üst parçası, ismi ikinci geçen parametre B Sütununun alt parçasına tanımlanan malzeme parametresidir. Hazırlanmış olan çatı ezilmesi analiz modeli 0,2 saniye termin süresi için 8 çekirdekli Ryzen 7 3700x işlemcili bir bilgisayarda çözdürüldü. Aşağıdaki şekillerde, B Sütununun, HyperView 2021.2 yazılımından elde edilen deforme olmuş ve deforme olmamış şekillerini görebilirsiniz.



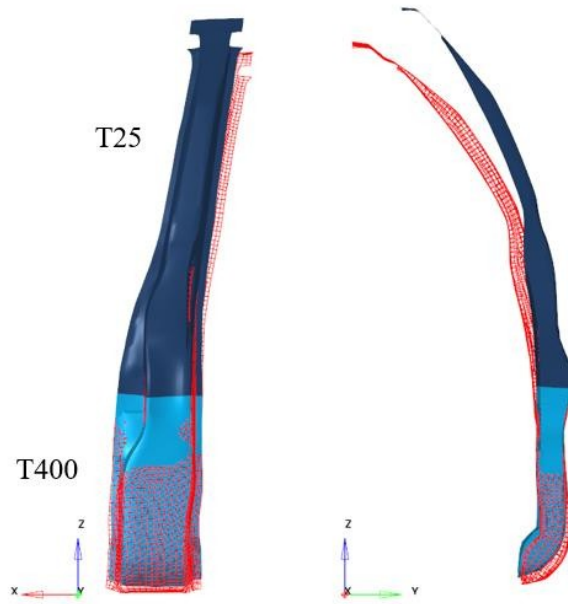
Şekil 4.12: O25-T25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali.



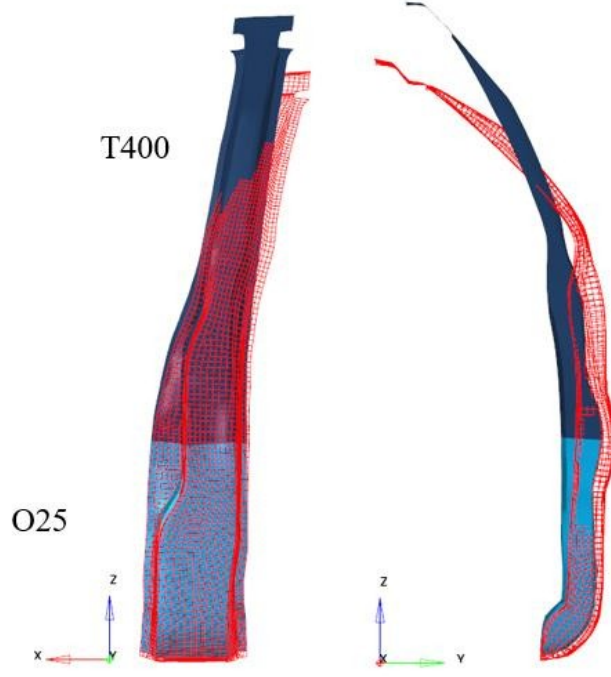
Şekil 4.13: O25-T400 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali.



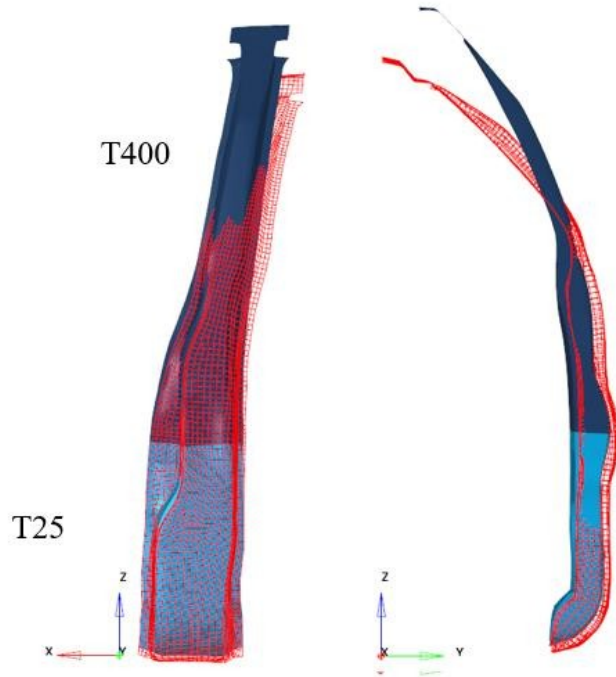
Şekil 4.14: T25-O25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali.



Şekil 4.15: T25-T400 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali.



Şekil 4.16: T400-O25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali.



Şekil 4.17: T400-T25 kombinasyonlu B Sütununun deforme olmuş hali (kırmızı) ve deforme olmamış hali.

Çözdürülen 9 farklı analizde toplam tepki kuvvetleri ve enerji absorpsiyon değerleri incelenmiştir. Tablo 4.6 incelendiği takdirde, en iyi tepki kuvveti, T25-T400 kombinasyonlu B sütununda elde edildiği gözükmemektedir. En iyi iç enerji değerini T400-T25 kombinasyonu vermiştir. Fakat T25-T400 kombinasyonlu B sütunun iç enerji değeri düşük kaldığı için, en iyi iç enerji, en iyi ikinci tepki kuvveti değerini veren T400-T25 kombinasyonu, optimizasyonda kullanılmak üzere seçildi.

Tablo 4.5: Kombinasyon uygulanmamış çatı ezilmesi analizi sonuçları.

	O25	T25	T400
Tepki Kuvveti (N)	23053	31559	31520
İç Enerji (j)	306,404	198,366	298,665

Tablo 4.6: Kombinasyonlu çatı ezilmesi analizi sonuçları.

	O25-T25	O25-T400	T25-O25	T25-T400	T400-O25	T400-T25
Tepki Kuvveti (N)	34286	34160	40615	51520	39061	48831
İç Enerji (J)	384,267	381,284	573,871	374,669	520,574	612,902

4.4 Deney Tasarımı, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Optimizasyon

Analizi yapılan modellerde, prototip üretimi ve test maliyetlerinden kaçınmak için optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu sayede bilgisayar ortamında, doğru koşullar ile uygulanması şartı ile optimum tasarım saptanabilmektedir. Üretime geçirilmek istenen modelin, belirli algoritmalar ile optimizasyonları mümkündür. Şekil, boyut, topoloji ve topografya optimizasyon algoritmalarındandır. Tek amaçlı optimizasyonda maksimum toplam tepki kuvveti için bir kısıt belirlenmiş ve maksimum spesifik enerji absorpsiyonu için amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Çok amaçlı optimizasyon çalışmasında toplam maksimum tepki kuvveti ve toplam maksimum spesifik enerji absorpsiyonu değerlerinin maksimum olması amaçlanmıştır. Bu başlık altında, deney tasarımı, yanıt yüzey ve optimizasyondan bahsedilecektir.

HyperStudy yazılımında B Sütunu için alt ve üst kalınlık parametreleri belirlenmiştir. Alt ve üst parametreleri arasında, seçilen seviyeye göre analiz çözümleri

elde edilir. Alt ve üst parametreleri arasında belirli aralıklar istenilen çıktı sonucu elde edilmiş olunur. Deney tasarımından alınan sonuçların seçilen eğri uydurma yöntemine göre eğrisi uydurulur ve kalınlık parametrelerine bağlı bir fonksiyon elde edilmektedir. Eğri uydurma yöntemlerinin hata payı vardır. Doğrusal olmayan fonksiyonlar için bu hata payı eğrinin ani yönelimlerinden dolayı artabilmektedir. Elde edilen fonksiyon, optimizasyon çözümünde istenilen ve kısıtlanan parametrelerin optimum değerlerini bulmak için kullanılmaktadır.

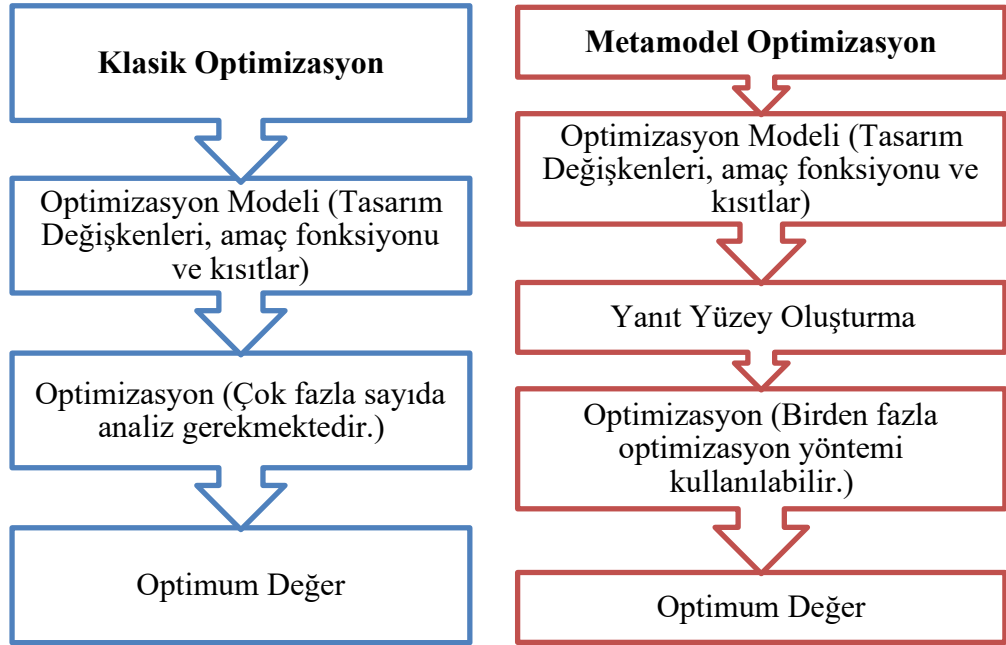
4.4.1 Deney Tasarımı

Deney tasarımı (DOE), mühendislerin bir veya birden çok girdi değişkeni ile temel çıktı değişkenleri arasındaki bağı inceleyen bir yöntemdir. Veri toplamak için geliştirilmiş bir yaklaşım yöntemidir. Girdi değişkenin ya da girdi değişkenlerinin yanıt üzerinde etkisi olup olmadığı, etkisi varsa ne kadar etkisi olduğu ve yanıtı optimize etmek için kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Tam Faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. 1,5 mm alt ve 2,5 mm üst sınır olacak şekilde iki girdi için, 4 deney tasarımı seviyesi ile 16 analiz yapıldı. Tam faktöriyel deney tasarımı, az sayıda değişkenin olduğu ve her değişkenin iki düzeyi olduğu çalışmalar için pratiktir. Tüm olası kombinasyonları değerlendirmektedir.

