

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI

DEĞİŞKEN SÖNÜMLEME KUVVETLERİNE SAHİP HİBRİT
AMORTİSÖR TASARIMI VE MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET ALİ KAÇMAZ

DENİZLİ, 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI



DEĞİŞKEN SÖNÜMLEME KUVVETLERİNE SAHİP HİBRİT
AMORTİSÖR TASARIMI VE MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET ALİ KAÇMAZ

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

Aileme,

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

MUHAMMET ALİ KAÇMAZ

ÖZET

**DEĞİŞKEN SÖNÜMLEME KUVVETLERİNE SAHİP HİBRİT
AMORTİSÖR TASARIMI VE MODELLEMESİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMET ALİ KAÇMAZ
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

Motosikletlerde süspansiyon sistemi genel olarak, sürüş dinamikleri ve konfor bakımından önemli rolü olsa da asıl öncelik sürüş güvenliğinde tutulmalıdır. Motosikletler diğer ulaşım araçlarına kıyasla daha tehlikeli sınıfta yer almaktadır. Bu yüzden tasarım sürecinde sürüş güvenliğini düşürecek her unsurlardan vazgeçilmelidir. Araştırma, alternatif bir ön süspansiyona sahip bir prototip motosiklet (kısaca bisiklet) için daha güvenli bir süspansiyon sistemi sunmaktadır. Motosikletlerin geleneksel ilk tercihi olan teleskopik çatallar mekanik prizmatik mafsallardır, bu nedenle kayar parçalar arasındaki statik sürtünme ortadan kaldırılamaz. Bu durum, özellikle eğilme sırasında süspansiyonun kenetlenmesi nedeniyle yol uyarılarına tepki verememesi riskli bir sonuç olarak görülür. Tasarımda, entegre edilen mekanizma teleskopik çatalın eksikliklerini gideren değişken sönümleme yeteneğine sahip bir süspansiyon modeli oluşturmaktadır. Değişken sönümleme sistemine sahip ilk tasarımı ve altyapısının standart bir modele oranla sönümleme kabiliyetini ne kadar geliştirdiği irdelenmiştir. Bu kapsamda, öncelikle kaster açısı, sönümleme geometrisi ve süspansiyon parametreleri incelenmiş, yapılan incelemeler sonucunda mekanizma tasarımı yapılmıştır. Ön tasarımı yapılan mekanizmanın, 3 boyutlu matematik modeli CATIA programında kurulmuş, bu model ile yapılan analizi sonuçları aynı tasarım için CATIA DMU Kinematics ve Geogebra programlarında kurulan kinematik modellerin konum analizi sonuçları kıyaslanmış ve büyük oranda uyum sağladığı görülmüştür. Literatür araştırmasında incelenen tasarım hatalarının bu modelde görülmemesi için analizler ile karşılaşılan hasar nedenlerini üzerinde durulmuştur. Bu aşamada ANSYS programı kullanılarak süspansiyon sistemi farklı frekanslardaki yüklemeler için optimize edilmiştir. Optimizasyon sonrasında süspansiyon modeli üzerindeki geliştirmelerin sürüş karakterine etkisi yorumlanmıştır. Son olarak mekanizmayı geliştirerek tam aktif sönümleme seviyesine çıkaracak geliştirmeler ve etkileri tartışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Ön süspansiyon, Motosiklet, Değişken sönümleme, Kaster açısı

ABSTRACT

DESIGN AND MODELING OF A HYBRID SHOCK ABSORBER WITH VARIABLE DAMPING

**MSC THESIS
MUHAMMET ALİ KAÇMAZ
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
CONSTRUCTION AND MANUFACTURING SCIENCE
(SUPERVISOR:PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)**

DENİZLİ, JULY 2023

Although the suspension system in motorcycles has an important role in terms of driving dynamics and comfort, the main priority should be kept in driving safety. Motorcycles are in a more dangerous class than other means of transportation. For this reason, every element that will reduce driving safety should be abandoned during the design process. The research provides a safer suspension system for a prototype motorcycle (bike for short) with an alternative front suspension. Telescopic forks, traditionally the first choice of motorcycles, are mechanical prismatic joints, so static friction between sliding parts cannot be eliminated. This situation is seen as a very risky result, especially in cases where the suspension cannot respond to road stimuli due to clamping during cornering. The mechanism integrated in the design creates a suspension model with variable damping, which compensates for the shortcomings of the telescopic fork. It has been examined how much the first design and infrastructure with variable damping system improves the damping ability compared to a standard model. In this context, first of all, caster angle, damping geometry and suspension parameters were examined and as a result of the examinations, the mechanism design was made. A 3-dimensional mathematical model of the previously designed mechanism was established in the CATIA program, and the analysis results made with this model were compared with the position analysis results of the kinematic models established in the CATIA DMU Kinematics and Geogebra programs for the same design. and were found to be largely compatible. The analyzes made to prevent the design errors examined in the literature research and the causes of the damages encountered are emphasized. At this stage, the suspension system is optimized for loads at different frequencies using the ANSYS program. After the optimization, the effects of the improvements made in the suspension model on the driving character were interpreted. Finally, improvements and effects that will improve the mechanism and raise it to full active damping are discussed.

KEYWORDS: Front suspensions, Motorcycle, Variable damping, Caster angle

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Kaster Açısı	2
1.1.1 Düşük Kaster Açısına Sahip Motosikletler.....	3
1.1.2 İdeal Kaster Açısına Sahip Motosikletler	4
1.1.3 Yüksek Kaster Açısına Sahip Motosikletler	5
1.2 Tekerlek Sürüş İzi	6
1.3 Süspansiyon Tipleri	6
1.3.1 Teleskopik Çatallar	7
1.3.2 Hossack / Fior / Foale / Britten	10
1.3.3 Foale / Parker / Elf / Yamaha GTS	11
1.3.4 Saxon / Motad / BMW Telelever.....	12
1.3.4.1 BMW Telelever.....	13
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	14
3. ALTERNATİF SÜSPANSİYON TASARIMI	25
3.1 Giriş ve Amaç.....	25
3.2 Değişken Sönümlmeye Sahip Süspansiyon Tasarımları	27
3.2.1 Vespa Tasarımının İncelenmesi.....	27
3.3 Süspansiyon Modelinin Simulink Analizi.....	30
3.4 Alternatif Malzeme Seçimi	34
3.4.1 Bisiklet Kadrolarında Malzeme Seçimi	35
3.4.2 Aday Malzemeler ve Puanlama	40
4. YÖNTEM	42
5. ANALİZ ÇALIŞMALARI	47
5.1 Sonlu Elemanlar Metodu	47
5.2 Mekanizmanın Statik Yapısal Analizleri	48
5.2.1 Ansys Mekanik Analiz.....	48
5.2.2 Mesh Modeli Oluşturma	49
5.2.3 Sınır Koşulları Belirleme ve Yorulma Ömrü.....	52
5.2.4 Toplam Deformasyon Analizi	53
5.2.5 Eşdeğer Gerilme (Von Mises) Analizi.....	54
5.2.6 Asal Gerilme (Principal) Analizi	55
5.2.7 Emniyet Katsayısı Analizi	56
5.3 Süspansiyon Sisteminin Dinamik Modelleri	58
5.3.1 Süspansiyon Sisteminin Ekstrem Durum İçin Dinamik Modeli..	59
5.4 Süspansiyon Sisteminin Doğal Frekans Analizi	61
5.4.1 Süspansiyon Sisteminin Modal Analizi.....	62

6. ARAŞTIRMA BULGULARI	70
6.1 Statik Yapısal Analizlerin Bulguları	70
6.2 Süspansiyon Sisteminin Dinamik Analizlerin Bulguları.....	73
6.3 Süspansiyon Sisteminin Modal Analizi	75
7. ÖNERİLER ve TARTIŞMA	78
8. SONUÇLAR.....	81
9. KAYNAKLAR.....	83
10. ÖZGEÇMİŞ.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Bir çarpmadan kaynaklanan tekerlek yükü (Cossalter 2006).	7
Şekil 1.2 Teleskopik çatal valfleri tek yönlü (Sachs ve Foale).....	9
Şekil 1.3 Teleskopik çatal valfleri çift yönlü (Foale ve Sachs).....	9
Şekil 1.4 Hossack boru yapısı (Hossack 2007).....	10
Şekil 1.5 Yamaha GTS 1000 A (Yamaha 1996).....	11
Şekil 1.6 Saxon Süspansiyonuna Sahip Triumph (Radika 1984)	12
Şekil 1.7 BMW 1100 RT Telelever (Braunsperger 2004)	13
Şekil 2.1 Bmw Yaprak Yaylı ve İlk Teleskopik Çatal (Hubertz 2013).	14
Şekil 2.2 BMW R69S Earles Süspansiyonu (Falloon 2003).....	15
Şekil 2.3 Vespa ve D'Ascanio (Ceccarelli 2015)	16
Şekil 2.4 Yeni Ve Eski Vespa Ön Süspansiyonu (Shiroma 2014).....	17
Şekil 2.5 BMW R 1100 RS – Telelever (Hubertz 2013).	18
Şekil 2.6 BMW K1200 S Duolever Süspansiyonu (Berkmann 2004).....	19
Şekil 2.7 Piaggio ve Quadro Ön Süspansiyonları (Aeon 2016).....	20
Şekil 2.8 Yamaha Niken ve Ön Süspansiyonu (Yamaha 2020).....	21
Şekil 2.9 Niken Ön Ackermann Geometrisi (Tuttle 2018).	22
Şekil 2.10 Honda Goldwing ve Kymco Cv3 Yeniden Yorumlanmış Süspansiyon Tasarımları (Revzilla ve Kymco 2022).....	23
Şekil 2.11 Earles ve Hossack Çatalı (Mieko ve Brandon 2022).....	24
Şekil 3.1 Farklı Süspansiyonların Çalışma Geometrisi (Jerryamcm 2015).....	25
Şekil 3.2 Vespa Ön Süspansiyonu a; Performans Analizi İçin Şeması b (Ceccarelli 2015).....	27
Şekil 3.3 Süspansiyon Şeması Modeli; Mekanik a, Parametre b (Teoli 2015).28	
Şekil 3.4 Vespa Süspansiyon Modelinin Çalışma Performansı (Teoli 2015)...	28
Şekil 3.5 Çukura giren bir lastiğin analizi (Teoli 2015).....	29
Şekil 3.6 Bozuk bir yol koşulunda süspansiyon analizi (Teoli 2015).....	29
Şekil 3.7 Basit Süspansiyon Modeli	30
Şekil 3.8 İki DOF Yay/Sönümlleme Modeli.....	30
Şekil 3.9 Farklı çatallar için açısız hız - zaman grafiği.....	31
Şekil 3.10 Farklı çatallar için anlık hız- zaman grafiği.....	32
Şekil 3. 11 Farklı çatallar için kuvvet -zaman grafiği.....	33
Şekil 3.12 Bisiklet fiyat -ağırlık grafiği (Ashby 2011)	36
Şekil 3.13 Kırılma Tokluğu/ Dayanım Grafiği (Ashby 2011).....	37
Şekil 3.14 Kopma mukavemeti-yoğunluk grafiği (Ashby 2011).....	38
Şekil 4.1 Geogebra üzerinden tasarlanan bir mekanizma	42
Şekil 4.2 Geogebra mekanizma analizi.....	43
Şekil 4.3 Geogebra süspansiyon analizi.....	44
Şekil 4.4 İlk deneysel mekanizma ve İlkten üzerinden gelişen tasarım	45

Şekil 5.1 Mesh modeli için eleman sayısı -ölçüsü garfıği	50
Şekil 5.2 Farklı ölçülere göre model üzerindeki mesh kalitesi	51
Şekil 5.3 Ana bağlantı kolu ve quadratic mesh yapısı	51
Şekil 5.4 Model üzerindeki sınır koşulları ve yorulma ömrü analizi	52
Şekil 5.5 Toplam deformasyon analizi.....	53
Şekil 5.6 Eşdeğer gerilme analizi.....	54
Şekil 5.7 Maksimum, ortalama ve minimum asal gerilme analizleri.....	55
Şekil 5.8 Emniyet katsayısı analizi	56
Şekil 5.9 Benzer burulma yükü altında BMW R 1200 GS telelever ve sağda alternatif tasarımın sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılması (Braunsperger 2004).....	57
Şekil 5.10 Dinamik Süspansiyon Modeli.....	58
Şekil 5.11 Ekstrem durum model örnekleri	59
Şekil 5.12 İkiz Arka Süspansiyonlar (Foale 2006)	60
Şekil 5.13 İlk moddaki toplam deformasyon analizi	63
Şekil 5.14 İkinci moddaki toplam deformasyon analizi.....	64
Şekil 5.15 Üçüncü moddaki toplam deformasyon analizi	65
Şekil 5.16 Dördüncü moddaki toplam deformasyon analizi.....	66
Şekil 5.17 Beşinci moddaki toplam deformasyon analizi.....	67
Şekil 5.18 Altıncı moddaki toplam deformasyon analizi.....	68
Şekil 6.1 Kaza sonucunda eğilmiş ön süspansiyon (Aksa 2022)	72
Şekil 6.2 Dalgalı yol şartlarında simülasyon modeli	73
Şekil 6.3 Viraj sırasındaki eğilmelerin simülasyonu	74
Şekil 6.4 Mod'a karşılık gelen frekans	76
Şekil 6.5 Örnek bağlantı (Foale 2006)	77

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. Motosikletlerin Sınıflandırılması (Gadola 2019).....	2
Tablo 2. Düşük Kaster Açısına Sahip Motosiklet Özellikleri (Gadola 2019).....	3
Tablo 3. İz Miktarına Göre Direksiyon Açısı (Foale 2006).....	3
Tablo 4. İdeal Kaster Açısına Sahip Motosiklet Özellikleri (Gadola 2019).....	4
Tablo 5. Yüksek Kaster Açısına Sahip Motosiklet Özellikleri (Gadola 2019)...	5
Tablo 6. Gidon Döndürme Açısına Göre Sönümlleme Miktarı (Foale 2006).	5
Tablo 7. Kadroları için Tasarım Gereksinimleri	36
Tablo 8. Seçilen Malzemelerin Özellikleri	39
Tablo 9. Seçilen malzemelerin üretilebilme faktörleri.....	40
Tablo 10. Aday malzemelerin önem katsayısı ile puanlandırma grafiği	41
Tablo 11. Mesh ölçü sınırlamaları	49
Tablo 12. Modal Analiz Frekansları	69

SEMBOL LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Sembol Açıklaması veya Adı</u>
a	: Tekerlek İzi [Mm]
c	: Sönümleme Katsayısı
c_f	: Yayın Sönümleme Katsayısı
c_g	: Lastiğin Sönümleme Katsayısı
CG	: Ağırlık Merkezi
φ	: Ortalama Kare Kontenjan Katsayısı
k	: Sertlik Katsayısı
k_f	: Yayın Sertlik Katsayısı
k_g	: Lastiğin Sertlik Katsayısı
m	: Araç Kütlesi [kg]
N_f	: Yerden gelen dinamik yükler
t	: Zaman Birimi [s]
v	: Araç Hızı [m/s]
ε	: Kaster Açısı [Derece]
ω	: Titreşim İletkenlik Katsayısı
z	: Z Ekseninde Konum
ż	: Z Ekseninde Hız
ż	: Z Ekseninde İvme
<u>Kısaltma</u>	<u>Kısaltma Açıklaması</u>
FEM	: Sonlu Elemanlar Analizi
ABS	: Anti Blokaj Fren Sistemi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimde beni her zaman desteklemesinin yanında bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan, çok sevdiğim ve kendime örnek aldığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özler KARAKAŞ' a çok teşekkür ederim.

Ayrıca yoğun tez çalışmam süresinde bana gösterdiği destek ve yardımları için her zaman benim yanımda olarak hiçbir konuda desteğini benden esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin gelişimiyle insan ömründen, ulaşım için ayrılan zaman önemli derecede azalmıştır. Tüm dünyada yaşanan gelişmeler ile keşfetmeye olan ilgisi artan insanlar, ulaşım imkanlarının sınırlarını zorlamaya başlamıştır. Araçların yaygınlaşmasıyla çeşitlenen türler arasında farklılıklar, kullanım alanlarını belirlemiştir. Ulaşımı zor yerlerde motosikletlerin yaygınlaşma sebebi ise arabalar gibi bir yol ihtiyacı duymamasıdır. Sıkça kullanılan patikalar, belirli bir süre sonra yol gereksinimlerini karşılayacak düzeye gelmektedir. Bu yüzden patika köy yollarında da kullanılmak için geliştirilerek günümüze kadar gelen birçok motosiklet türü mevcuttur. Bu özelliği ikinci dünya savaşın da keşfedilen motosikletler, önemli bir etki yaratmıştır. Günümüzde halen ulaşım için en pratik yollardan biri olan motosikletler evrimleşerek kullanımı en kolay araçlardan biri haline gelmiştir. Ancak kullanım kolaylığı tehlikeli bir ulaşım aracı olduğu gerçeğini değiştirmez. Otomobil sektöründe teknolojinin gelişimiyle aldığı güvenlik özellikleri motosiklet sektörü için kısıtlı kalmıştır. Her ne kadar çekiş kontrol ve kombine frenleme sistemleri eklenmiş olsa da bu sistemler halen her model de tam olarak uygulanabilir bilinmiş değildir.

Özellikle yoğun trafik bulunan şehirlerde ulaşım için vazgeçilmez bir çözüm olan motosikletler paket taşımacılığı sektöründe geliştirmiştir. Konfor alanının artmasıyla bireysel taşımacılık yani kurye sektörü de hızla önem kazanmıştır. Özellikle yaşadığımız pandemi dönemiyle bu ihtiyacın önemi iyice anlaşılmıştır. Bununla birlikte paket servis uygulamalarının artmasıyla motosiklet kullanımı buna bağlı olarak da kaza oranlarını artırmaktadır. Motosiklet türlerinin gelişmesi elektronik sistemlere sahip olması üst seviye motosikletlerde mevcut olsa da kurye tipi scooterlar bu tip teknolojilerden mahrum kalırlar. Motosiklet sürücü kabiliyeti ve odaklanma gerektiren tehlikeli bir araçtır. Bu aracı daha güvenli hale getirebilmenin yolları geçmişte olduğu gibi günümüzde de aranmaktadır. Kaza oranı düşük olan motosiklet modellerinin özellikleri incelendiğinde ise kaster açısı, teker izi, süspansiyon tipi ve süspansiyon geometrisi gibi değerleri iyi tasarlanmış olan motosikletlerin ön plana çıktığı görülmektedir.

1.1 Kaster Açısı

Kaster açısı (ϵ), dikey eksen ile direksiyon dönüş eksenini arasındaki açıdır. İz ise ön tekerleğin temas noktasının kaster açısına iz düşümü arasındaki mesafedir. Kaster açısının değeri, iz değeri ile yakından ilişkilidir. Bu parametreler birlikte, motosikletin sürücü tarafından algılanan yön dengesi ve manevra kabiliyetini tanımlamada önemlidir. Genel olarak, motosikletin manevra kabiliyeti hakkında iyi bir his elde etmek için, tekerlek kaster açısındaki bir artış, izdeki karşılık gelen bir artışla sebep olmaktadır. Kaster açısı motosikletin tipine göre değişmektedir: yarış veya spor motosikletleri için 20° - 25° , tur motosikletleri için 25° - 30° 'ye arasında değiştiği söylenebilir. Yapısal bir bakış açısıyla, küçük bir kaster açısı, frenleme sırasında çatal üzerinde dikkate değer bir baskıya neden olur. Ön çatal hem bükülme hem de burulma açısından oldukça deforme olabildiğinden, küçük açı değerleri daha fazla strese ve dolayısıyla sürül kararsızlığına yol açacaktır, bu da ön süspansiyon üzerinde tehlikeli titreşimlere neden olabilir. Büyük bir kaster açısı ise dar manevra yapmayı kolaylaştırırken küçük tümseklere karşı duyarlılığın azalmasına neden olur. Tablo 1 Kısaca dinamik tepki açısından motosiklet kullanma "karakterini" belirlemede temel bir rol oynayan bu parametreler için tipik bir aralığı göstermektedir.

Tablo 1. Motosikletlerin Sınıflandırılması (Gadola 2019).

Kaster Açısı	Düşük Kaster Açısı	İdeal Kaster Açısı	Yüksek Kaster Açısı
Motosiklet tipi	Racing ve Scouter Tipi Şehir içi ve yarış tipi	Naked, Enduro Yüksek güç-ağırlık oranında olan motosikletler	Touring, Chopper Yol motosikletleri ve klasik tip motosikletler
Sürüş Kabiliyeti	Manevra Kıvraklığı	Stabilite	İyi Yol Tutuşu
Kaster Açısı	20° - 25°	25°	25° - 30°
Sürüş izi oranı (Ön/Arka)	%5-7	%6-8	%7-9
Ön Sürüş İzi (Yer Düzlemi)	75mm-100mm	90mm-100mm	90mm-130mm
Teker Aralığı Mesafesi	1300mm-1400mm	1350mm-1550mm	1500mm-1600mm

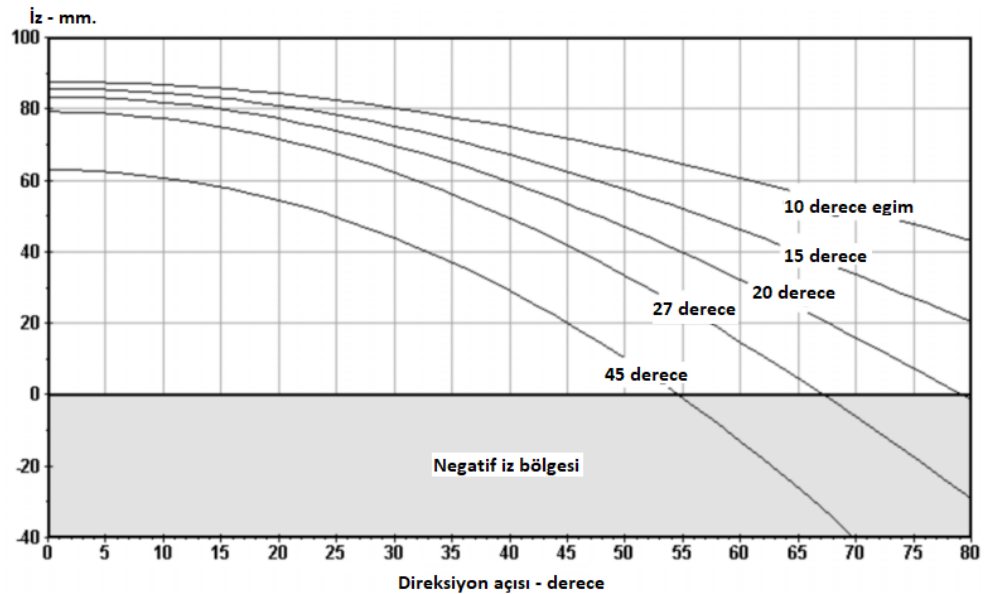
1.1.1 Düşük Kaster Açısına Sahip Motosikletler

Tablo 2. Düşük Kaster Açısına Sahip Motosiklet Özellikleri (Gadola 2019).

Düşük Kaster Açısı	Yarış Tipi	Scouter Tipi
Racing ve Scouter Tipi Şehir içi ve yarış tipi	Avantajları ve Dezavantajları	Avantajları ve Dezavantajları
Manevra Kıvraklığı	Viraj kabiliyeti	Dar manevra
20°-25°	Düşük sürtünme	Fonksiyonel
%5-7	Arkadan yol tutuş	Ağırlık Merkezi Geride
75mm-100mm	Düşük stabilite	Kolay Kullanım
1300mm-1500mm	Kolay yön değiştirme	Daha Kısa Tasarım

Düşük kaster açısı sürüş yetenekleri açısından değerlendirildiğinde teker iz oranı daha az olduğundan dolayı kolay manevra alabilen pist ve şehir içi motosikletlerinde daha çok tercih edilir. Ancak Yuvarlanma (Kastor) Etkisi daha az olduğundan direksiyon kararsızlığı sonucunda direksiyonda titremeler oluşturabilir, hatalı tasarıma sahip veya hasar aldığımda gidon tokatlama (tank slapper) gibi tehlikeli durumlar meydana getirebilmektedir. Farklı kaster açısına sahip modellerin direksiyon dönüş açısına göre iz değişimi Tablo 3 ile gösterilmiştir. Yüksek kaster açılı motosikletlerin direksiyon dönüş açısı bu yüzden sınırlandırılmalıdır.

Tablo 3. İz Miktarına Göre Direksiyon Açısı (Foale 2006).



1.1.2 İdeal Kaster Açısına Sahip Motosikletler

Tablo 4. İdeal Kaster Açısına Sahip Motosiklet Özellikleri (Gadola 2019).

İdeal Kaster Açısı	Naked	Enduro
Naked, Enduro Yüksek güç-ağırlık oranında olan motosikletler	Avantajları ve Dezavantajları	Avantajları ve Dezavantajları
Stabilite	Kolay adaptasyon	Fonksiyonel
25°	Kararlılık	Karma Kullanım
%6-8	Yol tutuşu ortada	Ağırlık merkezi ortada
85mm-105mm	Konforlu sürüş	Sönümlenme aralığı
1250mm-1450mm	Kolay kullanım	Daha fazla denge

İdeal bir sürüş geometrisi sağlamak için kaster açısının 25° olarak ayarlanmalıdır. Bu açı yüksek hızda direksiyon stabilitesi korunurken düşük hızlarda da iyi bir manevra için en ideal noktadır. Yüksek veya düşük kaster açısı nedeniyle, dinamik yüklemeler altında çatal ayaklarında eğilme yükleri nedeniyle yüzeylerin sürtünmesi artar ve bu, küçük darbelere tepkiyi geciktiren bir etkiye yol açar. Bu yüzden yüksek kaster açılı sistemlerde sönümlenme mesafesi fazla olmasına rağmen tamamını çoğunlukla kullanamaz. Daha dik açılı sistemlerde ise yeteri kadar sönümlenme mesafesi bulunmaz. Bu yüzden arazi motorlarında ideal açıları ofsetlerle yakalanmaya çalışılırken sönümlenme mesafesi de motosiklet yüksekliğiyle daha çok artırılabilir. Ancak yüklü olarak kullanılan tur motorları çantalarına arkadan yükler fazla yüklendiğinde ön tekerin üzerindeki yük azalması gibi sorunlar nedeniyle büyük ağır tip motosikletlerde 25°-30° kaster açısı aralığı güvenli olacaktır. Yeni başlayan kullanıcılar için tasarlanan motosikletler ideal açıya göre tasarlanmaktadır. İdeal açı her olasılıkta yol tutuşu ve kullanım kolaylığı sağladığı için herhangi bir kazanın önüne geçmektedir. Karma kullanım koşulları için tasarlanan modeller Tablo 4’de gösterilen gerekçelerle ideal açıyı tercih ederler. İdeal açıya sahip motosiklet modelleri daha güvenli sürüş deneyimi sergilemektedir. Motosiklet tasarımında beklentilere göre şekillenen tasarım ideal kaster açısına daha yakın aralıkta konumlandırılması çeşitli tasarım hatalarının karşılaşılmamasını önlemektedir. Sürücü güvenliği her zaman ilk planda tutulması gereken motosikletler için ideal kaster açısı tercih edilmelidir.

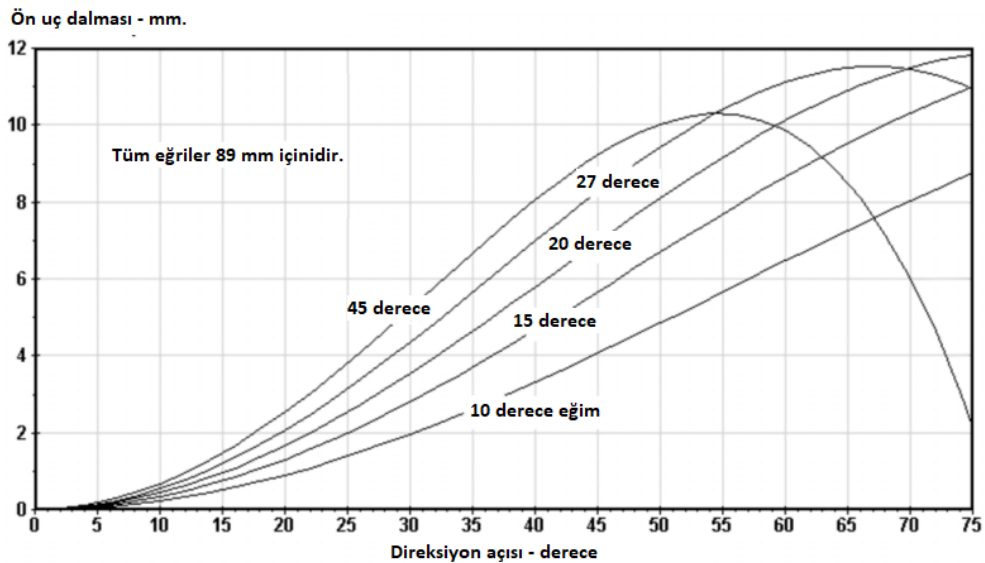
1.1.3 Yüksek Kaster Açısına Sahip Motosikletler

Tablo 5. Yüksek Kaster Açısına Sahip Motosiklet Özellikleri (Gadola 2019).

Yüksek Kaster Açısı	Touring	Chopper
Touring, Chopper Yol motosikletleri ve klasik tip motosikletler	Avantajları ve Dezavantajları	Avantajları ve Dezavantajları
İyi Yol Tutuşu	Güvenli Sürüş	Sert direksiyon
25°-30°	Geniş manevra	Kullanım zorluğu
%7-9	Dengeli yol tutuşu	Maksimum yol tutuşu
90mm-130mm	Geniş çalışma aralığı	Uzun çatallar
1400mm-1600mm	Daha dengeli sürüş	Uzun şase

Yüksek kaster açılı motosikletler uzun yollarda daha stabil olarak kullanılabilmektedir. Özellikle amerikadan yayılan bu tarz motosikletler iz genişliği büyük olduğu için yol tutuşunu artırmaktadır. Bu yüzden yüksek hızlı geniş virajlarda mükemmel bir kullanım kolaylığı sağlar. Kaster etkisiyle direksiyonu bırakarak seyahat etmeye imkan kılar. Çünkü merkez çizgisinin daha önünde yer alan ön sürüş izi yuvarlanmayla etkisiyle birlikte direksiyonu stabil hale getirmektedir. Bu tip açılara sahip motosikletler Tablo 6’da görüldüğü üzere geniş manevra kabiliyetine sahip uzun yol için tasarlanmış büyük modellerde tercih edilir.

Tablo 6. Gidon Döndürme Açısına Göre Sönümlenme Miktarı (Foale 2006).



1.2 Tekerlek Sürüş İzi

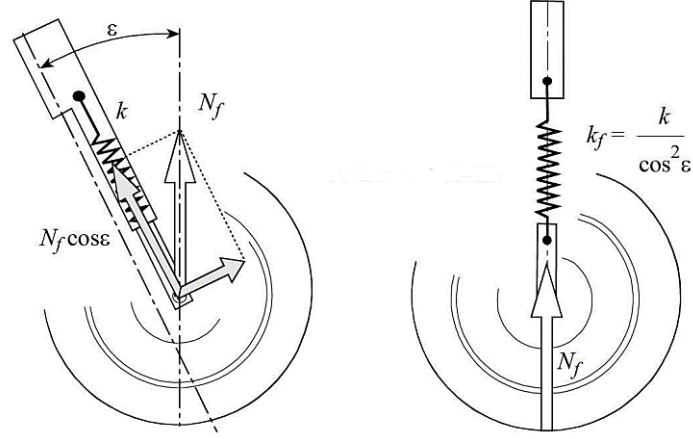
Tekerleğin zemin boyunca yere temas eden doğrusal yüzeyine sürüş izi denir. Sürüş izinin birincil işlevi, belirli bir miktarda direksiyon dengesi oluşturmaktır. Sürüş izinin fazlası direksiyon çevirmeyi ve doğru dönüş eksenini bulmayı zorlaştırır. Yere temas alanın az miktarda olması ise kararsızlık eğilimini artırmaktadır.

Kaster açısıyla veya ofset ile sürüş izi artırılabilir. Ofset kullanımı tekerleğin yere temas alanını düşürürken açının sabit kalmasını sağlamaktadır. Yüksek kaster açılı motosikletlerde manevra yeteneği kazandırırken tekerlek iz değişimi kontrolü zorlaştırmaktadır. İdeal kaster açısıyla kararlı sürüş ve manevra kabiliyeti optimize edilmektedir. Sürüş güvenliği için belirli miktarın üzerinde temas alanı gerekirken doğru direksiyon eksenini tasarımı ancak ideal açıyla mümkündür. Düşük kaster açısı ve iz miktarı ön tekerleğin kayması ile kontrolü anında kaybettiren ana faktördür. Diğer bir yandan ise yüksek kaster ve iz miktarı kısıtlı dönüş açısı ile virajın dışına çıkmakla sonuçlanabilir.

1.3 Süspansiyon Tipleri

Geçtiğimiz yıllarda yeni nesil süspansiyon sistemleri hakkında büyük gelişmeler olsa da otomotiv sektöründeki kadar motosiklet alanında büyük değişimler olmamıştır. Çok çeşitli süspansiyon tasarımlarına olan ilgi, neredeyse motosikletin kendisi kadar eskidir. Bununla birlikte, miktar üretimi için şimdiye kadar sadece az sayıda tasarım kabul edilmiştir. Teleskopik kiriş çatalı, çoğu üretici tarafından bu zamana kadar kullanılan ilk favoriydi (Foale 2006).

Yine de her dönemde alternatif bir süspansiyon sistemi markalar tarafından geliştirilmektedir. Standart teleskopik maşalara göre başarılı sonuçlar ortaya çıkaran süspansiyon üzerinde çalışmalar yapılarak yeni tip motosiklet modelleri ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde yeni nesil motosiklet süspansiyonlarının elektronik kontrollerle şehir ve doğa sürüşlerinde kullanıcının memnuniyetini artıracak sürüş modları oluşturulmaktadır. Bu modeller dahi yarı aktif mekanizmalı süspansiyon sistemlerinin sönümleme seviyesine yaklaşmamaktadır.



Şekil 1.1 Bir çarpmadan kaynaklanan tekerlek yükü (Cossalter 2006).

Yol tümsekleri, beklenen dikey kuvvetin yanı sıra tekerleklere uzunlamasına bir kuvvet verme eğilimindedir. Ön tekerleğin çatal sıkıştırması altında geriye doğru hareketi, bu kuvveti emmeye yardımcı olarak hem konforu hem de kontrolü artırır, ancak kuvvet yönünden dolayı tüm kuvvetler absorbe edilemez. Bunun sebebi kaster açısı ve süspansiyon çalışma aralığına bağlıdır ancak kaster açısının yönünde bileşke kuvvetler tam olarak sönümlenebilir. Değişken sönümlenme sistemine sahip motosikletler değişken kaster açısı yardımıyla daha geniş aralıkta tam sönümlenme yapabilirler.

