

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA SÜSPANSİYON HAVA KÖRÜĞÜNE
GELEN YATAY HAREKETİN SÖNÜMLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman YILDIRIM

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

AĞUSTOS 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA SÜSPANSİYON HAVA KÖRÜĞÜNE
GELEN YATAY HAREKETİN SÖNÜMLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman YILDIRIM

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Faruk YAREN

AĞUSTOS 2025

Osman Yıldırım tarafından hazırlanan “Ağır ticari araçlarda süspansiyon hava körüğüne gelen yatay hareketin sönümlenmesi” adlı tez çalışması 27.08.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **Makina Tasarım ve İmalat** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA SÜSPANSİYON HAVA KÖRÜĞÜNE GELEN YATAY HAREKETİN SÖNÜMLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, etik kurul onay belgesi aldığımı, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(27/08/2025).

Osman YILDIRIM



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Faruk Yaren'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı tamamlamamda en büyük motivasyonum olan çocuklarım Rabia ve Betül'e, her daim yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen eşime ve tüm hayatım boyunca destek olan kardeşlerime teşekkür ederim.

Osman YILDIRIM



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Süspansiyon Sistemi	2
1.1.1. Süspansiyon sisteminin görevleri	9
1.1.2. Süspansiyon sistemi değişkenleri	10
2. SÜSPANSİYON TÜRLERİ	13
2.1. Havalı Süspansiyon	13
2.2. Çelik Yaylı Süspansiyonlar	15
2.2.1. Geleneksel yaprak yaylar	16
2.2.2. Parabolik makaslar	17
2.2.3. Z Makaslar	18
2.2.4. Çift takviye yay süspansiyonu	18
3. HAVA KÖRÜKLÜ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİNDE TASARIM VE MONTAJ HATALARI	21
3.1. Hava Körüklü Süspansiyon Tasarımında Temel Gereksinimler	21
3.1.1. Süspansiyon sistemi açısından tasarımcı gereksinimleri	21
3.1.2. Hava körüğü seçimi ve yerleşim şartları	22
3.1.3. Gerilimlerin süspansiyon elemanları üzerindeki etkisi	22
3.1.4. Hizalamanın optimizasyonu	23
3.1.5. Hava körüğü montaj kuralları ve dikkat edilmesi gerekenler	23
3.2. Süspansiyon Sistemimlerinde İdeal Şekil Değişimi Durumları	24
3.3. Süspansiyon Sistemimlerinde İstenmeyen Şekil Değişimleri	26
4. YENİ TASARIM ÖNERİSİ	31
4.1. Önerilen Konsept Tasarımın Rijit Cisim Dinamiği (Rigit Body Dynamics) Analizleri ile Boyutlandırılması	34
4.1.1. Slot açısının belirlenmesi	35
4.1.2. Slot uzunluğu	37
4.1.3. Mevcut sistem ile önerilen sistem arasındaki değişim	38
4.2. Katı Cisim Dinamik Analizleri (Rigit Body Dynamics) Sonuçlarının Statik Analizlere Uygulanması	39
4.2.1. Taşıyıcı	39
4.2.2. Hava körük bağlantı braketi	42
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	45

KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	49



KISALTMALAR

ASR	: Antriebsschlupfregelung, Tahrik patinaj kontrolü
BDT	: Bilgisayar destekli tasarım
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım - Computer aided design
DWB	: Double wishbone- Çift salıncaklı
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi - Finite element methods
MCP	: Mc Pherson
SLA	: Short long arm- Kısa uzun kol
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
TSC	: Traction Control System, Çekiş Kontrol Sistemi



SİMGELER

u	: İleri yöndeki hız [m/s]
v	: Yanal yöndeki hız [m/s]
w	: Dikey yöndeki hız [m/s]
ϕ	: Zaman [Birim]
θ	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri
Ψ	: Açısal hız [Birim]
p	: Devrilme yönündeki hız [m/s]
q	: Eğilme yönündeki hız [m/s]
r	: Yönelme yönündeki hız [m/s]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Süspansiyon çeşitleri ve genel özellikleri.	4
Tablo 1.2. Araç eksenleri ve ifadelerle bazı gösterimler.	5
Tablo 2.1. Çelik makasların karşılaştırılma tablosu.	20
Tablo 4.1. 78 mm uzunluktaki kanalın aç ı değerlerine göre Yatay (X) ve dikey (Y) eksenlere gelen kuvvetler.	36
Tablo 4.2. 10' ar mm ile iteratif çalışma.	38





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Araç üzerindeki farklı eksenlerdeki momentlerin fiziksel karşılıkları.	5
Şekil 1.2. Bağımlı ve Bağımsız Süspansiyon Karşılaştırması (JCBL India, 2024).	7
Şekil 1.3. McPherson Süspansiyon sisteminin görüntüsü (Car Blog India, 2020).	7
Şekil 1.4. Çift Salıncak süspansiyon sisteminin görüntüsü (Bucchi ve ark., 2022). ...	8
Şekil 1.5. Çok kollu süspansiyon sisteminin görüntüsü (Zaferiopoulos, 2017).	9
Şekil 1.6. Farklı süspansiyon sistemlerinin özellikleri (Wallentowitz, 2014).	11
Şekil 2.1. Bir hava körüğünün yapısı.	15
Şekil 2.2. Yaprak Yay (Leaf Spring).	17
Şekil 2.3. Parabolik makas.	18
Şekil 2.4. Z Makas Geometrisi.	18
Şekil 2.5. Takviyeli Yaprak Yay Süspansiyonu (Tandem Leaf Springs).	19
Şekil 3.1. Tam sıkışma anında hava körüğünün durumu (Goodyear Air Springs., 2024).	24
Şekil 3.2. Tam sıkışma anında hava körüğünün durumu (Goodyear Air Springs., 2024).	25
Şekil 3.3. Açılı bir şekilde hareket eden hava körüğünün (Goodyear Air Springs., 2024).	25
Şekil 3.4. Körüğün tam sıkışma esnasındaki durumu (Goodyear Air Springs., 2024).	26
Şekil 3.5. Sistem hareketinin doğru yapıldığı bir tasarım (Goodyear Air Springs., 2024).	26
Şekil 3.6. Hava körüğünün merkez hattındaki kaçıklık (Goodyear Air Springs., 2024).	27
Şekil 3.7. Piston merkez çizgilerinin uyumsuzluğu (Goodyear Air Springs., 2024).	27
Şekil 3.8. Hava körüklerinde katlanma problemi (Goodyear Air Springs., 2024). ...	28
Şekil 3.9. Hava körüklerinde karşılaşılan saha problemleri-1.	28
Şekil 3.10. Hava körüklerinde karşılaşılan saha problemleri-2.	29
Şekil 3.11. Hava körüklerinde karşılaşılan saha problemleri-3.	29
Şekil 4.1. Hava körüklü süspansiyon sistemi tasarımı.	31
Şekil 4.2. Saf Holland AD-123 Modelinin geometrik özellikleri.	31
Şekil 4.3. Önerilen tasarımın yan görünüşü.	32
Şekil 4.4. Önerilen tasarımın geometrik özellikleri.	33
Şekil 4.5. Önerilen süspansiyon sisteminin sıkışma ve genişleme durumları.	33
Şekil 4.6. Farklı slot açılarındaki görünüş; a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45°.	35
Şekil 4.7. Aç - kuvvet diyagramı.	37
Şekil 4.8. Farklı kanal uzunluklarına göre görünüş a)78 mm, b)88 mm, c)98 mm, d)108 mm, e)118 mm, f) 128 mm.	37
Şekil 4.9. Referans sistem modelinde yatay yönde gelen kuvvet değeri.	38
Şekil 4.10. Taşıyıcı (Salıncak kolu) parçanın 3 Boyutlu Modeli.	39
Şekil 4.11. Taşıyıcı parçanın mesh aralıklarına göre ortaya çıkan gerilme grafiği. ..	40
Şekil 4.12. Taşıyıcı parçanın 5 mm'lik mesh görüntüsü.	40

Şekil 4.13. Taşıyıcı parçanın analiz sınır şartları.	41
Şekil 4.14. Taşıyıcı parçanın deformasyon analizi.	41
Şekil 4.15. Taşıyıcı parçanın yüksek gerilme noktaları.	41
Şekil 4.16. Taşıyıcı parçanın sırasıyla 10 mm ve 20 mm et kalınlığındaki gerilme durumu.	42
Şekil 4.17. Hava körük bağlantı braketinin 3 boyutlu modeli.	42
Şekil 4.18. Hava Körük Bağlantı Braketinin 5 mm 'lik mesh görüntüsü.	43
Şekil 4.19. Hava körük bağlantı braketinin statik analiz sınır şartlarının görüntüsü.	43
Şekil 4.20. Hava körük bağlantı braketinin parçanın deformasyon analizi.	43
Şekil 4.21. Hava körük bağlantı braketinin parçanın yüksek gerilme noktaları.	44



AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA SÜSPANSİYON HAVA KÖRÜĞÜNE GELEN YATAY HAREKETİN SÖNÜMLENMESİ

ÖZET

Süspansiyon sistemleri araçlarda zemin ile şasi arasında bulunur. Zeminden gelen ani tepkileri absorbe ederek yolcunun ve yükün güvenliğini sağlar. Süspansiyon sistemleri kullanım amacına göre bir çok değişkenlik gösterir. Uzun yıllardır metal yaylar kullanılsa da kompozit yaylar ve hava körüklü yayların kullanımı da artmaktadır. Yaygın olan süspansiyon sistemleri ve onların bazı temel parametreler üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Araç kullanım tipi, süspansiyon sisteminin tercih edildiği yerler, üretim kabiliyeti, tasarım kabiliyeti ve yol tutuşu gibi parametreler değerlendirilmiştir. Hava körüklü yayların çalışma prensiplerine uyumlu şekilde çalışması kritiktir.

Bu tezin ana odağı havalı süspansiyon sistemlerinde hava körüklerinin çalışma süresince istenmeyen yüklere maruz kalarak ömrünün azalmasının nasıl önlenebileceğine dair bir çözüm önerisi sunmaktır. Hava körüklerinin temel amacı sistemdeki dikey yönde gelen kuvvetleri absorbe ederek hem yük taşımacılığında hem de yolcular için konfor, güvenlik ve yol tutuşu sağlamasıdır. Süspansiyon hareketleri gereği hava körükleri dikey kuvvete dayanıklı olması gerekirken bazı mecburi durumlardan dolayı (hızlanma ve frenleme gibi) yatay ekseninde de kuvvete maruz kalır. Fakat esas problem kalıcı olarak yatay eksene maruz bırakılması durumudur.

Tezde önerilen tasarım ile yatayda gelen kuvvetlerin en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Taşıyıcı parçada sabit bir bağlantı yerine bir kanal tasarlanmıştır. Böylece yatay eksenindeki istenmeyen yüklere karşılık olarak sistemde hareket alanı oluşmuştur. Bu sayede körüğün ömrü korunmuş olacaktır. 3 Boyutlu tasarım programında tasarımlar çizilmiştir. Farklı birkaç boyut çalışması yapılmıştır ve analizlerden gelen sonuçlara göre uygun boyutlara karar verilmiştir. Tasarlanan parçalardaki bazı ölçülerde (etkisi yüksek olanlar) değişiklik yapılması belirlenmiştir. Bu parametrelerde doğru değerlere ulaşmak için iteratif çalışmalarla ilerlenmiştir.

Salıncak kolundaki hareket kanalının uzunluğu ve açısal durumu incelenen temel parametrelerdir. İteratif bir çalışma yapılarak odaklanılması gereken boyut aralığı bulunmuştur. İteratif çalışmalar için sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre tasarımın parametre değerleri belirlenmiş ve belirlenen parametrik değerleri ele alarak tasarlanmış parçaların dayanımları kontrol edilmiştir.

Analiz çalışmalarında doğru mesh boyutunun belirlenmesi için parçalarda farklı mesh boyutlarında çalışılmış ve uygun mesh boyutu ve tipi seçilmiştir. Sistemde parçalara gelen kuvvetler belirlenmiştir. Sınır şartlarını uygun şekilde katı cisimler dinamiği analizler yapılmıştır. Parçaların statik analizleri yapılarak mevcut geometrilerinin yeterli dayanıma sahip olduğu ortaya konulmuştur. Parçalarda meydana gelen deformasyonları gösterilmiştir. Statik analizlerde elde edilen bilgilere göre katı cisimler dinamiği analizleri hazırlanmıştır.

Referans alınan ürün ile önerilen yeni tasarımın kıyası yapılmıştır. Her iki sistemde de aynı analizler uygulanmıştır. Referans modelde, hava körüklerine gelen yatay yük ile tasarlanan sistemde hava körüklerine gelen yatay yüklerin karşılaştırılması sonucunda elde edilen iyileşme görünmüştür.



DAMPING OF HORIZONTAL MOTION TO SUSPENSION AIR BELLOWS IN HEAVY COMMERCIAL VEHICLES

SUMMARY

Suspension systems constitute one of the most critical subsystems in modern vehicles, acting as an intermediary between the chassis and the ground. Their fundamental purpose is to regulate the interaction between the vehicle body and road surface by absorbing shocks and vibrations caused by road irregularities. Through this function, suspension systems contribute not only to passenger comfort but also to cargo safety, vehicle stability, and road-handling performance. Over time, advancements in vehicle design and material technologies have led to the evolution of suspension systems with diverse structural configurations and material compositions. While metallic coil and leaf springs have historically been dominant due to their simplicity and robustness, the increasing demand for weight reduction, improved comfort, and adaptability has accelerated the adoption of composite springs and, most prominently, pneumatic (air) suspension systems.

In this thesis, the types of suspension systems used in heavy commercial vehicles, their design criteria, operating principles, advantages, and disadvantages will be examined in detail. In addition, the effects of suspension systems on vehicle performance, as well as the key parameters related to road safety and driving comfort, will be addressed. This study aims to serve as a guide particularly for engineers engaged in the design and development of heavy commercial vehicles. The proposed design aims to extend the service life of air springs. To minimize frequent failures such as air spring ruptures, design improvements have been introduced at the connection points of the springs, and various optimizations have been presented. By reducing unexpected loads, or loads that are inevitable due to design constraints, this design is expected to provide significant advantages in terms of safety, cost, comfort, and driving performance.

Air suspension systems, which utilize air springs as the primary elastic element, are particularly valued for their ability to provide adjustable stiffness, maintain ride height under varying load conditions, and enhance both ride comfort and handling characteristics. Nevertheless, despite their advantages, air springs are inherently designed to resist vertical loads, while operational scenarios often subject them to additional non-ideal loading conditions. Events such as sudden acceleration, braking, or lateral maneuvers introduce horizontal and angular forces that deviate from the intended design parameters. Temporary exposure to such lateral forces may not cause immediate failure; however, prolonged and repeated exposure leads to premature material fatigue, reduced durability, and eventually a shorter service life of the air spring. Addressing this issue has become a crucial engineering challenge in the optimization of heavy-duty and passenger vehicle suspension systems.

The primary objective of this thesis is to develop, analyze, and validate a novel design approach that minimizes the detrimental effects of horizontal loads acting on air springs. The central hypothesis of this research is that the incorporation of controlled flexibility in the supporting components can provide an effective mechanism for

mitigating undesired lateral stresses without compromising the vertical load-bearing capacity of the suspension system. To this end, a design innovation was proposed in the carrier element: instead of a conventional rigid fixed joint, a channel-based connection was developed. This channel configuration provides a defined allowance for movement under horizontal forces, thereby redistributing the stress flow, reducing direct lateral impact on the air spring, and extending its service life.

The research methodology adopted in this study integrates parametric design exploration, finite element analysis (FEA), and iterative optimization techniques. Three-dimensional models of the proposed suspension components were created using advanced computer-aided design (CAD) software. Multiple design iterations with varying dimensions and geometrical parameters were generated, with particular focus placed on the length and angular orientation of the movement channel in the control arm. These parameters were identified as critical in determining the ability of the system to accommodate horizontal displacements while maintaining vertical stiffness.

To ensure computational accuracy, mesh convergence studies were systematically conducted. Various mesh sizes and element types were applied to the models, and sensitivity analyses were performed to identify the optimal mesh configuration. Static structural analyses were initially performed to evaluate the strength and deformation characteristics of the redesigned components under representative loading conditions. Subsequently, rigid body dynamics analyses were carried out, with boundary conditions carefully defined to replicate realistic operating environments. The integration of static and dynamic analyses provided a holistic assessment of the proposed design's performance.

The comparative evaluation between the reference (conventional) suspension model and the newly proposed design revealed substantial improvements. In the reference model, the air spring was directly subjected to significant horizontal forces, which could lead to accelerated wear and fatigue. In contrast, the proposed design successfully minimized the magnitude of lateral loads transferred to the air spring. The results demonstrated that the channel-based design redistributed these forces within the supporting structure, thus effectively safeguarding the air spring against premature failure. Additionally, the redesigned components exhibited sufficient strength and stability to withstand operational loads, as confirmed by static and dynamic simulations.

Beyond demonstrating technical feasibility, the outcomes of this study highlight the broader implications of incorporating design flexibility into suspension systems. By reducing the detrimental influence of non-ideal loading conditions, the proposed design not only extends the lifespan of air springs but also enhances overall vehicle reliability, safety, and operational efficiency. The approach contributes to reducing maintenance costs and downtime, which are critical factors in both passenger and commercial vehicle sectors.

In conclusion, this thesis presents a novel design strategy that addresses a long-standing limitation of air suspension systems by minimizing the exposure of air springs to horizontal loads. The integration of advanced CAD modeling, finite element simulations, and iterative optimization provides a robust methodological framework for suspension design enhancement. The findings underscore the importance of designing suspension systems that are not only structurally strong but also dynamically adaptable to real-world operating conditions. Future research will focus on experimental validation of the proposed design through prototype development and

physical testing under laboratory and field conditions. Furthermore, the scalability of the concept to different vehicle classes and its potential integration with active and semi-active suspension technologies present promising directions for continued investigation.

To mitigate the impact of sudden lateral loads, a controlled allowance for movement was introduced into the system, thereby reducing the horizontal force directly transmitted to the air spring. Through iterative studies focusing on the correct boundary conditions, a design configuration was achieved in which lateral forces were minimized. Static analyses of the components confirmed that the existing geometries possessed sufficient structural strength. Further optimization is possible by considering additional factors such as manufacturing methods, weight reduction, and cost efficiency. Moreover, since the proposed system has been compared with a specific reference product group, future studies may extend the analysis to other product groups with higher load-carrying capacities.

