AĞIR VASITA ARAÇLARDA ALT ARKA KORUYUCU PARÇANIN FARKLI KESİT VE MALZEME ÖZELLİKLERİNDE TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Ali Selman AKÇA

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR VASITA ARAÇLARDA ALT ARKA KORUYUCU PARÇANIN FARKLI KESİT VE MALZEME ÖZELLİKLERİNDE TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Ali Selman AKÇA
0009-0009-4729-8071

Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AĞIR VASITA ARAÇLARDA ALT ARKA KORUYUCU PARÇANIN FARKLI KESİT VE MALZEME ÖZELLİKLERİNDE TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Ali Selman AKÇA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Otomotiv sektöründe sürekli bir değişim ve gelişim yaşanmaktadır. Bu değişim, araçların performansı, güvenliği ve sürdürülebilirliği üzerinde doğrudan etkiye sahip olan malzeme teknolojilerindeki ilerlemelerle yakından ilişkilidir. Ağır vasıta araçlarının alt arka koruyucu parçaları (RUPD), aracın alt kısmını dış etkenlerden koruyarak hem araç güvenliğini artırır hem de uzun ömürlü bir kullanım sağlar. Geleneksel olarak çelik malzemeden üretilen bu parçalar, son yıllarda alüminyumun avantajlarından faydalanarak yeniden tasarlanmaya başlanmıştır.

Alüminyumun hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci gibi özellikleri, ağır vasıta araçlarının arka alt koruyucu parçalarının tasarımında yeni olanaklar sunmaktadır. Bu makalede, farklı kesit ve malzeme özelliklerine sahip alt arka koruyucu parçaların çelikten alüminyum malzemeye dönüştürülmesi süreci ve alüminyum profilinde minimum ağırlıklı optimum profil kesitine ulaşılması detaylı bir şekilde incelenecektir.

Hafif bir yapıya ulaşmak amacıyla farklı alüminyum alaşımları kullanılacak ve karşılaştırılacaktır. Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri test cihazında ölçülecek ve bu mekanik özellikler, arka alt koruma tasarımının analizinde kullanılacaktır. Sonuç kısmında çelik tasarım ve farklı alaşımlardan oluşan alüminyum tasarım karşılaştırılacaktır. İster çelik ister alüminyum olsun, RUPD tasarımı sınır koşulları dikkate alınarak oluşturulacak ve pazar beklentisi akılda tutulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Arka Alt Koruyucu, Alüminyum, Deney Tasarımı Yöntemi, Yanıt Yüzeyi Metodolojisi, Bilgisayar Destekli Analiz, UN ECE R 58-03

2024, xv + 44 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE REAR UNDERRUN PROTECT IN HEAVY VEHICLES WITH DIFFERENT CROSS SECTIONS AND MATERIAL PROPERTIES

Ali Selman AKÇA

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

Supervisor: Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

The automotive industry is undergoing continuous change and development. This change is closely linked to advances in material technologies, which have a direct impact on the performance, safety and sustainability of vehicles. Rear Underrun Protection Device (RUPD) of heavy-duty vehicles protect the lower part of the vehicle from external factors, increasing vehicle safety and ensuring a long service life. Traditionally made of steel, these parts have been redesigned in recent years to take advantage of the advantages of aluminum.

The properties of aluminum such as light weight, high strength and corrosion resistance offer new possibilities in the design of rear lower protective parts of heavy duty vehicles. In this article, the process of converting lower rear protective parts with different cross-section and material properties from steel to aluminum material and achieving the optimum profile cross-section with minimum weight in the aluminum profile will be examined in detail.

Different aluminum alloys will be used and compared to achieve a lightweight structure. The mechanical properties of the aluminum alloy will be measured in a test rig and these mechanical properties will be used in the analysis of the rear lower guard design. In the conclusion, the steel design and the aluminum design with different alloys will be compared. Whether steel or aluminum, the RUPD design will be created with boundary conditions in mind and the market expectation in mind.

Key words: Rear Underrun Protection Device, Aluminum, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Computer Aided Analysis, UN ECE R58-03

2024, xv + 44 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca yardımını benden esirgemeyen ve yol gösterici olan danışman hocam sayın Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince deneysel ve sayısal çalışmalarımda imkân ve destek veren başta Yeşilova Holding Yönetimine, sonrasında ise mühendislik çalışmalarını harika bir ekip olarak iş birliği içinde yürüttüğümüz Yeşilova Holding Ar-Ge Merkezi çatısı altındaki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm eğitim öğretim hayatım boyunca maddi manevi her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen değerli annem Gülsüm AKÇA, babam Mustafa AKÇA, ablam Yasemin AKÇA BİNGÖL ve değerli eşim Aslı AKÇA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ali Selman AKÇA
26/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1.GİRİŞ 1
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1.Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Pazarındaki Yeri 6
2.2.Literatür Taraması 8
2.3.Deney Tasarımı Metodolojisi 17
3.MATERYAL ve YÖNTEM 21
3.1.Tasarım Süreci 21
3.2.Deney Tasarımı 27
3.3.Analiz 30
4.BULGULAR ve TARTIŞMA 36
5.SONUÇ 41
KAYNAKLAR 42
ÖZGEÇMİŞ 44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
Al	Alüminyum
kN	Kilonewton
m	Metre
mm	Milimetre
kg	Kilogram
E	Elastisite young modulü
Iox	Kesitin x eksenine göre eylemsizlik momenti
Ioy	Kesitin y eksenine göre eylemsizlik momenti
F	Kuvvet
MPa	Megapaskal
Hz	Hertz

Kısaltmalar	**Açıklama**
RUPD	Arka Alt Koruyucu (Rear Underrun Protection Device)
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik (Computer Aided Engineering)
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Elemant Analysis)
FUPD	Ön Alt Koruyucu (Front Underrun Protection Device)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
UN ECE	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
FMVSS	Federal Motorlu Araç Güvenlik Standartları
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
DOE	Deney Tasarımı (Design of Experiments)
RSM	Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodolgy)
AA	Alüminyum Alaşımı
EN-AW	Avrupa Normu İşlenmiş Alüminyum
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
DIC	Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	Kamyonla binek aracın arkadan çarpışması (Brumbelow, 2011)……..	1
Şekil 1.2.	Oluş türlerine göre ölümlü ve yaralanmalı trafik kaza bilgileri 2021-2022 (Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı, 2023)……	3
Şekil 1.3.	Standart bir RUPD görseli (Gogte & Vijendran, 2014)……..	3
Şekil 1.4.	Farklı tiplerde RUPD tasarımları……..	4
Şekil 1.5.	UN ECE R58/03 yönetmeliğine göre RUPD üzerine kuvvet uygulama noktaları (Gidlewski et al., 2022)……..	5
Şekil 2.1.	Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılım grafiği (Eroğlu & Şahiner, 2018)..	6
Şekil 2.2.	Alüminyum ekstrüzyon proses görseli (Engineered Extrusions, 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)……..	7
Şekil 2.3.	Otomobil segmentlerine göre ortalama alüminyum kullanımı (TALSAD, 2022) ……	7
Şekil 2.4.	Avrupa'da üretilen araçlardaki ortalama alüminyum kullanımı ve kullanım alanları (TALSAD, 2022) ……	8
Şekil 2.5.	RUPD ayrılma açısı (Gogte & Vijendran, 2014) ……	9
Şekil 2.6.	İç ve dış profillerin tasarım prosesleri (Sun et al., 2014) ……	9
Şekil 2.7.	Tasarım modeli (Balta et al., 2014) ……..	10
Şekil 2.8.	P1 kuvvetinin korelasyonu, A) Gerçek parça testi, B) 1 boyutlu kiriş elemanlarına sahip başlangıç tasarım modeli, C) 1 boyutlu yay elemanlarına sahip korele edilmiş tasarım modeli (Balta et al., 2016)…….	11
Şekil 2.9.	FUPD ve RUPD tasarım görselleri (Shah & Arora, 2017) ……	12
Şekil 2.10.	Bilgisayar destekli analiz RUPD çarpışma sonuçları: A) Tasarım A; B) Tasarım B; C) Tasarım C (Al-Bahash et al., 2018) ……..	13
Şekil 2.11.	P2 kuvveti karşısında, hesaplanan reaksiyon kuvveti-deplasman grafiğinin farklı yapıda RUPD tasarımlarında gösterimi (Lerspalungsanti et al., 2022) ……	15
Şekil 2.12.	RUPD üzerinde zamana bağlı oluşan şekil değişimleri (Çalışkan et al., 2021) ……..	16
Şekil 2.13.	Tasarlanan RUPD kesit görünümleri (Yıldız et al., 2023) ……	17
Şekil 2.14.	İki faktör için yanıt yüzeyi……	18
Şekil 2.15.	RSM uygulama adımları……	20
Şekil 3.1.	UN ECE R58/03 yönetmeliği tasarım sınırları……..	21
Şekil 3.2.	Çelik malzemeli referans tasarım ve sınır ölçüleri……..	21
Şekil 3.3.	Çelik malzeme tasarımın kesit ataleti ölçümü……	22
Şekil 3.4.	RUPD braketleri ve UN ECE R58/03 yönetmeliği yük uygulama noktaları..	22
Şekil 3.5.	P1 yüküne dayalı enine kesit hesaplaması için RUPD'un serbest cisim diyagramı……	23
Şekil 3.6.	Basit bir profil kesiti gösterimi……..	24
Şekil 3.7.	UN ECE R58/03 P1 yükü uygulama yönü ve tasarım eksenleri (X,Y,Z)……..	25
Şekil 3.8.	Aluminyum-D şekilli bir orta federli data ve belirlenen tasarım parametreleri……	25
Şekil 3.9.	Alüminyum ekstrüzyon profili kesit yüzey alanı……..	26
Şekil 3.10.	Analiz modeli ve P1 yükü uygulaması……..	30
Şekil 3.11.	Analiz modeli şasi sabitleme noktası……	31

Şekil 3.12.	1B ve 2B analiz eleman modelleri…….	31
Şekil 3.13.	ASTM E8 sub-size çekme test çubuğu ölçüleri…….	32
Şekil 3.14.	Çekme testi cihazı ve EN AW 6063 T6 alaşımı numune görseli……	33
Şekil 3.15.	EN AW 6063 T6 alaşımı için gerçek gerilme-gerinim grafiği……	34
Şekil 3.16.	EN AW 6082 T6 alaşımı için gerçek gerilme-gerinim grafiği……	34
Şekil 4.1.	Birinci RSM deney tasarımı pareto diyagramları……	36
Şekil 4.2.	Birinci RSM deney tasarımı optimizasyon sonrası parametre sonuçları……	37
Şekil 4.3.	İkinci RSM deney tasarımı optimizasyon sonrası parametre sonuçları……..	37
Şekil 4.4.	RSM optimizasyon sonucu parametrelerin değerleri……	38
Şekil 4.5.	EN AW 6063 T6 plastik gerinim analiz sonucu…….	39
Şekil 4.6.	EN AW 6063 T6 gerilme analiz sonucu……	39
Şekil 4.7.	EN AW 6063 T6 yer değiştirme analiz sonucu……	39
Şekil 4.8.	EN AW 6082 T6 plastik gerinim analiz sonucu……	40
Şekil 4.9.	EN AW 6082 T6 gerilme analiz sonucu……	40
Şekil 4.10.	EN AW 6082 T6 yer değiştirme analiz sonucu……	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 1.1.	Bölgelere göre RUPD yönetmelikleri (Gidlewski et al., 2022).....	2
Çizelge 3.1.	Taslak tasarımlara ait kesit atalet momentleri ve ağırlıkları.....	24
Çizelge 3.2.	Tasarım parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri.....	26
Çizelge 3.3.	Birinci RSM deney modeli ve deneylerin yanıtları.....	27
Çizelge 3.4.	İkinci RSM deney tasarımı parametreleri.....	28
Çizelge 3.5.	İkinci RSM deney modeli ve deneylerin yanıtları.....	29
Çizelge 3.6.	EN AW 6063 T6 ve EN AW 6082 T6 alaşımları mekanik özellikleri	35

1. GİRİŞ

Ağır vasıta araçları, ticari taşımacılıkta taşıdığı yük ve sorumluluk açısından kritik bir rol oynar. Bu araçlar, genellikle uzun mesafelerde ve yoğun trafik koşullarında çalışırken hem sürücü hem de yoldaki diğer kullanıcılar için güvenlik ve dayanıklılık standartlarına uymak zorundadır. Karayollarında meydana gelen trafik kazalarında, hızla seyreden hafif araçların ağır vasıta araçlarına arkadan çarpması sonucu ciddi yaralanmalı ve ölümlü kazalar yaşanmaktadır. Bu tür kazalar ağır vasıta araçlar ile hafif araçların şasi yüksekliklerindeki fark nedeniyle daha tehlikeli hal almaktadır. Arkadan çarpan araçların üst yapıları, genellikle ağır vasıta aracının alt bölgesine girmekte, bu da tehlikeli sonuçlara yol açmaktadır (Şekil 1.1) (Brumbelow, 2011) . Bu bağlamda, yük taşıma amacıyla kullanılan kamyon ve çekici gibi ağır ticari araçlarda bulunan pasif bir güvenlik bileşeni olan arka alt koruyucu (RUPD) parçaların rolü giderek daha önemli hale gelmektedir.



Şekil 1.1. Kamyonla binek aracın arkadan çarpışması (Brumbelow, 2011)

Bu parçaların tasarımı ve uygulanması, yolcuların güvenliği açısından kritiktir. ABD, Kanada, Avrupa ve diğer ülkelerde kullanılan çeşitli alt arka koruyucu (RUPD) düzenlemeleri bulunmaktadır (Çizelge 1.1) (Gidlewski et al., 2022). Avrupa pazarında satılmakta olan araçların uyması gereken bir regülasyon olan UN ECE R-58 yönetmeliği, bu parçaların tasarımında uyulması gereken kriterleri ve sağlaması gereken standartları belirlemektedir. Bu yönetmelikte 2016 yılında değişiklik yayını yapılmış ve

03 numaralı revizyona yükseltilmiştir. Bu son düzenlemede, hafif araçların ön çarpışma bileşenleri ile ağır vasıta aracın şasisi arasındaki yükseklik farkını azaltmak için RUPD yükseklik konumu yere yaklaştırılmış ve RUPD kirişine uygulanan test kuvvetleri, dayanımını arttırmak amacıyla iki katına çıkartılmıştır.

Çizelge 1.1. Bölgelere göre RUPD yönetmelikleri (Gidlewski et al., 2022)

Countries and Requirements	USA	Canada	Europe and Australia	China
Standard No.	FMVSS 223/224	CMVSS 223	UN ECE Reg. 58	GB 11567-2017
Height of the RUPD bar	min. 100 mm	min. 100 mm	min. 100/120 mm	min. 100/120 mm
Max. RUPD ground clearance	560 mm (before the test)	560 mm (before and after the test)	550 mm (before the test)	500/550/560 mm
Force applied at P1	50 kN	50 kN	100 kN	50 kN
Force applied at P2	50 kN	50 kN	100 kN	50 kN
Force applied at P3	100 kN	100 kN	180 kN	100 kN
Energy absorbed	5650 J (at P3), at 125 mm max. deformation	20,000 J (in the RUPD as a whole) at 350 kN	Not specified	Crash test with a test carriage Carriage deceleration shall not exceed 40 g

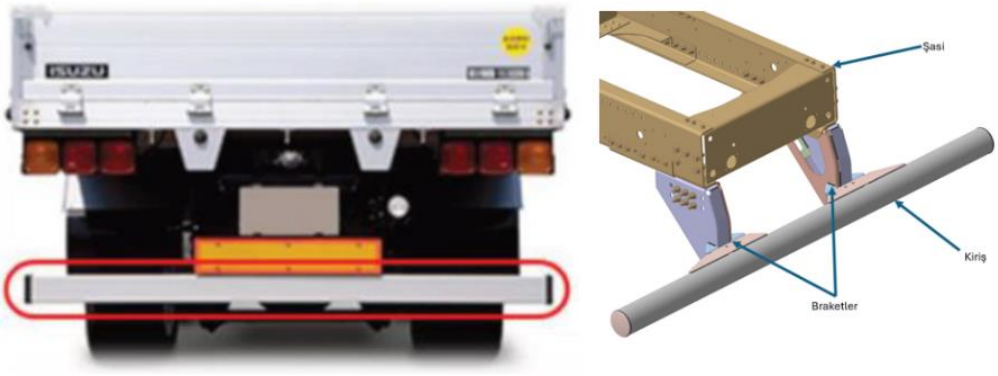
2021-2022 yıllarında Türkiye'de kaydedilen 197261 trafik kazasının %10,75'ini arkadan çarpma kazaları oluşturmaktadır (Şekil 1.2) (Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı, 2023) . Bu tür kazaların önemli bir kısmı, ağır vasıta araçların da dahil olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Ağır vasıta araçların fren mesafeleri daha uzun olup, manevra kabiliyetleri sınırlıdır. Bu nedenle, arkadan çarpma kazalarının önlenmesinde takip mesafesi büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, ağır vasıta araçlarda bulunan arka alt koruyucu parçalar (RUPD) bu tür kazaların etkilerini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu koruyucu parçalar, çarpma anında küçük araçların ağır vasıta altına girmesini engelleyerek can kaybı ve ciddi yaralanmaları önleyebilir. Ağır vasıta sürücülerinin özellikle şehirlerarası yollarda hız kontrolüne dikkat etmeleri ve diğer araçlarla aralarındaki mesafeyi korumaları gerekmektedir. Aynı şekilde, diğer sürücülerin de ağır vasıta araçların hareketlerini öngörerek güvenli bir sürüş mesafesi bırakmaları önemlidir. Bu tedbirler, arkadan çarpma kazalarının oranını azaltmada etkili olabilir ve trafikte genel güvenliği artırabilir.