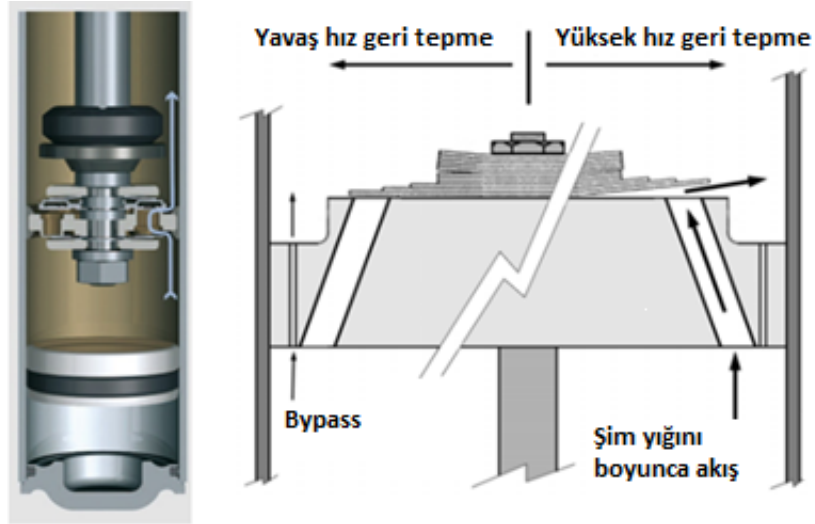
1.3.1 Teleskopik Çatallar

Geleneksel teleskopik çatal, direksiyon kolunun üstünde ve altından kelepçelerle kenetlenmiş genellikle krom kaplı çelik destek boruları üzerine yerleştirilmiş bir çift alüminyum veya çelik sürgü içerir. Bir zamanlar destekleri çevreleyen nispeten büyük çaplı yaylar için bir moda olmasına rağmen, bugünün yayları genellikle daha küçük çaplı, daha uzun ve borular içine yerleştirilmiştir. Bazı modellerde sürgülere bir hidrolik valflerle sönümlenme mekanizması dahil edilmiştir ve sönümlenme yağı aynı zamanda bir yağlayıcı görevi görür. Yeni tiplerinde ise geleneksel çatal düzeni ters konumlandırılarak hareketli kısmın yani yaysız kütle ağırlığını azaltarak çalışma ömrünü artırmak hedeflenmiştir. Ters teleskopik çatallar aynı zamanda frenleme sırasındaki burulma sertliğini artırarak yol tutuşunu artırmaktadır.

Teleskopik süspansiyonlar scooterlar ve küçük motosikletlerle birlikte teleskopik ön çatal neredeyse evrenseldir. Ana bileşenlerin seri üretim tekniklerine uygun kalitede ve düşük maliyelerle üretilmesi gerekçesi sunulsa da asıl nedeni bu değildir. Teleskopik çatallar popülerliği uzun sürelerdir üretilmesinin getirdiği güvenilirlik, üreticilerin ve kullanıcının yeniliklere ne kadar açık olduğu ile ilgilidir. Elbette başka faktörler de var, teleskopik çatal, alternatif tasarımların hiçbirleriyle karşılaştırılmayacak kadar uzun bir gelişme ve evrim sürecinden geçti.

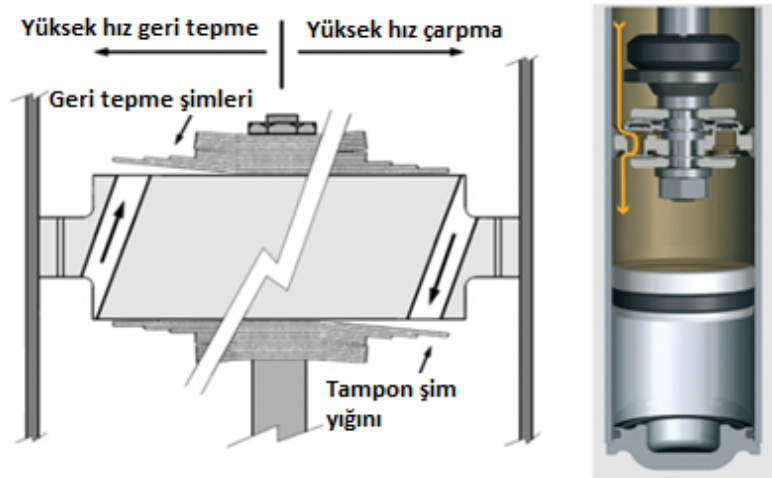
1950'lerin başında, hidrolik olarak sönümlü teleskopik çatallar, esas olarak sönümsüz veya sürtünme sönümlü kirişler üzerinde geliştirilmiş sürüşleri nedeniyle iyi bir popülerlik kazandı. Bununla birlikte, bazı üreticiler o zaman bile bu tasarımın eksikliklerinin farkındaydılar ve bir tür bağlantı çatalı kullandılar, örneğin 1935'ten 1955'e kadar teleskopik çatal kullanımında oldukça öngörülü olan BMW, Earles çatalını tercih etti. 1970 yılında pazarlama nedenleriyle teleskopik çatallara geri dönmelerine rağmen. Ariel ise lider kollar ve çatallarda preslenmiş metal arka bağlantı çatalları kullandı. NSU ve Moto Guzzi, önde gelen bağlantı çatallarını ilk defa kullanarak GP yarışında büyük başarı elde etti (Foale 2006).

Bu çatalların sürümleri son 15 yılda, yüksek kalite üretimle performansında büyük gelişmeler yaşandı. Düşük sürtünmeli contalar, geliştirilmiş üretim toleransları, yüzey pürüzsüzlükleri ve özel kaplamaların tümü, türün geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Bunlarla birlikte süspansiyonun çalışma sırasındaki sürtünme oranı önemli miktarda azaltıldı. Boru çapları arttı, böylece genel rijitliği geliştirildi ve bazı durumlarda ters çatal olarak bilinen tasarım değişikliğine de yardımcı oldu. Bu durumda daha küçük çaplı boru kaydırıcıdır ve tekerlek aksına bağlanır. Dış boru, destekleyici boyunduruklara kenetlenmiştir. Bu tasarım, kaydırıcının daha uzun olması, çatal kelepçeleri arasındaki alanın içine doğru uzanması ve dolayısıyla daha fazla örtüşme ve daha iyi destek sağlaması avantajına sahiptir. Gelişen malzeme özellikleriyle birbirine tam uyum sağlayan parçalar daha uzun süreler aşınmadan sönümleme yapabilmektedir. Ters teleskopik çatallar her ne kadar eğilmeye karşı direnç için tasarlanmış olsa da eğilme durumlarında tepki karmaşası yaşamaktadır. Yoldan gelen ani darbelere karşı anlık sönümleme tepkisi oluşturmakta güçlük çekmektedir.



Şekil 1.2 Teleskopik çatal valfleri tek yönlü (Sachs ve Foale)

Yukarıdaki Şekil 1.2’de değişken frekanslı yüklere karşı farklı sönümleme yapabilen bir teleskopik çatal için hidrolik sönümleme pistonunun kesit görüntüsü gösterilmiştir. Bu sistem yalnızca çarpmaya karşı sönümlemeye odaklanılmış bir tasarımdır. Aşağıdaki Şekil 1.3’de gösterilen piston ise hem çarpmaya hem de geri tepme sönümlemesini kontrol eder. Her iki tasarımda da ince baypas delikleri zamanla hidroliğin kararlı hale geçmesine izin verir. Boydan boya uzanan mil dışarıdan çevrilerek somunun sıkıştırdığı şimleri açacak basıncı kontrol ederek süspansiyon yüksekliğini ve yumuşaklığını ayarlayabilmektedir. Hidrolik sıvının viskozitesine bağlı olarak değişen sönümleme sertliği genellikle lineer bir değişim ile kararlı duruma geri dönmektedir. Hidrolik sıvı yağlayıcı işleviyle çatalar arasında ince film yağ tabakasıyla aşınmanın önüne geçerken zamanla özelliklerini kaybeden hidrolik sıvıya karışan metal parçaları süspansiyonu çalışamaz hale getirebilmektedir.



Şekil 1.3 Teleskopik çatal valfleri çift yönlü (Foale ve Sachs)

1.3.2 Hossack / Fior / Foale / Britten

Bu tip, çift bağlantı ailesi içinde diğer tip süspansiyonların antitezidir. Büyük kavisli kolları olan çok küçük bir dikme yerine, bu düzenek çok hafif ve sert konstrüksiyon yapısı bulunan daha büyük bir dikmeye sahiptir. Bunlar Şekil 1.4'te olduğu gibi lastiğin üzerine monte edilir. Direk genellikle normal tekerleklerin ve frenlerin kullanımına izin veren bir çatal şeklinde yapılmış olsa da hızlı tekerlek değişimini sağlamak için bunun tek taraflı bir bileşen olmaması için prensipte hiçbir neden yoktur. Ancak sertlik-ağırlık oranı muhtemelen teleskopik çatala sahip süspansiyonlardan daha iyidir.



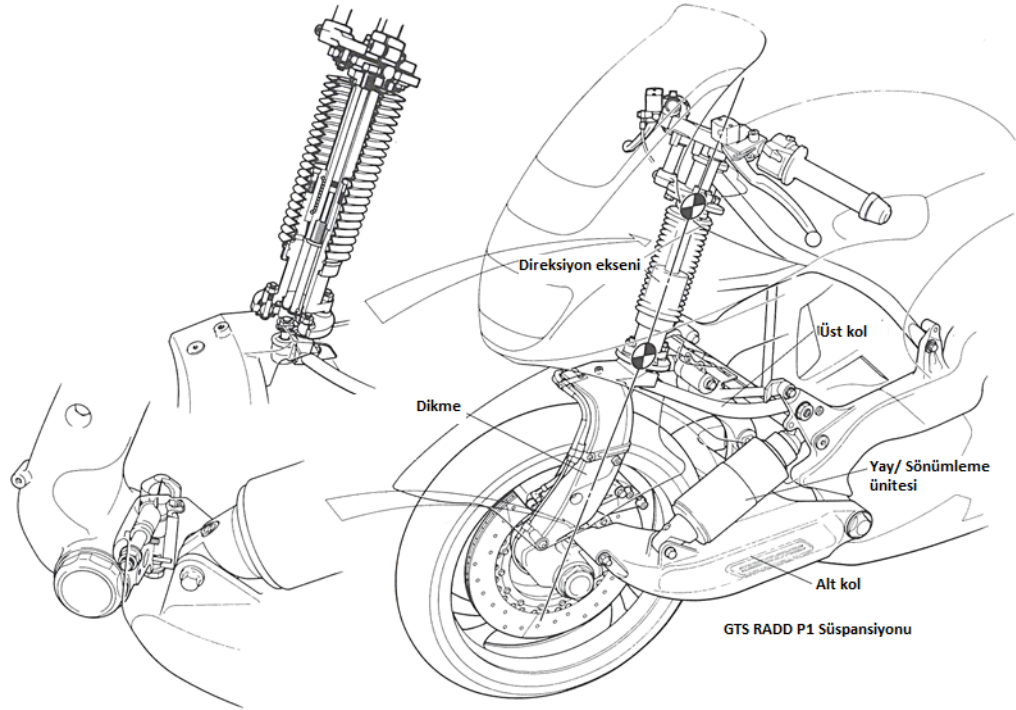
Şekil 1.4 Hossack boru yapısı (Hossack 2007)

Ön çatal, direksiyon bağlantısı, salıncaklar ve süspansiyon desteğinin çalıştırılmasını gösteren Şekil 1.4 orijinal hossack boru yapısıdır. Direksiyon bağlantısı, düz ileri konumda mekanizma direksiyona hissettirmeden süspansiyon hareketine izin verir. Direksiyon geniş bir açıyla döndürüldüğünde küçük bir miktar sönümleme aralığı düşüşü olurdu, ancak bunun böyle bir yarış tipi makinede çok az önemi vardır.

Daha rijit bir ön çatal ve direksiyondan bağımsız ön süspansiyon ile birlikte arazi kullanımı için herhangi bir gerçek potansiyele sahip olan tek sistemdir. Aslında Amerika'da Hoyt McKagen, asıl süspansiyon yüklerinin doğrudan konik makaralı rulmanlara beslenmesine izin veren, askıda bir mesnet kullanan, arazi kullanımı için bir sistem geliştirdi. Bu tasarım, süspansiyon yüklerine maruz kalan küresel bir yatak üzerinden yönlendirmeye kıyasla direksiyon sürtünmesinin azaltılması gibi ek bir avantaja sahiptir (Foale 2006).

1.3.3 Foale / Parker / Elf / Yamaha GTS

Şekildeki tasarım, solunda doğrusal oranlı bir şok ofseti ile alaşım bir kola asılı şekilde ön taraftaydı. Direksiyon dikmesi geriye açılıydı ve üst yapının arkasına sıkıştırılmış paralel üst salınım koluna bağlandı. Kauçuk bir tozlukla kaplanmış teleskopik bir direksiyon kolunu, direği kontrollere bağladı (Branch 2013).



Şekil 1.5 Yamaha GTS 1000 A (Yamaha 1996)

Bu tasarım, daha önceki sistemlerin özelliklerini birleştirir. Alt kol, Elf süspansiyon sistemi gibi kavisli ve göbek yüksekliğindedir, ancak üst kol, Hossack gibi lastiğin üzerinde bir salıncaktır. Üst ve alt kollar arasındaki mesafeyi artırarak (Elf'e kıyasla), pivot yatağına beslenen yükler önemli ölçüde azaltılmaktadır. Süspansiyon ünitesi artık kirişe yakın üst kola takılabilir, böylece alt kavisli koldaki burulma ve dikey eğilme yüklerini ortadan kaldırmaktadır. Bu bileşenler şimdi daha ince ve hafif olarak yapılabilmektedir. Bunun getirdiği dezavantaj ise, kirişin Elf 'den daha uzun olması fazla hareketli ağırlık ve daha az sert olması gerektiğidir. Parker sistemi bu tip sistemden farklıdır, çünkü direksiyon mekanizması bir çekme bağlantısı kullanmaz, bunun yerine sürücünün kontrolünü tekerleğe iletmek için teleskopik bir burulma borusu kullanır (Foale 2006).

1.3.4 Saxon / Motad / BMW Telelever

İlk bakışta şekildeki Saxon süspansiyon sistemi diğerlerine çok az benzerlik gösterir, ancak yine de bisiklet kullanımı açısından bir "MacPherson gergisinin" basit bir uyarlaması olarak düşünülebilir. Şekil 1.6'deki gibi yalnızca bir döner bağlantı ve üstte sabit bir pivot kullanır. Tek bir payanda yerine tekerlek, teleskopik çatala benzer iki kayar bacakta tutulur, ancak süspansiyon işlevi harici olarak ayrı bir yay/amortisör ünitesi tarafından yönetilir. Direksiyon eksenini, üst mil ve çatal sürgülerine bağlı olan alt hareketli eksen boyunca çizilen çizgi ile tanımlanır, ancak salıncaktan tekerleğe olan çıkıntı, payanda süspansiyonunun otomotiv versiyonundan daha uzundur.



Şekil 1.6 Saxon Süspansiyonuna Sahip Triumph (Radika 1984)

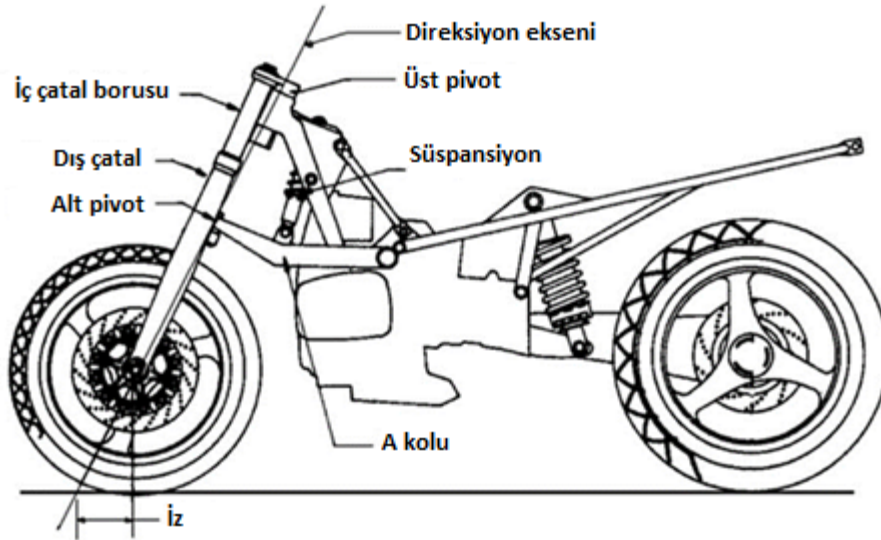
Bu Saxon / Motad tasarımı, BMW telelever'in öncüsüdür. Telelever çift taraflı tekerlek montajına sahip olmasına ve alt kol, tekerleğin üzerinde bir A-Kolu ile değiştirilmiş olmasına rağmen, geometrik olarak MacPherson gergi tipine benzer. Pazarın kabul edilebilirliğini korumak için teleskopik çatalların görünümünü koruma girişimi bu tasarımın amaçlarından biriydi ve bu yönde başarılı oldu. Teleskopik çatal barındırması kullanıcıların daha hızlı güven kazanmasına neden oldu (Foale 2006).

Ana tasarım kriterlerinden biri, pazarın böyle bir tasarıma daha iyi yanıt vereceği inancıyla teleskopik çatallara benzemesi gerektiğiydi. Bu açıdan bakıldığında, normal çatallara göre önemli ölçüde gelişme potansiyeline sahiptir. Teleskopik çatalı üzerindeki serbest bağlantı geliştirmeleri ile eğilmeler engellenerek dezavantaja neden olan sürtünmeler ortadan kaldırılmıştır (Cossalter 2006).

1.3.4.1 BMW Telelever

Yamaha GTS ile birlikte BMW, standart üretim modellerinde teleskopik çatala bir alternatif sunan diğer büyük üreticidir. “Telelever” olarak adlandırılan tasarım, Saxona çok benziyor olmasına rağmen farklı hisler uyandırıyor. Telelever’de tekerleğin hemen üzerindeki sürgülere bir "A" kolu veya salıncak monte edilmiştir ve hareketli bir yatak aracılığıyla sahte bir direksiyon kafasına takılan geleneksel bir üst çatal boyunduruğu gibi bir bağlantı farklılıkları vardır.

BMW ayrıca ABS fren sistemlerinin güçlü savunucuları olmuştur ve bunun teleskopik çatalları terk etme kararı üzerinde etkisi olmuş olabilir. ABS sisteminin döngü frekansı, çatal ve tekerlek grubunun boylamsal rezonans frekansına yakın olabilir ve bu da istenmeyen titreşime neden olabilir. Telelever bu yönde daha serttir ve bu nedenle doğal frekansı biraz daha yüksek olacağından benzer sorunları yaşama olasılığı daha düşük olacaktır. Ek olarak, yığılma ve dalış ile ilgili bölümde gösterildiği gibi, Telelever düzeninin geometrisi, frenleme sırasında burundan dalışı azaltmak için seçilebilir (Das 2019).



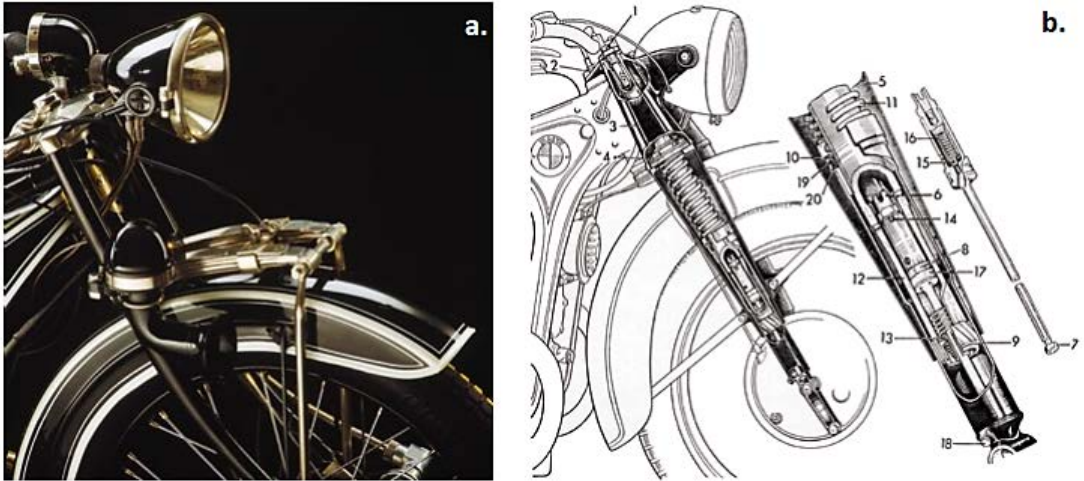
Şekil 1.7 BMW 1100 RT Telelever (Braunsperger 2004)

Görünüşte olmayabilir ama bu tür bir süspansiyon, MacPherson gergisinin bir çeşidi olarak görülebilir. Şekil 1.7’de görüldüğü üzere tekerlek, bir "A" kolu tarafından konumlandırılan bir kayar düzeneğe monte edilmiştir. Telelever ismini de bu kol bağlantısından almaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Motosiklet daha eski haliyle bisiklet süspansiyonları neredeyse araçların kendileri kadar eski bir tarihe dayanır. Ancak ilk versiyonları sürücülerin konforunu artıran rahat bir sele deneyiminden ileri geçememiştir. Araçların hızlanmasıyla ve yarışlar için yapılan geliştirmelerle ivme kazanmıştır.

Ön süspansiyonun ilk örneği İngiliz bir üretici olan Scott markasını 1908 de ürettiği bir modelde yer almaktadır. Bugün ki adıyla Isle Man tt yarışlarının kullanılmak üzerine geliştirilen eğilme prensibiyle çalışan ön süspansiyon modelidir. Bir ada üzerinde yüksek hızla ara sokaklardan geçme esasına dayanan yarışı yıllarca bu tasarımıyla kazanmıştır. Kritik bir öneme sahip olan süspansiyonlar böyle riskli bir yarışta vazgeçilmez bir hale getirmiştir (Wood 1999).



Şekil 2.1 Bmw Yaprak Yaylı ve İlk Teleskopik Çatal (Hubertz 2013).

1935'te BMW R12 ve R17 modelleriyle, hidrolik olarak çalışan teleskopik çatallara sahip bir motosiklet üreten ilk üretici oldu. Danimarkalı Nimbus şirketinin 1934'te üretimde sönümlenmemiş teleskopik çatalları olmasına rağmen tam versiyonunu BMW tarafından piyasaya sürülmüştür. Günümüzde çoğu motosiklet ön süspansiyon için teleskopik çatallar kullanmaktadır. Çatallar en kolay şekilde, fazla yay enerjisinin hidrolik sönümlenmesine sahip kaplanmış uzun helezon yaylar olarak basit bir şekilde anlatılabilir. Teleskopik çatal, sürücüye sürüş konforunda artı sağlamakla kalmadı, aynı zamanda ön tekerlek yoldaki tümsekleri çok daha iyi takip edebildiği yani yer temasını koruyabildiği için sürüş güvenliği oldukça artırdı.

Buna benzer bir durum kuzey Avrupa'da da yaşanmaktaydı. II. Dünya Savaşı'ndan sonra Almanya'nın teslim olma şartları ile askeri üretimi yasaklandı. Bu yasak sonrasında batı Almanya'daki imkanlarla motosiklet üretimine tekrar başlandı. Savaş sonrası ilk BMW motosikleti 1948'de tek silindirli 250cc R24 üretildi. Ön süspansiyon dışında parçaların çoğu, R23'ün savaş öncesi kalan parçalarından geliştirildi. Doğu kısımda kalan imkanlarla da çeşitli üretimler denenmekteydi.

1955 yılında BMW, R50, R60 ve R69 modelleriyle yeni bir motosiklet serisi tanıttı. Teleskopik çatalların yerine kurşun bağlantılı Earles ön çatallarıyla birlikte yeni bir şase tipi görüldü. Ön çataldaki salıncak kolu üzerinde ve arka tarafta ise şase ucuna yerleştirilmiş ayarlanabilir pistonlu amortisörler yerini aldı (Vennekate 2002).



Şekil 2.2 BMW R69S Earles Süspansiyonu (Falloon 2003)

1953 yılında İngiliz Ernest Earles tarafından patenti alınan bu üçgen çatal tasarımı, frenleme sırasında dalış yapılmasını ortadan kaldırmaya yardımcı oldu. BMW'nin ayarlanabilir tasarımı 1955'ten 1969'a kadar sepetli ve tekli motosikletlerin de kullanılmıştır. Earles çatalı, pivot noktasının ön tekerleğin arkasında olduğu ve Earles'in patentinin temeli olan çeşitli önde gelen bağlantı çatalıdır. Bu çatalın sepetli modellerde daha uyumlu çalıştığını fark eden üreticiler pivot konumunu değiştirerek alternatif oluşturmayı başaramadılar. Bu üçgen çatal, mekanik frenleme kuvvetleri çatalın pivot noktasına göre 'aşağıya' doğru döndüğü için sert fren yaparken motosikletin ön ucunun hafifçe yükselmesine neden olur. Ani moment değişimleriyle karşı motosikletin daha az tepki vermesi özellikle sert viraj almanın gerektiği anlarda; yarışırken veya bir sepetle viraj alırken daha iyi yol tutuşu sağlamaktadır. Motosiklet üzerindeki ağırlık dengesinin korunması sürücü konforu ve arazi kabiliyetleri için de avantajları yanında getirmektedir.

II. Dünya Savaşı'ndan sonra, müttefiklerle savaş faaliyetlerini durdurma anlaşması ışığında, İtalya'nın uçak endüstrisi hem yetenek hem de kapasite açısından ciddi şekilde kısıtlandı. İtalya'nın zarar görmüş ekonomisi ve savaştan dolayı yollarının feci durumu, otomobil pazarının yeniden gelişmesine hemen elverişli değildi. Piaggio'nun kurucusu Rinaldo Piaggio'nun oğlu Enrico Piaggio, İtalya'nın kitleler için modern ve uygun fiyatlı bir ulaşım tarzına olan acil ihtiyacını karşılamak için havacılık alanından ayrılmaya karar verdi (Sarti 2006).



Şekil 2.3 Vespa ve D'Ascanio (Ceccarelli 2015)

Piaggio mühendisleri Renzo Spolti ve Vittorio Casini, aktarma organlarını tamamen çevreleyen ve önde uzun bir sıçrama koruması oluşturan gövdeli bir motosiklet tasarladı. Piaggio, MP5'ten, özellikle de uzun orta bölümden memnun değildi. Scooter'ı yeniden tasarlamak için havacılık mühendisi ile sözleşme imzaladı. Daha önce Ferdinando Innocenti tarafından scooter tasarımı ve üretimi konusunda danışılan D'Ascanio, motosikletlerden nefret ettiğini, hantal, kirli ve güvenilir olmadıklarına inandığını hemen duyuldu (Shattuck 2005).

D'Ascanio'nun MP6 prototipi şekilde olduğu gibi motoru arka tekerleğin yanına monte edilmişti. Arka tekerlek doğrudan şanzımandan tahrik edildi, tahrik zincirini onunla ilişkili yağ ve kiri ortadan kaldırdı. MP6 tasarımı ayrıca tek taraflı bir ön süspansiyon, saplama akslarına monte edilmiştir. Değiştirilebilir ön bir amortisörle ayarıyla ilk değişken sönümlenmeli süspansiyon tasarımını geliştirmiş oldu.

D'Ascanio'nun havacılık mühendisliği geçmişi onu uçak iniş takımından esinlendiği bu süspansiyonun sisteminin mucidi kılmıştı. Yıllarca korunacak bu süspansiyon modeli popülerlik kazanınca birçok patenti Piaggio tarafından alındı. Ancak D'Ascanio tekrar havacılık kanadına dönmesiyle tam aktif yani aşağı ve yukarı salınabilen bu ön süspansiyon tasarımı ilerleyen yıllarda üretim maliyetleri düşürülerek değiştirildi. Yalnızca yukarıya salınabilen ve yatay kol kısmı kısaltılarak üretilmeye devam edildi. Bu süspansiyonların avantajlarını yok eden bir gelişmedir çünkü kaster açısı doğrultusunda kalan tekerlek göbeği kısıtlı çalışma aralığında kalmaktadır.



Şekil 2.4 Yeni Ve Eski Vespa Ön Süspansiyonu (Shiroma 2014)

Vespa için büyük bir şans olan bu süspansiyon güzel bir tasarıma sahip olmasına rağmen gelen erken film popülerliğiyle uygun üretim kalitesine ulaşılardan basit bir versiyonu ile üretimine devam edilmiştir. Belki de yalnızca vespa scooter üzerinde patentli kalması bu süspansiyonun geliştirilmesinin önüne engel olmuştur. Bu mekanizma zorlu yol şartlarında çalışabilen doğru bir konstrüksiyon tasarımlarıyla bugün ki büyük macera motorları arasında simge özellik olabilir. Günümüzde vespa kullanıcıları basit bir teleskopik çatal deneyiminden daha az sönümlenme kabiliyetine rağmen ikon tasarımı için satın almaya devam etmektedir. Bazı üretim sonrası parça tedarikçilerinin dahi fark ettiği bu özellikler sonradan eklenen parçalar ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Piaggio bulundurduğu alt markaları geliştirirken en büyük markası olan vespa için sabit satış rakamlarını dikkate alarak değişimlere çekimser yaklaşmaktadır.

1980'lerin başında İngiltere'de Saxon-Motodd tarafından geliştirilen Telelever çatal, viraj alma ve frenleme sırasında yol tutuş stabilitesini iyileştirmeyi amaçlıyordu. Telelever, geleneksel teleskopik çatalları kullanır, ancak payandalar yalnızca yağlama yağı içerir. Yaylanma ve sönümlenme işlevleri, bir "Telelever" kol bağlı bir monoshock tarafından ele alınır. Salıncak kolu, motor bloğunun ön tarafında döner ve salıncak kolunun ön ucu, bir küre mafsalı aracılığıyla çatal sürgülerini bağlayan bir desteğe bağlanır. Altta üçlü kelepçe olmadığından, çatal kaydırıcılar geleneksel teleskopik çatala göre daha uzun ve daha hafiftir bu daha büyük kaydırıcı/boru örtüşmesi hem burulma esnekliğini hem de yaysız ağırlığı azaltır.



Şekil 2.5 BMW R 1100 RS – Telelever (Hubertz 2013).

Telelever sisteminin ana avantajı, direksiyon işlevini frenleme ve süspansiyon işlevlerinden ayırmasıdır. Fren kuvvetleri, salıncak kolu aracılığıyla geri alınır ve böylece fren dalışını ortadan kaldırır. Frenleme sırasında, geleneksel teleskopik çatallarda olduğu gibi iz ve kaster açısı azalmak yerine bir miktar artar. Bu da ön tekerde daha fazla tutuşun olmasını salarken ön tekerin kayma durumunu önler. Geleneksel çatallara alışkın bazı sürücüler, Telelever'in başlangıçta histen yoksun olabileceğini ve dalışın olmamasının başlangıçta endişe verici olduğunu bildirdi. Ancak sürüşün getirdiği titreşimler ve darbeler doğrudan kullanıcıya aktarılmaması özellikle uzun yol motorlarında dikkate değer bir fark ortaya çıkarmaktadır. "Telelever" terimi, "Teleskopik çatal" ve "Kol" kelimesinin birleşmesidir; "kol" altta bulunan üçgen salıncak koludur. (Visordown 2010)

2004'te BMW, Norman Hossack'in tasarımına dayanan yeni bir ön süspansiyon içeren K1200S'yi duyurdu. BMW bu gerçeği fark etti ancak Hossack'a telif ücreti ödemedi. BMW, yeni ön süspansiyonuna Duolever adını verdi. 2018 itibariyle, Duolever tüm K1300 ve K1600 modellerinde kullanılmıştır (Hossack 2010).



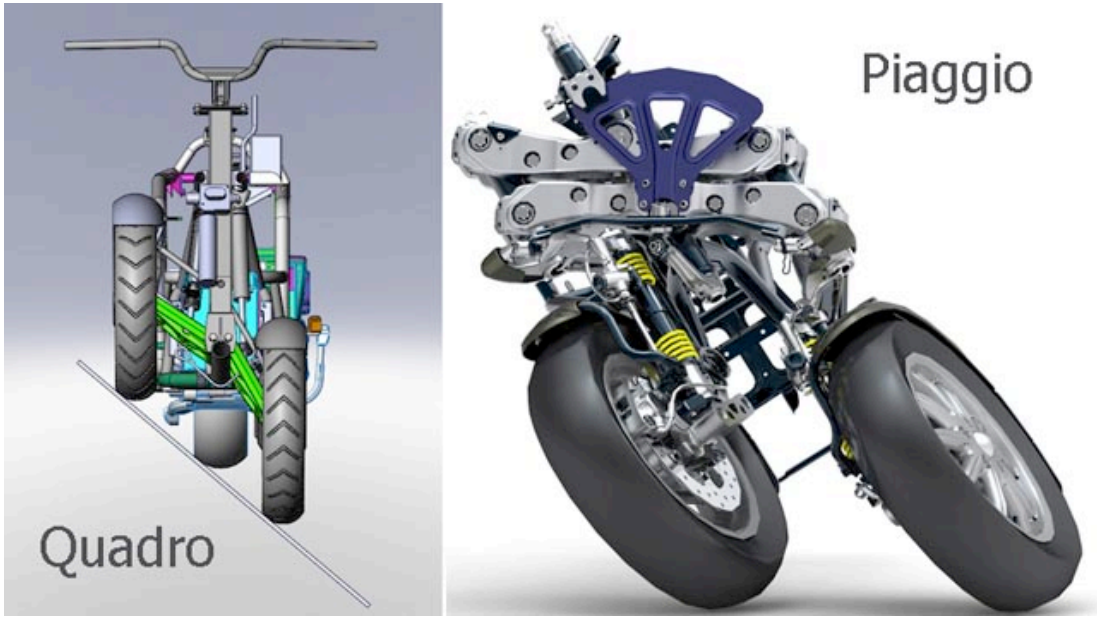
Şekil 2.6 BMW K1200 S Duolever Süspansiyonu (Berkmann 2004)

Duolever'in resmi BMW Motorrad açıklaması şunları içerir:

Bu ön tekerlek süspansiyonunun şu anda motosiklet pazarındaki avantajı burulma sertliğidir. BMW Motorrad Duolever ön tekerlek süspansiyonu, sabit çatal boruları sarsıntı geri tepmesi ve direksiyon sırasında yanal uzunlamasına bükülen geleneksel bir teleskopik gibi negatif kuvvetlerden etkilenmez. Arkadaki iki bağlantısı, sarsıntıda geri tepmeden kaynaklanan kuvvetleri emer ve tekerlek taşıyıcıyı sabit tutar. Böylece herhangi bir burulma ortadan kalkar ve ön tekerlek süspansiyonu çok hassastır. Sürücünün direksiyon komutları doğrudan dönüştürülür ve ön tekerlekten gelen geri bildirim tüm sürüş koşullarında yansır.