In addition to the improvements introduced by the proposed system, there are also certain aspects that require further development. Since relative motion will occur within the channel, noise and vibration are expected to be observed. The magnitude and effects of these phenomena will become clearer following experimental investigations. It is evident that, compared to the conventional system, higher levels of noise and vibration may arise. Moreover, the machining of the channel will require a more detailed manufacturing process, which is likely to result in additional production costs. Other aspects that need to be refined and improved will also become more evident after experimental validation.

In the proposed design, deformation within the channel hole of the carrier component, particularly at the connection between the air spring lower mounting part and the carrier, poses a potential risk. This indicates a possible need for design improvement in the connection region. Conducting a more detailed study of the design in this area would be beneficial. Furthermore, the dimensions of the connection pin inside the channel hole should also be examined and optimized accordingly.

The optimization study will be further expanded by considering all system components in detail. Based on the weight of the parts and the loads to which they are subjected, modifications in the manufacturing method may be required. Although cast parts are more economical, forging may be considered if a more robust component is needed. Additionally, certain geometrical modifications should be investigated to ensure better compatibility and integration among system components. In particular, the distance between the axle on the carrier part and the air springs is critical from a design perspective, as it generates a moment that directly influences the operational characteristics of the air springs. Another important aspect is the selection of air spring types. While the present study was conducted using identical air springs as the reference configuration, future studies could explore the application of different air spring types with similar performance characteristics.

Experimental validation will be highly beneficial to verify the results of the computer-aided analyses and to identify any unforeseen issues. The production of system prototypes is planned in order to obtain real-world performance data. By comparing the prototypes with the existing product, it will be possible to evaluate the suspension system both from a hysteretic behavior perspective and to assess the impact of the proposed improvements on the service life of the air springs. The contributions of this study will become clearer with the support of experimental data. Following the

experimental results, any potential need for design revisions can be identified, enabling further optimization of the system.



1. GİRİŞ

Ağır ticari araçlar, taşıma sektörünün bel kemiğini oluşturarak yüksek taşıma kapasiteleriyle öne çıkar. Bu araçların yol güvenliği, sürüş konforu ve yük taşıma performansını en üst düzeye çıkarabilmek için gelişmiş süspansiyon sistemlerine gereksinimi vardır. Süspansiyon, araç ile yol arasındaki temas noktasını yönetir; hem yolcuların ve yüklerin güvenliğini sağlar hem de araç dengesini ve stabilitesini koruyarak düzensiz yüzeylerde konforlu bir sürüş sunar. Özellikle uzun mesafelerde sürekli çalışmaya maruz kalan ağır ticari araçlarda süspansiyon sisteminin dayanıklılığı ve bakım aralıklarının uzatılması, kullanıcılar için önemli bir maliyet kalemini azaltırken, aracın kilometre performansını (hedeflenen 1.000.000 km gibi) güvence altına alır. Bunun yanı sıra, son yıllarda geliştirilen akıllı sensör tabanlı süspansiyon sistemleri, gerçek zamanlı yol verisi toplayarak titreşim analizleri yapmakta ve bakım ihtiyacını öngörerek arıza sürelerini daha da kısaltmaktadır. Böylece filo yöneticileri, bakım programlarını öngörülü şekilde planlayarak araç kullanılabilirliğini en üst düzeye çıkarabilmekte ve operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Diğer yandan, günümüzde otomotiv sektöründeki yoğun rekabet; maliyetlerin, ağırlığın, yakıt tüketiminin ve parçaların dayanımının optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bilgisayar destekli tasarım, simülasyon ve hatta makine öğrenimi uygulamaları sayesinde parçaların sanal prototipleri hızlıca test edilebilmekte; malzeme seçimi, geometri optimizasyonu ve titreşim davranışları dijital ortamda en uygun hale getirilmektedir. Farklı konfigürasyonlara göre artan parça ihtiyacını karşılamak amacıyla, çok sayıda modelde kullanılabilecek standartlaştırılmış ve modüler tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Bu yaklaşımla, süspansiyon sistemleri hızlı ve en ekonomik yöntemlerle üretilirken bir yandan da yüksek dayanım kriterlerini karşılayacak şekilde çok aşamalı doğrulama süreçlerinden geçer. Müşteri taleplerinin doğru analiz edilmesiyle başlayan tasarım ve onay safhaları, parçaların uzun ömürlü olması ve periyodik değişim sürelerinin uzatılması hedefine hizmet ederek, araçların pazarda tercih edilme oranını artırır. Ayrıca, sürdürülebilirlik kaygıları doğrultusunda geri dönüştürülebilir malzemeler ve düşük karbon salımlı üretim teknikleri tercih

edilmekte, bu da hem karbon ayak izini küçültmekte hem de markaların kurumsal itibarını güçlendirmektedir.

Bu tezde, ağır ticari araçlarda kullanılan süspansiyon sistemlerinin çeşitleri, tasarım kriterleri, çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenecektir. Ayrıca, süspansiyon sistemlerinin araç performansına etkisi, yol güvenliği ve sürüş konforu açısından önemli parametreler ele alınacaktır. Bu çalışma, özellikle ağır ticari araçların mühendislik tasarımı ve geliştirilmesinde çalışan mühendisler için yol gösterici olmayı hedeflemektedir. Sunulan tasarım ile hava körüklerinin ömrünün uzatılması hedeflenmiştir. Hava körüklerinde sıkça karşılaşılan körük patlamalarını en aza indirmek amacıyla körüğün bağlantı noktalarında tasarım iyileştirilmesi yapılmış ve çeşitli optimizasyonlar sunulmuştur. Körüklere gelen beklenmedik veya tasarımdan dolayı gelmek zorunda olan yükleri en aza indirgeyecek bu tasarım ile güvenlik, maliyet, konfor ve sürüş açısından avantajlar sağlayacaktır.

Bu çalışmada ilk bölümde yaygın kullanılan süspansiyon sistemleri paylaşılmıştır. Bu sistemlerin genel özellikleri, avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. 2. Bölümde ise ağır ticari araçlarda kullanılan yaygın süspansiyon sistemleri ele alınmıştır. Temelde ikiye ayrılan bu sistemlerin genel özellikleri, kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. Bölüm 3 'te havalı süspansiyon sistemleri ele alınmıştır. Bir havalı süspansiyon sisteminde doğru sistemin yapılması, dikkat edilmesi gereken hususlar ve yaygın hatalar üzerinde durulmuştur. 4. Bölümde yeni yapılan tasarım gösterilmiştir. Bu tasarımın katkıları ele alınmış olup yapılan analizleri ve sonuçları paylaşılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları yorumlanmıştır. Elde edilen kazanımlar, çalışmanın eksik yanları ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar ortaya koyulmuştur.

1.1. Süspansiyon Sistemi

Süspansiyon sistemi, bir aracın tekerlekleri ile gövdesi (şasi) arasında yer alan ve yol ile araç arasındaki dinamik etkileşimi yöneten mekanik düzenlemelerdir. Yay, amortisör, bağlantı kolları ve denge çubuklarından oluşan temel sistemde birçok farklı tasarımlar elde edilmiştir. Her bir bileşen için farklılık ortaya çıkmış ve gittikçe özelleşmiş sistemler kullanılmaktadır. Kullanılan araç tipi ve yük kapasitesi göz önüne alınarak geliştirilmiş olan süspansiyon sistemleri içerdikleri ürünlerde birçok

alternatifler üretilmiştir. Bu sistemler arasında tercihte bulunurken tüm özelliklerin yüksek performans göstermesi mümkün değildir. Bazı sistemler hafifliği ile öne çıkarken bir diğeri maliyeti ile öne çıkabilir. Yol tutuşu, üretimi, paketlenme alanı ve sürüş konforu gibi birçok seçenekten bazılarının iyi performans sergilediği bazılarının ise o kadar iyi olamayacağı aşıkardır.

Süspansiyon sistemi, aracın dinamik davranışının bel kemiğini oluşturur. Tasarım kalitesi, malzeme seçimi, düzenli bakımı; aracın sürüş güvenliği, konforu ve aracın uzun ömürlü kullanım performansı üzerinde belirleyici rol oynar. Dinamik davranışın belirlenmesinde ayar yapılabilen parçalar ve burçların etkisi büyüktür. Yayların yapım aşamasında belirlenen sertlik değerleri ile burçların sertlik değerleri sistemin karakterini belirlerken şok emici damperler ise sürüş testlerinde belirlenerek subjektif bir karar alınmasını sağlar. Sistemin değerlendirilmesinde, bazı parametrelerde metrik veriler olsa da diğeri parametrelerde öznel yorumlar yapılarak karar alınır. Araç dinamiği ekipleri bu konuda karar veren taraftır.

Aracın ihtiyacına göre süspansiyon sistemi seçilir. Konfor, yol tutuşu, maliyet, tasarım ve paketlenme alanı sınıflandırma için belirlenen temel parametrelerdir. Farklı süspansiyon türleri için bu parametreler Tablo 1.1'de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır. Sağ ve sol tekerleğin birbiriyle olan bağlantısı süspansiyon sistemi için bağımlılık veya bağımsızlık durumunu belirtir. Ağır yük taşımacılığının yapıldığı araçlarda yaprak yaylar ve havalı süspansiyonlar kullanılırken, binek araçlarda mc pherson, çift salıncaklı ve çok kollu süspansiyon sistemleri yaygındır. Arka dingil veya ön dingil olması da süspansiyon sistemi için ayırıcı bir parametredir. Zira her sistemin her yere uygun olması mümkün değildir.

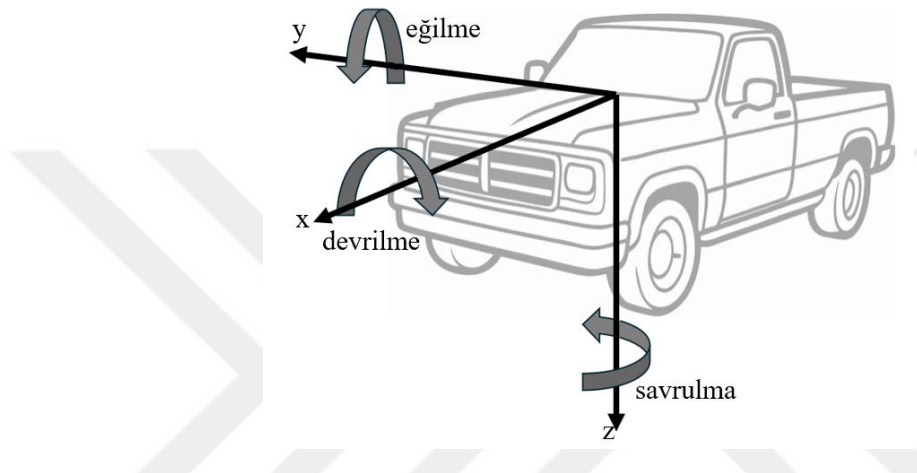
Tablo 1.1. Süspansiyon çeşitleri ve genel özellikleri.

Süspansiyon Türü	Kullanım Yeri	Araç Tipi	Konfor	Yol Tutuş	Karmaşıklık	Maliyet
Bağımlı Süspansiyon	Genellikle Arka Aks	Binek / Ağır Ticari	Düşük	Düşük	Basit	Düşük
McPherson Strut	Ön Aks	Binek	Orta	Orta	Basit	Düşük
Çift Salıncaklı (Double Wishbone)	Ön/Arka Aks	Binek (Spor/Lüks)	Orta	Yüksek	Orta	Orta
Çok Kollu (Multi-link)	Genellikle Arka Aks	Binek (Lüks/SUV)	Yüksek	Yüksek	Karmaşık	Yüksek
Hava Süspansiyonu	Ön/Arka Aks	Binek / Ağır Ticari	Çok Yüksek	Yüksek	Çok karmaşık	Çok yüksek
Yaprak Yaylı Süspansiyon	Arka Aks	Ağır Ticari	Düşük	Orta	Basit	Düşük
Torsiyon Barlı (Torsion Bar)	Ön Aks	Binek / Hafif Ticari	Orta	Orta	Orta	Orta
Hidropnömatik Süspansiyon	Ön/Arka Aks	Binek (Nadir, Lüks)	Çok Yüksek	Yüksek	Karmaşık	Yüksek

Süspansiyon sisteminde meydana gelen hareketleri açıklamak için eksen sistemleri Tablo 1.2’de gösterilmiştir. Kuvvetler ve momentler Şekil 1.1’de verilen bir araç üzerinde gösterilmiştir. X-ekseni boylamasına, Y-ekseni yanal ve Z-ekseni dikey hareketleri ifade eder. Boyluca gelen rüzgâr, frenleme ve ani hızlanmanın etkisiyle boylamsal hareketler oluşur. Yanal gelen rüzgâr, manevra ve sollama gibi hareketlerin etkisiyle yanal hareketler oluşur. Kasisten geçme ve engebeli yoldan geçmenin etkisiyle dikey hareketler oluşur.

Tablo 1.2. Araç eksenleri ve ifadelerle bazı gösterimler.

Eksen	Öteleme hızı	Açısal Yer Değiştirme	Dönme Hızı
x	u	ϕ	p
y	v	θ	q
z	w	Ψ	r



Şekil 1.1. Araç üzerindeki farklı eksenlerdeki momentlerin fiziksel karşılıkları.

Yumuşak süspansiyonun en büyük dezavantajı, özellikle ani manevra durumlarında devrilme olasılığının yüksek olmasıdır. Denge çubuğu, aracın düşey sertliğini etkilemeden yuvarlanma sertliğini artırmak için kullanılan klasik bir mekanik bağlantıdır. Denge çubuğunun en büyük dezavantajı sürüş konforunu olumsuz etkiler (Tavares ve ark., 2019).

Devrilme (roll), aracın sağa veya sola dönmesini ifade eder. Viraj alırken, asimetrik yük taşınırken ve yola bağlı olarak meydana gelir. Eğilme (pitch), aracın y eksenini etrafında eğilmesini ifade eder ve aracın önünün yukarı-aşağı hareket etmesidir. Hızlanma, frenleme, yokuş tırmanma veya inme ve yol eğimine bağlı olarak meydana gelir. Yönelme (yaw), aracın dikey ekseninde sağa ve sola dönmesidir. Direksiyon çevrilmesi, rüzgâr etkisi, tekerlek kayması ve yol eğimine bağlı olarak meydana gelir (Bennet S. 2007).

Devrilme, yolcuların ölümcül şekilde yaralanmasıyla sonuçlanan yol kazalarının önemli bir nedenidir. Devrilme önleme çalışmaları, özellikle ticari araçların güvenliğinde hayati bir rol oynar. kamyonlar, büyük otobüsler veya büyük tırlar gibi

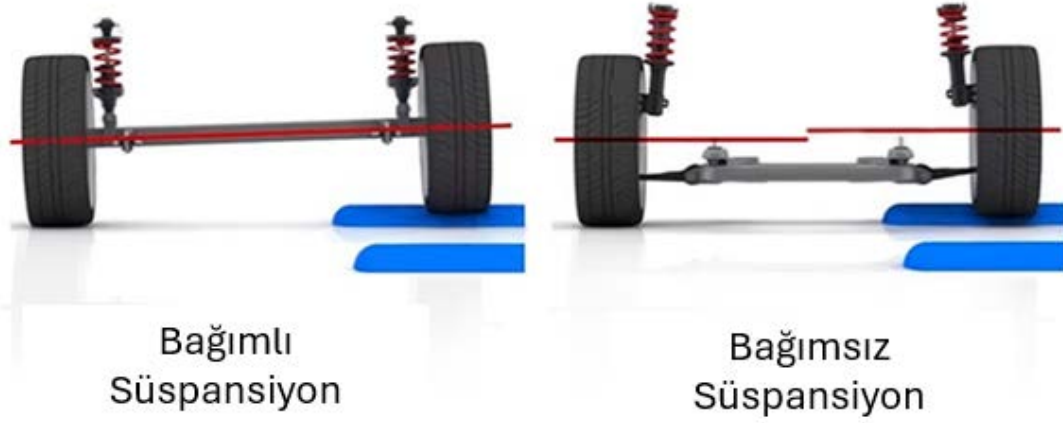
ticari araçların kendine özgü özellikleri vardır. İlk olarak, ticari bir aracın boyutu geleneksel araçlardan çok daha büyüktür. Ticari bir aracın yükü nedeniyle, ağırlık merkezi veya yuvarlanma merkezi genel araçlardan çok daha yüksektir ve bu da devrilme olasılığını artırır. Elektronik denge kontrolü (ESC), ticari araçlarda devrilmenin azaltılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Devrilmenin azaltılması için, yaklaşan devrilmenin tespiti ve tahmini gereklidir (Shin ve ark., 2021).

Devrilmenin önlenmesi için süspansiyon sistemindeki bazı ürünler ve parametrelerin konfigürasyonu gereklidir. Denge çubuğu (Anti-roll bar) aracın sağ ile solu arasında kullanılır ve virajlarda aracın dengesini sağlar. Süspansiyon sertliği ve sönümlemesi devrilmenin önlenmesindeki kritik bir değişkendir. Yay katsayılarının optimize edilmesi ve sınır şartlarının belirlenmesi yapılan testler sonucunda belirlenmelidir. Ağırlık merkezinin konumu, lastik ve jant seçimi ve dönme merkezinin konumu diğer kritik parametrelerdir (Hac, 2002).

Ön ve arka yay katsayılarının optimizasyonu eğilme (pitch) riskini azaltır. Amortisörlerde ise sönümleme katsayısı önemli bir etkiye sahiptir. Ağırlık merkezi ve şasi rijitliği eğilme riskinde önemli diğer parametrelerdir. Frenleme sırasında, ön amortisörün sönümlemesinin yüksek olması ve arka yayların daha sert olması eğilmeyi önlemek için optimum davranışlardır. Hızlanma sırasında, arka amortisörün sönümlemesinin yüksek olması ve ön süspansiyonun yumuşak olması istenen durumdur (Lu ve ark., 2024; Azman ve ark., 2004).

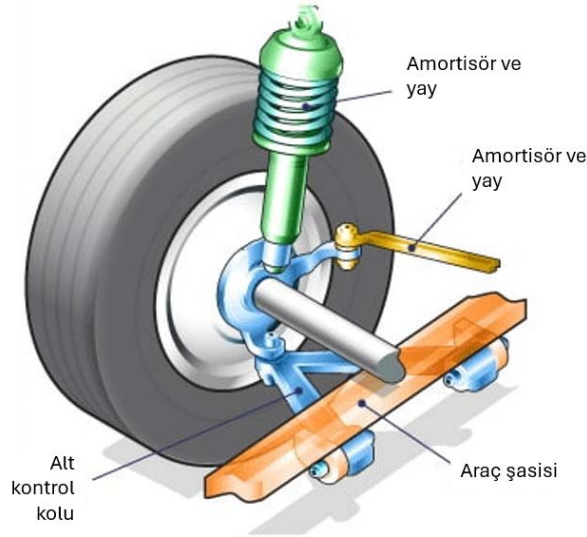
Yaw (Yönelme/Savrulma) için elektronik denge kontrolü (ESP,ESC) tekerlere ayrı ayrı fren uygulayarak savrulmayı engeller. Patinajları önlemek için TCS/ASR sistemleri mevcuttur ve patinaj savrulmaya sebep olabilir. Rüzgar etkisini azaltmak için ise aerodinamik tasarımı dikkatli bir şekilde yapmak gerekir. Yan rüzgarlarda savrulma oluşumunu engellemek için aerodinamik tasarımlar tercih edilmelidir (Grm ve ark., 2017; Zheng ve ark., 2018).