KAZA OLUŞ TÜRÜ	Yerleşim Yeri		Yerleşim Yeri Dışı		TOPLAM	
	Kaza Sayısı	%	Kaza Sayısı	%	Kaza Sayısı	%
Yandan Çarpma veya Yandan Çarpışma	58.068	35,70	4.972	14,38	63.040	31,97
Yayaya Çarpma	33.530	20,61	936	2,71	34.466	17,47
Devrilme, Savrulma, Takla	18.782	11,55	4.560	13,18	23.342	11,83
Yoldan Çıkma	9.218	5,67	13.053	37,73	22.271	11,29
Arkadan Çarpma	16.180	9,95	5.026	14,53	21.206	10,75
Karşılıklı Çarpışma	9.336	5,74	1.894	5,47	11.230	5,69
Engel/Cisim ile Çarpışma	7.583	4,66	2.388	6,90	9.971	5,05
Yan Yana Çarpışma	2.651	1,63	319	0,92	2.970	1,51
Duran Araca Çarpma	2.396	1,47	390	1,13	2.786	1,41
Park Etmiş Araca Çarpma	1.625	1,00	83	0,24	1.708	0,87
Araçtan Düşen İnsan	1.494	0,92	136	0,39	1.630	0,83
Hayvana Çarpma	544	0,33	467	1,35	1.011	0,51
Çoklu Çarpışma	639	0,39	176	0,51	815	0,41
Zincirleme Çarpışma	569	0,35	167	0,48	736	0,37
Araçtan Düşen Cisim	52	0,03	27	0,08	79	0,04
TOPLAM	**162.667**	**100**	**34.594**	**100**	**197.261**	**100**

Kaynak: Emniyet Genel Müdürlüğü ve Jandarma Genel Komutanlığı trafik kaza verilerine göre düzenlenmiştir.

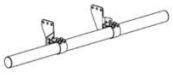
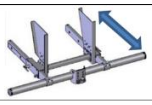
Şekil 1.2. Oluş türlerine göre ölümlü ve yaralanmalı trafik kaza bilgileri 2021-2022 (Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı, 2023)

RUPD bir çapraz eleman kirişi ve destek elemanları olmak üzere genellikle iki parçadan meydana gelir. RUPD'ların büyük bir kısmı çelik veya alüminyum malzemeden üretilir ve aracın şasesine vida veya kaynak yöntemiyle monte edilir. Avrupa'da geçerli olan yasalara göre, tüm kamyonlar, kendi araç kategorilerine, ağırlıklarına ve yük taşıma kapasitelerine uygun bir arka alt koruma cihazına sahip olmalıdır. Standart bir RUPD Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Standart bir RUPD görseli (Gogte & Vijendran, 2014)

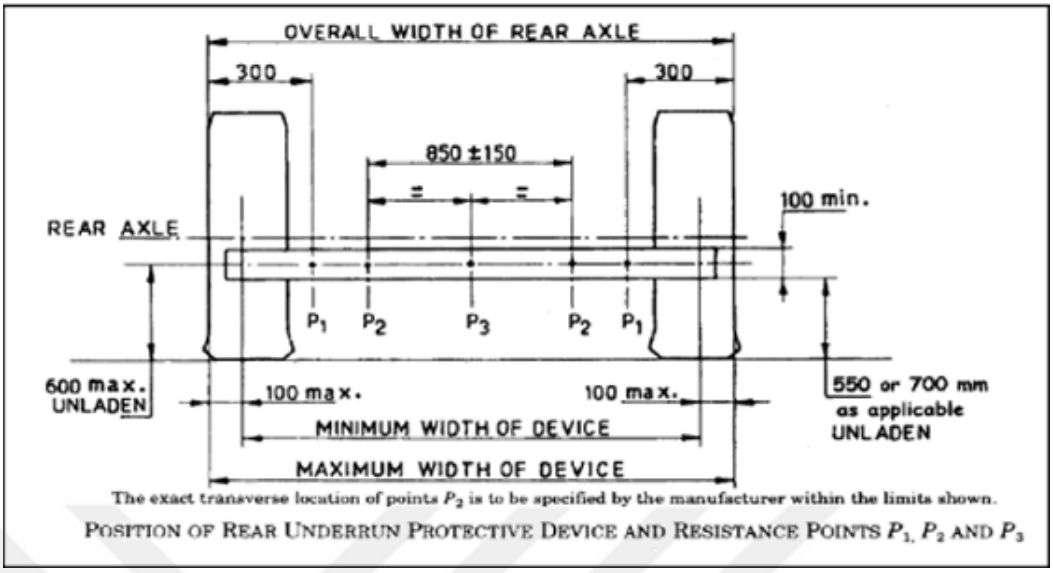
RUPD, kullanıcı ihtiyacına bağlı olarak, sabit ya da ayarlanabilir bir yapıda olabilir ve bu yapılar katlanabilir, kaydırılabilir ya da katlanabilir-kaydırılabilir özellikleri içerebilir. Şekil 1.4'te farklı tiplerde RUPD tasarımları kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları ile görülmektedir.

Taslak Görsel					
Tip	Sabit Arka Alt Koruyucu	Katlanabilir Arka Alt Koruyucu	Kayabilir Arka Alt Koruyucu	Katlanabilir ve Kayabilir (Telescopic) Arka Alt Koruyucu	Üç Parçalı Arka Alt Koruyucu
Kullanım Alanı	Damperli Kamyon, Kargo Araçları, Beton Mikseri, Vinç Sistemleri, Özel Üst Gövdeler				Platform Araçları
Avantajlar	Yüksek kuvvetlere dayanıklıdır, test sonrasında daha az deformasyona uğrar, fiyat açısından rekabetçidir, çeki demiri kolay entegre edilebilir	Kaldırması kolay, yerden yüksekliği ayarlamak mümkün	Kaldırması kolay,yatay konumu ayarlamak mümkün, çeki demiri monte edilebilir	Kaldırması kolay, yerden yüksekliği ve yatay konumu ayarlamak mümkün	Platfrom kaldırma sistemine yeterli açıklığı verebilir
Dezavantaj	Yerden yüksekliği ve yatay mesafeyi ayarlamak için esnekliği az	Yatay mesafenin ayarlanması mümkün değil, yüksek maliyetler, çeki demirinin entegre edilmesi zor, daha az dayanıklılık, tork kaybı sorunları	Sınırlı yerden yükseklik ayarı, yüksek maliyetler, daha az dayanıklılık, tork kaybı sorunları	Yüksek maliyetler, çeki demirinin entegre edilmesi zor, daha az dayanıklılık, tork kaybı sorunları	Yerden yüksekliği ve yatay mesafeyi ayarlamak için esnekliği az

Şekil 1.4. Farklı tiplerde RUPD tasarımları

Geleneksel olarak çelik malzemeden üretilen bu parçalar, son yıllarda alüminyumun avantajlarından faydalanarak yeniden tasarlanmaya başlanmıştır. Alüminyumun hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci gibi özellikleri, ağır vasıta araçlarının arka alt koruyucu parçalarının tasarımında yeni olanaklar sunmaktadır. Tezin öncelikli amacı, ağır hizmet kamyonu ile binek otomobil arasında arkadan çarpışma durumunda çarpışmanın şiddetini azaltmak için etkili, rekabetçi ve hafif bir çözüm bulmaktır. Bu hedefe ulaşmak için, pasif bir güvenlik bileşeni olan ve UN ECE R58 Avrupa yönetmeliğine uygun olması gereken alüminyum arka alt koruma tasarlanacak, modellenecek, analiz ve optimize edilecektir.

Hafif bir yapıya ulaşmak amacıyla farklı alüminyum alaşımları kullanılacak ve karşılaştırılacaktır. Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri test cihazında ölçülecek ve bu mekanik özellikler arka alt koruma tasarımının bilgisayar destekli analizinde kullanılacaktır ve UN ECE R58 yönetmeliğinin belirttiği kuvvetler uygulanacaktır (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. UN ECE R58/03 yönetmeliğine göre RUPD üzerine kuvvet uygulama noktaları (Gidlewski et al., 2022)

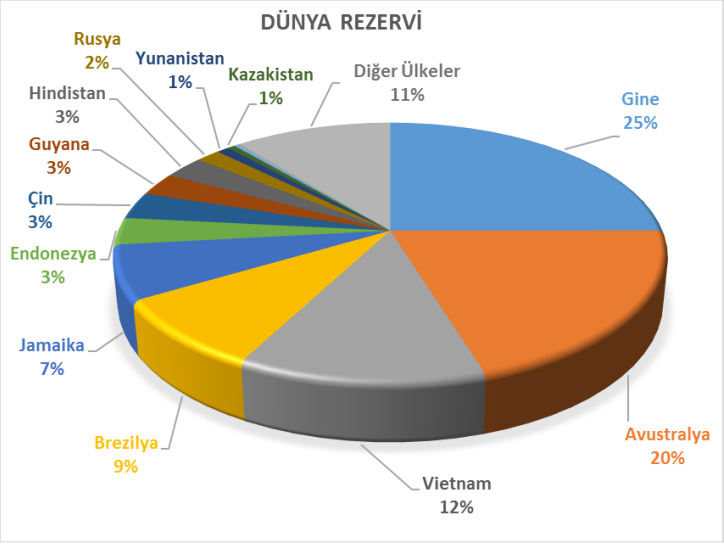
Sonuç kısmında çelik tasarım ve farklı alaşımlardan oluşan alüminyum tasarım karşılaştırılacaktır. İster çelik ister alüminyum olsun, RUPD tasarımı sınır koşulları dikkate alınarak oluşturulacak ve pazar beklentisi akılda tutulacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Pazarındaki Yeri

Alüminyum (Al) atom numarası 13, yoğunluğu 2,70 gr/cm³ olan gümüş renkli hafif bir metaldir. Yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en bol bulunan element olan alüminyum doğada saf olarak bulunmaz, oksit ve silikat bileşikler halindedir. Alüminyum metali üretimi birincil ve ikincil üretim olmak üzere ikiye ayrılır. Birincil alüminyum üretimi boksit cevherlerinden elde edilir. İkincil alüminyum ise hurda alüminyumun geri dönüşümü yolu ile üretilir (Eroğlu & Şahiner, 2018).

Alüminyum doğada çok yaygın bulunmasına rağmen, metal alüminyum ekonomik olarak boksit cevherinden elde edilir. Dünya boksit rezervi toplamı 55-75 milyar ton olup, bunun yaklaşık 30 milyar tonu işletilebilir rezerv durumundadır. Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılım grafiği (Eroğlu & Şahiner, 2018)

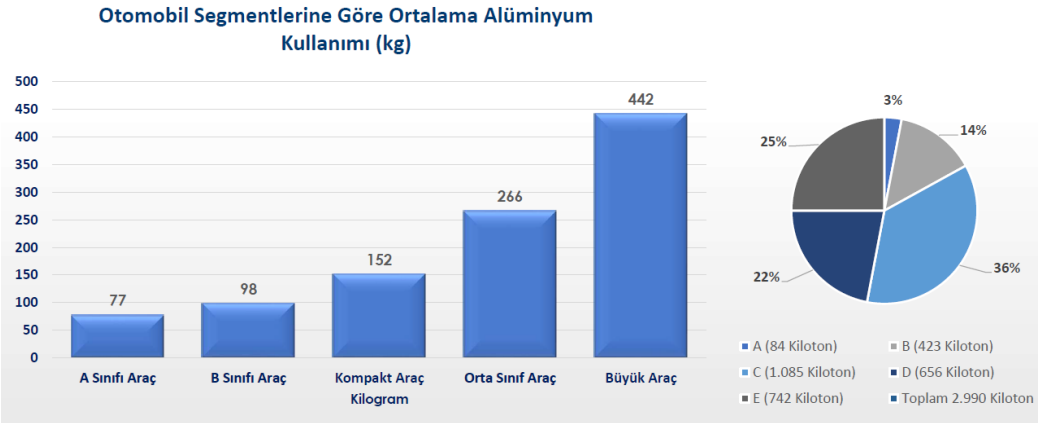
Alüminyum, dünyanın en bol bulunan metallerinden biridir ve hafifliği, dayanıklılığı ve korozyona direnci nedeniyle birçok endüstride tercih edilir. Alüminyum ekstrüzyon prosesi (Şekil 2.2), alüminyum alaşımlarının belirli bir kesit boyunca sürekli olarak

akıtılmasıdır. Bu proses, alüminyumun mükemmel plastisitesini ve düşük erime noktasını kullanır.



Şekil 2.2. Alüminyum ekstrüzyon proses görseli (Engineered Extrusions, 2024'ten değiştirilerek alınmıştır)

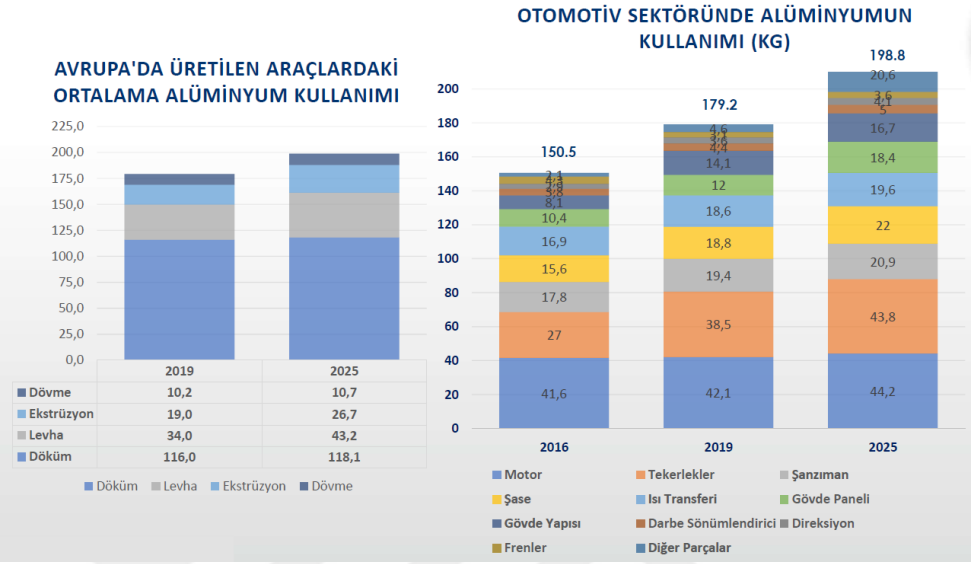
Otomotiv sektöründe, alüminyumun hafifliği ve dayanıklılığı, araçların yakıt verimliliğini artırmak için idealdir. Otomobil segmentlerine göre 2020 yılında ortalama alüminyum kullanımı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Alüminyum, otomobil gövdelerinde, motor parçalarında ve süspansiyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Son yıllarda, alüminyum kullanımı otomotiv sektöründe önemli ölçüde artarak devam etmektedir.



Şekil 2.3. Otomobil segmentlerine göre ortalama alüminyum kullanımı (TALSAD, 2022)

Alüminyumun otomotiv sektöründeki kullanımı, yakıt verimliliği ve emisyon standartlarına uyum sağlama ihtiyacı nedeniyle artmaktadır. 2020 yılında, otomotiv sektöründe kullanılan alüminyumun miktarı bir önceki yıla göre %10 artmıştır.

Gelecekte, alüminyumun otomotiv sektöründeki kullanımının daha da artması beklenmektedir (Şekil 2.4). Elektrikli araçların popülaritesinin artması ve hafif malzemelere olan talebin artması, bu trendi desteklemektedir.