Telelever de olduğu gibi, arka bağlantı yataklarının düzenlenmesi nedeniyle ayrıca kinematik bir dalış önleme etkisi elde edilir. Güçlü frenleme manevraları sırasında geleneksel bir hareketli kol ağır bir şekilde sarsılır veya kilitlenirken, Duolever bu durumda hala yeterli yay hareketine sahiptir ve bu nedenle sürücü hala virajda son derece geç fren yapabilir ancak yön dengesi açısından daha dengeli olabilir (Poschner 2004).

İtalya’da üretime giren ilk Vespa ile dünya çapında tanınan Piaggio'nun bir konseptle 2006 yılında tanıttığı yenilikçi bir Scouter olan MP3 sektörde büyük ilgi yarattı. Bu motosiklet şehir içi motosikletine entegre edilmiş iki ön tekerleğe sahip bir motosiklet modeliydi. Bu model benzeri görülmemiş bir sürüş deneyimi sağlayan sürüş stabilitesi kavramını yeniden tanımlıyordu. Viraj içinde 40 dereceye kadar eğilmeyi sağlayan bu tasarım ayrıca herhangi bir yüzeyde daha iyi yol tutuşu sağlamaktadır. İyi bir manevra kabiliyeti için düşük kaster açılı olan üretilen scooterlar ön tekerlekte düşük yol tutuşuna neden olmaktadır. Bu yüzden ani frenlerde ve kaygan zeminde kolayca kaydığı için kullanımı zor bir araç olarak bilinirdi. Önde çift tekerlek daha fazla yol tutuş kabiliyetini Scooter tipi motosikletlere de sundu (Fuoco 2010).



Şekil 2.7 Piaggio ve Quadro Ön Süspansiyonları (Aeon 2016)

Piaggio'nun bu modeliyle birçok marka, otomobil kullanıcılarını yakalamak adına önde çift tekerleğe sahip dinamik bir scooter geliştirmeye başladı. Bu araçlar otomobil süspansiyonlarından esinlenirken Piaggio Vespa da olduğu gibi tek kollu tasarımı tercih etmiştir. Yüksek mukavemetli çerçeve tasarımı ile hassas çift etkili hidrolik süspansiyonlarının birleşmesi bilgisayarlı FEM analizlerinin sonucudur. İtalya'nın zor virajlı dağ yollarında, motosiklet kullanmayı bilmeyen kullanıcılara test ettirilen bu modeller hayranlık bırakan izlenimler yarattı. Elektronik sistemler ile donatılarak günümüze kadar gelen bu sistem diskler yardımıyla ön süspansiyon mekanizmasını gerekli durumlarda kilitleyerek sürüşü daha güvenli hale getirmektedir (Carscoop 2006).

Bu modelle scooter pazarındaki talebi arttıran Piaggio'nun ardından diğer üreticiler geliştirme birimlerine bu konuda talimatlar verdi. Birçok marka tarafından sunulan modellere rağmen kullanıcı deneyimi Piaggio tasarımını öne çıkartıyordu. Uzak doğulu üreticiler bu modeli rakip alan tasarımlarında tam anlamıyla başarılı olamayınca daha güçlü motorları bu süspansiyonla entegre ederek kullanımı kolay bir motosiklet türetildi. Fuarda büyük bir ilgi yaratan bu model bir Yamaha modeliydi. Çift kollu olmasına rağmen tek taraflı bir bağlantıya sahip bir ön süspansiyona sahiptir.

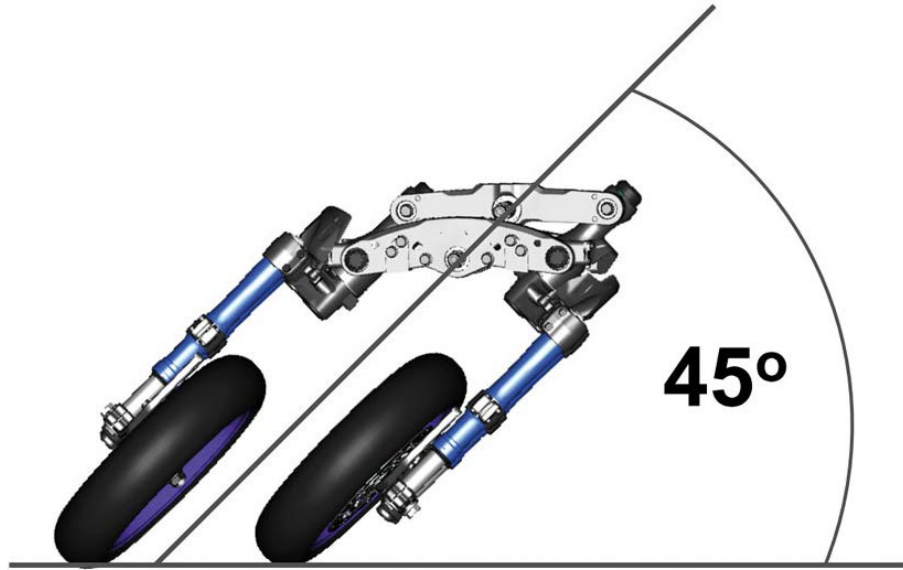


Şekil 2.8 Yamaha Niken ve Ön Süspansiyonu (Yamaha 2020)

2015 yılında Yamaha'nın büyük ilgi gören Mt-09'un motorunu taşıyan bu modelin adı çift kılıç anlamına gelen Niken olarak belirlenmiştir. Teknolojik donanımları modele iyi aktaran Yamaha üç tekerleğin her birinin kendi dönüş sensörü ve fren kontrol cihazları vardır. Her tekerleği ayrı ayrı kontrol eden bu sistem Niken'i daha güvenli ve kontrollü bir motosiklet haline getirir. Niken diğer modellerin aksine Tekerleği dışarıdan tutan çatalları sayesinde 45 derecelik bir viraj eğimine müsaade etmektedir. Kullanıcı deneyimlerine göre belirli bir açıda sınırlanması geleneksel motor sürüşünü kısıtlayan ve tedirginlik verici bir algı oluşturmaktadır. Ancak motosikletleri kontrolü tamamen ön tekerlekte olduğundan ve ön tekerleğin bu motosiklet modelinde çift olarak yer alması kontrol kaybının yaşanma olasılığını oldukça düşürmektedir (Tuttle 2018).

Ön süspansiyon, konsollu süspansiyonu desteklemek için paralel dörtgen kollar kullanır. Orta kısım yalın olması için tekerleklerin dışına her tarafta baş aşağı iki çatal ayağı monte edilmiştir. Ayarlanabilir ön yük ve sönümlemeye sahip 43 mm'lik bir arka bacak ve montajı hizada tutan daha sert sönümleme için 41 mm'lik bir ön bacadan oluşur. Niken'in ön süspansiyonu, ön yükleme sıkıştırma ve geri tepme sönümlemesi için tam ayarlanabilirlik sunarak, değişken koşullara uyacak şekilde ayarlamanıza olanak tanır ve kolaylık sağlamak için ön yük, alete ihtiyaç duymadan ayarlanabilir (Rafferty 2017).

Direksiyon kuvvetleri, ofset direksiyon mafsalları da dahil olmak üzere ayrı bir bağlantı kolu grubu ve bağlantıları aracılığıyla aktarılır. Ackermann direksiyon geometrisini, çoğu arabaya benzer şekilde, bir dönüş sırasında iç tekerleğin her virajda daha küçük bir yarıçap izlediği için dışarıda giderek daha fazla döndüğünü fark ederler. Her iki taraftaki saplama aksları, 120/70-15 lastikler kullanarak 15 inç boyutunda dökme alüminyum jantlar taşır (Tuttle 2018).



Şekil 2.9 Niken Ön Ackermann Geometrisi (Tuttle 2018).

Ackermann direksiyon geometrisiyle viraj dışındaki tekerlek daha az açılı olacak şekilde maksimum yol tutuş kabiliyetini alması sağlanır. Bu yüzden sürüş dinamikleri geleneksel motosiklet kullanımının dışında bir hissiyat oluşturmaktadır. Ancak motosiklet tekerleğine sahip olduğu için çizgisel bir eğriyi ortalayan bir elips yol teması izine sahiptir. Bu tasarım sürüş deneyimi olarak benzersiz hissiyat oluşturduğunun kanıtı olarak, her kullanım sonunda araç dinamiklerini yeniden keşfetmeniz ile açıklana bilmektedir.

Hossack tasarımı daha eski dönemlerde bisiklet üreticileri tarafından da kullanıldığı için patent üzerinde herhangi bir ceza ödemeyen BMW'nin ardından diğer markalarda bu tasarım türüne ilgi duymaya başlamıştır. Bunun en büyük örneğini Honda uzun yıllardır ürettiği şekillin sol kısmındaki Goldwing'in yeni modelinde kullanma kararı almıştır. BMW'nin kullandığı Hossack tasarımına göre daha yatay olarak yerleştirilen bu sistem kaster açısı olarak daha geniş açılı tur tipi motosiklet türünde üretilmiştir.



Şekil 2.10 Honda Goldwing ve Kymco Cv3 Yeniden Yorumlanmış Süspansiyon Tasarımları (Revzilla ve Kymco 2022)

Gelişen teknoloji ile birlikte sensörlerin adapte edildiği aktif çalışan süspansiyon sistemleri yanında mekanizmalarında kontrol edilebildiği modelleri günümüzde göre biliyoruz. Şekillin sağ kısmında modelde durağan halde ayağınızı yere koymadan denge sağlayan ve virajdaki hız-yol tutuş oranına göre yatış açısını kontrol eden disk teknolojisine sahip bir ön amortisör tasarımı mevcuttur. Kymco markasının geliştirdiği bu sistem Piaggio gibi bir scooter modeli üzerinden geliştirilmiştir. Teknolojik geliştirmelerle yeniden yorumlanan ön süspansiyonları kullanıcıların yorumları dikkate alındığında sensor, tepkime süresi bakımından negatif yorumlamalar yapılırken sınır koşullarını kendi belirlediği için ise pozitif yorumlar yapılmaktadır. Elektronik sistemler araçların sınır koşullarını belirleyerek riskli durumlarla karşılaşma olasılığını minimuma indirmiştir.

Pandemi dönemiyle toplu taşımayı tercih etmek istemeyen kullanıcılar için küçük elektrikli scooterlar popülerlik kazanmıştır. Teknolojisi güvenilir olan şirketler basit baz modelleri pazarlarken spesifik markalar süspansiyon sistemine sahip modeller ortaya çıkartmışlardır. Elektronik devreler ve aygıtları titreşime karşı dayanımı oldukça düşüktür. Bu yüzden elektronik devreler rezonans altında kısa sürede bağlantı kopmaları gibi arızalar oluşturmaya başladı. Bunun için markalar teleskopik çatalı ve alternatif diğer mekanizmalı ön süspansiyon modellerine uygun hale getirerek tasarımlarına entegre halde sunmaya başladı.



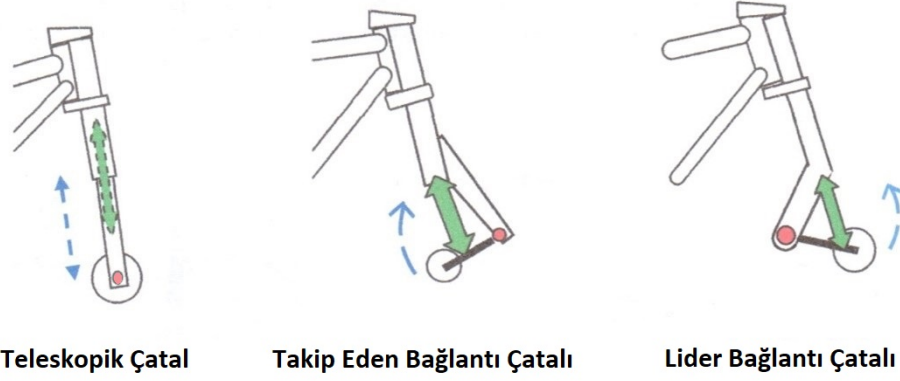
Şekil 2.11 Earles ve Hossack Çatalı (Mieko ve Brandon 2022)

Opsiyonlar arasında Earles çatalının bir versiyonu ve ilginç bir şekilde Hossack tasarımını scooterınıza entegre eden kitler hali hazırda mevcuttur. Neredeyse yarım yüzyıl süren Hossack ya da diğer bir süspansiyon modeli olan neredeyse yüzyıl süren Earles çatalı şu an en basit ulaşım araçlarında kullanılabilir. Ancak bu modeller herhangi bir değişken sönümlenme kabiliyeti kazanacak aralıkta çalışmıyor. Bunun sebebi tasarımların özelliğini kavramadan adapte edilen tasarım örnekleridir ve ne yazık ki kullanıcıya değişken sönümlenmeyi kullanıcıya doğrudan hissettiremiyor. Elektronik devrelerin bağlantı kopma sorununun önlenmesi üreticiler için yeterli bir seviye iken kullanıcılar doğru sönümlenme konforuyla tanıştıkça markalar arasında süspansiyon geliştirme rekabeti oluşacaktır.

3. ALTERNATİF SÜSPANSİYON TASARIMI

Tez çalışmasının bu aşamasında amortisör elemanlarının matematiksel modelleme programları ile mekanizma analizleri yapılacaktır. Motosikletlerde tasarımlar, dinamik denge denklemleri ve direksiyon geometrisinin oluşturulmasıyla başlanır. Bir motosiklette farklı gereksinimleri karşılamak için tasarımın geometrisi belirlenmelidir. Örneğin iyi bir arazi kabiliyeti için süspansiyon çalışma aralığı geniş tutularak kaster açısının ideal açıdan birazda fazla olmasını sağlamak gibi düşünülebilir.

3.1 Giriş ve Amaç



Şekil 3.1 Farklı Süspansiyonların Çalışma Geometrisi (Jerryamcm 2015)

Standart teleskopik çatalar kaster açısına dik olarak sönümlenebilirken kuvvet bileşkesi dik olarak gelmediğinde eğilmeler sürtünmeye sebep olarak prizmatik mafsallı türü olan çatalın sıkışmasına neden olmaktadır. Teleskopik çatalın diğer bir dezavantajı ise frenleme sırasında çatalın kapanarak öne doğru dalma hareketiyle kullanıcının ve motosikletin dengesini bozmaktadır. Ters teleskopik çatal teknolojisiyle bu sorunların bir miktar üstesinden gelinse de kusursuz sayılabilecek değişken sönümlene mekanizmaları sürüş güvenliği ve konforu adına birçok katkı sağlamaktadır. Değişken sönümlene bir kol bağlantısı ile sönümlene şiddetini dozajlanarak tam etkiyen darbe kuvvetinde geri tepki oluşturmaktadır. Böylece sönümlene sonrası salınım kararsızlığı oluşmazken tekerlek yol bağlantısı maksimumda tutulmaktadır. Teleskopik çatalarda lineer sönümlene özelliklerine ek yaylar ve valfler yardımıyla değişken sönümlene özelliğini tam olarak kazandırmaz.

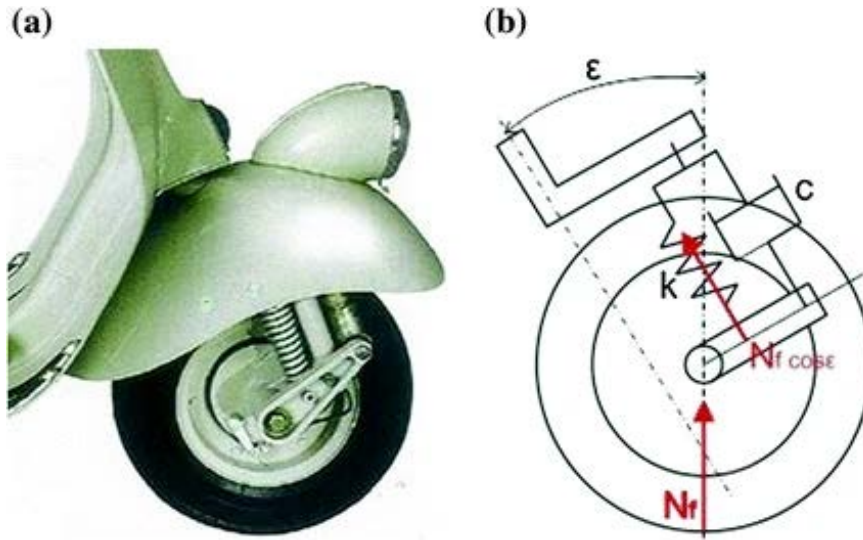
Değişken sönümleme sistemine sahip süspansiyonlar ana özelliklerini kol bağlantı yönüne göre kazanmaktadır. Şekil 3.1 görüldüğü üzere önden desteklenen bağlantıya takip eden bağlantı çatalı denirken arkadan desteklenen bağlantı çatalına lider bağlantı çatalı denmektedir. Lider bağlantı çatalının en iyi örneği Earles düzenine sahip süspansiyon sistemidir. En büyük avantajı ise frenleme ile dalma hareketi yapmayarak kullanıcı ve motosiklet üzerinde denge oluşturmaktadır. Takip eden bağlantı çatalının en iyi örneği olarak vespa MP6 ile görülmeye başlanılan süspansiyon modeli gösterilebilir. Geriye doğru katlanarak çalıştığı için genel yol bozukluklarıyla tam örtüşme sağlandığında kullanıcıya minimum hissettirerek sönümlemeyi tamamlamaktadır. Başlıca türleri olsa da değişken sönümleme sistemi serbest tasarım koşulları oluşturduğundan birçok özgün modelde mevcuttur. Ancak başarılı modellere bakıldığında ise otomotiv süspansiyonlarının büyük çoğunluğunu oluşturan Macpherson süspansiyon sistemine benzer tasarımlardan oluşmaktadır. Telelever sistemi yan tarafından benzetilirken çift tekerleğe sahip modeller ise neredeyse tam bir macpherson kol bağlantısı tasarımı barındırmaktadır. Her ne kadar benzetilse de motosiklet lastiğinin kavisli yapısı gereği tam yol tutuşu için ekstra mekanizmalar ve elektronikler ile özgün yapılar oluşturduğu aşikardır. Özellikle değişken sönümleme sistemi ile sürüş sırasındaki dışardan gelen etkiler kullanıcıya doğrudan aktarılmaması sürüş güvenliğini oldukça artırmaktadır.

Bu aşamada bizim amacımız her tür motosiklete veya bisiklete kolayca adapte edilebilecek sürüş güvenliğini artıran bir mekanizma ortaya çıkarmaktır. Teleskopik çatal süspansiyon sistemini üzerinden geliştirilecek olan mekanizma daha önceden olduğu gibi kullanıcılara güven duygusu hissettirecektir. Teleskopik çatal altına entegre edilen mekanizma ile çalışacak sistem geleneksel çatalın eksikliklerine göre biçimlendirilebilecektir. Başarılı ön süspansiyon tasarımının gelişmiş özellikleri; Teleleverin frenleme sırasında ön dalış yapmaması, Duoleverin yeni teknolojilere adapte edilebilirliği gibi yeteneklere sahip olmalıdır. Bu modeller üzerinden sürüş sırasındaki tepkileri dikkate alınarak yeni bir tasarım geliştirilecektir. Çalışma sistemi düşünülerek birkaç basit 4 kol mekanizması üzerinden analizlerin sonucu tasarımlar arasında tartışılacaktır. Değişken sönümlemeli süspansiyon modellerinin jant merkezi üzerindeki hareketi üzerinden mekanizmalar yorumlanacaktır. Standart teleskopik çatalara karşı değişken sönümleme mekanizmaları birbiriyle kıyaslanacaktır.

3.2 Değişken Sönümlenmeye Sahip Süspansiyon Tasarımları

3.2.1 Vespa Tasarımının İncelenmesi

Vespa'nın ön süspansiyonu, aşağıdaki şekillerde işlevsel bir şema ile temsil edilmektedir. Süspansiyon, bir helezon yay ve çift etkili bir amortisörden oluşur. Şekil 3.2b'de k , yayın sertliğini gösterir; c , amortisörün sönümlenme katsayısıdır; N_f , ön tekerleğe etkiyen dinamik yükü temsil eder ve ϵ direksiyon eksenini eğimidir.



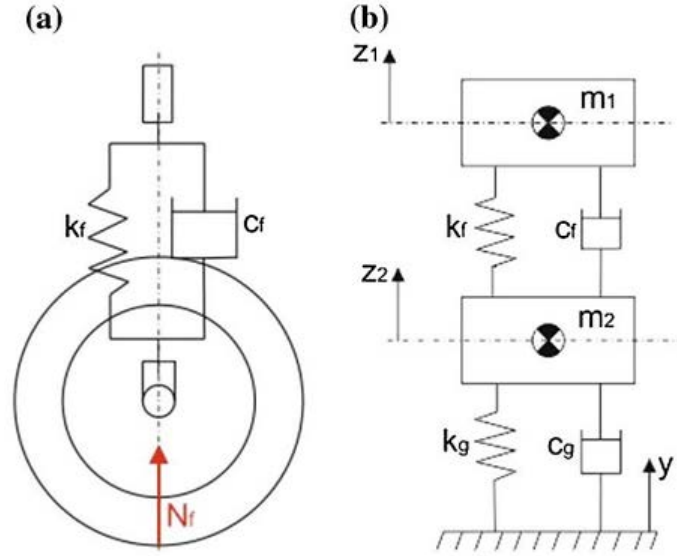
Şekil 3.2 Vespa Ön Süspansiyonu a; Performans Analizi İçin Şeması b (Ceccarelli 2015)

Çalışmayı kolaylaştırmak için süspansiyon, Şekil 3.3'de iki kütle arasında dikey bir yaylı amortisör birimi olarak temsil edilen eşdeğer bir süspansiyona indirgenmiştir. Karşılık gelen eşdeğer katsayı şu şekilde ifade edilebilir:

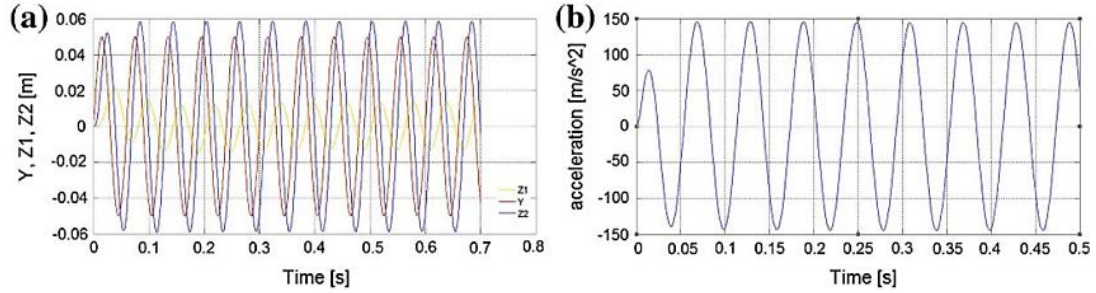
$$k_f = k / \cos^2 \epsilon \quad (3.2.1)$$

$$c_f = c / \cos^2 \epsilon \quad (3.2.2)$$

Süspansiyon sistemi üzerinde sönümlenme kuvveti belirleyen yay sertliğine bağlı k_f katsayısı (3.2.1) ve geri tepme kuvvetini belirleyen şok emicinin türüne bağlı olan c_f katsayılarıyla (3.2.2) çarpılarak süspansiyon kuvvetleri hesaplanmaktadır. Ön süspansiyon, sırasıyla z_1 ve z_2 düşey yer değiştirmeleri olarak m_1 ve m_2 kütlelerinin hareketi ile Şekil 3.3b'deki iki serbestlik dereceli modelle incelenebilir. Şekil 3.3 b'deki model, k_g ve c_g lastiğinin sertlik ve sönüm katsayısını içerir ve hareket denklemi şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 3.3 Süspansiyon Şeması Modeli; Mekanik a, Parametre b (Teoli 2015)



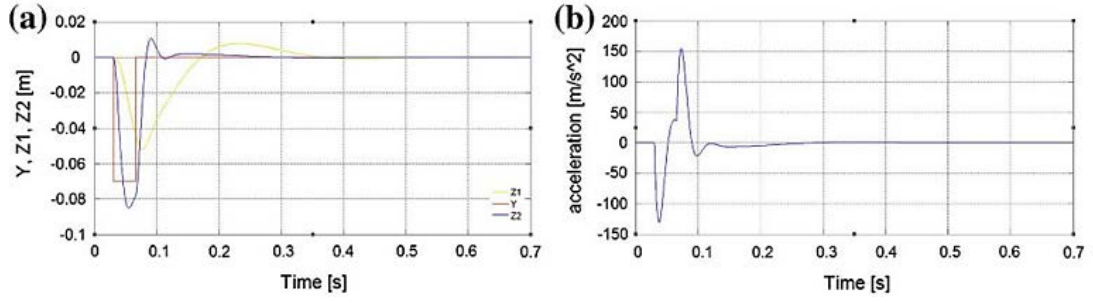
Şekil 3.4 Vespa Süspansiyon Modelinin Çalışma Performansı (Teoli 2015)

20 km/s hızda çalışırken performans değerlendirmesinin sayısal sonuçları sinüzoidal profilli bir yolda: kütlelerin yer değiştirmesi (yol profili için mavi; kütle m_1 ve kütle m_2 için kırmızı); b bir sürücünün m_1 kütlesi için ivmeyi ifade etmektedir. Formüller üzerinden süspansiyon ve lastiğin absorbe karakterlerini sönümleme ve geri tepme (3.2.4) olarak dörde ayırabiliriz. Böylece süspansiyonun çalışma kabiliyetlerini daha doğru değerlendirmek mümkündür.

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_f(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_f(z_1 - z_2) = 0 \quad (3.2.3)$$

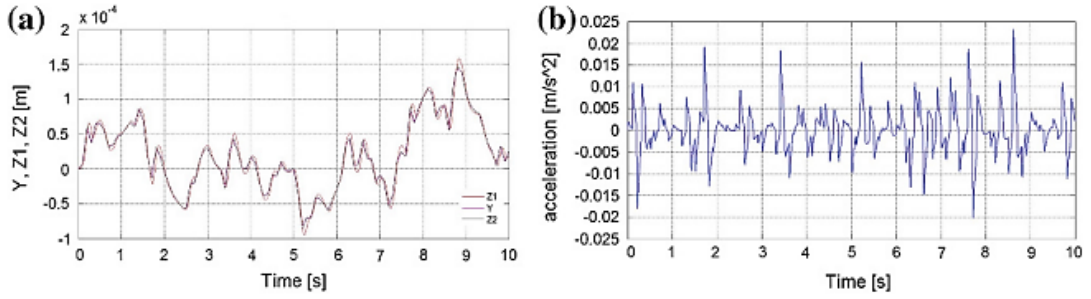
$$m_2 \ddot{z}_2 - c_f(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_f(z_1 - z_2) + c_g(\dot{z}_2 - \dot{y}) + k_g(z_2 - y) = 0 \quad (3.2.4)$$

Bu formüllerle ile uzun yıllar boyunca Vespa tasarımının başarısını motive eden temel performans özelliklerini ve birkaç model ürünü değerlendirmek için analizler yapıldı. Farklı yol koşullarında, farklı hızlarda simule edilen süspansiyon analizleri bu makalede Vespa scooterı için rapor edilmiştir (Ceccarelli 2015).



Şekil 3.5 Çukura giren bir lastiğin analizi (Teoli 2015)

7 cm yüksekliğinde ve 20 cm genişliğinde bir yol çukuruna 30 km/s hızla giderken Şekil 3.3'daki model için performans değerlendirmesinin sayısal sonuçları: a kütlelerin yer değiştirmesi (yol profili için mavi; kütle m_1 için sarı ve kırmızı kütle m_2) için; b bir sürücünün m_1 kütlesi için ivmeyi sembole etmektedir.



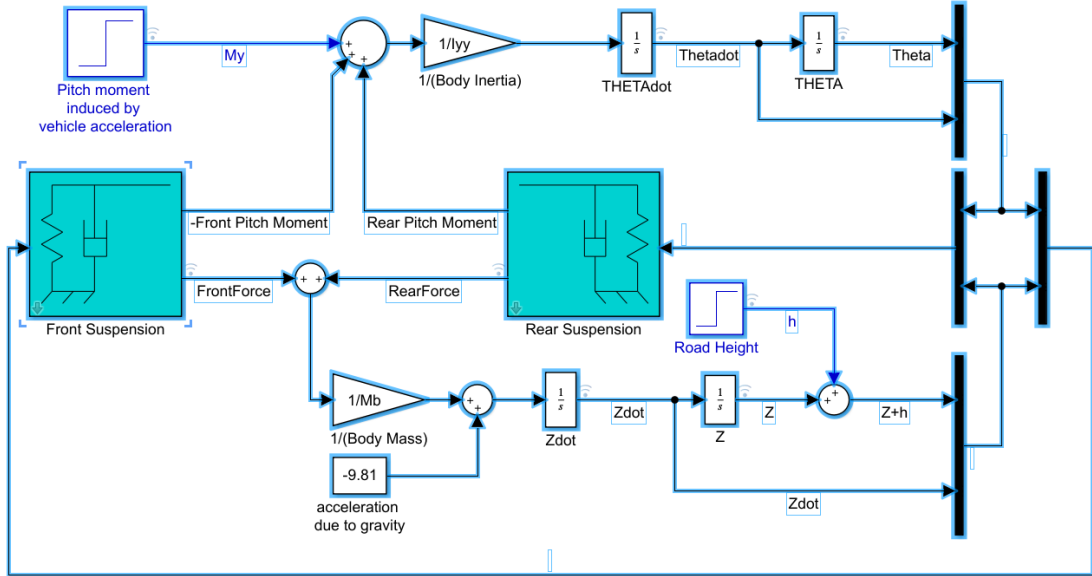
Şekil 3.6 Bozuk bir yol koşulunda süspansiyon analizi (Teoli 2015)

Maksimum yüksekliği 15 μm olan engebeli bir profile sahip bir yolda 50 km/s hızında çalışırken Şekil 3.3'daki model için performans değerlendirmesinin sayısal sonuçları: kütlelerin yer değiştirmesi (yol profili için mavi; kütle m_1 için sarı ve kırmızı kütle m_2) için; b bir sürücünün m_1 kütlesi için ivmeyi sembole etmektedir.

Bu makalede Corradino D'Ascanio'nun Vespa scooter tasarımında havacılık mühendisliğinin etkisiyle uçak iniş takımından esinlendiği süspansiyon sisteminin başarısı kanıtlanmıştır. Grafikler ile analizlerinin sonuçlarını açıklayan bu çalışma ise M. Ceccarelli ve G. Teoli Vespa scooter tasarımı makalesinden alınmıştır. Bu tasarım yapılırken bu gibi analiz yöntemleri olmadan tamamen kendi birikimlerinden ortaya çıkararak D'Ascanio, motosiklet modeline bu kadar iyi bir adaptasyon göstermesi bu modelin popülerliğinin ana nedenidir. Bu tasarım genel kitleler tarafından değişken sönümleme sisteminin başlangıç noktası olarak nitelendirilir. Oldukça basit bir analiz yoluyla hesaplanan performanslar, scooter'ın uygun davranışını, bu tasarımın konforu ve verimliliği için bugün hala başarılı olan değerlerle göstermektedir.

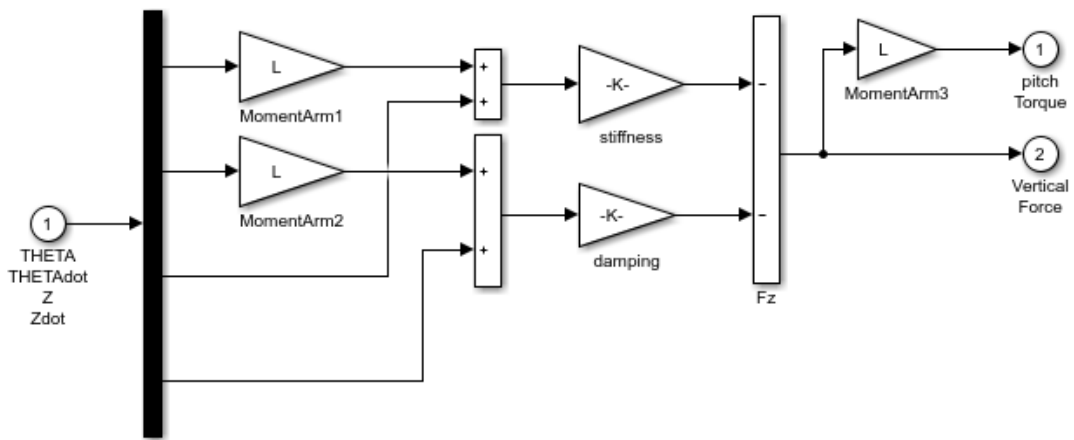
3.3 Süspansiyon Modelinin Simulink Analizi

Simulink üzerinde önceki makale üzerinde geliştirilen fonksiyonu adapte edilerek oluşturulan süspansiyon modeli üzerine sabit değerler eklenmiştir. Simulink modelinin kendi oluşturduğu set aralıklarından geçen süspansiyonun verdiği geri tepkileri hesaplatılmıştır. Bu verilerle motosiklet üzerindeki sönümlenmelerin hangi yol koşuluna uygun olduğu tespit edilebilir.