Bağımlı süspansiyon ve bağımsız süspansiyonun farkı Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Bağımlı süspansiyonlar basit, ekonomik ve dayanıklı olması ile öne çıkarken bağımsız süspansiyonlar ise konfor, sürüş dengesi ve yol tutuşu özellikleri ile öne çıkar. Bağımsız süspansiyon sistemleri maliyet ve mühendislik olarak daha zordur. Bu sebepten dolayı çok sık tercih edilmese de bazı spesifik işler için zorunluluk haline gelebilir (Topaç ve ark., 2019).



Şekil 1.2. Bağımlı ve Bağımsız Süspansiyon Karşılaştırması (JCBL India, 2024).

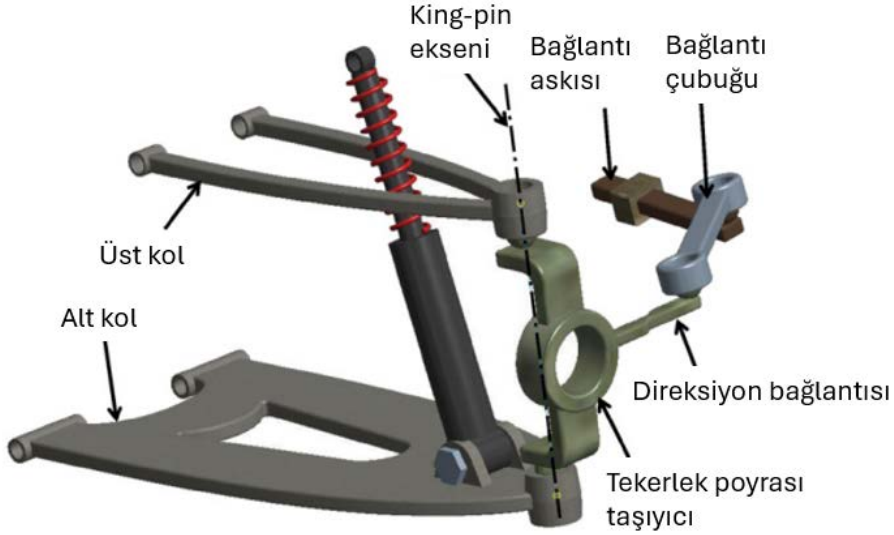
McPherson süspansiyon sistemi küçük ve orta büyüklükteki otomobillerde sıklıkla uygulanan bir süspansiyon sistemidir. Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Birçok modern araçta McPherson süspansiyon sistemi, kompakt boyutu, hafifliği, yüksek dayanıklılığı ve iyi sürüş özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Bu tip süspansiyon sistemi ön ve arka süspansiyon için kullanılabilir, ancak esas olarak otomobillerin ön aksamında bulunur ve burada direksiyon pivotu ve tekerlek için süspansiyon montajı sağlar (Saurabh ve ark., 2018).



Şekil 1.3. McPherson Süspansiyon sisteminin görüntüsü (Car Blog India, 2020).

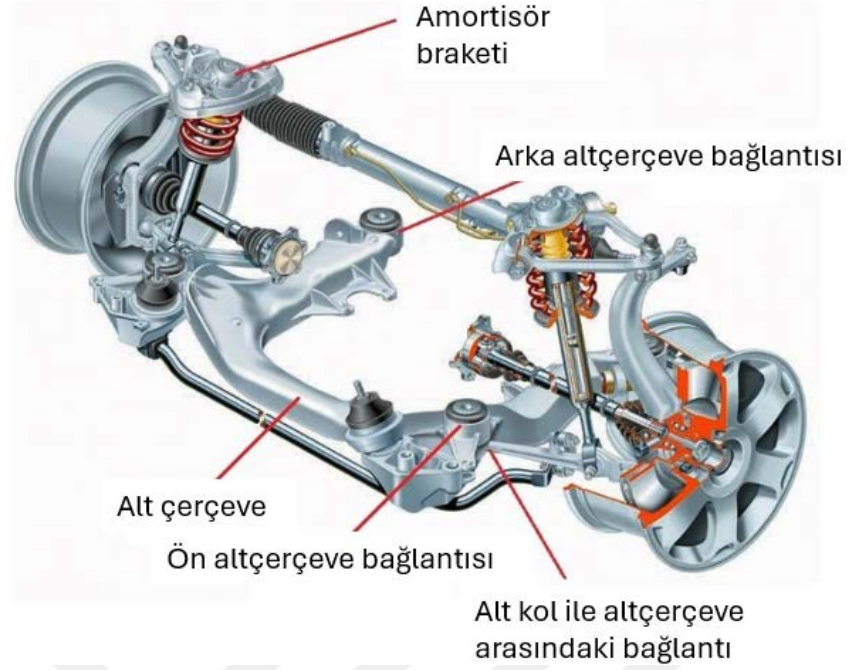
Çift Salıncaklı (Double Wishbone) süspansiyon sistemi kısa kol ve uzun kol içeren bir tasarımıdır ve Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Bazı çalışmalarda SLA (Short Long Arm) olarakta gösterilmiştir. DWB, diğer süspansiyonlara göre üstün kinematik tepkisi

nedeniyle yüksek performanslı otomobillerde ve SUV'larda kullanılır. Hafif bir sistem olmasının yanında yol tutuşu olarak oldukça başarılıdır (Reimpell ve ark., 2001).



Şekil 1.4. Çift Salıncak süspansiyon sisteminin görüntüsü (Bucchi ve ark., 2022).

Şekil 1.5’de gösterilen çok kollu süspansiyon ağır şartlarda dahi iyi performans gösterdiği için arazi sürüşlerinde dahi tercih edilebilmektedir. Dayanıklı ve konforlu bir sistem olsa da maliyet olarak yüksektir. Ayrıca tasarım olarak karışıklığa sahiptir. Çoklu bağlantıya sahip olduğu için süspansiyon hareketleri esnasında uyum içinde çalışabilmesi için iyi bir mühendislik çalışması gerekir (Raafiq ve ark., 2015).



Şekil 1.5. Çok kollu süspansiyon sisteminin görüntüsü (Zaferiopoulos, 2017).

Hidro pnömatik süspansiyon konfor ve yol tutuş açısında kaliteli bir sistem olsa da maliyet olarak dezavantajlı durumdadır. Lüks binek araçlar ile treyler taşımacılığında bazı özel modellerde kullanılmaktadır. Hem binek araçların konforu hem de yük taşımacılığında ürünlerin güvenli bir şekilde taşınmasında tercih edilmektedir (Büyükdördek, 2011).

1.1.1. Süspansiyon sisteminin görevleri

Süspansiyon sistemi sabit parça ile salınım yapan parçanın arasında askıda kalan sistemdir. Bir aracı ele aldığımızda sabit olan kısım için şasiyi salınım yapan kısım için tekerleği düşünebiliriz. Araçta süspansiyon sisteminin sağlamasını beklediğimiz bazı fonksiyonlar vardır. Bu fonksiyonlara göre tasarımıımızda bazı karakteristik davranışlar için tercihlerde bulunuruz ve sistem için belirlediğimiz önceliklere uyan bir ürün elde ederiz (Bennet S. 2007).

Süspansiyon sisteminin fonksiyonları;

- Yolcu ve yük taşımak
- Sürüş konforu sağlamak
- Titreşimlerin azaltılmasını sağlamak
- Aracın stabilitesini sağlamak
- Şasi ile tekerler arasında bağlantı kurmak

- Hızlanma ve frenleme durumlarında güvenliği sağlamak
- Manevra yaparken yol tutuşunu sağlamak

İstenilen karakteristikler

- Minimum ağırlık
- Düşük bakım ve işletme maliyeti
- Yol tutuşu
- Lastik aşınmasını en aza indirme
- Tekerler zıplamasını en aza indirme
- Yüklü ve yüksüz koşullar arasında nispeten sabit bir frekans sağlama
- Sürüş konforu

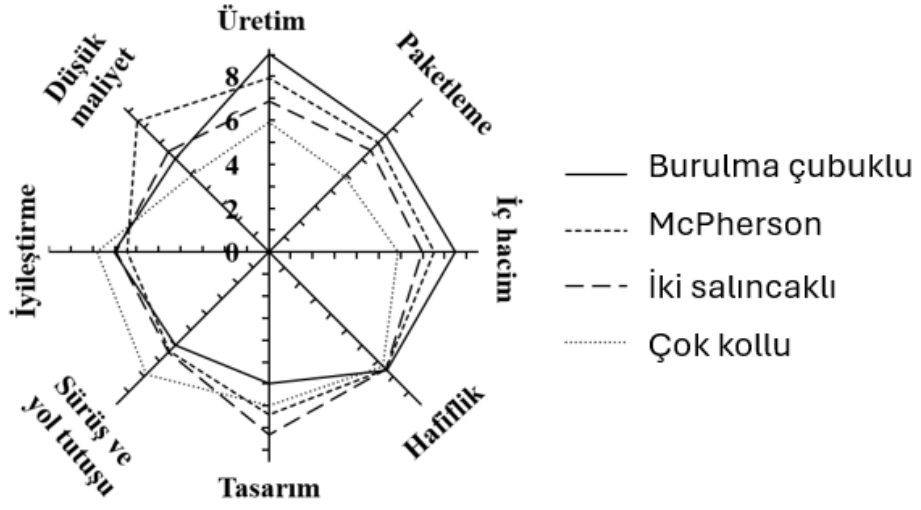
1.1.2. Süspansiyon sistemi değişkenleri

Şekil 1.6'da gösterildiği gibi süspansiyon sistemlerinde genel bir değerlendirme için örümcek ağı şemasını kullanılabilir. Bu şema sistemlerin avantajları ve dezavantajlarını gösteren bir değerlendirmedir. Temel parametreleri ele alıp ihtiyaçlarımızı önceliklendirerek tüm sistemin karakterini anlayabiliriz. Toplam ağırlık, maliyet, paketleme alanı ve performans temel parametrelerdir.

Şekilde 0 en düşük değer olup değer arttıkça kalite artmaktadır. Tüm sistemlerin iyi ve kötü olduğu durumlar mevcuttur. Seçilen kriterlere göre hangi sistem daha başarılı ise o sistem araçta kullanılabilir. Yarış araçları için yol tutuşu önemli iken, günlük araçlarda konfor ve maliyet ön plana çıkmaktadır.

Çok kollu süspansiyon sistemi sürüş ve yoltutuşu ile gürültü ve titreşim açısından başarılı olurken tasarımı, paketlemesi ve maliyeti olarak geride kalmaktadır. Benzer şekilde diğer sistemlerinde avantaj ve dezavantajları şekilde gösterilmektedir.

Mcpherson süspansiyon sistemi ise maliyet, üretim ve tasarım açısından öne çıkmaktadır. Ses ve titreşim ile yol tutuşu açısından kötü görünse de binek araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.6. Farklı süspansiyon sistemlerinin özellikleri (Wallentowitz, 2014).



2. SÜSPANSİYON TÜRLERİ

Ağır ticari araçlarda, farklı yol koşullarına ve taşıma ihtiyaçlarına göre çeşitli süspansiyon sistemleri kullanılır. Her bir süspansiyon türü, belirli yük taşıma kapasitesine ve yol koşullarına göre avantajlar sunar. Hangi sistemin kullanılacağı, aracın amacı, taşıma kapasitesi ve kullanım şartlarına bağlı olarak değişir. Çelik yaylı sistemler, basitliği ve dayanıklılığı nedeniyle uzun süre en yaygın tercih olmuşken, hava yaylı sistemler daha fazla konfor ve esneklik sunmaktadır. Ağır ticari araçlarda yaygın olarak kullanılan süspansiyon türleri şunlardır:

2.1. Havalı Süspansiyon

Kamyon, otobüs ve lüks binek araçlarda kullanılan daha yüksek konfor sağlayan sistemlerdir. Havalı süspansiyon sistemleri, araçların yol şartlarına göre daha esnek ve rahat bir sürüş deneyimi sunmak için kullanılan gelişmiş bir süspansiyon türüdür. Hava körüklerindeki basıncı kontrol ederek aracın her bir tekerleği için uygun sürüş yüksekliğini belirler. Aracın yükü, yol şartları ve sürücünün tercihlerine göre değişiklik gösterir. Sistemdeki sensörler, sürekli olarak araçtan aldığı değerlere göre havalı körükleri yönlendirir.

Havalı süspansiyon sistemi, kapalı bir alanda hava sıkıştırılarak çalışır. Hava, körüklere basılır ve tekrar emilir, böylece yay etkisi oluşturulur. Havalı süspansiyon elemanları, yük değişimine bağlı olarak havanın körüklere yönlendirilmesi ya da boşaltılması işlemi için mekanik ya da elektronik kontrollü seviye kontrol valfleriyle iş birliği yapar. Bu sayede araç, yükten bağımsız olarak sabit bir duruş sergileyebilir. Hem yüklü hem de boş ağırlıkta ideal bir sürüş konforu sağlanır. Ayrıca, yay özellikleri hızlıca ayarlanabilir ve araç manevralara daha düzgün tepki verebilir (Kuralay, N. S. 2008).

Ağır ticari araçlarda kullanılan havalı süspansiyon sistemleri, sürüş konforunu ve taşıma güvenliğini artırmak amacıyla geliştirilmiş, gelişmiş bir süspansiyon çözümüdür. Bu sistemlerde, klasik yaprak yaylar yerine hava ile dolu körükler (hava yastıkları) kullanılır. En önemli avantajlarından biri, araç yüksekliğinin yük durumuna

bağlı olarak otomatik şekilde ayarlanabilmesidir. Araç yüklüyken körükler şişirilerek yüksekliğin sabit kalması sağlanır, böylece hem yol tutuşu artar hem de araç üzerindeki ekipmanlar ya da yük dengeli bir şekilde taşınır. Bu nedenle, özellikle hassas ve kırılabilir yüklerin taşındığı nakliyelerde tercih sebebidir. Ayrıca, aracın yüksekliği ayarlanabildiği için yükleme ve boşaltma işlemleri sırasında da operasyonel verimlilik sağlar.

Havalı süspansiyonun bir diğer önemli avantajı ise titreşimleri büyük oranda sönümlemesi ve yol darbelerini absorbe etmesi sayesinde sürücüye ve araç içi ekipmanlara daha az yorgunluk vermesidir. Bu da hem sürüş güvenliğini artırır hem de aracın mekanik parçalarının ömrünü uzatır. Ayrıca aks yükü dengelenerek lastik aşınmaları azalır, yakıt verimliliği artabilir ve daha stabil bir sürüş elde edilir.

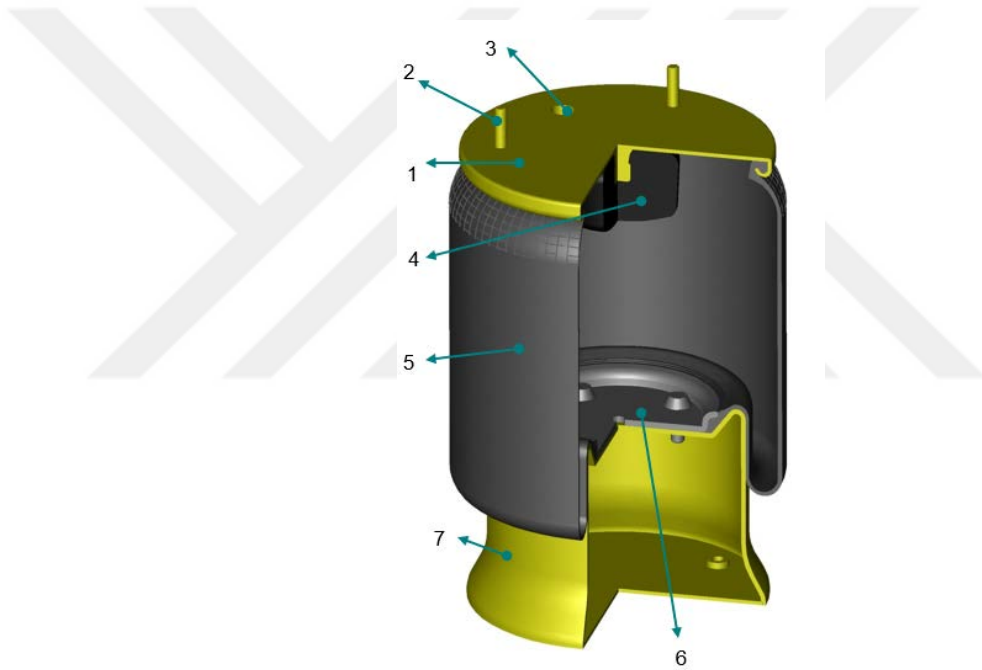
Bununla birlikte, havalı süspansiyon sistemlerinin bazı dezavantajları da vardır. Klasik süspansiyon sistemlerine kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle ilk yatırım maliyeti yüksektir ve düzenli bakım gerektirir. Hava kompresörleri, valfler, sensörler ve körükler gibi birçok parçanın bir arada çalışması gerektiğinden, sistemde oluşabilecek bir arıza tüm süspansiyon performansını etkileyebilir. Özellikle hava kaçakları, sistemin devre dışı kalmasına neden olabilir ve yol kenarında tamir için uzman müdahalesi gerekebilir. Soğuk hava koşulları, sistemin çalışma verimini olumsuz etkileyebilir; hava hatlarında donma gibi problemler görülebilir.

Sonuç olarak, havalı süspansiyon sistemleri, taşımacılıkta konfor, yük güvenliği ve performans anlamında ciddi avantajlar sunarken, bu avantajların sürdürülebilirliği için maliyet ve bakım gibi konuların dikkatle planlanması gereken sistemlerdir. Özellikle uzun yol taşımacılığı, yolcu taşımacılığı ve hassas yük taşımacılığında tercih edilmektedir.

Şekil 2.1’de hava körüğün detaylı yapısı gösterilmiştir. Sırayla tanımlamalar aşağıda yapılmıştır.