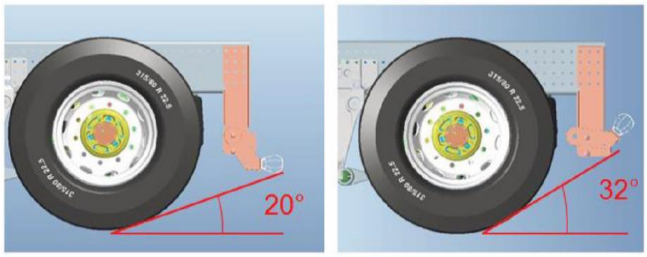


Şekil 2.4. Avrupa'da üretilen araçlardaki ortalama alüminyum kullanımı ve kullanım alanları (TALSAD, 2022)

2.2.Literatür Taraması

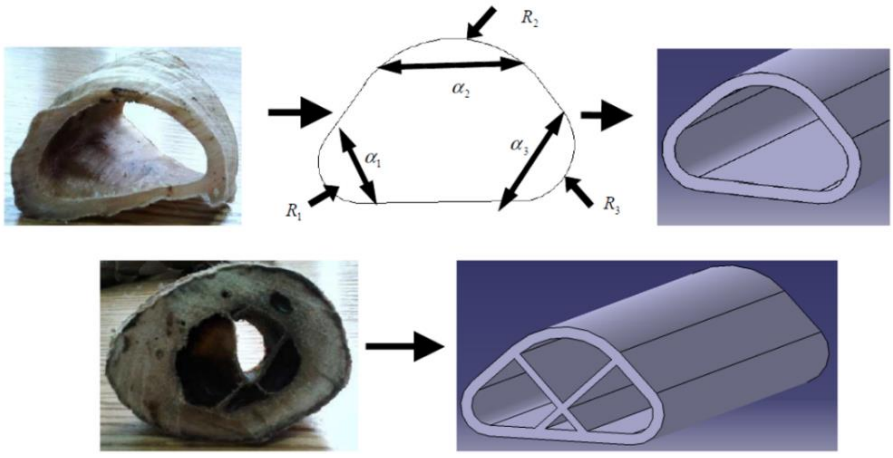
İncelenen bir çalışmada kısa çıkıntılı araç için hareketli (katlanabilir ya da kayabilir) RUPD tasarımı yapmak için şasi bağlantı sistemi üzerine çalışma yaparak kiriş üzerine değil şasi bağlantısında daha fazla ayrılma açısı sağlayacak (Şekil 2.5), güncel tasarım UN ECE R58/02'den 03'e geçen regülasyon gerekliliklerini de karşılayacak tasarım oluşturmuşlardır.

Çalışmalarını 4 adet konsept tasarım arasından Kesselring Matrix ile seçim yaptıktan sonra ve detay tasarımı oluşturup bilgisayar destekli analizler gerçekleştirmişlerdir. Tasarımda kullanılan tüm parçaların malzemesi AISI 304 çeliğidir (Gogte & Vijendran, 2014).



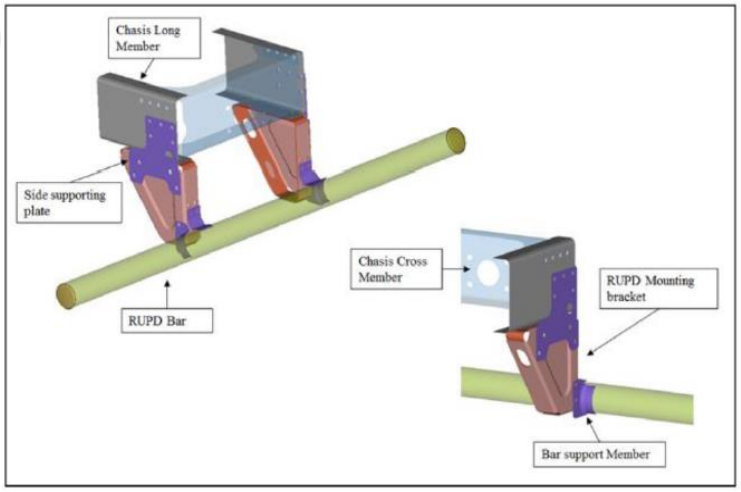
Şekil 2.5. RUPD ayrılma açısı (Gogte & Vijendran, 2014)

Günümüzde birçok araştırmacı, bazı modern bilim ve teknoloji sorunlarının çözümlerinin doğadan esinlenerek çözüm bulmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirmektedir. Hayatta kalmak ve çevreye uyum sağlamak için birçok canlı, kendilerini çeşitli morfolojilere ve karmaşık yapılara dönüştürür ve çevredeki ortama maksimum düzeyde uyum sağlayan ve uyumlu bir sistem geliştirir. Örneğin araştırmacılar, diş, diş, boynuz, kemik, toynak ve boynuz gibi bazı biyolojik yapıların iyi enerji emme kapasitesine ve yapısal dayanıklılığa sahip olduğunu bulmuşlardır. Yapılan bir çalışmada, koyun boynuzundan esinlenerek kiriş kesiti oluşturarak enerji emme kapasitesinden yararlanmak istenilmiştir. Koyun boynuzu örneğinden kesit açısı ve radyus değerlerini ana tasarım parametresi olarak belirleyerek iç ve dış kesit olmak üzere iç içe iki profil kesiti ortaya çıkarmışlardır (Şekil 2.6). Çalışmalarında 3, 4 ve 5 mm kalınlıklı çelik malzeme tasarımı ile standart bir tasarımın enerji emme kabiliyetlerini karşılaştırmışlardır (Sun et al., 2014).



Şekil 2.6. İç ve dış profillerin tasarım prosesleri (Sun et al., 2014)

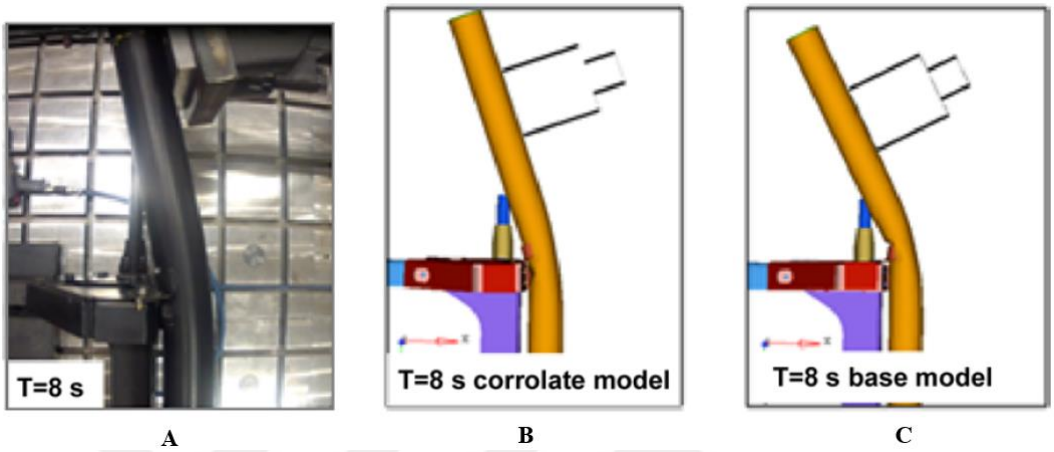
Balta ve arkadaşlarının (2014) gerçekleştirdiği darbe yüklemesine karşı RUPD tasarımının optimize edilmesi çalışmasında (Şekil 2.7), RADIOSS yazılımı kullanılarak gerçek hayat testiyle ilişkilendirilmiş bir bilgisayar destekli mühendislik (CAE) modeli oluşturulmuştur. UN ECE R58/03 yönetmeliğine göre P1 yük durumu üzerinde etkili parametreleri ortaya çıkarmak için tam faktöriyel deney tasarımı (DOE) uygulanmıştır. DOE çalışmasında, kiriş tipinin en az etkili faktör olduğu bulunurken, destek yeri, malzeme ve kalınlık, P1 yük durumu sırasında maksimum kuvvet üzerinde en önemli faktörler olarak belirlenmiştir. Daha sonra, tasarlanan deneylerin sonuçları kullanılarak sonlu eleman modeline Pareto optimizasyonu uygulanmıştır. RUPD kalınlığını minimumda ve P1 yükünü 50 kN'nin üzerinde tutmak tasarım hedefleri olarak belirlenmiştir. NSGA-II çok amaçlı optimizasyon yöntemi ile en maliyet etkin tasarımı bulmak için P1 yüklemesine bir kısıtlama uygulanmıştır. Pareto optimal çözüm olarak, A konumunda desteklenmiş, S355 JRH malzemeden yapılmış 4,3 mm kalınlığında boru kesitli kiriş seçilmiştir. Bu çözüm, maliyet, üretim ve performans açısından seri üretim dikkate alındığında en iyi çözüm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.7. Tasarım modeli (Balta et al., 2014)

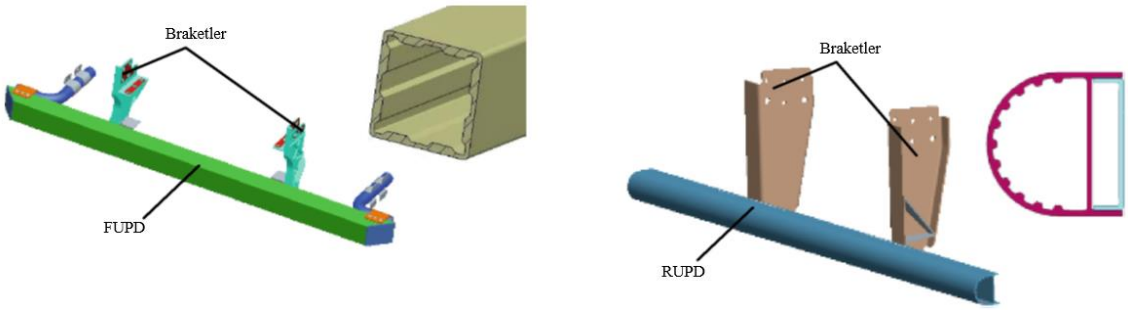
Balta ve arkadaşları (2016) gerçekleştirdikleri bir başka çalışmada RUPD tasarımının parametreleri ile yükleme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanarak bulmuştur. Optimum tasarım parametreleri, tasarım optimizasyon prosedürü kullanılarak belirlenmiştir. RUPD tasarımının doğrulanması amacıyla, hesaplanan ve öngörülen ECE-R58/03 P1 yük durumu kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.8).

Çalışmanın sonuçları, RSM modelinin yeterliliğini ve öngörülen modelin geçerliliğini doğrulamaktadır. Bu çalışma, ağır hizmet kamyonları için RUPD tasarımında minimum ağırlık, maliyet ve uygun performans hedeflerine ulaşmak için önemli katkılar sağlamaktadır.



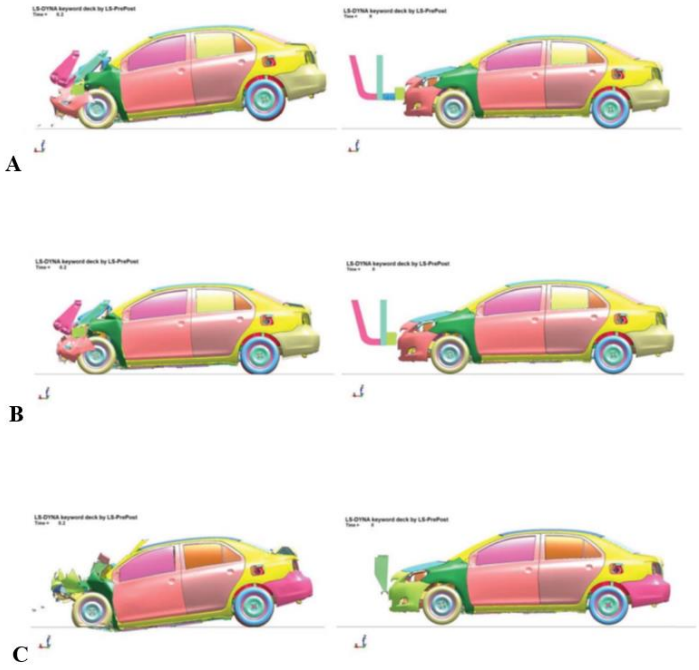
Şekil 2.8. P1 kuvvetinin korelasyonu, **A)** Gerçek parça testi, **B)** 1 boyutlu kiriş elemanlarına sahip başlangıç tasarım modeli, **C)** 1 boyutlu yay elemanlarına sahip korele edilmiş tasarım modeli (Balta et al., 2016)

Alüminyum malzemelerin kullanımıyla araç ağırlığını azaltma ve taşıma kapasitesini artırmaya yönelik gerçekleştirilen bir başka çalışmada, şasi ve kartel koruma cihazlarının alüminyum malzemeler kullanılarak tasarlanması ve yüksek mukavemetli perçinler ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi yerine perçinleme işlemi kullanılarak, alüminyum bileşenlerin üretim süreci kolaylaştırılmıştır. Sanal simülasyonlar OptiStruct ve LS-DYNA yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tasarımlar fiziksel testlerle doğrulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, yeni alüminyum tasarımların araç ağırlığını 276 kg azaltarak taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, ön alt koruma parçası (FUPD) ve RUPD'nin yeni tasarımları (Şekil 2.9), çarpışma sırasında enerji absorpsiyonunu artırmış ve yolcu güvenliğini sağlamıştır. Sanal ve fiziksel test sonuçları, tasarımların güvenli ve dayanıklı olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, ticari araçlar için geliştirilen alüminyum bileşenlerin, geleneksel çelik bileşenlere kıyasla önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır (Shah & Arora, 2017).



Şekil 2.9. FUPD ve RUPD tasarım görselleri (Shah & Arora, 2017)

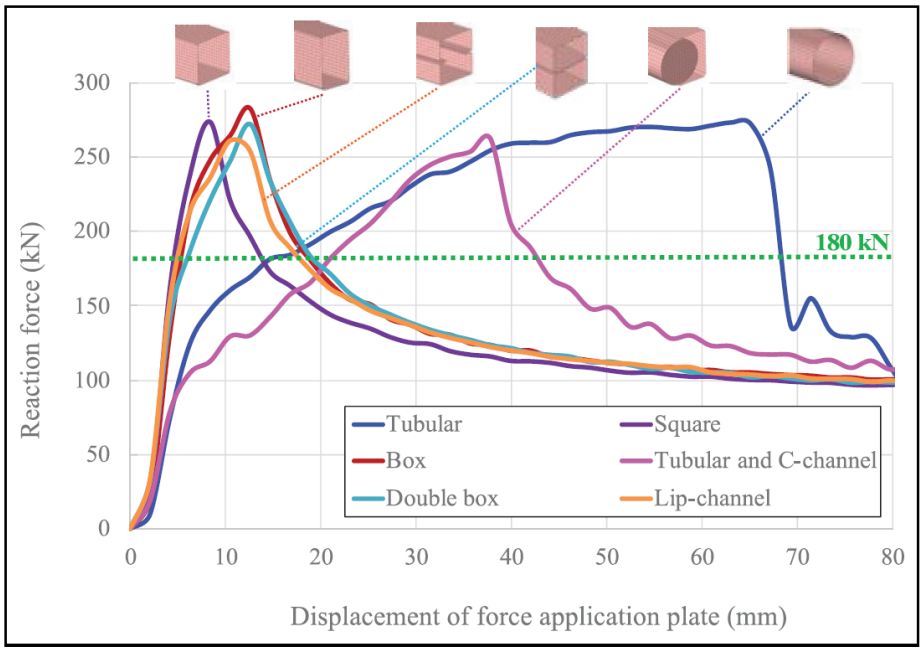
FMVSS 223/224 yönetmeliklerine dayalı olarak geliştirilen RUPD tasarımı çalışmasında Al-Bahash ve arkadaşları (2018) kazaların şiddetini azaltmak ve yolcu güvenliğini artırmayı hedeflenmiştir. Bu amaçla, çalışmada üç farklı RUPD tasarımı (Tasarım A, B ve C) geliştirmiş ve performans analizleri LS-DYNA yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar simülasyonu ile gerçekleştirmiştir. Toyota Yaris (2010) model bir araç, farklı hızlarda (45, 54 ve 63 km/s) bu tasarımlarla çarpıştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, yeni RUPD tasarımının enerji absorpsiyonunu %68,87 oranında artırdığını ve yolcu aracının yavaşlamasını %66,116 oranında azalttığını göstermiştir. Özellikle Tasarım A, tasarım B ve temel tasarım (tasarım C) ile karşılaştırıldığında en iyi performansı göstermiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, tasarım A, çarpışma sonrası araç deformasyonunu ve yolcu bölmesi girişini önemli ölçüde azaltmıştır (Şekil 2.10). Al-Bahash ve arkadaşlarının çalışmasından elde edilen veriler, yeni RUPD tasarımlarının küçük araçların ağır araçlarla çarpışmaları sonucu oluşan kazalarda yolcu güvenliğini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.10. Bilgisayar destekli analiz RUPD çarpışma sonuçları: **A)** Tasarım A; **B)** Tasarım B; **C)** Tasarım C (Al-Bahash et al., 2018)