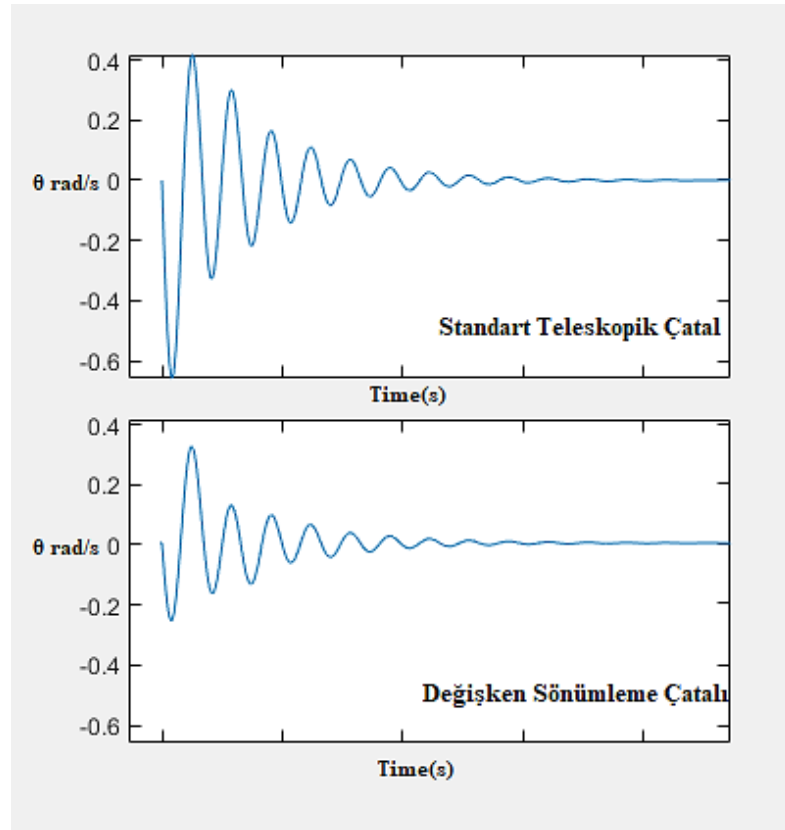
Şekil 3.7 Basit Süspansiyon Modeli

Simulink üzerinde süspansiyon modeli üzerinden geliştirilen bu algoritma verilen hız aralığında belirlenen yol yüksekliklerinde süspansiyon modelini çalıştırmaktadır. Bu modelde k yayın sertlik katsayısı iken c amortisörün sönümleme katsayısıdır.



Şekil 3.8 İki DOF Yay/Sönümleme Modeli

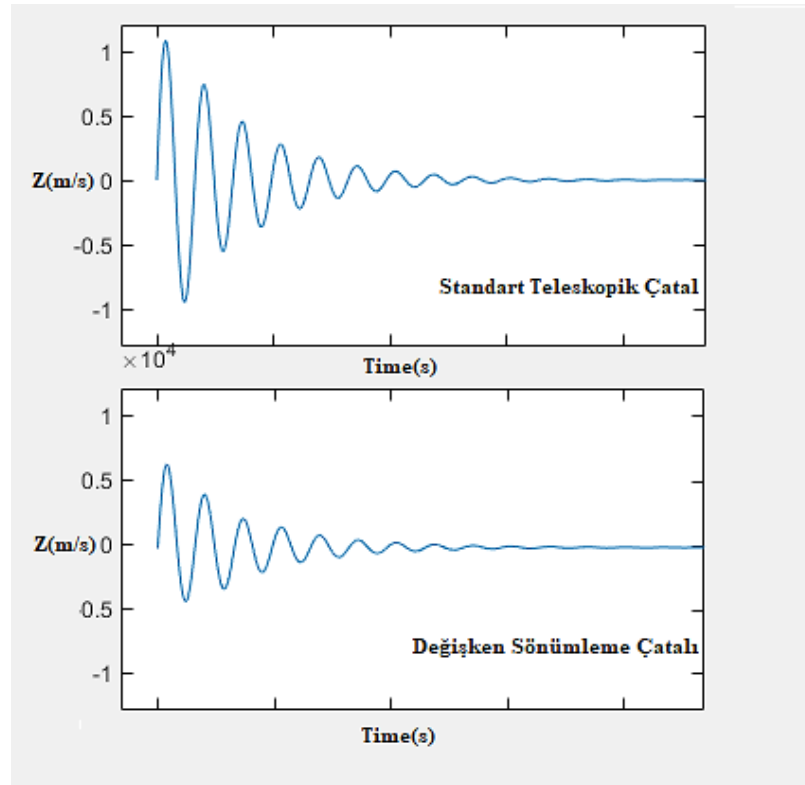
Standart bir teleskopik çatalın değişken sönümlenme mekanizmasından farkını basitçe incelemek için oluşturduğumuz model Şekil 3.7 de görülmektedir. Süspansiyon bileşenleri tarafından sönümlenen kuvvetleri başlıca lastik ve amortisör üzerinden olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğru bir süspansiyon tasarımı için sönümlemenin minimumu lastik tarafından sönümlenecek şekilde hesaplanıldığında emniyet katsayısını maksimum seviyededir. Matlab simülasyonunda basit bir model üzerinden tekerlek sönümlemesini ihmal edilerek çözdürüldüğünde ise aşağıdaki açısız hız-zaman grafiği elde etmekteyiz.



Şekil 3.9 Farklı çatal türleri için açısız hız - zaman grafiği

Teleskopik çatalın doğrusal açısına eşdeğer kuvvet aynı yönlü hale geldiğinde burulma sırsındaki depolanan enerjiyle beraber şiddetli bir sönümlenme hareketine başladığını grafikte görmekteyiz. Başlangıç şiddetini artıran burulma aynı zamanda moment değişimine bağlı olarak sönümlenme sonrası gereksiz salınımları da giderebilmektedir. Değişken sönümlenme sisteminde bir mesnet desteği sağladığı için ilk kuvvet amortisör ve mesnet yatağı arasında dağıtılmaktadır. Bu yüzden ilk tepki daha az bir açısız etkiye neden olmuştur. Sönümlenme aralığının ayarlamak daha zor olmasına rağmen aynı yükü değişken olarak daha çabuk sönümlendiği görülmektedir.

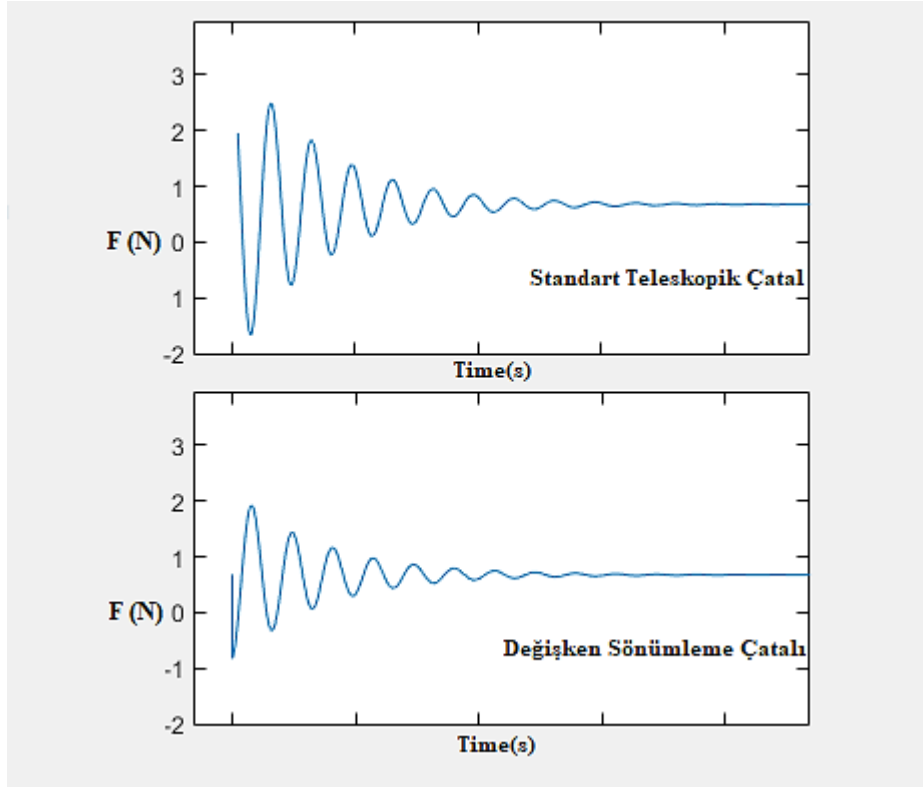
Standart bir teleskopik çatal geniş sönümlenme aralığı daha fazla sönümlenme kabiliyeti kazandırabildiği gibi gereksiz salınım süresini de artırmaktadır. Değişken sönümlenme sisteminde ise daha kısıtlı sönümlenme aralığı grafiklere de yansımıştır. Gereksiz salınımları durdura bildiği gibi sönümlenme kuvveti yetersizliğinde ise kalan kuvveti doğrudan şaseye aktaracaktır. Bu gibi dezavantajlar düşünülerek geliştirmeler yapılmış olsa da karaktere has bu özellikler kullanıcılar tarafından algılanmaktadır. Sönümlenme başladığı an kabul edilerek çizdirilen Şekil 3.10 grafiği süspansiyon hareket hızı sembol etmektedir. Aynı kuvvetlere karşı standart teleskopik çatalın daha hızlı sönümlenme yaptığını görmekteyiz. Ancak bu kullanıcıya ne kadarının aktarıldığına bağlı bir durumdur. Örneğin frenleme sırasında ani bir öne dalış istenmediği gibi, arazide dik bir engele daha yumuşak bir geçiş sağlayabilir.



Şekil 3.10 Farklı çatal türleri için anlık hız- zaman grafiği

Süspansiyon yol bozukluklarına karşı ne kadar verimli çalıştığı sönümlenen kuvvetin süspansiyon hareketine oranı ile kısmen ifade edilebilir. Süspansiyon sabit çalışma aralığında farklı kuvvetleri aynı oranda sönümlenmesinin yolu birden fazla sönümleyici barındırmasıdır. Simülasyon da basit hali bulunan teleskopik çatal içinde de bazı ek sönümleyiciler bulunmaktadır. Ancak anlık sönümlenme miktarı ne kadar fazla olursa kullanıcı üzerindeki moment değişimi o kadar fazla yaşanmaktadır. Bu yüzden belirli bir ivmeyle kuvvetlerin absorbe edilerek normal haline dönmesi gerekir.

Süspansiyon üzerinden absorbe edilirken ve geri eski konumuna gelirken oluşan moment kuvvetleri sürüş kontrolünü kaybettirebilmektedir. Bunun gibi durumları engellemek için süspansiyon hareket hızı kısıtlanmaktadır. Sönümlenme sistemlerinin asıl amacı dikey kuvvetleri sürücüye olduğunca az aktarmaktır. Model üzerinden çizdirilen aşağıdaki grafikleri incelediğimizde aynı yüke karşı geri bildirimlerini analiz etmek mümkündür. Bir çukurdan geçiş sönümlenmesinde teleskopik çatal tüm sönümlenme alanıyla kuvveti absorbe ederek kuvveti dağıtması ve salınımları grafik de ön plana çıkmaktadır. Diğer süspansiyon ise ani bir geri açılmanın ardından yükle beraber kararlı hale geçerek sönümlenmelerle kuvvet azalışının sürdüğünü ve son noktada küçük titreşimlerin bir süre kaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3. 11 Farklı çatallar için kuvvet -zaman grafiği

İki sistem arasındaki bazı tepkiler çeşitli çözümlerle giderilse de spesifik özellikler açısından kıyaslamaya değerdir. Değişken sönümlenme sistemi kısa sürede aynı kuvvetleri absorbe edebildiği bu grafiklerle kanıtlanmaktadır. Bu yüzden otomobil endüstrisinde uzun yıllardır buna benzer yapılar kullanılmaktadır. Bu sistem elektronik kontrolcü algoritmalarıyla daha uyumlu çalıştığı otomotiv tarafında ve gelişmiş değişken süspansiyon üreticilerini araştırmalarıyla desteklenmektedir.

Günümüze ulaşan süspansiyon modellerinin ilk versiyonları çoğunlukla yanlış malzeme seçiminden kaynaklı hasarlardan dolayı geliştirmelerine ara verilmiştir. Malzemelerin kuvvet aktarımı ve doğal frekansı gibi birçok özelliği detaylı olarak incelenerek süspansiyon tasarımında kullanılması gerekmektedir. Teleskopik çatal gibi sürtünmenin kaçınılmaz olduğu sistemlerde aşınmaya bağlı olarak kritik parçalar üzerindeki gevşemeler ve hasarlar ciddi kaza riski oluşturmaktadır. Özellikle üreticiler belirli markalardan hazır süspansiyon tedarik etmesiyle bunun gibi sorunlar ortadan kalmaya başladı. Süspansiyon üreticileri gerçekçi deney düzenekleri ile uzun süreli olarak malzemeler için çalışma ömrü ve dayanım testleri üretim kalitesini oldukça artırmıştır. Düşük sürtünmeli, rijit kollar ve doğru yataklama desteklerine kavuşan teleskopik çatallar ters çevrilerek yaysız kütle ağırlığı oldukça azaltılmıştır. Bu geliştirmelerin tamamı gelişen malzeme biliminin katkıları ile mümkün olabilmektedir. Gelişmiş alüminyum alaşımları daha rijit bir çatal kolu sağlarken payandalar üzerinde düşük aşınmalı yataklar eklenerek uzun süreler aynı performansta çalışmasını sağlamaktadır.

3.4 Alternatif Malzeme Seçimi

Bisikletler daha gelişmiş haliyle motosikletler günümüze gelene kadar birçok malzeme çeşidi ile üretilmiştir. Bunlar motosiklet ve metalürji için büyük gelişmeler meydana getiren olaylardandır. Alüminyum alaşımları kadro ve jant için yeterli dayanım koşullarına elverişli hale getirilmesi ile otomotiv sektöründe şase ve jant malzemelerinin de değişmesine katkıda bulunmuştur. Özellikle bisiklet üzerindeki geliştirmelerin denemeleri sırasında daha az riskli durumlar yaşandığından farklı fikirler ortaya çıkmasında yardımcı olmaktadır. Bunların en büyük örneği bisiklet üzerine içten yanmalı motorların entegre edilerek motosiklete dönüşmesi ve elektrikli bisikletle başlayan geliştirmelerin otomotiv endüstrisini de değiştirmesi olarak gösterilebilir. Bugün bu geliştirmeleri yeni nesil elektrikli scooterlar üzerinden devam ettirilmektedir. Eski tip süspansiyon mekanizmalar adapte edildiği gibi özgün sayılabilecek birçok sönümleme mekanizması üretilerek bazı modellere entegre kit halinde online platformlarda satışa sunulmaktadır. Bisiklet üzerinden geliştirilecek süspansiyon modeli için en uygun malzeme araştırılacaktır.

3.4.1 Bisiklet Kadrolarında Malzeme Seçimi

Bisiklet tasarımında ilk düşünce kullanım alanı ve taşıyacağı yüküdür. Kullanım alanına göre tasarlanan kadro uygun malzemelerle yapılması kritik öneme sahiptir. Dağ bisiklet kadrolarında mukavemet ve kırılma tokluğu öne çıkarken yarış bisikletlerinde hafiflik ve sertlik ön plandadır. Her bisiklet türü kendine özgü tasarım çeşitleri vardır ancak ilk tasarım kriteri şasi ve çatalların normal kullanımda hasara uğramamasıdır. Bunun için tasarımda moment, ağırlık ve konumları hesaplanarak bisiklet türüne göre üretilmelidir. Malzeme olarak karbon çelikleri, krom molibden alaşımlı çelikler, alüminyum, magnezyum, titanyum ve karbon fiber materyalleri tercih edilir.

En İyi Malzeme ve Şekil Seçimi

Parçanın çalışma şartlarında taşıyacağı yükleri ve gerektirdiği dayanım şartlarını belirleyerek tasarım boyutlarında mümkün olan en az maliyetle ve hafif olacak malzemeyi seçmek gerekir. Bisiklet türlerine göre bazı malzemeler öne çıkmaktadır. Dağ bisikletlerinde malzeme tokluğundan dolayı alüminyum 6000- 7000 serileri kullanılır. Alüminyum alaşımlarının pek çok çeşidi var. Kabaca bir ayırım yapmak gerekirse daha sert ve katı olan 7000 alaşımı ile biraz daha hafif ve nispeten yumuşak olan 6000 alaşımı arasında yapabiliriz. 7000 alaşımlarında alüminyumun yanı sıra çinko ve magnezyum (kısmen bakır) bulunuyor. 6000 alaşımında ise silisyum ve magnezyum var. Kaynak esnasında deforme olma ihtimalleri bulunduğu için 6000 serilerinin işçiliği zor. 7000 alaşımlarına oranla daha yumuşak olmaları 6000'li kadroların darbe emici özelliği taşımalarını sağlıyor.

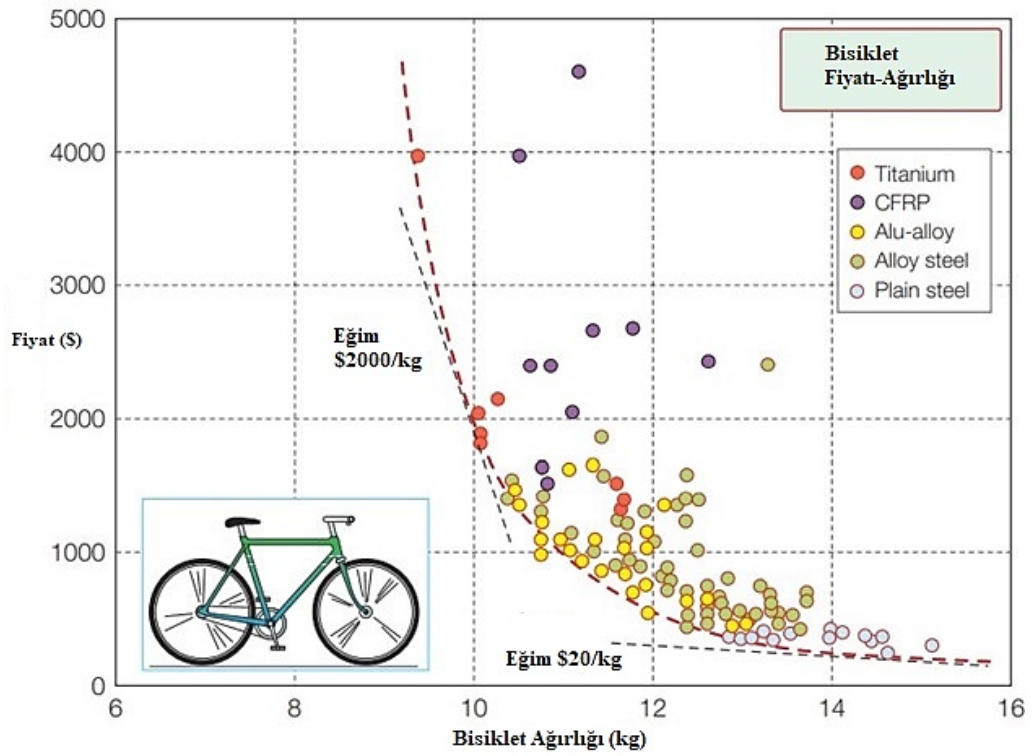
Yarış bisikletlerinde hava sürtünmesi minimuma indirebilme için pürüzsüzlük, kolay şekil verilebilme ve hafiflik özellikleri öne çıkan titanyum, magnezyum ve karbon fiber materyalleri kullanılır. Pahalı olması değerli malzemelerden ve çeşitli zor imalat sürecinden geçmesinden kaynaklanıyor. Karbon fiber malzemeyle üretilen bisikletler gevrek kırılma davranışı göstermeye yatkın olmaları yüzünden ve birkaç katmanın üst üste konmasıyla katmanlı bir formla oluşturduğu için üretimi zorlaştırır. Şehir ve çocuk bisikletlerinde hızlı seri üretim yapılabilecek kaynakla birleştirilen düşük maliyetli ve kolay tedarik edilen malzemelerden olan karbon çelikleri, krom ve molibden alaşımlı ıslah çelikleri tercih edilirler.

Üretim süreçleri ve pazar trendleri bisiklet kadrolarının şekillendiren en önemli etkenler. Üretim şartları kadro dizaynında başlıca sınırlamaları getiriyor. Çelik, gün geçtikçe ucuzlayan alüminyuma yerine tercih edilirken üretim şekilleri eski yöntemlerden uzaklaşmaktadır. Malzeme seçiminde nelere dikkat etmeliyiz?

Ağırlık, Geometri, Mukavemet, Şekil Alma, Korozyon Dayanımı, Kolay Üretim

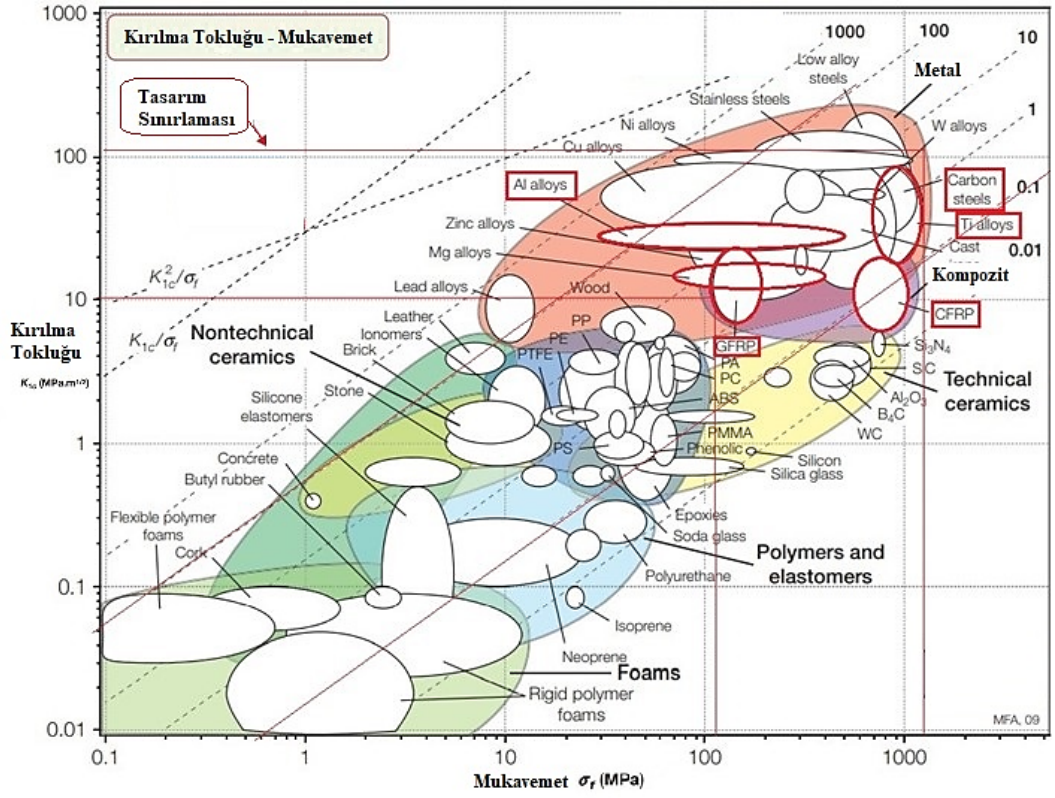
Tablo 7. Kadroları için Tasarım Gereksinimleri

Fonksiyon	Bisiklet Şasesi
Sınırlama	Bisiklet üzerinde oluşabilecek kuvvetlere dayanım sınırlamasıdır
Uzunluk	Kişiye göre belirtilen
Amaç	Kütleyi en aza indirmek
Serbest Değişken	Malzeme
Bölüm	Tasarım modeli



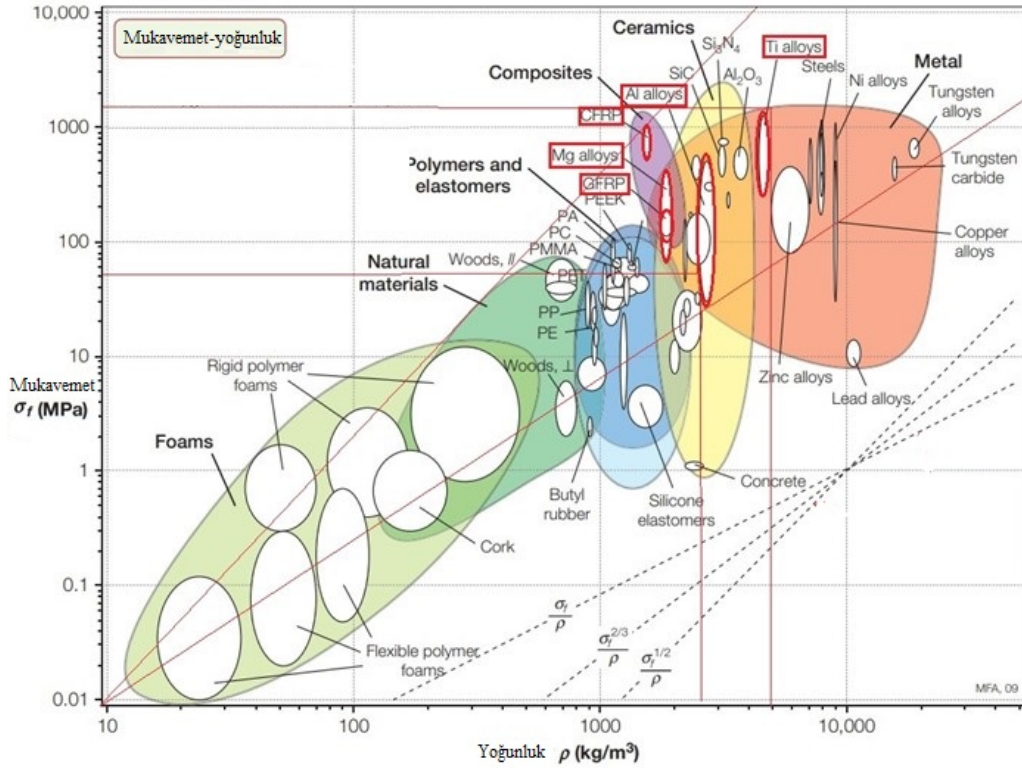
Şekil 3.12 Bisiklet fiyat -ağırlık grafiği (Ashby 2011)

Fiyatına göre ağırlık oranları karşılaştırıldığında da görülebileceği gibi alüminyum alaşımları en çok tercih edilme sebebi ortada fakat gelişen kompozitler ve alaşımların getirdiği avantajlarda spesifik noktalarda önlerde olduğunu görebiliyoruz.



Şekil 3.13 Kırılma Tokluğu/ Dayanım Grafiği (Ashby 2011)

Bisiklet malzemesinde seçimindeki en önemli faktör kırılma tokluğu ve dayanımdır. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi kırmızı alanlarla belirtilen noktadaki malzemelerin çoğu bisiklet yapımında tercih edilen malzemelerdir. Belirtilen alanda alüminyum, bakır, nikel, krom, titanyum, magnezyum alaşımlarıyla beraber dökme demirler ve bazı karbon kompozit malzemeler yer almakta bunların çoğu kullanılırken dökme demir, paslanmaz çelik ile spesifik materyaller (W, Cu, Ni) üretilme zorluğundan kaynaklanan nedenlerle daha önce hiç kullanılmamıştır. Kompozit malzemeler ve alaşımların gelişmesiyle günümüzde çok farklı malzemelerle yapılan bisikletler mevcuttur. Mevcut malzemeler bisiklet şasesi üzerinde popülerleşmesiyle motosiklet şase malzemeleri olarak kullanılmaya başlandığı görülmüştür. Özellikle karbon fiber kompozit gövde ve jant tasarımları bisiklet yarışlarında kullanılması motosiklet üreticilerinin bu üretim yöntemine yatırım yapmasını sağlamıştır. Ayrıca farklı süspansiyon tiplerinin başarısız modelleri üzerindeki malzeme geliştirmeleriyle düşük aşınmaya sahip rijit süspansiyon modelleri oluşturma imkânı vermiştir. Yeni prototip üretimlerinde farklı malzemeler ve üretim yöntemleri sönümlenme sonrası salınımı azaltırken geri bildirim hızını artıran özellikler kazandırmıştır.



Şekil 3.14 Kopma mukavemeti-yoğunluk grafiği (Ashby 2011)

Bisikletlerde ağırlık ve dayanım birbirine bağlı etkenlerdir. Genellikle ağırlık artıkça dayanımda artar fakat minimum ağırlık maksimum dayanım söz konusu olduğunda malzeme seçimi karmaşık hale gelmeye başlar. Tabloda belirtilen kırmızı aralıkta kalan malzemeler alüminyum alaşımları etrafında toplandığını görebiliyoruz. Alüminyum gün geçtikçe alaşımları artan ve ucuzlayan malzeme olarak avantajını sürdürmekte bunun yanında çeliklerden hafif olması üretim sistemlerini bu yönde geliştirilmesine yol açıyor.

Bu iki tablodan yararlanarak seçtiğim malzeme türlerinin alaşımlarını araştırdım. Bulduğum alaşımlarda çoğunlukla tercih edilen ve temini mümkün olan malzemeler seçilmeye çalışılmıştır. Çoğunlukla alüminyum alaşımları ve Krom-Molibden (Cro-Moly) alaşımlı çeliklerden üretilen seri üretim bisikletlerin fiyat avantajı sağladığı için vazgeçilmez malzemeleri oluşturmaktadır. Özellikle alüminyumunun hafiflik avantajı ve gün geçtikçe kolaylaşan imalat yöntemleriyle ön plana çıkarmaktadır. Seri üretime kolay adapte edilebilirliğiyle öne çıkan Krom-Molibden alaşımlı kadrolar uygun üretim maliyetleriyle üreticilerin ortak tercihidir.

Bisikletlerde kullanılan malzemeleri tercih edilme sıklığına göre sıralanırsa

- Krom-Molibden alaşımlı çelikler
- Alüminyum alaşımları
- CFRP Karbon fiber kompozit türleri
- Magnezyum alaşımları
- Titanyum alaşımları

Üretim adeti ve beklentiler dikkate alınarak bu malzemeler arasından seçtiğim malzeme alaşımlarının malzeme özelliklerini tablo halinde sıraladım. Bu seçimlerimde el yapımı üretimiyle yapılamayacak kadar fazla ve yeni bir firma üretecekmiş kadar üretimi kolay, bulunabilen ve uygun maliyetle üretilebilecek bir seçim yapılmıştır. Bu seçime şu an uymayan tek malzeme karbon fiber bunu seçmemdeki ana sebep seri üretim de kullanılan alaşımların gün geçtikçe elle üretim ve kompozit malzemelere yaklaştığını gözlemlemektir.

Tablo 8. Seçilen Malzemelerin Özellikleri

Malzeme Özellik	6061 Alüminyum (AlMg1SiCu)	7005 Alüminyum (AlZn45Mg1,5 Mn)	7020 Alüminyum (AlZn4,5Mg1)	7075 Alüminyum (AlZn5,5MgCu)	Karbon Fiber (CFRP)	Çelik Cro-Moly (25CrMo4)
Yoğunluk	2.70 g/cm ³	2.78 g/cm ³	2.78 g/cm ³	2.81 g/cm ³	1.7 g/cm ³	7.8 g/cm ³
Elastisite	69 GPa	70 GPa	71 GPa	71 GPa	295 GPa	195 GPa
Akma Dayanımı	270 MPa	290MPa	310 MPa	470 MPa	800 MPa	650 MPa
Çekme Dayanımı	310 MPa	350MPa	380 MPa	590 MPa	3100 MPa	950 MPa
Kesme Dayanımı	207 MPa	210 MPa	227 MPa	320 MPa	-	-
Uzama	%15	%12	%12	%8	%1,9	%12
Sertlik (Brinel)	90 -95	95-105	105 -125	140	180	215

Malzemeler kadar üretilme maliyetleri de dikkate değer bir öneme sahiptir. Bazı malzemelerin şekil alma kabiliyeti düşük iken bazılarının tedarik imkânı düşüktür. Bu yüzden malzeme özellikleri gibi üretilebilirlik faktörleri araştırılarak alternatifleri ile kıyaslanmalıdır. Üretim sayısına doğrudan etkisi bulunan bu özellikler arasındaki kıyaslama en kullanışlı malzeme seçimini yapacaktır. Üretim kolaylığı ile ürün kalitesindeki stabiliteyi yakalamak ve daha güvenli bir süspansiyon modeli sağlayacaktır. Seçilen malzemelerin üretilebilme faktörleri şu şekilde sıralanmaktadır:

Tablo 9. Seçilen malzemelerin üretilebilme faktörleri

Malzeme Özellik	6061 Alüminyum (AlMg1SiCu)	7005 Alüminyum (AlZn4,5Mg1,5 Mn)	7020 Alüminyum (AlZn4,5Mg1)	7075 Alüminyum (AlZn5,5MgCu)	Karbon Fiber (CFRP)	Çelik Cro-Moly (25CrMo 4)
Maliyet (TL/ cm ³)	12.9	13.6	14.8	16.8	298	10.31
Ağırlık	2.70	2.78	2.78	2.81	1.70	7.80
Mukavemet	69	70	71	71	295	195
Kırılma Tokluğu	25	25	24	24	20	50
Şekil Alma	15	12	12	8	2	12
Korozyon Direnci	5/5	5/5	5/5	5/5	4/5	2/5
Tedarik (gün)	2	7	7	3	14	2
Üretim Hızı	20	18	18	18	3	40
Üretim Maliyeti	4	4	4	4	14	2
Üretim Verimi	0.95	0.95	0.95	0.95	0.68	0.98

3.4.2 Aday Malzemeler ve Puanlama

Bisiklet malzeme seçimi için söz konusu olduğunda birçok faktör etkili olmaktadır, ama en önemlisi kullanılacak olduğun ortam şartlarına bağlıdır. Yani sürekli asfalt gibi düz zemin üzerinde gidecek bir bisikletle sürekli dağdan inme (downhill) bisikletleri aynı koşullar altında çalışmamaktadır. Bu yüzden genelin tercih ettiği orta sınıf dağ bisikleti şase ve süspansiyon malzemesi için üretim faktörleri arasında önem katsayı belirlemek için oluşturulan sıralama şu şekildedir.

- Maliyet
- Ağırlık
- Mukavemet
- Kırılma tokluğu
- Şekil alma
- Korozyon direnci
- Bulunabilirlik
- Üretim hızı
- Üretim maliyeti
- Üretim verimi

Önem katsayısı öznel bir nicelik olduğu için zamana ve konuma göre değişebilmektedir. Daha doğru bir sonuç için o an ki koşullar değerlendirilerek yeniden oluşturulmalıdır.