1. Üst Plaka: Süspansiyona montaj için kullanılan hava yayının metal parçası.
2. Saplama: Hava yayını süspansiyona takmak için kullanılan boncuk plakası tertibatının kalıcı parçası.
3. Hava Girişi: Hava sisteminden somunu monte etmek için kullanılan üst plakadaki dişli delik.

4. Tampon: Birçok süspansiyon uygulamasında kullanılan sağlam kalıplanmış kauçuk/plastik arıza emniyet cihazı. Ani hava basıncı kaybı durumunda araç ve süspansiyona aşırı hasar gelmesini önler.
5. Körük: Bir hava yayının kalbi. En az dört katman veya tabaka, bir iç kauçuk levha, iki kat kauçuklaştırılmış kord kumaş (birbirine çapraz) içerir.
6. Uç Kapatma: Bu çelikten yapılır ve piston somunlarla sabitlenir ve piston ile uç kapatma arasında hava kaçağına karşı bulunan körük tarafından monte edilir.
7. Piston: Hava yayının alt bölümü. Alüminyum, çelik veya elyaf takviyeli plastikten yapılır. Hava yayı için hareketli çekme kolu veya aks yuvası şeklinde alt montaj düzeni sağlar.



Şekil 2.1. Bir hava körüğünün yapısı.

2.2. Çelik Yaylı Süspansiyonlar

Çeşitli formlarda metal yayların kullanıldığı sistemlerdir. Çelik yaylar, genellikle bir dizi metal levhanın üst üste konularak birbirine bağlanmasıyla oluşturulur. Bu yaylar, aracın yükünü dengelemek ve sarsıntıları emmek için kullanılır. Aracın yükü arttıkça yaylar daha fazla sıkışır ve esner. Yaylar, aracın yol tutuşunu iyileştirirken, yol darbelerini de emerek sürüş konforu sağlar.

Çoğunlukla metal malzemelerden yapılan ürünler kullanılsa da ağırlığı azaltmak için alternatif malzemeler araştırılmıştır. İmalat yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde

kompozit malzemelerden yapılan ürünleri piyasada görmek artık mümkündür. Malzemelerin farklılığı yayların yapacağı süspansiyon hareket aralıklarını da etkilemektedir. Burada malzeme tercihinin yanında yayların sertlik katsayıları da önemli bir karakteristik oluşturmaktadır. Genel olarak yayların malzemesi, şekli, hareket aralığı ve sertlik katsayısı temel parametrelerdir.

Çeşitli şekillerde elde edilen ürünlerin temel amacı aynıdır. Enerjinin belli bir oranını emip sönümlmek, geri kalanını depolamak ve yük ortadan kalktığında bu depolanan enerjiyi serbest bırakmaktır. Geçmişten günümüze farklı şekillerde yaylar yapılmış olup her birinin kullanım alanları özelleştirilmiştir. Süspansiyon sistemleri içerisinde de kullanılacak yeri (ön ve arka dingil gibi), taşıma kapasitesi, paketleme alanı, hedeflenen süspansiyon hareket aralığı ve maliyeti göz önüne alınarak birçok farklı ürün elde edilmiştir.

2.2.1. Geleneksel yaprak yaylar

Özellikle ağır ticari araçların inşaat serisi modellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geometrik olarak sabit kesit alanına sahip olan bu elemanlar, tüm uzunluk boyunca uzanır ve üç noktalı yükleme altında eliptik bükülmeye uğrar. Bu makas türü, çok katmanlı yapraklardan oluştuğu için gerilmeyi eşit şekilde dağıtamaz; en yüksek gerilim makasın orta ekseninde, en düşük gerilim ise uçlardaki göz bölgesinde meydana gelir. Şekil 2.2’de yaprak yay görselinde bağlantı noktaları ve metallerin geometrisi bulunmaktadır.

Çok katlı kullanımları ve kat yüzeylerinin birbirine temas etmesi, makasın kuvvet-deplasman ilişkisinin katlar arasındaki sürtünme nedeniyle bozulmasına sebep olur. Bu sürtünme konfora olumsuz etkiler sunmaktadır. Ayrıca, katların doğrudan teması sonucu ortaya çıkan sürtünme, ses problemleri gibi diğer olumsuz sonuçlara da yol açmaktadır. Ses sorununu gidermek için makasların arasına düşük sürtünmeli malzemeler yerleştirilebilir ya da makaslar yağlanabilir. Ayrıca, katların eşit kalınlıkta olmasının neden olduğu gerilim birikimindeki farklılıkları ortadan kaldırmak amacıyla, çok katlı bu makaslarda katlar kademeli olarak farklı boyutlarda konumlandırılarak gerilmelerin daha dengeli dağılımı sağlanmaya çalışılır. Yüksek gerilimin görüldüğü merkez bölgesinde daha fazla malzeme kullanılırken, uç kısımlar daha az katlı olarak tasarlanır. Bu yöntem, ağırlık avantajı sağlayarak daha hafif makasların elde edilmesine olanak tanır. Parabolik eğri oluşturulurken katların birleşim noktalarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir; aksi halde, orta eksenden

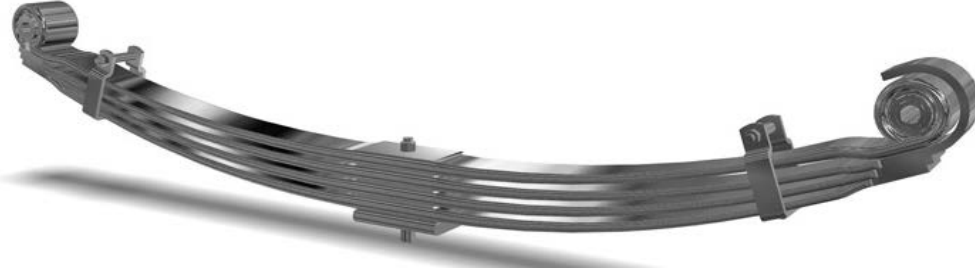
bu noktalara doğru kayarak istenmeyen yüksek gerilim bölgeleri ortaya çıkabilir (Gaylord B. 2024).



Şekil 2.2. Yaprak Yay (Leaf Spring).

2.2.2. Parabolik makaslar

Parabolik yaprak yaylar konvansiyonel yaprak yayların mevcut dezavantajlarını azaltmak amacıyla ortaya çıkan ve mekanik süspansiyonlu araçlarda geleneksel tipe alternatif olarak kullanılabilen yaylardır. Geleneksel yaylarla karşılaştırıldığında geometrik olarak farklılıklar mevcuttur. Bu yay türlerinin tek katlı ve çok katlı versiyonları bulunmaktadır. Sabit kesit alanına sahip yayların en önemli dezavantajı olan gerilmenin makasın orta ekseninde toplanmasını önlemek için, düşük gerilim bölgelerinde yaprağın geometrisini incelterek gerilmenin yay boyunca eşit dağılmasını sağlamayı amaçlar. Böylece, gereksiz malzeme yığılmalarının önüne geçilerek makasın daha hafif olması hedeflenir. Kesit değişiminin bir diğer faydası, parçanın deplasman kabiliyetini geliştirerek araç konforuna olumlu katkı sağlamasıdır. Böylece daha hafif bir ürünle aynı taşıma kapasitesine sahip ve daha iyi bir konfor sunar. Katlı bir geometri olmadığı için ses açısından da avantajlıdır. Tasarım aşamasında makas gözü (araca bağlantı noktaları) hesabı oldukça önemlidir. Dikey ekseninde uygulanan yüklemelerde, maksimum gerilme genellikle makasın orta ekseninde almasına rağmen frenleme anında bu durum değişmektedir. Bu durumda en yüksek gerilme makas gözünde meydana gelir. Bu nedenle, parabolik makasların kesit değişim hesapları yapılırken, kesitin göze doğru azaldığı bölgelerde ilave analiz yöntemleri kullanılarak, ihtiyaç duyulan kalınlığa göre kesit yeniden artırılmalıdır. Şekil 2.3'te bir parabolik makas gösterilmiştir. Bağlantı noktaları geleneksel yaprak yay ile aynı iken metallerin geometrisi farklıdır.



Şekil 2.3. Parabolik makas.

2.2.3. Z Makaslar

Z makas, klasik yaprak yaylardan farklı olarak kompakt, hafif ve yüksek taşıma kapasitesine sahip bir yay sistemidir. Genellikle parabolik kesitli, yani merkezden uçlara doğru incelen tek yapraklı veya az katlı yaylardır. Az katlı olması ve geometrisi sayesinde ağırlık açısından avantaj sağlamaktadır. Geleneksel yaylar gibi yüksek ağırlık taşıma kapasitelerine sahiptir. Ses problemi oluşturmaz ve konfor açısından tercih edilebilir. Yağlama ihtiyacı yoktur, servis süresi uzundur. Maliyeti ve montajı açısından avantajlıdır ve uzun ömürlüdür. Darbelere karşı dayanımı ise geleneksel yaylar kadar yüksek olmadığı için tercih edilecek olan uygulamalar sınırlı kalmaktadır. Şekil 2.4’te z makasının geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Z Makas Geometrisi.

2.2.4. Çift takviye yay süspansiyonu

Ağır ticari araçlarda yaygın olarak kullanılan ve özellikle iki dingilli (tandem akslı) sistemlerde tercih edilen bir süspansiyon çözümüdür. Bu yaylar, ağır yükleri taşımak, yük dağılımını dengelemek ve zorlu yol koşullarında dayanıklılık sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Tandem leaf spring sistemi, arka tarafta birbirine yakın konumlandırılmış iki aks (genellikle tahrikli) üzerine oturtulmuş bir yay düzenidir.

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, yaylar genellikle ön ve arka aksı birbirine bağlayan şekilde konumlandırılır, böylece yük daha geniş bir alana yayılır ve araç dengeli şekilde taşır. Çift takviye yay süspansiyonu, ağır yük taşıma kapasitesi, yükün iki aksa dengeli şekilde dağılması ve zorlu yol koşullarında sağladığı dayanıklılık gibi önemli avantajlara sahiptir. Bu yapı, araçta dengeyi artırırken yol tutuşunu da geliştirir ve özellikle bozuk zeminlerde aksların zemini daha iyi takip etmesini sağlar. Ancak, bu sistemin bazı dezavantajları da vardır. Çok parçalı ve karmaşık yapısı nedeniyle ağırlığı fazladır ve bakım gereksinimi yüksektir. Ayrıca, klasik çok katlı yaprak yaylarda görülen sürtünmeden kaynaklı enerji kaybı ve konfor düşüşü, tandem sistemlerde de hissedilebilir.



Şekil 2.5. Takviyeli Yaprak Yay Süspansiyonu (Tandem Leaf Springs).

Tablo 2.1'de görüldüğü gibi birçok süspansiyon parametresi vardır. Çelik makaslardaki bu çeşitlilik hedeflenen amaçlara yönelik tercih edilmektedir. Çelik yaylı süspansiyon sistemleri, piyasada yoğun olarak maden inşaat ve benzeri ağır yük taşımacılığının olduğu iş kolunda tercih edilmektedir. 4x2, 6x2, 6x4, 8x2 ve 8x4 Dingil sistemine sahip araçlar piyasada yaygındır. Özellikle ağır yük taşımacılığında 6x4, 8x2 ve 8x4 araçlar tercih edilmektedir. Her bir arka dingil için karayollarının sınırı 11500 kg 'dır. Bu yüzden dingil sayısının fazla olması önemlidir. Yol şartı olarak kaba yolları ve ağır yükleri düşününce dingil sayısının artması avantajlı olacaktır.

Çelik yayların diğer önemli parametrelerini de ele alarak karar vermek gerekir. Maliyeti ve parça ağırlığı diğer rekabetçi konulardır. Parçanın hem ağır olması hem de maliyetli olması istenmeyen bir durumdur. Aynı yük taşıma kapasitesine sahip olup daha hafif ve daha ucuz bir ürün her zaman aranan üründür. Ayrıca bakım ihtiyacı ve ses oluşturması gibi diğer parametreler kullanıcı tarafından en hızlı tepki alan konulardır. Ürünlerin bakım ihtiyacının uzun olması ve sessiz bir şekilde çalışabilmesi oldukça kritiktir.

Tablo 2.1. Çelik makasların karşılaştırılma tablosu.

Özellik / Kriter	Tandem Yaprak Yay	Z Makas	Parabolik Makas	Klasik Makas (Çok Katlı)
Yapı Tipi	Çok katlı yay ve bağlantı elemanları	Tek katlı ya da az katlı, Z formunda	İncelen kesitli, az katlı	Sabit kesitli, çok katlı
Aks Sayısı	Genellikle 2 (tandem aks)	Tek aks	Tek aks	Tek aks
Yük Taşıma Kapasitesi	Çok yüksek (dağıtılmış yük)	Yüksek	Yüksek	Çok yüksek
Ağırlık Avantajı	Yok	Var (hafif yapı)	Var (optimize edilmiş kesit)	Yok
Konfor	Orta – Düşük	Yüksek	Orta – Yüksek	Düşük
Sürtünme	Yüksek (çok katlı yapraklar ve bağlantılar)	Yok	Düşük (az katlı yapraklar)	Yüksek
Bakım Gereksinimi	Yüksek	Düşük	Düşük – Orta	Yüksek
Üretim Maliyeti	Orta – Yüksek	Orta – Yüksek	Orta	Düşük
Üretim Zorluğu	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
Kullanım Alanları	Ağır kamyonlar, inşaat ve madencilik araçları	Modern ağır ticari araçlar, treyler sistemleri	Otobüs, kamyon, hafif ve orta ticari araçlar	Eski tasarımlı araçlar, iş makineleri
Zemin Takibi ve Yol Tutuşu	Yüksek (tandem yapı sayesinde)	Orta – Yüksek	Yüksek (yumuşak yaylanma ile)	Orta

3. HAVA KÖRÜKLÜ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİNDE TASARIM VE MONTAJ HATALARI

Hava körükleri bir kuvvetle bükülebilen, çekilebilen veya sıkışabilen ve kuvvet ortadan kalktıktan sonra eski halini alabilen elastik malzemeden oluşan bir üründür. Aynı anda birden fazla eksen de kuvvete maruz kalabilir. İçerisinde sürekli olarak hava basıncı vardır ve değişen basınca göre tepkisi de değişmektedir. Araçta sürekli değişen yol tepkisine rağmen stabil bir konfor ve yük taşıma imkânı sağlar. Avantajları çok olsa da doğru bir tasarımla sistemde kullanılması gerekir. Eğer yapısına uygun olmayan bir şekilde kullanılırsa ömrü kısalmış ve güvenlik riski oluşturabilir. Sistem içerisinde montaj edilirken ve çalışma sürecinde körüklerde dikkat edilmesi gereken birçok kural vardır.

3.1. Hava Körüklü Süspansiyon Tasarımında Temel Gereksinimler

Hava Körüklü süspansiyon elemanlarının tasarımında, sadece temel sistem gereksinimlerini karşılamak yeterli değildir; aynı zamanda hava körüğünden beklenen performans kriterlerini ve körüğün sisteme entegrasyon koşullarını da göz önünde bulundurmak gerekir.

3.1.1. Süspansiyon sistemi açısından tasarımcı gereksinimleri

Bir süspansiyon sisteminin sağlaması gereken başlıca şartlar şunlardır:

1. Tam hareket aralığında güvenilir mekanik performans: Tekerleklerin tüm dikey deplasman boyunca dengeli ve tekrarlanabilir davranış göstermesi,
2. Mevcut hava beslemesiyle ağırlığa karşı yeterli destek: Sistemin çalışma basıncında yaylı kütleyi her yük koşulunda taşıyabilmesi,
3. İstenen dinamik yay sertliği ve doğal frekans özellikleri: Yük aralığı boyunca titreşim izolasyonu ve yol tutuşu gereksinimlerini optimize edecek yay oranı ve rezonans frekansı değerleri,
4. Tüm hareket aralığında öngörülen dinamik kuvvet yanıtı: Hem yol pürüzlülüklerine hem de hızlanma–frenleme gibi geçici durumlara karşı yeterli kuvvet kontrolü.

3.1.2. Hava körüğü seçimi ve yerleşim şartları

Süspansiyon sistemine entegre edilecek hava körüklerinin karşılaması gereken başlıca şartlar ise aşağıdaki gibidir:

1. Sistem yüksekliğinin tüm noktalarında stabil davranış: Körüğün hem minimum hem de maksimum sıkışma konumlarında öngörülen basınç-deplasman eğrisini sağlaması,
2. Uzun ömür ve dayanıklılık: Malzeme yorgunluğunu ve aşınmayı sınırlayacak çalışma koşullarının korunması.

Hava körüklerinde yedek taşıma kapasitesi ve çok yönlü kullanım olanakları bulunmakla birlikte, tasarım aşamasında tercih edilen tüm çalışma koşullarını bir arada gerçekleştirmek genellikle mümkün olmayabilir. Bu nedenle:

- Tasarımsal önceliklendirme yapılarak en kritik performans kriterleri belirlenmeli,
- Körüğün farklı geometri ve montaj konfigürasyonları değerlendirilerek istenen performans ile kabul edilebilir yan etkiler dengelenmeli,
- Hem mekanik hem de durumsal (sıcaklık, toz, kimyasal etkenler) maruziyetler göz önünde bulundurularak, uzun vadeli sorunsuz işletme sağlanmalıdır.

Bu yaklaşımlar, pnömatik süspansiyon sistemlerinin hem konfor hem de dayanıklılık açısından maksimum faydayı sunmasını mümkün kılar (Goodyear Air Springs, 2024).

3.1.3. Gerilimlerin süspansiyon elemanları üzerindeki etkisi

Hava körüklerinde oluşan yüksek gerilimler, körüğü oluşturan malzemenin yorulma ömrünü önemli ölçüde kısaltır. Özellikle;

- Yüksek tasarım çalışma basıncına sahip körükler,
- Uzun boyuna sıkıştırma sapmaları gösteren körükler,
- Üst ve alt montaj yüzeyleri arasında ciddi hizalama hataları bulunan körük montajları

gibi çalışma koşulları, gerilim seviyelerini tepe noktalara taşır ve mikro yıpranma hızını artırır. Ayrıca, tek seferdeki gerilim büyüklüğünün yanı sıra bu gerilime maruz kalma sayısı da ömür üzerinde kritik rol oynar. Çok sayıda tekrar eden ve hızlı gerilim değişimlerine uğrayan elemanlarda yorgunluk hasarı hızla birikir; örneğin, viraj dönüşlerinde süspansiyon bileşenlerinin yanal yönde aşırı hareketi, gaz hacmi küçük

körüklerde ani basınç sıçramalarına yol açarak malzemenin yorgunluğunu tetikler (Kasım ve ark., 2021).