4.4.2 Yanıt Yüzey Yöntemi

Simülasyon kaynaklarının yetersiz olduğu durumlarda amaç, hızlı bir veri yaratan araca sahip olmaktır ve/veya daha ileri çalışmaların etkinliğini artırmak için gürültülü yanıtların düzeltilmesi gerekmektedir. Simülasyonlardan gelen kesin yanıtlar yerine eğri uydurma ile elde edilmiş olan veriler, optimizasyon çalışmaları için yeterli olabilmektedir. Eğri uydurma işlevleri, gerçek yanıtları temsil eden matematiksel fonksiyonlardır. Ayrıca yanıt yüzeyi, vekil model, metamodel veya yaklaşım olarak da adlandırılmaktadır. Bazı simülasyonlar hesaplama açısından uzun sürebilmektedir ve yüksek donanıma ihtiyaç duymaktadır, bu da yalnızca tasarım çalışmaları için onlara güvenmeyi pratik hale getirmektedir. Bu gibi durumlarda bir eğri uydurma kullanılması, hesaplama kaynaklarından önemli ölçüde tasarruf

edilmesini sağlamaktadır. Yanıtlar doğrusal olmayan olduğunda, optimizasyon yerel minimum veya maksimum noktaya düşebilmektedir. Eğri uydurmadan elde edilen yaklaşık yanıtları kullanarak bu sorun önlenmektedir. Bir yanıt yüzey kullanırken, doğruluk ve verimlilik arasında bir negatif alışveriş her zaman mevcuttur.



Şekil 4.18: Klasik optimizasyon ve Metamodel Optimizasyon iş akışı (Altair 2021).

HyperStudy yazılımında, eğri uydurmak için FAST adı altında bir seçenek mevcuttur. FAST, İngilizcesi ile fit automatically selected by training yani otomatik eğri uydurma yöntemi seçimi anlamına gelmektedir. Deney tasarımından gelen verilerin, eğri uydurmalarını gerçekleştirirken, arka planda en uygun eğri uydurma yöntemini seçmektedir. Bunu En Küçük Kareler Regresyonu LSR, Hareketli En Küçük Kareler Methodu MLSM ve Radyal Temelli Fonksiyon RBF eğri uydurma yöntemleri için yapmaktadır. Hata payının en az olduğu eğri uydurma yöntemiyle optimizasyon aşamasına geçilmesine olanak tanımaktadır. En iyi parametreleri seçmenin yanı sıra, deney tasarımından gelen verileri işlemek için eğri uydurma parametreleri üzerinde de oynamalar yapmaktadır. FAST, gürültü içeren veya içermeyen verilerin eğrisini çıkarmak için de kullanılabilir. Eğri uydurma yöntemini kendisi seçerek arka planda yinelenen işlemleri minimuma indirmektedir. Yöntemler arasında çapraz doğrulama, R^2 kalite karşılaştırmasını kullanmaktadır. R^2 , çapraz doğrulama kullanılmayan verilerin, kullanılması durumunda model üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılmaktadır. Verileri bağımsız bir kümeye genelleyerek

modelin davranışını tahmin etmektedir. R^2 değeri, 1'e yaklaştıkça eğri uydurma sonucu o kadar doğru olmaktadır. R^2 değeri, 0,9 ile 1 arasında ise eğri uydurma sonucu modeli iyi bir şekilde temsil etmektedir. (Altair 2021).

4.4.2.1 En Küçük Kareler Regresyonu (Least Squares Regressions LSR)

Seçilen modelin bir yaklaşım fonksiyonu oluşturur, öyle ki, yaklaşım modeli ve karşılık gelen simülasyon modeli tarafından tahmin edilen yanıt değerleri arasındaki farkların (artıklar) karelerinin toplamı en aza indirilmektedir. Yaklaşım modeli ve karşılık gelen simülasyon modeli tarafından tahmin edilen çıktı yanıt değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamı en aza indirilecek şekilde seçilen düzende bir yaklaşım fonksiyonu oluşturmaktadır (Altair 2021).

Örneğin;

$$\min E = \sum_{i=1}^n (f_i^{tahmin} - f_i)^2$$

Burada;

n deney sayısı,

f_i^{tahmin} i'ninci yaklaşım sonucu tahmin edilen yanıt değeri,

f_i ise i'ninci tasarımın analizi için yanıt değeridir.

Bu, E'nin türevini sıfıra eşitledikten sonra regresyon katsayılarının bulunmasıyla sağlanmaktadır. HyperStudy'deki en küçük kareler regresyonu, ilgilenilen yanıt, değişkenlerle ilişkilendiren bir fonksiyon oluşturmaktadır. Doğru bir yaklaşım oluşturmak için uygun deney tasarımı modeli seçilmelidir. Çıktı yanıtlarının doğrusal, doğrusal olmayan, gürültülü veya gürültüsüz olup olmadığını ve yapının davranışı hakkında önceden bilgi sahibi olmak, regresyon sonucunu değerlendirmek için önemlidir. Deney tasarımı seviyesi ve analiz modeli, eğri uydurmadaki sonuçları etkilemektedir (Altair 2021).

İki seviyeli bir deney tasarımı verisi, yaklaşımda yalnızca doğrusal bir ilişkiye sahiptir. Yanıtlar için daha fazla seviye kullanılarak daha yüksek dereceli fonksiyonlar uydurulabilir, ancak deney tasarımında daha fazla seviye belirlemek daha fazla çalışma ile sonuçlanmaktadır. (Altair 2021).

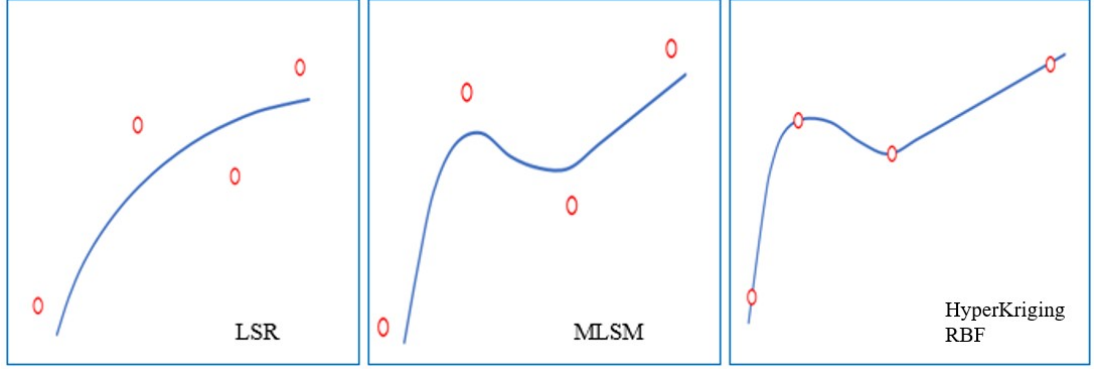
4.4.2.2 Hareketli En Küçük Kareler Methodu (Moving Least Squares Method MLSM)

Örnekleme noktalarıyla ilişkili dağılımın sabit kalmadığı bir en küçük kareler modeli oluşturmaktadır. Doğrusal olmayan ve gürültülü yanıtlar için kullanılması uygundur. Daha iyi bir tanımlama için, giriş matrisine ek olarak bir test matrisini de kullanmak önerilmektedir. MLSM eğri uydurmasının kalitesi, analiz sayısının, fonksiyonun mertebesinin ve uygulamanın davranışının bir fonksiyonudur. Artıklar ve hatalar MLSM yanıt yüzeyi için uygun değilse, belirli eğri uydurma sınırına yetecek kadar analiz sonucunsa sahip olmak koşuluyla yanıt yüzey mertebesi artırılmalıdır. Hareketli En Küçük Kareler Yönteminde dağılımlar sabit olmadığı için analitik bir form yoktur ve bir denklem sağlanamamaktadır (Altair 2021).

4.4.2.3 HyperKriging (HK)

Yaygın olarak Bilgisayar Deneylelerinin Tasarımı ve Analizi (DACE) olarak bilinen bir uygulama alanı olan deterministik bilgisayar simülasyonlarından gelen veri kümeleriyle tahmine dayalı modeller oluşturmaktadır. Kriging, başlangıçta jeostatistikteki uygulamalar için geliştirilmiş olmasına rağmen, genel bir istatistiksel enterpolasyon yöntemidir ve herhangi bir disiplinde, uygun matematiksel varsayımları karşılayan rastgele alanlardan örneklenmiş verilere uygulanabilmektedir. Bilinen noktalar arasında, olabildiğince noktaların üzerinden geçmek ve sorunsuz bir şekilde eğri uydurmak için tasarlanmıştır. Sayısal gürültü içermeyen yüksek düzeyde doğrusal

olmayan yanıt verilerinin modellenmesi için uygundur.



Şekil 4.19: Deneysel noktalarının LSR, MLSM, HyperKriging ve RBF yöntemleri sonucunda ortaya çıkan eğri (Altair 2021).

Çarpışma analizleri gibi yüksek düzeyde doğrusal olmayan analizlerde kullanılmaktadır. Çok sayıda örnekleme noktası içeren büyük çalışmalar için HyperKriging kullanmak önerilmektedir. HyperKriging, Şekil 4.19'da görüldüğü üzere, tam deneysel tasarımının verilerinin noktalarından geçmeye çalışır ve genel olarak, kalıntılar sıfır değilse de küçüktür. Yalnızca tam girdi matrisini kullanan tanı ölçütleri anlamlı değerler üretmemektedir. Çapraz doğrulama sonuçları, yalnızca giriş noktalarını kullanan özel bir şema kullanarak bazı tanılamalar sağlamaktadır. HyperKriging kalitesi hakkında ayrıntılı tanımlama elde etmek için bir test matrisi kullanmak önerilmektedir (Altair 2021).