Tablo 10. Aday malzemelerin önem katsayısı ile puanlandırma grafiği

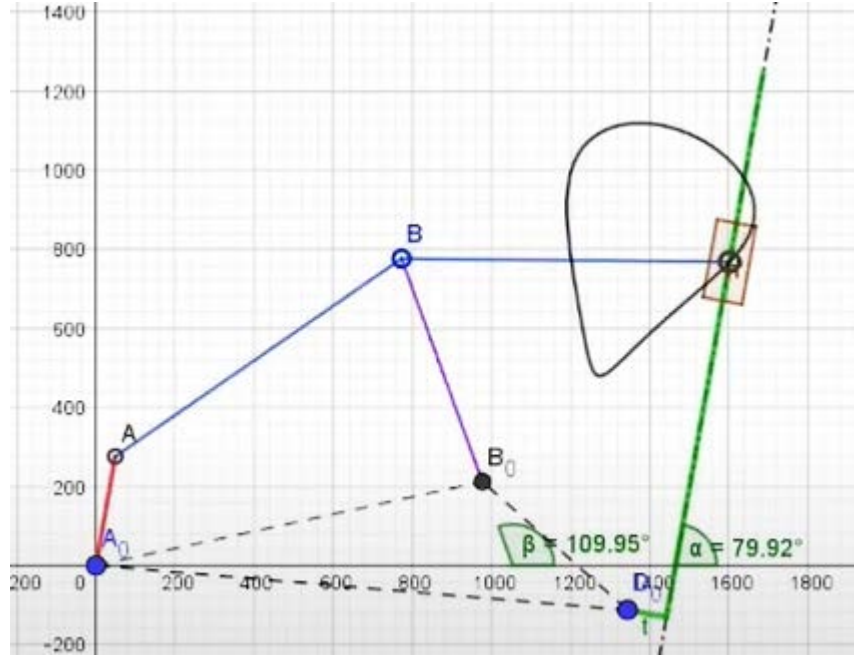
Malzeme	6061 Alüminyum (AlMg1SiCu)	7005 Alüminyum (AlZn4,5Mg1,5 Mn)	7020 Alüminyum (AlZn4,5Mg1)	7075 Alüminyum (AlZn5,5MgCu)	Karbon fiber (CFRP)	Çelik Cro-Moly (25CrMo4)
Özellik Önem Katsayısı						
Maliyet (TL/ cm ³) K _M = 8	8/10 64	9/10 72	8/10 64	8/10 64	1/10 8	9/10 72
Ağırlık K _M = 7	7/10 49	7/10 49	7/10 49	7/10 49	9/10 63	2/10 14
Mukavemet K _M = 7	6/10 42	6/10 42	7/10 49	8/10 56	10/10 70	9/10 63
Kırılma Tokluğu K _M = 6	7/10 42	6/10 36	6/10 36	7/10 42	1/10 6	10/10 60
Şekil Alma K _M = 5	9/10 45	8/10 40	6/10 30	6/10 30	1/10 6	8/10 40
Korozyon Direnci K _M = 4	9/10 36	9/10 36	9/10 36	9/10 36	8/10 28	5/10 20
Tedarik (gün) K _M = 4	8/10 32	4/10 16	4/10 16	6/10 24	1/10 4	8/10 32
Üretim Hızı K _M = 3	8/10 24	9/10 27	8/10 24	8/10 24	1/10 3	10/10 30
Üretim Maliyeti K _M = 2	8/10 16	8/10 16	8/10 16	8/10 16	1/10 2	9/10 18
Üretim Verimi (%) K _M = 2	9/10 18	9/10 18	9/10 18	9/10 18	6/10 12	10/10 20
TOPLAM	368	352	338	359	202	369

Malzeme Seçiminin Sonuçları İncelendiğinde;

1. Krom molibden en yüksek puanı alan yani kullanmanın en mantıklı seçim olacağını belirlenen adaydır. Çelik, yüksek mukavemeti yüksek toklukla birleştiren alaşımdır. Bisiklet üretiminde ilk malzeme seçeneği olarak değerlendirilmektedir.
2. 6061 alüminyum alaşımları farklı mukavemet değerlerindeki temperleri motosiklet ve bisiklet üretiminde hali hazırda çok popülerdir. Nispeten yüksek mukavemeti, iyi işlenebilirliği ve korozyona karşı yüksek direnci birleştirildiğinde yaygın olarak kullanılabilir. Düşük bir puan farkıyla ikinci alternatif malzeme olarak değerlendirilecektir.
3. Alternatif malzemeler arasından uygun üretim profili olan boru, lama ve mil şekillerine göre tercihler yapılacaktır.

4. YÖNTEM

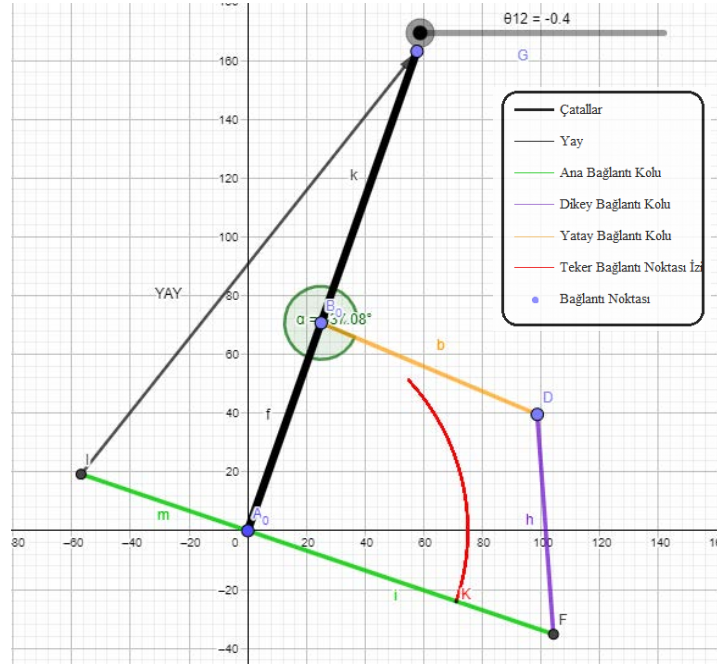
Bu tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen süspansiyon geometrisi etkin çalışması sağlandıktan sonra belirtilen farklı parametrik verilere bağlı olarak analizler ile optimize edilmesi sağlanmıştır. Bu mekanizmada her bağlantı kolunun, bağlantı türünün ve kullanılan malzemelerin önemli farklar oluşturduğu testler sırasında anlaşılmıştır. Bağlantı kollarının uzunlukları ve çalışma koşullarını geliştirmek için teorik verilerle hesaplamalar yapılmıştır. Mekanizma analizi programları ile ufak değişimlerin dahi daha kolay tespit edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.1 Geogebra Üzerinden Tasarlanan Bir Mekanizma

Geogebra programı, matematik ile geometriyi öğrenme ve öğretme amacıyla kullanılabilen, ilköğretimden üniversiteye kadar geniş bir kesime hitap eden özgür bir dinamik matematik yazılımıdır. Java tabanlı olarak geliştirilen bu program birçok platformda kolayca çalışabilmektedir. GeoGebra, matematiği somutlaştırır; girilen matematiksel ifadeler bir yandan grafik olarak görüntülenir. Noktalar, vektörler, parçalar, çizgiler, konik bölgeler ile birlikte fonksiyonlarla inşa yapılabilir ve ardından dinamik olarak değiştirilebilir. Çoğu kalkülüs tabanlı araçların yanında sağlanan birçok geometrik yapısı da desteklenmektedir. Serbest geometri modelleri arasındaki bağlantı tiplerini belirleyerek konum, hız ve ivme bileşenlerini hesaplayabilmektedir.

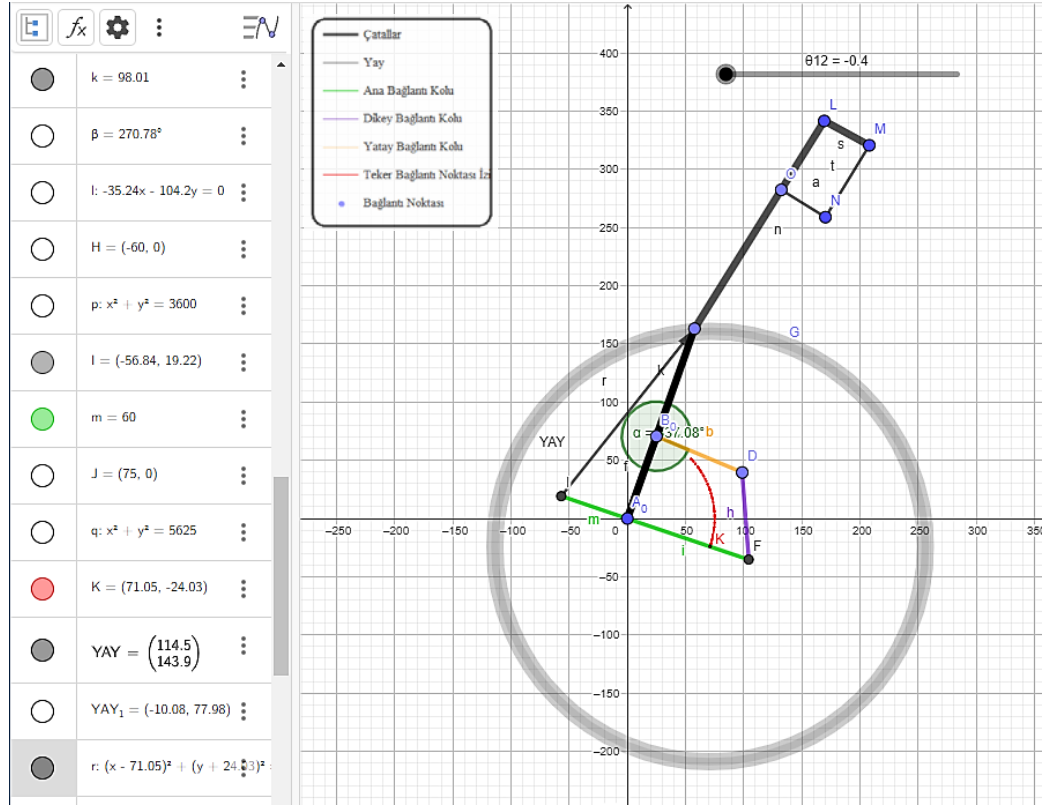
Dinamik araç modeli oluşturmanın basit yolu çalışma geometrisini belirlemektir. Belirlenen geometriyi basit bir mekanizma ile oluşturmak için Geogebra gibi dinamik tasarım programlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Geogebra programı üzerinde geliştirilen mekanizmalar arasında çalışma mesafesi ve geometrik izler çıkarılarak üretilmesi kolay bir mekanizma seçilmiştir. Bunun yanında mekanizmanın sönümlenme kabiliyeti değişken olabilmesi için yay konumu ve bağlantısı da dikkate alınması gereklidir.



Şekil 4.2 Geogebra Mekanizma Analizi

Mekanizma analizini incelediğimizde; Siyah kalın doğru, ana taşıyıcı çatal üzerine geçen mekanizma gövdesidir. Siyah ince doğru, bağlantı kolu ucundan ana gövde arasında esneyen bir yaydır. Yeşil doğru ise yay ve mekanizma gövdesine bağlı ana bağlantı koludur. Mor ve sarı doğrular mekanizmayı sabitleyen yardımcı bağlantı kollarıdır. Kırmızı ile gösterilen eğri ile mekanizmanın sönümlenme sırasında jant göbeğiyle nasıl hareket ettiği gözlemlemek için çıkartılan izdir.

Mekanizma tasarımında teker merkezinin montaj edileceği kısım belirlemek statik ve dinamik yükler bakımından da önemlidir. Süspansiyon çalışması sırasında tekerleğe gelen yüklerin oluşturacağı hareketleri bu bağlantı noktasına iletacaktır. Yoldan aktarılan kuvvetlerin bileşkesi geometrinin izin verdiği ölçüde sönümlene bilmektedir.



Şekil 4.3 Geogebra Süspansiyon Analizi

Tasarımlar arasında imal edilebilirlik açısından bakıldığında mantıklı görülen mekanizma seçilmiştir. Mekanizma bağlantı kolları uzunlukları birçok kez hesaplandığı halde cad tasarımlarında çalışabilirliği bakıldığında tekrar hesaplatılmıştır. Tekerlek sönmüleme esnasında bisiklet gövdesine çarpmasını engellemek için cad programında mekanizma gövdesi 80 mm aşağıya konumlandırılmıştır. Bu yüzden ideal kaster açısı olan 75 dereceden bisikletin aksenal olarak dönmesiyle daha geniş açılı bir versiyon türemiştir. Telelever süspansiyonda olduğu gibi çalışma aralığı ve mekanizmalar kapladığı alan gerçek üretimde analizlerdeki tasarımı tamamıyla korumak mümkün olmadığı görülmektedir. Tasarımlar ne kadar mükemmeliyetçi olsa da üretilebilirlik gibi faktörler nihai sonuç üzerinde beklenmeyen değişiklikler oluşturmaktadır. Basit bir deney düzeneği halinde üretilen ilk prototip kendi imkanlarım dahilinde tamamlanmıştır. Birkaç değişikliklerle optimum çalışma hassasiyetine kavuşan mekanizmanın bağlantı sıklığı ayarlanabilir sönmülemeye izin vermektedir. Yatay bağlantı kolunun çatalla birleştiği nokta çalışma açısını belirleyen bir değişken olarak belirlenmiştir. Dikey bağlantı yol konumuna dik gelecek şekilde bağlandığında daha net geri bildirimler alınmaktadır.



Şekil 4.4 İlk Deneysel Mekanizma ve İlki Üzerinden Gelişen Tasarım

Genel konsept, tipik araç ön süspansiyonu macpherson sistemini çağrıştırırsa da tam olarak aynı mantıkta sönümlenme yapmamaktadır. Bu model kaster açısı, ön tekerlek izi ve sönümlenme aralığı gibi değişkenler konusunda macpherson'dan ayrılmaktadır. Her parametre için geniş bir aralık mevcuttur, böylece bisiklet "karakterini" fark edilir şekilde değiştirme fırsatı sunar. Sürücü algısını ve motosiklet performansını tehlikeye atabilecek dinamik etkilerden kaçınmak için ön ucun genel boyuna, yanal ve burulma sertliği de dikkatli bir değerlendirme gerektirecektir. Mekanizma üzerindeki bağlantı noktaları sürtünmeleri sönümlenme enerjisinin kontrolünü sağlayacaktır. Bağlantı kolları üzerinden dağılan gerilmeler mekanizma ve teleskopik çatallardan ayrıştırılarak sönümlenecektir. Teleskopik çatalların çalışma mantığı belirli bir dikey yüke karşılık gelen yatay yükü absorbe etmektedir. Çatallara dik konumlandırılan mekanizma ise aktarılan yükün açısı fark etmeden sönümlenme tepkisini oluşturmaktadır. Çatallarda eğilmeyle başlayan sönümlenmeler özellikle iç içe geçmiş teleskopik çatallarda üzerindeki sürtünmeyi artırarak süspansiyonun çalışmasını engellemektedir. Ters teleskopik çatallar üzerinde bu etki bir miktar azaltılmıştır. Bu gibi durumlarda sönümlenmeyi mekanizma üstlenecektir.

Özellikle viraj alırken çatalların yatay eğilmeye zorlanması ve yoldaki bozuklukların düzleme dik açılarda etkiyen kuvveti süspansiyonun çalışmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bunu, geleneksel süspansiyonların üstesinden gelmek için yeterli donanımına sahip değildir. Böylece sönümlenme azaltılır ve bu da artan tekerlek sekmesine yol açar. Bu durumu düzeltmek için belirli bir dereceye kadar yanal eğilmeye yapısal uyum sağlamak için bazı girişimlerde bulunulmuştur, ancak henüz bu soruna genel kabul görmüş bir çözüm yoktur. Temel sorunun yetersiz sönümlenme olduğunu ve yetersiz yanal hareket olmadığını fark etmek, iyileştirme arayışını doğru yöne yönlendirmeye yardımcı olabilir.

Genelde daha yumuşak sürüş deneyimi isteriz ancak bu, mevcut hareket ve geometri değişikliklerine karşı dengelenmelidir. Frenleme, hızlanma ve viraj alma sırasında uygun davranış ihtiyacı da dikkate alınmalıdır. Sürüş sırasındaki çeşitli gereksinimler, 'herhangi bir bisiklet için mükemmel bir kurulum tasarlamayı imkânsız kılar, bu yüzden uzlaşma kaçınılmazdır. Konfor için ideal ayarlamalar, örneğin hızlı virajlarda eğilmeye veya belki de frenleme sırasında aşırı dalışa neden olabilir.

Mekanizma ile doğru ayarlanmış teleskopik çatal eğilmelere karşı daha az zorlanacağı için sönümlenme sertliğinin daha dar aralıkta tutulmasına imkân verecektir. Optimum sürüş kabiliyeti maksimum sönümlenme ve minimum eğilme gerilmesiyle elde edilmelidir. Kontrolsüz eğilmeler ve öne dalış süspansiyonu kötü etkilediği gibi sürücünün dengesini kaybederek hata yapmasına neden olmaktadır. Süspansiyon hareketi merkez düzlemde gerçekleşse de motosiklet dinamiklerinin sıkı entegrasyonu, diğer eksen, yalpalama ile ilgili tepkilere yol açabilir. Kötü ayarlanmış süspansiyon, yol tutuşunu azaltabilir ve bu tepkilerin tehlikeli dengesizlikler haline gelmesine izin verebilir.

Sürüşü daha güvenli hale getirmek için teleskopik çatalın eksiklerini mekanizma telafi edeceği ön görülmektedir. Mekanizmanın geriye doğru katlanması teleskopik çatal üzerine gelen yüklerin kaster açısı doğrultusunda tam sönümlenme ile çalışmasına imkân verecektir. Yatay viraj gerilmelerinde ise kenetlenen teleskopik çatal mekanizmanın doğru sönümlenme yapmasını sağlayacaktır. Teleskopik çatalın rijit davranışını mekanizma ile birleştirildiğinde eğilmelere daha az maruz kalan geniş sönümlenme aralığına sahip süspansiyon sistemi oluşturulacaktır.

5. ANALİZ ÇALIŞMALARI

Süspansiyon sistemleri güvenlik ve konfor sağlamak için tasarlanmış başarılı modelleri olsa da iyi tasarlanmadığında aldığı hasarlarla kullanıcıyı çok tehlikeli durumlar içerisine bırakabilir. Bunun birçok örneği mevcut süspansiyon sistemlerinde; bağlantı noktaları kırılma, rezonansla meydana gelen çatlaklar ve yol setleriyle burkulma ile sürüş hakimiyetini kaybetme gibi ağır sonuçları olmaktadır. Bunların önüne geçmek adına numerik ve deneysel analizlerle sistemlerinin emniyet katsayılarını yüksek tutmak gereklidir.

Bu aşamada prototip, ANSYS paket yazılımında Workbench yapısal analiz modülünde çeşitli analizler çözdürüldü. Sonlu elemanlar yöntemi ile birçok parça üzerine çalışırken gelebilecek değişken yükler yüklenerek analizleri yorumlanacaktır.

5.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu çözümü zor olan mühendislik problemlerinin kolay bir şekilde çözümünü sağlayan numerik bir metottur. Özellikle karmaşık olan problemlerin kolay ve kısa sürede çözülmesi bu metodu popüler kılmıştır. Sonlu elemanlar metodu karmaşık olan mühendislik problemlerini kendi içerisinde daha basit alt bölümlere ayırarak çözümü bu bölümler içerisinde gerçekleştirmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile karmaşık geometriye sahip çizimler modellendiği gibi bir bütün olarak diğer metotlarla çözülmesi imkânsız olan problemler de rahatlıkla çözülmektedir.

Çeşitli metotlar kullanılarak yapılan çözümlerinin hiçbirinde kesin bir çözüm elde etmek mümkün değildir. Kullanılacak olan metoda bağlı olarak yaklaşık bir çözüm elde edilmektedir. Sonlu elemanlar metodu ile çözülen problem hakkında yaklaşık bir çözüm önerir. Bu metotla eğer daha kesin sonuçlar elde etmek isteniyorsa tanımlanan düğüm noktaları ve eleman sayıları artırılması gerekir. Bu sayede çözümün doğruluğu artırılmış olur. Fakat sonlu elemanlarda düğüm noktaları ve eleman sayılarının artırılması çözümün doğruluğu açısından önemli ise de çok sayıda düğüm ve eleman tanımlamak problem çözümünde zaman almaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme, modal ve termal gibi analizler kolayca yapılmaktadır.

5.2 Mekanizmanın Statik Yapısal Analizleri

Günümüzde geliştirilen mekanizmaların kontrolünde bilgisayar destekli programlar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. İleri gelen programlar arasında bulunan ANSYS programı statik ve dinamik yapısal analizler konusunda mühendislik hesaplamaları desteği sağlamaktadır. Mekanizmaların çalışma durumunda yapısal bütünlüğünün kontrolü, her parça için dayanım hesaplanması ve kompleks yapıların analizleri insan yaşamını daha güvenli hale getirmektedir. Birden fazla analizle gerçek ortam koşullarında sistemler tekrar tekrar kontrol edilerek simule edilmektedir.

Gerçeğe en yakın sonucun doğru hesaplanabilmesi için her faktörün simülasyon üzerinde girilmesi gereklidir. Montaj koşulları göz önünde bulundurularak her parçanın gerilme, eğilme ve burkulma toleransları kontrol edilebilmektedir. Özellikle insan hayatı söz konusu olan araçların simülasyonlarla canlandırılarak daha güvenli hale getirilebilmesi bu programların değerini gün yüzüne çıkarıyor.

5.2.1 Ansys Mekanik Analiz

Mühendislik gerektiren tasarımlarda ana konstrüksiyonun kuvvetler altında formunu koruyabilmesi oldukça önemlidir. Bu yüzden mekanizmalardan önce ana yapının tasarlanması ve olağan statik yüklere karşı dayanımı hesaplatılmalıdır. Mekanik analiz ara yüzü ile parçaların malzeme özellikleri eşleştirilerek analiz alt yapısı oluşturulmaya başlanır. Malzeme özellikleri olarak izotropik ve ortotropik esneklik, doğrusal elastikiyet, hiperelastisite, plastiklik ve süneklik gibi değerleri kontrol edilerek parçaya özgü davranışlara daha gerçekçi boyutla incelenebilir.

ANSYS programının modülleri kullanılarak deformasyon, asal gerilme, kritik gerilme ve emniyet faktörü hesaplatıldığında konstrüksiyonun güvenilirliği hakkında bir veri elde edilmiştir. Bu veriler kullanım koşulları altında ekstra simülasyonlarla titreşim ve ısı etkenler karşısında tepkileri hesaplanabilir. Kullanılacak ortam şartları değerlendirilerek tasarımın üretilmesi veya revize edilmesi kararlaştırılmalıdır. Bu programlarla yapılan analizler tasarımların kusurlarının erkenden keşfedilerek giderilmesini sağlamaktadır.

5.2.2 Mesh Modeli Oluşturma


Sonlu elemanlarda gerçeğe yakın bir sonuç elde edebilmek için uygun element tipinin seçimi ve gerekli sayıda kullanılması önemli bir husustur. Kullanılan elementlerin büyüklüğü hesaplama alanı içindeki değişimleri yansıtacak kadar küçük olması istenir. Gereksiz çok sayıda eleman kullanılması da istenilmez. Bu durumda hem fazla hesaplama zamanı harcanır hem de sayısal hesaplamalarda oluşabilecek bir hatanın artmasına neden olacaktır. Gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler gibi sonucu daha fazla etkileyen kısımlarda element boyutları düşürülmelidir (Çayiroğlu 2019).

Örgü elemanları söz konusu olduğunda, simetri ve tekdüzelik birincil öneme sahiptir. Düzgün kenarlı simetrik elemanlar yüksek kaliteli elemanlar olarak kabul edilir. Bir ağ hücresinin "kalitesi" çeşitli şekillerde ölçülebilir. ANSYS, kalitelerini belirlemek için örgü elemanları üzerinde çeşitli geometrik kontroller gerçekleştirir. Bunlardan bazı kontroller veya ölçüler şunlardır:

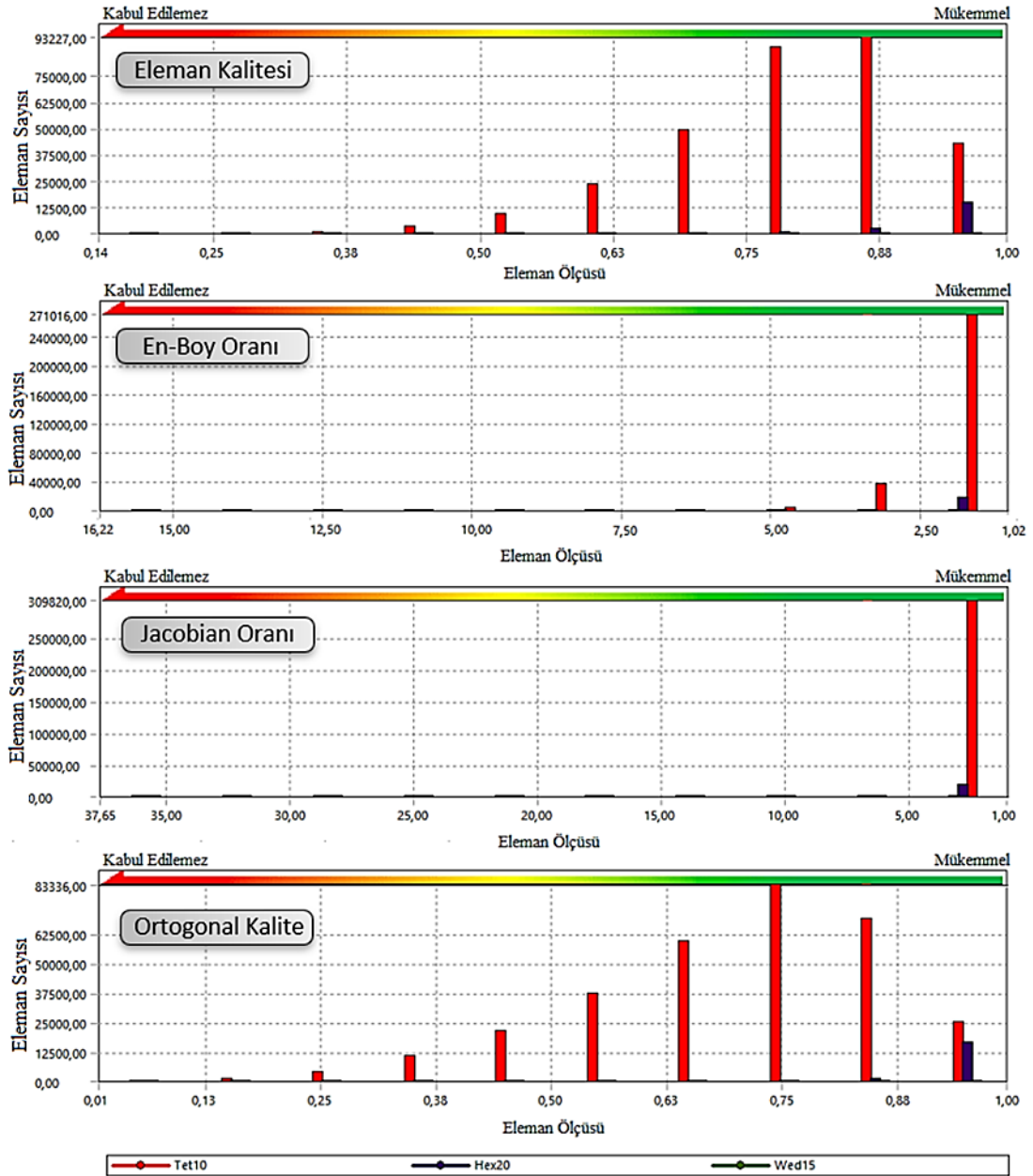
- Eleman Kalitesi
- En Boy Oranı
- Jacobian Oranı
- Ortogonal Kalite

Farklı metotlarla geometri düzenin doğruluğunu kontrol eden bu ölçüler sayısal verilerle açıklanması Ansys belgelerinden detaylarına ulaşılabilmektedir. Analiz doğruluğu yapısal, yüzeysel ve malzeme özelliklerine göre metotların önem sırası değişmektedir. Bu araştırma için kriterler aşağıdaki tabloda sıralanmaktadır.

Tablo 11. Mesh ölçü sınırlamaları

Mesh Modeli	<i>Kalitesiz</i>	<i>Kötü</i>	<i>Uygun</i>	<i>İyi</i>	<i>Çok İyi</i>	<i>Mükemmel</i>
Ölçek						
Eleman Kalitesi	0-5	5-20	20-50	50-80	80-95	95-100
En-Boy Oranı	60	40	20	10	3	1
Jacobian Oranı	270	90	30	15	10	1
Ortogonal Kalite	0-0.001	0.001-0.14	0.14-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1

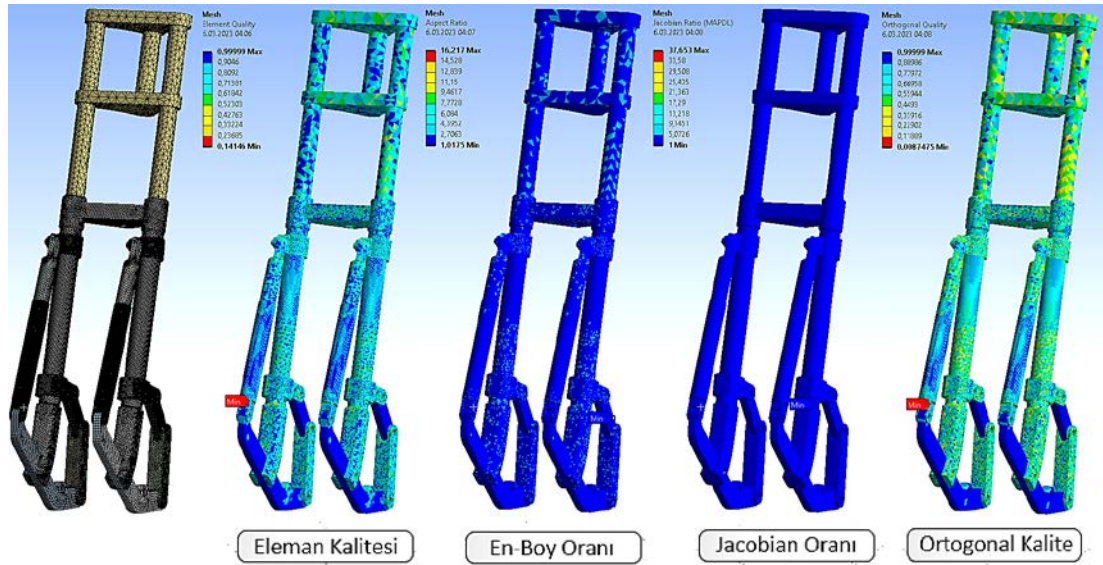
Mesh kalitesi genel olarak sınır değerler üzerinden yorumlanmaktadır ancak bu gibi çok parçalı montajlarda eleman sayısı yoğunluğu dikkate almak gerekmektedir. Herhangi bir parça üzerindeki görünmeyen kusur ve parça boyutları arasındaki farklar sınır değerlerini oldukça düşürdüğünde hesaplama üzerindeki güven azalmaktadır. Toplam eleman sayısına oranı detaylı olarak incelendiğinde sınır değeri değiştiren faktörü tespit etmek veya ihmal etmek tasarımcıya kalmaktadır.



Şekil 5.1 Mesh modeli için eleman sayısı -ölçüsü garfiği

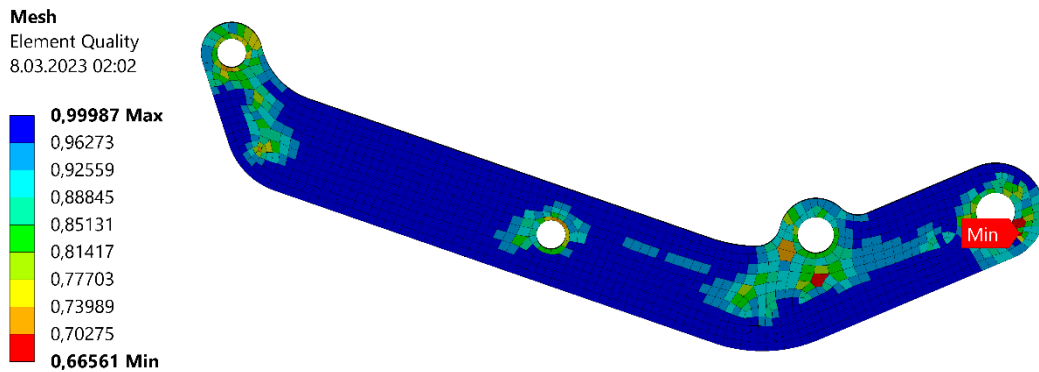
Grafikler incelenmesi mesh yapısına göre tetragonal kırmızı ve hexagonal mor olarak sınıflandırılmaktadır. Tetragonal mesh yapısı ağırlıklı olduğu ve hexagonal yapıların daha homojen yapıdadır.

Mesh ağ yapısının toplam eleman sayısı 327020 ve düğüm sayısı 641245 olduğu göz önünde bulundurulduğunda montaj üzerindeki sınırları düşüren kusurlar ihmal edilebilir. Yukarıda Şekil 5.1 de görüldüğü gibi genel eleman kalitesi kriter tablosuna göre çok iyi sınıfta yer almaktadır. Kritik olarak incelenen parça üzerlerindeki eleman sayısını artırmak için bölgesel meshlerle eleman sayısı artırılmıştır. Gerilmenin arttığı noktalar üzerinde mesh yapısını yoğunlaştırılarak gerçeğe en yakın sonuçları elde edebiliriz.



Şekil 5.2 Farklı ölçülere göre model üzerindeki mesh kalitesi

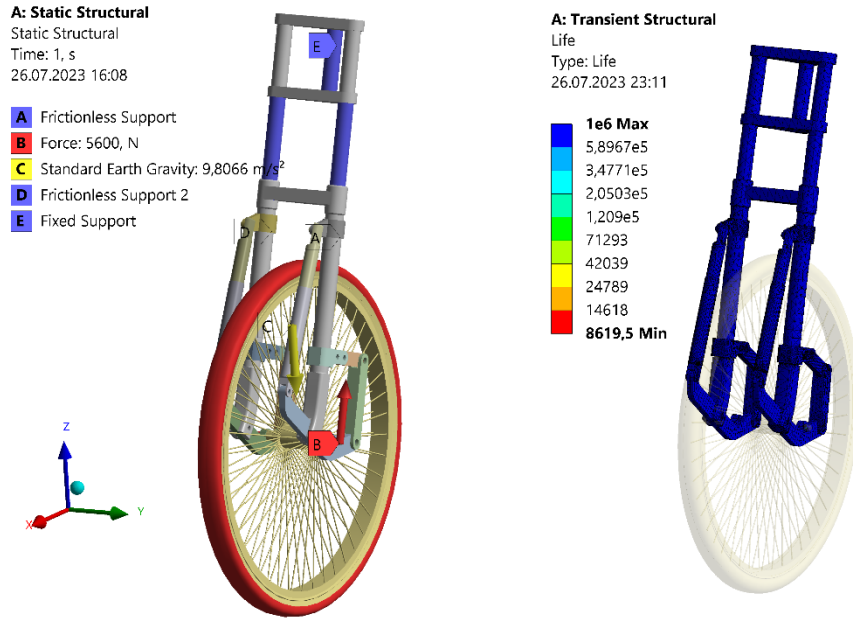
Tasarımın getirdiği spesifik parçalar üzerindeki dayanım dikkate alındığında mesh yapısı uygun görülmüştür. Gereğinden fazla eleman sayısı model üzerindeki değişikliklerin kontrolünde iş yükü oluşturacağından uygun şartlarda yalın olarak bırakılmıştır. Çatal kollarına entegre bağlantılar ve yük dağılımını sağlayan ana bağlantı kolunun mesh kalitesinin alt sınırları oldukça yüksek tutulmuştur. Montajla aynı ayarlarda ana bağlantı kolunun mesh yapısı aşağıda görülmektedir.