3.1.4. Hizalamanın optimizasyonu

Körüklerin montajı sırasında, üst ve alt yüzeyler arasındaki eksen doğrultusu sapmaları mutlaka minimize edilmelidir. İdeal konumlandırma hem körük çap ekseninin hem de taşıyıcı şasi bileşenlerinin ortak referans hattına olabildiğince paralel yerleştirilmesini gerektirir. Bu sayede:

- Gerilim tepe noktaları azalır,
- Yanal titreşim ve eğilme bileşenleri dengelenir,
- Eleman ömrü ve sistem güvenilirliği iyileşir.

Hizalama hatalarının çap değerinin belirli bir eşik değerin altında tutulması (örneğin $\pm 1-2$ mm), laboratuvar testleri ve yol simülasyonlarıyla doğrulanmış bir uygulamadır. Bu tolerans aralığı hem montaj kolaylığı hem de uzun vadeli yorgunluk dayanımını dengeleyen bir optimizasyon sunar (Vijayan ve ark. 2019).

3.1.5. Hava körüğü montaj kuralları ve dikkat edilmesi gerekenler

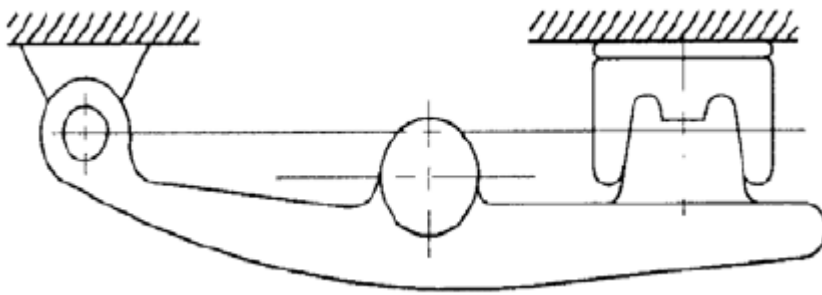
1. Doğru Konumlandırma (Eksenel Hizalama); Hava körüğü, şasi ile aks arasına tam dik gelecek şekilde eksenel olarak hizalanmalıdır. Eğik veya açılı montaj, körüğün bir tarafında fazla gerilme ve erken yıpranmaya neden olur.
2. Bağlantı Yüzeylerinin Temizliği; Montaj yapılacak yüzeyler temiz, pas ve kirden arındırılmış olmalıdır. Körüğün alt ve üst plakaları ile temas edecek yüzeylerde düzgün oturma sağlanmalıdır.
3. Sıkma Torku ve Cıvata Kalitesi; Üretici tarafından belirtilen cıvata tork değerlerine mutlaka uyulmalıdır. Fazla sıkma, körük flanşının zarar görmesine sebep olurken az sıkma ise gevşeme, ses ve sızdırmazlık problemlerine sebep olur. Cıvatalar yüksek dayanımlı olmalıdır.
4. Körüğün Boşken Montajı; Montaj işlemi sırasında körük hava ile doldurulmamış yani boş olmalıdır. Şişirilmiş körükle montaj yapılması, flanşların veya körük çeperinin deforme olmasına yol açabilir.
5. Montaj Açısının Kontrolü; Körük, her iki flanşına da paralel olacak şekilde yerleştirilmelidir. Körük, çalışırken eksenel bir hareket yapmalıdır. Açısız kaymalar, burulmalar olmamalıdır.

6. Esneme ve Hareket Mesafesi; K r   n  alı ma hareketi boyunca sıkışma (minimum boy) ve uzama (maksimum boy) değerlerine uygun yer bırakılmalıdır. Aksi halde k r  k ya tam sıkı amaz ya da aşırı uzayarak patlayabilir.
7. Hava Giriş  ıkı larının Uygunluğu; Hava hortumları k r   e güvenli ve dik açıyla ba lanmalı, hortumlar sürtünmeye maruz kalmamalıdır. Sızdırmazlık için uygun bağlantı elemanları ve conta sistemleri kullanılmalıdır.
8. Çevresel Etkenlerden Koruma; K r   n montaj yerinde ta , çamur, kesici/kimyasal sıvılarla doğrudan temastan korunması gerekir. Gerekirse koruyucu kaplama,  amurluk veya muhafaza eklenmelidir.
9. Montaj Sonrası Test; İlk hava basımı sonrası k r  kte hava kaçağı testi (sabunlu su, basınç testi vb.) yapılmalıdır. K r  k  i irildikten sonra aracın dengesi ve y k dağılımı kontrol edilmelidir.

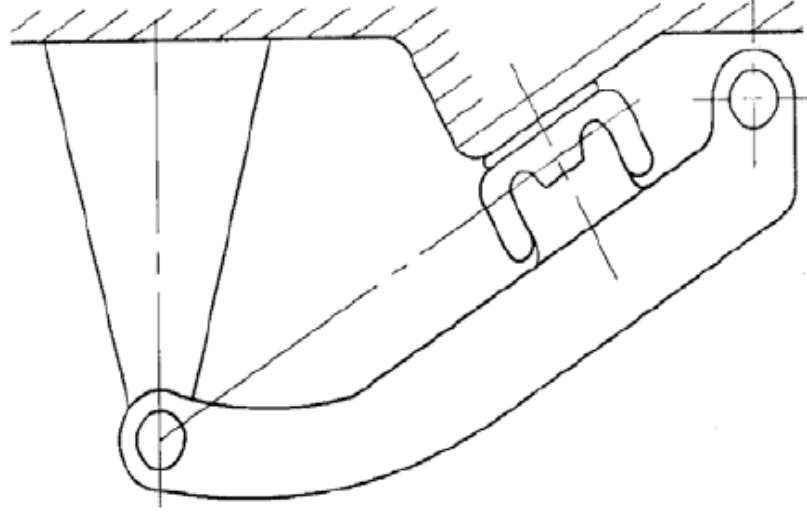
3.2. S spansyon Sistemimlerinde İdeal  ekil Değişimi Durumları

Tüm montaj geometrilerindeki temel konsept, en yüksek bağlantı gerilimlerini en aza indirmektir. Ayrıca, sıkışma ve sürtünme hava k r   n n ömrünü azaltır ve bundan kaçınılmalıdır.

Şekil 3.1'de ve 3.2'de gösterildiği gibi, tamamen sıkı tırılmı  konumdaki piston, üst tutucu ile aynı merkez çizgisine sahiptir. Bu  ekiller, geniş iç bo lu a ve tam tampon temasına izin veren ideal bir durumu göstermektedir.

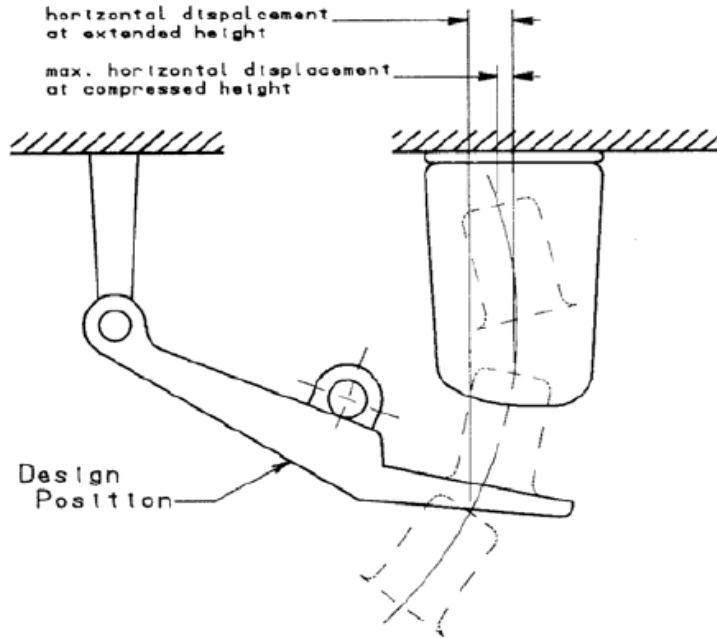


Şekil 3.1. Tam sıkışma anında hava k r   n n durumu (Goodyear Air Springs., 2024).



Şekil 3.2. Tam sıkışma anında hava körüğünün durumu (Goodyear Air Springs., 2024).

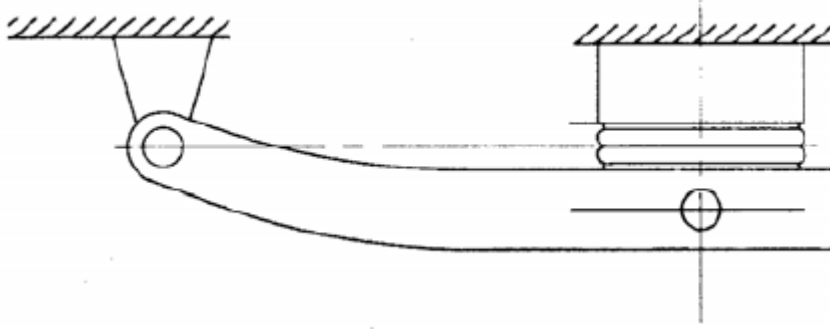
Ancak, Şekil 3.3’de daha gerçekçi bir durumdaki konum aralığını göstermektedir. Hava yayı kavisli bir yolda hareket ettiğinden, piston ve üst tutucu hem tasarım yüksekliğinde hem de sıkıştırılmış yükseklikte aynı merkez çizgisine sahip olmayabilir. Ayrıca, pivot kolundan uzaktaki maksimum yatay yer değiştirme, pivot koluna doğru olan maksimum yer değiştirmeden daha az olmalıdır.



Şekil 3.3. Açılı bir şekilde hareket eden hava körüğünün (Goodyear Air Springs., 2024).

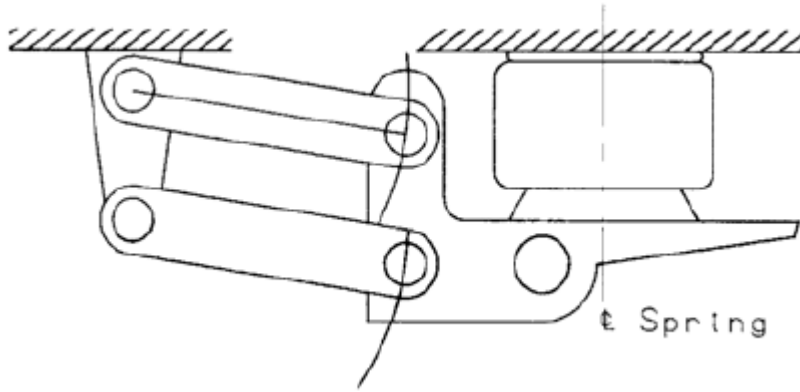
Maksimum sıkıştırma stroğu için, uç tutucular Şekil 3.4’te gösterildiği gibi tam sıkıştırılmış konumda paralel olmalıdır. Yeterli sıkıştırma stroğu elde edilebiliyorsa,

uç tutucular tasarım yüksekliğinde paralel olabilir. Ancak önceki ifade her zaman geçerlidir. Alt tutucunun ve üst tutucunun merkez çizgisi tam sıkıştırılmış konumda çakışmalıdır. Ayrıca pivot noktasından geçen ve hava yayı grubu merkez hattına dik olan bir çizginin hava yayını da ikiye böldüğünden emin olun.



Şekil 3.4. Körüğün tam sıkışma esnasındaki durumu (Goodyear Air Springs., 2024).

Pistonun merkez hattı, piston tam hareketi boyunca hareket ettirildiğinde üst tutucu merkez hattının eşit mesafelerde önüne ve arkasına hareket etmelidir. Normal tasarım konumu Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Sıkışma ve genişleme hareketlerinde hava körüğü sürekli olarak paralel hareket eder.



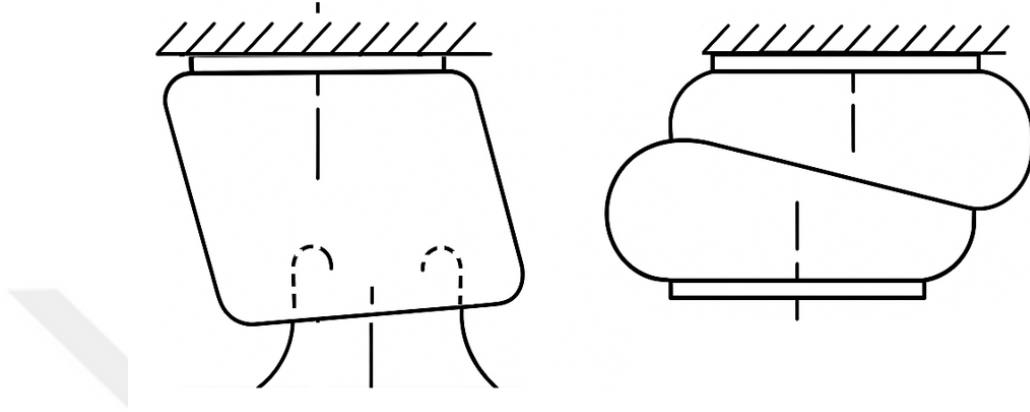
Şekil 3.5. Sistem hareketinin doğru yapıldığı bir tasarım (Goodyear Air Springs., 2024).

3.3. Süspansyon Sistemimlerinde İstenmeyen Şekil Değişimleri

Pnömatik yaylar çok fazla suistimalle uzun süre çalışabilir, ancak kötü çalışma geometrileri, iyi geometrilerle kullanılan yaylara göre daha erken arızalara neden olacaktır. Strok ömür testlerinde çalışma geometrilerindeki oldukça küçük değişiklikler, iyileştirilmiş geometrilerle 4 ile 10 kat ömür artışı gösterebilir. Saha operasyonları, hizmette daha az uzun strok olması nedeniyle muhtemelen bu kadar

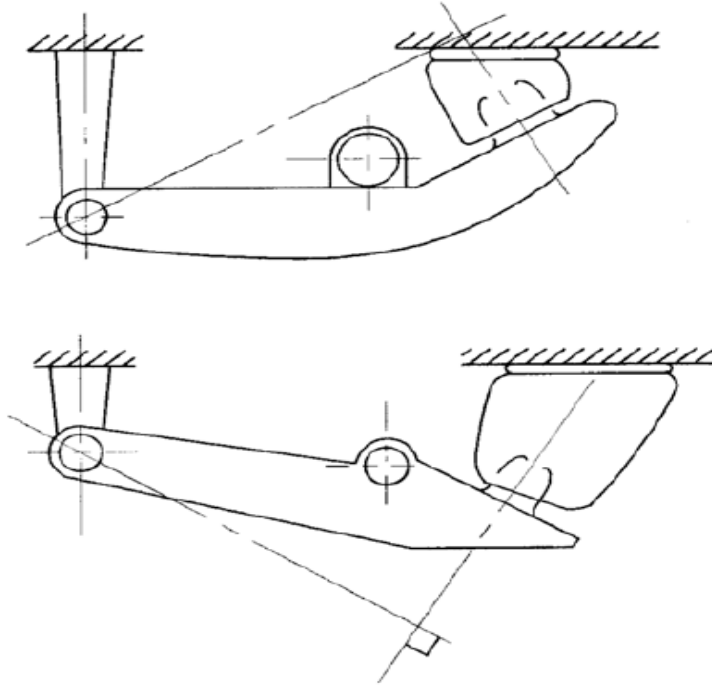
dramatik ömür iyileştirmeleri göstermeyecektir, ancak kesinlikle iyileştirme eğilimi olacaktır.

Şekil 3.6’da gösterildiği gibi merkez hattı kaymasından kaçının. Yuvarlanan lob tipi, körüklere göre yanlış hizalamaya karşı daha az hassastır. Merkez kaçıklığı durumunda körükler hızlıca deformasyona uğrar.



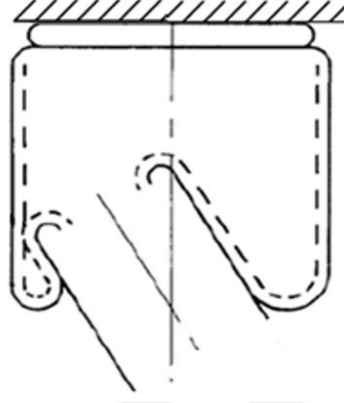
Şekil 3.6. Hava körüğünün merkez hattındaki kaçıklık (Goodyear Air Springs., 2024).

Şekil 3.7’de piston merkez çizgileri pivot koluyla uygun olmayan şekilde ilişkilendirilmiştir. Üst montaj plakasında ve manşonun piston üzerinde yuvarlandığı yerde daha fazla aşınma ve ayrıca iç sürtünme olasılığı olacaktır.



Şekil 3.7. Piston merkez çizgilerinin uyumsuzluğu (Goodyear Air Springs., 2024).

Şekil 3.8’de körüğün sıkıştırıldığı durumda bükülmesine ve katlanmasına neden olabilecek ve tam sıkıştırılmış konumlarda hasar görebilecek düşük basınç koşulları altında bir hava yayı gösterilmektedir. İçten aşınacak ve ömrünün kısılmasına neden olacaktır.



Şekil 3.8. Hava körüklerinde katlanma problemi (Goodyear Air Springs., 2024).

Şekil 3.9’da körüğün sıkıştırıldığı durumda ön yüzeyi ile arka yüzeyi arasındaki farkı görünmektedir ve körük geometrisinde deformasyon belirgin şekildedir. Şekil 3.10’da ve şekil 3.11’de sırasıyla körük yüzeyindeki deformasyon ve körükteki hava kaçağı gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Hava körüklerinde karşılaşılan saha problemleri-1.



Şekil 3.10. Hava körüklerinde karşılaşılan saha problemleri-2.

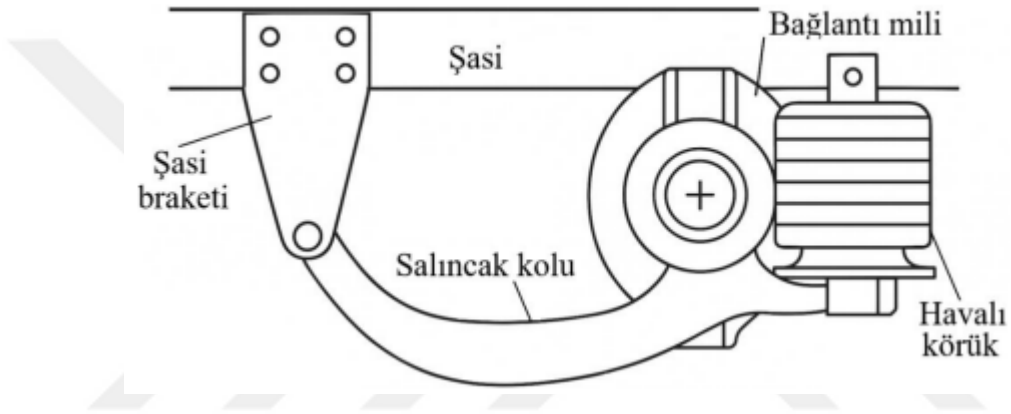


Şekil 3.11. Hava körüklerinde karşılaşılan saha problemleri-3.