4.4.2.4 Radyal Temelli Fonksiyon (Radial Basis Function RBF)

Temel fonksiyonların doğrusal kombinasyonlarını kullanmaktadır. Tipik temel fonksiyonlar lineer, kübik, ince plaka spline, Gauss, multiquadric ve ters-multiquadric'dir. Bu temel fonksiyonların yüksek düzeyde doğrusal olmayan yanıtlar için doğru olduğu, ancak doğrusal yanıtlar için doğru olmadığı gözlemlenmiştir. Bu eksikliği gidermek için HyperStudy'de bir Radyal Temelli Fonksiyon modeli, bir fonksiyon ile güçlendirilmektedir (Altair 2021).

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Phi(\|x - x_i\|) + \sum_{j=1}^n c_j p_j(x)$$

Formülde;

n, deney sayısını

x, tasarım değişkenlerini,

x_i i'ninci deney noktasını,

$\|x - x_i\|$ Öklid normunu,

Φ temel fonksiyonu,

λ_i temel fonksiyonun katsayısını,

$p_j(x)$ düşük dereceli fonksiyonu,

c_j (j=1,2...k) bilinmeyen katsayıları,

k polinomdaki toplam seri sayısını temsil etmektedir.

Sayısal gürültü içermeyen yüksek düzeyde doğrusal olmayan yanıt verilerinin modellenmesi için uygundur. RBF, tam deney tasarımı noktalarından geçmeye çalışır ve genel olarak, kalıntılar sıfır değilse de küçüktür. RBF, çok sayıda değişken içeren çalışmalar için önerilmektedir. HyperKriging ve Radyal Temelli Fonksiyon yöntemlerinin uygulanabilirliği fizik açısından benzerdir, her ikisi de gürültü olmadan yüksek düzeyde doğrusal olmayan çıktı yanıtları için önerilmektedir. Çok sayıda deney tasarımı noktası içeren büyük çalışmalar için HyperKriging kullanmak önerilirken, çok sayıda değişken içeren çalışmalar için Radyal Temelli Fonksiyonu önerilmektedir. (Altair 2021).

4.4.3 Tek Amaçlı Optimizasyon

Optimizasyon, mümkün olduğu kadar eksiksiz, işlevsel bir tasarım elde etmek için bir dizi matematiksel prosedürün kullanılmasıdır. Bir dizi kısıt uygulanır ve kısıtlarınıza uygun bir tasarım olup olmadığı saptanır. Ağırlık azaltmaları, yapısal güçlendirmeler, kazanç arttırmak vb. için birçok farklı endüstride, optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Çarpışma, kaynak, frekans gibi birçok analiz tipinde uygulanabilmektedir. Optimum boyut ve optimum şekil, optimizasyon sonucu elde edilebilmektedir. Eğri uydurma metodu kullanarak veya doğrudan analiz koşturarak optimizasyon çalışması yapılabilmektedir.

Tasarım problemini, optimizasyon çalışması olarak formüle etmenin üç adımı vardır. Tasarım parametreleri, amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonunu belirlemek bu üç adımdır. Tasarım parametreleri, sistemin performansını iyileştirmek için değiştirilebilen parametrelerdir. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) uygulamaları için boyut veya şekil olabilmektedirler. Bu çalışmadaki;

Tasarım parametreleri : $1,5 \text{ mm} \leq t_{alt}, t_{üst} \leq 2,5 \text{ mm}$

Amaç fonksiyonu : Maksimum Toplam SEA, E_{SEA}

Kısıt fonksiyonu : Toplam tepki kuvveti $F_{total} \geq 48800 \text{ N}$

$t_{alt}, t_{üst}$, ikiye bölünmüş olan B Sütunun alt ve üst kalınlıklarını temsil etmektedir. F_{total} , araç çatısı 127 mm ezilirken ortaya çıkan en büyük tepki kuvvetidir. Araç ağırlığına bölündüğünde çatı ezilmesi güvenlik oranı olan SWR elde edilmektedir. 48800 N çatı ezilmesi analizi sonucu elde edilmiştir. SEA, spesifik enerji absorpsiyonudur. Birim kütlenin absorbe ettiği enerji temsil etmektedir.

Mühendislikte tasarım yapılırken, aşağıdaki gibi durumlarla karşılaşmaktadır;

Maliyeti en aza indirmek,

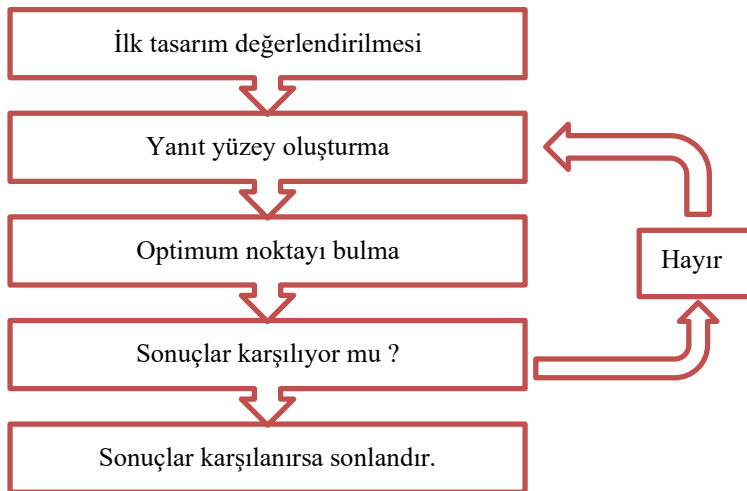
Zamanı azaltmak,

Kaliteyi arttırmak.

Geleneksel olarak, mühendisler ilk olarak tasarım modellemesiyle sürece başlamaktadırlar. İstenilen sonuç için deneme yanılma yoluyla ilerlenmektedir. Fakat bu süreç, mühendislere mühendislik yapmaları için vakit bırakmamaktadır. Optimizasyon yazılımları, tasarım sürecine harcanan vakti, kanıtlanmış matematiksel metotlar kullanarak minimuma indirebilmektedir. Bu, sadece deneme yanılma yoluyla ilerlemek yerine, tasarımda oluşabilecek problemlerin öngörülmesini ve bilgi edinilmesini sağlayarak daha optimum bir üretime yol göstermektedir. Aynı zamanda alternatif tasarımların keşfedilmesini de sağlamaktadır.

4.4.3.1 Adaptif Yanıt Yüzey Metodu (Adaptive Response Surface Method ARSM)

Yanıt yüzeyleri oluşturur ve yeni değerlendirmeler mevcut olduğunda bunları uyarlanabilir şekilde güncellemektedir. Optimum değer bulunana kadar yinelemeler gerçekleştirmektedir. Optimizasyon sırasında oluşturmuş olduğu ilk yanıt yüzeyi bir doğrusal regresyon polinomdur. Daha sonra bu yüzey üzerine optimum değeri bulmaktadır. Sonuçların sağlanması yapılması gerekmektedir. Yanıt yüzeyden gelen yanıt değeri veya değerleri, optimum sonuçları göstermezse, ARSM yeni bir yanıt yüzeyi oluşturur ve bu yüzeyde optimum değeri çıkartmaktadır. Bu döngü, optimizasyon kriterlerinden birisi karşılanana kadar devam etmektedir (Altair 2021).



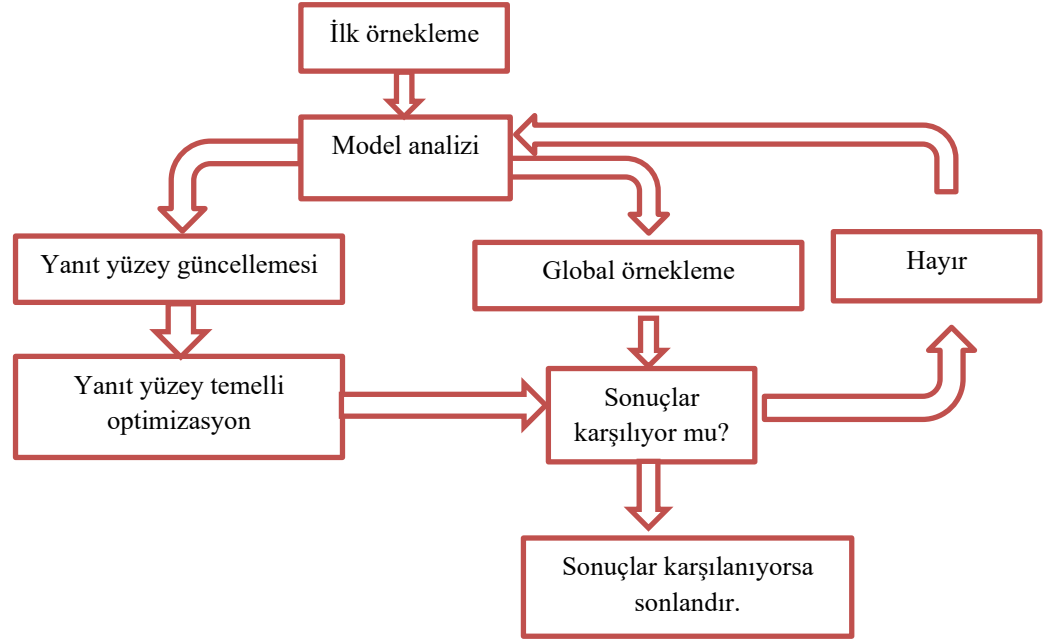
Şekil 4.20: Adaptif Yanıt Yüzey Metodu iş akışı (Altair 2021).

Tek amaçlı optimizasyon çalışmasında ARSM varsayılan bir yöntemdir. Tasarım değişkenlerinin sayısı fazlaysa ARSM kullanılması önerilmemektedir. ARSM her yineleme sırasında çalışmayı değerlendirir, sonuç olarak yineleme ve değerlendirme içerikleri aynı çıkmaktadır. Yanıt yüzeyler kullanıldığı için verimli bir optimizasyon yöntemidir. ARSM;

- Yakınsama değerlerinden birisini bulduğunda,
- En fazla analiz sayısına ulaştığında,
- Optimizasyon parametrelerinde hata olması durumunda, çalışmayı durdurmaktadır (Altair 2021).