Şekil 5.3 Ana bağlantı kolu ve quadratic mesh yapısı

5.2.3 Sınır Koşulları Belirleme ve Yorulma Ömrü

Bir analiz çalışmasının matematiksel modelini oluşturula bilmek için tasarımın sabitleme noktaları, sürtünme ve yüklerin model üzerinde tanımlanmalıdır. Herhangi bir sonlu eleman analizi için, sınır koşulları simülasyonun doğruluğunu belirleyen kritik noktadır. Bunun nedeni, sınır koşullarının analizimizde doğrudan modellenmeyen diğer parçaların veya yapıların etkisini temsil etmesidir. Oluşturulan sınır koşullarının doğruluğu, analiz ve gerçek gerilme yüklerini birbirine yakınlaştırmaktadır.



Şekil 5.4 Model üzerindeki sınır koşulları ve yorulma ömrü analizi

Sınırlı koşullar altında yüklemelere maruz kalan parçalar belirli bir yorulma ömrü sonunda hasara uğramaktadırlar. Simülasyon üzerinde tanımlanan sınır şartlarına içinde döngüsel yüklemeler oluşturularak ortalama bir ömür belirlenebilir. Yorulma dayanımı hakkında bir fikir oluşturmak için parçanın yüksek ve düşük çevrim yoğunlukları belirlenmelidir. Bu basitçe süspansiyon mekanizması üzerinde günlük sınır şartlarına yaklaşan gerilme miktarını tanımlamaktadır. Süspansiyon üzerindeki kuvvet yüksek belirlendiğinden gerçekte bu yüklemeye ulaşma olasılığı çok düşüktür. Ancak yine de bu gerilmeler üzerinden yüksek çevrim için 100 döngü ve düşük çevrim için 20 döngü belirlenmiştir. Bu kabul üzerinden çalışma ömrü analizi yorumlandığında sistemin genel ömrü $1 \cdot 10^6$ çevrim yani ortalama kullanımda 20 yılın üzerinde bir dayanım sergileyeceğini göstermektedir. Ortalama 20 yıllık bir kullanım $4,32 \cdot 10^5$ döngüye karşılık gelen sınır şartı çevrimi olarak kabul edilmiştir.

5.2.4 Toplam Deformasyon Analizi

Toplam deformasyon analizi süspansiyon sistemi sabit noktadan başlayarak gerilme merkezine kadar deformasyon şemasını bize göstermektedir. Bu süspansiyon çalışmalarında oldukça önemlidir çünkü ilk tepkinin nasıl absorbe edileceğini bize renk değişimleriyle anlatmaktadır.

A: Transient Structural

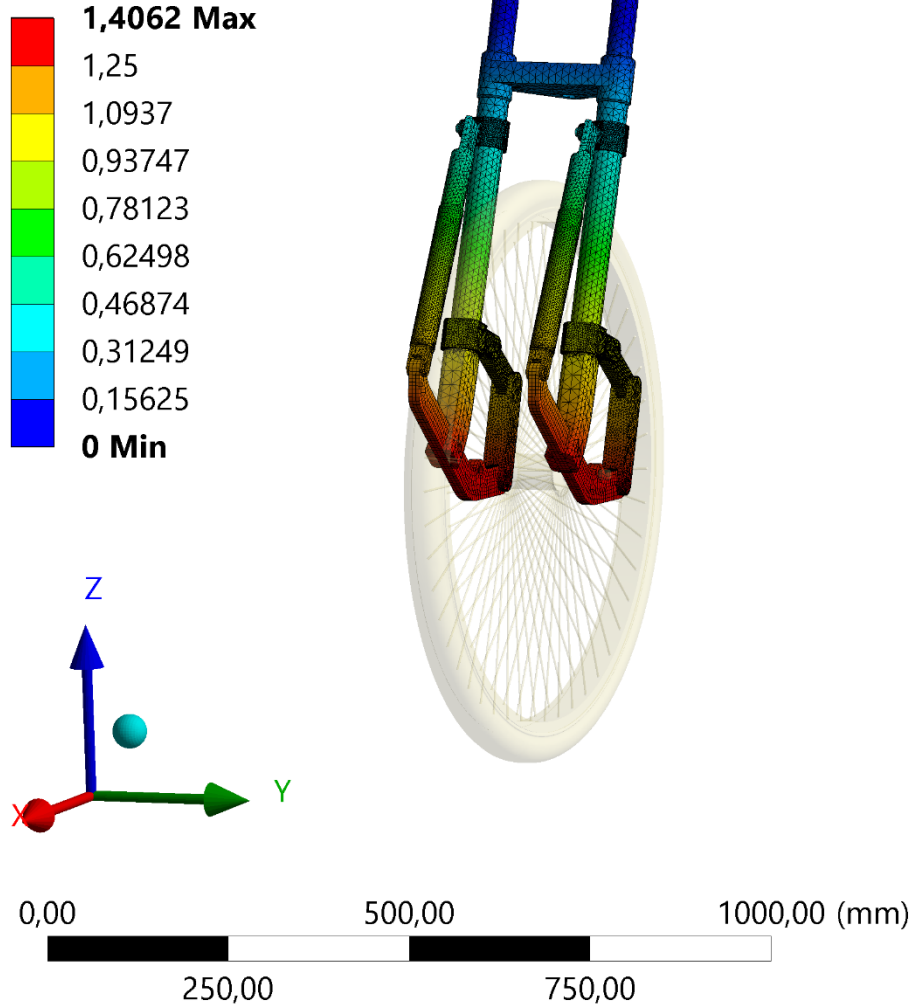
Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

12.12.2022 14:30



Şekil 5.5 Toplam deformasyon analizi

5.2.5 Eşdeğer Gerilme (Von Mises) Analizi

Eşdeğer gerilme analizi için maksimum ve minimum gerilmenin yüzey üzerinde dağılımı gösterilmektedir. Von-Mises gerilimi, tek eksenli çekme testlerinin sonuçlarından karmaşık yükleme altındaki malzemelerin verimini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Maximum nokta teleskopik çatalda olduğu gözlenmektedir.

A: Transient Structural

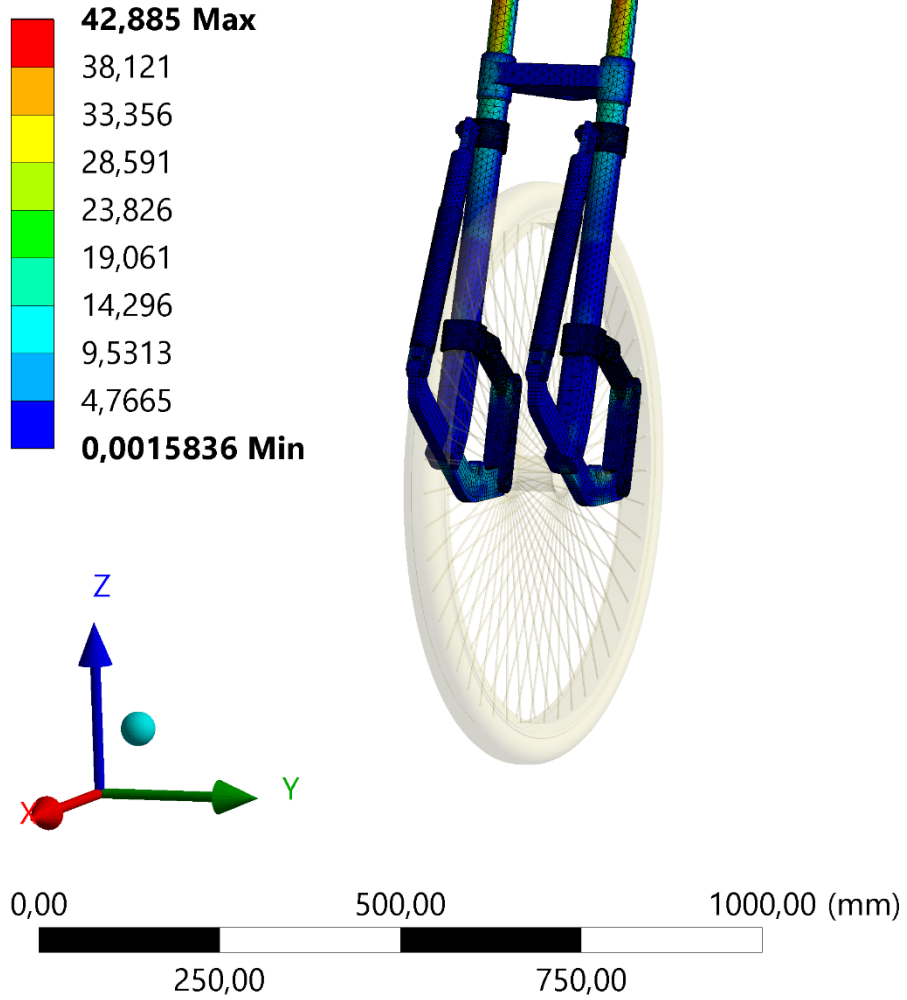
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

12.12.2022 14:30

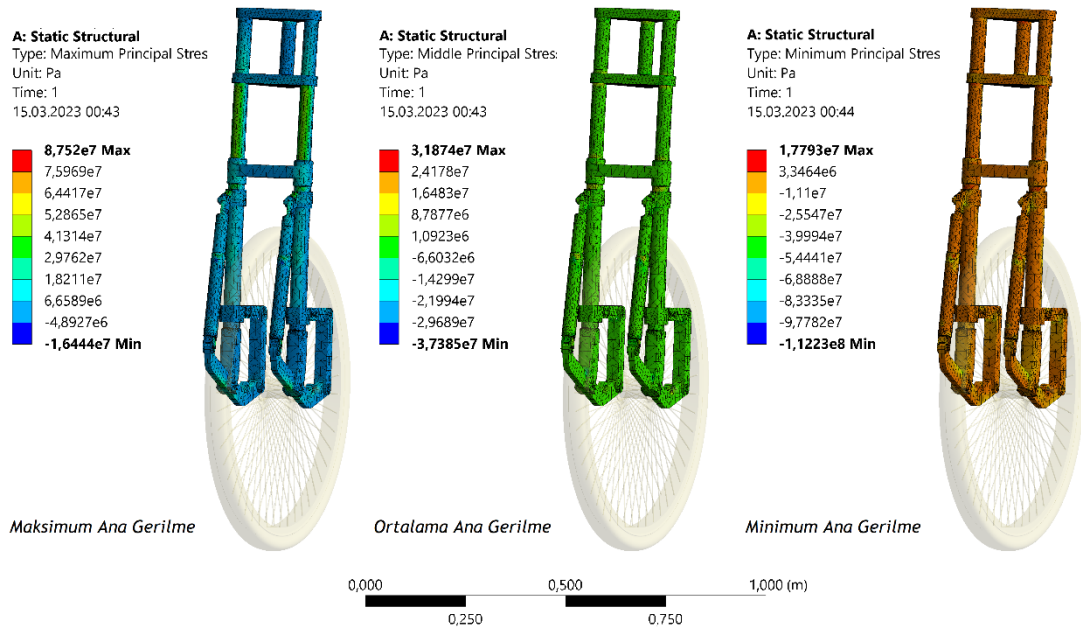


Şekil 5.6 Eşdeğer gerilme analizi

5.2.6 Asal Gerilme (Principal) Analizi

Eşdeğer gerilme analizi olası gerilme yoğunluğunun göstergesi olarak düşünülebilir. Asal gerilme ise bir mekanik tasarımın tasarım sınırları içinde olup olmadığını ve çalışma süresi boyunca güvenli bir şekilde çalışıp çalışmayacağını yargılamak için oldukça etkilidir.

Asal gerilme bir düzlemde, üzerine etkiyen maksimum gerilimdir ve bu durumda kayma gerilimi sıfır olarak ölçülür. Von Mises stresi, çoğunlukla sünek bir malzeme olması durumunda dikkate alınan, belirli bir malzemenin kırılma sınırını belirlemek için kullanılan bir değerdir.



Şekil 5.7 Maksimum, ortalama ve minimum asal gerilme analizleri

Süspansiyon parçaları herhangi ani kırılmaya karşı sünek karakter özellikleri sergileyecek şekilde tasarlanır. Genellikle alüminyum alaşımlarından üretilen jant, salıncak kolu ve amortisör tercihi bu yüzden. Sünek malzemelerin kırılmadan önce uzama ve sertleşme hareketi ile sistem üzerindeki enerjiyi absorbe ederken, sönümleme zamanını artırarak enerjinin diğer parçalara aktarılmasını sağlamaktadır. Gevrek malzemeler gibi ani kırılma yapmaması kullanıcıya kontrol imkânı verir. Maksimum asal gerilme analizinde görüldüğü üzere tasarımda gerilme yoğunluğu istenilen konumda yer almaktadır. Karşı konulamayacak şiddetteki yatay kuvvetler çatalın eğilmesiyle çarpışma şiddetini absorbe edeceği için bu şekilde tasarlanmaktadır.

5.2.7 Emniyet Katsayısı Analizi

Eşdeğer stres oranına ve malzeme özelliklerini değerlendiren program güvenlik katsayısı verilerini süspansiyon sistemi üzerinde göstermektedir. Teleskopik çatalların negatif özelliklerinden olan sürgüler kısmından eğilme bu sistemin en zayıf noktaları arasında ancak güvenli bölgede yer almaktadır.

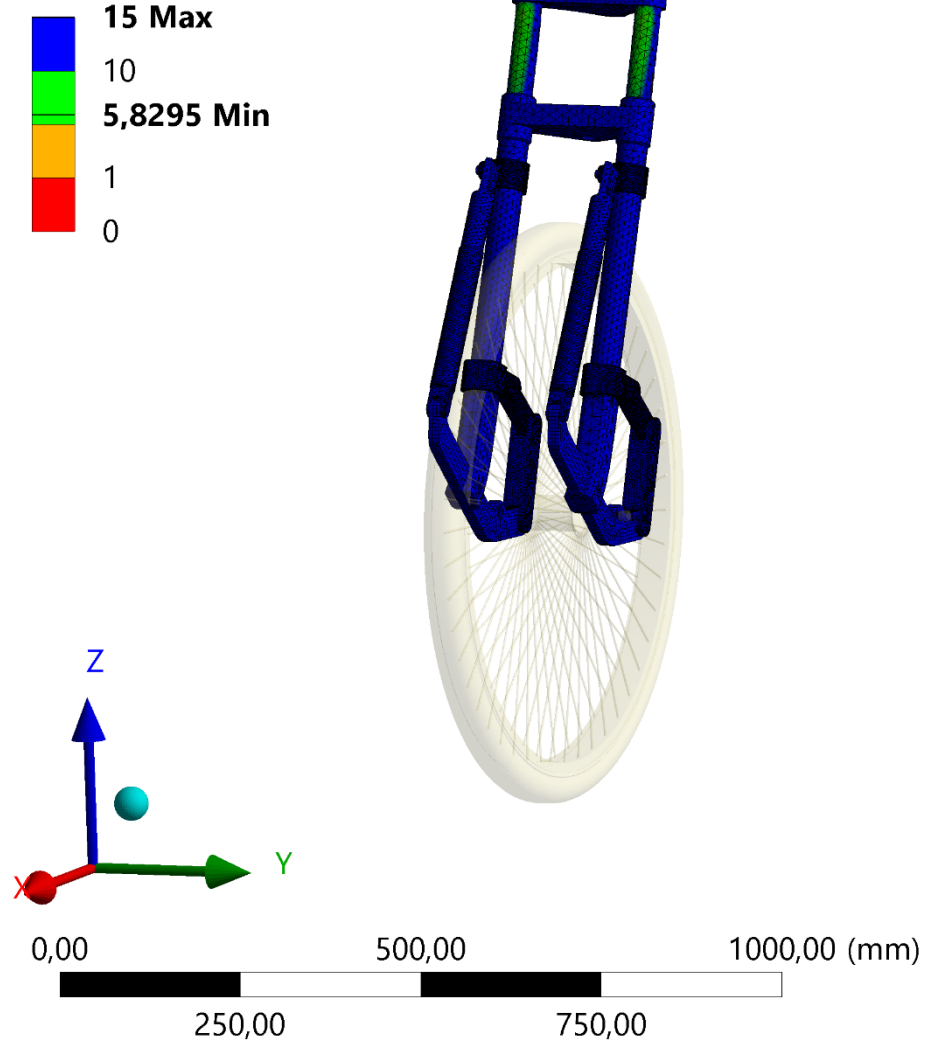
A: Transient Structural

Safety Factor

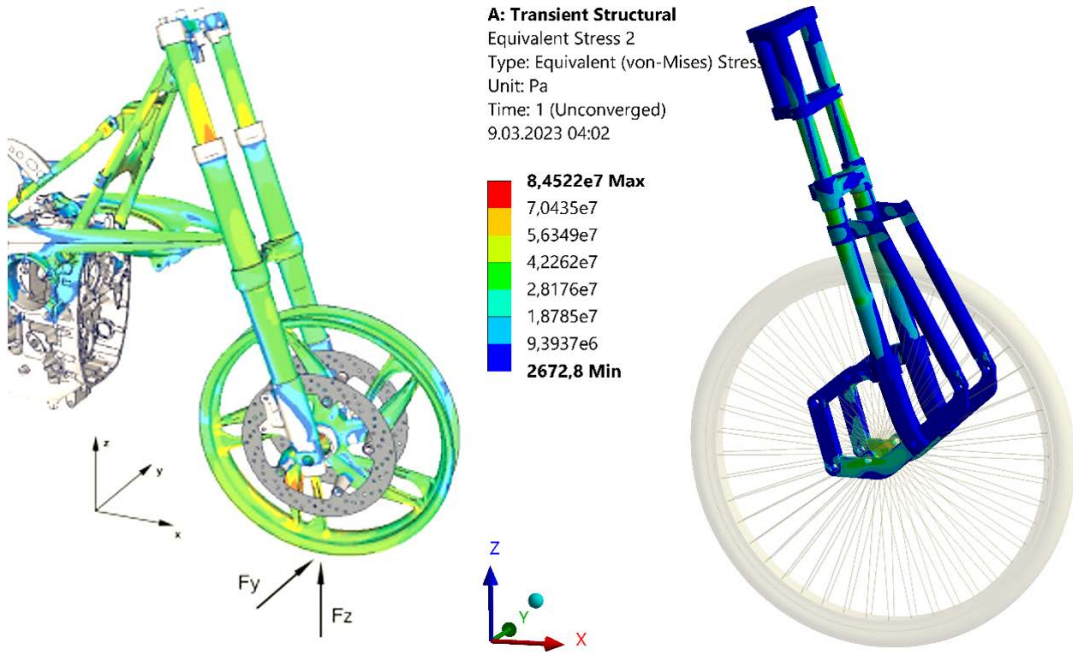
Type: Safety Factor

Time: 1

12.12.2022 14:31



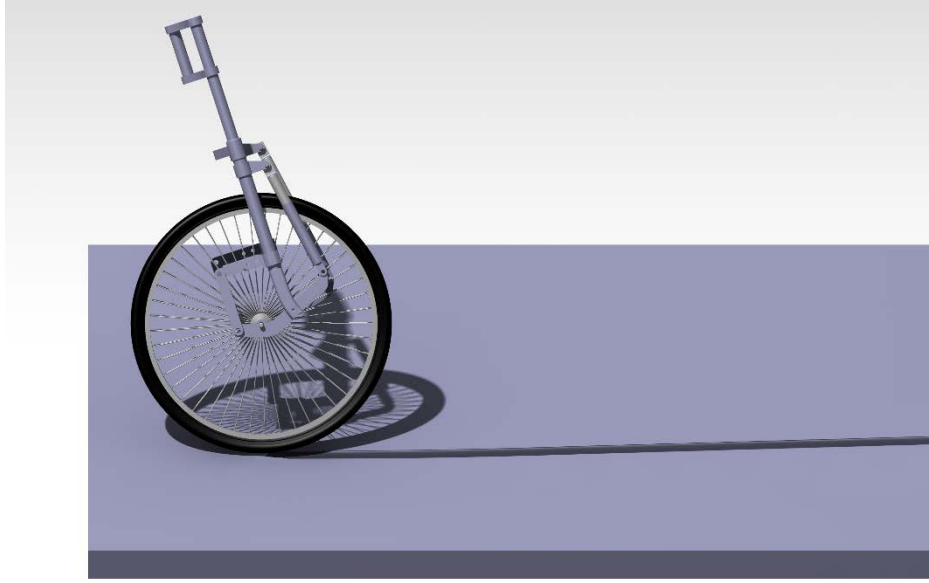
Şekil 5.8 Emniyet katsayısı analizi



Şekil 5.9 Benzer burulma yükü altında BMW R 1200 GS telelever ve sağda alternatif tasarımın sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılması (Braunsperger 2004)

Uzun yıllardır tartışılmasına rağmen rakipsiz olarak üretilen modellerin yarısını oluşturan bir pazara sahip GS halen telelever süspansiyon sistemini geliştirmeye devam etmektedir. Günümüzde birçok teknolojik özelliğe kavuşan bu süspansiyon sistemi ilk tanıtımlarında tasarımın güven algısını artırmak için dayanım analizleri ve özelliklerini barındıran makale yayınlamıştır. Tasarımın farklı süspansiyon modellerini çağrıştırdığı tartışılarda özgün bir tasarım olduğu kabul edilmelidir. Değişken sönümlenme sisteminin en büyük örneği olan telelever ile tasarım modeli üzerinde kritik gerilme dağılımları çatalın üst kollarında toplanmasıyla benzerlik göstermektedir. Değişken sönümlenme mekanizmaları birbirinden oldukça ayrılan tasarımlara sahip olduğundan ana ve destek kolları üzerindeki gerilmeler doğrudan karşılaştırılmaz. Ancak telelever sistemine şase bağlantısı sağlayan üst destek kolu tasarımdaki dikey ve yatay destek kollarındakine benzer gerilmeler göstermektedir. Özellikle sisteme ismini veren ana destek kolu telelever sistemi için kritik öneme sahip olduğundan özel üretim yöntemleriyle sertleştirilmiş dövme alüminyumdan üretildiği analiz ile de kanıtlanmıştır. Motosiklet kullanımını kolaylaştıran bu süspansiyon sistemi güvenliği elden bırakmamıştır. Tasarımdan ana bağlantı kolu üzerinde kritik gerilme oluşmasada bir yoğunluk mevcuttur. Bu yüzden tekerlek mili bağlantısını deneysel mekanizmada olduğu gibi alt kısma almak yük dağılımını kolaylaştıracaktır. Tasarım ile telelever süspansiyon sistemi doğrudan mukayese edilmesede çıkarım yapmak mümkündür.

5.3 Süspansiyon Sisteminin Dinamik Modelleri



Şekil 5.10 Dinamik Süspansiyon Modeli

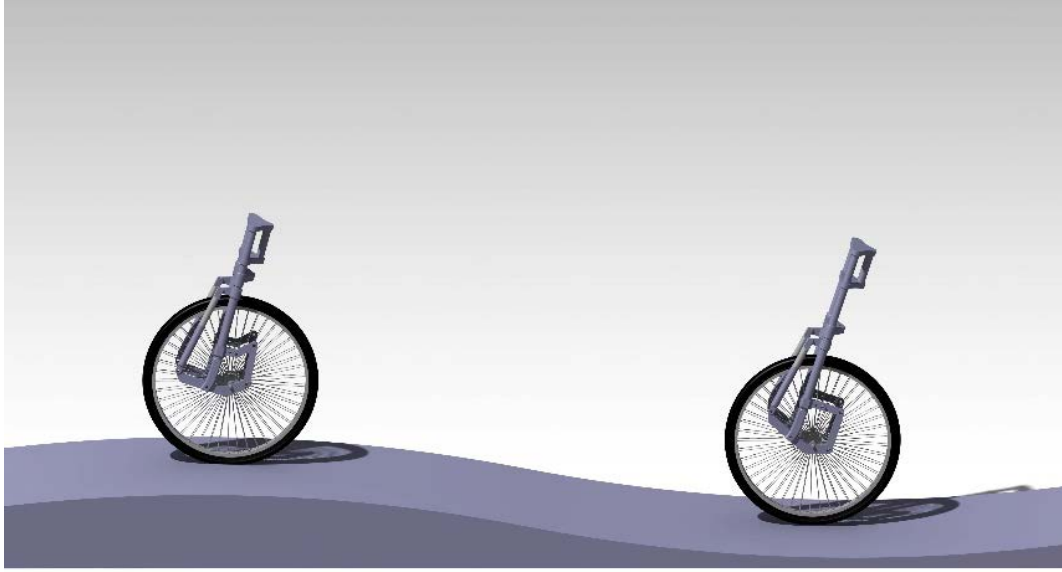
Eğimli bir yol modeli üzerinde dinamik süspansiyon hareketlerinin simülasyonu oluşturuldu. Otomotiv süspansiyonlarında olduğu gibi iki teker arasındaki düzensiz çalışma balans bozukluğu yarattığı için bağlantı kurulmuştur. Çatallar üzerindeki mekanizmalar arasındaki tek bağlantı bir taraf fazla çalıştığında sürüş yönü o yana doğru çekme yapmaktadır. Mekanizmalar arasında yatay torsiyon bağlantısı kurulması ekstrem durumlarda kontrol kaybetme olasılığını önleyebilir.

Çeşitli analiz programıyla yapılan analizler grafikler ve değerler vermesine rağmen deneyimlerle test edilmediği sürece anlamlı bir sonuç elde etmek oldukça zordur. Bazı olumsuz tepkileri keşfedildikten sonra yeni tasarımlarda nasıl giderilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu sistem simule edilerek aynı aşamalarından geçtikten sonra deney düzeneğine uygulanabilirliği kontrol edilir. Tasarımın entegrasyon kısmı çözümlendiğinde eksiklikleri üzerinde araştırmalara başlanmıştır. Entegre parçalarla simülasyon analizlerine devam edilerek çalışma sırasındaki durumu incelenir.

Süspansiyon çalışması olağan durumlarda iyi sonuçlar vermeye başladıktan sonra ekstrem durumlarda tepkilerini incelemek gerekmektedir. Ön tekerleğin kilitlemesi ya da yüksek bir sete çarpması gibi durumlarda hasarı minimize ederek sürücüyü güvenli alanda tutması beklenmektedir. Birkaç eksiklik tasarım üzerinde geliştirildikten sonra geliştirilmiş süspansiyon sistemi üzerinden simülasyon sonsuz döngü üzerinde çalıştırılarak mekanizma test edilmiştir.

5.3.1 Süspansiyon Sisteminin Ekstrem Durum İçin Dinamik Modeli

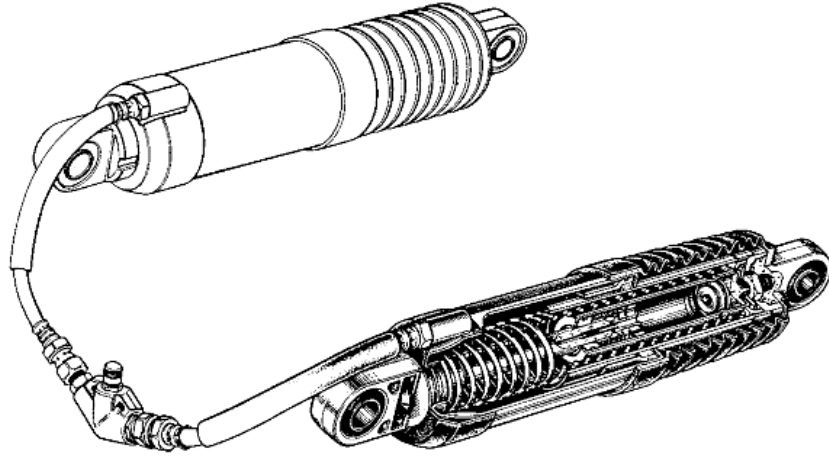
Birden fazla kaza videosu üzerindeki incelemeler sonucunda birçok kaza başlangıcı ön tekerleğin kontrolsüz kayması ile başlamaktadır. Ön tekerlek yönlendirici olduğu kadar denge sağlama konusunda da oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu yüzden ön tekerleğe kaldırım ve dairesel bir set üzerinde geçişinde vereceği tepkiler simule edilmiştir.



Şekil 5.11 Ekstrem durum model örnekleri

Simülasyonlar da ortaya çıkan eksiklikler üzerinde çalışıldığında diğer değişken sönümlmeli süspansiyon sistemlerinin bu sorun üzerine nasıl yaklaştığı tartışılmıştır. Genel kanı sol ve sağ bağlantı kollarını tek amortisöre bağlayan bir çatal bağlantısıyla çalışmasını eşitlemektir. Böylece yatay zorlamalara karşı aynı tepkiyi veren mekanizma sürüş sırasında yalpalama gibi davranışlara mücadele göstermeyecektir. Diğer bir açıdan ise bu bağlantı kolu eğilmeye karşı direnci sönümleme ve geri bildirim dengesini belirleyecektir. Earles çatalında olduğu gibi arkadan yatay kolları birbirine bağlamak torsiyon işleviyle sönümleme kabiliyetini korurken çalışma geometrisini değiştirmesi kötü bir sonuç olacaktır. Süspansiyon sistemini oluşturan tüm parçaların üzerinde çalışmanın yolu gerçek deneysel mekanizma üzerindeki deneyimlerle ortaya konmaktadır. Gerçek tepkilerden alınan geri bildirimler keşfetmek sisteme güven duygusu kazandıkça artarak giden bir durumdur. Bu yüzden ilk tasarımların sürüş üzerindeki etkileri incelemek için simülasyonlar kullanılır.

Mekanizmanın geriye doğru kapanarak çalıştığı için jant üzerine gelen fazla yükten sonra geriye doğru yükselerek tekrar konumunu almaktadır. Bu durum diğer değişken sönümlenme sistemlerinde öne doğru olduğu için mekanizmaları kilitlenmektedir. Bu simülasyonla test edilen mekanizmanın çalışması doğrulanmış olup deney düzeneğine aktarılmıştır.



Şekil 5.12 İkiz Arka Süspansiyonlar (Foale 2006)

Bu durumda genellikle arka süspansiyonlarda kullanılan pnomatik veya hidrolik bir teknik mekanizmaya entegre edilebilir. İlk defa 1980'li yıllarda çeşitli tür motorlarında kullanılan bu teknik iki amortisör arasındaki yükü paylaşır. Şekil 5.12'deki gibi boru bağlantısıyla iç basınçları birbirine eşitleyerek farklı yüklerle izin vermektedir. Bağlantı arasında bulunan valf yardımıyla ayarlanabilir sönümlenme kabiliyeti kazanır.

Teleskopik çatalların eğilmeye zorlanmadan çalışabilmesi için mekanizmanın gelen yatay yükleri iki yönlü olarak eşitlemesi gerekmektedir. Mekanik bağlantıları artırılarak çözülebilen bu sorun mekanizmanın karakteristik özelliklerini törpülemektedir. Bu yüzden mekanizma üzerindeki yaylar pnomatik vakum silindirleri arasında Şekil 5.11 'deki gibi bir bağlantı yöntemiyle bir miktar izin verilebilir. Ekstra olarak mil bağlantısıyla eşitlenilmeye çalışılan mekanizmalar uzun kullanımda mil üzerindeki yorgunluk dikkate alınarak incelenmelidir. Tekerlek konumu sınırlayan kauçuk takozlar mekanizmanın kapandığı noktaya gelecek şekilde konumlandırıldığında sert bir sönümlenme sonrasında dahi kolayca stabil konumuna geri dönmeyi sağlayacaktır.

5.4 Süspansiyon Sisteminin Doğal Frekans Analizi

Doğal frekans: Bir cismin sadece esnekliğine ve kütesine bağlı olan ve cismin o frekansta uyarılırsa yüksek genlikle ve sürekli olarak titreşeceği frekansa "Doğal Frekans" denir.

Süspansiyon sistemleri için frekans uyumu oldukça önemli bir konudur. Sönümlenme esnasında oluşan titreşimler bir parçanın doğal frekansını yakalaması durumunda bir süre sonra hasar, ayrılma ve çatlak oluşumuna neden olabilir. Süspansiyon sistemi çalışma koşulları yüksek genlik ve aralıklarında titreşime maruz kaldığından yalıtımı dikkate alınması gereken bir husustur. Seçilen malzeme özelliklerine bağlı olarak sönümlenme sırasında absorbe edilen enerjinin bir kısmı titreşim dalgalarıyla diğer parçalara aktarılmaktadır. Özellikle art arda sönümlenmeler sırasında aktarılan iki farklı dalga frekansı etkileştiğinde rezonans meydana gelmektedir.

Rezonans: Bir cismin doğal frekansı ile çakışan bir frekansta uyarılması veya bir milin kritik hızında döndürülmesi sonucunda ortaya çıkan fiziksel olaya Rezonans denir. Rezonansa girmiş bir cisim aşırı şekilde titreşir. Zira bu frekansta o cisim üzerine etki eden atalet kuvvetiyle cismin esnekliğinden kaynaklanan yay kuvveti birbirine eşit; fakat ters işaretli olduğundan birbirini götürür. Geriye sadece sönümlenme kuvveti kalır. Bu kuvvet de sönümlenme katsayısına bağlı olarak cismin hangi genlikle titreşeceğine karar verir.

$$M \frac{d^2}{dt^2} X + C \frac{d}{dt} X + KX = F \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.4.1)$$

Şayet yukarıda anlatıldığı şekilde M kütesi F genliği ile etki eden sinüzoidal bir kuvvet etkisiyle. K yay katsayısına ve C sönümlenme katsayısına sahip bir yayın ucunda asılı şekilde X genliği ile titreşiyorsa, bu F kuvveti ortadan kaldırıldığında titreşmeye devam ediyorsa o zaman frekansı, doğal frekanstır. Yukarıdaki 1 nolu denklem denklemin sağ tarafı 0 olacak şekilde yeniden yazarsak,

$$M \frac{d^2}{dt^2} X + C \frac{d}{dt} X + KX = 0 \quad (5.4.2)$$

Birinci terim atalet kuvvetini, ikinci terim sönümleme kuvvetini ve üçüncü terim de yay kuvvetini gösterir. Birinci ve üçüncü terim birbirini götürdüğünde yay-kütle sistemine etki eden sadece sönümleme kuvveti kalır. Öyleyse, rezonans meydana geldiğinde titreşim genliğine sadece sönümleme katsayısı karar verir. X 'in ($X=x.\sin(\omega t + \varphi)$) şeklinde bir sinüzoidal olduğunu hatırlayıp, ivme ile deplasmanın birbirlerine 180 derece açıyla etki ettiğini göz önüne alarak bu iki kuvvetin nasıl birbirini götürebildiğini görebiliriz. Sönümleme arttırıldığı takdirde, titreşim genliğini azaltmak mümkündür (Çağlayan 2009).