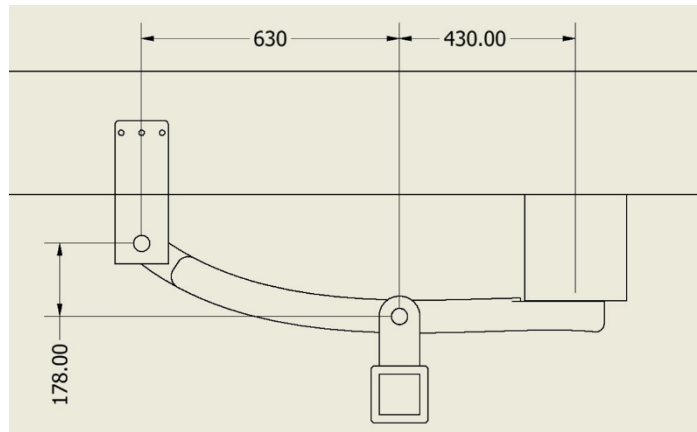
4. YENİ TASARIM ÖNERİSİ

Arka süspansiyon için kullanılan yaygın tasarım Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Salıncak kolu (taşıyıcı) aracın arka kısmında hava körüğü ile şasiye bağlanmıştır. Bu tasarımda hava körüğünün alt bağlantı noktası ile üst bağlantı noktası sabit bir şekildedir. Sistem genişleme ve sıkışma yaşarken hava körüğünde açısal hareketler yaşanır. Bu tasarımda hava körüklerin deformasyonu hızlı olur.



Şekil 4.1. Hava körüklü süspansiyon sistemi tasarımı.

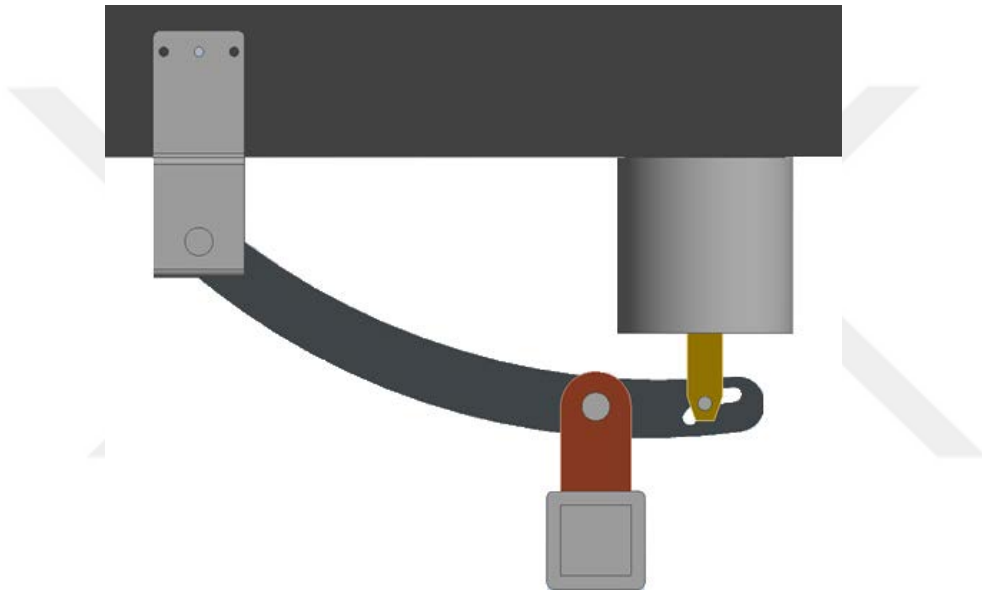
Şekil 4.2’de ise piyasada var olan ürünün geometrik boyutlarını göstermektedir. Çalışmada referans alınan bu tasarım SAF Holland markasının AD-123 modelini temsil etmektedir.



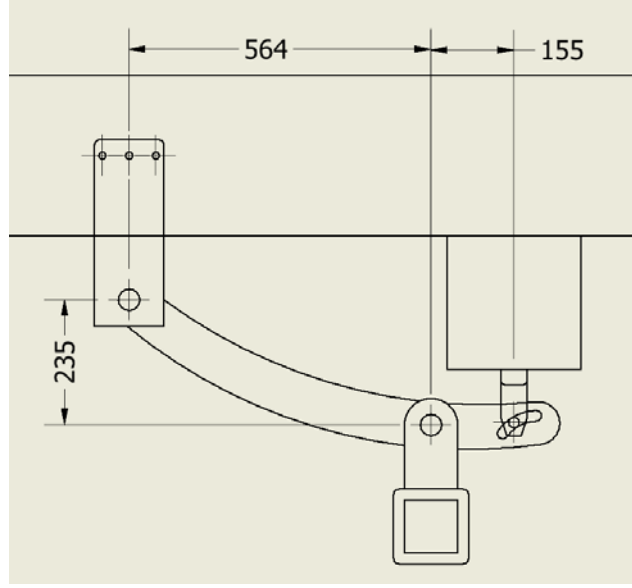
Şekil 4.2. Saf Holland AD-123 Modelinin geometrik özellikleri .

Şekil 4.3’de gösterilen tasarım çalışmasında yaygın olan tasarıma göre en temel farklılığı hava körüğü alt braketinin farklılığıdır. Bu sistemde, hava körüğü alt braketinin bağlantı noktası sabit olmayıp bir kanal içerisinde hareket etmesi amaçlanmıştır. Dikey gelen yüksek ağırlık sayesinde hava körüğü alt braketini sürekli olarak paralel hareket edecek ve yatayda gelen yüklerden dolayı kanal içerisinde hareket edecektir. Kanal deliğinin uzunluğu ve açısı kritik parametrelerdir. İteratif çalışmalar yapılarak en doğru değerlere ulaşılması amaçlanmıştır.

Şekil 4.4’de gösterilen tasarım çalışmasının geometrik ölçüleri hakkında bilgi vermektedir.

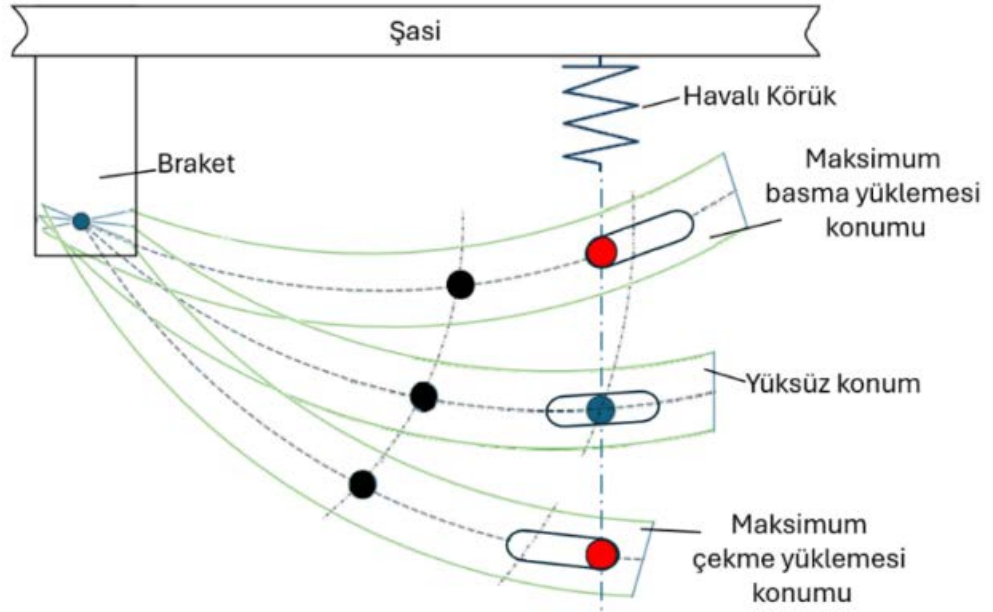


Şekil 4.3. Önerilen tasarımın yan görünüşü.



Şekil 4.4. Önerilen tasarımın geometrik özellikleri.

Şekil 4.5’de gösterilen hareket simülasyonu, sistemin genişlediği ve sıkıştığı maksimum seviyelerdeki durumunu göstermektedir. Hava körüğü bu sayede sürekli olarak dikey hareket ederek körük deformasyonlarına karşı daha uzun ömürlü olur. Ayrıca körüğün üst bağlantı merkezi ile alt bağlantı merkezi de korunur. Körükte katlanma olmayacak ve açısız bir duruş engellenmiş olacaktır. Doğru bir şekilde çalışma şartları sağlanmış olur.



Şekil 4.5. Önerilen süspansiyon sisteminin sıkışma ve genişleme durumları.

4.1. Önerilen Konsept Tasarımın Rijit Cisim Dinamiği (Rigid Body Dynamics) Analizleri ile Boyutlandırılması

Bir süspansiyon sistemi tasarlariken birçok parametre bulunmaktadır. Paketleme alanı, yük kapasitesi, sistemin ağırlığı, sistemin maliyeti ve üretilebilirlik bunlardan bazılarıdır. Bu temel sınır şartları ile çeşitli hedefler sağlanmaya çalışılır. Yol tutuşu, ses ve gürültü etkisi, paket alanı ve konforu belirlerken sınır şartlarını maksimum verimle kullanılması hedeflenir. Sistemi tasarlamak ve üretmekle de süreç tamamlanmış olmuyor. Ürünün bakım ve servis edilebilirliği de oldukça önemlidir. Bir süspansiyon sistemindeki parçalar bakımları yapılarak en az 200.000 km ömre sahip olması beklenir. Parça testleri ve tam araç testleri boyunca sistemin ve parçaların dayanıklılığını ölçeriz. Servis bakım sürelerini belirler ve bakım maliyetlerini en aza indirmek için parça tercihlerimiz ve tasarım tercihlerimiz belirleriz. Bazı parçaların ömrü uzun ve dayanıklı iken bazı parçalar belirli aralıklarla yenisiyle değiştirilmesi gerekmektedir. Bakım süresinin uzun ve ekonomik olması müşterilerin tercihini belirleyen bir unsurdur.

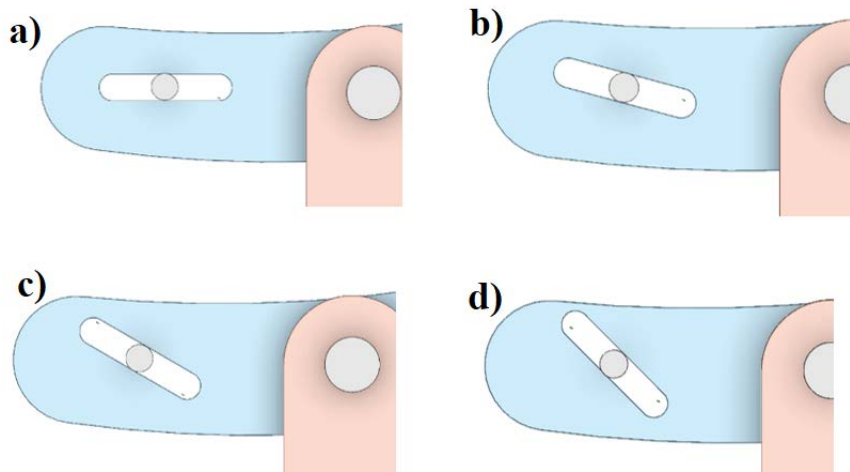
Yapılan çalışmada hava körüklerinin uzun ömürlü olması için yeni bir tasarım sunulmuştur. Hava körüklerinin maruz kaldığı tasarım sorunları önceki bölümlerde ele alınmış ve körüğün doğru çalışabilmesi için gereklilikleri ortaya konulmuştu. Birçok kural olsa da tüm kuralları yerine getirmek bazen tasarım ve maliyet açısından mümkün olmayabilir. Daha önce de açıklandığı üzere hava körüklerinin dikey çalışması gerekmektedir ve yatayda maruz kaldığı kuvvetlerin minimum olması istenir. Körükler dikey yönde çalışır pozisyonda olsa bile bazen frenleme ve ani hızlanmalar ile yatay kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle yatayda gelen kuvvetin sıfırlanması oldukça zordur. Fakat tasarım olarak körüklerin dikey pozisyonda hareket ediyor olması, sıkışma ve genişleme anında hala paralellliğini koruması temel amaçtır. Bu şartlar yerine getirilmediğinde, körüğün ömrü azaltılmış, aracın bakım maliyeti yükseltilmiştir. Ayrıca körük patlaması anında ciddi bir kazaya neden olunabilir. Tüm bu sebeplerden dolayı bu çalışmada tasarımsal olarak bazı çözümler paylaşılmış ve çözüm önerisinde bulunulmuştur.

Hava körüklerinin genişleme ve sıkışma boyunca dikey hareket etmesi bazı tasarımlarda sağlanamayan bir durumdur. Piyasada da bu tarz süspansiyonlardan dolayı sık sık hava körüğü problemi ile karşılaşmaktadır. Bazı sistemler için garanti ve servis maliyetleri yüksektir. Çalışmamızda hava körüğünün alt braketini taşıyıcı

parçanın bağlantısını sabit bir nokta yerine bir hareket aralığı verilerek körüğün alt ucunun her durumda yatay ekseninde aynı konumda kalması alt braketin üzerine açılan bir slot ile sağlanmaktadır. Yatayda gelen kuvvetlerden dolayı açılabilir olarak zorlanmaları en aza indirgeyerek körüğün ömrünün daha uzun olması hedeflenmektedir. Körüğün genişleme ve sıkışma esnasında hareket aralığı bizim için bir parametredir. Ayrıca delik kalınlığı da ikinci parametremizdir. Bu deliğin açılabilir durumu ve lineerliği veya parabolik olması da bir diğer parametredir. Bu çalışmada iteratif olarak sayılan bu parametreler incelenmiştir. Sınır şartları ile yatayda gelen kuvvetlerin ilişkisini ortaya konulmuştur. Sırayla parametrelerimiz ve yatayda gelen kuvvetlerin ilişkisini açıklanmış ve parçalar optimize edilmiştir. Referans olarak belirlenen süspansiyon sistemi 8 ton kapasite ile ele alınmıştır. 2 körüklü bu sistemde körük başına 4 ton yük gelmektedir. Yay katsayı 500 N/mm alındı (Amarir, I. vd., 2023) ve sürtünme katsayısı 0,6 olarak belirlenmiştir (Davis, J. R., 1997).

4.1.1. Slot açısının belirlenmesi

Slot açısı için iteratif çalışılmalar yapılmıştır. Bu açı lineer olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.6 'de görüldüğü gibi 0 dereceden başlayıp 45 dereceye kadar 4 farklı temel değer incelenmiştir. Başlangıç olarak 0°, 15°, 30° ve 45° açıları ele alınmıştır. x-ekseni aracın önünden arkasına doğru olan eksenini ifade ederken yani yatay eksenini, y-ekseni aracın aşağıdan yukarısını yani dikey eksenini ifade etmektedir.



Şekil 4.6. Farklı slot açılarındaki görünüş; a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45°.

0 Derece pozisyonunda X ekseninde gelen kuvvet 56593 N, Y ekseninde gelen kuvvet ise 2597 N 'dur. 15 Derecede ki pozisyonda X eksenindeki kuvvet 1574 N, Y ekseninde ise 1559 N 'dur. 30 Derecede ki pozisyonda X eksenindeki kuvvet 2203 N,

Y ekseninde ise 1512 N ‘dur. 45 Derecede ki pozisyonda X eksenindeki kuvvet 9543 N, Y ekseninde ise 1792 N ‘dur.

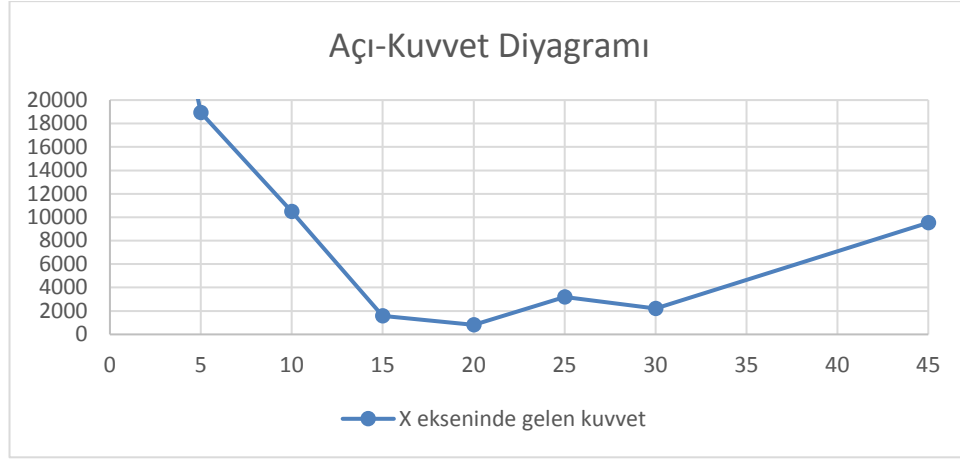
İteratif ilk değeriendirmemizi yapıldığında, daha detaylı olarak bakılması gereken aralığın 15 ile 30 derece aralığı olabileceği belirlenmiştir. Daha yakından iteratif bir çalışma yapılarak çalışma aralığı daraltılmıştır.

Değeriendirmeler neticesinde 5’er derece aralıkla daha yakın bir değeriendirme yapılacaktır. 5° ‘den başlayarak 25° ‘ye kadar daha fazla iterasyon üzerinde çalışılmıştır.

Tablo 4.1’e göre 20° de açılı durumda X ekseninde oluşan kuvvet dağılımının görülen en düşük değeri olduğu ortaya çıkmıştır. Açılı çalışmaları neticesinde 20° açılı belirlenerek diğer parametreler incelenecektir. Şekil 4.7’de elde edilen grafik bu değerielerin ilişkisini daha belirgin olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 4.1. 78 mm uzunluktaki kanalın açılı değerielerine göre Yatay (X) ve dikey (Y) eksenlere gelen kuvvetler.