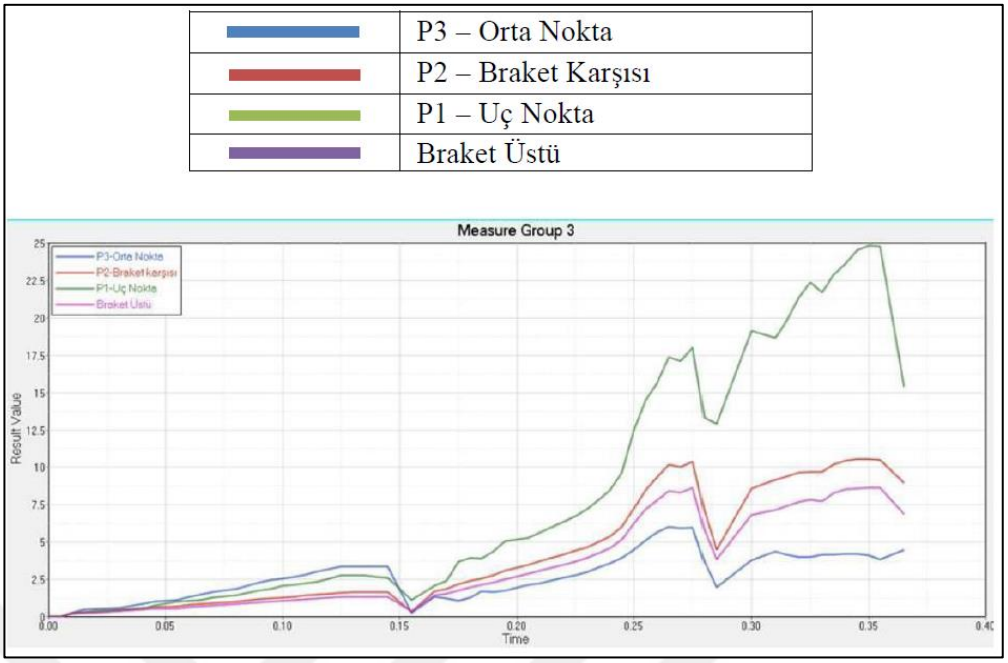
Alüminyum malzeme alaşımları ve yaşlandırma işlemleri mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etki ortaya çıkarmaktadır. Yapılan bir çalışmada EN AW 6082 alüminyum alaşımı ve yapay yaşlandırma işlemi kullanılarak ağır vasıta araçları için RUPD tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. UN ECE R58/03 yönetmeliklerine uygun olarak geliştirilen RUPD tasarımı, hafif araçların ağır araçların altına girmesini önlemek ve kazaların ciddiyetini azaltmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu çalışmada, alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini artırmak için çeşitli ısıl işlemler uygulanmış ve yapay yaşlandırma işlemi ile EN AW 6082 alüminyum alaşımının akma dayanımının %48 oranında artırıldığı görülmüştür. Çalışmada, çelik ve alüminyum RUPD tasarımları karşılaştırılmış ve alüminyum tasarımının, çelik tasarıma kıyasla yaklaşık %35 oranında ağırlık azaltımı sağladığı belirlenmiştir. ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler, her iki tasarımın enerji ve deformasyon değerlerini ortaya koymuş ve alüminyum tasarımının hafif olmasına rağmen yeterli dayanıklılık sağladığını göstermiştir. Bu bulgular, ticari araçlar için geliştirilen alüminyum bileşenlerin, geleneksel çelik bileşenlere kıyasla önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır (Gökçe, 2019).

Lerspalungsanti ve arkadaşları (2022), UN ECE R58/03 standardına uygun olarak geliştirilen RUPD tasarımı sürecinde morfolojik analiz ve beyin fırtınası yöntemleri kullanılarak 72 potansiyel çözüm üretmiştir. Üç potansiyel RUPD tasarımı, çeşitli ağır vasıta türleri için prototip olarak seçilmiştir. Bu prototipler, düz yataklı kamyon, kutu kamyon, sıvı tankeri, tehlikeli madde tankeri ve özel amaçlı kamyonlar gibi farklı araç türlerine uyacak şekilde tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak yapılan simülasyonlar, bu prototiplerin yapısal dayanıklılığını değerlendirmiştir. ABAQUS yazılımı ile yapılan analizler, prototiplerin gerilme, deformasyon ve maksimum tepki kuvveti açısından değerlendirilmesini sağlamıştır. Simülasyon sonuçları, tam ölçekli prototiplerin gerçek test sonuçları ile doğrulanmış ve önerilen tüm RUPD prototiplerinin UN ECE R58/03 standardını karşıladığı ve test yüklerine dayanıklı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, koruyucu kirişin farklı tasarımları incelenmiş ve bu tasarımların yapısal dayanıklılık ve enerji emilim kapasitesi değerlendirilmiştir. Çeşitli koruyucu kiriş tasarımlarının enerji emilim kapasitesi analiz edilmiştir (Şekil 2.11) ve özellikle tübüler kesitli koruyucu kirişin, yüksek enerji emilim kapasitesi sağlayarak yolcu güvenliğini artırdığı görülmüştür. Farklı RUPD tasarımlarının toplam ağırlıkları ve maksimum reaksiyon kuvvetleri değerlendirilmiş ve her bir tasarımın güç-ağırlık oranı hesaplanmıştır. Çift kutu kesitli koruyucu kirişin en yüksek güç-ağırlık oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, ağır vasıta araçları için geliştirilen RUPD tasarımlarının enerji emilim kapasitesini artırarak ve yapısal dayanıklılığı sağlayarak yolcu güvenliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Morfolojik analiz ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geliştirilen bu tasarım yaklaşımı, ticari ölçekte diğer RUPD türleri için de bir kılavuz olarak kullanılabilir.



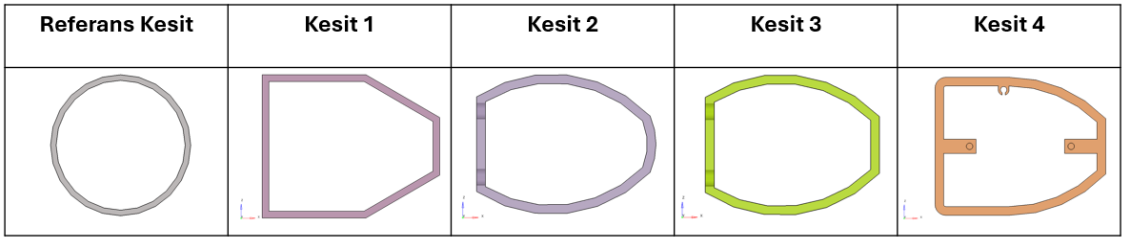
Şekil 2.11. P2 kuvveti karşısında, hesaplanan reaksiyon kuvveti-deplasman grafiğinin farklı yapıda RUPD tasarımlarında gösterimi (Lerspalungsanti et al., 2022)

Alüminyum malzeme kullanılarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada, yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu alüminyum malzemeler kullanılarak, ağırlık artışını engellemek ve tasarımı geliştirmek hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, RUPD tasarımı FEA kullanılarak yapılan yapısal analizler, tampon tasarımının gerilme ve şekil değiştirme davranışlarını değerlendirmiştir. Çalışmada, alüminyum malzemelerin kullanımıyla ağırlık azaltma sağlanmış ve alüminyum RUPD tasarımı, mevcut çelik tasarıma kıyasla %25-34 oranında daha hafif olmuştur. İlk aşamada dikdörtgen formda tasarlanan RUPD, takviyelerle güçlendirilerek yönetmelik şartlarını karşılamıştır. FEA ile yapılan analizlerde, parça üzerinde en yüksek gerilme ve şekil değiştirme bölgeleri tespit edilmiştir (Şekil 2.12). Bu bölgeler, sabitleme braketleri ile aracın orta ekseni arasında yoğunlaşmıştır. Optimizasyon çalışmaları kapsamında, 7075-T6 malzeme kullanılarak RUPD kalınlığı 1.5 mm'ye düşürülmüş ve toplam ağırlığı %34 oranında azaltılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, alüminyum malzemelerin kullanımıyla ticari araçların yapısal bileşenlerinin ağırlığının azaltılabileceğini ve taşıma kapasitesinin artırılabileceğini göstermektedir (Çalışkan et al., 2021).



Şekil 2.12. RUPD üzerinde zamana bağlı oluşan şekil değişimleri (Çalışkan et al., 2021)

Alüminyum ekstrüzyon profili kesiti üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada, tasarım ve modelleme sürecinde profillerin ekstrüzyon ile üretilebilirliği göz önüne alınarak dört farklı kesit geometrisi incelenmiştir. Bu kesitler, EN AW 6063 T6 alüminyum alaşımı kullanılarak tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar analizleri, Altair Hyperworks Optistruct modülünde doğrusal olmayan şekilde modellenmiş ve UN ECE R58/03 standardında belirtilen beş farklı yükleme durumu analiz edilmiştir. En kritik yükleme durumu, 100 kN kuvvetinin tekerleklerin dış kenarlarına teğet olarak gelen uzunlamasına düzlemlerden 300 mm konumlandırılarak uygulanması olarak belirlenmiştir. Bu yükleme durumu, RUPD'un dayanıklılığını test etmek için önemli bir kriterdir. Analiz sonuçlarına göre, dört farklı kesit geometrisi (Şekil 2.13) arasında en yüksek von Mises gerilmesi, yer değiştirme ve plastik şekil değişimlerine bakılmış ve kesit 4 en düşük deformasyon ve gerinim değerlerini göstermiştir. Kesit 4, dikdörtgen ve silindirik yapının birleşimi olup, rijitliği sağlamanın yanı sıra ağırlığı da minimize etmektedir. Bu nedenle, kesit 4 optimum kesit olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.13. Tasarlanan RUPD kesit görünümleri (Yıldız et al., 2023)

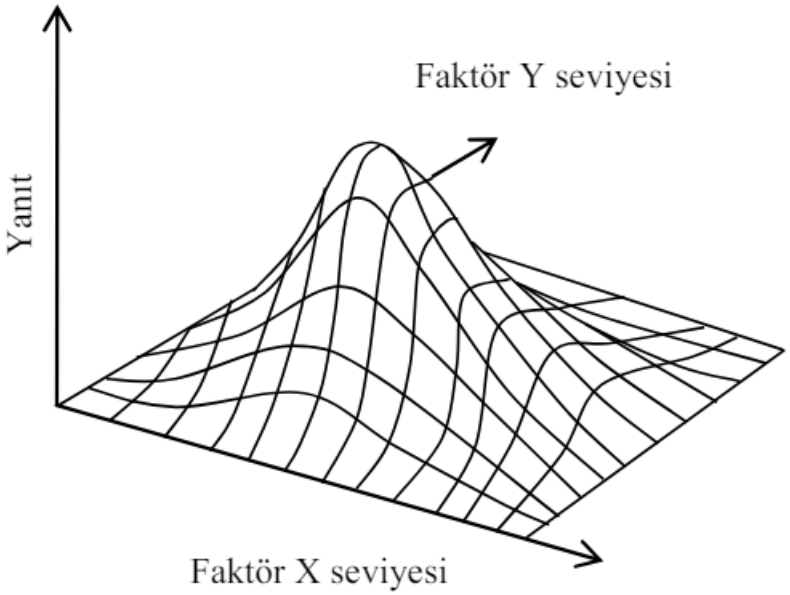
2.3.Deney Tasarımı Metodolojisi

Deney tasarımı (Design of Experiment, DOE) mühendislik, üretim, tarım, pazarlama ve bilimsel araştırmalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir sürecin veya sistemin performansını etkileyen değişkenleri (faktörleri) ve bu değişkenlerin birbirleriyle etkileşimlerini sistematik olarak incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, en az sayıda deneyle en fazla bilgi elde etmektir. Bu sayede, süreç iyileştirme ve optimizasyon daha hızlı ve maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir (Montgomery, 2017).

Deney tasarımında ilk adımda performansı ortaya koyacak kriterler faktörler tespit edilir. Böylece en iyi sonuçların bulunabileceği koşullar sağlanmış olur. Sonraki adımda bu faktörlerin performansını gösteren özelliklere bağlı etkilerin belirlenmesi ve sisteme en uyumlu kombinasyonunun tespit edilmesi yönünde sistemde kontrol dışı-kontrol edilmeyen faktörler de göz önüne alınarak deneyler gerçekleştirilir. Gerçekleştirilen deneyler, sonucuna bağlı olarak performans ölçütü dikkate alınarak en uygun optimum koşullar belirlenir (Erdil, 2020).

Analitik sistemlerde yanıtın iki faktöre bağlı olduğu durumlarda, bu ilişkiyi temsil etmek için üç boyutlu bir yüzey kullanılabilir. Şekil 2.14'te gösterildiği gibi, bu yüzey, yanıtın iki faktörün seviyelerine bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Bu yüzey, "dağın" zirvesinin hedeflenen optimum değeri gösterdiği yanıt yüzeyi olarak adlandırılır. En çok kullanılan DOE yöntemlerinden biri olan Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) karmaşık sistemlerin ve süreçlerin optimizasyonu için kullanılan güçlü bir istatistiksel tekniktir. RSM, deney tasarımı ve analizinin bir kombinasyonudur ve

özellikle ikinci dereceden (quadratic) modelleri kullanarak faktörlerin ve yanıt değişkenlerinin ilişkilerini incelemeye yöneliktir. RSM çalışmaları, gelecekteki yanıt değişkeninin doğru tahmin edilmesi için girdi değişkenleri ile yanıt değişkeni arasındaki ilişkiyi belirleyen uygun bir fonksiyonun veya modelin tespit edilmesini amaçlar. Bu çalışmalar, problemin türüne bağlı olarak en büyük veya en küçük yanıt değerini araştırmayı ve bu değeri sağlayabilecek girdi değişkenlerinin değerlerini belirlemeyi içerir. Ayrıca, bir yanıt sisteminin altında yatan mekanizmanın anlaşılmasına katkıda bulunmayı hedefler



Şekil 2.14. İki faktör için yanıt yüzeyi

RSM'nin ana amacı, bir sürecin veya sistemin yanıtını (çıktısını) etkileyen bağımsız değişkenlerin (faktörlerin) en uygun kombinasyonlarını belirlemektir. Bu yöntem, belirli bir faktör düzeyinin yanıt değişkeni üzerindeki etkisini anlamak ve bu etkiyi optimize etmek için kullanılır (Montgomery, 2017) ve RSM'de model çoklu regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir faktörün ana etkisinin veya etkileşim etkisinin yanıt değişkenin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir.

RSM'in ilk adımında yanıt değişkeni üzerinde etkisi olduğu düşünülen faktörlerin ve sahip oldukları düzeylerin belirlenmesi ilk adım olarak belirtilebilir. Bu adımdan sonra,

deney tasarımı, regresyon ve optimizasyon teknikleri iç içe kullanılır. İkinci dereceden çoklu regresyon analizi yardımıyla oluşturulmuş bir model denklem (2.1) ile ifade edilebilmektedir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{J=i+1}^{k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \qquad (2.1)$$

Y: yanıt değişkeni,

X_i ve X_i^2 : bağımsız değişkenler (i=1,2,…..,k),

β_0, β_i, β_{ii} ve B_{ij} : regresyon katsayıları (i=1,2,…..,k), (i=1,2,…..,k-1), (j=i+1,….,k),

ε : rastgele hata terimidir.