4.4.3.2 Global Yanıt Yüzey Metodu (Global Response Surface Method GRSM)

Yanıt yüzeyi tabanlı bir yaklaşımdır. Yinelemeler esnasında, global yanıt yüzey metodu, global sonuç taraması için birkaç tasarım oluşturmaktadır. Bu tasarımları, yerel tarama ve global tarama arasında iyi bir denge sağlamak için oluşturmaktadır. Yanıt yüzeyi, daha iyi model uyumu için, yeni oluşturulan tasarımlara bağlı olarak yinelenmektedir. Tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon çalışmaları için kullanılabilir. Yüksek sayıda tasarım değişkeni barındıran çalışmalar için kullanılması önerilmektedir. Yineleme esnasında oluşturulan tasarımlar paralel olarak çözülebilmektedir. Analizin uzun zaman aldığı durumlarda GRSM iyi bir optimizasyon yöntemi seçimidir. Optimum değer vermeyen bir çalışmada, o çalışma yok sayılarak optimizasyona devam edebilmektedir. Bunu yaparken, tasarım alanını daha iyi araştırabilmek için yeni tasarımlar oluşturmaktadır. GRSM, en fazla değerlendirme sayısına ulaşıldığında optimizasyonu sonlandırmaktadır (Altair 2021).

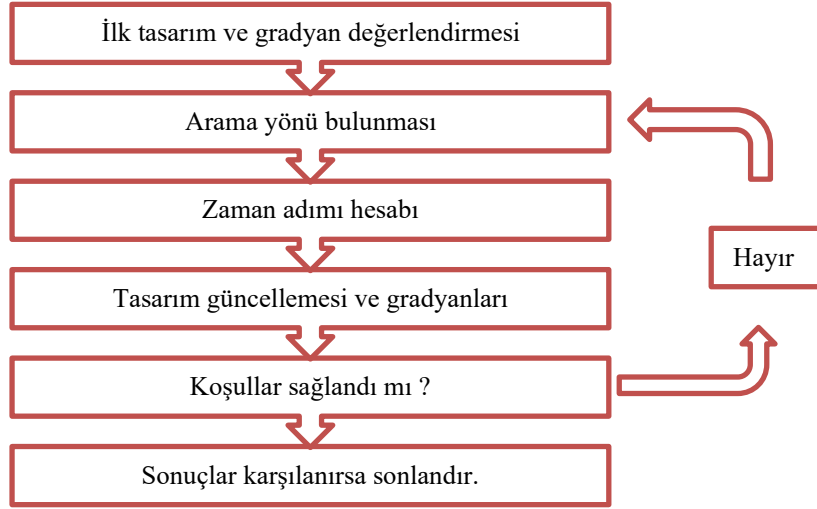


Şekil 4.21: Global Yanıt Yüzey Metodu iş akışı (Altair 2021).

4.4.3.3 Kabul Edilebilir Yönler Metodu (Method of Feasible Directions MFD)

Kısıt belirlenmiş optimizasyon çalışmalarında kullanılmak için üretilmiş en eski yöntemlerdendir. Temel dayanağı, hali hazırda kabul edilebilir bir tasarımdan iyileştirilmiş bir gerçek hayatta uygulanabilir tasarıma geçmektir. Bu yüzden, çalışmalardaki amaç fonksiyonu azaltılmalı ve yeni tasarım için kısıtlamalar aşılmamalıdır.

Gradyan temelli bir optimizasyon yöntemidir. Genelde yerel optimum noktayı bulmaktadır. Çalışmaya fazla sayıda kısıtlama eklendiği durumlarda verimli olabilmektedir. Fakat genel olarak SQP yönteminden daha az doğru ve ARSM yönteminden daha fazla süre almaktadır.



Şekil 4.22: Kabul Edilebilir Yönler Yöntemi iş akışı (Altair 2021).

Aşağıdaki koşullardan birisi sağlandığında optimizasyon sona ermektedir;

- Mutlak yakınsaklık,
- Göreceli yakınsaklık.

Her yinelemedeki değerlendirme sayısı otomatik olarak ayarlanmaktadır ve hassasiyet ayarı nedeniyle her çalışmada değişiklik gösterebilmektedir (Altair 2021).

4.4.3.4 Genetik Algoritma (Genetic Algorithm GA)

Genetik algoritma yöntemiyle optimizasyon, bir tasarım popülasyonunun üretilmesiyle başlamaktadır. Sonrasında, bu tasarımlar uygunluklarına göre sıralanmaktadır. Uygunluk tasarımın doğruluğunun ölçüsüdür, kısıtların ihlali ve amaç fonksiyonu değerlerinin bir fonksiyonudur. Seçilen tasarımlar, genetik operatörlerin yardımıyla tekrar yaratılmaktadır. Tekrar yaratılan tasarımlar, bir sonraki neslin üyeleri olmaktadır. Bu süreç, popülasyonun optimum çözüme yakınsayana kadar yinelenmektedir. Çarpışma problemlerinde doğru sonuçlar verebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Altair 2021).

Genetik algoritma, diğer optimizasyon yöntemlerine göre aşağıdakilere göre farklılık göstermektedir;

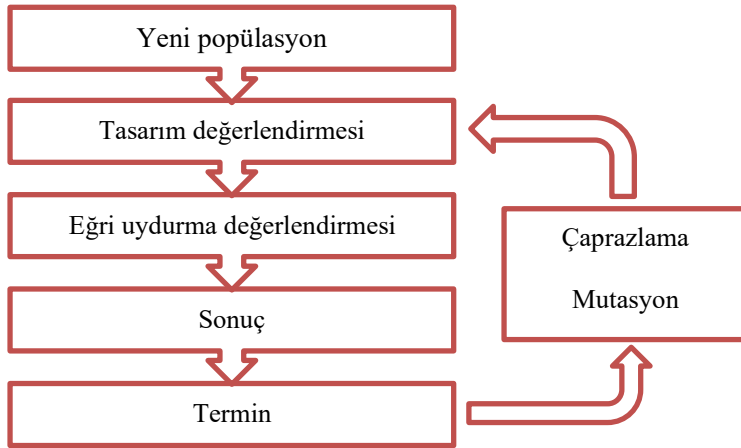
- Keşif yöntemleri olarak sınıflandırılması,

- Aynı anda birden fazla tasarım üzerinde yoğunlaşması,
- Tasarım popülasyonlarının paralel olarak değerlendirilebilmesi,
- Yakınsama yerine en fazla yineleme sayısı girilmesi.

Genetik algoritma, optimum sonuç için global bir tarama yapmaktadır. Ayrık problemler için çok uygun bir yöntemdir. Birçok analiz gerektirdiği için zaman alan bir yöntemdir.

Aşağıdaki koşullardan birisi sağlandığında optimizasyon sona ermektedir;

- Birkaç başarılı yinelemeden sonra amaç fonksiyonunun değiştirilmesi durumunda,
- En fazla müsaade edilen yineleme sayısına ulaşıldığında,
- Analiz hata verdiğinde.



Şekil 4.23: Genetik Algoritma iş akışı (Altair 2021).

4.4.4 Çok Amaçlı Optimizasyon

Tasarımı gerçek hayata dönüştürme sırasında, bazı durumlarda sadece tek bir parametrenin iyileştirilmesi incelenmez. Birden fazla parametrenin belirli bir kısıta uyması gerektiğinde çok amaçlı optimizasyon uygulanmaktadır. Bu çalışmadaki çok amaçlı optimizasyon çalışmasında toplam tepki kuvveti F_{total} in yanı sıra toplam spesifik enerji absorpsiyonu E_{sea} da bir amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Spesifik enerji absorpsiyonu iç enerjinin, kütleyle oranıdır. Çok amaçlı optimizasyonda

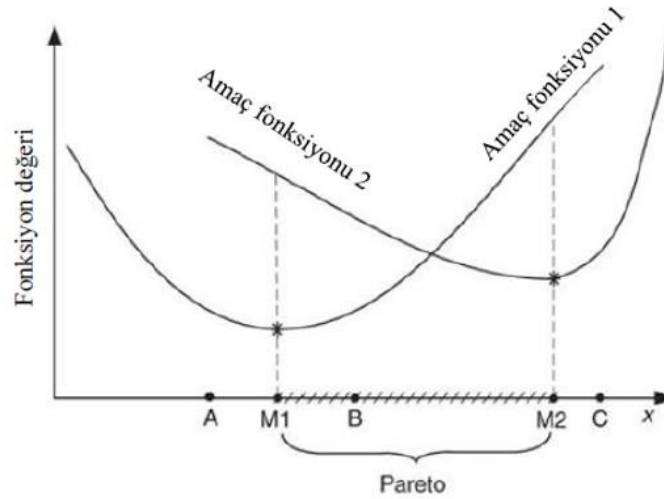
iki amaç fonksiyonunun da maksimum değeri alması hedeflenmiştir. E_{sea} 'nın maksimum değeri alması için ya kütlenin azalması ya da enerji absorpsiyon değerinin artması gerekmektedir.

Tasarım parametreleri : $1,5 \text{ mm} \leq t_{alt}, t_{üst} \leq 2,5 \text{ mm}$

Amaç fonksiyonu : Maksimum toplam tepki kuvveti, F_{total}

: Maksimum toplam SEA, E_{sea}

Çok amaçlı optimizasyonda, Pareto Grafiği çok önemli bir yer tutmaktadır. Pareto noktaları, baskın olmayan tasarım modellerinin bir kümesidir. Baskın olmayan tasarımlar, amaç işlevlerinden en az birisi dikkate alındığı için, diğer tasarımlara göre daha iyilerdir.



Şekil 4.24: Çok amaçlı optimizasyon için amaç fonksiyonu ve Pareto alanı (Öztürk 2017).

Şekil 4.24'de görülen optimizasyon modeli, iki amaç fonksiyonuna sahip çok amaçlı optimizasyon modelidir. Belirlenen amaç fonksiyonlarının minimize olması amaçlanmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon yerine her iki amaç fonksiyonu ayrı ayrı optimize edilirse, yıldızla belirtilen optimum değerler elde edilirdi. M1 noktasından M2 noktasına giderken, optimum değerler bir amaç için kötüleşmekte bir amaç için iyileşmektedir. M1 ve M2 noktaları arasında kalan verilerin oluşturduğu grafiğe Pareto Grafiği denilmektedir (Öztürk 2017).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dodge Neon araç modeline çatı ezilmesi analizi, gerçek test verilerine uygun bir şekilde, HyperWorks 2021 yazılımında yaratıldı. Araç, gerçek testte, altından platforma sabitlendiği için, analiz sonucuna etkisi olmayacağı düşünülen tekerlekler model üzerinden çıkarıldı. Bu çalışma kapsamında, 9 farklı çatı ezilmesi analizi gerçekleştirildi. B Sütunu iki farklı komponente bölünmeden önce O25, T25 ve T400 malzeme parametreleri için analizler koşturuldu. İkiye bölünme işleminden sonra, O25-T25, O25-T400, T25-O25, T25-T400, T400-O25 ve T400-T25 kombinasyonları için analizler koşturuldu. Burada ismi ilk geçen parametre ikiye bölünen B Sütununun üst parçası, ismi ikinci geçen parametre B Sütununun alt parçasına tanımlanan malzeme parametresidir. Hazırlanmış olan çatı ezilmesi analiz modeli 0,2 saniye termin süresi için 8 çekirdekli Ryzen 7 3700x işlemcili bir bilgisayarda çözdürüldü.

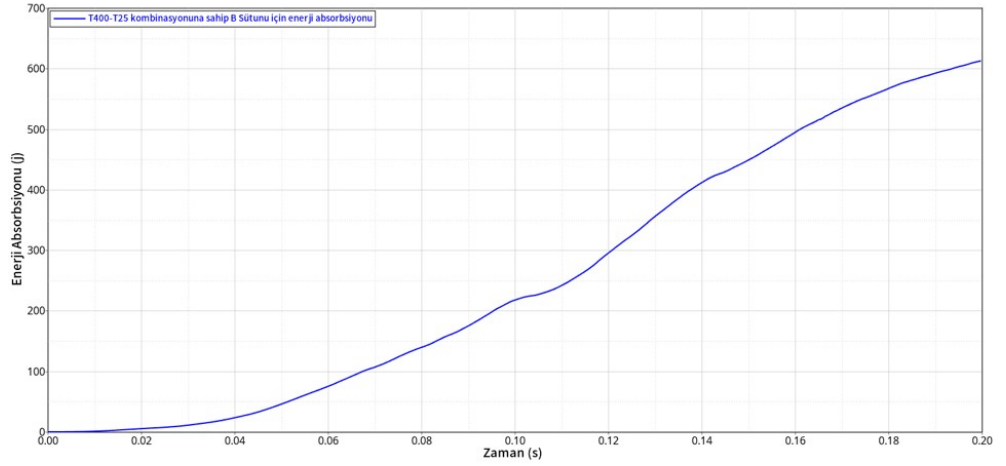
Tablo 5.1: Kombinasyon uygulanmamış çatı ezilmesi analizi sonuçları

	O25	T25	T400
Tepki Kuvveti (N)	23053	31559	31520
İç Enerji (J)	306,404	198,366	298,665

Tablo 5.2: Kombinasyonlu çatı ezilmesi analizi sonuçları

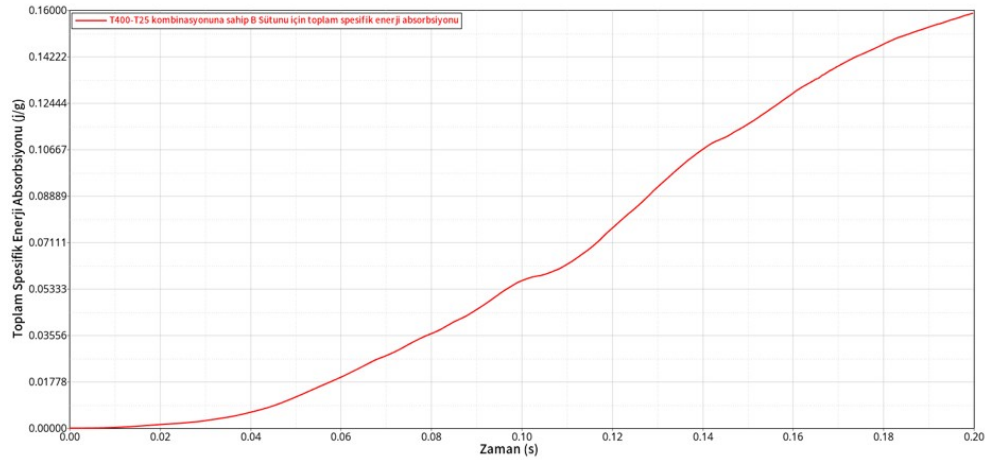
	O25-T25	O25-T400	T25-O25	T25-T400	T400-O25	T400-T25
Tepki Kuvveti (N)	34286	34160	40615	51520	39061	48831
İç Enerji (J)	384,267	381,284	573,871	374,669	520,574	612,902

Çözdürülen 9 farklı analizde toplam sonuç kuvvetleri ve enerji absorpsiyon değerleri incelenmiştir. Tablo 5.2 incelendiği takdirde, en iyi tepki kuvveti, T25-T400 kombinasyonlu B sütununda elde edildiği gözükmemektedir. En iyi iç enerji değerini T400-T25 kombinasyonu vermiştir. Fakat T25-T400 kombinasyonlu B sütunun iç enerji değeri düşük kaldığı için, en iyi iç enerji, en iyi ikinci tepki kuvveti değerini veren T400-T25 kombinasyonu, optimizasyonda kullanılmak üzere seçildi. Şekil 5.1'de B sütunu enerji absorpsiyon grafiği görülmektedir. Daha önceki kısımlarda bahsedildiği üzere B sütunu iki farklı komponente ayrıldı. Enerji absorpsiyon grafiği oluşturulurken B sütunu alt parçası ve üst parçasının enerji absorpsiyon değerleri HyperGraph yazılımında toplandı ve tek bir grafik oluşturuldu.

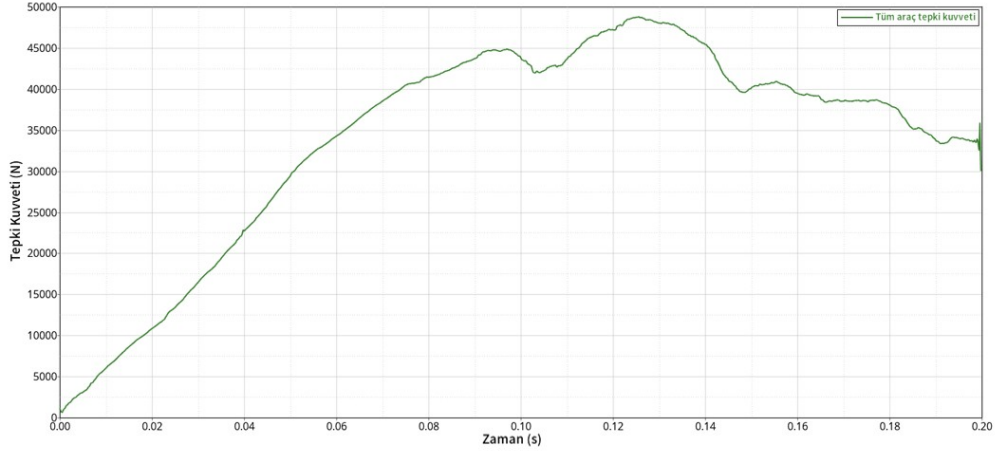


Şekil 5.1: T400-T25 Kombinasyonu uygulanmış B Sütunu için enerji absorpsiyonu

Şekil 5.2’de B sütunu toplam SEA grafiği görülmektedir. Toplam SEA değerinin birimi, j/g olarak seçildi. Alt ve üst B sütunu parçalarının enerji absorpsiyon değerleri toplandı ve toplam B sütunu kütlesine bölünerek toplam SEA grafiği oluşturuldu. Şekil 5.2’deki grafikten anlaşılacağı üzere, enerji absorpsiyonu sonlanmamış eğrinin yönü devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 5.2: T400-T25 Kombinasyonu uygulanmış B Sütunu için toplam spesifik enerji absorpsiyonu



Şekil 5.3: Tüm araç tepki kuvveti

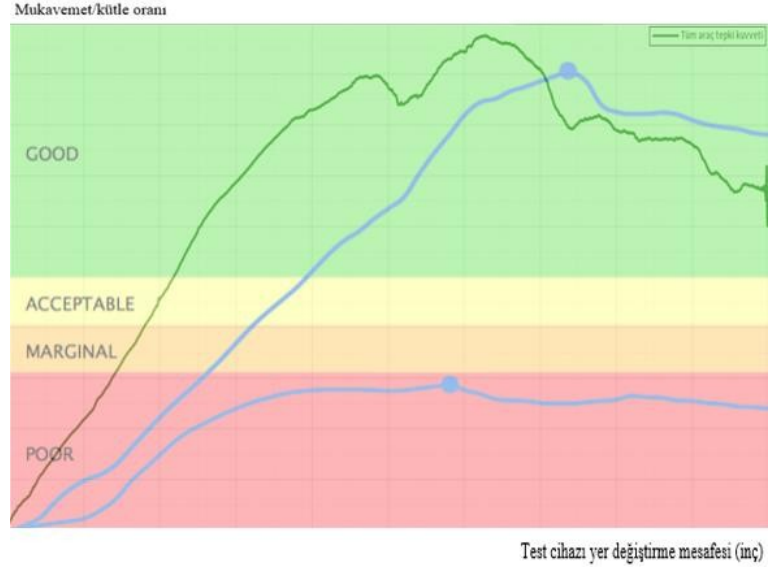
SWR değeri elde edilirken;

$$\frac{F_{total}}{g \cdot m_{araç}}$$

formülü kullanılmaktadır. Bu yüzden Şekil 5.3'deki, tüm araç tepki kuvveti grafiği SWR değerini saptamak için çok önemlidir. Bu araç modelinin SWR değeri;

$$\frac{48831 N}{(9,81 \frac{m}{s^2}) \cdot (989,2 kg)} = 5,03 SWR$$

çıkmaktadır. Elde edilen SWR değeri Tablo 4.1'deki sınıflandırma ile karşılaştırılacak olursa, araç modelinin SWR değeri iyi sınıfında yer almaktadır. Şekil 4.2'deki örnek tepki kuvveti grafiği ile analizler sonucu elde edilen SWR grafiği, Şekil 5.4'de birleştirildi. Grafikler, değerlerinden bağımsız bir şekilde birebir ölçeklendirildiler. Eğrilerin, test cihazının araç çatısını ezmeye başladıktan sonraki gidişatlarını incelersek, birbirlerine benzer karakteristiklere sahip oldukları gözlemlenebilmektedir. Bu da analiz modelinin, gerçeklikten uzak olmadığını öğrenmemizi sağlamaktadır.



Şekil 5.4: Analiz sonucu çıkan SWR grafiği ile gerçek test sonucunda çıkan SWR değerlerinin karşılaştırılması

Elde edilen analiz sonuçlarından bir adım sonra deney tasarımı oluşturuldu. Deney tasarımı yöntemi, tam faktöriyel olarak belirlendi. Test modelin analizini koşturmadan önce aşağıdaki B Sütunu kalınlık parametreleri oluşturulmuştu. Deney tasarımı analizlerinde bu parametreler kullanıldı ve 4 seviyede toplam 16 analiz koşturuldu. Analizler sonucunda, B sütunu kütlesi, toplam tepki kuvveti ve toplam spesifik enerji absorpsiyon değerlerini Tablo 10'da görebilirsiniz.

Tasarım parametreleri : $1,5 \text{ mm} \leq t_{alt}, t_{üst} \leq 2,5 \text{ mm}$

Tablo 5.3: Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Sonuçları

$t_{üst} \text{ (mm)}$	$t_{alt} \text{ (mm)}$	$m_{üst} \text{ (g)}$	$m_{alt} \text{ (g)}$	$F_{total} \text{ (N)}$	$E_{SEA} \left(\frac{J}{g}\right)$
1,500	1,500	1610,9	1283,2	42724,691	0,162
1,500	1,833	1610,9	1568,4	42506,129	0,143
1,500	2,166	1610,9	1853,6	42674,688	0,131
1,500	2,500	1610,9	2138,7	42564,363	0,122
1,833	1,500	1968,9	1283,2	47718,355	0,172
1,833	1,833	1968,9	1568,4	46969,629	0,161
1,833	2,166	1968,9	1853,6	45714,828	0,148
1,833	2,500	1968,9	2138,7	45403,781	0,139
2,166	1,500	2326,9	1283,2	51237,609	0,134
2,166	1,833	2326,9	1568,4	51282,883	0,124

2,166	2,166	2326,9	1853,6	50665,074	0,086
2,166	2,500	2326,9	2138,7	51213,063	0,086
2,500	1,500	2684,9	1283,2	51307,559	0,085
2,500	1,833	2684,9	1568,4	51358,000	0,077
2,500	2,166	2684,9	1853,6	51693,203	0,068
2,500	2,500	2684,9	2138,7	49262,121	0,060

Deney tasarımı 4 seviyede 16 analiz için tamamlandıktan sonra, eğri uydurma aşamasına geçildi. Deney tasarımında elde edilen veriler eğri uydurma yöntemleri ile bir fonksiyon haline getirildi. HyperStudy yazılımının sunmuş olduğu FAST seçeneği ile eğri uydurma işlemleri tamamlandı. Üst, Alt B sütunu kütleleri için LSR toplam spesifik enerji absorpsiyonu için RBF ve toplam tepki kuvveti için MLSM yöntemi ile seçildi ve fonksiyonları oluşturuldu. Aşağıdaki tablolarda, sırasıyla eğri uydurma yöntemleri için sonuçlar görülebilmektedir.

Tablo 5.4: LSR yöntemiyle $m_{üst}$ (g) için eğri uydurma sonuçları

Deney Numarası	$m_{üst}$ (g)	$m_{üst}$ (g) LSR	Hata	Hata (%)
1	1610,9	1610,9	0,000	0,000
2	1610,9	1610,9	0,000	0,000
3	1610,9	1610,9	0,000	0,000
4	1610,9	1610,9	0,000	0,000
5	1968,9	1968,9	0,000	0,000
6	1968,9	1968,9	0,000	0,000
7	1968,9	1968,9	0,000	0,000
8	1968,9	1968,9	0,000	0,000
9	2326,9	2326,9	0,000	0,000
10	2326,9	2326,9	0,000	0,000
11	2326,9	2326,9	0,000	0,000
12	2326,9	2326,9	0,000	0,000
13	2684,9	2684,9	0,000	0,000
14	2684,9	2684,9	0,000	0,000
15	2684,9	2684,9	0,000	0,000
16	2684,9	2684,9	0,000	0,000

Tablo 5.5: LSR yöntemiyle m_{alt} (g) için eğri uydurma sonuçları

Deney Numarası	m_{alt} (g)	m_{alt} (g) LSR	Hata	Hata (%)
1	1283,2	1283,2	0,000	0,000
2	1568,4	1568,4	0,000	0,000
3	1853,6	1853,6	0,000	0,000
4	2138,7	2138,7	0,000	0,000
5	1283,2	1283,2	0,000	0,000
6	1568,4	1568,4	0,000	0,000
7	1853,6	1853,6	0,000	0,000
8	2138,7	2138,7	0,000	0,000
9	1283,2	1283,2	0,000	0,000
10	1568,4	1568,4	0,000	0,000
11	1853,6	1853,6	0,000	0,000
12	2138,7	2138,7	0,000	0,000
13	1283,2	1283,2	0,000	0,000
14	1568,4	1568,4	0,000	0,000
15	1853,6	1853,6	0,000	0,000
16	2138,7	2138,7	0,000	0,000

Tablo 5.6: RBF yöntemiyle E_{SEA} ($\frac{j}{g}$) için eğri uydurma sonuçları

Deney Numarası	E_{SEA} ($\frac{j}{g}$)	E_{SEA} ($\frac{j}{g}$) RBF	Hata	Hata (%)
1	0,162	0,162	0,000	0,000
2	0,143	0,143	0,000	0,000
3	0,131	0,131	0,000	0,000
4	0,122	0,122	0,000	0,000
5	0,172	0,172	0,000	0,000
6	0,161	0,161	0,000	0,000
7	0,148	0,148	0,000	0,000
8	0,139	0,139	0,000	0,000
9	0,134	0,134	0,000	0,000
10	0,124	0,124	0,000	0,000
11	0,086	0,086	0,000	0,000
12	0,086	0,086	0,000	0,000
13	0,085	0,085	0,000	0,000

14	0,077	0,077	0,000	0,000
15	0,068	0,068	0,000	0,000
16	0,060	0,060	0,000	0,000

Tablo 5.7: MLSM yöntemiyle $F_{total} (N)$ için eğri uydurma sonuçları

Deney Numarası	$F_{total} (N)$	$F_{total} (N)_{MLSM}$	Hata	Hata (%)
1	42724,691	42714,632	10,059	0,023
2	42506,129	42510,622	-4,492	-0,010
3	42674,688	42671,445	3,242	0,007
4	42564,363	42569,432	-5,068	-0,011
5	47718,355	47709,594	8,761	0,018
6	46969,629	46963,827	5,802	0,012
7	45714,828	45725,901	-11,073	-0,024
8	45403,781	45407,596	-3,814	-0,008
9	51237,609	51238,108	-0,498	-0,0008
10	51282,883	51275,113	7,770	0,015
11	50665,074	50678,514	-13,439	-0,026
12	51213,063	51206,442	6,620	0,012
13	51307,559	51309,882	-2,323	-0,004
14	51358,000	51361,307	-3,306	-0,006
15	51693,203	51661,083	32,119	0,062
16	49262,121	49374,006	-111,884	-0,22

B sütunu üst ve alt parçalarının kütleleri toplam maksimum SEA ve toplam maksimum tepki kuvveti için eğri uydurma sonuçlarında, hata %0 çıkmış oldu. Eğri uydurma işlemlerinin R^2 çapraz doğrulama değerleri;

B sütunu üst parçasının kütlesi için, $R^2 = 1$,

B sütunu alt parçasının kütlesi için, $R^2 = 1$,

Toplam SEA için, $R^2 = 0,932$ ve

Toplam tepki kuvveti için, $R^2 = 0,952$ 'dir.

R^2 değeri, 1'e yaklaştıkça eğri uydurma sonucu o kadar doğru olmaktadır. R^2 değeri, 0,9 ile 1 arasında ise eğri uydurma sonucu modeli iyi bir şekilde temsil etmektedir .

Eğri uydurma sonuçlarından sonra tek amaçlı optimizasyon aşamasına geçildi ve fizibil sonuç veren optimizasyon sonuçları aşağıdaki tablolarda verildi.

Tablo 5.8: ARSM yöntemi

İterasyon	$t_{üst} (mm)$	$t_{alt} (mm)$	$F_{total} (N)$	$E_{SEA} \left(\frac{j}{g}\right)$
1	2,000	2,000	48859,981	0,133
2	2,330	2,000	51693,506	0,085
3	2,000	2,330	48455,005	0,115
4	1,950	1,700	48694,610	0,159
5	1,937	1,500	48964,605	0,164
6	1,926	1,500	48837,576	0,165
7	1,923	1,500	48800,807	0,166
8	1,923	1,500	48800,253	0,166
9	1,923	1,500	48800,156	0,166

ARSM yönteminde fizibil sonuç 9. iterasyon sonunda sağlandı. $F_{total} (N)$ değeri 48800 Newton kısıtının üstünde olacak şekilde sonuç alınmış oldu. Optimizasyon sonucunda optimum kalınlık değerleri, üst B sütunu parçası için 1,92 mm alt B sütunu parçası için 1,5 mm olarak kabul edildi. Toplam tepki kuvveti 48800 N'dan büyük olması bekleniyordu ve sonuçta da bu sağlanarak 48800,156 N değerine ulaşıldı.

Tablo 5.9: MFD yöntemi

İterasyon	$t_{üst} (mm)$	$t_{alt} (mm)$	$F_{total} (N)$	$E_{SEA} \left(\frac{j}{g}\right)$
1	2,000	2,000	48859,980	0,133
2	2,000	2,000	48908,995	0,132
3	2,000	2,002	48847,330	0,133
4	2,049	1,600	50364,523	0,150
5	2,062	1,500	50498,842	0,149
6	2,053	1,567	50415,070	0,150
7	2,051	1,600	50384,835	0,150
8	2,049	1,601	50363,784	0,150
9	2,049	1,500	50379,582	0,151
10	2,051	1,500	50399,075	0,151
11	2,049	1,501	50379,467	0,151

12	1,933	1,500	48923,159	0,165
13	1,924	1,500	48810,004	0,166
14	1,923	1,500	48800,000	0,166

MFD yönteminde fizibil sonuç 14. iterasyon sonunda sağlandı. Optimizasyon sonucunda optimum kalınlık değerleri, üst B sütunu parçası için 1,92 mm alt B sütunu parçası için 1,5 mm olarak kabul edildi. ARSM yönteminden çıkan et kalınlığı sonuçları ile kıyaslandığında, alt B Sütunu parçasının et kalınlığı ve üst B Sütunu parçasının et kalınlığı birebir aynı çıktı. MFD yöntemiyle uygulanan optimizasyon çalışmasında toplam tepki kuvveti kısıt değeriyle aynı çıktı ve fizibil sonuca ulaşılmış oldu. MFD yönteminden çıkan sonuçlar Tablo 16’da bulunabilmektedir.

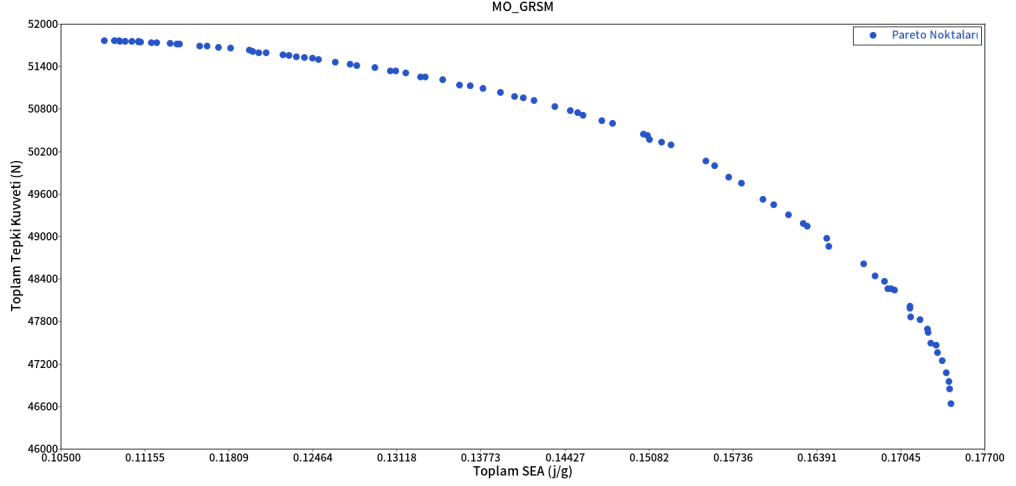
Çok amaçlı optimizasyon sonuçları iki farklı yöntem için aşağıda yer almaktadır. Çok amaçlı optimizasyon çalışması yapılırken;

Tasarım parametreleri : $1,5 \text{ mm} \leq t_{alt}, t_{üst} \leq 2,5 \text{ mm}$

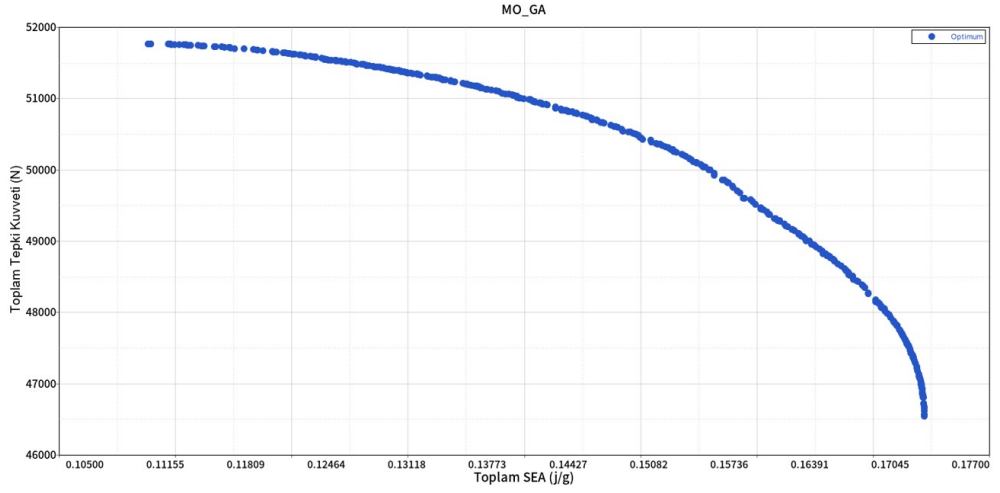
Amaç fonksiyonu : Maksimum toplam tepki kuvveti, F_{total}

: Maksimum toplam SEA, E_{sea}

olacak şekilde optimizasyon modeli oluşturuldu. Toplam tepki kuvveti ve toplam SEA’nın maksimum olması için MO-GA (Multi Objective Genetic Algorithm) ve MO-GRSM (Multi Objective Global Response Surface Method) optimizasyon yöntemlerine başvuruldu. Bu optimizasyonlardan elde edilen Pareto noktaları sayesinde kullanıcıya geniş bir tasarım alanı seçme şansı tanınabilmektedir. Toplam tepki kuvvetinin en fazla olduğu noktayı veya tam tersi bir şekilde toplam SEA’nın en fazla değere sahip olduğu noktayı kullanıcı seçebilmektedir ve yapmış olduğu seçime göre tasarımının son haline sahip olabilmektedir.



Şekil 5.5: MO-GRSM yöntemiyle elde edilen Pareto Noktaları



Şekil 5.6: MO-GA yöntemiyle elde edilen Pareto Noktaları

Nihai sonuç olarak, tasarım parametreleri: $1,5 \text{ mm} \leq t_{alt}, t_{üst} \leq 2,5 \text{ mm}$ için, $t_{üst}$: $1,92 \text{ mm}$ ve t_{alt} : $1,5 \text{ mm}$ olarak kabul edildi. Yeni kabul edilen kalınlık parametreleri, çatı ezilmesi analizi modeline uygulandı ve optimizasyon sonuçlarının sağlama analizi gerçekleştirildi. Sağlama analizi yapılan modelin, analiz öncesi ve sonrası render görüntülerini aşağıdaki şekillerde görebilirsiniz. Render işleminde sadece şasi komponentleri kullanıldı. Render işlemi, Altair InspireRender 2021.2 yazılımı ile gerçekleştirildi.

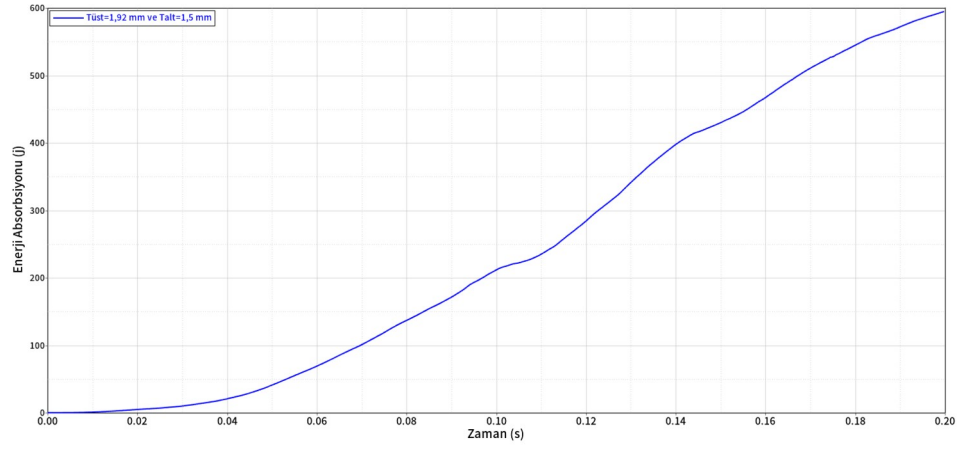


Şekil 5.7: Araç modelinin analiz öncesi render görüntüsü

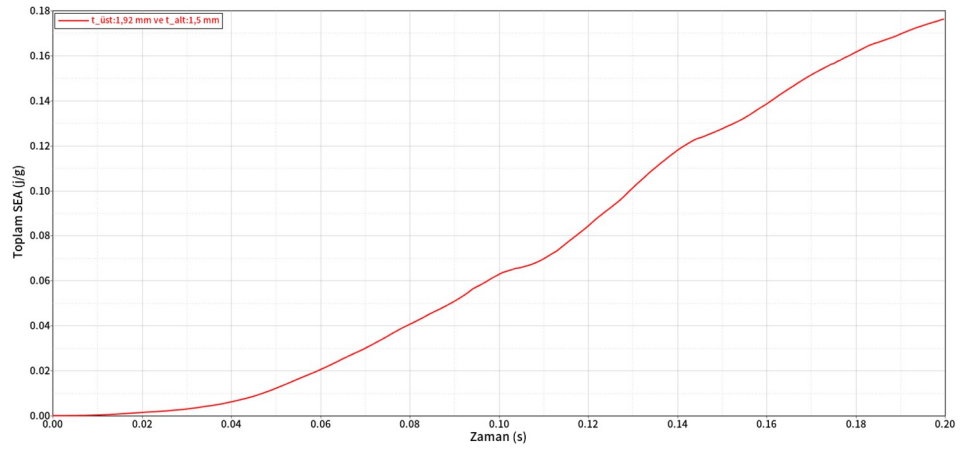


Şekil 5.8: Araç modelinin analiz sonrası render görüntüsü

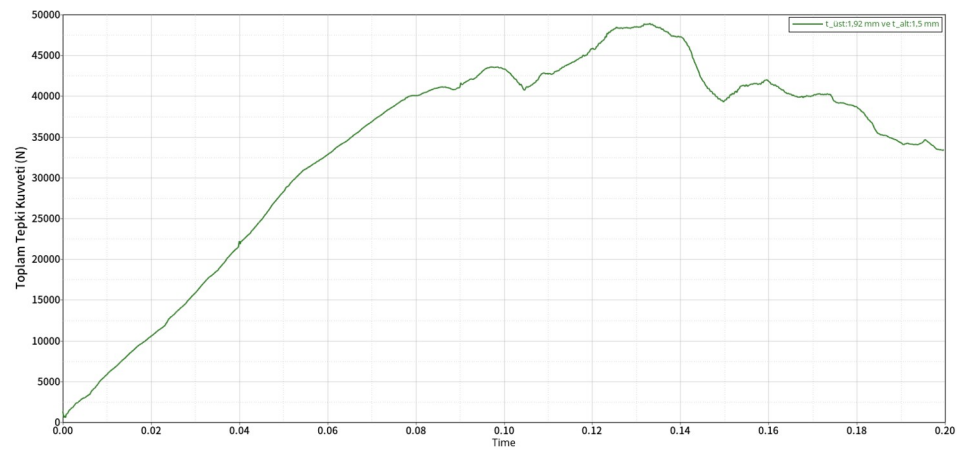
Aşağıdaki şekillerde, gerçekleştirilen sağlama analizi için enerji absorpsiyonu, maksimum toplam tepki kuvveti ve maksimum toplam SEA sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.9: $t_{üst} : 1,92 \text{ mm}$ ve $t_{alt} : 1,5 \text{ mm}$ için sağlama analizindeki enerji absorpsiyonu



Şekil 5.10: $t_{üst} : 1,92 \text{ mm}$ ve $t_{alt} : 1,5 \text{ mm}$ için sağlama analizindeki toplam SEA



Şekil 5.11: $t_{üst} : 1,92 \text{ mm}$ ve $t_{alt} : 1,5 \text{ mm}$ için sağlama analizindeki toplam tepki kuvveti

Aşağıdaki tabloda, test modeli, optimizasyon sonuçları ve optimizasyon sonuçlarının sağlama analizi sonuçları görülebilmektedir.

Tablo 5.10: Sağlama analizinden çıkan sonuçların test modeli ve optimizasyon sonuçları ile karşılaştırılması

	$t_{üst} (mm)$	$t_{alt} (mm)$	$m_{B-sütunu} (g)$	$E_{sea} (\frac{j}{g})$	$F_{total} (N)$
Test Modeli	2	2	3860	0,158	48831
ARSM	1,923	1,5	3349	0,166	48800,156
MFD	1,923	1,5	3349	0,166	48800
Sağlama Analizi	1,92	1,5	3345	0,176	48918,304
Hata (%)	%0,001	%0,000	%0,001	%6,024	%0,002

Sağlama analizi sonuçları, optimizasyon sonuçları ile karşılaştırılacak olunursa birbirlerine oldukça yakın değerler çıktığı gözlemlenebilmektedir. Sağlama analizinde E_{sea} ve F_{total} değerleri optimizasyon sonuçlarına göre daha büyük çıktı. Aradaki farklılığın sebebi çapraz doğrulamadaki hata oranından kaynaklanmaktadır.

Deney tasarımı seviyesi daha büyük tutulup, oradan gelen sonuçlar ile eğri uydurma gerçekleştirilmiş olsa idi, hata yüzdesi teoride daha az olacaktı. Sonuçlardaki hata yüzdesi kabul edilebilmektedir. Amaç değerinden daha düşük bir değer, sağlama analizinde çıksaydı optimizasyon sonuçlarının gözden geçirilmesi gerekebilirdi. Optimizasyon çalışması sağlama analizi sonuçları da alındıktan sonra tamamlanmış oldu. Buna göre;

1- Test modelindeki B sütununun kütlesi 3860 gramdan, 3345 grama indirildi ve otomotiv sektörünün, karbon ayak izini azaltmak için ilk başvurduğu yöntem olan kütle azaltma çalışması tamamlanmış oldu ve

$$\frac{3860 (g) - 3345 (g)}{3860 (g)} = 0,133 = \%13,3$$

oranında kütle tasarrufu sağlandı.

2- Optimizasyon sonucunda, test modelindeki B Sütununun toplam spesifik enerji absorpsiyon değeri 0,15800 j/g'dan 0,17627 j/g'a çıkarıldı ve

$$\frac{0,176 \left(\frac{j}{g}\right)}{0,158 \left(\frac{j}{g}\right)} - 1 = 0,115 = \%11,5$$

oranında spesifik enerji absorpsiyonu artmış oldu. Kütlede tasarruf edilirken, optimum tasarım parametrelerinin de bulunmasıyla spesifik enerji absorpsiyonu değerinde artış görüldü. Buradan anlaşılacağı üzere, kütle azaltılırken de güvenlik parametrelerinde düşüş gözlemlenmeyebilir.

3- Optimizasyon sonucunda, test modelindeki B Sütununun toplam tepki kuvveti değeri 48831 N'dan 48918,304 N değerine arttırıldı. Çatı ezilmesi testlerinin güvenlik skalası olan SWR değeri, test modeli için 5,03 SWR idi. Optimizasyon sonucunda

$$\frac{48918,304 N}{(9,81 \frac{m}{s^2}) \cdot (988,7 kg)} = 5,04 SWR$$

değeri elde edildi. 5,04 SWR değeri IIHS standartlarında iyi bir değer olarak yorumlanmaktadır. SWR değerinde düşme gözlemlenmemiş ve çok ufak bir miktarda artış elde edilmiştir.

Bu çalışma, B sütununun yapısal ağırlığını azaltırken, güvenlik kriterlerinde düşme olmamasını amaçlamıştır. Karbon ayak izinin en aza indirilmesi için hükümetlerce çok katı kurallar uygulanmaktadır. Bu sebeple otomotiv parçalarında kütle azaltma çalışmaları kaçınılmazdır. Prototip ve test maliyetleri, gerçek testlerin hazırlığının uzun süreç almasından dolayı sonlu elemanlar metoduyla analiz ve optimizasyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Analiz ve optimizasyon modelleri doğru tanımlandığı takdirde, gerçeğe çok yakın sonuçlar verebilmektedir. Tasarım hatalarının saptanıp, üretimden önce düzeltilmesi de sonlu elemanlar metoduyla yapılan çarpışma analizleri ile mümkün kılınmaktadır. Sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz ve optimizasyon çalışmaları yapmak şirketlere maliyet ve zaman gibi tasarruflar sağlamaktadır.

6. KAYNAKLAR

Pietrasik, T., “Road traffic injuries [online]”, (2021), <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>, (2021).

EGM Trafik Başkanlığı., “Trafik İstatistik Bülteni”, (2020).

Kean, Sam., “The First Fatal Car Crash [online]”, (2019), <https://www.theatlantic.com/science/archive/2019/08/pioneering-female-scientist-was-first-car-crash-victim/597037/>, (2019).

Kunkle, Fredrick., “Fatal crash with self-driving car was a first — like Bridget Driscoll’s was 121 years ago with one of the first cars [online]”, (2018), <https://www.washingtonpost.com/news/tripping/wp/2018/03/22/fatal-crash-with-self-driving-car-was-a-first-like-bridget-driscolls-was-121-years-ago-with-one-of-the-first-cars/>, (2018).

ANCAP.com., “Understanding Safety Features [online]”, (2020), <https://www.ancap.com.au/understanding-safety-features>, (2020).

Kartik, B., “A Review Paper on Anti-Lock Braking System (ABS) and its Future Scope”, *IJRASET*, 7, (8), 372-375, (2019).

Wang, Y, X., Jiang, Y, H., Li, R, B., Chen, M, Z., “Automotive Safety Technology and Its Improvement”, *International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics EECR*, 160, (2018).

EuroNCAP.com., “Electronic Stability Control [online]”, (2013), <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety-assist/previous-tests/esc/>, (2013).

Yu, L., Wang, R., “Researches on Adaptive Cruise Control system: A state of the art review”, *JoAE*, 1-30 (2021).

Bridgestonetire.com., “What is TPMS & How Does it Work? [online]”, (2021), <https://www.bridgestonetire.com/learn/maintenance/tire-pressure-monitoring-system-how-tpms-works/>, (2021).

Penmetsa, P., Hudnall, M., Nambisan, S., “Potential safety benefits of lane departure prevention technology”, *IATSS Research*, 43, 21-26, (2018).

Choksey, J, S., “What is a Blind-Spot Monitor? [online]”, (2021), <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/what-is-a-blind-spot-monitor>, (2021).

Lampinen, M., “What’s next for driver and occupant monitoring systems? [online]”, (2020), <https://www.automotiveworld.com/articles/whats-next-for-driver-and-occupant-monitoring-systems/>, (2020).

EuroNCAP.com., “AEB Car-To-Car [online]”, (2020), <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety-assist/aeb-car-to-car/#>, (2020).

Nambiar, Kavitha., “Dual Front Airbags Made Mandatory In India [online]”, (2021), <https://gomechanic.in/blog/dual-front-airbags-mandatory/>, (2021).

D’Elia, A., Newstead, S., Scully, J., “Evaluation of vehicle side airbag effectiveness in Victoria, Australia”, *Accident Analysis and Prevention AAP*, 54, 67-72, (2013).

Bansal, K, Divyank., “Study reveals that protection offered by knee airbags is next to negligible [online]”, (2019), <https://www.autox.com/news/industry-news/study-reveals-that-protection-offered-by-knee-airbags-is-next-to-negligible-106402/>, (2019).

Yirka, Bob., “General Motors announces first center mounted airbags [online]”, (2011), <https://phys.org/news/2011-10-motors-center-mounted-airbags-video.html>, (2011).

IIHS., “Airbags”, *IIHS*, (2021).

Yang, H, I., Yun, Y, W., Park, G, J., “Design of a pedestrian protection airbag system using experiments”, *JoAE*, 1-14 (2015).

Volvocars.com., “Pedestrian Airbag [online]”, (2020), <https://www.volvocars.com/en-th/support/manuals/v40-cross-country/2018w17/safety/airbags/pedestrian-airbag>, (2020).

NHTSA., “Federal Motor Vehicle Safety Standards; Roof Crush Resistance”, *Department Of Transportation National Highway Traffic Safety Administration*, (2009).

IIHS., “Crashworthiness Evaluation Roof Strength Test Protocol”, *IIHS*, (2016).

NHTSA., “Laboratory Test Procedure For Fmvss No. 216a, Roof Crush Resistance”, *Department Of Transportation National Highway Traffic Safety Administration*, (2009).

Tang, B., Wu, F., Wang, Q., Li, C., Liu, J., Ge, H., “Numerical and experimental study on ductile fracture of quenchable boron steels with different microstructures”, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3, 55-65, (2019).

Altair., “Altair HyperStudy Help [online]”, (2021), altairuniversity.com, (2021).

Öztürk, İ., “Çok Amaçlı Kriterleri Sağlayan Hızlandırılmış Tasarım Yaklaşımı İle Taşıtlarda Darbeye Maruz Kalan Elemanların Tasarımı”, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, (2017).