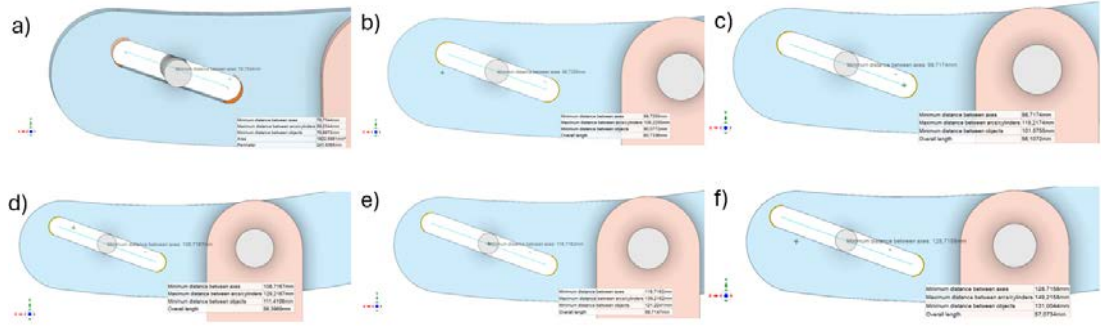
Açılı değeri	X ekseninde gelen kuvvet (N)	Y ekseninde gelen kuvvet (N)
0	56593	2597
5	18942	2273,1
10	10494	1860,9
15	1574,2	1559,8
20	814,18	1322
25	3196,6	1308,4
30	2203,6	1512,4
45	9543,7	1792,9



Şekil 4.7. Açı - kuvvet diyagramı.

4.1.2. Slot uzunluğu

Slot uzunluğu süspansiyon sisteminin hareket aralığını belirleyecektir. Bu yüzden bu parametre için süspansiyon hareket aralıklarına uyumlu olması gerekir. Bu bölümde süspansiyon hareket aralığından bağımsız olarak slot uzunluğu iteratif bir şekilde incelenecektir. Burada belirtilen uzunluk kanalın iki ucu arasındaki daire merkezleri baz alınarak, kanalın simetrik olabilmesi adına her iki taraftan 5 mm artırılarak tasarımlar güncellenip analizler yapılmıştır. Şekil 4.8’da gösterilen tasarımsal değişiklikler gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı kanal uzunluklarına göre görünüş a)78 mm, b)88 mm, c)98 mm, d)108 mm, e)118 mm, f) 128 mm.

Tasarımsal değişikliklerle elde edilen kuvvetler Tablo 4.2’ de gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde kanal uzunluğu arttıkça x ekseninde gelen kuvvet azalmaktadır. Uzunluk artışı yatayda gelen tepki alanını artırdığı için yatay kuvveti de azaltmaktadır. Burada tasarım sınır şartları göz önünde tutularak en uzun delik kanalı tercih edilmesi makul olacaktır.

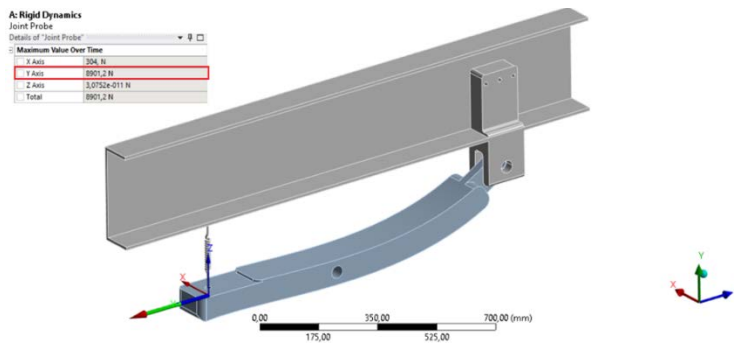
Tablo 4.2. 10' ar mm ile iteratif çalışma.

Slot uzunluğu	X ekseninde gelen kuvvet (N)	Y ekseninde gelen kuvvet (N)
58	3432	1489
68	991,01	1426,3
78	814,18	1322
88	806,21	1242,7
98	795,39	1330,8
108	782,9	1078,1
118	768,88	1016,9
128	765,75	937,04

Tüm iterasyonlar bir araya getirilerek açı, uzunluk ve yatayda gelen kuvvetler incelenmiştir. Açı olarak 20° seviyesinde en az kuvvet oluşurken, uzunluk arttıkça yatay kuvvetin azaldığı görülmüştür. Burada tasarım sınırları içerisinde en uzun kanal tercih edilmesi avantajlı olacaktır fakat belirli bir mesafeden sonra etkisi sınırlı olacaktır. Karar aşamasında tüm parametreleri ele alarak değerlendirmek gerekir.

4.1.3. Mevcut sistem ile önerilen sistem arasındaki değişim

Referans alınan SAF Holland AD123 modeli ile yeni tasarlanan sistemi karşılaştırdığımızda hava körüklerimize gelen yatay yükün minimize edildiğini görmekteyiz. Şekil 4.9'da gösterilen analizde referans ürün modellenmiş olup hava körüğüne gelen yatay yükler incelenmiştir. Yapılan karşılaştırma sonrası iyileştirme elde edilmiştir. Önerilen yeni sistem ile 800 N yükün altına gelinmiştir. Referans modele göre yüzde 90 iyileştirmeye ulaşılmıştır.



Şekil 4.9. Referans sistem modelinde yatay yönde gelen kuvvet değeri.

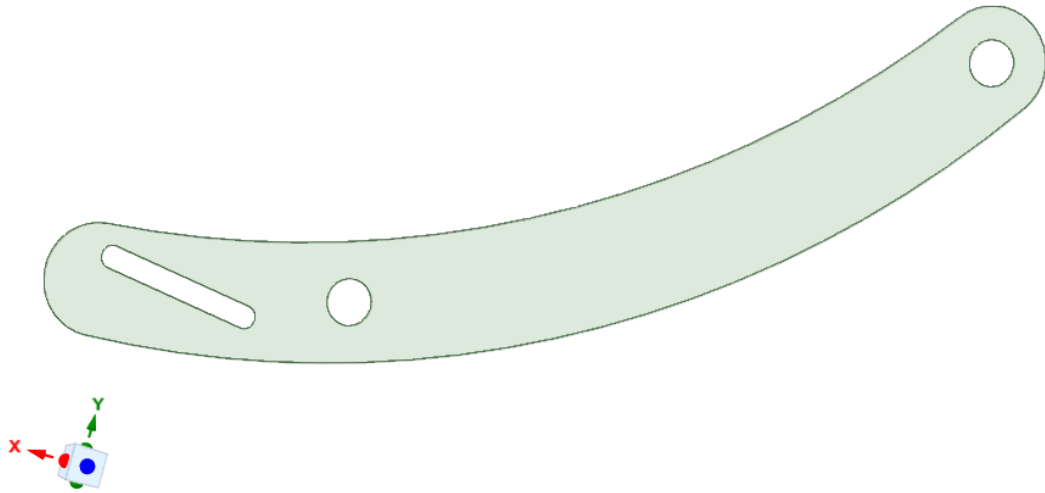
4.2. Katı Cisim Dinamik Analizleri (Rigit Body Dynamics) Sonuçlarının Statik Analizlere Uygulanması

Bu bölümde elde ettiğimiz verilere göre parçalar üzerinde optimizasyon çalışması ele alınmıştır. Hava körüğü bağlantı braketleri ile taşıyıcı parçamızın doğru şekilde analiz edilebilmesi ve verilerin güvenilirliğini sağlamak için iteratif mesh çalışması yapılmıştır. Burada kararlı sonuçlar alınana kadar devam edilmiş olup, güvenilirlik seviyesi elde edilince belirlenen değerler ile devam edilmiştir.

Malzeme özellikleri olarak salıncak kolu ve körük alt bağlantı braketleri için malzemenin mekanik davranışının izotropik olduğu kabulü ile elastisite modülü 200 GPa, Poisson oranı 0.3 olarak tanımlanmıştır.

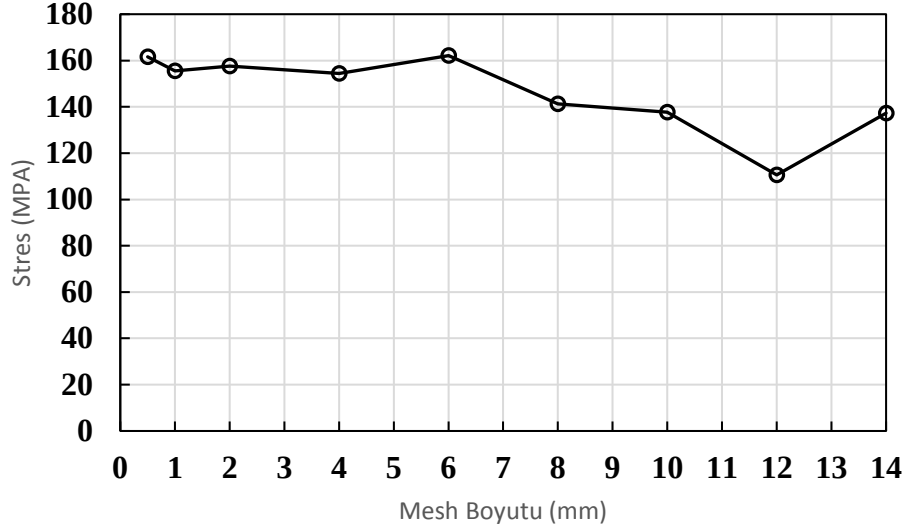
4.2.1. Taşıyıcı

Taşıyıcı, sistemdeki en fazla gerilmelere maruz kalan parçasıdır. Taşıyıcının uç kısmında şasi ile arasındaki bir tutucu braket vardır. Aks sistemi ise parçanın ortasındaki delikten bağlanmıştır. Diğer uç kısmında ise hava körüğüne bağlantısı vardır. Hava körük braketleri ile hava körüğüne bağlanmıştır. Parçanın rijitliği oldukça önemlidir. Piyasada kullanılan bu tarz parçalar dökümden yapılmaktadır. Şekil 4.10'da taşıyıcı parçanın tasarımı gösterilmektedir.

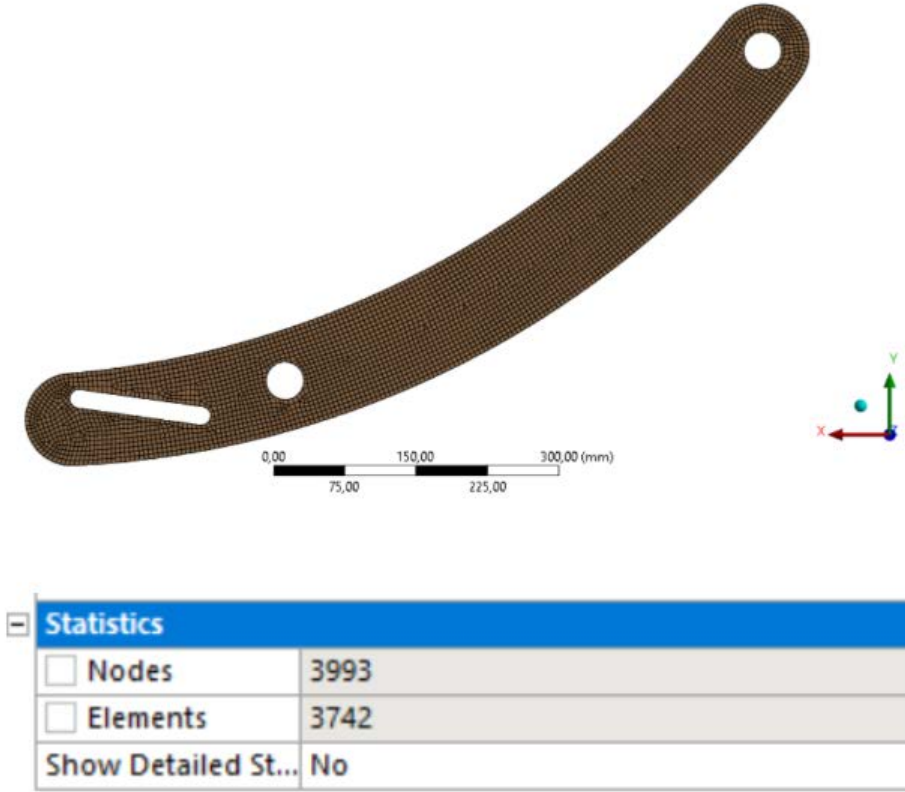


Şekil 4.10. Taşıyıcı (Salıncak kolu) parçanın 3 Boyutlu Modeli.

Taşıyıcı parça için 5 mm mesh aralığından itibaren benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle 5 mm 'lik mesh boyutları ile çalışılmıştır. Şekil 4.11'de mesh boyutlarına karşılık gelen stres değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.12'de ise 5 mm mesh boyutuna göre parçanın mesh yapısı gösterilmiştir.



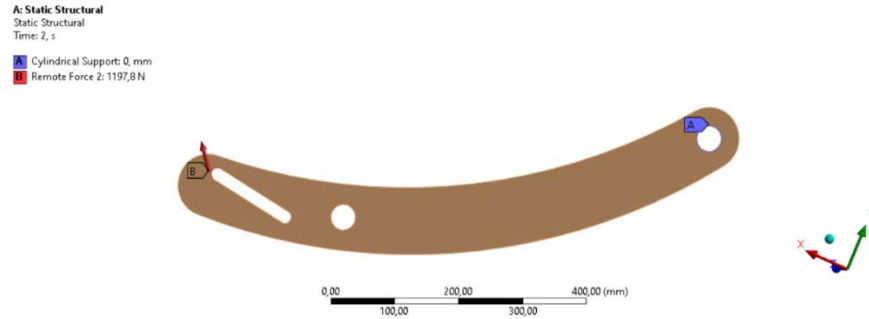
Şekil 4.11. Taşıyıcı parçanın mesh aralıklarına göre ortaya çıkan gerilme grafiği.



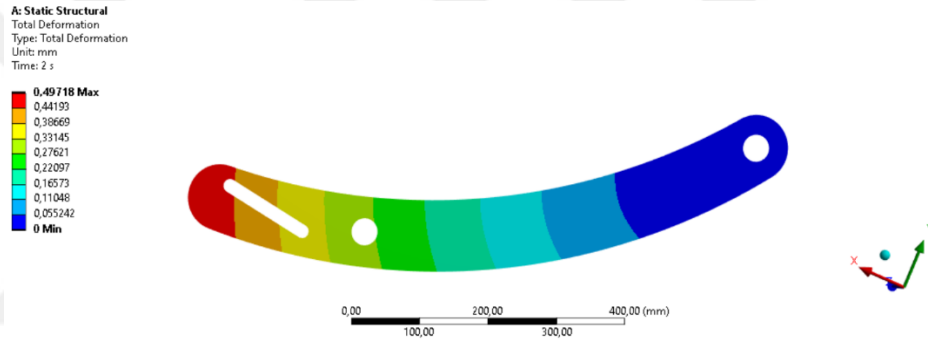
Şekil 4.12. Taşıyıcı parçanın 5 mm'lik mesh görüntüsü.

Sınır şartları, kuvvet değerleri katı cisim dinamiği analizlerinde alınmıştır. Statik analizde bu değerler kullanılmıştır. Şekil 4.13'te taşıyıcı parçanın analiz sınır şartları gösterilmiştir. Şekil 4.14'te taşıyıcı parçanın deformasyon analizi gösterilmiştir. Pim deliğinden körük bağlantısına doğru artan gerilme görülmektedir. Şekil 4.15'de

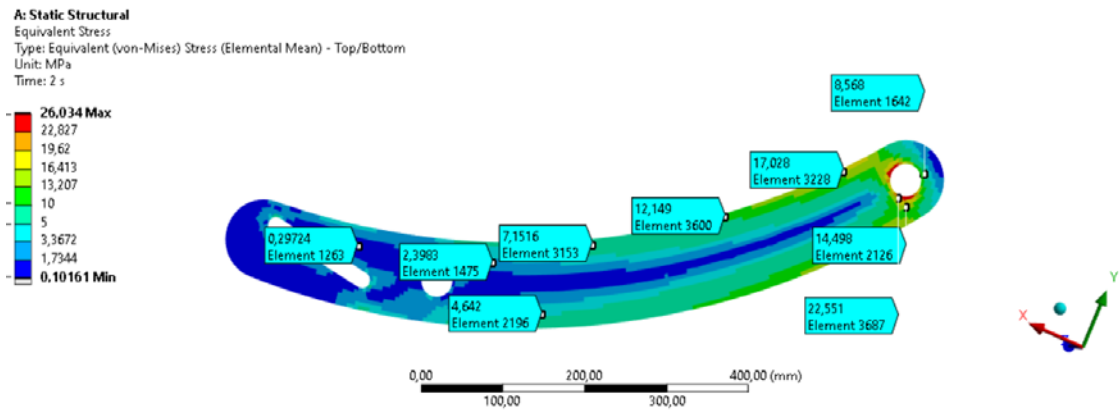
taşıyıcı parça üzerinde oluşam maksimum gerilmeler görülmektedir. Parçanın pim bağlantı noktasında en yüksek gerilmelere ulaşılmıştır. Şekil 4.16'de taşıyıcı parça için çalışılan diğer et kalınlıkları ele alınmıştır. Sırasıyla 10 mm ve 20 mm et kalınlıkları incelenmiş olup sonuç olarak 30 mm ile devam edilmesi ön görülmüştür.



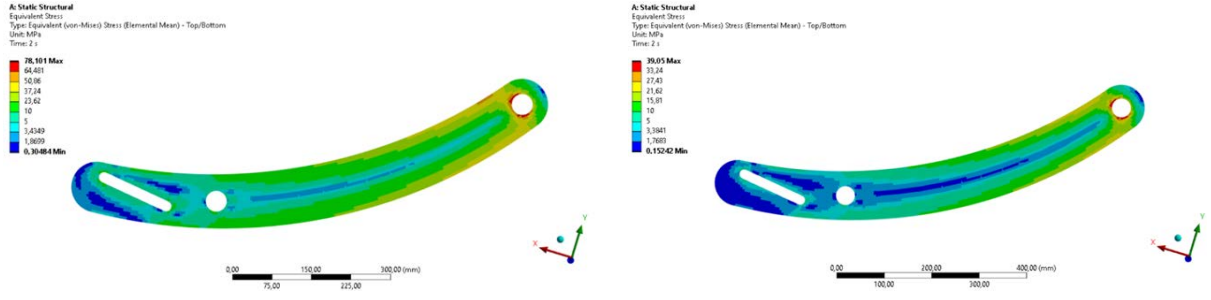
Şekil 4.13. Taşıyıcı parçanın analiz sınır şartları.



Şekil 4.14. Taşıyıcı parçanın deformasyon analizi.



Şekil 4.15. Taşıyıcı parçanın yüksek gerilme noktaları.