Süspansiyon sistemimizde, sönümlenmeler sırasındaki yaylar üzerindeki gerilmeler sürüş sırasında titreşimler oluşturmaktadır. Ancak sönümleme gerçekleşikten sonra titreşimler belirli genliklerle devam ederek kullanıcıyı rahatsız edebilmektedir. Titreşim genliği sürekli azalarak değiştiğinden bir süre sonra ses oluşturmaya başlayabilir. Bu titreşimler parçaların doğal frekansı değerine ulaşmadan süspansiyon takozlarıyla durağan durumuna stabil hale getirilmelidir.

Sönümleme, amortisörler kullanılarak veya sönümleme plakaları kullanılarak arttırılabilir. Birisi sabit zemine diğeri de şaseye tespit edilecek ve birbirine civatalarla çok sıkı olmayacak ve sürtünerek hareket edebilecek şekilde iliştilmiş plakalar bu ilave sönümlemeyi sağlayabilir. Özellikle yapısal titreşimlerin sönümlemesinde binaları ne kütlelerini ne de yay katsayısını değiştirmek çok masraflı ve pratik olmadığından sürtünme plakaları kullanılır. Hatta bunlar deprem titreşimlerinin etkilerini azaltmak içinde kullanılır.

5.4.1 Süspansiyon Sisteminin Modal Analizi

Modal analiz, nesnelerin yapısal dinamiklerini, yapıların ve nesnelerin nasıl titreştiğini ve uygulanan kuvvetlere ne kadar dirençli olduklarını anlamak için vazgeçilmez bir araçtır. Böylece tasarımlar test edilebilir, optimize edilebilir ve doğrulanabilir. Modal Analiz, kullanıcıya nesnenin doğal frekansları, sönümleme parametreleri ve yapısal mod şekilleri hakkında genel bir izlenim sunabilir. Böylelikle kullanıcı, nesneyi uygulanan kuvvetlere daha az duyarlı olacak şekilde değiştirebilir, örneğin; şekil ve kütleye göre nesne tasarımını optimize edilebilir.

ANSYS Workbench'de elde edilen analizlerin mod biçimleri aşağıda gösterilmiştir. İlk modda süspansiyon sisteminin genel çalışma koşullarında sürekli aldığı dik kuvvetlerin etkisini gözlemlemekteyiz. Gayet rijit özellikler sergileyen yapıda mekanizmanın total deformasyon analizi frekansı 2,0042 Hz'de 0,090342 mm maksimum yer değiştirme olarak hesaplatılmıştır.

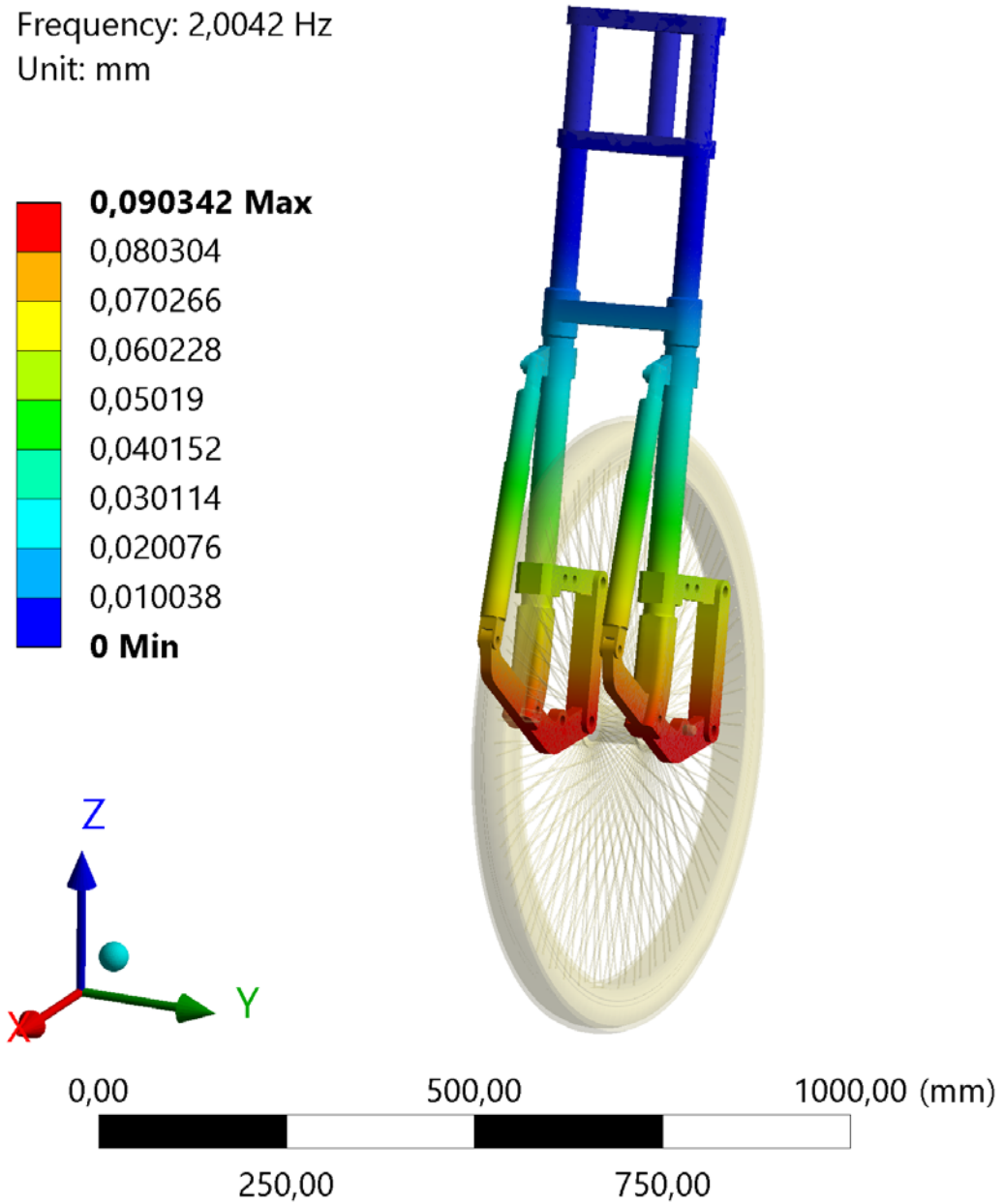
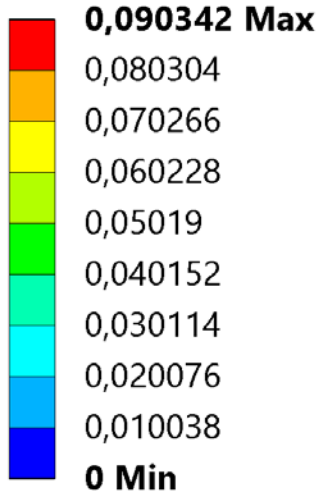
A: Modal

Total Deformation 1

Type: Total Deformation

Frequency: 2,0042 Hz

Unit: mm

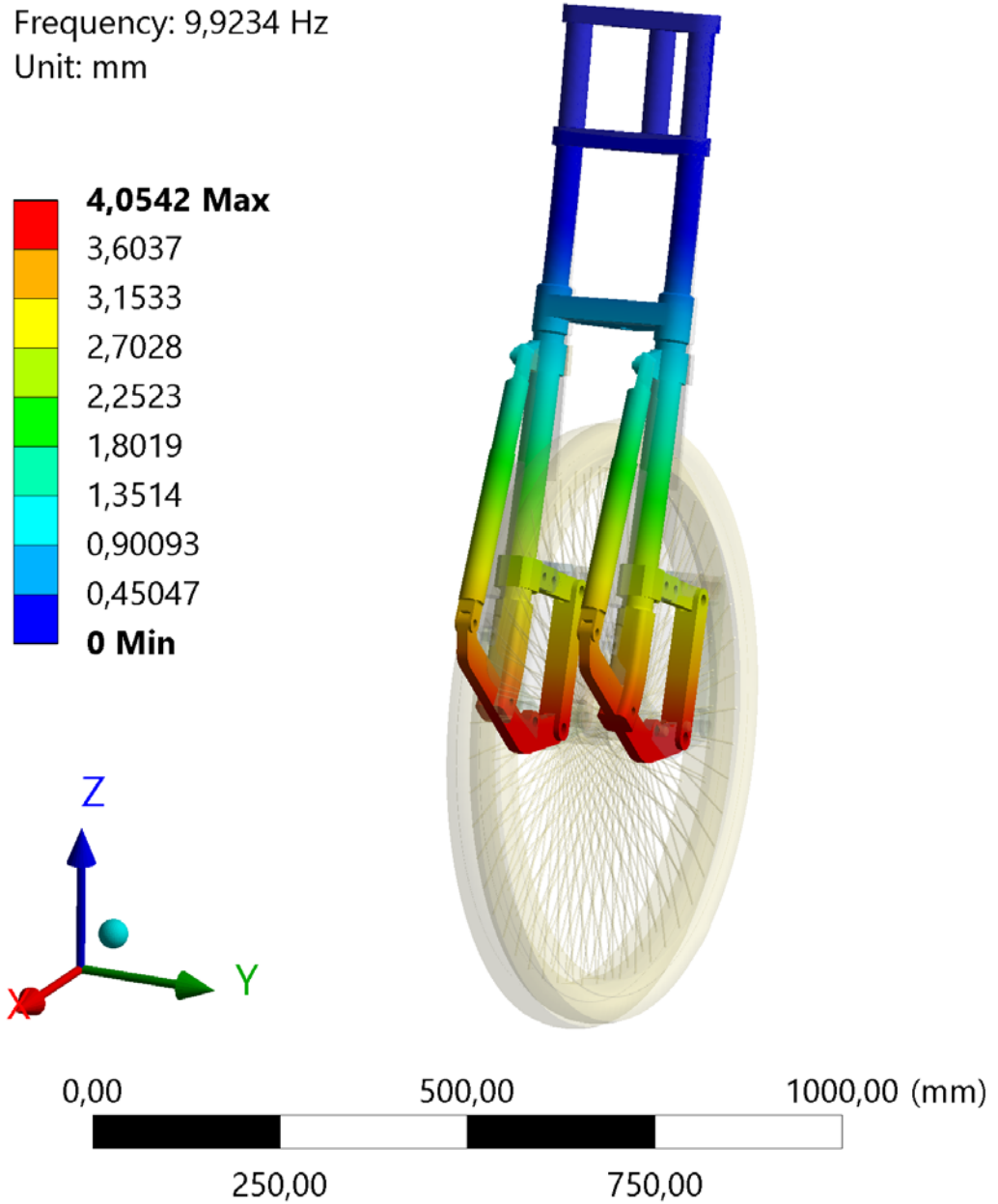
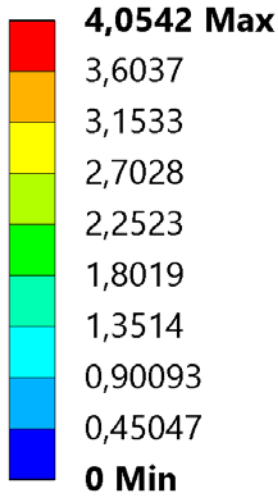


Şekil 5.13 İlk moddaki toplam deformasyon analizi

İkinci mod 9,9234 Hz frekansta süspansiyon sisteminin toplam deformasyon oranı ortalama seviyelerde kalmaktadır. Bu frekansta uyarılmış süspansiyon sisteminin maksimum yer değıştirmesi 4,0542 mm kadardır. Bu frekans ani bir frenleme sırasında mekanizmanın karşılaşacağı gerilmeler kadar deformasyon göstermiştir.

A: Modal

Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Frequency: 9,9234 Hz
Unit: mm



Şekil 5.14 İkinci moddaki toplam deformasyon analizi

Üçüncü Mod 15,389 Hz frekansta süspansiyon sisteminin toplam deformasyon oranı düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu frekansta uyarılmış süspansiyon sisteminin maksimum yer değıştirmesi 2,5909 mm kadardır. Süspansiyon mekanizmasının çakıllı veya stabilize yollarda titreşimlerden gelen gerilmelere karşılık bir deformasyon miktarına eşdeğerdır.

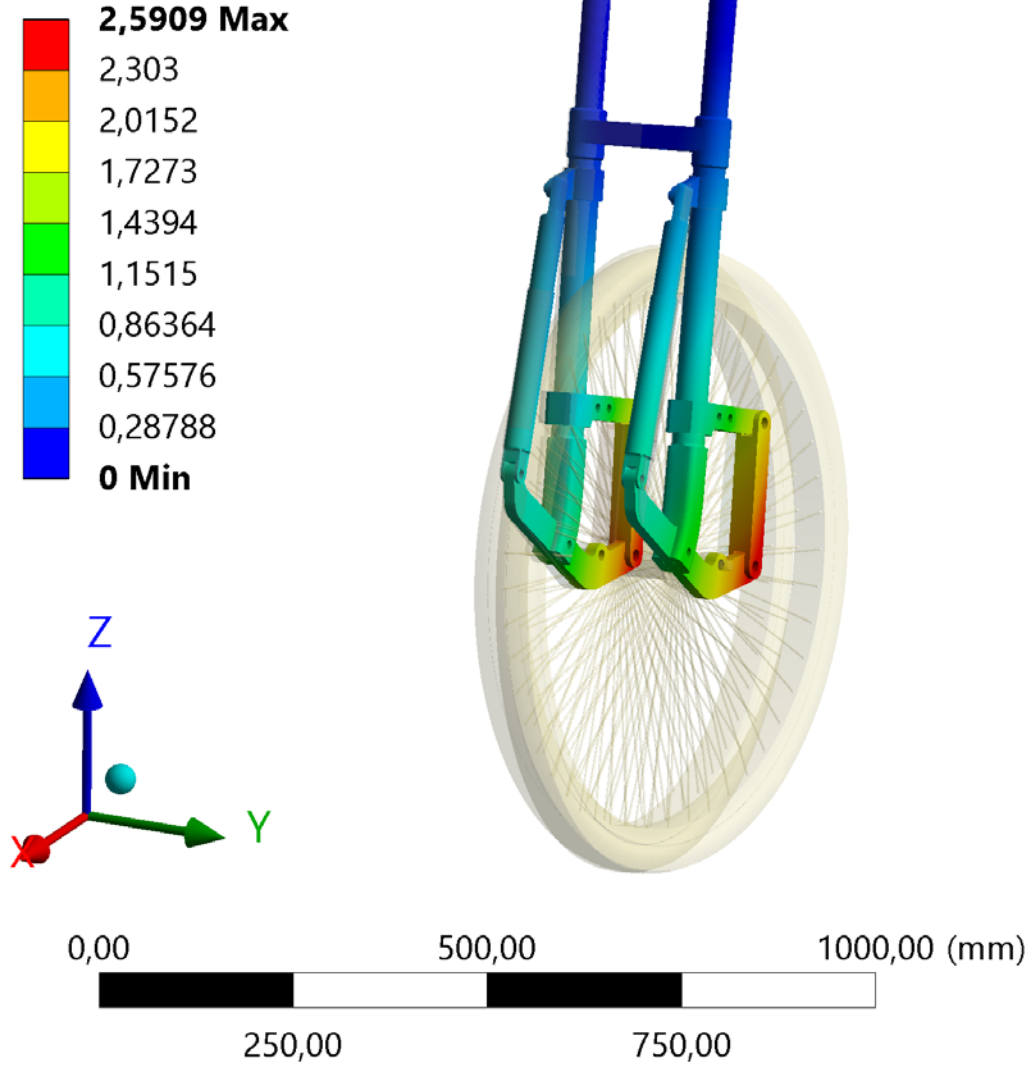
A: Modal

Total Deformation 3

Type: Total Deformation

Frequency: 15,389 Hz

Unit: mm



Şekil 5.15 Üçüncü moddaki toplam deformasyon analizi

Dördüncü Mod 16,602 Hz frekansta süspansiyon sisteminin toplam deformasyon oranı düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu frekansta uyarılmış süspansiyon sisteminin maksimum yer değıştirmesi 2,6293 mm kadardır. Süspansiyon mekanizmasının yüksek hızlarda ufak sönümler oranındaki gerilmelere karşılık gelen bir deformasyon miktarıdır.

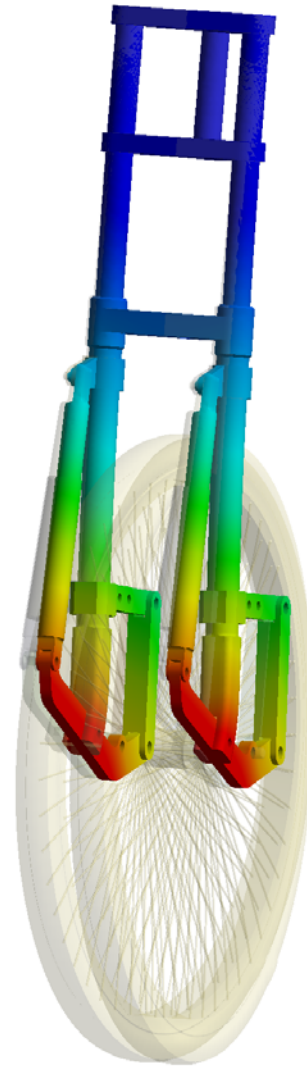
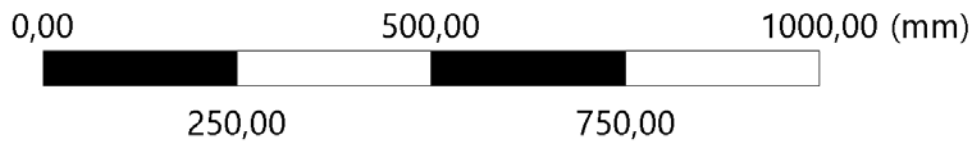
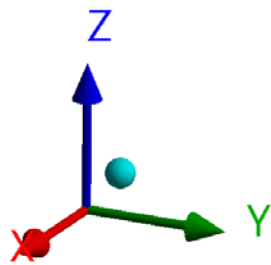
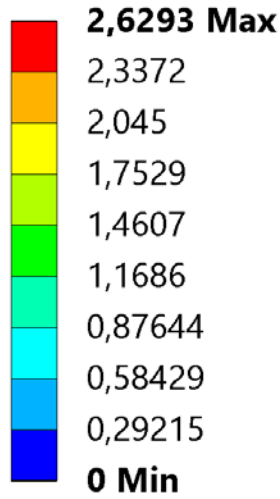
A: Modal

Total Deformation 4

Type: Total Deformation

Frequency: 16,602 Hz

Unit: mm



Şekil 5.16 Dördüncü moddaki toplam deformasyon analizi

Beşinci Mod 34,631 Hz frekansta süspansiyon sisteminin toplam deformasyon oranı statik yükleme durumuna yakın seviyelerde kalmaktadır. Bu frekansta uyarılmış süspansiyon sisteminin maksimum yer değiştirmesi 0,6856 mm kadardır. Yüksek frekanstaki bu toplam deformasyon viraj sırasında sönümlenmelere karşılık gelen bir gerilmeye eşdeğerdir.

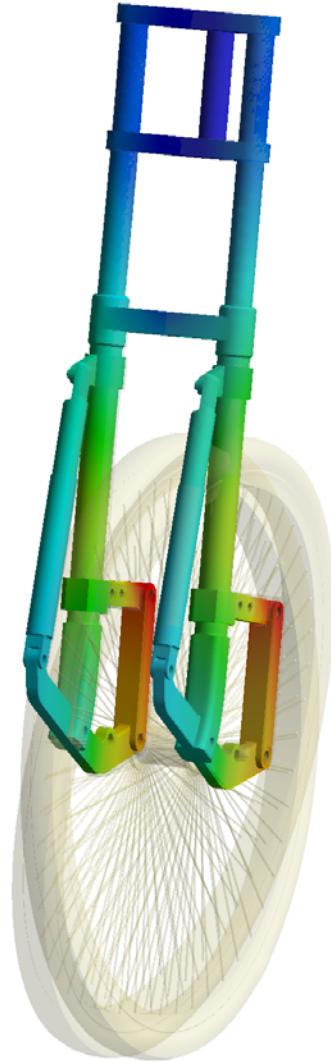
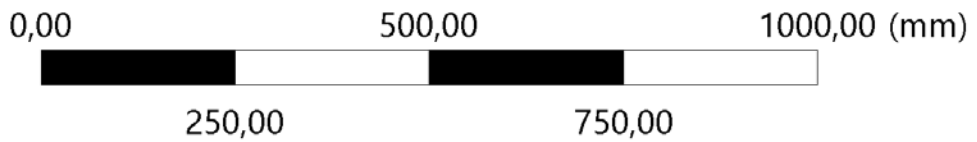
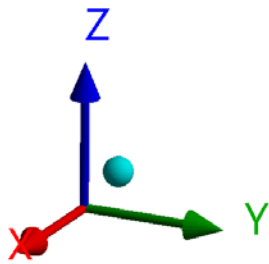
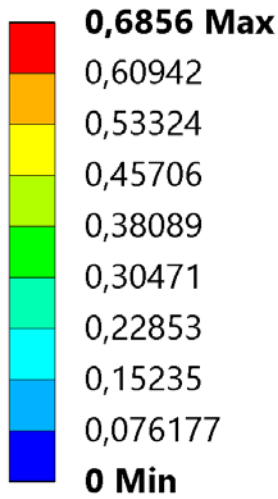
A: Modal

Total Deformation 5

Type: Total Deformation

Frequency: 34,631 Hz

Unit: mm



Şekil 5.17 Beşinci moddaki toplam deformasyon analizi

Altıncı Mod 70,665 Hz frekansta süspansiyon sisteminin toplam deformasyon oranı statik yükleme durumunun maksimum seviyelerinde kalmaktadır. Bu frekansta uyarılmış süspansiyon sisteminin maksimum yer değıştirmesi 8,1408 mm kadardır. Kuvvetlere karşı dayanımı iyi olsa da yataydan alınacak darbeler ancak dışarıdan etkiyen kaza durumunda bu şekilde gerilmeye maruz kalacağıında bu durum olağan değildir.

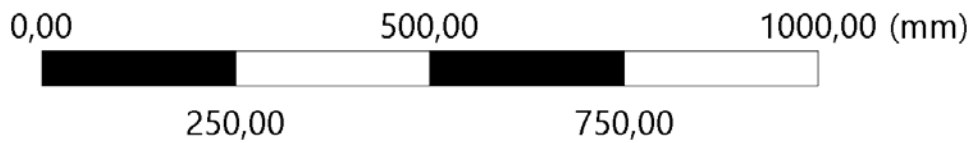
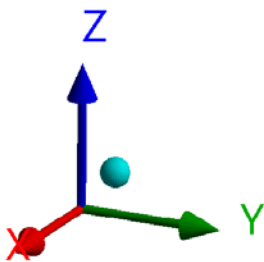
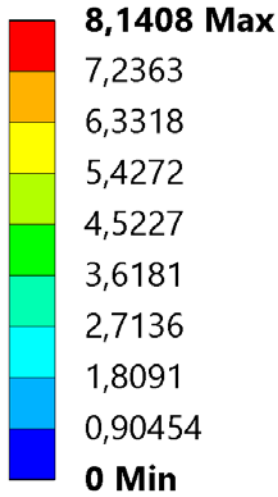
A: Modal

Total Deformation 6

Type: Total Deformation

Frequency: 70,665 Hz

Unit: mm



Şekil 5.18 Altıncı moddaki toplam deformasyon analizi

Tablo 12. Modal Analiz Frekansları

Mod	1	2	3	4	5	6
Frekans [Hz]	2,0042	9,9234	15,389	16,602	34,631	70,665
Deformasyon [mm]	0,0903	4,0542	2,5909	2,6293	0,6856	8,1408

Projede temel amaç, modal analizde süspansiyon sisteminin rezonansa geleceği frekansları bulmak olmuştur. Buna göre çözüm aşamasında yapılacak analizler ile sınır koşulları tespit edilmiştir. Bu bağlamda modeli oluşturulan süspansiyon sisteminin modal analizleri “ANSYS Workbench” yardımıyla incelenmiştir.

Statik gerilmeler sırasındaki toplam deformasyon oranını yakalamadığını göz önünde bulundurduğumuzda parçaların doğal frekanslarını ulaşan bir titreşime çalışma şartlarında karşılaşılmayacaktır. Bu da süspansiyon sisteminin olağan sürüş şartlarında rezonans olmayacağı anlamına gelmektedir. Sönümlenmeler esnasında gereksiz titreşimler bağlantıların zayıflamasına bu ise sürücüyü tehlikeli durumlarla karşılaşmasına neden olabilir. Bunun için sönümlenmenin ilerlemesine bağlı olarak yalıtım tedbirleri alınması gerekir. Tekerlek mili bağlantı somunlarından başlayarak tüm bağlantıların arasına farklı doğal frekansı olan rondelalar ile titreşimin ilerlemesi engellenecektir.

Süspansiyon, özellikle tekerleğe yani motorun hareket yönüne dik gelen darbelere karşı oldukça rijit davranan bir karaktere sahip olması gerekmektedir. Mekanizma gereken anlarda bir miktar eğilmeyle yol tutuşu korumayı müsaade edecek kadar eğilmeye izin vermektedir. Ancak sönümlenme bittikten sonra standart haline dönemediğinde yalpalama ve çekme gibi istenmeyen durumlar oluşturabilir. Süspansiyon üzerindeki bileşenler ve bağlantı noktası doğru ayarlandığında tam performans ile güvenli sürüş sağlayacaktır.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada nümerik analizler ve deneysel çalışmalar birbirlerine takip edecek şekilde incelenmiştir. Ayrıca birden fazla tasarımlarla nümerik ve deneysel analizler birbiriyle karşılaştırılarak optimum mekanizma seçilmiştir.

Nümerik çalışmalarda süspansiyon sisteminin sonlu elemanlar metodu ile statik ve dinamik gerilme analizleri yapılmıştır. Deneyimlerle süspansiyonu bir bütün halinde incelendiğinde geliştirmelerin olumlu etkileri ve sorunlarını belirlemek için çeşitli analiz çalışmaları yapılmıştır.

6.1 Statik Yapısal Analizlerin Bulguları

Statik analizlerle çalışma şartlarında karışılabilceği yüklerin mekanizma dayanımına etkisini gözlemlenmiştir. Maksimum deformasyon miktarı 1.4062 mm sonucu ortaya çıkmıştır. Analizlerde direksiyon merkezinden sabitlendiği düşünüldüğünde teleskopik çatallara göre daha rijit olduğunu göstermektedir. Teleskopik çatallar darbelerle maruz kaldığında fazla eğilme ile tekerleğin yerden kesilmesi ve sonrasında kalıcı deformasyona uğraması ise kontrol kaybına neden olabilmektedir. Özellikle düşük kaster aralığındaki motosikletler ufak eğilmelerle dahi yalpalama gibi kararsızlıklara düşebilmektedir. Deneyimli bir kullanıcı kalıcı deformasyon sonucu kontrol kaybına müdahale edebilir belki ama tekerleğin yerden kesilmesi durumunda yapılabilecek çok az şey vardır. Bu yüzden daha rijit bir ön süspansiyon tasarımı her kullanıcı tarafından aranan bir özelliktir.

Teleskopik çataltın daha rijit olması arandığı gibi mekanizmanın sünek özellikler taşıması kırılmalara karşı sürüş güvenliğini ön planda tutacaktır. Sürüş sırasında beklenmedik yol darbeleri sonucunda bir parçanın gevrek kırılma ile kopması sürücünün alacağı hasar miktarını artıracaktır. Bu yüzden sünek malzeme karakterini koruyan parçalar ile son ana kadar sönümlemeye devam edecek şekilde sürücü güvenliği korunmalıdır. Aynı zamanda eğilmelerin sürücünün direksiyon algısını kötü etkileyen eğilme boşluklarına da izin verilmemelidir. Bu denklemin iyi ayarlandığı süspansiyonlar sürücü güvenliği konusunda itibar kazanmıştır.

Daha önce saxon, motad gibi geometrilerin benzer tasarıma rağmen telelever kadar başarılı olamamasının sebebi malzeme ve parça seçimleri yeteri kadar deneyimlemeden geliştirilen modelleri sunmalarıydı. Örneğin motosikletlerde tel jantlar darbelerinin belirli kısmını kendi absorbe etmeye meyillidir ve süspansiyona gerekli kuvvet aktarımını gerçekleştiremez. Olağandan fazla gerilmelerde ise tel koparma ve eğrilme gibi sonuçlar doğurduğundan süspansiyonun özelliklerini göstermesine izin vermez. Teleleve en yakın diğer modeli düşündüğümüzde ise teleskopik çatalın rijit özellikler sergilemesi süspansiyon mekanizmasının tam olarak çalışmamasına neden olmuştur. Bu yüzden motosiklet üzerinde süspansiyon mekanizması geliştirmek deneyim sahibi ekiplerle, gelişmiş analiz yöntemleri ve uzun sürüş deneyimlerinin sonucu ortaya çıkmalıdır.

Telelever üzerindeki geliştirmeler Braunsperger ve BMW Motosiklet Münih departmanındaki diğer yetkililerinin hazırladığı tanıtım makalesinde şöyle anlatılmakta:

Bu benzersiz BMW ön tekerlek süspansiyonunun daha da geliştirilmesi için temel araştırmaların bir parçası olarak, kapsamlı FEM hesaplamalarının hedef değerleri, daha az ağırlıkla önemli ölçüde artırılmış sağlamlıktı. Odak noktası, ön çerçevenin ana bileşenleri olan arka kollar ve payandalardı. Arka kol tamamen yeni geliştirilmiş, yüksek mukavemetli ve hafif alüminyum dövme bir parçadır. Yatak tabanı ve bileşen direnç momentleri, maksimum ön uç rijitliği için tasarlanmıştır. Sürgülü boru/destek borusu kombinasyonunun ilkeye bağlı yüksek rijitliği, cidarı inceltmiş olmasına rağmen destek borusu çapı 35 mm'den 41 mm'ye çıkarılarak daha da artırılmıştır. Bu şekilde, ön tekerleğin yanal kuvvetleri altındaki ön ucun burulma sertliği toplamda yaklaşık %20 artırılabilir. Tekerlek konumu parametrelerinin daha da geliştirilmesi, büyük ölçüde geliştirilmiş sürüş dinamikleri özelliklerine daha fazla katkı sağlar. Ön tekerleğin kasteri 5 mm azaltılarak 110 mm'ye düşürüldü, 62,9°'lik direksiyon başı açısı normal konumunda tutuldu. Kinematik tasarım, istenen geri beslemenin elde edilmesi ve yeterli artık yay hareketinin mevcut kalması için fren dalışını gerekli seviyeye düşürür. Ön gaz basıncı desteğinin yay tabanı, yol üzerinde ve yol dışında geniş kullanım yelpazesi için mekanik olarak dokuz aşamada ayarlanabilir. Öndeki süspansiyon hareket aralığı 190 mm'dir (Braunsperger 2004).

Süspansiyon tasarımında kaster açısı motosiklet tipini belirleyen ana unsurların başında gelmektedir. Ancak telelever modelinin değişken özellikleri iki durumun avantajlarını barındırmaktadır. Elektronik kontroller ve mekanizma ile yüksek hızlarda açığı artırarak yol tutuşunun getirdiği stabilite artarken, düşük hızlarda açığı azaltarak manevra kabiliyeti ile sürüş kolaylığı kazandırmaktadır.

Tasarımda kullanılan mekanizma ile buna yakın bir sonuç elde etmek mümkündür. Teleskopik çatal üzerine geçen borularla standart bir süspansiyonu yüksek kaster açıyla kullanmayı mümkün kılıyor. Mekanizma kullanıcı ağırlığına göre iyi ayarlandığında mekanizma daha geniş aralıkta sönümler yapabilecektir. Doğru ayarlanmış süspansiyon mekanizmasıyla iyi manevra kabiliyeti kazandırırken yol tutuşundan bir kayıp oluşturmaz. Böylece kullanıcıya daha güvenli bir sürüş deneyimini hissettirmektedir.

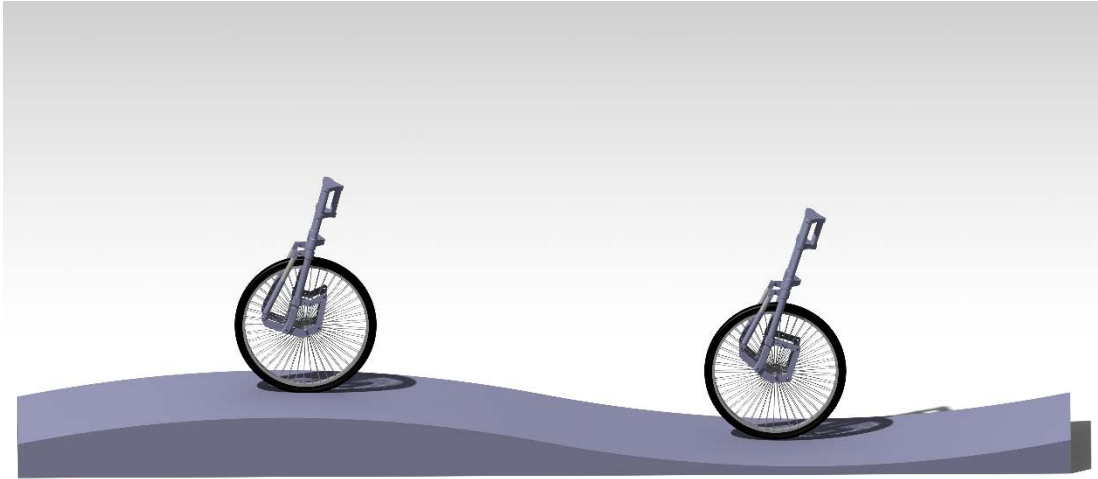
Statik analizlerle emniyet katsayısı hesaplatıldığında minimum olarak 5.8295 kat güvenli seviyelerde ve teleskopik çatal kollarında olduğunu analizlerde gözlemlemekteyiz. Bu değer teleskopik çatal sisteminin en sünek kısmına yani çatal ayaklarında gözlenmektedir. Herhangi bir ön görülemeyen kaza durumunda sistemin kırılma uğramaması için bu nokta eğilmeye izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Mekanizma her ne kadar sünek özellikler gösterecek şekilde olsa da gövdeyle tekerlek arası boşluğun kapanması kaza sırasında sönümler yaparak kazanın etkisini azaltacaktır. Aşağıdaki Şekil 6.1’de görüldüğü gibi çatalın içe geçen kısmından eğilme ile geriye doğru uzama göstermesi vuruş şiddetini oldukça azaltmaktadır.



Şekil 6.1 Kaza sonucunda eğilmiş ön süspansiyon (Aksa 2022)

6.2 Süspansiyon Sisteminin Dinamik Analizlerin Bulguları

Simülasyon modeli üzerinden oluşturulan analizler süspansiyon geliştirme deneyimi kazanmak için vazgeçilemez bir yöntemdir. Süspansiyon sistemi teorik olarak kusursuz gibi düşünülse de ufak tefek hataların tespiti bu yöntemlerle ortaya konmaktadır. Çalışmada ilk üretilen prototipin bağlantı kollarını aşırı güçlendirmesi ve ekstra ağırlıkları çatal kısmın fazla eğrilmesine neden olduğu simülasyonlar ile geliştirilen özelliklerdendir. Simülasyon da kullanılan parçaların malzemelerini değiştirmek ve özelliklerini karşılaştırmak deneysel mekanizmaya göre oldukça kolaydır. Tekerlekten sönümlenme sistemine kadar olan parçalara yaysız ağırlık denmektedir. Bu ağırlıklar sönümlenmenin aktarılması üzerinde gecikmeler oluşturmaktadır. Bu yüzden bu ağırlığın etkileri araştırılarak optimize edilmesi gerektiği gibi malzemelerin ve bağlantıların aktarma hassasiyeti değerlendirilmelidir.

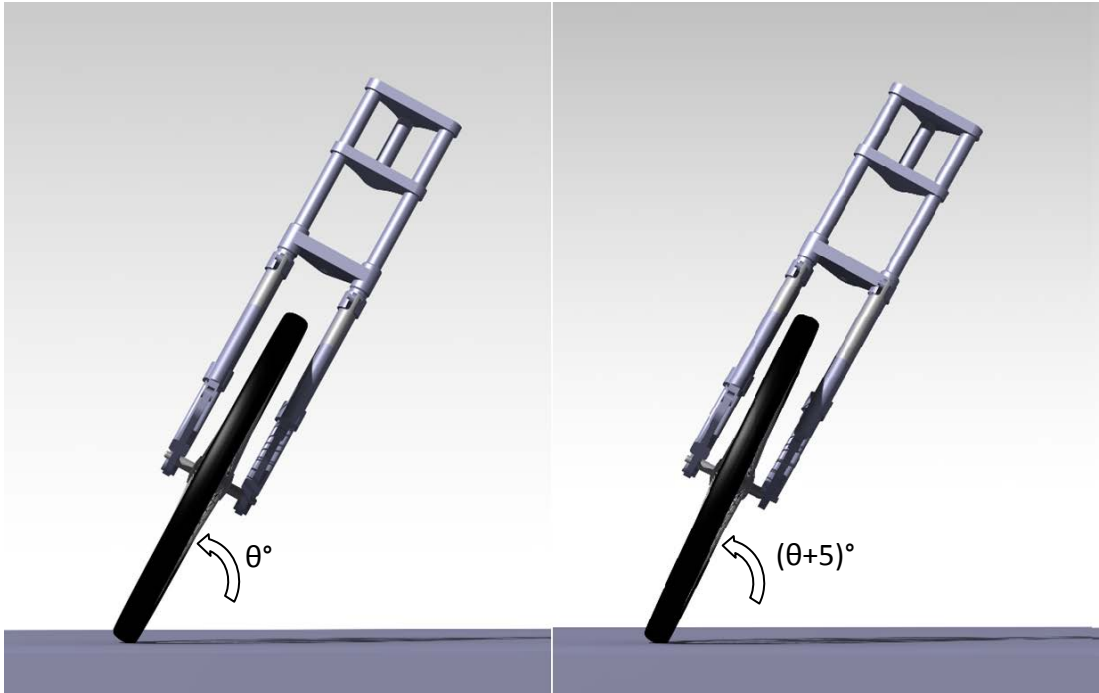


Şekil 6.2 Dalgalı yol şartlarında simülasyon modeli

Süspansiyonun yer değiştirme kabiliyeti mekanizma ile nasıl artırılacağı simülasyonlarla hesaplatılmıştır. Teleskopik çatalın çalışma aralığı ortalama olarak 120 mm olmasına rağmen bu mesafeyi belirli oranda kullanabilmektedir. Entegre edilen mekanizma ile beraber bu mesafe 200mm'ye kadar ulaşacaktır. Sönümlenme sırasındaki eğilmelerin mekanizma tarafından giderilmesi ile çatalların üzerindeki çalışma verimliliği de artacağı düşünülmektedir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi süspansiyon sisteminin sönümlenme kombinasyonu ile maksimum çalışma aralığı kullanılmıştır. Mekanizmanın sönümlenme kabiliyetini artıracak simülasyon üzerinde yapılan bu çalışma ile kanıtlanmıştır. Çalışma aralığının sürüşe kazandırdığı konfor ve kontrol kolaylığı kullanıcı deneyimini oldukça güvenli bir seviyeye çıkarmaktadır.

Tekerleğin yanağında köşe kısmı tutuşu düşük alan olarak bilinir. Bu noktada yol tutuşunu kazanmak için yeterince ısıya ulaşması ve ağırlık dengesini iyi ayarlamak gereklidir. Hızlı girilen bir viraja zorunlu olarak fazla yana yatırmayla bu kısma geçme motorun yere düşmesi ile sonuçlanır. Bu mekanizma özellikle yatay yük farklarıyla mekanizmanın ve tekerlek milinin izin verdiği eğilme koşullarıyla güvenli sürüş bölgesinde kalacaktır. Bazı uzun yol motosikletlerinde ise istenirse bile gövde şartları ve mekanizma özellikleri sayesinde ölü bölgeye girmek imkânsız hale gelecektir.

Aynı açıyla yan yatırıldığında tekerleğin daha dik açıyla yere basması yol tutuşu getirirken viraj kabiliyetini düşürmesi beklenir. Ancak Sönümlenme mekanizması geriye doğru parabolik olarak hareket etmesi lastiğinde viraj içine doğru dönmesini kolaylaştırır. Diğer değişken sönümlenmeli süspansiyon sistemlerinin çoğunluğu öne doğru yükselen mekanizma ile bu durum tersi bir etkiyle karşılaşmaktadır. Olağan dışı olan bu etki kullanıcılarda tedirginlik yaratmaktadır.



Şekil 6.3 Viraj sırasındaki eğilmelerin simülasyonu

Viraj sırasında 30° bir yatmada tekerleğin 25° 'de kalması yol tutuşunun artmasına izin verir. Bunu elektronik kontrollü olarak geliştirebilmekte mümkündür. Böylece tekerlek üzerindeki ağırlık transferi bozulmayarak kontrollü viraj alınabilecektir. Standart teleskopik çatalla sahip motosikletle 30° ile girile bilinen bir viraja bu mekanizma modeliyle 5° daha az yana yatırma açısıyla dönülebilecektir.

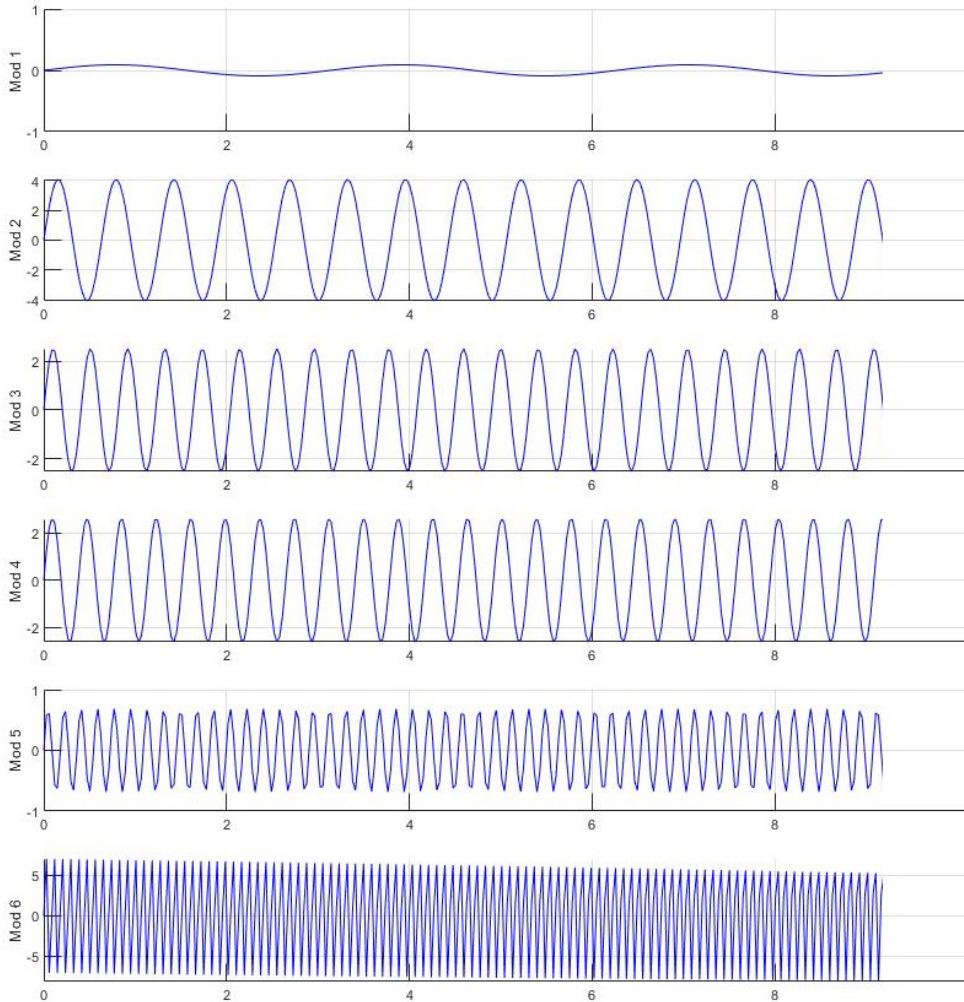
Mekanizma üzerinde eğilmelerin avantajları olsa da kullanıma bağlı olarak ne kadar kalıcı deformasyon bırakacağı özellikle motosiklet tipinde farklı geliştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Motosiklet versiyonu geliştirmeleri arasında dövme alüminyum alaşım jantlar ile şok absorbe edicilerin tek basınç tankıyla birleştirilmesi mekanizmaların birlikte çalışmasını sağlayabilir. Ayarlanabilir süspansiyon ve elektronikler yardımıyla aktif değişken sönümlenme kabiliyeti kazandırılabilir. Böylece kaster açısının da hız faktörüne göre kontrol edildiğinde iyi manevra kabiliyeti ve güvenliği ön planda olan sürüş deneyimi hissettirir. Özellikle yeni kullanıcıların basit hatalarının büyük sonuçlar doğurmasına önüne geçmektedir. Daha önce de gelişmiş markaların motosiklet algısını değiştirdiği gibi daha ulaşılabilir motosiklete, bisiklete ve e-scooter modellerine dahi adapte edilebilecek süspansiyon tasarımı sunulmaktadır.

6.3 Süspansiyon Sisteminin Modal Analizi

Süspansiyon sistemi üzerindeki deneysel tasarımlar incelendiğinde titreşimlerin oluşturduğu sesler mekanizma çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Bir süre sonra ise bağlantı noktalarında gevşemeler yaşanacaktır. Sistem üzerinde titreşimleri yalıtım için bağlantı noktaları arasına rondela eklenmiştir. Böylece sistemin oluşturduğu titreşimler uygun frekans aralığına çekilmiştir. Motosikletlerin genel çalışma frekansları (0-50) Hz aralığındadır. Yeni modellerle bu aralık oldukça azaltılmış olsa dahi genel aralıkta maksimum deformasyon oranı statik analiz sonuçlarını aşmadığını gözlemlediğimizde rezonans riskini giderdiğimiz görülmektedir. Titreşimler süspansiyon sistemi üzerinden dağılsa da motor ve mekanik aksamları tahrik edici frekansları göz önüne alınarak istenilen frekans aralığını kapsayacak konstrüktif değerlere gidilebilmektedir. Bu yüzden mekanizma sınırlandırıcıları üzerine kauçuk takozlar ile sistemin üzerindeki titreşimlerin durdurulması sağlanacaktır. Sönümlenme sonrası devam eden titreşimlerin oluşturduğu ses ve vibrasyon kalitesizlik hissiyatı vermektedir. Gerekli geliştirmelerle rahatsız edici ses ve vibrasyon aralığında (0-25) Hz mekanizma üzerinden yalıtılarak sürücü üzerindeki tedirginliği kaldırmaktadır. Yeni deneyimleyen kullanıcılar mekanizma geri bildirimlerine temkinli yaklaştığından küçük titreşimleri dahi kritik bir durum olarak görüp endişelene bilmektedirler. Bu yüzden teleskopik çataldan titreşim anlamında daha rafine sönümlenme yapabilmesi gerekmektedir.

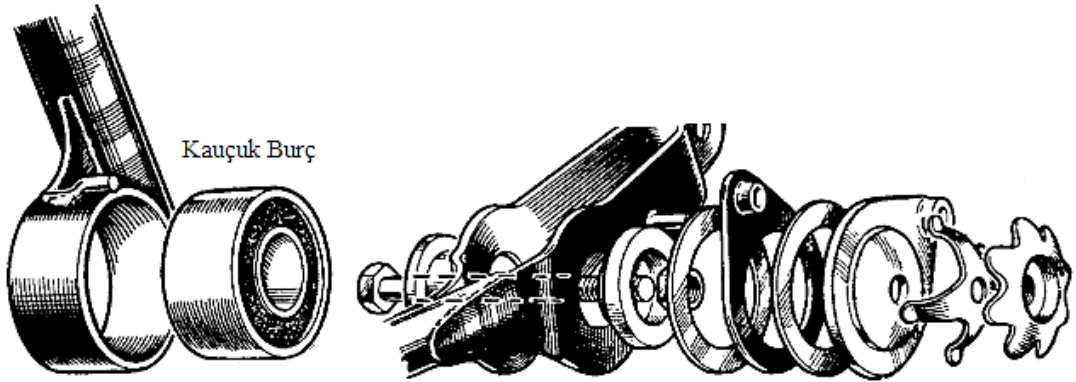
Modal analizlerde farklı frekanslarda uyarılmış süspansiyon sistemi üzerindeki deformasyon oranı incelenmiştir. Direksiyon bağlantı kolundan sabitlenen süspansiyon sistemleri için çatal ve mekanizma üzerindeki yer değiştirmelere bakıldığında 900 mm -1100 mm aralığındaki ön çatal için maksimum deformasyon 8 mm’lerde olduğu hesaplatılmıştır. Bu değer gayet rijit bir yapıda olduğunun kanıtı ve emniyet katsayısı analizini de doğrular niteliktedir.

Modal analizler sistemlerin kusurlarını bulmak için en ideal konstrüksiyon analizlerindedir. Yapıyı sabitlendiği noktadan bağımsız her noktadan eğilmeye zorladığından oluşabilecek hasarlar karşısında da fikir oluşturmaktadır. Analizde tasarım üzerinde kritik etkiler yaratacak frekanslar belirlenerek bu aralıklarda oluşan deformasyon oranları sunulmaktadır.



Şekil 6.4 Mod’a karşılık gelen frekans

Frekans genlikleri ve aralığına bakıldığında en yıkıcı Hertz dalgası Mod 6 seviyelerinde yaşandığı görülmektedir. Toplam deformasyon miktarı en yüksek olan analiz bu kısımdan sonra parçaların doğal frekansını yakalama olasılığı bulunur. Ancak bisiklet ve motosikletlerin büyük bir kısmı bu seviyede sönümleme frekansına maruz kalmaz. İncelenen makalelerde motosiklet için maksimum frekansın 50 Hz'e kadar olduğu gözlemlenmiştir. Bu seviyelerin üstünde çıkmasının önünde tekerleğin, lastiğin ve mekanizmaların geri tepki bildirim hızıyla ilgi olarak kısıtlanmaktadır. Bunun yanında kullanılacak rondela ve takozlar bağlantılar üzerinde titreşim aktarımını absorbe edecektir.



Şekil 6.5 Örnek bağlantı parçaları (Foale 2006)

Teleskopik çatallara göre parça sayısı daha fazla olduğundan dolayı parçalar üzerinden aktarılan titreşimlerin şiddeti de düşmektedir. Herhangi sönümleme sonrası titreşimi ana şaseye ulaşmadan absorbe edilmektedir. Bir benzer sistem olan telelever geometrisinde başarılı bir şekilde kullanıcıya konfor ve güvenlik olarak aktarılmıştır. Kullanıcılar sürüş hissiyatsızlığı olarak yorumlayanlar olsa dahi özellikle uzun kullanımlarda sürüş oluşturduğu yorgunluğun kontrol kabiliyetini azaltmasının önüne geçmektedir. Bakımsızlığın ve hasarların oluşturabileceği titreşimler ile rezonans her sistem için oluşabilecek bir durumdur. Bunu absorbe edebilecek bir süspansiyon sistemi kullanıcıya büyük bir sürüş güvenliği kazandırmaktadır. Değişken sönümlenmeli motosikletlerde kaza oranının düşük olması araştırmalarla kanıtlanmış olup bu sistemlerin başarısı olarak nitelendirilmektedir.

7. ÖNERİLER ve TARTIŞMA

Otomotiv endüstrisinde süspansiyon konusunda son 50 yılda üreticiler birbirleriyle yarış içinde birçok model geliştirerek sürüş kabiliyetlerini oldukça artırmıştır. Bunun yanında güvenlik sistemlerinin teknolojik altyapıyla desteklenmesi kaza oranını oldukça düşürmüştür. Ancak motosiklet sektöründe birkaç üretici dışında benzer tip süspansiyonlarla üretime devam etmektedir. Motosiklet tehlikeli bir araç olduğu gerçeği kabullenildiği için eksik veya hatalı tasarımlar dahi oldukça geç düzeltilmektedir. Regülasyonlarla güvenlik düzeyi artırılmaya yeni başlanılan motosiklet sektöründe halen anti blokaj sistemi (ABS) yer almayan motosiklet modelleri üretilmektedir.

Motosiklet üretiminde her ayrıntı kullanıcıların sürüş güvenliğini artırmak amaçlanarak tasarlanmalıdır. Sürüş güvenliğini artıran elektronik stabilite programları her modelde kesinlikle bulunmalıdır. Çekiş kontrol sistemleri, kombine frenleme ve kaydırmalı debriyaj gibi sürüş yardım sistemleri konfor ögesinden daha çok sürücünün hayatını kurtarabilecek sistemlerdir. Olumsuz koşullar altında yanlış bir vites geçişi tekerleğin kilitlemesiyle kontrol kaybına neden olabilmektedir. Sürücü her ne kadar deneyimli de olsa dalgalılık anında yapılacak panik frende ön tekerleğin kaymasının arka tekerleğin fren kombinasyonu ile kontrol altına almak mümkündür. Bu yüzden sürüş destek sistemleri opsiyon bir konfor özelliği değil zaruri bir ihtiyaçtır.

Motosiklet için konfor tabii ki kullanıcıya rahatlık sağlaması yanında sürüş güvenliğini de artırmaktadır. Kullanıcı sürüşe odaklanmasını etkileyen durumlar örneğin sürücünün üşmesi dahi sürüş güvenliğini oldukça düşürmektedir. Bu yüzden küçük detayların odaklanmayı bozmaması için her parçanın tasarımı üzerinde durulması gerekmektedir. Mekanizmalar yarı bağımsız çalışması sürüş güvenliğini artırmasıyla konforlu bir sürüş sağlamaktadır. Sönümlenme aralığının artırılması sağlarken değişken sönümlenme darbe şiddetini kademeli olarak yumuşatmaktadır. Herhangi bir model de janta hasar verecek kadar büyük olan çukurlarda diğerlerinin aksine geriye doğru sönümlenmesiyle sürüş güvenliği sağlamaktadır. Mekanizmanın geriye doğru katlanarak yükselmesi çatal kollarının daha az yüke maruz bırakmaktadır. Bu özelliği ve sınırlandırmalarıyla literatürde örneği olmayan bir mekanizma sistemine sahiptir.

Bu araştırmadaki mekanizma sistemiyle fabrikasyon olarak düşük kaster açılı olmasından dolayı kontrolü zor olan motosikletleri çatal uzunluğunu artırarak daha güvenli hale getirebilmek amaçlanmıştır. Böylece motosiklet frenlemeler ve kayma sırasında tehlikeli kaster açısı aralığına girmeyerek kontrolün devamlı olarak sürücüde kalmasını sağlayacaktır. Direksiyon üzerinde titreşimleri ve Tank tokatlama (Tankslapper) eğiliminin yaşanmasının önüne geçilecektir. Motosikletin öne yığılmasıyla iyice düşen kaster açısı tekerlek üzerindeki yuvarlanma etkisini azaltmakta bu ise gidonun sağa ve sola doğru hızla çarpmasına neden olmaktadır. Bazen bu durum dengesiz tel jantla ve tekerleğin kusurlarından meydana gelebilmektedir. Kastor etkisini kaybeden lastik kararsızlık durumunda tecrübeli sürücüleri dahi kazaya sürüklemektedir. Bu durumun önüne doğru kaster açısına sahip motosiklet ile tekerleğin basıncını, eğriliğini ve lastiğini kontrol edilerek önlemek mümkündür. Eğer motosikletin kaster açısı tasarımı yanlış ise mekanizma ile çatalların yükseltilmesi motosikletin geriye doğru döndüreceğinden bu sorunu ortadan kaldıracaktır. Motosiklet böylece daha geniş açuya sahip olduğundan tekerleğin yere temas alanı artacaktır. Temas alanının çatal iz düşümünün geride kalan kısmı direksiyon üzerinde kastor etkisi ile direksiyonun stabil kalmasını sağlamaktadır. Direksiyon üzerindeki titreşimler ve kararsız hareketler kastor etkisinin yok olmasına bağlı olarak başlamaktadır. Kastor etkisinin kaybolması tekerleğin yere yeterince iz oluşturamadığı anlarda yani zemin geçişleri, yüksek teker basıncı, ön taraftaki yükün azalması ve lastik deseninin bozulması gibi durularda meydana gelmektedir.

Bağlantı sayısının artması yüklerin dağılımını artırdığı için titreşimi absorbe ettiği gibi bağlantı noktalarını tork anahtarlarıyla sıklılığının düzenli olarak kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bağlantı elemanları özel yapıştırıcılarla sabitlenmesi ve parçaların deformasyonu incelemek diğer süspansiyon sistemlerine göre ekstra dikkat gerektirmektedir. İlk üretilen değişken sönümlemeli süspansiyon modellerinde markaların üretim koşullarını tam kontrol edemediğinden dolayı bazı kronik hasarları olan bağlantı tipleri de üretilmiştir. Doğal frekansı incelenmeyen bağlantı parçaları rezonansa uğrayarak bir markanın güvenilirliğini ciddi şekilde sarıştığı projelerde geçmişte görülmüştür. Bu yüzden simülasyonların çok parçalı olarak çözümlenemediği problemleri güvenlik tedbirleri alınarak bu projede olduğu gibi deneyimlemek gerekmektedir. Proje üzerindeki deformasyon noktalarının tespiti ve bağlantı parçalarının üretim kalitesi sürekli olarak kontrol edilmelidir.

Motosikletlerin çeşitlerine göre mekanizmayı adapte etmek için farklı tasarım ve geliştirmelere ihtiyaç duyulacaktır. Teleskopik çatal kollarının kalınlığına, fren sisteminin montaj noktası ve kilometre sayacı gibi bileşenler mekanizmanın üzerine aktarılması güç durumlar ortaya koymaktadır. Ayrıca motosikletin ön kısmı biraz yükseldiği için rüzgâra karşı dinamikleri de değişecektir. Mekanizma yol tutuşunu artırsa da karşıt yüzler yüksek hızlarda motosiklet üzerindeki yük dağılımı etkilerini incelemek gerektirmektedir. Grenajsız motosikletlerde böyle bir sorunla karşılaşılacak olsa dahi her detay ayrıca incelenmelidir.

Eğimli yollarda tekerleğin yere bastığı açıyı mekanizma ile daha dik halde tutarak önden kayma olasılığını düşürür. Bu davranışı geleneksel motosiklet kullanıcılarının alışmakta zorlanacağı bir durum oluşturmaktadır. Süspansiyon sisteminin viraj alma yeteneği geliştirilmiş olsa dahi sürüş stratejilerini kullanmak ve geri tepkileri bakımından uzun incelemelerden geçmesi gerekmektedir.

İzlenimlerini daha iyi ele alabilmek için standart süspansiyon ve mekanizma arasında birçok karşılaştırma gerçekleştirdim. Mekanizma deney düzeneğinde bir miktar daha fazla ağır olması süspansiyon üzerinde hareketli ağırlığı da artırmıştır. Bunun avantajları arasında tekerleğin yerden daha az kesilmesi ve daha rijit olması gibi birkaç avantajı olsa da istenilen bir durum değildir. Bunun için yapılan malzeme seçimi analizleriyle kullanılması gereken alüminyum serisi belirlenmiştir. Ancak seçilen alaşımın istenilen türde temin edilemediğinde ve bu çalışma dışı çeşitli sorunlardan dolayı yeni deney düzeneği imal edilememiştir. Ancak malzeme seçimi çalışması üçüncü bölümde yer almaktadır. Seçilen Krom Molibden ve 6061 serisi alüminyum alaşımları üzerinden üretilecek mekanizma sistemiyle daha aktif sönümlenmeler yapabilecek kabiliyete erişecektir.

8. SONUÇLAR

Sürüş güvenliğini artırmaya yönelik olarak değişken sönümleme sistemine sahip süspansiyon tasarımı ile ön lastiğin yol tutuş yeteneklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geniş sönümleme aralığı sağlayan rijit tasarım, darbelere karşı kararlı bir geri bildirim algısı oluşturmaktadır. Hızlanma ve frenleme sırasındaki ani moment değişimlerine karşı sabit kaster açısını koruyan mekanizma ile sürücüye güven sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar sayesinde;

- Değişken sönümleme mekanizması teleskopik çatal sistemine entegre halde benzersiz bir süspansiyon modeli oluşturmaktadır.
- Çatal kollarının desteklenerek uzatılması ile elde edilen daha geniş kaster açısı sönümleme aralığını ve ön lastiğin temas alanını artırmıştır.
- Tasarımının getirdiği geriye doğru katlanır mekanizma sayesinde eğilme yüklerine daha az maruz kalan özgün bir tasarım ortaya konulmuştur.
- Yatay bağlantı kolları ile darbelere karşı dayanım ve sonrasındaki absorbe yeteneği geliştirilmiştir.
- Teleskopik çatal barındıran tüm motosiklet modellerine uygulanabilmektedir.
- Modüler yapısı sayesinde elektronik sürüş yardım sistemleriyle uyumlu çalışacak şekilde ayarlanabilmektedir.

Bu ürün ile sektörel olarak değişken sönümlemeli süspansiyon modelleri arasında tasarımı ve kolay entegrasyonu ile farkındalık yaratacağı öngörülmektedir. Geleneksel mekanizmalar aksine geriye doğru parabolik hareketin oluşturduğu sönümleme kabiliyeti üreticiler arasında öne çıkacaktır. Genel motosiklet kültürü üzerinden gelişen modellerin arasında yenilikçi bir alternatif oluşturacaktır. Sürüş güvenliği bakımından deneyimleyen kullanıcılar arasında ciddi oranda olumlu geri dönüşler oluşturması hedeflenmektedir. Bu sistem sonradan alınarak eklenebilir bir alternatif olacak şekilde tasarlandığı için tüm kullanıcılar arasında ilgi yaratacaktır. Teleskopik çatal kullanan ve direksiyonun stabil kalmadan sallanmasından sorun yaşayan kullanıcılar bu mekanizmayı entegre ettiğinde yuvarlanma etkisi artacağından sorunları giderilmiş olacaktır.

Mekanizma analizleri incelendiğinde standart 100 mm çalışma aralığına sahip bir teleskopik çatal ile karşılaştırdığımız bu mekanizma, tek olarak kullanımda daha iyi sönümleme ve geri bildirim sağladığı görülmektedir. Özellikle teleskopik çatalla birleştirildiği versiyonlarda değişken sönümleme kabiliyetiyle 200 mm çalışma mesafesi olan bir süspansiyon sisteminden daha fazlasını daha az yer kaplayarak sağlayacaktır. Bu ise arazi kullanımı için tasarlanmış motosikletlerde yüksekliği daha fazla artırmamak için 170 mm seviyelerinde kullanılan aralığı artırırken motosiklet sele yüksekliğini de önemli miktarda düşürecektir. Arazi koşulları altında kaygan yol şartlarında kullanıcılar rahatlıkla iki ayağını yere koyabilmesi sürüş hakimiyetini artıracaktır.

Mesh kalitesi olarak analizler değerlendirmek için Şekil 5.1'e bakıldığında;

- Eleman kalitesine bakıldığında eleman sayısının 0,75-0,88 değerleri arasında yoğunlaştırdığını görebiliriz.
- En boy oranı maksimum 1 değerine en yakın aralık olan 1,02-2,5 aralığında toplanmıştır.
- Jocabian oranına bakıldığında 1-5 birim aralığında dışında ihmal edilebilir oranda eleman sayısı kaldığı görülmektedir.
- Ortogonal kalite ise 0,75 değerinde maksimum eleman sayısı olduğu ve yoğunluğun bu değer çevresinde kaldığı görülmektedir.

Mesh değerlerini referans olarak alındığında analizlerin doğruluğu 4 farklı metot ile kanıtlanmıştır. Analizlerde bugüne kadar yaşanan motosiklet süspansiyonu hasarları dikkate alınarak kritik bölgelere odaklanılmıştır. Tekerlek mili bağlantısı, süspansiyon bağlantıları ve mekanizmayı oluşturan parçalar odaklanılan bölgeler arasındadır. Toplam yer değiştirme miktarına bakıldığında 1,4062 mm değerinde ve tekerlek bağlantısı noktasına doğru homojen şekilde dağıtılması yol tepkilerine uyumlu geri bildirim vereceğini göstermektedir. Genel süspansiyon sistemi analizlerinde maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilmenin çatal kollarının içe geçen noktasında olduğu ve değerinin 42,885 MPa seviyelerinde olduğu görülmektedir. Tüm sistem bileşenleri dikkate alınarak bakıldığında emniyet katsayısı 5,8295 birim üzerinde yer aldığından herhangi bir hasara uğrama ihtimali yok denecek kadar azdır.

9. KAYNAKLAR

Braunsperger, M.; Ochner, U.; Vogt, J.; Die neue BMW R1200 GS. In: ATZ 106 (2004), Nr. 5, S. 398-409 (5 Kasım 2004).

Ceccarelli, M., ve G. Teoli. "Corradino D'Ascanio and His Design of Vespa Scooter." *Multibody Mechatronic Systems*. Springer, Cham, 2015. 399-409 (2015).

Cossalter, V., vd. "An advanced multibody model for the analysis of motorcycle dynamics." 3 rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, Beijing. (2009).

Cossalter, Vittore, Roberto Lot ve Matteo Massaro. "An advanced multibody code for handling and stability analysis of motorcycles." *Meccanica* 46: 943-958 (2011).

Cossalter, Vittore. *Motorcycle dynamics*. Lulu.com, (2006).

Çağlayan, İ. H. "Rezonans: Makinaların ve yapıların gizli düşmanı." *Mühendis ve Makina* 50. Cilt 598. Sayı (2009): 55-60.

Das, Souvik, vd. "Metallurgical Analysis of Surface Defect in Telescopic Front Fork." *International Journal of Structural and Construction Engineering* 13.3 (2019): 169-175.

Falloon, Ian. *Original BMW Air-Cooled Boxer Twins 1950–1996*. MotorBooks/MBI Publishing Company. p. 15. ISBN 978-0-7603-1424-1 (2003).

Fan, Yi, ve Rukui Deng. "Innovative design of eight-bar linkage motorcycle suspension based on mechanism regeneration method." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1678. No. 1. IOP Publishing, (2020).

Foale, Tony. "Motorcycle handling and chassis design: the art and science". Tony Foale, (2006).

Gadola, Marco, vd. "The Design of A Motorcycle Featuring Fully Independent Adjustability for Front Suspension and Steering Geometry." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 538. No. 1. IOP Publishing, (2019).

Hubertz, Mike ve Gerd Vilsmeier. "Evolution of Wheel Control Systems." ATZextra worldwide 18.1 (2013): 56-61.

J. Kleine Vennekate: Deutsche Motorräder der 50er Jahre. Verlag Kleine Vennekate, (2002), ISBN 978-39355-1707-2, S. 9.

Labiano Mezquíriz, Francisco. "Diseño de una suspensión del tipo Telelever." (2016).

Landerl, Christian, Josef Miritsch, ve Antonius Ruhé. "Die neue Reiseenduro BMW R 1200 GS." ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift 115.3 (2013): 190-197.

Lorusso, Benedetto. "Telelever Kinematic Study." (2009).

Moreno Giner, David, vd. "Motorcycle Dynamics in Virtual. Lab Motion." International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Vol. 44120. (2010).

Quick Spin: "BMW R1100S BoxerCup Replika". What Bike: 39. Summer (2004).

R. S. Sharp, S. Evangelou, ve D. I. N. Limebeer, "Advances in the Modelling of Motorcycle Dynamics," Multibody System Dynamics, vol. 12, no. 3, pp. 251-283, (2004).

Ramírez, Ciro Moreno, M. Tomas-Rodriguez, ve Simos A. Evangelou. "Dynamical analysis of a duolever suspension system." Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control. IEEE, (2012).

Roland Brown, "Classic Motorcycles", p. 61, 2000, Hermes House, London, ISBN 1-84038-433-6 (2000).

Sarti, Giorgio "Origin and Development: The Forerunners". Vespa: 1946-2006: 60 Years of the Vespa. St. Paul, MN, USA (2006).

Shattuck, Colin ve Peterson, Eric "Chapter 1: The Evolution of a Revolution". Scooters: Red Eyes, Whitewalls and Blue Smoke. Speck Press. pp. 20–22. ISBN 978-0-9725776-3-2 (2005).

Wilson, Hugo Motosiklet Ansiklopedisi. Dorling-Kindersley. ISBN 0-7513-0206-6 (1995).

Yanachkov, Georgi, ve Simona Hesapchieva. "Using Multilink type suspension as a front suspension for a motorcycle." FDIBA Conference. (2017).