RSM'nin bileşenleri şu şekildedir:

1. Deney Tasarımı:

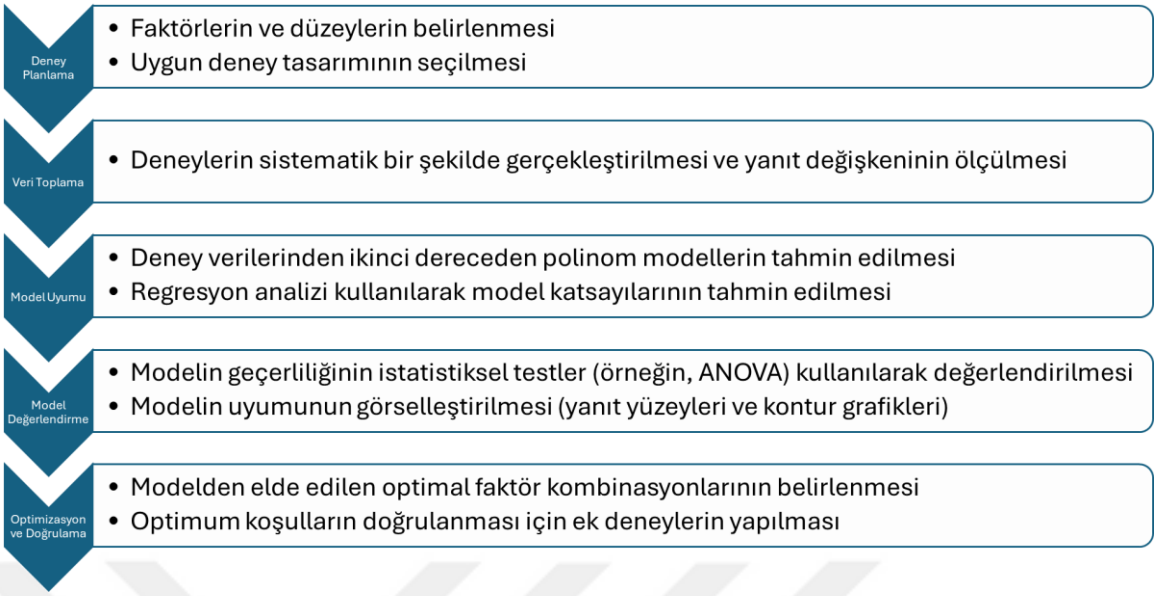
- Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design, CCD): Faktör düzeylerinin hem köşeleri hem de merkez noktaları içerir. Bu tasarım, ikinci dereceden modelleri tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır.
- Box-Behnken Tasarımı: Faktör düzeylerinin kombinasyonlarını sistematik bir şekilde test eder, ancak CCD'den farklı olarak eksen noktaları içermez.

2. Matematiksel Modelleler:

- İkinci Dereceden Polinom Modeller: Yanıt değişkenini, faktörlerin lineer, etkileşimli ve ikinci dereceden etkilerini içeren polinomlarla tahmin eder.

3. Yanıt Yüzeyleri ve Kontur Grafikleri:

- Yanıt Yüzeyleri: Faktör düzeylerinin yanıt üzerindeki etkilerini üç boyutlu grafikler olarak gösterir.
- Kontur Grafikleri: Yanıt yüzeylerinin iki boyutlu kesitleridir ve faktör kombinasyonlarının yanıt üzerindeki etkilerini görselleştirir.

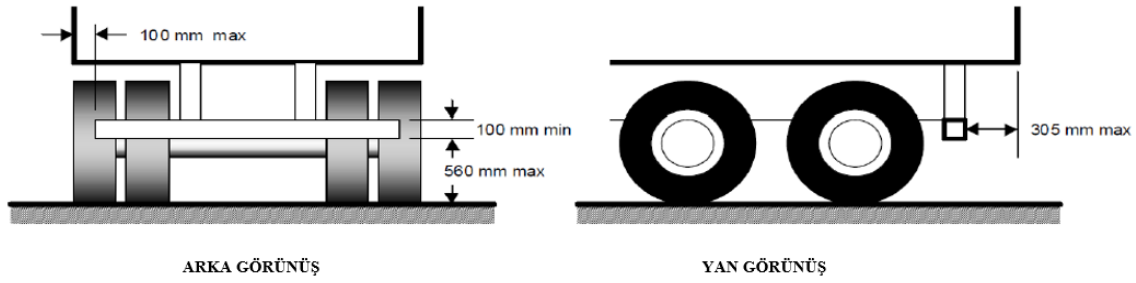


Şekil 2.15. RSM uygulama adımları

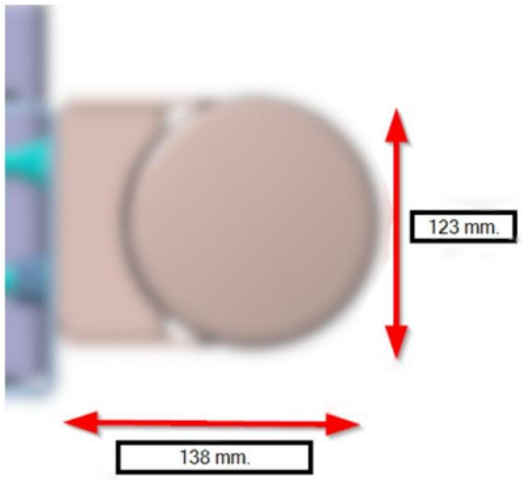
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1.Tasarım Süreci

Referans alınan tasarım, çelik malzemeli toplam ağırlığı yaklaşık 35 kg olan ağır vasıtalar için geliştirilmiş bir arka alt koruma (RUPD) sistemidir. Bu tasarım, yüksek mukavemetli çelikten yapılmış olup, çarpışma durumunda araç altına girme riskini minimize etmek amacıyla tasarlanmıştır ve UN ECE R58/03 yönetmeliğine uygun deformasyon sınırlarına ve ölçülerine sahiptir (Şekil 3.1). Bu tezin amacı çelik malzemeli tasarımının sınır ölçüleri (Şekil 3.2) referans alınarak ekstrüde alüminyum alaşımı ile üretilebilecek ve ağırlığı minimum %30 azaltılmış (~25 kg) RUPD tasarımı gerçekleştirmektir.

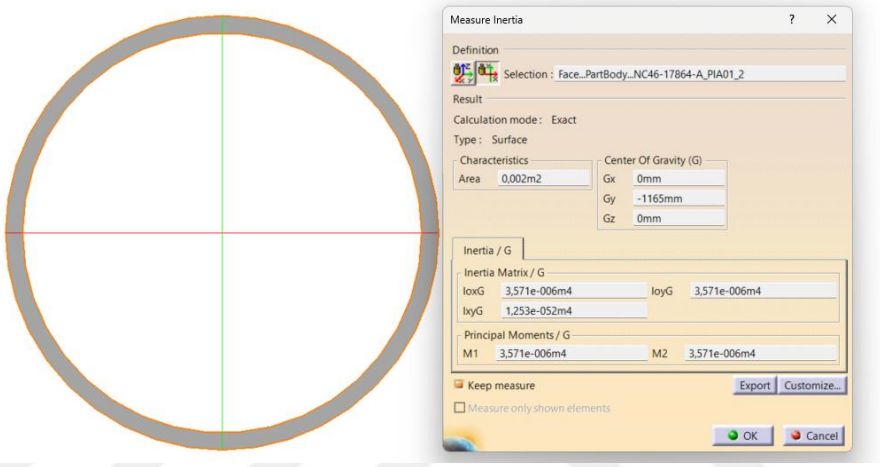


Şekil 3.1. UN ECE R58/03 yönetmeliği tasarım sınırları



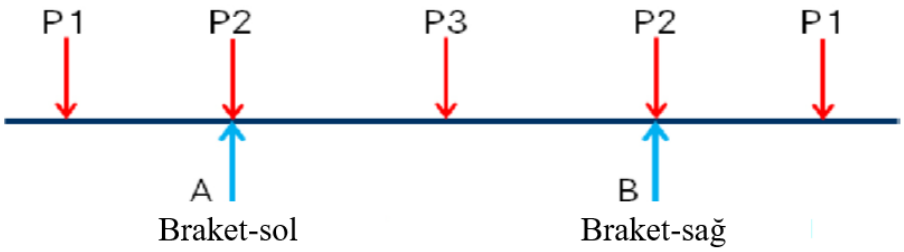
Şekil 3.2. Çelik malzemeli referans tasarım ve sınır ölçüleri

Alüminyum ekstrüzyon profili kesit tasarımının ilk aşamasında, çelik malzemenin yoğunluğunun alüminyum yoğunluğunun yaklaşık olarak 2,85 katı olması göz önünde bulundurularak, referans tasarımdaki çelik malzemenin kesit ataleti Catia V5 programında ölçülmüştür. Şekil 3.3'te gösterilen çelik malzeme profil kesiti karar aşamasında, ölçülen değerin 2,85 katı olan (~10,2x10^{-6} m^4) minimum hedef olarak belirlenmiştir.

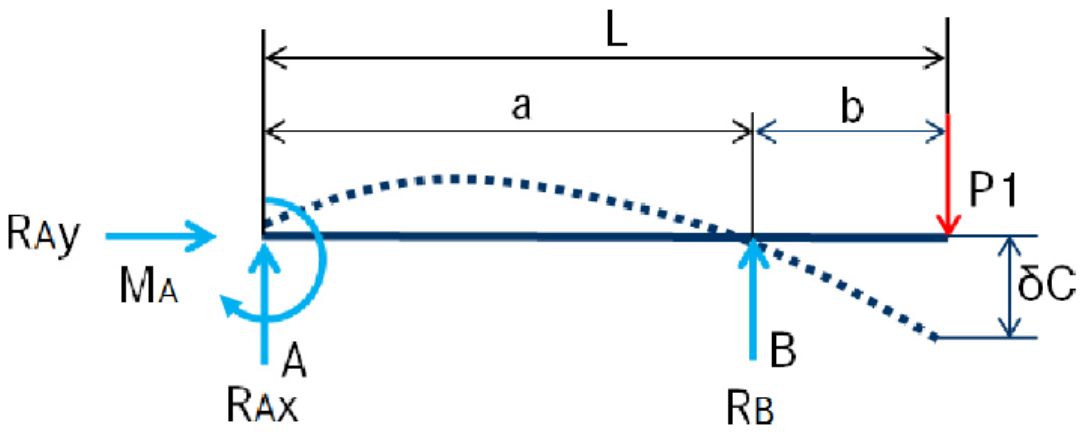


Şekil 3.3. Çelik malzeme tasarımın kesit ataleti ölçümü

P1 yükleme durumu, RUPD'un bükülme dayanıklılığını test etmek için uygulanmaktadır. Bu aşamada, RUPD'un montaj braketleri arasındaki mesafe ve yükleme noktası dikkate alınarak, bir taraftan montaj braketine sabitlenmiş diğer taraftan serbest hareket eden bir kiriş modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.4. RUPD braketleri ve UN ECE R58/03 yönetmeliği yük uygulama noktaları



Şekil 3.5. P1 yüküne dayalı enine kesit hesaplaması için RUPD'un serbest cisim diyagramı

L: Sol braket noktası ile P1 yük uygulama noktası arasındaki RUPD uzunluğu

P: P1 yükü

a: sağ ve sol braketler arası uzunluk

b: Sağ braket noktası ile P1 yük uygulama noktası arasındaki RUPD uzunluğu

E: Malzeme elastisite (Young) modülü

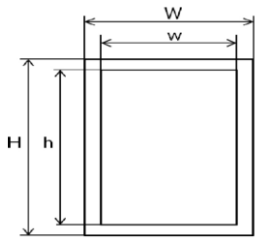
I: RUPD kesitinin atalet momenti

P1 yük uygulama noktasında sapma, serbest cisim diyagramı (Şekil 3.5.) kullanılarak 3.1 numaralı denklem ile ifade edilebilir.

$$\delta C = \left(\frac{Pa^2b}{6EI}\right) x \left(\frac{L}{a} - \left(\frac{L}{a}\right)^3\right) \tag{3.1}$$

Bu denklemden yola çıkılarak RUPD kesitinin atalet momenti 3.2 numaralı denklemde belirtilmiştir.

$$I = \frac{WH^3 - wh^3}{12} \tag{3.2}$$



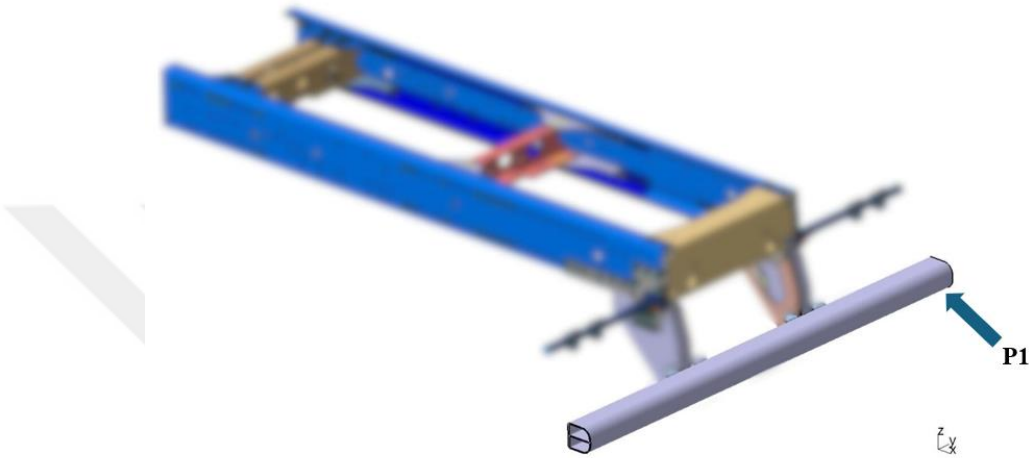
Şekil 3.6. Basit bir profil kesiti gösterimi

Belirlenen hedef kesit ataleti değeri doğrultusunda, referans tasarımın ağırlığının minimum %30 azaltılmış ağırlığı olan yaklaşık 25 kg ağırlıkta 7 adet taslak profil kesiti (Çizelge 3.1.) oluşturularak her bir tasarımın kesit ataleti ve ağırlıkları değerlendirilerek seçim yapılmıştır.

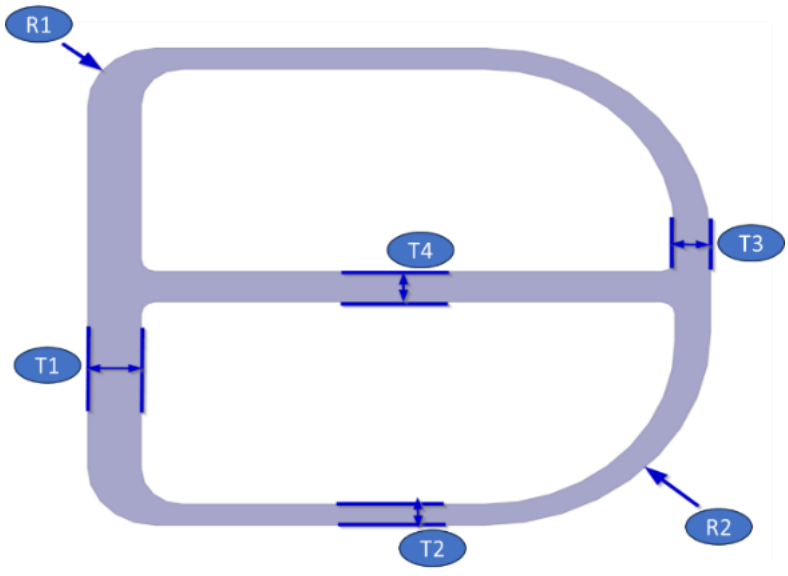
Çizelge 3.1. Taslak tasarımlara ait kesit atalet momentleri ve ağırlıkları

Kesit Adı	**Atalet X Yönünde** $10^{-6}m^4$	**Atalet Y Yönünde** $10^{-6}m^4$	**Kütle (kg)**	**Kesit Görseli**
Referans parça (Çelik malzeme)	3,5710	3,5710	35,096	
Aluminyum-Dikdörtgen Data	9,194	10,17	25,039	
Aluminyum-Çap Data	8,189	8,189	25,04	
Aluminyum-Çap ve Düz Yüzeyli Data	8,101	9,156	25,031	
Aluminyum-D Şekilli Federsiz Data	7,979	9,428	25,009	
Aluminyum-D Şekilli Bir Orta Federli Data	7,228	10,37	25,048	
Aluminyum-D Şekilli İki Orta Federli Data	6,959	10,12	25,103	
Aluminyum-D Şekilli Çapraz Federli Data	7,146	10,32	25,053	

UN ECE R58/03 yönetmeliğine göre P1 yükü RUPD'un Y eksenine dik olarak uygulanması nedeniyle (Şekil 3.7.) Ioy/kg oranı dikkate alınmıştır ve en yüksek Ioy/kg oranına sahip olan "Aluminyum-D Şekilli Bir Orta Federli Data" optimize edilmek üzere alüminyum profil kesiti olarak seçilmiştir. Seçilen profil kesiti üzerinde iyileştirme çalışması yapılacak parametreler belirlenerek Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



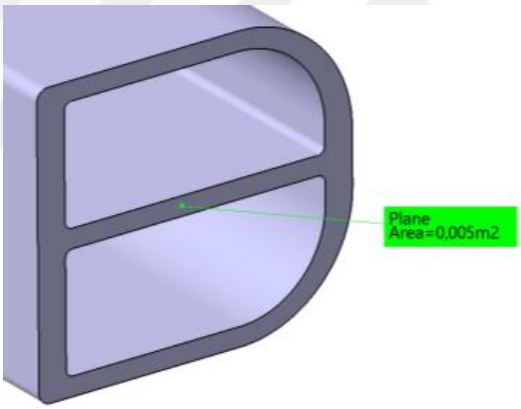
Şekil 3.7. UN ECE R58/03 P1 yükü uygulama yönü ve tasarım eksenleri (X,Y,Z)



Şekil 3.8. Aluminyum-D şekilli bir orta federli data ve belirlenen tasarım parametreleri

Ekstrüzyon profillerinde et kalınlıklarının mümkün olduğunca birbirine yakın olması alüminyum malzemenin kalıp içerisinde akışı da bir o kadar homojen olacağı için üretim prosesinde tercih edilmektedir. Ekstrüzyon profilleri tasarımlarında dikkat edilmesi gereken bir diğer hususta, ekstrüzyon preslerinin gücüne bağlı olarak uyulması gereken profillerin metredeki kütlesi kg/m hesaplamasıdır. Bu kriter basit bir hesap ile incelenebilir. Kesitin yüzey alanı (Şekil 3.9.) 1 m ile çarpılarak, 1 metrelik profilin toplam hacmi bulunur ve bu hacim de alüminyum yoğunluğu ile çarpılarak, profilin metredeki kütlesi bulunabilir.

Bu bilgiler ve braket bağlantı delikleri konumları göz önünde bulundurularak belirlenen tasarım parametrelerinin alabileceği minimum ve maksimum değerler Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.



Şekil 3.9. Alüminyum ekstrüzyon profili kesit yüzey alanı

Çizelge 3.2. Tasarım parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri

Parametreler	Minimum	Maksimum
T1	6	12
T2	4	8
T3	6	12
T4	3	8
R1	5	18
R2	10	50

3.2.Deney Tasarımı

Deney tasarımı uygulamasında kullanılan RSM içerisinde Box-Behnken tasarımı seçilerek belirlenen 6 adet tasarım parametresinin minimum ve maksimum değerleri (Çizelge 3.2.) Minitab uygulamasına tanımlanmıştır. Box-Behnken tasarımında 6 adet parametre için programa yanıtların girilmesi gereken 54 adet deney oluşmuştur. Programın belirlediği parametre değerlerindeki tasarımlar oluşturularak CAE analizler gerçekleştirilmiştir. Ağırlık ve CAE analizinden alınan gerilim değerleri RSM içerisine yanıtlar olarak tanıtılmıştır (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. Birinci RSM deney modeli ve deneylerin yanıtları

RSM-1	Tasarım Parametreleri						Yanıtlar	
Deney Sırası	T1	T2	T3	T4	R1	R2	Ağırlık (kg)	Gerilim (Mpa)
1	9	4	9	4	18	10	22,434	283,7
2	6	6	9	3	5	30	22,025	286,4
3	9	6	9	4	11,5	30	24,648	281,8
4	9	4	6	4	18	30	19,722	307,5
5	12	4	9	3	11,5	30	22,919	264,125
6	9	6	9	4	11,5	30	24,648	281,8
7	12	6	9	5	5	30	27,563	260,7
8	9	6	6	5	11,5	10	24,414	285,23
9	9	8	12	4	18	30	29,154	282,2
10	9	6	9	4	11,5	30	24,648	281,8
11	9	4	12	4	5	30	23,561	280,8
12	9	4	9	4	18	50	20,483	302,1
13	6	6	6	4	11,5	50	20,384	279,67
14	9	6	12	3	11,5	10	26,912	283,2
15	12	6	6	4	11,5	10	25,602	271,23
16	6	8	9	3	11,5	30	25,026	274,2
17	6	4	9	5	11,5	30	20,366	282,7
18	9	4	6	4	5	30	20,039	297,9
19	6	4	9	3	11,5	30	18,812	277,9
20	9	4	9	4	5	50	20,8	290,22
21	6	6	9	5	18	30	23,367	273,82
22	9	8	9	4	5	10	28,813	285,7
23	9	4	12	4	18	30	23,244	284,5
24	9	6	9	4	11,5	30	24,648	281,8
25	6	6	9	5	5	30	23,578	280,43
26	9	8	9	4	5	50	26,862	295,33
27	6	6	12	4	11,5	50	23,105	306,2
28	12	6	6	4	11,5	50	24,301	262,52
29	9	6	6	5	11,5	50	23,113	293,36
30	9	6	6	3	11,5	50	21,56	302,68
31	12	6	9	3	18	30	25,662	264,73
32	6	8	9	5	11,5	30	26,579	273,42
33	12	6	9	3	5	30	26,085	261,5
34	12	8	9	3	11,5	30	28,829	261,739
35	6	6	6	4	11,5	10	21,685	278,1
36	9	8	6	4	5	30	26,252	297,04
37	9	8	6	4	18	30	25,935	287,4
38	6	6	12	4	11,5	10	25,698	298,72
39	9	6	6	3	11,5	10	22,861	289,5
40	9	8	9	4	18	50	26,545	287,92
41	9	6	12	5	11,5	50	25,796	286,22
42	9	6	12	5	11,5	10	28,389	278,4
43	9	8	9	4	18	10	28,496	282,6
44	9	6	9	4	11,5	30	24,648	281,8
45	12	4	9	5	11,5	30	24,396	262,35
46	9	6	9	4	11,5	30	24,648	281,8
47	12	8	9	5	11,5	30	30,307	261,176
48	9	6	12	3	11,5	50	24,318	287,6
49	12	6	9	5	18	30	27,14	263,05
50	12	6	12	4	11,5	50	27,022	270,83
51	12	6	12	4	11,5	10	29,615	267,57
52	6	6	9	3	18	30	21,813	275,3
53	9	4	9	4	5	10	22,751	281,1
54	9	8	12	4	5	30	29,472	291,17

Gerçekleştirilen bu çalışma sonrasında tasarım parametrelerinin ağırlık ve gerilim çıktıları üzerindeki etki değerlerini gösteren regresyon denklemleri, denklem 3.3 ve 3.4'te görülmektedir.

$$\begin{aligned} Gerilim = {} & 513 - 25{,}6\,T1 - 0{,}9\,T2 - 39{,}7\,T3 + 81{,}8\,T4 + 0{,}44\,R1 - 4{,}19\,R2 + 0{,}105\,T1 \\ & * T1 - 0{,}07\,T2 * T2 + 1{,}086\,T3 * T3 - 10{,}60\,T4 * T4 - 0{,}006\,R1 * R1 \\ & + 0{,}0182\,R2 * R2 + 0{,}105\,T1 * T2 + 1{,}078\,T1 * T3 + 0{,}02\,T1 * T4 \\ & + 0{,}114\,T1 * R1 + 0{,}2579\,T1 * R2 + 0{,}605\,T2 * T3 - 0{,}29\,T2 * T4 \\ & - 0{,}274\,T2 * T1 - 0{,}039\,T2 * R2 + 0{,}31\,T3 * T4 - 0{,}034\,T3 * R1 \\ & + 0{,}1077\,T3 * R2 + 0{,}087\,T4 * R1 - 0{,}010\,T4 * R2 + 0{,}0048\,R1 * R2 \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned} Ağırlık = {} & 0{,}0538 + 0{,}77314\,T1 + 1{,}74106\,T2 + 0{,}77681\,T3 + 0{,}87233\,T4 - 0{,}000196\,T1 \\ & - 0{,}000141\,R2 + 0{,}000659\,T1 * T1 + 0{,}0000128\,T2 * T2 + 0{,}002608\,T3 \\ & * T3 - 0{,}000194\,T4 * T4 + 0{,}000009\,R1 * R1 - 0{,}000002\,R2 * R2 \\ & - 0{,}012625\,T1 * T2 - 0{,}00000\,T1 * T3 - 0{,}006313\,T1 * T4 \\ & - 0{,}002712\,T1 * R1 - 0{,}00000\,T1 * R2 - 0{,}012604\,T2 * T3 - 0{,}00000\,T2 \\ & * T4 - 0{,}0000005\,T2 * T1 + 0{,}00000\,T2 * R2 - 0{,}006292\,T3 * T4 \\ & - 0{,}0000006\,T3 * R1 - 0{,}005384\,T3 * R2 + 0{,}000019\,T4 * R1 \\ & + 0{,}0000006\,T4 * R2 + 0{,}00000000\,R1 * R2 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Tasarım parametrelerinin faktörler üzerinden etkileri Pareto diyagramında incelendiğinde, T1 ve R2 parametrelerinin gerilim değeri üzerindeki etkilerinin diğer parametrelerinden yüksek olduğu görülmüştür. Böylece gerilim yanıtı için en önemli faktörler olan T1 ve R2 parametreleri için Minitab programının optimizasyon çözücüsü tarafından önerdiği değerler belirlenmiştir. Tespit edilen bu değerler ağırlık azaltımı hedefinde ikinci RSM modeli kurularak tasarımlarda sabit tutulmuştur ve diğer 4 adet tasarım parametresi optimize edilmiştir (Çizelge 3.4.).

Çizelge 3.4. İkinci RSM deney tasarımı parametreleri

T1	12		Sabit
T2	3	8	Değişken
T3	4	12	Değişken
T4	2	8	Değişken
R1	7	15	Değişken
R2	50		Sabit

Gerçekleştirilen ikinci deney tasarımında da RSM içerisinde Box-Behnken tasarımı uygulanarak, 4 adet parametre için gereken 27 adet deneyin ağırlık ve CAE analizi gerilim değerleri hesaplanarak programa yanıt olarak girilmiştir (Çizelge 3.5.).

Çizelge 3.5. İkinci RSM deney modeli ve deneylerin yanıtları

RSM-2	Tasarım Parametreleri				Yanıtlar	
Deney Sırası	T2	T3	T4	R1	Ağırlık (kg)	Gerilim (Mpa)
1	8	4	5	11	27,306	261,86
2	3	4	5	11	19,602	264,156
3	3	12	5	11	23,439	261,904
4	5,5	8	2	7	23,097	262,298
5	3	8	8	11	23,712	258,38
6	8	12	5	11	30,637	242,06
7	5,5	12	5	15	26,908	259,217
8	8	8	5	15	28,798	260,743
9	5,5	8	8	15	27,308	270,606
10	8	8	5	7	29,058	260,14
11	3	8	5	15	21,347	263,09
12	5,5	8	5	11	25,203	261,022
13	5,5	8	5	11	25,203	261,022
14	5,5	8	5	11	25,203	261,022
15	5,5	4	8	11	25,765	270,853
16	5,5	4	2	11	21,143	267,042
17	5,5	12	8	11	29,197	257,615
18	5,5	12	2	11	24,878	266,405
19	5,5	4	5	7	23,584	261,923
20	5,5	8	8	7	27,568	251,706
21	8	8	8	11	31,163	248,404
22	8	8	2	11	26,693	260,645
23	5,5	12	5	7	27,168	260,994
24	5,5	4	5	15	23,324	263,472
25	5,5	8	2	15	22,837	262,837
26	3	8	5	7	21,607	267,645
27	3	8	2	11	19,242	270,15

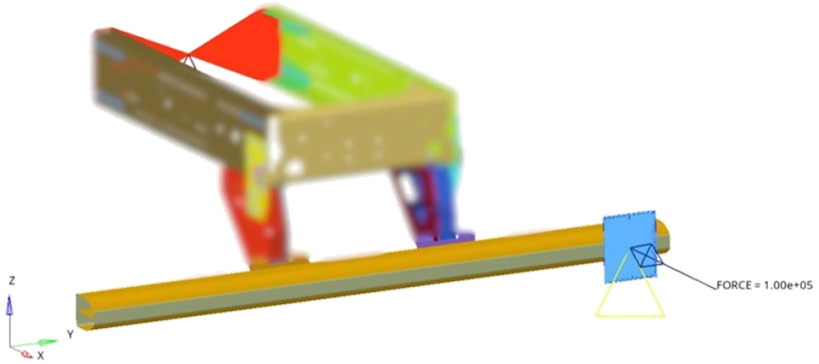
Gerçekleştirilen ikinci RSM modeli sonrası ağırlık ve gerilim yanıtları için elde edilen regresyon denklemleri (denklem 3.5, denklem 3.6) sayesinde analiz gerçekleştirilmesine gerek duymadan parametrelerin değerleri talep edildiği şekilde değiştirilerek yanıtlar elde edilebilmektedir.

$$Gerilim = 276{,}1 + 4{,}04\,T2 + 3{,}19\,T3 - 4{,}50\,T4 - 3{,}47\,R1 - 0{,}326\,T2 * T2 + 0{,}016\,T3 * T3 + 0{,}159\,T4 * T4 + 0{,}072\,R1 * R1 - 0{,}439\,T2 * T3 - 0{,}016\,T2 * T4 + 0{,}129\,T2 * R1 - 0{,}263\,T3 * T4 - 0{,}052\,T3 * R1 + 0{,}383\,T4 * R1 \quad (3.5)$$

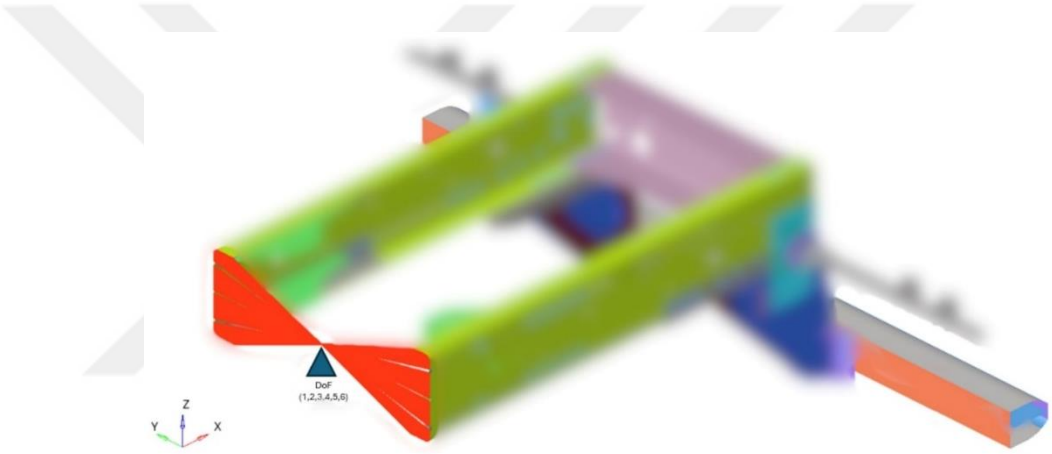
$$Ağırlık = 9{,}41521 + 1{,}59177\,T2 + 0{,}505950\,T3 + 0{,}795954\,T4 - 0{,}032214\,R1 - 0{,}000033\,T2 * T2 + 0{,}002698\,T3 * T3 - 0{,}000037\,T4 * T4 - 0{,}000013\,R1 * R1 - 0{,}012650\,T2 * T3 + 0{,}0000\,T2 * T4 - 0{,}0000\,T2 * R1 - 0{,}006312\,T3 * T4 - 0{,}0000\,T3 * R1 - 0{,}0000\,T4 * R1 \quad (3.6)$$

3.3.Analiz

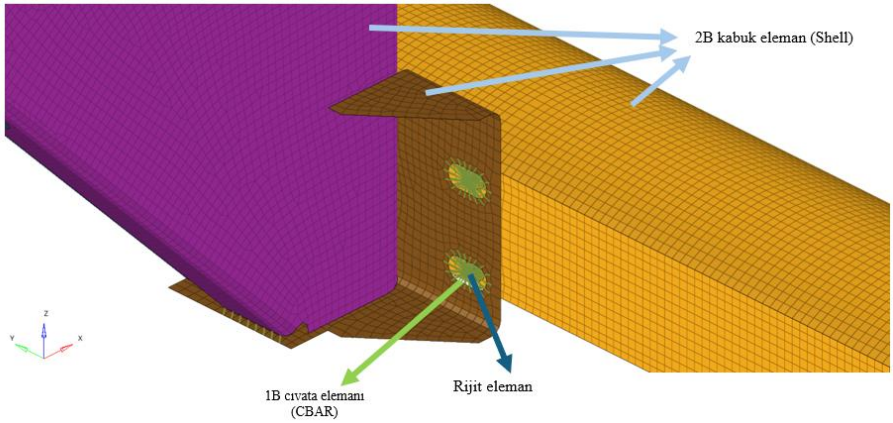
Kesit analizleri, Altair Hyperworks Optistruct modülünde doğrusal olmayan (non-lineer) yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, UN ECE R58/03 standardında belirtilen yüklemelere göre yapılmış ve beş farklı yükleme durumu incelenmiştir. RUPD için en kritik yükleme durumu, arka akstaki tekerleklerin dış kenarlarına teğet geçen uzunlamasına düzlemlerden 300 mm uzaklıkta konumlandırılan 100 kN (P1) yüklemesi olarak belirlenmiştir ve modelleme iki boyutlu (2B) olarak yapılmıştır. Profil kesitinde üçgen ve dörtgen kabuk (Shell) elemanlar kullanılmıştır. Cıvata bağlantıları, bir boyutlu (1B) CBAR elemanlar kullanılarak rijit (rigid) olarak modellenmiştir. Sabitleme noktaları standartlara uygun şekilde modellenmiş ve yükler verilmiştir (Şekil 3.10, 3.11, 3.12). Profilin bağlandığı parçalar çelikten olup, rijit elemanlarla 6 noktadan sabitlenmiştir. Kuvvetin uygulanacağı rijit duvar, tek eksende (x ekseni) serbest bırakılarak diğer eksenlerde sabitlenmiştir.



Şekil 3.10. Analiz modeli ve P1 yükü uygulaması.

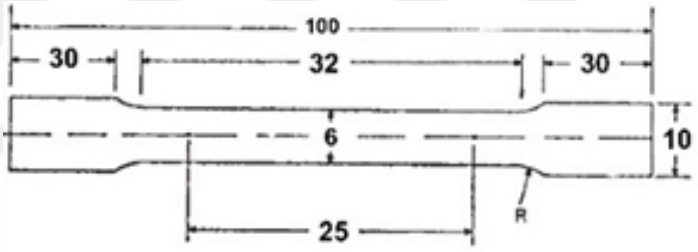


Şekil 3.11. Analiz modeli şasi sabitleme noktası.



Şekil 3.12. 1B ve 2B analiz eleman modelleri

Analizlerde malzeme kartını oluşturmak için deneysel verilerden yararlanılmıştır. EN AW 6063 T6 ve EN AW 6082 T6 alaşımları için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numuneleri ekstrüzyon yönünde ASTM E8 sub-size standardına uygun olarak üretilmiştir (Şekil 3.13). Testler, eksenel yük kapasitesi 250 kN olan hidrolik servo kontrollü MTS test makinesinde gerçekleştirildi. Deneylerde standartlarda önerilen 0.5 mm/dk yükleme hızı uygulanmıştır. Test cihazından kuvvet ve deplasman değerleri elde edilmiştir, bu veriler 5 Hz sıklıkta toplanmıştır. Tüm testlerde deformasyon ölçümleri Digital Image Correlation (DIC) metodu ile sağlanmıştır. Bu metotta, numunelerden gerinim ölçümü yapılabilmesi için numunelerin test kesit yüzeyleri önce beyaza boyanmış, sonrasında siyah sprey boya ile nokta kümeleri oluşturulmuştur. DIC fotoğraflarının çekilmesi ve analizlerinin yapılması RÜZGEM bünyesindeki GOM ARAMIS 4M DIC sistemi ile gerçekleştirilmiştir. DIC fotoğrafları 1 Hz sıklıkta çekilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.13. ASTM E8 sub-size çekme test çubuğu ölçüleri

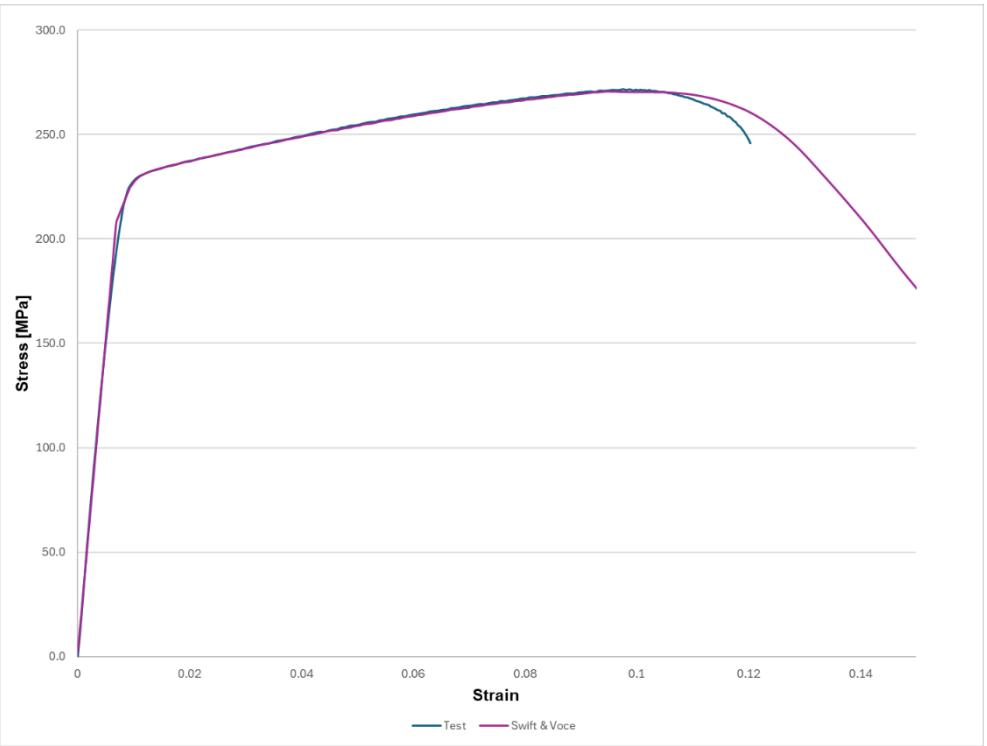


Şekil 3.14. Çekme testi cihazı ve EN AW 6063 T6 alaşımı numune görseli

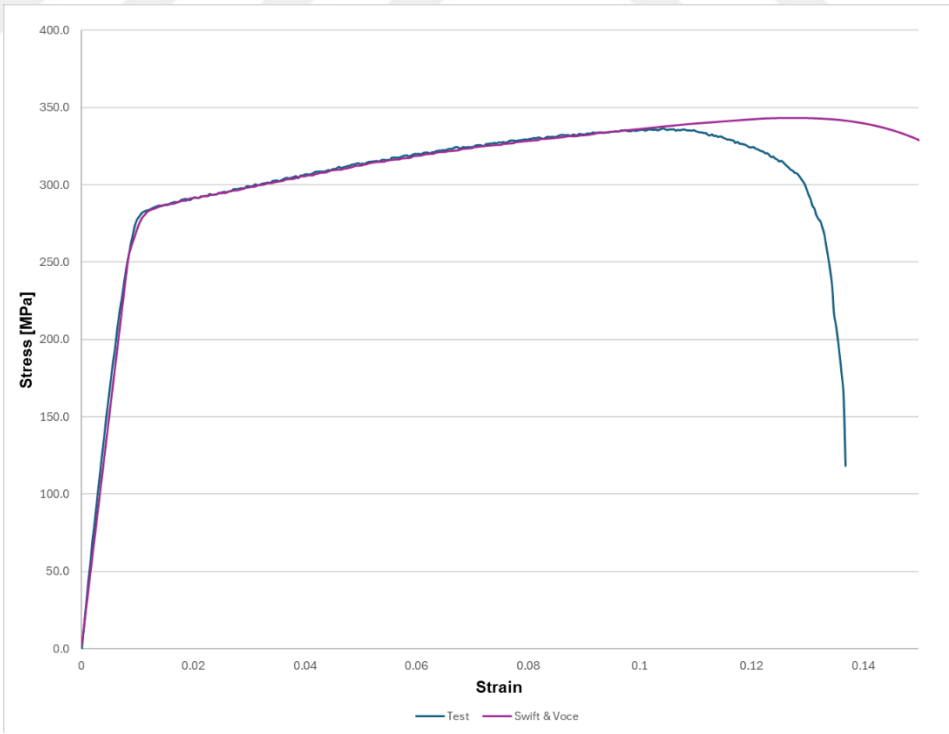
Analizlerde malzeme kartını oluştururken pekleşme denklemlerinden yararlanılmaktadır. Alüminyum alaşımına yönelik literatürde metallerin büyük gerinim pekleşme davranışını tanımlamak için en yeterli izotropik pekleşme yasalarından biri olarak defalarca tanımlandığı için denklem 3.7'de belirtilen Swift-Voce birleşik denklemi kullanılmıştır (Yang et al., 2021).

$$\sigma = \alpha\left[K\left(\varepsilon_p + \varepsilon_0\right)^n\right] + (1-\alpha)\left[\sigma_0 + Q\left(1 - e^{-\beta\varepsilon p}\right)\right] \tag{3.7}$$

Swift-Voce birleşik denklemi kullanılarak elde edilen EN AW 6063 T6 alaşımı ve EN AW 6082 T6 alaşımları gerçek gerilme-gerinim grafikleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.15. EN AW 6063 T6 alaşımı için gerçek gerilme-gerinim grafiği



Şekil 3.16. EN AW 6082 T6 alaşımı için gerçek gerilme-gerinim grafiği

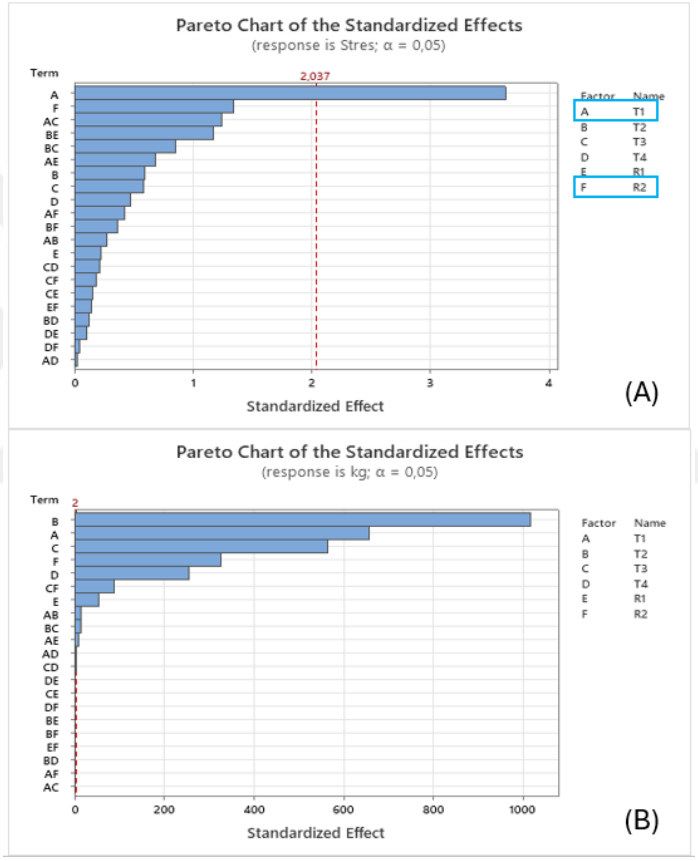
EN AW 6063 T6 ve EN AW 6082 T6 alaşımlarının TS 755-2 standardında yer alan mekanik özellikleri ve profil üretimi gerçekleştirilip fiziki parçalar ile gerçekleştirilen testlerin sonuçlarındaki mekanik özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. EN AW 6063 T6 ve EN AW 6082 T6 alaşımları mekanik özellikleri

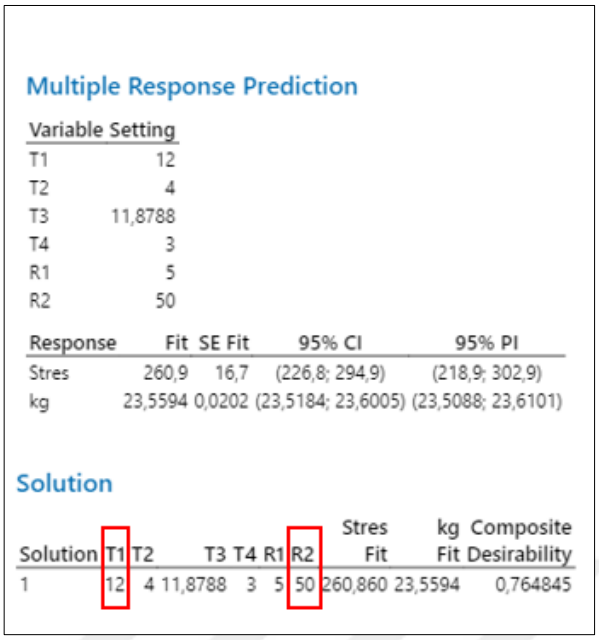
Malzeme alaşımları	TS EN 755-2			YOVA-Üretimi yapılan fiziki parça sonuçları		
	σ Akma [MPa]	σ Çekme [MPa]	ε Kopma	σ Akma [MPa]	σ Çekme [MPa]	ε Kopma
EN AW 6063 T6	170	215	0.06	217.8	265	0.12
EN AW 6082 T6	250	290	0.1	251.2	304.8	0.13

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

RSM deney tasarımı ilk olarak belirlenen 6 adet parametre ile gerçekleştirilerek, parametrelerin gerilim ve ağırlık yanıtları üzerindeki etkileri pareto diyagramında incelendiğinde T1 ve R2 parametrelerinin gerilim yanıtı için en yüksek etkilerde bulunduğu görülmüştür (Şekil 4.1). Minitab programı içerisinde optimizasyon çözücü kullanılarak 6 adet parametrenin optimum sonuçları elde edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Birinci RSM deney tasarımı pareto diyagramları.
A) gerilim yanıtı için pareto diyagramı **B)** ağırlık yanıtı için pareto diyagramı



Multiple Response Prediction

Variable	Setting
T1	12
T2	4
T3	11,8788
T4	3
R1	5
R2	50

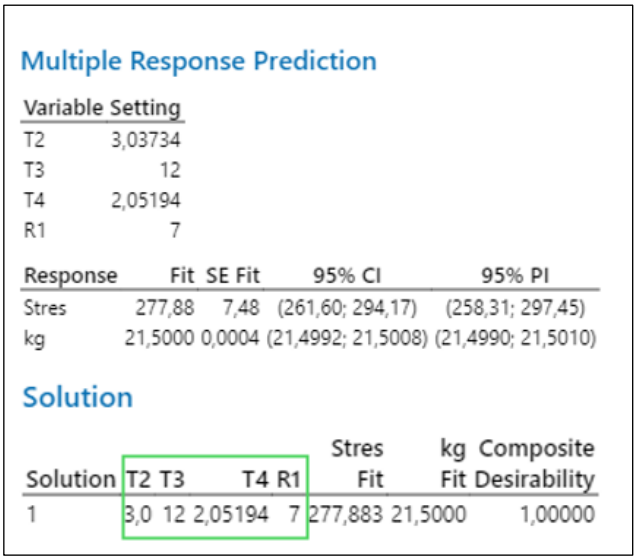
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Stres	260,9	16,7	(226,8; 294,9)	(218,9; 302,9)
kg	23,5594	0,0202	(23,5184; 23,6005)	(23,5088; 23,6101)

Solution

Solution	T1	T2	T3	T4	R1	R2	Stres Fit	kg Fit	Composite Desirability
1	12	4	11,8788	3	5	50	260,860	23,5594	0,764845

Şekil 4.2. Birinci RSM deney tasarımı optimizasyon sonrası parametre sonuçları

Elde edilen T1=12 ve R2=50 olarak parametre değerleri sabit tutularak diğer 4 adet parametrenin (T2, T3, T4, R1) ağırlık azaltımında etkisini kullanmak üzere ikinci bir RSM deney düzeneği oluşturulmuştur. RSM optimizasyonu sonucunda 4 adet parametre için sistemin belirlediği optimum (minimum ağırlık, maksimum gerilim) parametre değerleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Multiple Response Prediction

Variable	Setting
T2	3,03734
T3	12
T4	2,05194
R1	7

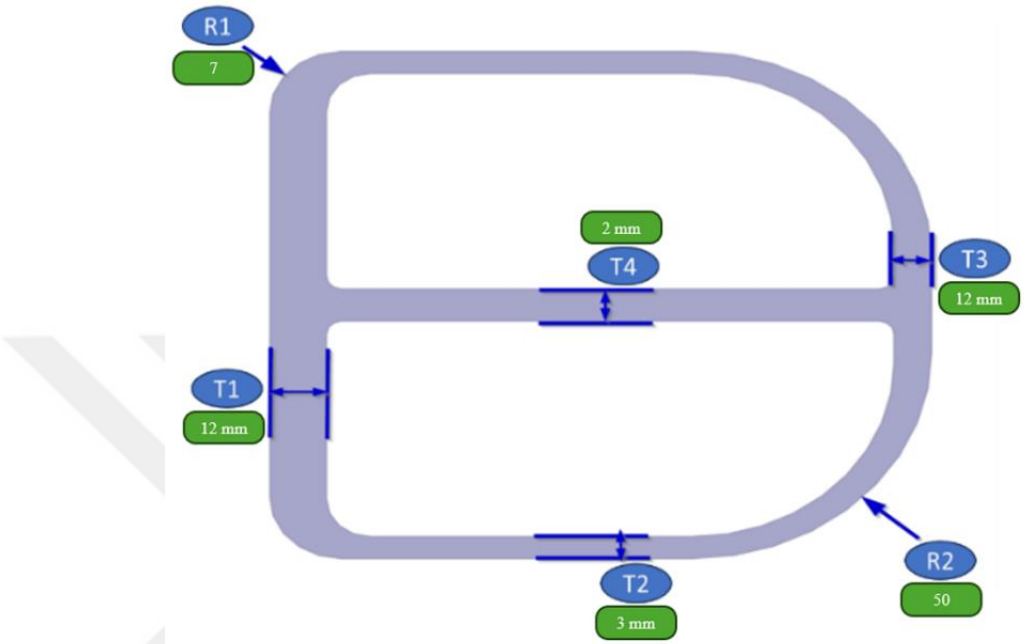
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Stres	277,88	7,48	(261,60; 294,17)	(258,31; 297,45)
kg	21,5000	0,0004	(21,4992; 21,5008)	(21,4990; 21,5010)

Solution

Solution	T2	T3	T4	R1	Stres Fit	kg Fit	Composite Desirability
1	3,0	12	2,05194	7	277,883	21,5000	1,00000

Şekil 4.3. İkinci RSM deney tasarımı optimizasyon sonrası parametre sonuçları

Gerçekleştirilen iki RSM optimizasyonu deney tasarımı sonucunda ekstrüzyon profili kesitinin belirlenen parametreleri için optimizasyon tamamlanmıştır ve tüm parametreler için elde edilen değerler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

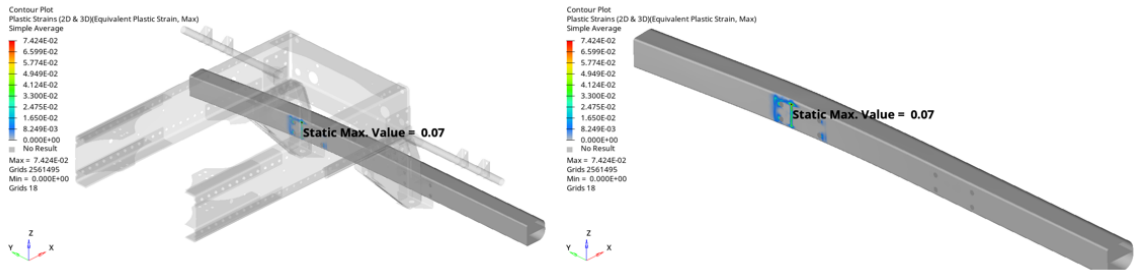


Şekil 4.4. RSM optimizasyon sonucu parametrelerin değerleri

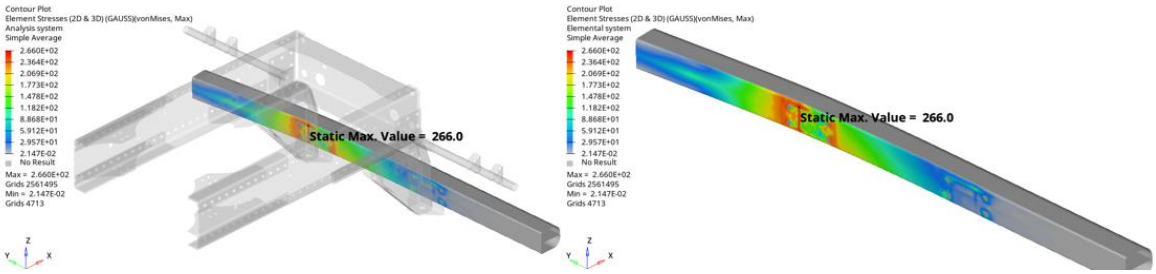
Analiz sonuçları değerlendirilirken, UN ECE R58/03 yönetmeliğince izin verilen maksimum 400 mm yer değiştirme değerinden küçük olması beklenmektedir. Bunun yanı sıra malzemede kopma (failure) gözlemlenmemesi için maksimum çekme gerilmesi ve plastik gerinim değerleri de incelenmelidir.

Optimize edilmiş EN AW 6063 T6 alaşımlı modelin analiz sonuçları alt şekillerde gösterilmiştir. Analizler 90 kN'a kadar çözüm almıştır. Bu noktada ulaştığı maksimum plastik gerinim değerinin Şekil 3.24'teki YOVA verisi olan 0,12'nin altında kalmasına rağmen, modelin ulaştığı 266 MPa'lık maksimum gerilme değerinin Şekil 3.24'teki YOVA verisi olan 265 MPa'ın üzerine geçtiği için tasarlanan kesit tasarımı bu alaşım için uygun değildir.

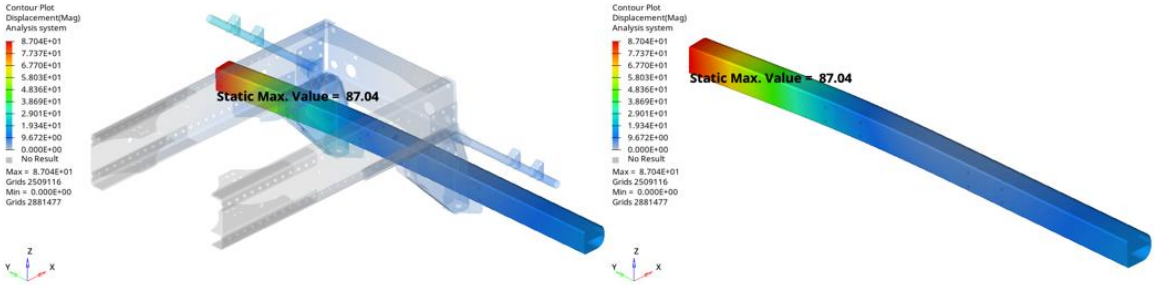
Deformasyon sonrası oluşan 87,04 mm yer değiştirme değeri UN ECE R58/03 yönetmeliğince izin verilen maksimum 400 mm yer değiştirme değerinden küçük olsa bile malzeme kopma noktasını geçtiği için bu kesit tasarımı bu alaşıma uygun değildir.



Şekil 4.5. EN AW 6063 T6 plastik gerinim analiz sonucu

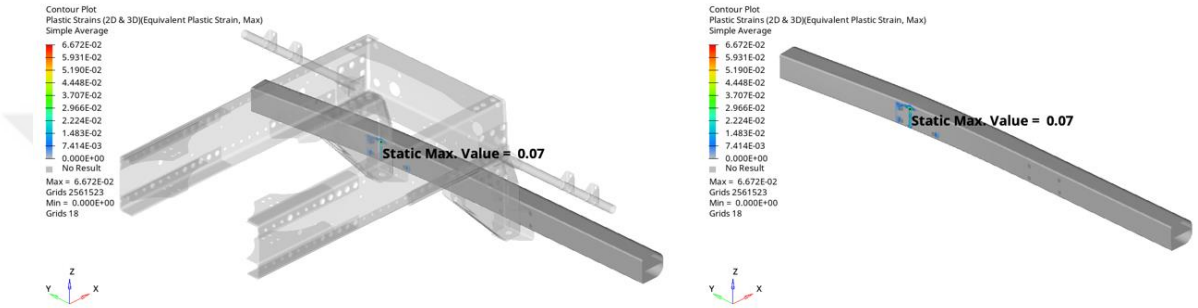


Şekil 4.6. EN AW 6063 T6 gerilme analiz sonucu

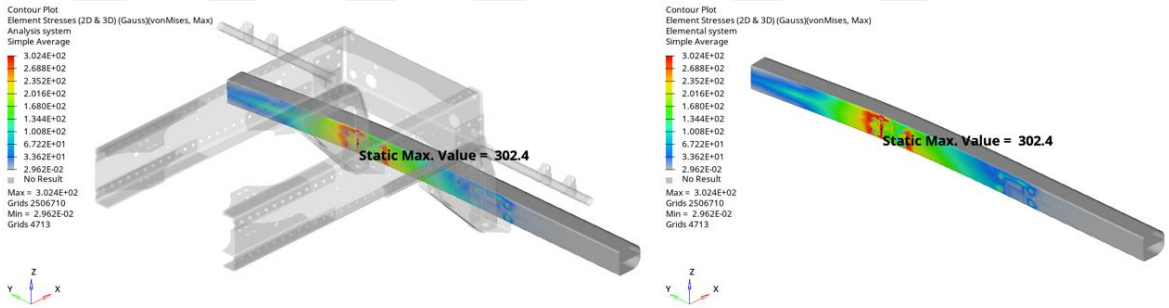


Şekil 4.7. EN AW 6063 T6 yer değiştirme analiz sonucu

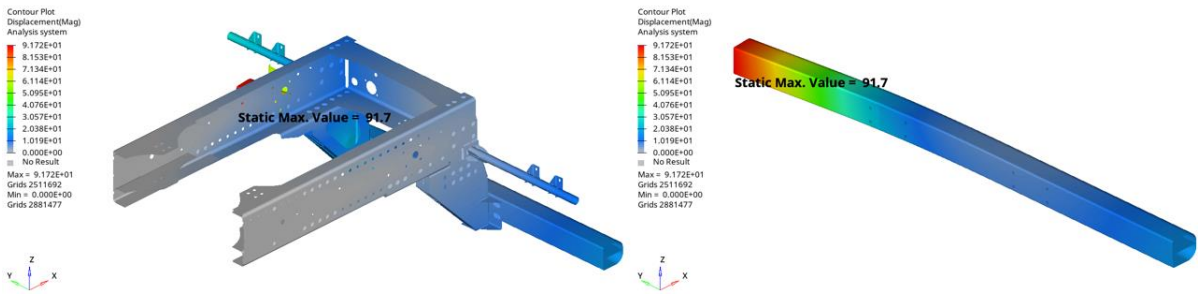
Optimize edilmiş EN AW 6082 T6 alaşımlı modelin analiz sonuçları gösterilmiştir (Şekil 4.8.- 4.10.). Analiz sonucunda; plastik gerinim değerinin 0,07 ve maksimum gerilme değerinin 302,4 MPa olduğu görülmüştür. Elde edilen bu değerlerin Şekil 3.24'teki YOVA verilerinin maksimum değerleri altında kaldığı ve deformasyon sonrası 91,7 mm olan yer değiştirme değerinin de UN ECE R58/03 yönetmeliğince izin verilen maksimum 400 mm yer değiştirme değerinin altında kaldığı için tasarlanan kesit bu alaşıma uygun bulunmuştur.



Şekil 4.8. EN AW 6082 T6 plastik gerinim analiz sonucu



Şekil 4.9. EN AW 6082 T6 gerilme analiz sonucu



Şekil 4.10. EN AW 6082 T6 yer değiştirme analiz sonucu

5. SONUÇ

Optimizasyon sonucunda optimum kesit tasarımı için analizlerden yararlanılmıştır. En kritik yükleme durumu olan P1 (100 kN) yükleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda toplam deformasyon, toplam von Mises gerilmesi ve plastik gerinim sonuçları elde edilmiştir.

Yapılan tasarım ve analizler sonucunda ağır vasıta araçlarında kullanılabilecek optimum ağırlıkta alt arka koruyucu kesiti elde edilmiştir. Kesit atalet momentlerinin incelenmesiyle analizlerden önce geometri hakkında bir öngörü elde edilmiş; dikdörtgen ve silindir şeklin birleşmesinden oluşan 'D' yapıyı I profile benzetmek en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Optimizasyon çalışmalarında deney tasarımı yöntemi (DOE) uygulanarak belirlenen parametreler için optimum değerler elde edilmişidir. Geometride ortada federli yapının bulunması çarpma yönündeki dayanımı arttırmaktadır. Federlerin eklenmesi atalet momentini de arttırarak eğilmeye karşı daha rijit bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda RUPD için optimum kesit tasarımı Aluminyum-D Şekilli Bir Orta Federli Data Modeli olmuştur. EN AW 6063 T6 alaşımının mekanik özellikleri EN AW 6082 T6 alaşımına göre daha düşük olduğu için (akma, kopma, uzama,) RUPD analiz sonuçlarında regülasyon şartlarını sağlayamadığı görülmüştür. Aynı analizler 6082 alaşımı kullanıldığında yönetmelik şartlarını sağlamaktadır ve minimum ağırlık hedefi ile optimize edilmiş kesit elde edilmiştir.

Verilen malzeme mekanik özellikleri Yeşilova Holding bünyesinde üretilen alüminyum profillerden elde edilmiştir. Elde edilen değerler TS 755-2 standardında yer alan değerlerin üzerinde olduğu için değerlendirme yapılırken standartta yer alan mekanik değerlerin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Al-Bahash, Z. F., Ansari, M. N. M., & Shah, Q. H. (2018). Design and simulation of a rear underride protection device (RUPD) for heavy vehicles. *International Journal of Crashworthiness*, *23*(1), 47–56. https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1302040

Balta, B., Erk, O., Solak, H. A., & Durakbasa, N. (2014). Pareto Optimization of Heavy Duty Truck Rear Underrun Protection Design for Regulative Load Cases. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, *7*(2), 726–735. https://doi.org/10.4271/2014-01-9027

Balta, B., Otosan, F., Solak, H. A., Erk, O., & Durakbasa, N. M. (2016). A response surface approach to heavy duty truck rear underrun protection device beam optimisation. In *Int. J. Vehicle Design* (Vol. 71).

Brumbelow, M. (2011). *Crash Test Performance Of Large Truck Rear Underrıde Guards*. https://www.researchgate.net/publication/328228627

Çalışkan, T., Yılmaz, A. S., & Akkas, N. (2021). Ticari Araçlarda Sonlu Eleman Analizi Kullanılarak Arka Alt Koruma Tasarımı ve Optimizasyonu. *Academic Perspective Procedia*, *4*(1), 297–306. https://doi.org/10.33793/acperpro.04.01.44

Erdil, A. (2020). *Importance of Experimental Design in the De-velopment of Products and Processes: Applica-tion in a Factory in the Automobile Industry*.

Eroğlu, G., & Şahiner, M. (2018). *Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum*.

Gidlewski, M., Jackowski, J., & Posuniak, P. (2022). Review and Analysis of Technical Designs of Rear Underrun Protective Devices (RUPDs) in Terms of Regulatory Compliance. In *Sensors* (Vol. 22, Issue 7). MDPI. https://doi.org/10.3390/s22072645

Gogte, S., & Vijendran, N. (2014). *Conceptual design and development of movable rear underrun protection*.

Gökçe, G. (2019). *Rear Underrun Guard Design And Analysis For Heavy Duty Vehicles By Using 6082 Aluminum Alloy With Artificial Aging Treatment (Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).*

Lerspalungsanti, S., Pitaksapsin, N., Viriyarattanasak, P., Wattanawongsakun, P., & Suebnunta, N. (2022). Design approach of heavy goods vehicle underrun protection using morphological analysis. *Proceedings of the Institution of*

Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, *236*(6), 1213–1232. https://doi.org/10.1177/09544070211034328

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (John Wiley &Sons, Ed.; Eighth).

Shah, A. A., & Arora, H. (2017). Design and Development of Chassis Along with Novel Under Run Protection Devices for Commercial Vehicles with the Use of an Innovative Approach Resulting in Lighter Weight of the Vehicle. In *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering* (pp. 610–619). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_67

Sun, B. H., Zhao, J., Yang, Z., Ren, L. Q., & Zhu, B. (2014). Design and analysis of the bio-inspired rear under-run protection devices for heavy truck. *Applied Mechanics and Materials*, *461*, 499–505. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.461.499

Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı. (2023). *Trafik Kazaları Özeti-2022*. www.kgm.gov.tr

Yang, Y., Vincze, G., Baudouin, C., Chalal, H., & Balan, T. (2021). Strain-path dependent hardening models with rigorously identical predictions under monotonic loading. *Mechanics Research Communications*, *114*. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2020.103615