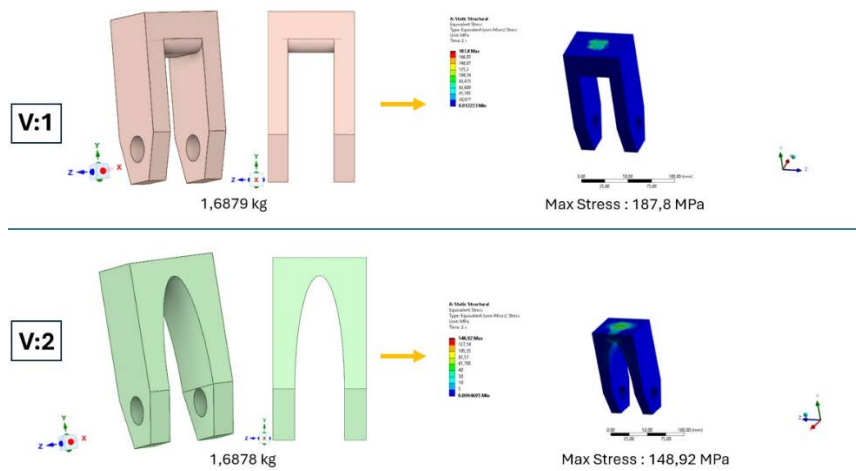
Şekil 4.16. Taşıyıcı parçanın sırasıyla 10 mm ve 20 mm et kalınlığındaki gerilme durumu.

4.2.2. Hava körük bağlantı braketi

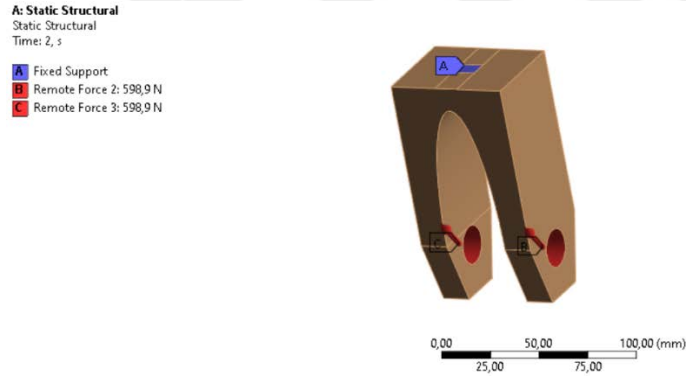
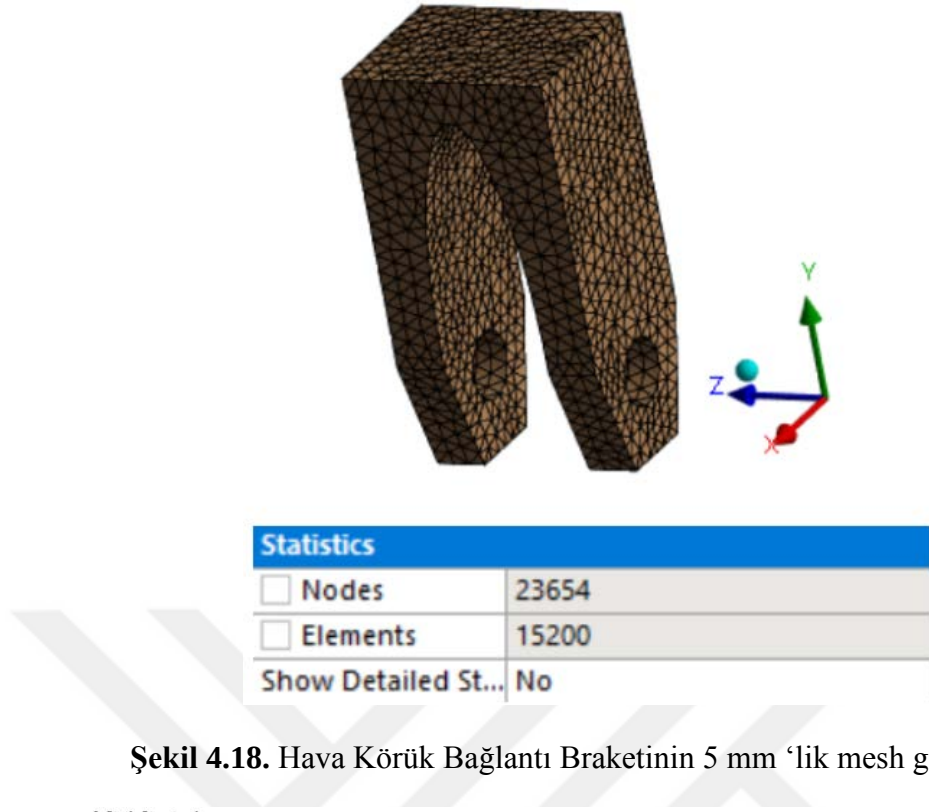
Hava körüklerinin üst tarafında şasi ile bağlantısı vardır. Alt tarafında ise taşıyıcı parça ile olan bağlantısı için hava körük bağlantı braketi vardır. Bu braketin tasarımına bağlı olarak üretim yöntemi olarak değişik ürünler yapılmıştır. Piyasada sac parça ve döküm parçalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekonomik olması en önemli etkidir.

Şekil 4.17’de parçanın 3 boyutlu modeli ve şekil 4.18’de parçanın 5 mm mesh boyutuyla oluşturulan mesh yapısı gösterilmiştir.

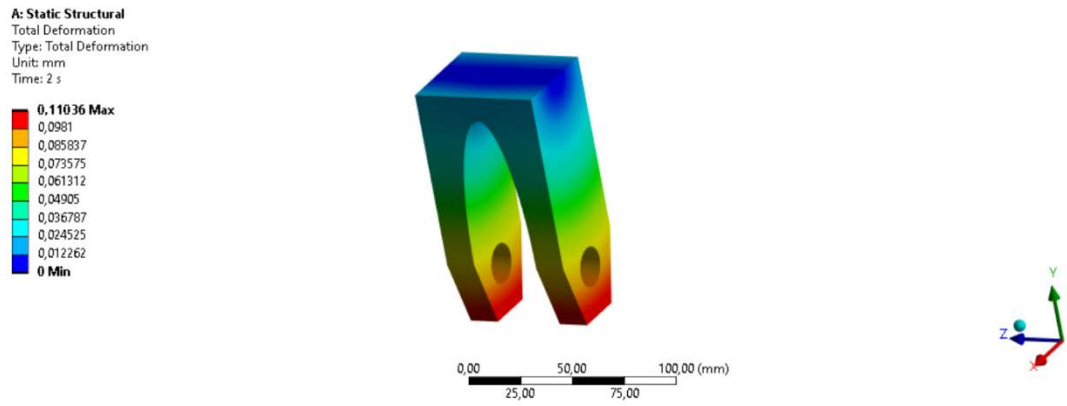
Şekil 4.19’da braketin statik analiz sınır şartları gösterilmiştir. Şekil 4.20’de parçanın deformasyon analizi gösterilmiştir. Körük ile olan bağlantı noktasından taşıyıcı ile bağlantısı olan noktaya doğru artan deformasyon görülmektedir. Şekil 4.21’de ise parça üzerinde maksimum gerilmeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Hava körük bağlantı brakettinin 3 boyutlu modeli.



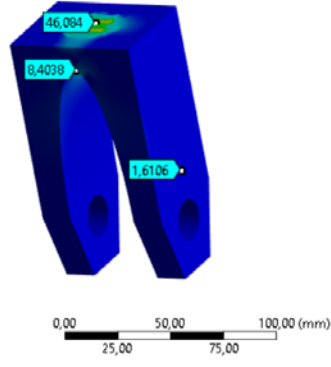
Şekil 4.19. Hava körük bağlantı braketinin statik analiz sınır şartlarının görüntüsü.



Şekil 4.20. Hava körük bağlantı braketinin parçanın deformasyon analizi.

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2 s

148,92 Max
127,14
105,35
83,57
61,785
40
30
10
5
0,0094695 Min



Şekil 4.21. Hava körük bağlantı braketinin parçanın yüksek gerilme noktaları.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Ağır ticari araçlarda hava körükleri çok yüksek yüklere maruz kalmaktadır. Hava körüklü süspansiyon sistemlerinde ani hızlanma veya frenleme sırasında körüklere binen yük, statik yükün yanı sıra dinamik yük transferinden de etkilenir. Bu tür manevralar sırasında körüklere gelen yük, statik değerinin yaklaşık $\pm\%30$ 'u kadar artabilir veya azalabilir. Bu değişim, aracın kütlesi, kütle merkezinin yüksekliği, ivmelenme değeri ve dingil mesafesine bağlı olarak hesaplanabilir, Davis L., Bunker J., (2009). Havalı körüklerin dikey yükleri taşıma kapasiteleri yüksek olsa da yatayda gelen yüksek kuvvetler hava körüklerinin ömrünü hızlıca tüketmektedir. Bu yükleri tamamen engellemek mümkün olmasa da istenmeyen durumları en aza indirgeyerek parçaların ömrü daha uzatılabilir. Çalışılan süspansiyon sisteminde hava körüklerinin çalışma süresince istenmeyen yüklere maruz kalarak ömrünün azalmasının nasıl önlenebileceğine dair bir çözüm sunulmaktadır.

Yatayda gelen ani yüklere karşı sistemde hareket alanı oluşturularak köprüge gelen yatay yükün daha az etki oluşturması amaçlanmıştır. Yapılan iteratif çalışmalarla ile doğru sınır şartlarına odaklanılarak yatayda gelen kuvvetin en az olduğu tasarım oluşturulmuştur. Parçalar statik analizleri yapılarak mevcut geometrilerinin yeterli dayanıma sahip olduğu ortaya konulmuştur. Üretim, ağırlık ve maliyet gibi etkileri ele alarak bir miktar daha optimize edilmesi mümkündür. Ayrıca referans alınan ürün grubu ile karşılaştırması yapıldığı için diğer daha yüksek taşıma kapasitesine sahip ürün grupları içinde çalışmalar yapılabilir.

Sistemin getirdiği iyileştirmelere karşılık bazı gelişmesi gereken konularda vardır. Bir kanal içerisinde hareket olacağı için ses ve titreşim gözlenecektir. Deneysel çalışmaların akabinde bu konuların şiddeti ve etkisi daha anlaşılır olacaktır. Eski sisteme göre daha fazla ses ve titreşim olacağını nettir. Ayrıca açılacak olan kanalın işlemleri daha detaylı bir üretim olacağı için ekstra maliyet oluşturacaktır. Geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gereken diğer hususlar deneysel çalışmalardan sonra daha anlaşılır olacaktır.

Önerilen tasarım çalışmasında hava körük alt bağlantı parçası ile taşıyıcı parçanın delik kanalında deformasyon bir risk teşkil etmektedir. Bu bağlantı şeklinde iyileştirme ihtiyacı olabilir. Bağlantı bölgesindeki tasarımla ilgili detaylı çalışma faydalı olacaktır. Ayrıca delik kanalının içindeki bağlantı piminin ebatları da incelenerek optimize edilmesi gerekir.

Tüm sistem parçaları ele alınarak optimizasyon çalışması daha da genişletilecektir. Parçaların ağırlık ve maruz kaldığı yüklere dayanarak üretim metodunda değişiklikler olabilir. Döküm parçalar ekonomik olsa da daha muhkem bir parça ihtiyaç olursa dövme yapılması değerlendirilebilir. Ayrıca sistem parçalarının birbiriyle daha uyum içinde çalışması için bazı geometrilerde değişiklikte incelenmelidir. Özellikle taşıyıcı parçadaki aks ile körüklerin arasındaki mesafe tasarım açısından kritiktir. Moment oluşturduğu için körük özelliklerini etkilemektedir. Bir diğer önemli konu ise körük tipleridir. Bu çalışmada aynı körükler kullanılacağı referans alınarak ilerlenmiştir fakat aynı özelliklerde farklı körük tipleri ile çalışmalar yapılabilir.

Bilgisayar destekli yapılan bu çalışmaların gerçekleştiğini görmek ve ön görülemeyen bir şey varsa bunu anlamak için deneysel çalışma yapılması oldukça faydalı olacaktır. Sistemin prototip üretimleri yapılarak gerçek sonuçlar elde edilmesi planlanmaktadır. Mevcut ürünle kıyaslama yapılarak hem süspansiyon sistemini histerik olarak değerlendirmek hem de yapılan iyileştirmenin körük ömrüne etkisini anlamak mümkün olacaktır. Bu çalışmanın ardından deneysel bir veri ile yapılan çalışmanın katkıları daha net ortaya çıkacaktır. Deneysel sonuçların ardından tasarım üzerinde revizyon ihtiyacı varsa anlayıp, sistemi optimize etmek mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Topaç M.M., Özmen B., Deryal U. ve Selbes O. (2019), “Özel tip bir yarı römork için bağımsız süspansiyon sistemi tasarımı: kavramsal tasarım çalışmaları”, Politeknik Dergisi, 22(1): 95-102 <https://doi.org/10.2339/politeknik.399078>
<https://doi.org/10.2339/politeknik.399078>
- JCBL India. (2024, 2 Nisan). Car Suspension Parts and Their Functions. <https://www.jcblautomoto.com/blog/car-suspension-parts-and-their-functions/> adresinden 11 Temmuz 2025 tarihinde alınmıştır.
- Car Blog India. (2020, 2 Aralık). MacPherson Strut, Double Wishbone and Solid Axle: Dependent and Independent Suspension Systems. Carblogindia.com. <https://www.carblogindia.com/suspensions-macpherson-double-wishbone-solid-axle/> adresinden 11 Temmuz 2025 tarihinde alınmıştır.
- Saurabh D. Shinde, Shruti Maheshwari, Satish Kumar. (2018) Literature review on analysis of various Components of McPherson suspension, Materials Today: Proceedings, Volume 5, Issue 9, Part 3, Pages 19102-19108, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.263>
- Reimpell H.S. Jörnsen, J.W. Betzler. (2001) The Automotive Chassis: Engineering Principles, SAE International, Warrendale, PA.
- Bucchi, F.; Lenzo, B. (2022) Analytical Derivation and Analysis of Vertical and Lateral Installation Ratios for Swing Axle, McPherson and Double Wishbone Suspension Architectures. Actuators, 11, 229. <https://doi.org/10.3390/act11080229>
- Zafeiropoulos, Nikos. (2017). Active Noise Control in a Luxury Vehicle.
- Raafiq, Mohamed & Madhu, Dr. (2015). A review paper on multi link suspension mechanism with compliant joints. International Journal of Applied Engineering Research. 10.
- Büyükördek C. (2011) Modelling And Analysis Of A Hydropneumatic Suspension System, Istanbul Technical University Institute Of Science And Technology [Yüksek Lisans] İstanbul Teknik Üniversitesi
- Rafael Tavares, Joan Vazquez Molina, Monzer Al Sakka, Miguel Dhaens, Michael Ruderman. (2019) Modeling of an active torsion bar automotive suspension for ride comfort and energy analysis in standard road profiles, IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 15, Pages 181-186, ISSN 2405-8963
- Bennet S. (2007) Mechanics of Heavy-duty Trucks and Truck Combinations (4) Delmar Cengage Learning
- Shin, Donghoon & Woo, Seunghoon & Park, Manbok. (2021). Rollover Index for Rollover Mitigation Function of Intelligent Commercial Vehicle's Electronic Stability Control. Electronics. 10. 2605. [10.3390/electronics10212605](https://doi.org/10.3390/electronics10212605). <https://doi.org/10.3390/electronics10212605>

- Hac, A., (2002) "Rollover Stability Index Including Effects of Suspension Design," SAE Technical Paper 2002-01-0965 <https://doi.org/10.4271/2002-01-0965>.
- Lu Y, Huang Y, Sun C, Zhong J, Khajepour A. (2024) An interconnected suspension with adjustable roll and pitch stiffness (IS-ARPS) to enhance anti-roll and anti-dive/squat characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2024;0(0) <https://doi.org/10.1177/09544070241245473>
- Azman, M. & Rahnejat, Homer & King, Paul & Gordon, Timothy. (2004). Influence of anti-dive and anti-squat geometry in combined vehicle bounce and pitch dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 218. 10.1243/1464419043541464. <https://doi.org/10.1243/1464419043541464>
- Grm, Aleksander & Batista, Milan. (2017). Vehicle aerodynamic stability analysis under high crosswind. *Strojniski Vestnik*. 3. 191-200. 10.5545/sv-jme.2016.4095. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.4095>
- Zheng, H., yangyang, m., Wang, L., and Zhang, J., "Comparison of Active Front Wheel Steering and Differential Braking for Yaw/Roll Stability Enhancement of a Coach," *SAE Int. J. Veh. Dyn., Stab., and NVH* 2(4):267-283, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0820>.
- Bennet S. (2007) *Mechanics of Heavy-duty Trucks and Truck Combinations* (4) Delmar Cengage Learning
- Wallentowitz H. (2014) *Suspension, A Comparison of Rear Suspension Design* <https://doi.org/10.1002/9781118354179.auto006>
- Kuralay, N. S. (2008). *Motorlu Taşıtlar: Temel ve Tasarım Esasları, Yapı Elemanları Cilt 1 tahrik ve Sürüş Sistemeleril*. TMMOB, İzmir.
- Gaylord B. (10.05.2024) <https://mgaguru.com/mgtech/suspensn/rs107.htm>
- Goodyear Air Springs (10.05.2024) <https://www.stemco.com/wp-content/uploads/2020/07/STEMCO-Goodyear-Air-Spring-Application-Considerations-for-Commercial-Vehicles.pdf>
- Kasım, H., Özkan, E., Yazıcı, M. (2021). Hava Körüklerinin Statik ve Dinamik Sönümlleme Özelliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 12-22.
- R. Vijayan, T. Thanka Geetha, B. Nishanth, M. Tamilarasan, V. Vijaya Kumar, (2019) Value engineering and value analysis of rear air spring bracket, *Materials Today: Proceedings*, Volume 16, Part 2, Pages 1075-1082, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.198>
- Amarir, I., Mounir, H., Rajad, O., & Amadane, Y. (2023). Fatigue performance investigation on the automotive welded structure under damped loads using the Taguchi method. *Heat Transfer*, 52(1), 162-192.
- Davis, J. R. (1997). *Concise metals engineering data book*. ASM international.
- Davis L., Bunker J., (2009) *Heavy vehicle suspension testing and analysis - dynamic load sharing* (1.Baskı). State of Queensland

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Osman YILDIRIM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014-2019 yılları arasında Bosch Atmo-8 firmasında Tasarım Uzmanı olarak çalıştım.
- 2021-2023 yılları arasında Tırsan Treyler firmasında Ürün Geliştirme Uzmanı olarak çalıştım.
- 2023 yılından itibaren Ford Otosan firmasında Ürün Geliştirme Uzmanı olarak çalışmaktayım.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

Yıldırım, O., Yaren, M.F., (2025) Ağır Ticari Araçlarda Süspansiyon Hava Körüğüne Gelen Yatay Hareketin Sönümlenmesi, 4 th International Conference on Scientific and Innovative Studies; Konya,Türkiye

DİĞER ESERLER: