

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**LASTİK BASINCININ ABS FREN PERFORMANSINA ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**ERSİN TURAL**

**KOCAELİ 2016**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LASTİK BASINCI DEĞİŞİMLERİNİN ABS PERFORMANSINA  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ERSİN TURAL

Yrd.Doç.Dr. Hakan KÖYLÜ  
Danışman, Kocaeli Üniv.



Prof.Dr. Mehmet UÇAR  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Prof.Dr. Fatih Mehmet BOTSALI  
Jüri Üyesi, Selçuk Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 23.12.2016

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Her geçen gün artan araç sayısı, çeşitli güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu durum, artan kaza sayısında önemli bir pay oluşturmakta ve araç performanslarını arttırmak zorunda bırakmaktadır. Bu nedenle, taşıtlarda kullanılan yardımcı sistemlerin geliştirilmesi ve kullanılması otomotiv sektöründe faaliyet gösteren firmalar tarafından da desteklenen ve hızla önemi artan bir konudur. Bu güvenlik sistemlerinin birincisi, sürücü için tehlikeli bir durum oluşması halinde devreye giren taşıt iskeleti, hava yastığı gibi sistemleri içeren pasif güvenlik sistemleridir. İkincisi ise, her an aktif olan çekiş kontrol sistemleri, ABS, savrulma kontrol gibi yazılım ve donanımları içeren aktif güvenlik sistemleridir. Bu tez çalışmasında, aktif güvenlik sistemlerinden biri olan ve taşıtın boylamsal dinamiğini iyileştirmede kullanılan ABS konu alınmıştır. ABS kontrol sistemi; hem lastik basıncı ile modellenerek, simülasyon programı olan MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur; hem de deneysel çalışma yapılarak, performansı incelenmiştir.

Bu çalışma boyunca, bilgi ve birikimleriyle destek ve yardımlarını esirgemeyen ve her konuda beni yönlendiren değerli Tez Danışman Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan KÖYLÜ' ye teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına destek olan ve yardımlarını esirgemeyen bölümümüzün değerli hocalarına, sevgili çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına, 113M421 nolu TÜBİTAK projesi ile destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca, emek ve tecrübeleri ile her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan ve haklarını asla ödeyemeyeceğim aileme ve eşim Özge TURAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Aralık – 2016

Ersin TURAL

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ .....	1
1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	4
1.1. ABS Kontrol Sistemlerinin Fren Performansını Belirleyen Parametreler ve Bu Parametrelerin Etkileri.....	4
1.1.1. Tekerlek hızı.....	5
1.1.2. Taşıt hızı .....	5
1.1.3. Kayma oranı ve tutunma katsayısı .....	6
1.2. Taşıtın Frenleme Performansını Belirleyen Parametreler.....	9
1.3. ABS Kontrol Metotları .....	10
1.4. Lastik Modeli ve Etkilendiği Parametreler .....	12
1.4.1. Düşey lastik sertliği .....	13
1.4.2. Boylamsal tutunma katsayısı .....	14
1.4.3. Boylamsal kayma sertliği .....	14
1.4.4. Lastik basıncı.....	15
1.5. ABS Fren Sistemine Lastiğin Etkisi .....	15
2. LASTİK BASINCINA BAĞLI ABS MODELİ VE SİMÜLASYONU .....	21
2.1. MATLAB/Simulink Boylamsal Taşıt Dinamiğinin Modellenmesi.....	21
2.2. Çeyrek Taşıt Fren Dinamiği Modeli .....	22
2.2.1. Frenleme anında taşıt gövdesinin dinamiği.....	23
2.2.2. Frenleme anında tekerlek dinamiği .....	23
2.3. ABS Fren Sistemi Modeli.....	24
2.4. Lastiğin Modellenmesi.....	27
2.4.1. Magic Formula lastik modeli .....	27
2.4.2. Magic Formula lastik modelinin genel formülü .....	28
2.4.3. Boylamsal lastik kuvveti .....	31
2.4.4. Lastik basıncı için genişletilmiş Magic Formula lastik modeli .....	31
2.4.5. Tekerleğin boylamsal dinamiğinin modellenmesi .....	34
2.5. Simülasyon Çalışması.....	34
2.6. Simülasyon Sonuçları .....	36
2.6.1. Kuru yol simülasyon sonuçları .....	36
2.6.2. Islak yol simülasyon sonuçları .....	40
2.6.3. Kaygan yol simülasyon sonuçları .....	45
3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	50
3.1. Test Aracı.....	50
3.2. ABS Ölçüm Sistemi ve Ölçüm Cihazları.....	51
3.3. ABS Test Metodu .....	58

3.4. Deneysel Sonuçlar .....	62
3.4.1. Kaygan yol test sonuçları .....	62
3.4.2. Islak-Kaygan yol test sonuçları .....	68
3.4.3. Kaygan-Islak yol test sonuçları .....	75
3.4.4. Ayrık yol test sonuçları .....	81
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	91
4.1. Simülasyon alışması Sonuçları.....	91
4.2. Deneysel alışma Sonuçları .....	92
4.3. neriler .....	95
KAYNAKLAR .....	97
EKLER.....	101
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	105
ÖZGEÇMİŞ .....	106



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. ABS kayma aralıkları .....	7
Şekil 2.1. Çeyrek taşıt fren dinamiği modeli .....	23
Şekil 2.2. Kaymaya bağlı tutunma katsayısı değişimi .....	26
Şekil 2.3. ABS fren sistemi modelinin blok diyagramı .....	27
Şekil 2.4. Magic Formula lastik karakteristiği eğrisi .....	29
Şekil 2.5. Lastik modeli uygulaması .....	30
Şekil 2.6. Kayma değeri ve tekerlek düşey yükü ile boylamsal tekerlek bağıntısı .....	33
Şekil 2.7. Tekerlek dinamiği Simulink akış diyagramı .....	34
Şekil 2.8. 25 psi için tutunma katsayısı-kayma karakteristiği .....	35
Şekil 2.9. 33 psi için tutunma katsayısı-kayma karakteristiği .....	35
Şekil 2.10. 38 psi için tutunma katsayısı-kayma karakteristiği .....	36
Şekil 2.11. Kuru yol için fren basıncı benzetim sonuçları .....	37
Şekil 2.12. Kuru yol için tekerlek ve taşıt hızı benzetim sonuçları .....	38
Şekil 2.13. Kuru yol için kayma oranı benzetim sonuçları .....	39
Şekil 2.14. Islak yol için fren basıncı benzetim sonuçları .....	41
Şekil 2.15. Islak yol için tekerlek ve taşıt hızı benzetim sonuçları .....	42
Şekil 2.16. Islak yol için kayma oranı benzetim sonuçları .....	43
Şekil 2.17. Kaygan yol için fren basıncı benzetim sonuçları .....	45
Şekil 2.18. Kaygan yol için tekerlek ve taşıt hızı benzetim sonuçları .....	46
Şekil 2.19. Kaygan yol için kayma oranı benzetim sonuçları .....	48
Şekil 3.1. Test aracı .....	50
Şekil 3.2. Enkoder .....	52
Şekil 3.3. Basınçölçerin ABS modülatörüne bağlanması .....	52
Şekil 3.4. Optik hız sensörü .....	53
Şekil 3.5. Veri toplama sistemi .....	54
Şekil 3.6. Veri toplama yazılımı arayüzü .....	54
Şekil 3.7. Veri toplama yazılımının kalibrasyon bölümü .....	55
Şekil 3.8. Veri toplama yazılımının ölçüm bölümü .....	55
Şekil 3.9. Veri toplama yazılımının veri inceleme bölümü .....	56
Şekil 3.10. Veri toplama yazılımının raporlama bölümü .....	57
Şekil 3.11. Farklı yollar için kayma oranı-sürtünme katsayısı .....	58
Şekil 3.12. ABS test ortamı .....	59
Şekil 3.13. Kaygan yol testi .....	59
Şekil 3.14. Islak yoldan kaygan yola geçiş yol testi .....	60
Şekil 3.15. Kaygan yoldan ıslak yola geçiş yol testi .....	60
Şekil 3.16. Ayrık yol testi .....	61
Şekil 3.17. Kaygan yol için fren basıncı sonuçları .....	63
Şekil 3.18. Kaygan yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları .....	64
Şekil 3.19. Kaygan yol için kayma oranı sonuçları .....	66
Şekil 3.20. Kaygan yol için frenleme ivmesi sonuçları .....	67
Şekil 3.21. Kaygan yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları .....	68
Şekil 3.22. Islak-Kaygan yol için fren basıncı sonuçları .....	69

Şekil 3.23. Islak-Kaygan yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları .....	71
Şekil 3.24. Islak-Kaygan yol için kayma oranı sonuçları.....	72
Şekil 3.25. Islak-Kaygan yol için frenleme ivmesi sonuçları.....	73
Şekil 3.26. Islak-Kaygan yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları .....	74
Şekil 3.27. Kaygan-İslak yol için fren basıncı sonuçları.....	75
Şekil 3.28. Kaygan-İslak yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları .....	77
Şekil 3.29. Kaygan-İslak yol için kayma oranı sonuçları.....	78
Şekil 3.30. Kaygan-İslak yol için frenleme ivmesi sonuçları.....	79
Şekil 3.31. Kaygan-İslak yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları .....	80
Şekil 3.32. Ayrık yol için 30 km/sa fren basıncı sonuçları .....	82
Şekil 3.33. Ayrık yol için 60 km/sa fren basıncı sonuçları .....	83
Şekil 3.34. Ayrık yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları .....	85
Şekil 3.35. Ayrık yol için 30 km/sa kayma oranı sonuçları .....	86
Şekil 3.36. Ayrık yol için 60 km/sa kayma oranı sonuçları .....	87
Şekil 3.37. Ayrık yol için frenleme ivmesi sonuçları.....	89
Şekil 3.38. Ayrık yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları.....	90

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Lastik koşullarının etkisi üzerine yapılmış çalışmalar .....	16
Tablo 2.1. Taşıt parametreleri.....	22
Tablo 2.2. ABS kontrolör durum çizelgesi.....	25
Tablo 2.3. Kuru yol için durma mesafesi benzetim sonuçları .....	40
Tablo 2.4. Islak yol için durma mesafesi benzetim sonuçları .....	44
Tablo 2.5. Kaygan yol için durma mesafesi benzetim sonuçları.....	49
Tablo 3.1. Test aracının özellikleri.....	51
Tablo 3.2. Ölçülen parametrelerin özellikleri.....	51
Tablo 3.3. Deney tasarımı.....	62





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A_{br}$	: Tekerlek fren piston alanı, ( $m^2$ )
$B$	: Sertlik faktörü
$BCD$	: Lastik karakteristiği eğrisinin orijin ile yaptığı açı, ( $^\circ$ )
$C$	: Şekil faktörü
$C_{F_z}$	: Düşey lastik sertliği
$D$	: Pik değeri
$E$	: Eğrilik faktörü
$F_a$	: Aks yükü, (N)
$F_{br}$	: Frenleme kuvveti, (N)
$F_{br,d}$	: Fren diskine etkiyen çevresel kuvvet, (N)
$F_s$	: Tekerlek ile yol arasındaki sürtünme kuvveti, (N)
$F_x$	: Boylamsal tekerlek kuvveti, (N)
$F_y$	: Yanal tekerlek kuvveti, (N)
$F_z$	: Gerçek düşey yük, (N)
$F_{z_0}$	: Nominal düşey yük, (N)
$J$	: Tekerlek atalet momenti, ( $kg\cdot m^2$ )
$k$	: Hidrolik aktüatör kazancı
$K$	: Boylamsal tekerlek kayma oranı
$K_f$	: Fren sabiti
$K_{ref}$	: Referans boylamsal tekerlek kayma oranı
$K_{xK}$	: Boylamsal kayma sertliği
$m$	: Taşıt kütlesi, (kg)
$M_{br}$	: Frenleme momenti, (Nm)
$M_x$	: Tekerlek momenti, (Nm)
$P_{br}$	: Fren basıncı, (bar)
$p_{C_x}$	: Magic Formula parametresi
$p_{D_x}$	: Magic Formula parametresi
$p_{E_x}$	: Magic Formula parametresi
$p_{H_x}$	: Magic Formula parametresi
$p_{V_x}$	: Magic Formula parametresi
$p_i$	: Lastik basıncı, (psi)
$p_{i_0}$	: Nominal lastik basıncı, (psi)
$R_{br}$	: Etkin frenleme yarıçapı, (m)
$R_{ef}$	: Tekerlek efektif yuvarlanma yarıçapı, (m)
$S_H$	: Yatay kayma
$S_V$	: Dikey kayma
$t$	: Hidrolik aktüatör zaman sabiti
$v$	: Taşıt hızı, (m/s)
$V_s$	: Kayma hızı, (m/s)
$V_0$	: Referans hız, (m/s)
$x_m$	: Çıkış denkleminde ait $y'$ 'nin pik noktasına olan yatay uzaklığı

$X$	: Giriş değişkeni
$y_a$	: Çıkış denkleminde ait $y$ 'nin en yüksek asimptot değeri
$y_{\max}$	: Maksimum asimptot değeri
$Y$	: Çıkış değişkeni
$\alpha$	: Tekerlek açısal ivmesi, ( $\text{rad/s}^2$ )
$\varepsilon$	: Tekillik önleme değeri
$\lambda_{C_x}$	: Şekil düzeltme katsayısı
$\lambda_{E_x}$	: Eğrilik düzeltme katsayısı
$\lambda_{H_x}$	: Yatay kayma düzeltme katsayısı
$\lambda_{V_x}$	: Dikey kayma düzeltme katsayısı
$\lambda_{\mu_v}$	: Kayma hızı ile azalan tutunma düzeltme katsayısı
$\lambda_{\mu_x}$	: Maksimum tutunma düzeltme katsayısı
$\lambda'_{\mu_x}$	: Azalan tutunma katsayısı
$\mu$	: Tekerlek ile yol arasındaki tutunma katsayısı
$\rho_z$	: Düşey Lastik Deformasyonu, (m)
$\omega$	: Tekerlek Açısal Hızı, ( $\text{rad/s}$ )

### Kısaltmalar

ABS	: Anti-lock Braking System (Anti Blokaj Fren Sistemi)
ECU	: Electronic Control Unit (Elektronik Kontrol Ünitesi)
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türevsel)
TNO	: Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (Hollanda Uygulamalı Bilimsel Araştırma Organizasyonu)

## LASTİK BASINCININ ABS FREN PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Frenleme anında, lastik-yol temasındaki değişimden dolayı, lastiğin üreteceği frenleme kuvveti önemli ölçüde değişmektedir. Lastiğin yol temasını etkileyen en önemli hususlardan biri, lastik basıncıdır. Lastik basıncı arttıkça ve azaldıkça, yol temasının azalması, bunun en önemli nedenidir. Bu nedenle, lastik basıncındaki artış ve azalış, taşıttaki ABS fren sisteminin performansını direkt olarak etkileyecektir. Buna göre, bu çalışmada, lastik basıncının ABS'nin frenleme performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Lastik basıncındaki artış ve azalış için, nominal lastik basıncından daha düşük ve daha yüksek olmak üzere, 3 farklı lastik basıncı kullanılmış ve bu basınçlara göre ABS performansı teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Teorik çalışmada, lastik basıncının ABS performansına etkilerini yansıtabilmek için, mevcut ABS modeline, lastik basıncına duyarlı olarak tasarlanan lastik modeli entegre edilmiştir. Bu model, 30 km/sa ve 60 km/sa ilk hızlı olarak, farklı yol sürtünme katsayılarına sahip olan kuru, ıslak ve kaygan yol yüzeylerinde, ani frenleme girdisinin olduğu frenleme senaryoları için koşturuldu. Deneysel çalışmada da, kritik yol şartlarında aynı lastik basınçları ve fren başlangıç hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, lastik basıncının ABS'nin performansına etkileri, hem teorik hem de deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, nominal lastik basıncından daha düşük ve yüksek lastik basınçlarının etkilediği ABS performansını tekerlek hızı, fren basıncı ve kayma oranı değişimleri üzerinden ortaya çıkarılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** ABS, Lastik Basıncı, Lastik Modeli, Magic Formula, Pacejka.

## **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TYRE PRESSURE ON ABS BRAKING PERFORMANCE**

### **ABSTRACT**

Due to the change in the tire-to-road contact during braking, the braking force generated by the tire will vary significantly. One of the most important issues affecting the tire to road contact is tire pressure. As tire pressure increases and decreases, the reduction of road contact is that the reason is the most important. Therefore, increasing and decreasing in tire pressure will directly affect the performance of the ABS brake system of the vehicle. According to this, in this study, it aimed to investigate the effect of the ABS braking performance of the tire pressure. To increasing or decreasing in tire pressure, including higher and lower than the nominal tire pressure, three different tire pressures are used and ABS performance by these pressure have been investigated theoretically and experimentally. In the theoretical study, in order to reflect the impacts of the ABS performance of the tire pressure, tire model designed to be sensitive to the tire pressure is integrated into the ABS model available. This model was simulated for braking scenarios where is sudden braking input in dry, wet and slippery road environments having different road friction coefficient as 30 km/h and 60 km/h initial speeds. In experimental studies, tests on the same tire pressure and braking initial velocity was carried out in critical way conditions. In this way, the effects of the ABS performance of the tire pressure were investigated both theoretically and experimentally. In these studies, the ABS performance, which is affected by tire pressures lower and higher than the nominal tire pressure, is revealed through wheel speed, brake pressure and slip ratio changes.

**Key words:** ABS, Tire Pressure, Tire Model, Magic Formula, Pacejka.

## GİRİŞ

Taşıtlarda, frenleme esnasında, tekerleklerin kilitlenmesi ve tekerlek kaymasının frenleme performansı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Özellikle kaygan yollarda yapılan ani frenlemede, hem frenleme mesafesi uzamakta ve hem de direksiyon kontrolü oldukça zorlaşmaktadır. Emniyetli ve kararlı bir için, taşıtlarda yaygın olarak, ABS donanımlı fren sistemi (Anti-lock Braking System) kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, ABS kullanılan taşıtların fren performansı ve taşıt kararlılığında diğer taşıtlara göre, önemli üstünlükler sağladığını ortaya koymaktadır. Bu üstünlükleri ortaya çıkaran özellikler, aracın kararlı ve düzgün hareketi, direksiyon kontrolü ve kısa mesafede frenlemedir.

Bu özelliklerin sağlanabilmesi, frenleme sırasında tekerleklerin kilitlenmemesine bağlıdır. Frenleme sisteminden özellikle, aracın yol şartına uygun bir mesafede frenlenmesi beklenilmektedir.

Bu kapsamda, araç güvenlik sisteminin önemli bir bileşeni olan ABS fren sisteminin temel amacı; fren kararlılığını en üst düzeye çıkarmak için yol ile lastik arasındaki tutunmaya uygun fren basıncı değişimi sağlayarak tekerleklerin kilitlenmesini önlemektir. Bu amaç doğrultusunda, ABS fren sistemi, asfalt veya karlı yol gibi farklı sürtünme katsayılı yol şartlarında dayanıklı bir şekilde çalışmalıdır. ABS fren sistemi, tekerlek açısından karmaşık ve doğrusal olmayan bir dinamiğe sahip olup; literatürde, lastik-yol etkileşimine uygun kayma ve tutunma parametrelerini elde edebilmek için, birçok farklı ABS kontrolcüsü geliştirilmiştir. Bu kontrolcülerin kontrol parametreleri, yol tipi ve lastiğin fiziksel özelliklerine dayanıklı bir şekilde tasarlanmaya çalışılmaktadır. Çünkü, ABS fren sistemi için yol tipi ve lastik özellikleri bozucu etkenlerdir. Özellikle frenleme anında, lastiğin fiziksel yapısında meydana gelen herhangi bir değişim, lastik-yol temasını anlık olarak bozduğu için ABS kontrolcüsünü oldukça zorlamaktadır. Burada, lastik fiziksel özelliklerini etkileyen en önemli husus lastik basıncıdır. Çünkü lastik basıncının lastik mekaniğini belirleyen tüm parametrelere etkisi vardır. Bu çalışmanın amacı, lastik basınçlarına

ve yol şartlarına göre uyarlanabilir, yüksek performanslı ABS kontrol algoritması geliştirilmesini sağlayacak hususların ortaya çıkarılmasıdır. Bunun için bu çalışmada, farklı lastik basınçları ve yol koşulları için ABS performansı, simülasyon ve deneysel çalışmalar ile incelenmiştir.

Simülasyon çalışmasında yol tipi ve lastik basıncına göre Pacejka lastik modeli parametrelerinin farklı yol şartlarında farklı değerler aldığı bilinmektedir. Daha sonra, bu değerler kullanılarak, frenleme esnasında, bu şartlara göre hesaplanan sürtünme katsayısına uygun fren torku uygulanacaktır. Bu şekilde lastik basıncının ABS performansına etkileri farklı yol tipinde araştırılmıştır.

Bu kapsamda, birinci bölümde ABS performans parametreleri tanıtılmıştır. ABS'nin kontrol edilebilmesi için kullanılan yöntemler incelenmiş ve bu yöntemlerin kullanılması sonucu kontrol edilen değişkenler ve performans parametreleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bunun üzerine, ABS fren sistemi performansında, lastik koşullarından biri olan lastik basıncının etkisini anlamak için, lastik basıncının fren sistemi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İkinci bölümde, Magic Formula isimli lastik modeline dayalı olarak lastiğin kuvvet eğrilerini elde etmede ve lastik performansında büyük etkiye sahip olan lastik basıncına bağlı olarak boylamsal tekerlek dinamiğini belirlemek amaçlanmıştır. ABS fren sisteminin çalışma prensibine göre, ABS kontrol sisteminin gereksinimleri belirlenmiş ve bu gereksinimleri karşılayacak kontrol sistemi tanıtılmıştır. Taşıt fren sistemi olarak, MATLAB/Simulink yazılımı üzerinden, dinamik sistem modeli kurulmuştur. Sonra, MATLAB/Simulink'te bulunan çeyrek taşıt fren dinamiği modeli kullanılarak, ABS fren sistemi simüle edilmiştir. Lastik basıncının ABS kontrollü fren dinamiğine etkilerini yansıtmak için lastik basıncını belirleyen parametreleri içeren Genişletilmiş Magic Formula isimli lastik modeli kullanılmıştır. Bu parametreler; düşey yük, yüklü lastik yarıçapı, düşey lastik deformasyonu, düşey lastik sertliği ve boylamsal kayma sertliğidir. Bunlardan düşey yük, yüklü lastik yarıçapı, düşey lastik deformasyonu; deney aracında, yapılan ölçümler ile elde edilmiştir. Düşey lastik sertliği ve boylamsal kayma sertliği; bu ölçümlere göre hesaplanmıştır. Bu şekilde, lastik basıncının yansıtıldığı tutunma katsayısı-kayma ve boylamsal sürtünme kuvveti-kayma grafikleri elde edilmiştir. Farklı yol tipleri de yol

tipine bağlı Magic Formula parametreleri değiştirilerek elde edilmiştir. Bu lastik modeli ile elde edilen sonuçlar lastik basıncı ve yol tipine göre ayrı ayrı incelenmiş ve kuru, ıslak ve kaygan yollarda elde edilen sonuçlar lastik basınçlarına göre karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde, yapılan deneysel çalışmaya ait testlerin tasarlanması ve oluşturulması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu testlerde kullanılan ölçüm cihazları tanıtılmış ve bu ölçüm cihazları kullanılarak yapılan ölçümler üzerinde durulmuştur. Ayrıca, bu bölümde testlerde kullanılan üç farklı lastik basıncı ile yapılan ABS testlerine ait test tasarımı verilmiştir. Daha sonra, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuş ve farklı lastik basıncına göre analiz yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar verilerek, öneriler yapılmıştır.

Böylece, bu çalışmanın amacı; düşük ve yüksek hızlarda, lastik basıncı farklılıklarının ABS performansı üzerindeki etkileri, ABS performansının geliştirilebilmesinde nasıl bir rol oynadığı ve ABS fren sistemi kontrolü üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu araştırmaktır. Ayrıca, bu tez çalışması ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda, ABS kontrolü üzerinde çalışan tasarımcılarına önemli bir kaynak oluşturmak ve lastik basıncının ABS performansına etkileri incelenerek literatüre önemli bir katkı sağlamak hedeflenmiştir.

## 1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

ABS fren sistemi, bir taşıtın en önemli güvenlik elemanlarından birisidir. ABS ilk olarak uçaklar için üretildi ve daha sonra otomobillerde kullanıldı. ABS fren sistemleri; 1978 yılında Robert Bosch tarafından bulunmuş, 1980'lerin başında birçok otomobil firması tarafından kullanılmıştır (Bosch, 1999). Günümüzde yeni üretilen tüm taşıtlar standart ABS fren sistemi ile donatılmaktadır. Bu da, ABS'nin frenleme performansının daha da iyileştirilmesi ve eksikliklerinin giderilmesi gerektiğini göstermektedir. ABS (Anti Blokaj Fren Sistemi) adından da anlaşılacağı gibi, tekerleklerin blokajını yani kilitlenmesini önleyen bir sistemdir. ABS fren sistemi, ani frenleme sırasında, tekerleklerin kilitlenme sınırına yaklaştığını algıladığında devreye girerek, ani frenleme manevraları esnasında ve ani frenlemede taşıtın direksiyon hakimiyetini sağlamasına yardım ederek taşıt güvenlik ve kontrolünün iyileştirilmesini sağlar. Tekerleğin kilitlenmesi; ABS sensörünün ölçtüğü tekerlek hız sinyallerinden hesaplanan, tekerlek ivmesinde ve tekerlek kayma oranında ortaya çıkan salınımlar aracılığıyla belirlenmektedir. ABS, frenleme anında, tekerleklerin kilitlenmesini önleyecek şekilde, fren basıncının artırılması, azaltılması ve sabit tutulması ile taşıt kontrolünü sağlamaktadır. Fren basıncının değişimi; tekerlek ivmesinin ve tekerlek kayma oranının değişimine bağlıdır. Bu doğrultuda yapılan birçok çalışma, ABS frenleme performans parametreleri olan tekerlek hızı, taşıt hızı, kayma oranı ve tutunma katsayısına dayandırılmıştır (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015; Dousti ve diğ., 2014; Guo ve diğ., 2014; Mola ve diğ., 2014; John ve Pedro, 2013; Varghese, 2013; Rievaj ve diğ., 2013; van Zyl ve diğ., 2013; Adcox ve diğ., 2011; Kidney ve diğ., 2011; Cheli ve diğ., 2011; Jaiswal ve diğ., 2010).

### 1.1. ABS Kontrol Sisteminin Fren Performansını Belirleyen Parametreler ve Bu Parametrelerin Etkileri

Günümüz taşıtlarında bulunan birçok ABS fren sistemi, kayma oranı ile kontrol edilmektedir. Kayma kontrollü sistemlerde, optimum kayma değeri ile tekerleklerin kayma değerleri karşılaştırılmaktadır. Bu yöntemde, frenleme sırasında, dönen tekerleğin çevresel hızı referans alınarak, tekerleğin kayma oranı hesaplanıp eşik



kayma değerinin sınır olarak seçilmesi söz konusudur. Bununla beraber, ABS performansını belirleyen tekerlek hızı, kayma oranı ve tutunma katsayısı parametreleri de araştırılmalıdır.

### **1.1.1. Tekerlek hızı**

ABS fren sistemleri eşik kayma oranı değerinin tespit edilmesi için, referans olarak sensörlerin ölçtüğü tekerlek hız bilgisinden faydalanmaktadır. Patel ve diğ. (2007), tutunmayı optimum değerde tutmak için yaptıkları kayan kip modüllü kayma kontrolü metodunda, sadece tekerlek hız değişimlerini kullanmışlardır. Schwarz ve diğ. (1997) ise çalışmalarında, ABS kontrol sistemi performansının, elde edilen tekerlek hız bilgisinin kalitesine bağlı olduğunu ifade etmiştir.

### **1.1.2. Taşıt hızı**

Tekerleklerin kayma değerlerinin hesabında kullanılan taşıt hızının bulunması, ABS alışmaları için önem teşkil etmektedir. Bu nedenle, ABS performansının tam olarak tespit edilebilmesi için farklı taşıt hızı tahmin algoritmaları geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, Tanelli ve diğ. (2006), tekerlek hız ve tekerlek ivmesi ölçümüne dayanan yeni bir taşıt hızı tahmin algoritması geliştirmiştir. Bu yaklaşımın az hesap karmaşıklığına sahip olması ile araç elektronik kontrol ünitesi için uygulanabilir olduğunu ve tahmin sonuçlarının tekerlek kayma değerini az hata ile hesaplayabildiğini test etmişlerdir. Weida ve diğ. (2006)'ne göre, frenleme anında, maksimum tekerlek hızına göre, taşıt referans hızının hesaplandığı ABS kontrol algoritmalarının dezavantajının, referans taşıt hızı ile gerçek taşıt hızı arasında büyük bir sapma meydana gelmesidir. Bu nedenle, ABS kontrol ünitesinin her bir kontrol çeviriminde ihtiyaç duyduğu ve referans kayma oranını hesaplamak için kullanılan tekerlek hızına göre, referans taşıt hızının daha kesin bir şekilde hesaplanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Taşıt hızı; kayma oranının bir fonksiyonu olup, kayma oranı değişiminin karakteristiğini belirleyen en önemli parametrelerden birisidir. Ani frenleme anında boylamsal kaymanın taşıt hızı ile doğrudan ilişkili olduğunu düşünen de Hoogh (2005) alışmasında, taşıt hızının etkisini içeren kesin ve doğru sonuçlar elde etmek için, taşıt hızına bağımlı tutunma katsayısı modeli üretmiştir. Böylece, tutunma

katsayısının taşıt hızına göre, nasıl değiştiğini incelemiştir. Ayrıca, boylamsal kuvvet-kayma eğrisinin karakteristik noktaları olan boylamsal kayma sertliği, maksimum tutunma katsayısı ve kilitlenme anındaki tutunma katsayısı için taşıt hızının etkisini araştırmıştır. Taşıt hızının artmasıyla maksimum tutunma katsayısının ve kilitlenme anındaki tutunma katsayısının azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Zhang (2013) çalışmasında, referans taşıt hızını kayma metodu kullanarak hesaplamıştır. Ayrıca, ABS'nin devreye girip girmemesine karar vermesi için kullanılan 7 km/sa taşıt hızındaki eşik değerleri kullanmıştır. Buna göre, eğer taşıt hızı 7 km/sa'ten daha fazla ise, ABS devreye girecektir; aksi halde, ABS devre dışı kalacaktır.

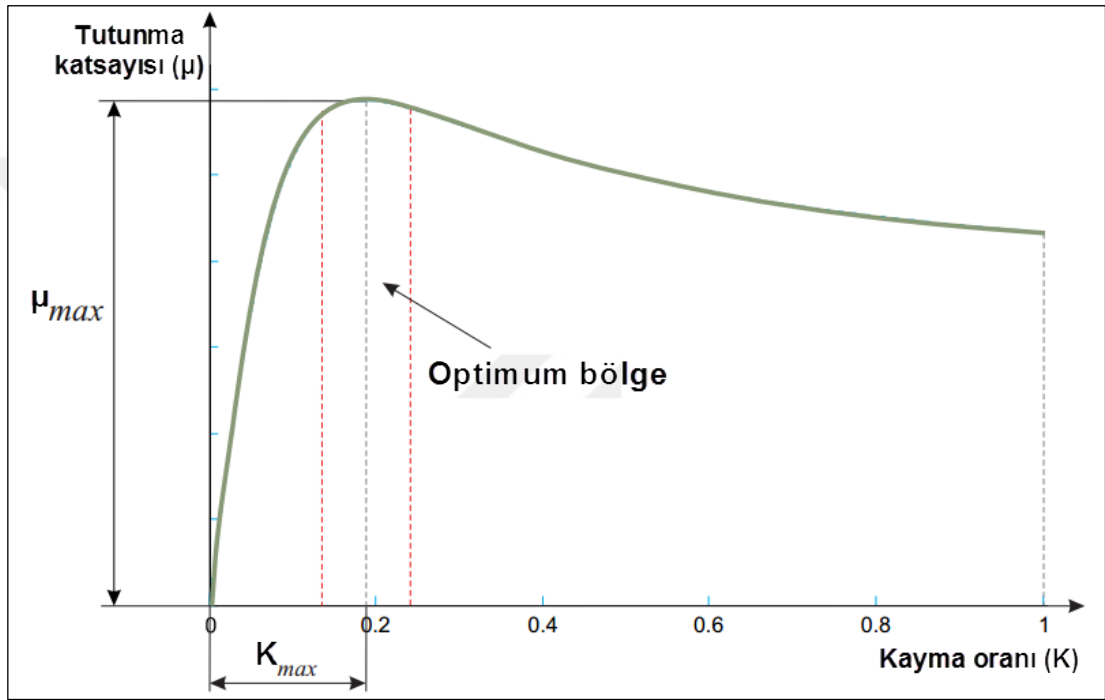
### **1.1.3. Kayma oranı ve tutunma katsayısı**

ABS kontrol sistemindeki her tekerlek için, kontrol parametresi olan boylamsal kayma değeri önceliğe sahip olup; tekerlek açısı hızı, tekerleğin yüklü durumda iken sahip olduğu efektif yarıçap ve taşıtın boylamsal hızı kullanılarak, frenleme esnasında [0-1] aralığında değer alacak şekilde, tekerlek kayma formülasyonları oluşturulur. Boylamsal taşıt dinamiği çalışmalarında, anti blokaj kontrol sistemleri, tekerleklerdeki boylamsal kayma değerini, belirli bir aralıkta tutmaya çalışmaktadır. Buna göre, ABS kontrol sistemi için gerekli referans kayma değerleri, Şekil 1.1'de gösterilen bölgede belirlenmelidir.

ABS sistemine sahip olmayan bir taşıtta, ani frenleme anında, boylamsal tekerlek kaymasının belli bir eşik değerini aşması, tekerleğin kilitlenmesine ( $K=1$  durumu) neden olur. Tekerlekteki kilitlenme, tekerlek ile yol arasındaki sürtünme (tutunma) katsayısının azalmasına neden olmaktadır. Bu durumun taşıt üzerindeki etkileri şunlardır: azalan tutunma katsayısı, sürtünme kuvvetinin düşük olmasına ve bunun sonucu olarak frenleme mesafesinin artmasına neden olur. Ayrıca, tekerlekler direksiyondan gelen komutlara yanıt veremediğinden dolayı; taşıt stabilitesi bozulur ve sürücü, taşıt üzerindeki hakimiyetini kaybeder (Dousti ve diğ., 2013).

Tekerlekteki frenleme kuvvetinin tekerlekteki kaymaya göre farklılaşması; tekerlekten elde edilebilecek frenleme kuvvetini farklılaştırır. Ayrıca, farklı tutunma katsayılı ortamlarda, elde edilecek kuvvet eğrileri de farklılaşır. Buna göre, taşıt tekerlelerinden elde edilebilecek kuvveti, tüm yol koşullarında, optimum seviyede tutabilmek için, tekerlek-yol sürtünme katsayısı bilgisine her an ihtiyaç vardır.

Bunun için, Hoseinnezhad ve Hadiashar (2011)'a göre, tekerlek-yol sürtünme katsayısı; her tekerlekteki tork dengesi kullanılarak ve tekerlek efektif yarıçapı da göz önünde bulundurularak gerçek zamanlı olarak tahmin edilebilir. Böylece, her bir tekerlekteki lastik-yol tutunmasını azamiye çekerek, her bir tekerlek için ayrı fren kuvveti üretilmiştir. Sonuç olarak, incelenen ani frenleme senaryolarında, klasik ABS stratejisine göre, taşıt stabilitesinin iyileştiği ve frenleme mesafesinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 1.1. ABS kayma kontrol aralıkları (Seyedgoosheh, 2010)

Lastik frenleme kuvvet üretimi, tekerlek kayma oranına göre tanımlanabildiği için; ABS kontrol algoritmalarında, kayma oranı önemli bir parametredir. Düşük tutunma katsayılı yüzeylerde, kilitlenmeyi önlemek için; kayma oranı tahmini gereklidir. Tekerlek kayma oranının ifadesi çok basit olmasına rağmen, hem tekerlek efektif yarıçapı hem de taşıt hızının kesin ölçülememesinden dolayı; kayma oranı hesaplaması zordur (Miller ve diğ., 2001).

Hong ve diğ. (2006)'ne göre, kayma kontrollü sistemler frenleme kuvvetini daha doğru bir şekilde kontrol edebilmektedir ve klasik fren kontrol sistemlerine göre farklı taşıtlara daha kolay adapte edilebilmektedir. Kayma kontrolü aracılığıyla, frenleme performansının iyileştirilebilmesi için, her bir tekerlekteki gerçek zamanlı

frenleme kuvveti bilgisi gerekmektedir. Ayrıca, frenleme stabilitesinin artırılması ve minimum frenleme mesafesi için, optimum kayma değerinin belirlenmesi gereklidir.

En kısa frenleme mesafesi, lastik durumuna ve yol şartlarına göre değişiklik göstermekle birlikte, tekerlek kaymasının 0,1 ve 0,2 değerleri arasında seyretmesi sonucunda elde edilir. Bu durumda; sürtünme katsayısı ve buna karşılık gelen sürtünme kuvveti, en büyük değerini alır. ABS kontrol sistemi, boylamsal kayma durumunun ideal boylamsal kayma durumunu takip etmesi ilkesine göre çalışmaktadır. Dolayısıyla, Dousti ve diğ. (2013) kontrole yönelik bir modelin geliştirilmesi açısından, boylamsal kayma durumunun dikkate alınması gerektiğini ifade etmiştir.

Wang ve diğ. (2008)'ne göre, tekerleklerin yalnız kilitlenme kontrolünün yanı sıra kayma değerlerinin hesap edilerek kontrol değişkeni olarak atanması, çözünürlüğü daha yüksek ve daha hızlı kontrol yapabilen bileşenler gerektirir. Böylece, daha hassas bir kontrol uygulaması gerçekleştirilmiş olur.

ABS fren sistemi, kayma anında, boylamsal kaymayı azaltarak taşıt kontrolü sağlar. Buna göre, ABS sistemlerinin çoğu, fren torkunu ayarlamak için, tekerlek kayma bilgisini kullanarak, tekerlek silindir basıncını kontrol eder (Anwar, 2006).

Tekerlekler optimum fren torkunun sağlanması için, lastik-yol sürtünme katsayısı bilgisi, birçok araç güvenlik kontrol sistemi için, son derece yararlıdır (Dousti, 2014).

Cheli ve diğ.(2008) çalışmalarında, ABS algoritmalarının tekerlek kilitlenmesi önlemek için, her bir tekerlekteki fren basıncını, boylamsal tekerlek kayma oranı tahmini ile ayarladığını vurgulamıştır. Ayrıca, burada basınç arttırma, basınç sabit tutma ve basınç azaltma kontrol döngüsü aşamalarının her birinin başlayacağı ve sona ereceği eşik değerlerinin belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Buna göre, kayma oranını ve fren basıncının değişimini belirleyen eşik değerlerin ABS'nin performansını belirleyecek eşikler olduğunu ifade etmişlerdir.

ABS fren sisteminde bulunan elektronik kontrol ünitesi, kayma oranına ait eşik değerlerini kullanarak, basınç değişim noktalarını tespit etmektedir. ABS fren sisteminin performansını belirlediği için, tutunma katsayısının doğru tahmin

edilmesini sağlayan, kayma oranına ait eşik değeri, frenlemede çok kritik bir faktördür (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015). Bu nedenle, bu eşik kayma oranı değerlerini ve tutunma katsayısının tahmin edilmesini etkileyen faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu faktörler ile kayma oranı ve tutunma katsayısının arasındaki ilişkiler araştırılmalıdır.

Kontrol değişkenlerindeki kötüleşmenin en önemli nedeni, lastik ile yol arasındaki tutunmanın tespit edilme zorluğudur. Bu güçlükler nedeniyle gerçek yol ve tutunma şartlarına uygun olmayan kayma oranı değişimlerinin ortaya çıkması, uygun olmayan fren basıncı değişimlerine neden olmaktadır. Ayrıca, Solyom ve diğ. (2004) alışmalarında, lastik ile yol arasındaki etkileşim lineerlik göstermediğinden ABS'nin çalışmasında ortaya çıkan en büyük belirsizliğin, lastik ile yol arasındaki sürtünmeden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, lastik ile yol arasındaki tutunmayı kontrol etmek için geliştirilen kontrol metotları ile düşey yükler değiştirilmiştir. Bunun için, Li ve diğ. (2002) fren basıncı değişim noktalarının yol pürüzlülüğü ve tutunma katsayısı değişimine bağlı olarak sürekli olarak yer değiştirdiği bir ABS kontrol algoritması önermişlerdir.

## **1.2. Taşıtın Frenleme Performansını Belirleyen Parametreler**

Frenleme performansı, ani frenleme durumlarında, bir taşıtın ne kadar etkili ve stabil bir şekilde frenlendiğini belirtir (Varghese, 2013). ABS performansını belirleyen tekerlek hızı, kayma oranı ve tutunma katsayısı parametreleri ve fren basıncı arasındaki uyum karşılaştırılırken; frenleme ivmesi, frenleme süresi, frenleme mesafesi gibi taşıt frenleme performansını belirleyen parametreler referans alınmaktadır.

Çeşitli yol şartlarında, ABS kullanılan taşıtların, frenleme mesafelerinin karşılaştırılması, fren performanslarının önemli göstergesidir. Bu nedenle, ABS fren sistemi kullanılan taşıtların frenleme mesafelerini, değişik yol şartlarında, karşılaştırma çalışmaları ilgi çekmiştir.

Bu anlamda ABS'nin asıl fonksiyonu ıslak, karlı ve buzlu yollarda ortaya çıkmaktadır. Çünkü, lastik ile yol arasındaki sürtünme katsayısı, kilitlenmeye etki eden ve dolayısıyla frenleme mesafesini belirleyen bir özelliktir. Böyle yollarda,

yeterli direksiyon kontrolü, ani frenleme durumunda daha da önemlidir. Çünkü, ABS'siz bir taşıt için bu tip yollarda ani frenleme, daha uzun frenleme mesafesine neden olduğu gibi, direksiyon kontrolünü de tamamen ortadan kaldıracaktır (Altıparmak, 2001).

Taşıtın yol ile bağlantısını sağlayan lastiğe etkiyen kuvvetler, taşıtın ne kadar büyüklükteki bir frenleme ivmesi ile yavaşlayacağını belirler. Bu anlamda, frenleme anındaki lastik-yol tutunması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Taşıtın frenleme mesafesini etkileyen faktörlerden biri de, lastik basıncıdır. Rievaj ve diğ. (2013) lastik basıncının frenleme mesafesine etkisini incelemiştir. Lastik basıncının lastik ile yüzey arasındaki tutunma belirsizliklerini sınırlandırdığı, frenleme mesafesini azalttığı, böylece iyi bir taşıt frenleme performansı elde edildiği optimum değerde olması gerektiğini saptamışlardır. Benzer şekilde, Marshek ve Cuderman (2002) çeşitli lastik basınçları için, ABS ile gerçekleştirdikleri ani frenleme testlerinde, optimum frenleme performansına, nominal (standart) lastik basıncında ulaşıldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Lastik ile yol arasındaki etkileşim, taşıt hareketinde önemli rol oynamaktadır. Lastik-yol arasındaki kuvvetler, lineer bir ilişki ile tanımlanabildiği takdirde, taşıt davranışı tahmin edilebilir ve güvenli bir sürüş durumundan bahsedilebilir. Savitski ve diğ. (2015), lastik-yol arasındaki nonlineer ilişkiden dolayı tahmin edilemeyen bir taşıt davranışı olarak ortaya çıkan ani frenleme anında, taşıtın frenleme performansını deneysel olarak incelemiştir. Sonuç olarak, lastik-yol arasındaki ilişkinin ve ayrıca lastik parametrelerinin nonlineer olmasının, frenleme mesafesinin artmasına neden olduğu ve bunun sonucunda da taşıtın frenleme performansının kötüleştiği görülmüştür. van Zyl ve diğ. (2013), taşıtın frenleme performansının maksimum tutunma katsayısı ile doğrudan ilişki olduğunu ifade etmiştir. Buna göre, ıslak ve buz yol şartlarında, aynı taşıt başlangıç hızı ile yaptığı testlerde, lastik basıncı azaldığında lastiklerin tutunmasının azalması ile frenleme mesafesinin olumsuz olarak etkilendiği görülmüştür.

### **1.3. ABS Kontrol Metotları**

ABS, farklı kontrol metotları kullanabilmektedir. Xin ve diğ. (2008) çalışmalarında, ABS fren sistemlerinin eşik değer kontrol metotlarına sahip olduklarını ve bu

prensibin referans kayma oranına dayandığını savunmaktadırlar. Ayrıca, anti blokaj mantığına göre, kayma oranının maksimum tutunma katsayısı civarında salındığını, böylece yüksek boylamsal lastik kuvvetleri ve daha kısa frenleme mesafesi elde edilebildiğini düşünmektedirler.

Etkili metotlardan biri de, farklı kurallara dayanan bulanık mantık (fuzzy logic) kontrol metotlarıdır. Precup ve diğ. (2004) çalışmalarında, ABS kayma kontrolünde kullanılan karmaşık dinamik modelleri ek özellikler ile genişletilebilen bulanık mantık kontrolü tasarlamışlardır. Guo ve diğ. (2014) ise çalışmalarında, optimum kayma değeri elde etmek için geliştirdikleri kayan kip modüllü (sliding mode) kayma kontrolörüne ait üstel parametrelerin optimizasyonunda bulanık mantık kontrol metodunu uygulayarak, kontrol kalitesini iyileştirmişlerdir. Bunun sonucunda, geliştirdikleri kontrolör ile klasik Bang-bang kontrolöre göre, daha hızlı ve kesin kayma oranı denetimi gerçekleştirildiği ve fren stabilitesinin arttığını görmüşlerdir.

John ve Pedro (2013) ise çalışmalarında, lastik-yol etkileşiminin nonlineer olmasından ve taşıt dinamiğindeki belirsizliklerden dolayı geribeslemeli, PID ve kayan kip modüllü kontrol gibi standart kontrol metotlarının yeterli olmayacağını düşünerek; başka bir kontrol olarak, ABS kontrolü için, yapay sinir ağ tabanlı geribeslemeli kontrol metodu tasarlamışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, tasarladıkları kontrolörün, PID kontrolöre göre; farklı tutunma değerlerine sahip yol şartları için uygun olduğunu, frenleme torkunu iyileştirdiğini ve daha kısa frenleme mesafesi elde edildiğini ortaya çıkarmıştır. Al-Mola ve diğ. (2014) çalışmalarında, klasik PID kontrolörün taşıt dinamiğinde her zaman var olan kararsızlıklar için, yeterli olmayacağını düşünmüşlerdir, Bu nedenle, dinamik sistemin kararlılığını iyileştirmek için, kayan kip modüllü kontrol ve aktif kuvvet kontrol yöntemlerini, klasik PID ile birleştirmişlerdir. Bunun sonucunda, ABS için tasarladıkları kontrolcülerin ani frenleme sırasında, klasik PID kontrolörüne göre, performansı iyileştirdiğini görmüşlerdir.

Lin ve Ting (2007) çalışmalarında, geri adımlı kontrol metodu kullanarak ABS ile aktif süspansiyon sistemini entegre etmiştir. Böylece, frenleme anında süspansiyon sistemi, fren kuvveti değişimine göre, tekerlekler üzerindeki düşey yük miktarını değiştirerek, lastik-yol arasındaki tutunma arttırılmıştır. Sadece ABS ile yapılan

simülasyon ile 47 m frenleme mesafesi elde edilirken; aktif süspansiyon sisteminin ABS ile entegre edildiği frenleme sistemi ile 41 m frenleme mesafesi elde edilmiştir. Sonuç olarak; frenleme süresi ve mesafesi azaltılarak, ABS fren sisteminin performansını arttırılmıştır.

#### **1.4. Lastik Modeli ve Etkilendiği Parametreler**

Lastik modelleri, lastik ile yol arasındaki ilişkiyi incelemek için, kullanılan matematiksel modellerdir. Lastik modellemesi, tekerlek mekaniğini anlamak ve de tekerlek-taşıt kombinasyonu çalışmaları için yapılmaktadır.

Taşıt ile yol arası ilişki, lastik ile olduğu için; lastik modeli, taşıt modellemelerinde çok büyük öneme sahiptir. Bu önemi dolayısıyla, lastik modellemesi üzerine çok sayıda teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada da lastik modelleri ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiş ve simülasyonlarda kullanılmaları hakkında bir değerlendirme yapılmıştır.

Çeşitli taşıt dinamiği problemleri için çok sayıda lastik modeli geliştirilmiştir. Her biri özel amaçlarla yapılan bu lastik modelleri, farklı doğrulukta ve komplekslikte olduğu gibi kullanım bakımından da farklı kategorilerde olabilmektedirler.

Taşıt dinamiğinde, lastik davranışının modellenmesi, iki farklı yaklaşımla yapılmaktadır: teorik (analitik) ve deneysel (ampirik) modelleri. Tekerlek dinamik özellikleri üzerine yapılan teorik çalışmaların çoğu, lineer ve birbirinden bağımsız karakteristikler veya nonlineer ve birbirine bağımlı karakteristikler üzerine kurulmuştur. Diğer çalışmalar ise, yapılan deneyler üzerine kurulmuştur. Her bir grup model teorik, deneysel veya her ikisinin kombinasyonu şeklinde olabilir. Kullanılan tekerlek modellerinde daha çok öneme sahip parametrelerin kullanılması, parametre sayısının az olması, verdiği sonuçların iyi olması, teorik olarak kolay uygulanıp fazla deney gerektirmemesi aranan özelliklerdir. Probleme yaklaşım bakımından, iki uç noktada bulunan teorik ve deneysel modellerde, deney ve modeller arası yüksek uygunluk elde edilmesine rağmen, yapılması gereken deney ve belirtilmesi gereken tekerlek parametreleri fazladır. Örneğin, modellerin basitliği



açısından bakılacak olursa, deneysel modeller teorik modellere göre daha fazla tekerlek parametresi istemektedirler.

Teorik lastik modelleri, katı mekaniği kuramları kullanılarak, detaylı lastik-yol temas bölgesinin karakterizasyonunun yapılmasını, yani tekerlek ve yol arasında oluşan kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanmasını sağlayan karmaşık modellerdir. Tekerlek-taşıt simülasyonlarında, taşıt dinamiği kontrolü çalışmaları için kullanılan karmaşık matematiksel yapılara sahip bu tür lastik modelleri, ölçüm dataları yerine geçmek üzere kullanılırlar. Dolayısıyla, simülasyonlarda, lastik modelinin çok büyük bir önemi vardır (Eldoğan, 1995).

Lastik davranışını yansıtan bir diğer modelleme türü olan deneysel modeller ise, çok sayıda girdi-çıkı ilişkisi olan tekerlek testine dayanır. Deney sonuçları tablo haline getirilir ve sayısal metotlarla formüle edilirler. Deneylere dayanmaları sebebiyle, istenen taşıt dizaynı çalışmalarında kullanılmak üzere, iyi yaklaşımların elde edilmesini sağlarlar. Deneysel lastik modellerinin en çok kullanılanı ise, Pacejka Lastik Modelidir. Bu model, testler sonucunda elde edilen lastik davranışını, trigonometrik fonksiyonlar da kullanarak, uydurmaya çalışmaktadır (Pacejka, 2002).

Lastik parametreleri, taşıt kontrol sistemleri için çok önemlidir (Miller ve diğ., 2001). Aşağıda lastik modelini etkileyen düşey lastik sertliği, boylamsal tutunma katsayısı, boylamsal kayma sertliği ve lastik basıncı parametreleri açıklanmıştır.

#### **1.4.1. Düşey lastik sertliği**

de Hoogh (2005) ve op het Veld (2007) çalışmalarında; lastik basıncının artmasıyla, düşey lastik sertliğinin arttığını ve bunun sonucunda temas uzunluğunun azaldığını vurgulamıştır. de Hoogh (2005) aynı zamanda, TREADSIM lastik simülasyon modeli ile düşey lastik sertliğinin; taşıt hızından etkilendiği ve taşıt hızının artmasıyla, düşey lastik sertliğinin arttığı; bunun sonucunda da, temas uzunluğunun azaldığını da belirtilmektedir.

Zegelaar (1998) ise yaptığı deneysel çalışmada; düşük aks salınımlarında, taşıt hızının artmasıyla, düşey lastik sertliğinin azaldığını; yüksek aks salınımlarında, taşıt hızının artmasıyla, düşey lastik sertliğinin arttığını belirtmiştir.

### **1.4.2. Boylamsal tutunma katsayısı**

Maksimum boylamsal tutunma katsayısı, taşıt hızından doğrudan etkilenmektedir. de Hoogh (2005) çalışmasında, taşıt hızının artmasına karşılık maksimum boylamsal tutunma katsayısının azaldığını görmüştür. Buna göre, maksimum boylamsal tutunma katsayısının taşıt hızının bir fonksiyonu olduğu sonucuna ulaşmıştır. de Hoogh (2005), aynı zamanda maksimum boylamsal tutunma katsayısının lastik basıncı ile ilişkili olduğunu savunmuştur. Yaptığı deneysel ölçümler sonucunda, maksimum boylamsal tutunma katsayısının nominal lastik basıncında elde edildiği görülmüştür. Nominal lastik basıncından daha yüksek veya düşük lastik basınçlarında ise, maksimum boylamsal tutunma katsayısının azaldığı görülmüştür. Bu da, frenleme performansının azaldığını belirtmektedir. Savitski ve diğ. (2015) çalışmalarında, lastik basıncının boylamsal tutunma katsayısını önemli ölçüde etkilediğini görmüştür.

### **1.4.3. Boylamsal kayma sertliği**

Bir lastiğin sertliği, öncelikli olarak lastik basıncı ile belirlenmektedir. Boylamsal kayma sertliği; lastiğin taşıt yönlendirme parametrelerinden biri olan boylamsal lastik kuvvetini karakterize etmektedir (Varghese, 2013). Miller ve diğ. (2001)'ne göre; boylamsal kuvvet ve boylamsal kayma arasındaki ilişkinin lineer olduğu bölgede, lastiğin boylamsal sertliği kullanılarak; boylamsal kuvvet, boylamsal kaymaya orantılı olarak yaklaştırılabilir. Bu sertlik, lastiğin yola temas alanına bağlıdır. Sonuç olarak lastiğin boylamsal sertliği, lastik ile yol arasındaki temas alanının uzunluğunu belirleyen lastik basıncına önemli ölçüde bağlıdır. Yaptıkları deneyde ise, lastik basıncının artması ile lastiğin boylamsal sertliğinin azaldığı görmüşlerdir. Savitski ve diğ. (2015) çalışmalarında, lastik basıncının boylamsal kayma sertliğini belirgin bir şekilde etkilediğini görmüştür.

op het Veld (2007) çalışmasında, hem TREADSIM modeli ile simülasyon hem de deneysel ölçüm sonuçlarında, lastik basıncının artmasıyla boylamsal kayma sertliğinin azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Aynı şekilde, boylamsal kayma sertliğinin lastik basıncı ile ilişkili olduğunu savunan de Hoogh (2005) da çalışmasında, büyük ve küçük lastik için, benzer şekilde hem TREADSIM modeli ile simülasyon hem de deneysel ölçüm yapmıştır. Simülasyon sonuçlarında, hem büyük hem de küçük lastik

için, lastik basıncının artmasıyla boylamsal kayma sertliğinin azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Fakat deneysel ölçüm sonuçlarında büyük farklılık görülmüştür. Büyük lastik ile yapılan deneysel ölçüm sonucunda, lastik basıncının artmasıyla, boylamsal kayma sertliğinin azalmıştır; küçük lastik ile yapılan deneysel ölçüm sonucunda, lastik basıncının artmasıyla, boylamsal kayma sertliğinin artmıştır.

Carlson ve Gerdes (2003), lastiğin boylamsal sertliğini ve tekerlek efektif yarıçapını tanımlayan nonlinear tahmin stratejisi sunmuşlardır. Sonra, bu stratejiyi çeşitli test şartları altında, hem bir yaz hem de bir kış lastiğinin boylamsal sertliğini ve efektif yarıçapını deneysel olarak tanımlamak için kullanmışlardır. Elde ettikleri veriler, düşük kayma oranı bölgesinde, lastiğin boylamsal sertliğini lastik basıncı ve düşey yük gibi parametrelerin önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, lastiğin boylamsal kayma sertliğinin kuru yoldan ıslak yola geçişte en az etkilendiğini belirtmişlerdir.

#### **1.4.4. Lastik basıncı**

Boylamsal kayma sertliği ve maksimum tutunma katsayısının lastik basıncı ile doğrudan ilişkilidir. de Hoogh (2005) lastik basıncının kuvvet ve momentlere etkisini tanımlamak için, Magic Formula parametrelerini lastik basıncına bağlı olacak şekilde genişlettiği çalışmada, TREADSIM modeli ile aynı taşıt hızı için yaptığı simülasyonlarda lastik kuvvet ve moment sonuçlarını elde etmiştir. Taşıt dinamiği davranışını simüle etmek için Magic Formula parametrelerini kullandığı bu simülasyonlarda, lastik basıncının artmasıyla maksimum tutunma katsayısının azaldığını görmüştür. Deneysel sonuçlarda ise, maksimum tutunma katsayısının en yüksek nominal lastik basıncında elde edildiğini ve nominal lastik basıncının haricindeki diğer basınçlarda ise lastik basıncı azaldıkça maksimum tutunma katsayısının azaldığını görmüştür. Savitski ve diğ. (2015) lastik basıncının değişmesi ile maksimum tutunma katsayısının elde edildiği eşik kayma oranı değerinin değiştiğini görmüştür.

#### **1.5. ABS Fren Sistemine Lastiğin Etkisi**

Günümüzde kullanılan ABS fren sistemleri, kontrol algoritmalarına dayalıdır ve ECU içerisine gömülüdür. Bu, çeşitli şartlar altında aracın güvenliğini sağlayabilmek

için dizayn edilen ve bir kontrol mantığı olan ABS kontrolörü yaklaşımına dayanmaktadır. Ancak, gerçekte ABS'nin çalışması hava sıcaklığı, yüzey koşulu, lastik basıncı, aşınma durumu gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu, kullanım ömrü boyunca aynı kalmayan ve ABS'nin kontrol etmeye çalıştığı ana eleman olan lastiğin dinamik bir parça olmasından dolayıdır. Bir lastik çeşitli basınçlarda çalışabilir, yıpranmadan dolayı diş derinliği küçülebilir, kullanım süresine ve hava sıcaklığına göre ısınabilir veya soğuyabilir. Bu, lastiğin mekanik özelliklerinde ve yola temas eden lastiğin malzeme özelliklerinde sürekli değişime neden olur. Lastiğin yapısı, basıncı ve sıcaklığı ile lastik karakteristiğinin nasıl değiştiğini görmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların amacı, lastik basıncının ve sıcaklığının lastik karakteristiğine etkisini açıklayan lastik modelleri geliştirmektir. Bu alandaki patentlerin özeti Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Lastik koşullarının etkisi üzerine yapılmış çalışmalar (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015)

<b>Kuruluş</b>	<b>İncelenen Koşul</b>
TNO Automotive and TU, Delft	Lastik basıncı
Michelin, Greenville, South Carolina	Lastik yüzeyi, yükü, izi ve ortam sıcaklığı
Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, and Renault SA, Paris	Lastik yüzey sıcaklığı
Toyota, Aichi Prefecture, Japan	Lastik yüzey sıcaklığı
University of Surrey, Surrey, UK	Lastik yüzey sıcaklığı

Bu çalışmalar, genellikle ABS üreticileri tarafından yapıldığı ve tescilli bilgileri içerdiği için; ABS performansında lastiğin etkisi üzerine çalışan kuruluşlarda mevcut olan bilgilerle sınırlıdır (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015). Özellikle, ABS kontrolü içeren frenleme çalışmalarında, lastik basıncı etkisinin araştırılıp ayrıntılı bir şekilde ele alınarak yayımlandığı çalışma eksikliği bulunmaktadır (Savitski ve diğ., 2015).

Bazı çalışmalarda, farklı araçların aynı lastiğe nasıl farklı tepkiler verdiğini ve ABS performansında lastiğin boylamsal kuvvet-kayma eğrisinin etkisi gösterilmiştir (Kidney ve diğ., 2011). Bu eğrilerde eşik kayma oranı, lastiğin pik değerinin elde edildiği nokta olarak tanımlanır. Bu nedenle, lastik basıncının değişimi, eşik kayma oranı değerini etkilemektedir (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015). Savitski ve diğ. (2015) lastik basıncının değişmesi ile eşik kayma oranı değerinin değiştiğini görmüştür. Sonuç olarak, lastiğin boylamsal kuvvet-kayma eğrisi bilgisine dayanan parametreleri, dinamik olarak ayarlamaya uyarlanan ABS algoritmalarının; frenleme mesafesi performansını iyileştireceği görülmüştür (Cheli ve diğ., 2011). Bu, taşıt için gerekli olan bilgiyi sağlayan akıllı lastik varsayımına dayanmaktadır (Singh ve Sivaramakrishnan, 2015). ABS'nin frenleme mesafesi performansında, lastik dizayn parametrelerinin etkisini anlamak için; deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015). Bu anlamda, örneğin ABS fren sisteminin performansında burulma sertliği gibi başlıca lastik yapısı parametrelerinin etkisi üzerine odaklanıldığı çalışmalar mevcuttur (Adcox ve diğ., 2011). de Hoogh (2005) çalışmasında, tekerlek kilitlenmesinde lastik basıncının etkisini araştırmak için, kilitlenme anındaki tutunma katsayısı için lastik basıncının etkisini incelemiştir. Lastik basıncı ve lastik kilitlenmesi arasındaki ilişkiyi bulmak için; TNO lastik test treylerinden elde ettiği ölçümleri ve MATLAB/Simulink ortamında M-Function olarak temsil edilen TREADSIM modelinin simülasyon sonuçlarını araç olarak kullanmıştır. TREADSIM modelinin simülasyon sonuçlarında, lastik basıncının artmasıyla kilitlenme anındaki tutunma katsayısının azaldığını görmüştür. Deneysel sonuçlarda ise, kilitlenme anındaki tutunma katsayısının en yüksek nominal lastik basıncında elde edildiğini ve nominal lastik basıncının haricindeki diğer basınçlarda ise lastik basıncı azaldıkça kilitlenme anındaki tutunma katsayısının azaldığını görmüştür.

Savitski ve diğ. (2015) çeşitli lastik basınçlarında, lastik-yol arasındaki nonlinear ilişkiden ve yine nonlinear olan lastik parametrelerinden dolayı meydana gelen ve tahmin edilemeyen bir taşıt davranışı olarak ortaya çıkan ani frenleme anında, ABS kontrol sistemini ve taşıtın frenleme performansını deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada, lastik basıncının, ABS performansını etkileyen maksimum tutunma katsayısı, sertlik ve diğer lastik karakteristiklerini farklı olarak etkileyebilmesinden

yararlanılmıştır. Sonuçlar, referans kayma oranı ile kontrol edilen ABS fren sisteminin lastik basıncına karşı duyarlı olduğunu göstermiştir. Buna bağlı olarak, lastik karakteristiği değişimine neden olan lastik basıncının uyarlanabilir ABS fren sistemi kontrol algoritması için, bir kontrol fonksiyonu olarak ele alınması gerektiği önerilmiştir. Bunun sonucunda, lastik basıncının ABS ile adapte edilebileceğini ve ABS performansını iyileştirilebileceği vurgulanmıştır.

op het Veld (2007) çalışmasında, Matlab'de 100 km/sa taşıt hızı ile yaptığı simülasyon testlerinde, lastik basıncı azaldığında, fren stabilitesini belirleyen savrulma hız oranının daha büyük genlikte oluştuğu sonucuna ulaşmıştır. Çoğunlukla bu çalışmalar, ABS çalışma aralığı ile uyuşan lastik karakteristikleri sağlayan dizayn önerileri sağlamak için gerçekleştirilmiştir. Dousti ve diğ. (2013) Pacejka tarafından önerilen Magic Formula lastik modeli kullanarak, frenlenen lastiğin zemin ile etkileşimi esnasında meydana gelen fren kuvvetinin boylamsal kaymaya göre değişim grafiğinin tahmin edilmesine yönelik geliştirdikleri algoritma ile simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Bu algoritmanın çıktısı olan parametrelerle, ABS kontrol algoritması güncellenerek, günümüz taşıtlarında kullanılan algoritmalara göre, daha yüksek performanslı algoritma elde edilmesi hedeflenmiştir. Jaiswal ve diğ. (2010), ABS sisteminin performansına lastik davranışının etkisini MATLAB/Simulink'te kuru, ıslak ve kaygan yol şartları için simülasyonunu yaparak, 3 farklı lastik modelinin dinamik davranışını incelemiştir. Lastik karakteristiğinin, tekerlek fren basıncındaki ani değişimlerin sonucu olarak, tekerlek hız salınımlarına neden olan önemli bir etki olabileceğini düşünmüşlerdir.

Tekerleklerin rijit olarak düşülmesi ile hazırlanan ABS algoritmasının, aracın frenleme mesafesi performansının kötü olmasına neden olması muhtemeldir. Birçok çalışmada ABS kontrol yapısı, lastik modellerinin geçici rejimde olduğu düşünülerek modellenmiştir.

Böylece lastik modellerinin ABS fren performansına etkileri incelenmiştir. Adcox ve diğ. (2011); lastik dizaynlarının ABS fren sistemine etkilerini incelemek için, önce küçük bir binek taşıtın fren sisteminin simülasyon modelini tasarlamışlardır. Bu fren sistemi modeli, lastik yanağının torsiyonel bükülmesini, dinamik sürtünmeli yüzey ve fren hidroliği gibi parametreler içermektedir. Ayrıca bu modelde, tekerlek

sönümlemesi, lastiğin yanak elastikiyeti ve tekerlek ataleti gibi çeşitli lastik ve tekerlek dizayn parametreleri ile birlikte, ABS kontrol algoritmasının parametreleri değiştirilebilmektedir. Ayrıca, tekerleğin torsiyonel dinamiği değişikçe, frenleme mesafesinin iyileşmesi için, ABS kontrol algoritmasının içerisine, filtre yerleştirilmiştir. Değişken tekerlek ve lastik parametrelerinde, iyi bir performans elde edilebilmesine ve frenleme mesafesinin azaltılabılmesine, düşük filtre kesim frekansı kontrolörü ile ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, düşük tekerlek ataletlerinde sistemin kontrol edilemediği ve frenleme mesafesinin önemli ölçüde arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Rievaj ve diğ. (2013) lastiğin enine deformasyon yönündeki lastik rijitliğini etkileyen lastik basıncına bağlı frenleme mesafesini incelemiştir. Bu durum, aynı taşıt başlangıç hızı ve kuru yol şartında, 3 farklı lastik basıncı ile test edilmiştir. Bu basınçlar; nominalin üstü, nominal ve nominalin altı lastik basıncı değerleridir. Frenleme mesafesi ve taşıt stabilitesini etkileyen frenleme açısından, nominal lastik basıncının daha faydalı olduğunu gözlemlemişlerdir. Marshek ve Cuderman (2002) çeşitli lastik basınçları için ABS ile ani frenleme testleri gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu ani frenleme testlerinde, optimum frenleme performansına, nominal lastik basıncında ulaşıldığı sonucuna ulaşmışlardır. Benzer şekilde van Zyl ve diğ. (2013), CarSim simülasyon yazılımını kullanarak, aynı taşıt başlangıç hızı ve kuru yol şartında, 3 farklı lastik basıncı durumunu simüle etmiştir. Bu üç farklı taşıt konfigürasyonu; tüm lastiklerin nominal lastik basınçta olduğu, sadece ön tekerleklerin nominal lastik basıncının altında olduğu ve sadece arka tekerleklerin nominal lastik basıncının altında olduğu durumlardır. Bu çalışmanın sonucunda, lastik basıncının nominal lastik basıncının altında olmasından önemli ölçüde etkilenen taşıt ve frenleme stabilitesinin kötüleştiği görülmüştür.

ABS fren sistemleri, lastik-yol etkileşimi ile ilgili parametreleri kontrol ettiği için; yapılan literatür çalışmalarında, genellikle, kayma ve tutunma değerlerini doğru elde edebilmek için, farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde, yol tipi ve lastik basıncı gibi bozucu etkiler nedeniyle, kayma ve tutunma katsayısı değişimleri lineer olmayan karakteristikler sergilemiştir. Ancak bu gibi bozucu etkilerin ABS'ye etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Aynı zamanda bu çalışmalarda hem ıslak yoldan kaygan yola veya kaygan yoldan ıslak yola geçiş gibi kritik yol şartları hem de farklı

frenleme başlangıç hızları göz önüne alınmamıştır. Halbuki düşük hızlarda zayıf tekerlek hız sinyali nedeniyle geciken fren basıncı değişim kararı ABS'yi etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bunun yanında düşük hızda fren basıncı değişimini geciktiren ve bu nedenle ABS'yi en çok zorlayan diğer husus, ABS ile frenleme anında aynı aks veya aynı yöndeki tekerleklerin farklı tutunmaya sahip yollara geçişleridir. Literatür çalışmasında elde edilen diğer önemli sonuç, lastik-yol etkileşimi ile ilgili ABS çalışmalarının performans analizinde kayma sertliği, lastiğin düşey sertliği, lastik dış sertliği vb. lastik parametrelerinin göz önüne alınmasının önemidir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, lastik basıncı nedeniyle kayma ve tutunma da meydana gelen farklılıkların hem farklı fren başlangıç hızlarında hem de kritik yol şartlarında ortaya çıkarılması ve bunların ABS'nin kontrol ve frenleme performansına etkilerinin, boylamsal kayma sertliği ve düşey lastik sertliği gibi iki farklı lastik parametreleri ile incelenmesidir. Bu şekilde, bu sonuçları kullanarak, lastik basıncına göre kayma veya ivme kontrolünü yeniden düzenleyen lastik basıncı-ABS entegrasyonu tasarlanabilecektir. Bu entegrasyonun gerekliliği; Michelin'in 2016 yılında gerçekleştirdiği araştırmaya göre, sürücülerin %80'inin aracının lastik basıncını kontrol etmemesi şeklinde elde edilen, lastik kontrolü araştırma sonucu ile apaçık ortaya çıkmaktadır. Böylece, bu entegrasyon sayesinde dikkate alınmayan lastik basıncının ABS performansı üzerindeki kötü etkileri sürücüden bağımsız bir şekilde telafi edilebilecektir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, lastik basıncı nedeniyle kayma ve tutunma da meydana gelen farklılıkların hem farklı fren başlangıç hızlarında hem de kritik yol şartlarında ortaya çıkarılması ve bunların ABS'nin kontrol ve frenleme performansına etkilerinin incelenmesidir. Bu şekilde lastik basıncına göre kayma veya ivme kontrolünü yeniden düzenleyen lastik basıncı-ABS entegrasyonu tasarlanabilecektir. Bu sistem, lastik basıncının ABS performansı üzerindeki kötü etkilerini telafi edebilecektir. Sürücülerin çoğunun aracının lastik basıncını kontrol etmemesi; bu sisteminin gerekliliğini apaçık ortaya koymaktadır.



## **2. LASTİK BASINCINA BAĞLI ABS MODELİ VE SİMÜLASYONU**

Bu çalışmadaki simülasyonlarda kullanılan matematiksel modeller, öncelikli olarak 3 bileşenden oluşmaktadır;

1. Çeyrek taşıt fren dinamiği modeli
2. ABS fren sistemi modeli
3. Lastik modeli

Ayrıca simülasyonlar sırasında aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır;

1. Yol yüzeyinin pürüzlülüğündeki dalgalanmaların lastiğe etkisi yok sayıldığı için, sabit sürtünme katsayılı bir yoldaki ani frenleme senaryoları gerçekleştirilmiştir.
2. Frenleme sırasında, yanal yük transferinin olmadığı ve tekerleklerin yanal kuvvet üretmediği kabul edilmiştir.
3. Frenleme boyunca lastik basıncı ve lastik ile ilgili diğer tüm parametrelerin sabit kaldığı varsayılmıştır.

### **2.1. MATLAB/Simulink Boylamsal Taşıt Dinamiğinin Modellenmesi**

Bu bölümde, taşıt dinamiği ve tekerleğin boylamsal dinamiğinin matematik modelinin MATLAB/Simulink ortamında oluşturulması ve kullanılacak taşıtın tanıtılması amaçlanmaktadır.

Boylamsal taşıt dinamiği ve ABS kontrol sistemi, MATLAB/Simulink yazılımında, M-Function ile temsil edilerek kullanılmıştır. Taşıtın tekerlek sistemi; taşıtın hızlanması ve yavaşlamasında, birincil etkiye sahip olmayan ve tekerlek sistemine direksiyonla veya sistem dışından uygulanacak yanal bir kuvvet olmadan tekerleklerin yanal kuvvet üretmeyeceği duruma getirilmiştir.

Boylamsal taşıt dinamiği modellemesinde, taşıt süspansiyon sisteminin ihmal edilmesiyle, ön ve arka akstaki düşey yükler, statik yük dağılımına ek olarak, boylamsal doğrultudaki ivmenin bir fonksiyonuyla, dinamik aks yükü adı altında ifade edilebilir (Cho ve diğ., 2010).

Buna göre, çalışma kapsamında direksiyon girdisi olmayan, sürtünme katsayısı sabit, boylamsal ve yanal eğimi olmayan yol ortamında çalışıldığı için, hesaplanan aks yükleri, tekerleklere eşit olarak paylaştırılmıştır.

Bu analizde çeyrek taşıt modeli kullanılmıştır. Aşağıda Tablo 2.1’de, taşıt için geçerli olan ve boylamsal taşıt dinamiği modellemesinde de kullanılacak parametreler ve değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Taşıt Parametreleri

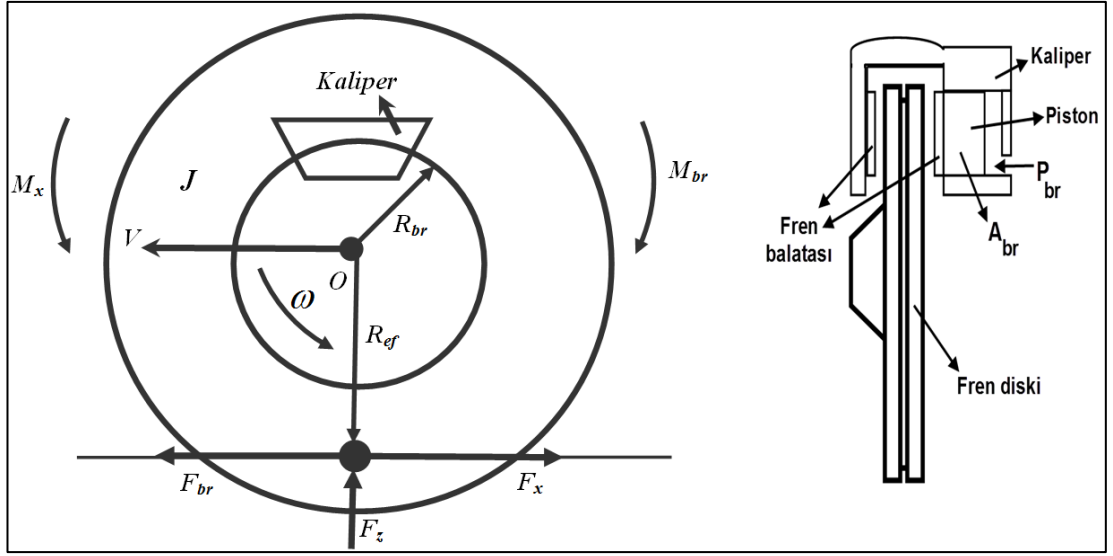
Bileşen	Parametre	Değer	Birim
Asılı Kütle	Kütle	1412	kg
	Ağırlık	13851,72	N
Tekerlek	Yüksüz Yarıçap	0,31595	m
	Etkin Yarıçap	0,2582	m
	Atalet Momenti	6	kg-m <sup>2</sup>
Fren Sistemi	Maksimum Basınç	103	bar

## 2.2. Çeyrek Taşıt Fren Dinamiği Modeli

ABS fren performansını analiz etmek için; performans parametrelerinin ve bu parametrelerin bağlı olduğu, fren dinamiği büyüklüklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.1’de görülen çeyrek taşıt fren dinamiği modelinde, efektif yuvarlanma yarıçapı, tekerlek merkezine göre lastik temas merkezinin değişimi ile hesaplanmaktadır. Sürtünme momenti ( $M_x$ ) ve hidrolik fren sisteminden elde edilen frenleme momenti ( $M_{br}$ ), lastiğe etkiyen boylamsal kuvvetin efektif yuvarlanma yarıçapı ve hidrolik fren kuvvetinin etkin frenleme yarıçapı ile çarpılmasıyla elde edilir;

$$M_x = F_x R_{ef} \quad (2.1)$$

$$M_{br} = F_{br} R_{br} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1. Çeyrek taşıt fren dinamiği modeli

Burada,  $F_x$  boylamsal tekerlek kuvvetini,  $F_{br}$  hidrolik fren kuvvetini ve  $R_{ef}$  tekerlek efektif (etkin) yuvarlanma yarıçapını temsil etmektedir

### 2.2.1. Frenleme anında taşıt gövdesinin dinamiği

Frenleme anında, taşıt gövdesi dinamiği; taşıt gövdesinin ataleti ile taşıtı sürüklemeye çalışan kuvvet ve buna reaksiyon gösteren, lastik ile yol arasındaki tutunma katsayısının fonksiyonu olan tutunma kuvveti arasındaki dengeden oluşmaktadır. Buna göre; taşıt gövdesi kuvvet dengesi, aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir;

$$m\dot{v} = -F_x \quad (2.3)$$

$$F_x = \mu F_z \quad (2.4)$$

Yukarıdaki denklemlerde;  $m$  taşıt kütleini,  $v$  taşıt hızını,  $\mu$  tekerlek ile yol arasındaki sürtünme (tutunma) katsayısını ve  $F_z$  tekerlek düşey yükünü ifade etmektedir.

### 2.2.2. Frenleme anında tekerlek dinamiği

Frenleme anında tekerlek dinamiği modelinin denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$M_x = \mu F_z R_{ef} \quad (2.5)$$

$$F_{br} = P_{br} A_{br} \quad (2.6)$$

$$K_f = A_{br} R_{br} \quad (2.7)$$

$$M_{br} = P_{br} A_{br} R_{br} = P_{br} K_f \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde;  $P_{br}$  hidrolik fren basıncını,  $A_{br}$  tekerlek fren piston alanını,  $R_{br}$  etkin frenleme yarıçapını ve  $K_f$  fren sabitini ifade etmektedir.

Buna göre, tekerlek merkezine göre, tekerlek moment (tork) dengesi Denklem (2.9)'daki gibidir;

$$J \cdot \dot{\omega} = \sum M_o = M_x - M_{br} = F_x R_{ef} - F_{br} R_{br} = \mu F_z R_{ef} - P_{br} K_f \quad (2.9)$$

Burada ise,  $J$  tekerlek atalet momentini ve  $\omega$  tekerlek açısal hızını ifade etmektedir.

### 2.3. ABS Fren Sistemi Modeli

ABS kontrol sistemleri, taşıtın boylamsal dinamiğinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerin amacı, frenleme esnasında, aracın tekerleklerinin kilitlenmesini önlemektir. Böylece; frenleme esnasında, taşıt güvenli bir şekilde frenlenerek, direksiyon araç sürücüsünün hakimiyetinde kalmaktadır.

Fren sistemi için, kontrol algoritması geliştirilirken, boylamsal kaymanın tanımlanması gerekir. Bir taşıt, sabit hızla hareket ederken, taşıt hızı tekerlek açısal hızı ile doğru orantılı olup, orantı katsayısı tekerlek yarıçapı olmaktadır (Dousti ve diğ., 2013);

$$v = R_{ef} \cdot \omega \quad (2.10)$$

Ani frenleme anında, fren pedalına basıldığı andan itibaren, tekerlek hızı aniden düşmesine rağmen, aracın tepkisi göreceli olarak daha yavaştır. Bu durumun sonucu olarak da, yukarıdaki denklem geçersiz olur ve boylamsal tekerlek kayması  $K$  olarak adlandırılan yeni bir değişkenin türetilmesi gerekir (Dousti ve diğ., 2013). Bu birimsiz boylamsal tekerlek kayma değeri; tekerleğin açısal hızı, boylamsal taşıt hızı ve tekerlek efektif yarıçapı parametreleri ile hesaplanmaktadır. ABS kontrol sistemlerinde, kontrolü yapılan parametre, her tekerlek için bu boylamsal tekerlek kayma değerleridir;

$$K = \frac{v - R_{ref} \cdot \omega}{v} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki kayma bağıntısındaki kayma değeri, tekerleklerin kilitlemesi durumunda 1 değerini alır. Buna göre, frenleme esnasında, kayma değeri [0-1] aralığında elde edilir.

ABS fren sistemi gereksinimlerini karşılayan kontrolör, fren sistemi için kontrol yapılacak parametrenin daha önceden belirlenmiş referans değer ile kontrol sinyalinin birkaç durum için oluşmasını sağlayan sistemdir. Boylamsal taşıt dinamiğinde, aktif güvenlik sistemi olarak çalışan ABS kontrol sisteminde, kontrolör, tekerleklerde önceden belirlenen kayma değerlerine göre fren basınçlarının ayarlanması esasıyla çalışmaktadır.

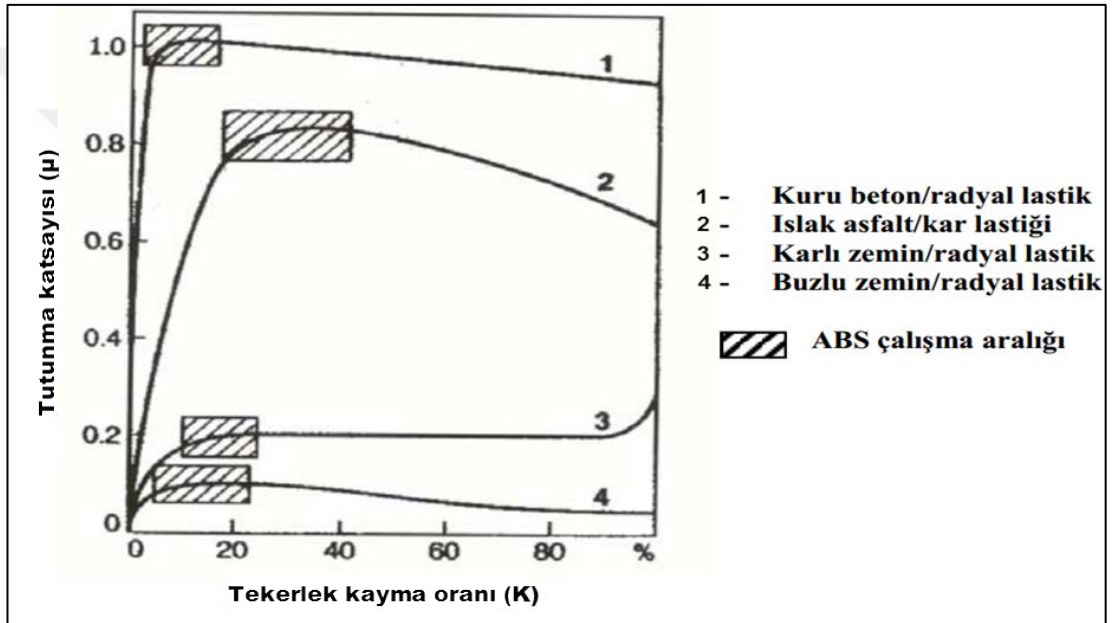
ABS kontrolör sistemi, her tekerlek için referans aldığı sınır kayma değerleri ile yaptığı kayma kontrolünde, fren basıncını Tablo 2.2’de verildiği gibi üç durumda kontrol etmektedir. Bu üç basınç değeri arasındaki geçişler, tekerlek hızı ve taşıt hızının ölçülmesi ile elde edilen kayma değerine göre ayarlanmaktadır. Kontrolör için gerekli referans kayma değerleri, tekerleğin kayma değerine bağlı olarak üretilen tekerlek kuvveti eğrilerine göre seçilir. Maksimum referans kayma değeri olarak, en yüksek tekerlek kuvvetinin elde edildiği kayma değerine karşılık gelen değer seçilir. Böylece, tekerleklerin kilitlemesi engellenmiş olup, aynı zamanda tekerleklerden boylamsal yönde yüksek frenleme kuvveti elde edilir.

Tablo 2.2. ABS kontrolör durum çizelgesi

<b>Kayma</b>	<b>Durum</b>
$K < K_{ref}$	Basınç artışı
$K = K_{ref}$	Basınç sabitlemesi
$K > K_{ref}$	Basınç azalması

Tekerleklerin kilitlemesi ve buna bağlı olarak frenleme mesafesi, lastik-yol arasındaki tutunma katsayısına ve frenleme kuvvetine bağlıdır. Frenleme mesafesinin farklı yol şartlarında analizinin yapılabilmesi için, frenlenen lastik üzerinde meydana gelen kuvvet ve lastik-yol arasındaki sürtünme karakteristiklerinin anlaşılması gerekir. Şekil 2.2’de tekerlek kayma oranı ile lastik-yol tutunma katsayısı arasındaki

ilişki gösterilmektedir. Frenleme başladığında, fren basıncı ve basıncın oluşturduğu frenleme kuvveti artar, bunun sonucunda da taşıt hızı azalır. Frenleme kuvveti, maksimum tutunma katsayısı değerine ulaşıncaya kadar yükselir. Bu da, taşıtın kararlı ve kararsız olduğu bölgeleri ayıran limiti ifade eder. Maksimum frenleme kuvvetinden sonra, fren basıncı artsa bile, tekerlek ile yol arasında meydana gelen frenleme kuvvetinde artış olmaz. Kilitlenme anındaki tutunma değeri, maksimum frenleme kuvvetinin meydana geldiği tutunma değerinden daha düşüktür. Buna göre ABS fren sistemi, frenleme kuvvetini sürekli olarak maksimum tutunma civarında olmasını sağlamaya çalışmaktadır.

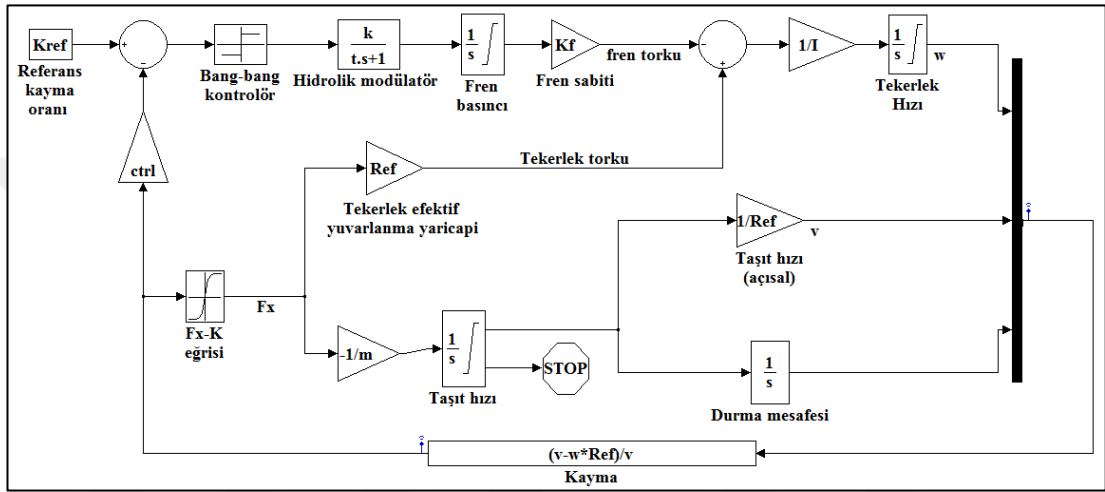


Şekil 2.2. Kaymaya bağlı tutunma katsayısı değişimi (Bosch, 1999)

Bu çalışmada, Şekil 2.3'te gösterilen MATLAB/Simulink çeyrek taşıt ABS fren sistemi kullanılmıştır.

Şekil 2.3'te sürtünme katsayısı-kayma eğrisi olarak bilinen ve kaymanın bir fonksiyonu olan, lastik ve yol arasındaki tutunma katsayısı görülmektedir. Bu çalışmada, modelin Simulink blok diyagramları içerisindeki, MATLAB değişkenleri için, tablo kullanılarak, tutunma katsayısı-kayma eğrisi oluşturulmuştur. Bu model, tutunma katsayısını, tekerlek ağırlığı ile çarparak, lastiğe etkiyen sürtünme kuvvetini üretmektedir. Taşıt hızını elde etmek için, sürtünme kuvveti taşıt kütlesine bölünür. Fren basıncı değişim oranını elde etmek için, bu model, referans kayma oranından gerçek kayma oranını çıkarır ve bu değeri kontrolöre sinyal olarak gönderir ve

böylece hata oranını azaltır. Yani, kontrolörün giriş değişkeni, farklı yol şartlarına göre değişen gerçek tekerlek kayma oranı ile elde edilmek istenilen referans kayma değeri arasındaki, kayma oranı hata değeri ve bu hatanın değişim oranıdır. Bu hatayı azaltmak için, kontrolörün çıkış değişkeni, fren basıncını değiştirmek için kullanılır. Böylece, fren basıncı kontrol edilerek, hem tekerleğin istenilen referans kayma değerine yakın bir değerde tutulması sağlanır hem de taşıt frenleme mesafesinin azalması sağlanır.



Şekil 2.3. ABS fren sistemi modelinin blok diyagramı

Bu çalışmada, gerçek kayma değerinin referans kaymayı yakalaması için, fren basıncının üretilmesinde, lastik basıncı bilgisini kullanan bir kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrolör ile ABS fren kontrol sistemini iyileştirmek ve kayma oranı salınımını daraltmak amaçlanmıştır.

## 2.4. Lastiğin Modellemesi

Taşıt modelinde kullanılacak olan lastik modeli, taşıtın boylamsal tepkisinde lastik basıncının etkisini yansıtabilmeli ve simüle edebilmelidir.

### 2.4.1. Magic Formula lastik modeli

Magic Formula lastik modeli, boylamsal, yanal ve bu ikisinin birleşimi olan şartlarda, yoldan lastiğe etkiyen kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanabilmesini sağlayan bir dizi matematiksel formül içermektedir. Magic Formula, taşıt dinamiği modellerine dahil etmek için, deneysel lastik verilerini kullanan geçerli bir modeldir. Bu modelin

katsayıları; fiziksel bir önem taşımakla beraber, elde edilecek lastik karakteristiğini temsil etmenin uygun bir gösterim şeklidir. Bu nedenle, farklı yol yüzeylerine, anlamlı bir şekilde, tepki vereceği düşünülmektedir.

#### 2.4.2. Magic Formula lastik modelinin genel formülü

Verilen sabit düşey yük değeri için, Magic Formula lastik modelinin genel formülü aşağıdaki gibidir;

$$y(x)=D. \sin\{C. \arctan[B.x.(1-E)+E. \arctan(B.x)]\} \quad (2.12)$$

$$Y(X)=y(x)+S_V \quad (2.13)$$

$$x=X+S_H \quad (2.14)$$

$$D=y_{\max} \quad (2.15)$$

$$C=1 \pm \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{y_a}{D}\right)\right) \quad (2.16)$$

$$B = \frac{dy}{dx} \quad (2.17)$$

$$E = \frac{B.x_m - \tan\left(\frac{\pi}{2.C}\right)}{B.x_m - \arctan(B.x_m)} \quad (2.18)$$

Denklem (2.13)'te verilen Y; moment, boylamsal kuvvet veya yanal kuvvet hesabında kullanılan çıkış değişkenidir.

Denklem (2.14)'te verilen X; boylamsal kayma oranı veya kayma açısı olan giriş değişkenidir.

Denklem (2.17)'de verilen B; sertlik faktörüdür.

Denklem (2.16)'da verilen C; şekil faktörüdür.

Denklem (2.15)'te verilen D; pik değeridir.

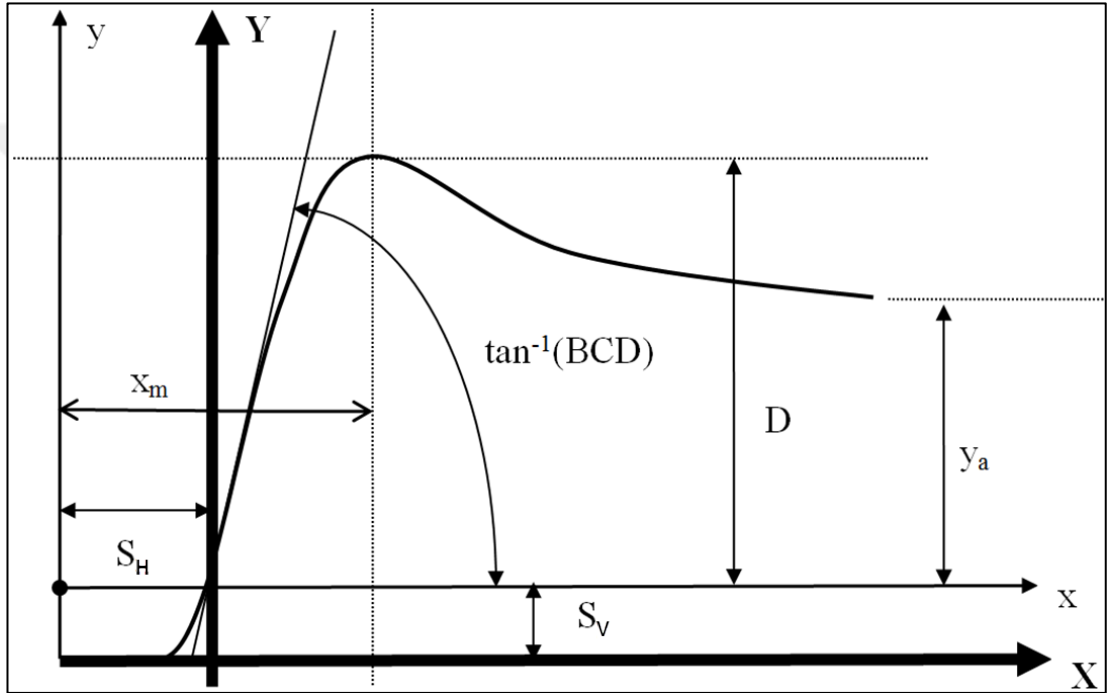
Denklem (2.18)'de verilen E; eğrilik faktörüdür.

Denklem (2.14)'te verilen  $S_H$ ; yatay kaymadır.



Denklem (2.13)'te verilen  $S_v$ ; dikey kaymadır.

Magic Formula, merkezi  $x=y=0$ 'dan geçen bir eğri oluşturmaktadır. Eğri,  $y$  ekseninde pik değerine ulaşmaktadır ve  $x$  ve  $y$  ekseninde ofset oluşturmaktadır. Bu formül, boylamsal kayma oranı ve düşey yük değerinin bir fonksiyonu olarak, ölçülen boylamsal kuvvet eğrileri ile yakın bir şekilde benzeyen karakteristikler üretir. Şekil 2.4'te Magic Formula lastik modeline ait giriş-çıkış denkleminin ait eğri görülmektedir ve şekilde gösterilen parametrelerin açıklaması aşağıda yapılmıştır.



Şekil 2.4. Magic Formula lastik karakteristiği eğrisi

Şekil 2.4'te görülen  $y_a$ ; çıkış denkleminin ait  $y$ 'nin en yüksek asimptot değeridir.

Şekil 2.4'te görülen  $x_m$ ; çıkış denkleminin ait  $y$ 'nin pik noktasına olan yatay uzaklığıdır.

B; Magic Formula lastik karakteristiği eğrisinin lineer bölgesindeki eğimi, yani eğrinin orijinden kayma oranını belirleyen sertlik faktörüdür. Bu faktöre, boylamsal kayma sertliği de denilmektedir (Zegelaar, 1998). Lastik basıncı; sertlik faktörünü, önemli ölçüde değiştirmektedir (de Hoogh, 2005).

C; sinüs fonksiyonu şeklindeki, Magic Formula lastik karakteristiği eğrisinin limitlerini kontrol eden şekil faktörüdür. Eğrinin yatay asimptotunu belirleyen bu

faktör, ayrıca kilitlenme anındaki tutunma katsayısının maksimum tutunma katsayısına oranını ifade etmektedir (de Hoogh, 2005). Eşik kayma oranı değerini geçtikten sonraki kısımda, boylamsal lastik kuvveti-kayma eğrisinde meydana gelen düşüşü belirten bir parametredir. Böylece, Magic Formula lastik karakteristiği eğrisinin şeklini belirler. Düşük bir şekil faktörü, bu kısımda daha dik bir düşüşe neden olur. Yüksek bir şekil faktörü ise, ABS'nin daha geniş bir çalışma aralığında, yüksek bir performans ile çalışmasını sağlar. Şekil faktörü düştükçe; maksimum frenleme kuvvetinin olduğu aralık daha dar olduğu için, ABS fren sisteminin performansının azalmasına ve frenleme mesafesinin uzamasına neden olmaktadır. Lastik basıncı ve düşey parametreleri, lastiğin boylamsal kuvvet-kayma eğrisinin düşüş kısmını büyük ölçüde etkilemediği için, şekil faktörünü de büyük ölçüde etkilememektedir (Sivaramakrishnan ve diğ., 2015).

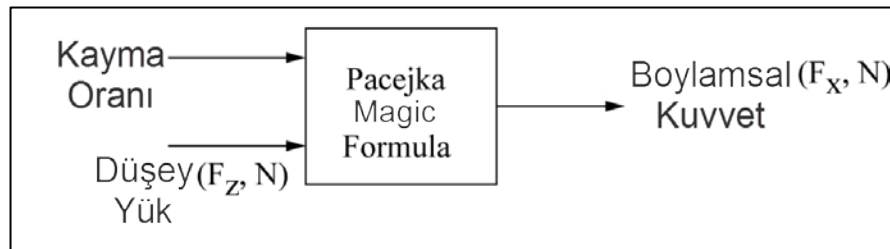
Şekil 2.4'te görülen D; kuvvetin veya momentin maksimum olduğu noktadır.

Şekil 2.4'te görülen BCD; eğrinin orijin ile yaptığı açığı göstermektedir.

E; eğrilik faktörüdür ve sertlik faktörü veya pik değerine bağlı olarak değişmez. Eğrinin maksimum olduğu noktada boylamsal kaymayı kontrol eden faktördür.

Şekil 2.4'te görülen  $S_V$  ve  $S_H$  ise, eğriye ait ofsetlerdir. Yuvarlanma direnci, yönlendirme ve koniklik için hesaba katılan parametrelerdir.  $F_y$  ve  $F_x$  eğrilerinin orijinden uzaklığını belirleyen faktördür. Lastiğin deneysel datalarından direkt olarak kesin bir şekilde tahmin edilebilirler.

Açıklanan lastik parametreleri normal (düşey) yükün fonksiyonudur.



Şekil 2.5. Lastik modeli uygulaması

Bu lastik modeli, boylamsal kuvvet elde edilmesinde, düşey yük ve boylamsal tekerlek kayma oranı gereklidir. Şekil 2.5'te düşey yük, boylamsal kayma ve

boylamsal kuvvet arasındaki ilişkiyi gösteren lastik modelinin akış diyagramı verilmiştir.

### 2.4.3. Magic Formula lastik modelinin genel formülü

Boylamsal kuvvet, boylamsal kayma oranının fonksiyonudur. Aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$F_x = D_x \cdot \sin\{C_x \cdot \arctan[B_x \cdot K_x - E_x \cdot (B_x \cdot K_x - \arctan(B_x \cdot K_x))]\} + S_{V_x} \quad (2.19)$$

$$K_x = K + S_{H_x} \quad (2.20)$$

$$C_x = p_{C_{x1}} \cdot \lambda_{C_x} \quad (2.21)$$

$$D_x = \mu_x \cdot F_z \quad (2.22)$$

$$\mu_x = \frac{(p_{D_{x1}} + p_{D_{x2}} \cdot df_z) \cdot \lambda_{\mu_x}}{1 + \lambda_{\mu V} \cdot \frac{v_s}{v_0}} \quad (2.23)$$

$$E_x = (p_{E_{x1}} + p_{E_{x2}} \cdot df_z + p_{E_{x3}} \cdot df_z^2) \cdot \left(1 - p_{E_{x4}} \cdot \text{sgn}(K_x)\right) \cdot \lambda_{E_x} \quad (2.24)$$

$$K_{xK} = F_z \cdot (p_{K_{x1}} + p_{K_{x2}} \cdot df_z) \cdot \exp(p_{K_{x3}} \cdot df_z) \cdot \lambda_{K_{xK}} \quad (2.25)$$

$$B_x = \frac{K_{xK}}{(C_x \cdot D_x + \epsilon_x)} \quad (2.26)$$

$$S_{H_x} = (p_{H_{x1}} + p_{H_{x2}} \cdot df_z) \cdot \lambda_{H_x} \quad (2.27)$$

$$S_{V_x} = F_z \cdot (p_{V_{x1}} + p_{V_{x2}} \cdot df_z) \cdot \lambda_{V_x} \cdot \lambda'_{\mu_x} \quad (2.28)$$

### 2.4.4. Lastik basıncı için genişletilmiş Magic Formula lastik modeli

Önceki bölümlerdeki denklemlere bağlı olarak, bu bölümde, lastik basıncını içeren Magic Formula lastik modeli denklemleri önerilmektedir. Burada genişletilen denklemler, en yüksek ve en düşük lastik basınçlarının düşünüldüğü ölçümler ile sınırlandırılmıştır, yani sadece interpolasyon için geçerli olması amaçlanmıştır. Mümkün olduğunca az parametreye sahip olması istenildiği ve sadece 3 lastik

basıncı ile ilişkilendirildiği için, bu denklemler öncelikli olarak, lineer ilişkiler ile sınırlandırılmıştır. Daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için ise, sadece ikinci dereceden polinomlar kullanılmıştır (Schmeitz ve diğ., 2005).

Lastik basıncı içeren Magic Formula lastik modeli için, lastik basıncındaki değişim tanımlanmalıdır;

$$dp_i = \frac{p_i - p_{i0}}{p_{i0}} \quad (2.29)$$

Burada,  $p_{i0}$  nominal veya referans lastik basıncı değeridir. Ayrıca, düşey yükteki değişim de tanımlanmalıdır;

$$df_z = \frac{F_z - F_{z0}}{F_{z0}} \quad (2.30)$$

$F_{z0}$  ve  $F_z$  sırasıyla nominal ve gerçek düşey yük değeridir.

Lastik basıncı değişimine bağlı olan bu modelde, düşey lastik deformasyonun belirlenmesine dayanan bir yaklaşım esas alınmıştır. Bu yaklaşımda, düşey yük; Ek-A'da belirtilen düşey lastik sertliğinin bir fonksiyonu olarak kullanılmıştır;

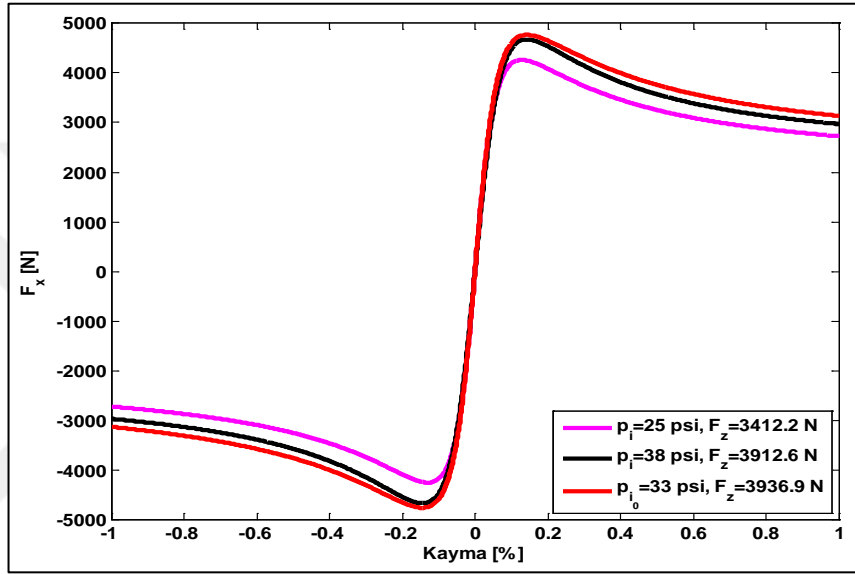
$$F_z = \frac{C_{Fz}}{\rho_z} \quad (2.31)$$

Boylamsal lastik karakteristiği, boylamsal sürtünme katsayısı ( $\mu_x$ ) ve boylamsal kayma sertliğinin ( $K_{xK}$ ) lastik basıncı ile ilişkilendirilmesi ile genişletilmiştir. Genişletilmiş Magic Formula lastik modelinde, Magic Formula lastik modelinin genel formülüne göre; boylamsal sürtünme katsayısı ve boylamsal kayma sertliği farklıdır. Burada,  $p_{p_{x1}}$ ,  $p_{p_{x2}}$ ,  $p_{p_{x3}}$  ve  $p_{p_{x4}}$  ek boylamsal ölçüm parametreleri, lastik parametrelerini tanımlamak için yeterlidir (de Hoogh, 2005). Bu nedenle, aşağıdaki genişletilmiş denklemde altı çizili kısım, boylamsal sürtünme katsayısı için farklılığı oluşturmaktadır;

$$\mu_x = (p_{D_{x1}} + p_{D_{x2}} \cdot df_z) \cdot \frac{(1 + p_{p_{x3}} \cdot dp_i + p_{p_{x4}} \cdot dp_i^2)}{\dots} \quad (2.32)$$

Boylamsal kayma sertliği için, ilk olarak Magic Formula lastik modelinin genel formülündeki, lastik basıncı ile olan lineer bağıntı önerilmektedir. Ancak, ikinci derece terimlerin denklemi iyileştirdiği görülmüştür. Bu nedenle, aşağıdaki genişletilmiş denklemde altı çizili kısım, boylamsal kayma sertliği için farklılığı oluşturmaktadır;

$$K_{xK} = F_z \cdot (p_{K_{x1}} + p_{K_{x2}} \cdot df_z) \cdot \exp(p_{K_{x3}} \cdot df_z) \cdot \underline{(1 + p_{P_{x1}} \cdot dp_i + p_{P_{x2}} \cdot dp_i^2)} \quad (2.33)$$

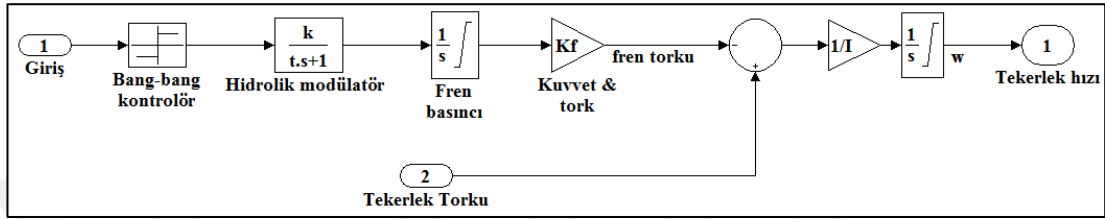


Şekil 2.6. Kayma değeri ve tekerlek düşey yükü ile boylamsal tekerlek kuvveti bağıntısı

Sonuç olarak; 3 lastik basıncı için, bu denklemler uygulanarak hesaplamalar yapılmıştır. Lastik basıncına duyarlı lastik modelinin ürettiği Fx-K grafiği, Şekil 2.6'da verilmiştir. Şekil 2.6'da görülen Fz değerleri lastik modelinden elde edilmiş olup lastiğin düşey tepki kuvvetini temsil etmektedir. Şekil 2.6'ya göre şişirme basıncı, nominal lastik basıncından daha düşük veya yüksek olduğunda lastiğin düşey tepki kuvveti azalmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, lastik basıncının artması ile düşey tepki kuvvetindeki düşüşün azalmaya göre oldukça düşük seviyede olmasıdır. Bu, lastik basıncı azaldıkça lastiğin içindeki basınç kuvvetindeki azalmanın daha etkili olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi maksimum boylamsal lastik kuvvetini üreten kayma değeri, lastik basıncına göre değişiklik göstermektedir. Bu sonuç, bu çalışmanın dayanağını oluşturmaktadır.

#### 2.4.5. Tekerleğin boylamsal dinamiğinin modellenmesi

Taşıt fren sistemleri, birinci dereceden dinamik sistem ile modellenebilir. Bu durumda, taşıt hidroliği, gecikme zamanı ile tanımlanmış olur. Ayrıca, tekerleklere dağıtılacak şekilde, master silindirden orantılı olarak çıkan basınç hattı da kazanç bloğu ile modellenir. Şekil 2.7’de Bang-bang kontrol sistemi ile fren sisteminin dinamik sistem olarak modeli görülmektedir.



Şekil 2.7. Tekerlek dinamiği Simulink akış diyagramı

Fren hidroliği gecikmesinin dinamik modeli olarak Denklem (2.34)’teki transfer fonksiyonu baz alınmıştır;

$$G(s) = \frac{k}{t.s+1} \quad (2.34)$$

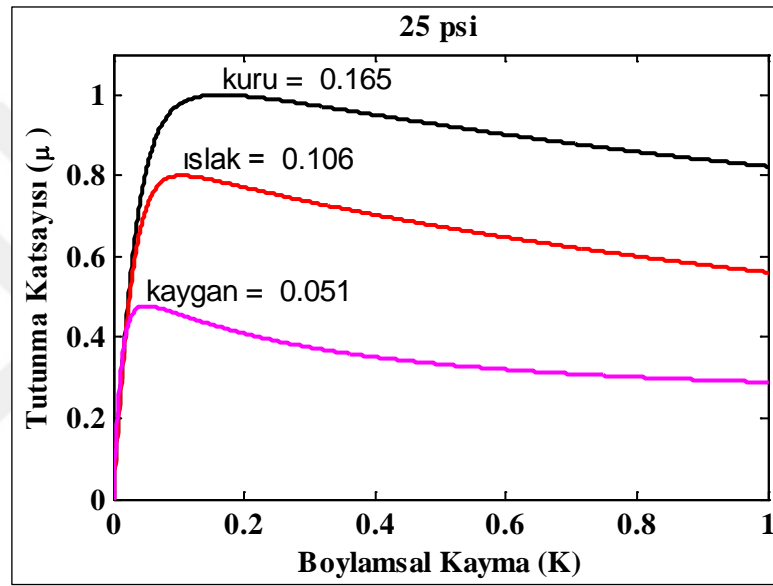
Burada, k hidrolik aktüatörün kazanç değeridir; t hidrolik aktüatörün zaman sabitidir.

Bu modelde, tekerleklerde bar cinsinden oluşacak fren basıncı için, hidrolik aktüatör belirli bir kazanç ile ilişkilendirilmiştir.

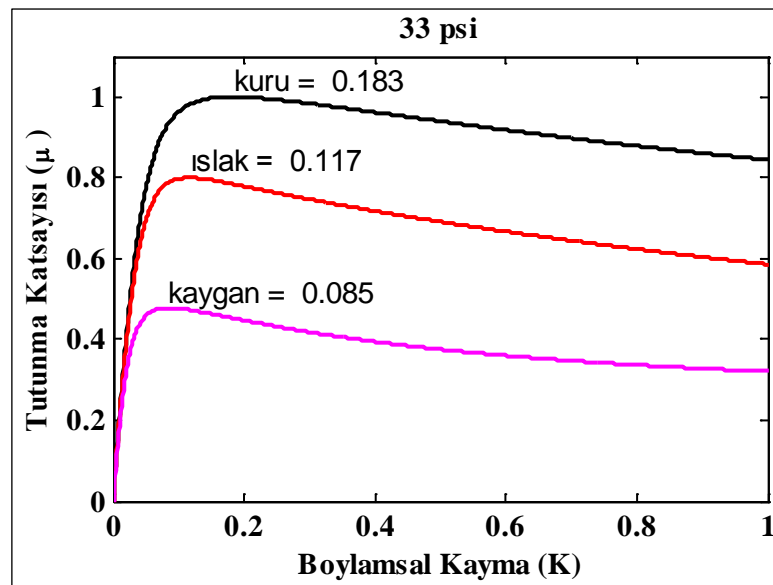
#### 2.5. Simülasyon Çalışması

Simülasyonlar, 30 km/sa ve 60 km/sa olmak üzere iki farklı taşıt hızında ve kuru, ıslak ve kaygan olmak üzere üç farklı yolda 25(~172,37 kPa), 33(~227,53 kPa) (nominal) ve 38(~262 kPa) psi olmak üzere üç farklı lastik basıncına göre gerçekleştirilmiştir. Burada 33 psi nominal lastik basıncı olup, 25 psi düşük lastik basıncını ve 38 psi yüksek lastik basıncını temsil etmektedir. Bu lastik basınçlarının ABS performansına etkilerini belirleyebilmek için Magic Formula lastik modeli kullanılmıştır. Bu model gerçek taşıta ait yük, tekerlek ve lastik bilgilerini içermektedir.

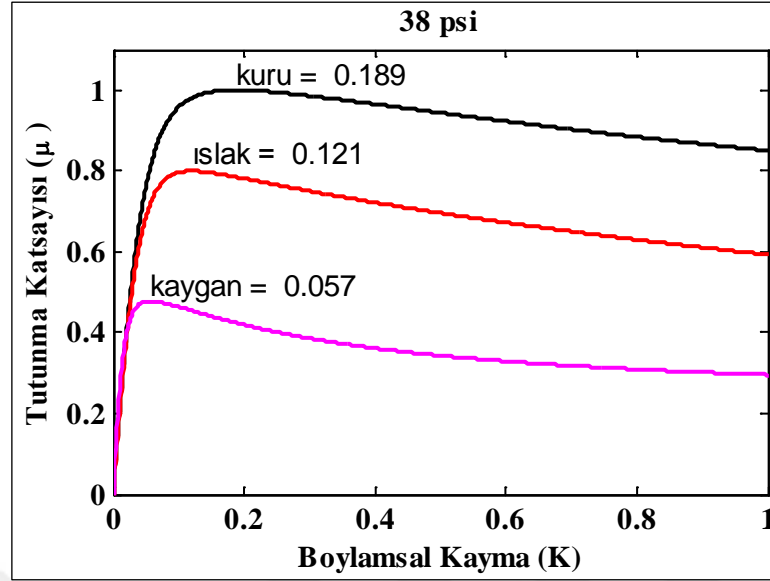
Böylece, lastik basıncının etkilerini yansıtabilmek için düşey lastik deformasyonu, düşey lastik sertliği, boylamsal kayma sertliği vs. gibi çeşitli lastik özellikleri kullanılmıştır. Bu lastik modeli ile yol tipleri tutunma katsayısı-kayma eğrilerine göre Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'daki gibi her lastik basıncı için belirlenmiştir. Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'da görüldüğü gibi maksimum kayma oranı değeri, aynı yolda lastik basıncı arttıkça artmaktadır. Bu, lastik basıncı arttıkça maksimum tutunmaya daha yüksek kayma oranı ile ulaşıldığını daha açık bir şekilde ifade etmektedir. Böylece, çalışmanın dayanağı yol tiplerine göre de doğrulanmıştır.



Şekil 2.8. 25 psi için tutunma katsayısı-kayma karakteristiği



Şekil 2.9. 33 psi için tutunma katsayısı-kayma karakteristiği



Şekil 2.10. 38 psi için tutunma katsayısı-kayma karakteristiği

## 2.6. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon testlerinde, 3 farklı tutunma katsayısındaki, frenleme durumu benzetimi yapılmıştır. Tutunma katsayısı azaldıkça, daha yüksek kayma oranı elde edilmiştir. 33 psi ve 38 psi lastik basınçlarında, kuru, ıslak ve kaygan yolda, eşik değer kontrol stratejisine göre, referans kayma oranı 0,1-0,2 aralığındadır. Fakat, 25 psi ve 38 psi lastik basınçlarında, kuru ve ıslak yolda, bu kayma oranı 0,1-0,2 aralığında iken; kaygan yolda, bu kayma oranı yaklaşık 0,5 civarındadır.

Buna bağlı olarak, normal çalışma aralığında, lastik basıncının ABS performansını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varıldı.

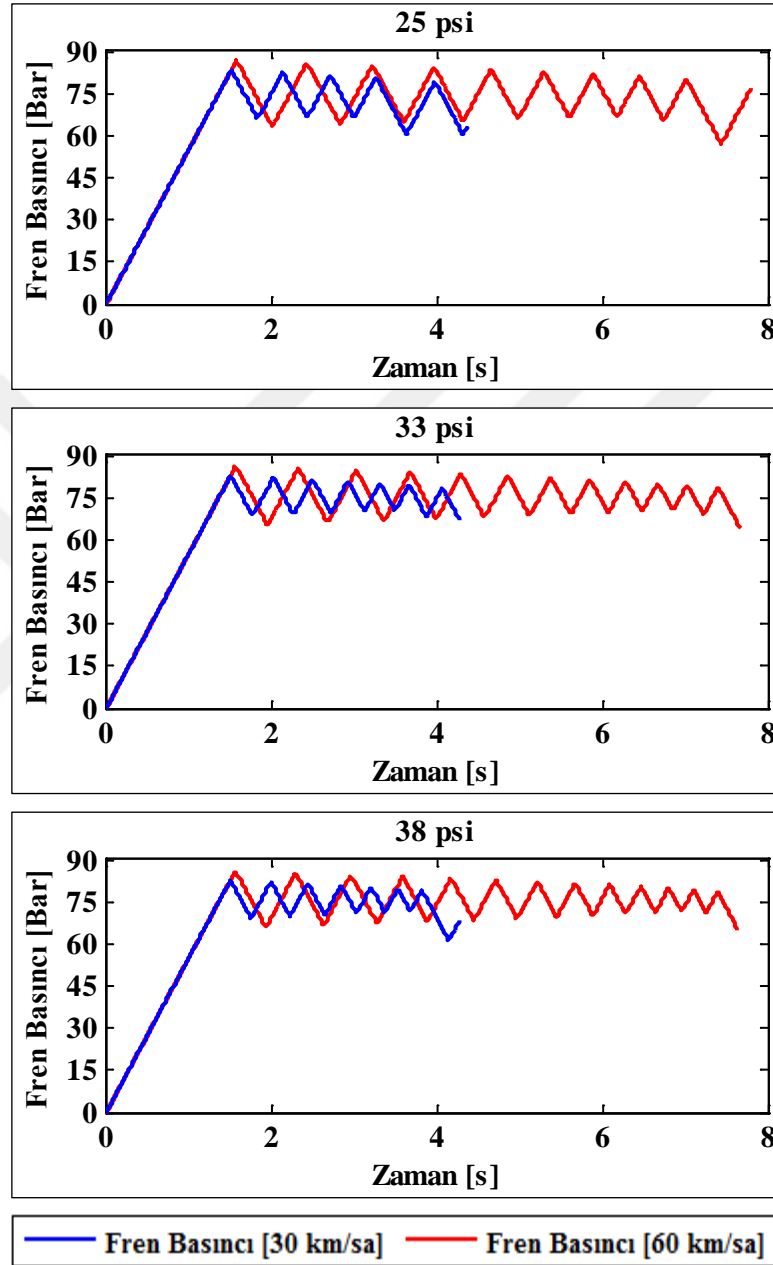
### 2.6.1. Kuru yol simülasyon sonuçları

Kuru yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, fren basıncı değişim sonuçları Şekil 2.11’de verilmiştir.

Taşıt hızı ve lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 2.11’e göre; tüm lastik basınçlarında, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre, fren basıncı salınım sayısının daha az olduğu görülmüştür. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncındaki artışın en uzun 25 psi lastik basıncında, 33 psi ve 38 psi lastik basıncındaki fren basıncı artışının ise benzer

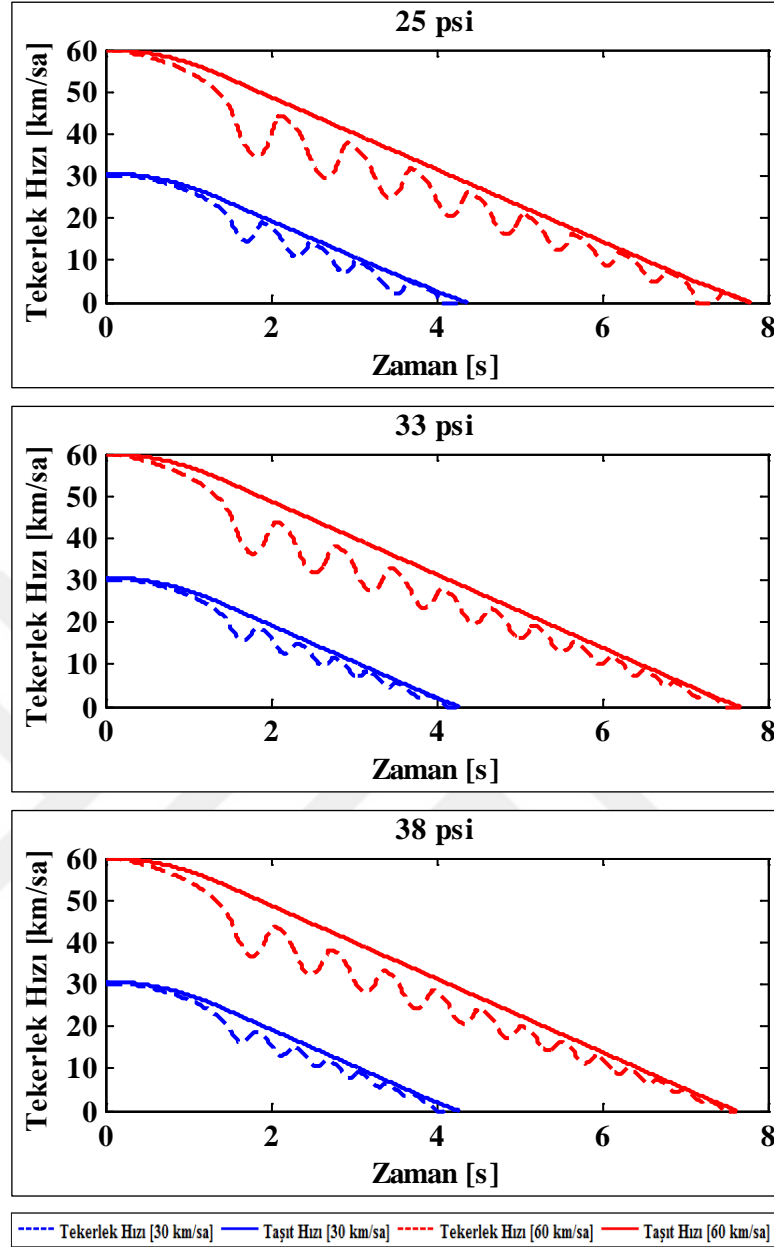


sürdüğü görülmüştür. Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncındaki artışın yüksek hızlarda yapılan frenlemelere göre, daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.



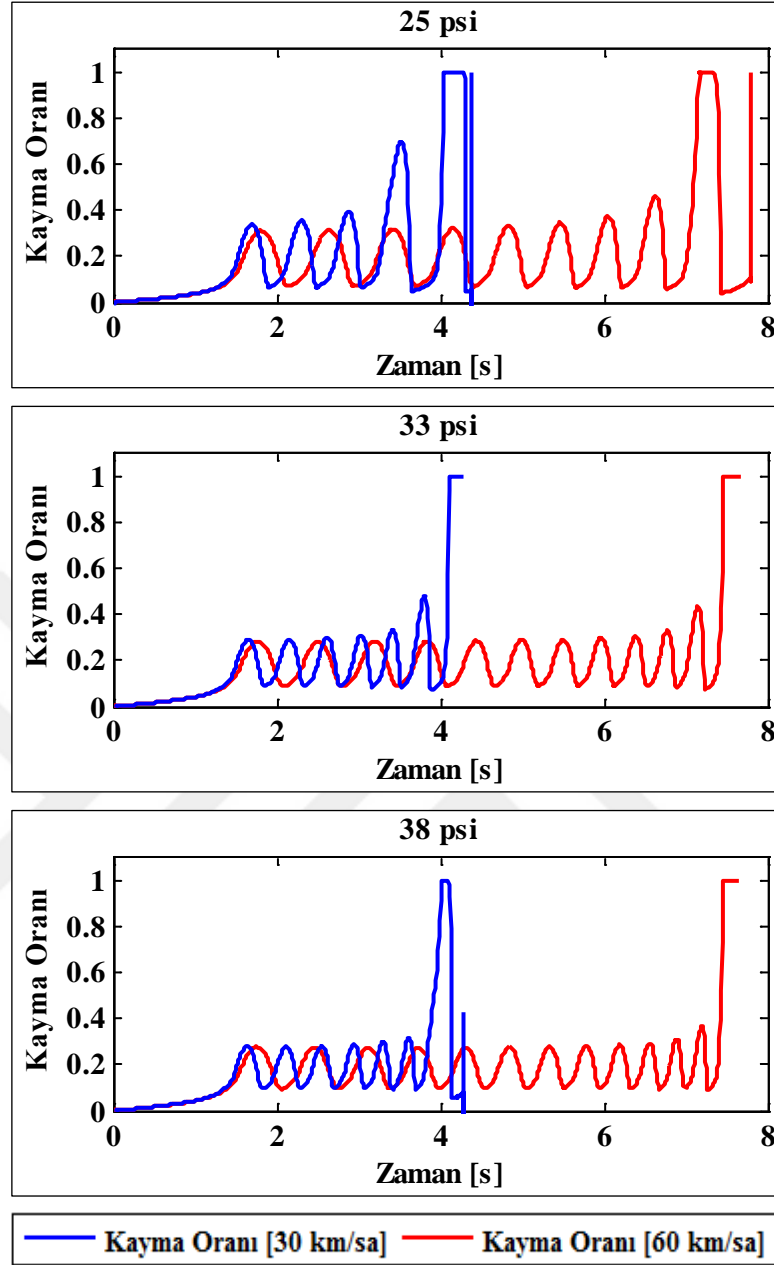
Şekil 2.11. Kuru yol için fren basıncı benzetim sonuçları

Kuru yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 2.12’de verilmiştir. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hızındaki salınım en az 25 psi lastik basıncında, 33 psi ve 38 psi lastik basıncındaki salınım ise benzer oranda görülmüştür.



Şekil 2.12. Kuru yol için tekerlek ve taşıt hızı benzetim sonuçları

Kuru yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, kayma oranı değişim sonuçları Şekil 2.13'te verilmiştir. 38 psi lastik basıncında, eşik değer kontrol stratejisine göre, referans kayma oranı 0,2 civarında iken; 25 psi lastik basıncında, bu kayma oranı yaklaşık 0,5 civarında elde edilmiştir.



Şekil 2.13. Kuru yol için kayma oranı benzetim sonuçları

Şekil 2.13'e göre; hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenleme testlerinde, lastik basıncı azaldıkça, kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. 25 psi lastik basıncı testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hıza göre, kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı; diğer lastik basınçlarında ise her iki hızda da benzer değerlerde salındığı görülmüştür. Buna göre, kayma oranı değerleri için, düşük ile yüksek hızlarda yapılan frenlemeler arasındaki farkın en fazla 25 psi lastik basıncında olduğu görülmüştür. Kayma oranındaki değişim, hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, 25 psi lastik

basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, biraz daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak, Şekil 2.11'deki yol testlerinde fren basıncındaki artış süresinin ve Şekil 2.12'deki yol testlerinde tekerlek hız düşüş şiddetinin, hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en fazla 25 psi lastik basıncında olduğu görülmektedir.

Kuru yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, frenleme mesafesi sonuçları Tablo 2.3'te verilmiştir.

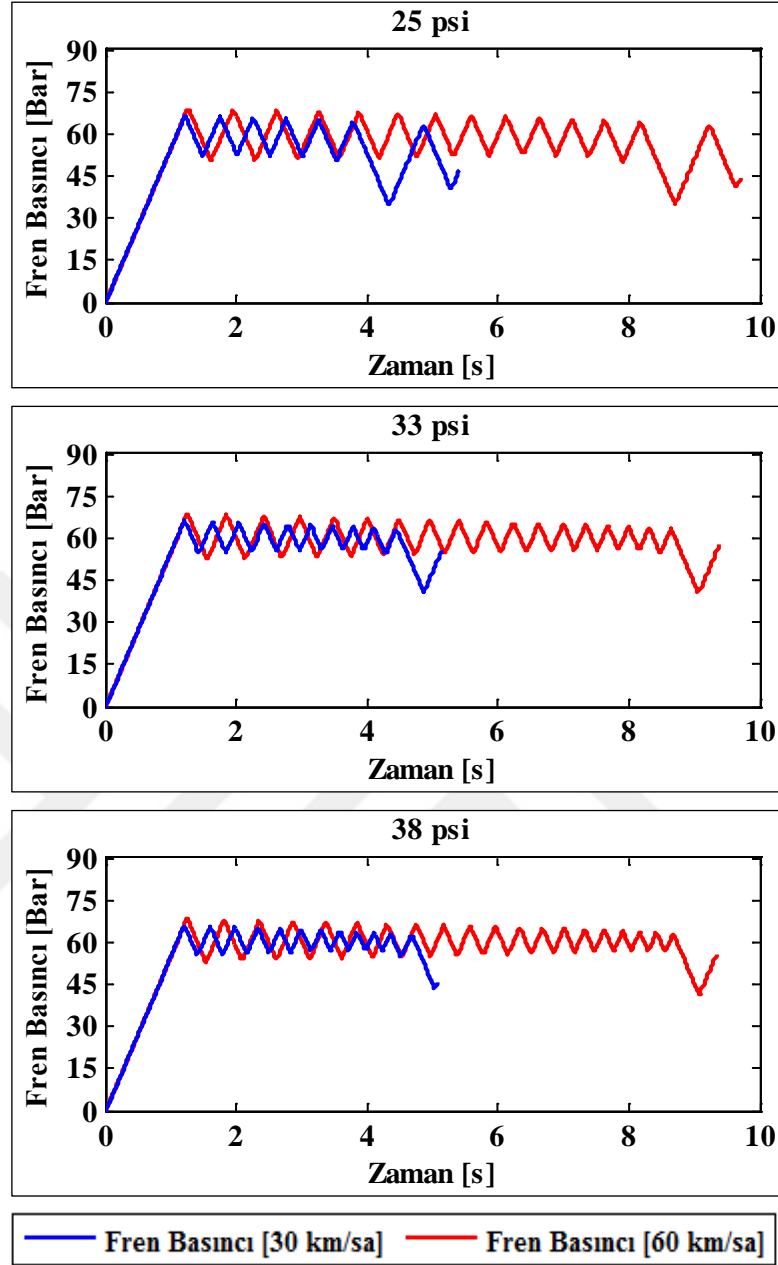
Tablo 2.3. Kuru yol için frenleme mesafesi benzetim sonuçları

<b>Lastik basıncı</b>	<b>Taşıt Hızı</b>	<b>Frenleme mesafesi</b>	<b>Frenleme süresi</b>
25 psi	30 km/sa	6,417 m	4,372 s
	60 km/sa	21,28 m	7,793 s
33 psi	30 km/sa	6,355m	4,273 s
	60 km/sa	21,11 m	7,663 s
38 psi	30 km/sa	6,347 m	4,274 s
	60 km/sa	21,07 m	7,638 s

Kuru yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Tablo 2.3'te verilmiştir. Tablo 2.3'e göre; kuru yolda, düşük hızda 33 psi lastik basıncında, 6,355 m frenleme mesafesi elde edilmiştir; 25 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 0,975 artmıştır; 38 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 0,126 azalmıştır. Kuru yolda, yüksek hızda yapılan testlerde, 33 psi lastik basıncında, 21,11 m frenleme mesafesi elde edilmiştir; 25 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 0,805 artmıştır; 38 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 0,19 azalmıştır. Kuru yolda, düşük hızda yapılan testlere göre yüksek hızda yapılan testlerde, frenleme mesafesinde en az artış 25 psi, en çok artış 33 psi lastik basıncında gerçekleşmiştir.

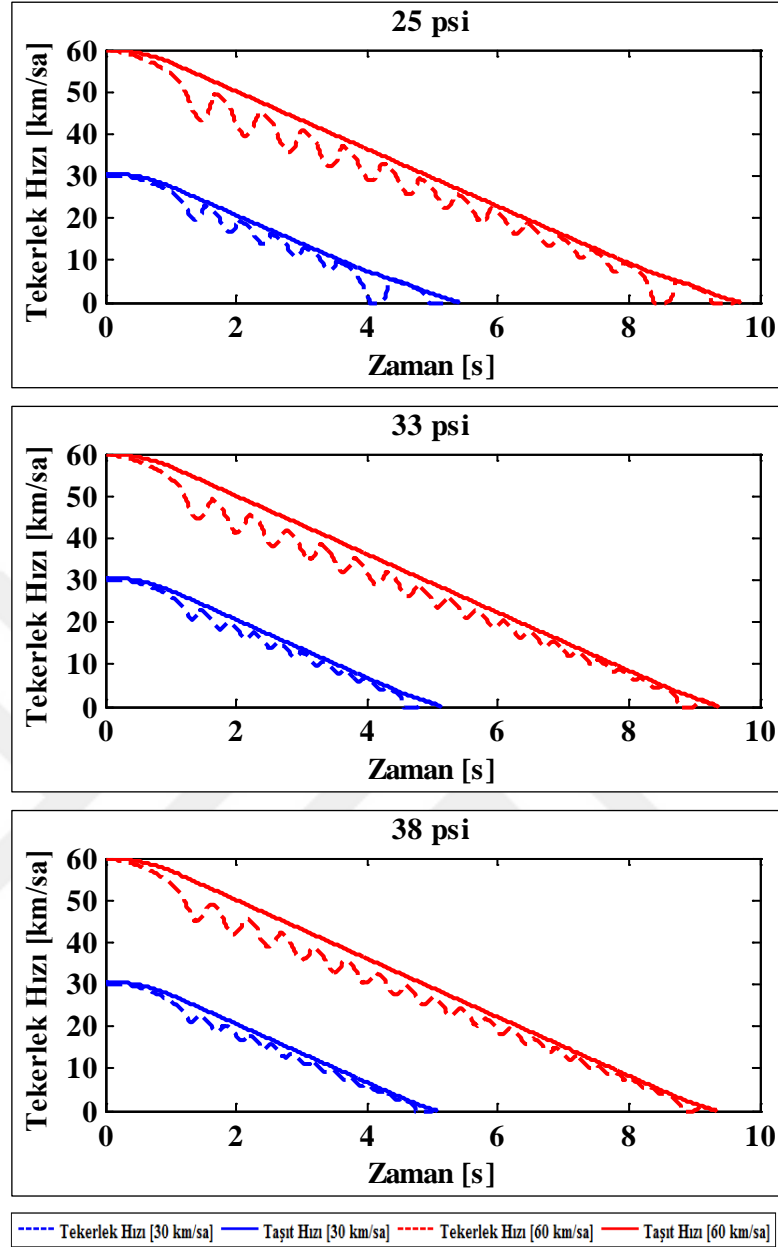
## 2.6.2. Islak yol simülasyon sonuçları

Islak yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, fren basıncı değişim sonuçları Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14. Islak yol için fren basıncı benzetim sonuçları

Taşıt hızı ve lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 2.14'e göre; tüm lastik basınçlarında, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre, fren basıncı salınım sayısının daha az olduğu görülmüştür. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncındaki artışın en uzun 25 psi lastik basıncında, 33 psi ve 38 psi lastik basıncındaki fren basıncı artışının ise benzer sürdüğü görülmüştür. Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncındaki artışın yüksek hızlarda yapılan frenlemelere göre, daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.



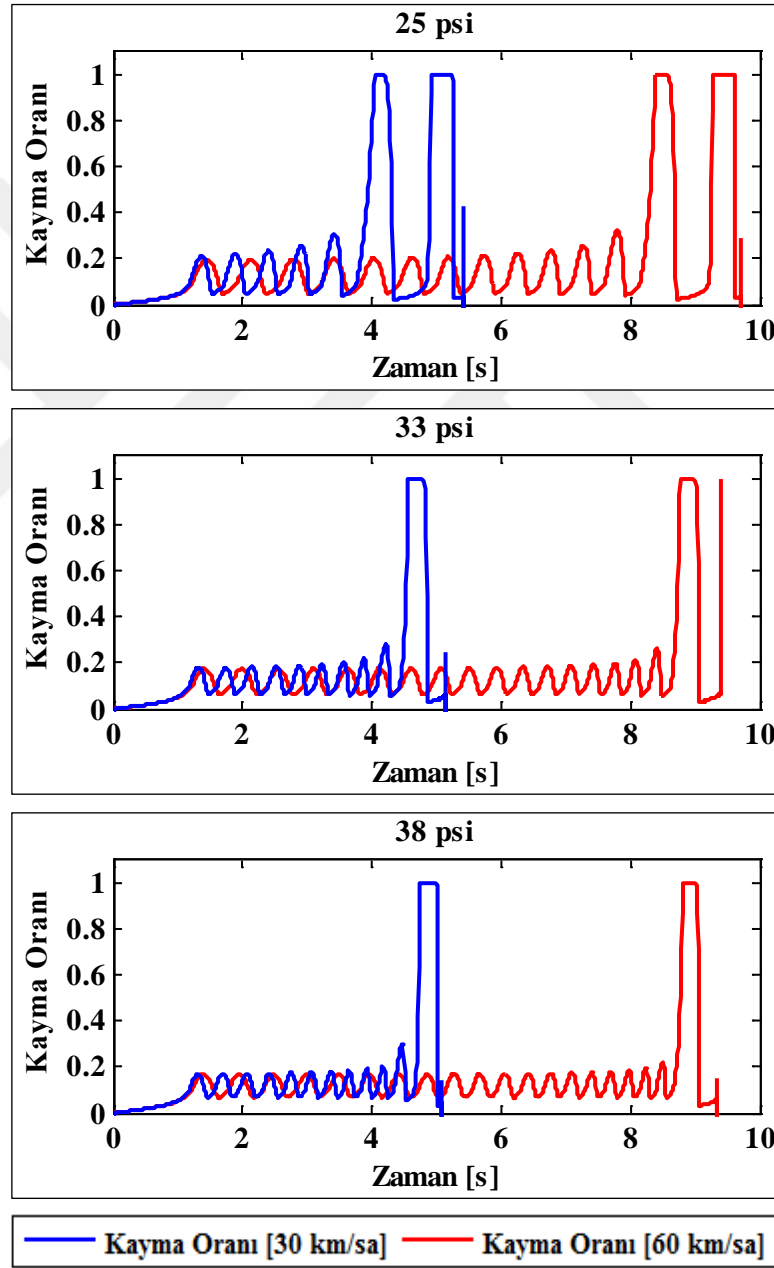
Şekil 2.15. Islak yol için tekerlek ve taşıt hızı benzetim sonuçları

Islak yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 2.15'te verilmiştir. 25 psi lastik basıncında, tekerlekte daha fazla kilitleme meydana geldiğini görülmüştür. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hızındaki salınım en az 25 psi lastik basıncında, 33 psi ve 38 psi lastik basıncındaki salınım ise benzer oranda görülmüştür.

Şekil 2.15'teki gibi, fren başlangıç anındaki taşıt hızı hem 30 km/sa olan düşük taşıt hızında yapılan hem de 60 km/sa olan yüksek taşıt hızında yapılan ABS fren

testlerinde, tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği test, 25 psi lastik basıncı ile yapılan testtir.

Islak yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, kayma oranı değişim sonuçları Şekil 2.16'da verilmiştir. 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, eşik değer kontrol stratejisine göre, referans kayma oranı 0,1-0,2 aralığında iken; 25 psi lastik basıncında, bu kayma oranı biraz daha yüksek değerlerde elde edilmiştir.



Şekil 2.16. Islak yol için kayma oranı benzetim sonuçları

Şekil 2.16'ya göre; hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenleme testlerinde, lastik basıncı azaldıkça, kayma oranının daha fazla kilitleme sınırına yaklaştığı görülmüştür. 25 psi lastik basıncı testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hıza göre, kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı; diğer lastik basınçlarında ise her iki hızda da benzer değerlerde salındığı görülmüştür. Buna göre, kayma oranı değerleri için, düşük ile yüksek hızlarda yapılan frenlemeler arasındaki farkın en fazla 25 psi lastik basıncında olduğu görülmüştür. Kayma oranındaki değişim, hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, 25 psi lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, biraz daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak, Şekil 2.14'teki yol testlerinde fren basıncındaki artış süresinin ve Şekil 2.15'teki yol testlerinde tekerlek hız düşüş şiddetinin, hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en fazla 25 psi lastik basıncında olduğu görülmektedir.

Tablo 2.4. Islak yol için frenleme mesafesi benzetim sonuçları

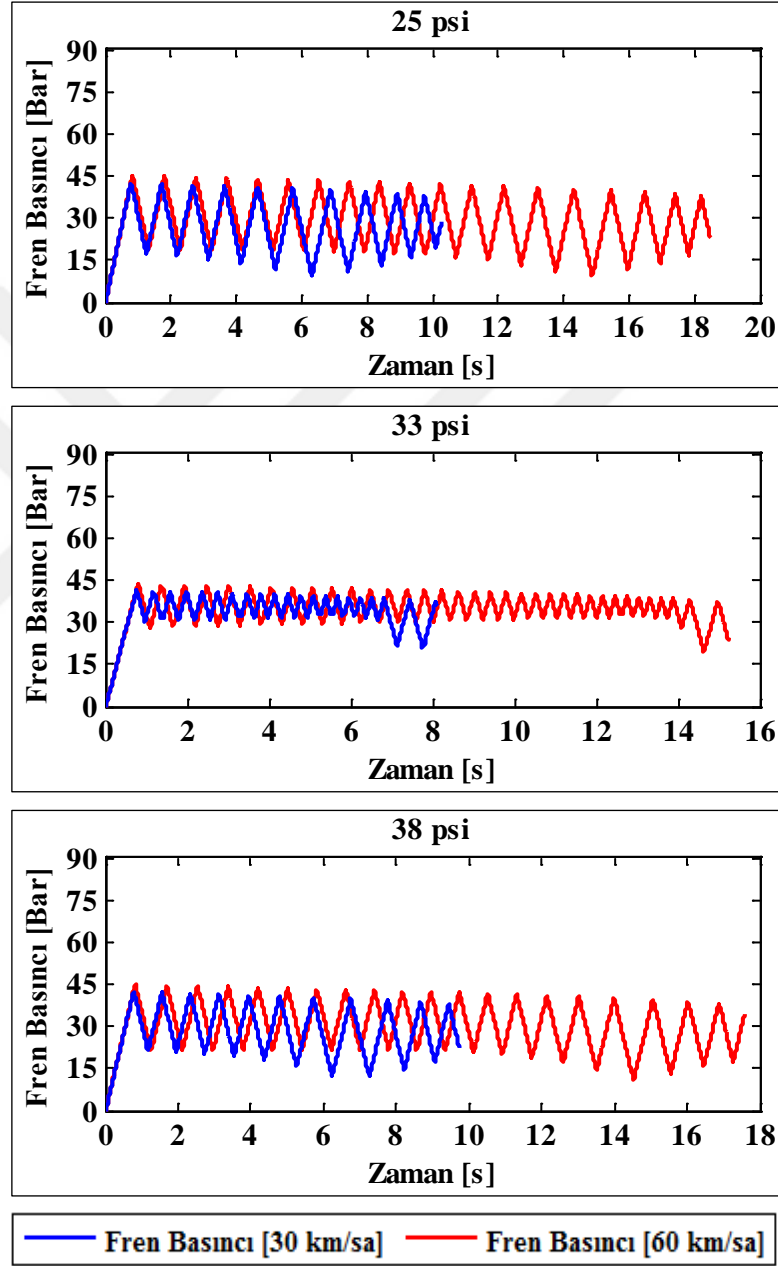
<b>Lastik basıncı</b>	<b>Taşıt Hızı</b>	<b>Frenleme mesafesi</b>	<b>Frenleme süresi</b>
25 psi	30 km/sa	7,389 m	5,411 s
	60 km/sa	25,27 m	9,7 s
33 psi	30 km/sa	7,209 m	5,146 s
	60 km/sa	24,9 m	9,389 s
38 psi	30 km/sa	7,173 m	5,078 s
	60 km/sa	24,82 m	9,334 s

Islak yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Tablo 2.4'te verilmiştir. Tablo 2.4'e göre; ıslak yolda, düşük hızda yapılan testlerde, 33 psi lastik basıncında, 7,209 m frenleme mesafesi elde edilmiştir; 25 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 2,5 artmıştır; 38 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 0,5 azalmıştır. Islak yolda, yüksek hızda yapılan testlerde, 33 psi lastik basıncında, 24,9 m frenleme mesafesi elde edilmiştir; 25 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 1,486 artmıştır; 38 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 0,32



azalmıştır. Islak yol testinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde; frenleme mesafesinde, en az artış 25 psi lastik basıncı testinde elde edilirken, en çok artış 38 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir.

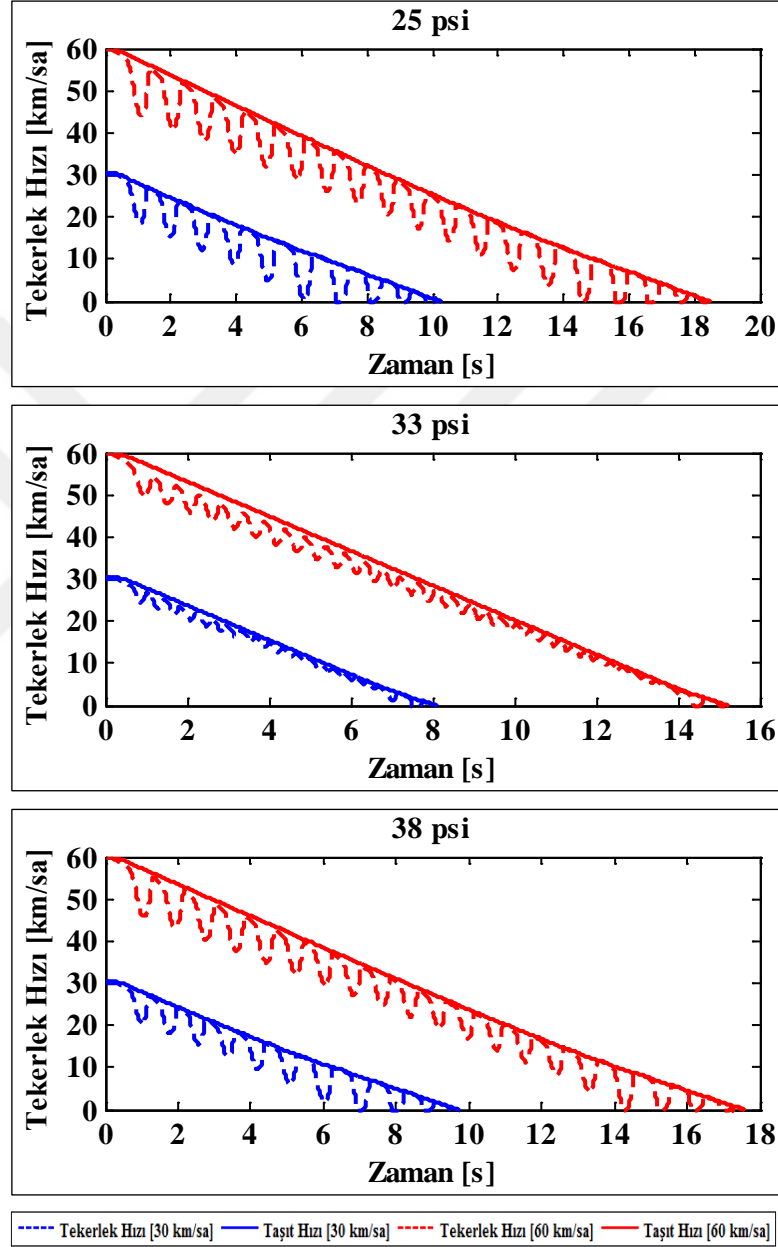
### 2.6.3. Kaygan yol simülasyon sonuçları



Şekil 2.17. Kaygan yol için fren basıncı benzetim sonuçları

Kaygan yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, fren basıncı değişim sonuçları Şekil 2.17'de verilmiştir. Taşıt hızı ve lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 2.17'ye göre; tüm lastik basınçlarında, düşük hızlarda

yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre, fren basıncı salınım sayısının daha az olduğu görülmüştür. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncındaki artışın en uzun 25 psi ve 38 psi lastik basıncında, en kısa 33 psi lastik basıncında sürdüğü görülmüştür.



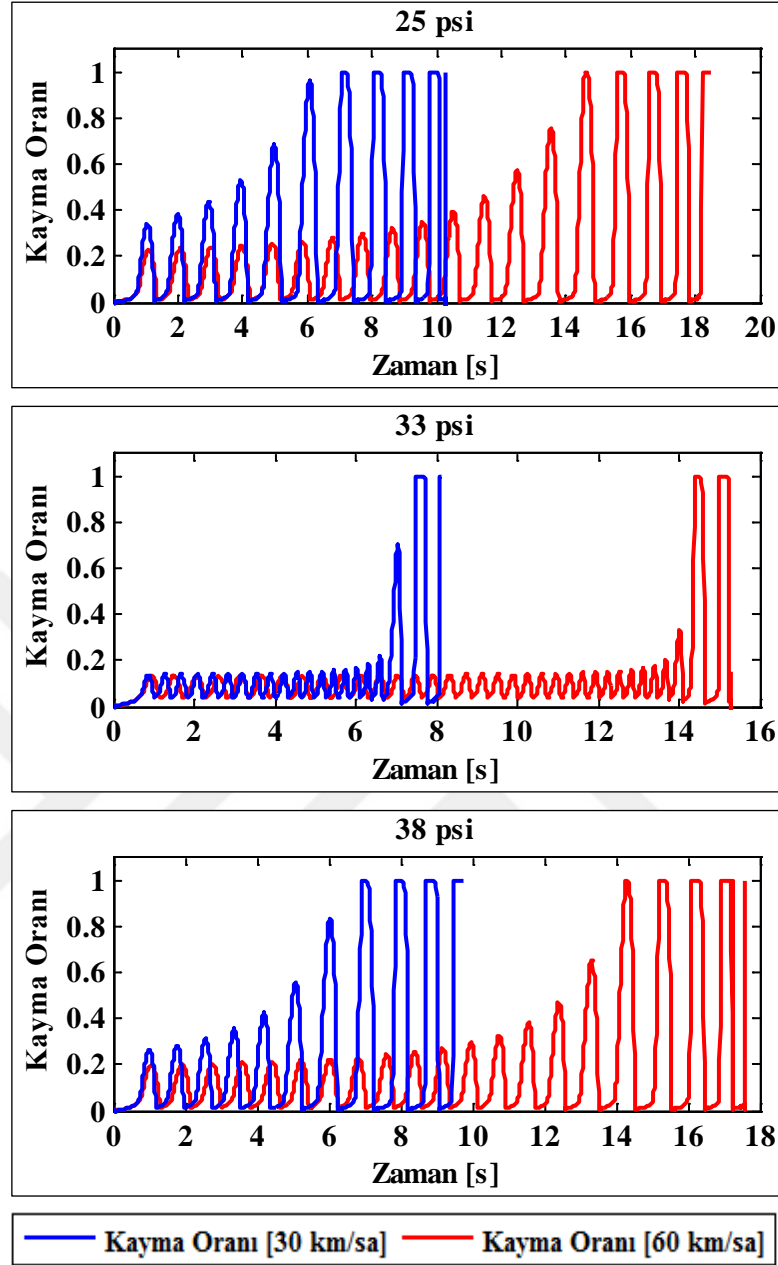
Şekil 2.18. Kaygan yol için tekerlek ve taşıt hızı benzetim sonuçları

Kaygan yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 2.18’de verilmiştir. 25 psi ve 38 psi lastik basınçlarında, 33 psi nominal lastik basıncına göre, tekerlekte daha fazla kilitlenme meydana geldiğini

görülmüştür. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hızındaki salınım en az 25 psi ve 38 psi lastik basıncında, en çok ise 33 psi lastik basıncında görülmüştür. Şekil 2.18'deki gibi, fren başlangıç anındaki taşıt hızı hem 30 km/sa olan düşük taşıt hızında yapılan hem de 60 km/sa olan yüksek taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde, tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği test, 25 ve 38 psi lastik basıncı ile yapılan testlerdir.

Kaygan yol için, 25, 33 ve 38 psi lastik basınçlarında, kayma oranı değişim sonuçları Şekil 2.19'da verilmiştir. 33 psi lastik basıncında, eşik değer kontrol stratejisine göre, referans kayma oranı 0,1-0,2 aralığında iken; 25 ve 38 psi lastik basıncında, bu kayma oranı yaklaşık 0,5 civarında elde edilmiştir.

Şekil 2.19'a göre; düşük ve yüksek hızlarda yapılan frenleme testlerinde, nominal lastik basıncının altında ve üzerinde, kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. 25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hıza göre, kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı; 33 psi lastik basıncında ise her iki hızda da benzer değerlerde salındığı görülmüştür. Buna göre, kayma oranı değerleri için, düşük ile yüksek hızlarda yapılan frenlemeler arasındaki farkın en fazla 25 ve 38 psi lastik basıncında olduğu görülmüştür. Kayma oranındaki değişim, düşük ve yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, 25 ve 38 psi lastik basıncında, 33 psi lastik basıncına göre, daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak, Şekil 2.17'deki yol testlerinde fren basıncındaki artış süresinin ve Şekil 2.18'deki yol testlerinde tekerlek hız düşüş şiddetinin, düşük ve yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en fazla 25 ve 38 psi lastik basıncında olduğu görülmektedir.



Şekil 2.19. Kaygan yol için kayma oranı benzetim sonuçları

Kaygan yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Tablo 2.5'te verilmiştir. Kaygan yolda, düşük hızda yapılan testlerde, 33 psi lastik basıncında, 10,64 m frenleme mesafesi elde edilmiştir; 25 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 23,4 artmıştır; 38 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 16,26 artmıştır. Kaygan yolda, yüksek hızda yapılan testlerde, 33 psi lastik basıncında, 38,95 m frenleme mesafesi elde edilmiştir; 25 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 16,226 artmıştır; 38 psi lastik basıncında, frenleme mesafesi, % 10,76 artmıştır. Kaygan yol testinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, yüksek

hızlarda yapılan frenlemelerde; frenleme mesafesinde, en az artış 25 psi lastik basıncı testinde elde edilirken, en çok artış 33 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir.

Tablo 2.5. Kaygan yol için frenleme mesafesi benzetim sonuçları

<b>Lastik basıncı</b>	<b>Taşıt Hızı</b>	<b>Frenleme mesafesi</b>	<b>Frenleme süresi</b>
25 psi	30 km/sa	13,13 m	10,28 s
	60 km/sa	45,27 m	18,49 s
33 psi	30 km/sa	10,64 m	8,101 s
	60 km/sa	38,95 m	15,27 s
38 psi	30 km/sa	12,37 m	9,734 s
	60 km/sa	43,14 m	17,59 s

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında, lastik basıncının ABS'nin frenleme performansına etkilerini belirlemek için, tekerlek hızı ve taşıt hızı ölçülmüş ve bu değerlere bağlı olarak ABS performans parametresi olan kayma oranı elde edilmiştir. ABS elektronik kontrol ünitesinin tekerlek hızı ve kayma oranı değişimlerine tepkilerini belirlemek için hidrolik modülatör çıkışından fren basıncı değişimi ölçülmüştür.

ABS yol testleri, farklı tutunma katsayısına sahip yollarda gerçekleştirilmiştir. Farklı yolların etkilerini karşılaştırmak için, dört tekerleğin kaygan, ıslak-kaygan, kaygan-ıslak zemin ve her iki aksın birer tekerleğinin kaygan zemin üzerinde diğer iki tekerleğin ıslak yolda olduğu ayırık ( $\mu$ -split) zeminde ayrı ayrı testler gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Test Aracı

Bu çalışmada, test aracı olarak Şekil 3.1'de gösterilen Toyota Auris kullanılmıştır. Bu taşıtın fren sistemi, çapraz fren sistemine sahiptir. Ayrıca, hidrolik basınç modülatörü, 4 kanallı selenoid valf ile fren basıncını değiştirmektedir. Böylece, ABS devreye girdiğinde, tekerlek fren silindirindeki basıncı ayarlama işlemini kontrol eden, 4 kanallı selenoid valf vasıtasıyla, her bir tekerlek ABS kontrol ünitesi tarafından ayrı ayrı kontrol edilmektedir.



Şekil 3.1. Test aracı

Tablo 3.1'de test aracının özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Test aracının özellikleri

<b>Araç sistemi</b>	<b>Özellik</b>
Ön süspansiyon	MacPherson bağımsız süspansiyon sistemi
Arka süspansiyon	Burulma kirişli yarı bağımsız süspansiyon sistemi
Şanzıman	5 vitesli-manuel şanzıman-önden çekişli
Ön fren sistemi	Hidrolik disk fren
Arka fren sistemi	Hidrolik disk fren
El freni	Mekanik
Motor	Buji ateşlemeli - 4 silindirli
Direksiyon sistemi	Elektrik yardımcı direksiyon

### 3.2. ABS Ölçüm Sistemi ve Ölçüm Cihazları

ABS'nin frenleme performansına lastik basıncının etkisini analiz etmek için; taşıt hızı, ön tekerleklerden ölçülen tekerlek hızı, fren basıncı ve frenleme mesafesi ölçüm sistemi Tablo 3.2'de verilmiştir.

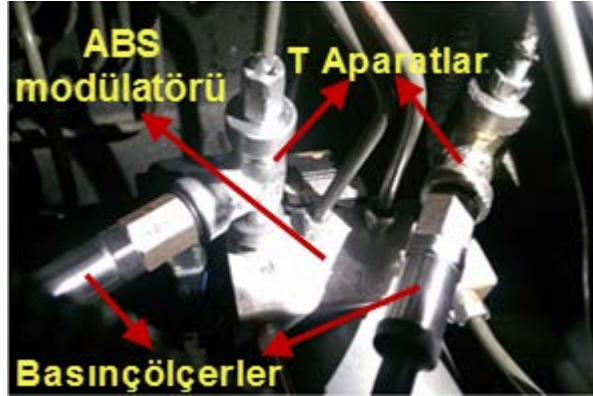
Tablo 3.2. Ölçülen parametrelerin özellikleri

<b>Parametre</b>	<b>Dönüştürücü</b>	<b>Birim</b>	<b>Elektriksel Çalışma Aralığı</b>	<b>Ölçme Aralığı</b>
Ön sağ ve sol tekerin açısal hızı	Enkoder	devir	1000 darbe/devir	0-6000 dev/dak
Ön sağ ve sol tekerin fren basınçları	Basınç sensörü	bar	0,43 V – 4,5 V	0-250 bar
Taşıt hızı	Optik hız sensörü	km/sa	-10 V - +10 V	0-250 km/sa



Şekil 3.2. Enkoder

Ön tekerleklerin açısal hızı; geri-beslemeli kontrol sistemlerinde pozisyonların belirlenmesi ve geri-besleme sinyallerinin üretilmesinde kullanılan enkoderler (kodlayıcılar) ile ölçülmüştür. Enkoder ile tekerlek hızı, 1 devirde 1000 darbe olarak ölçülmektedir ve bu ölçüm cihazı maksimum 6000 dev/dak ölçebilmektedir. Enkoder, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, tekerlek göbeğine bağlanabilen ve bijon somunlarına bağlanan kanallı disk ve enkoderin tekerlek birlikte dönmemesi için direksiyon hareketlerine serbestlik sağlayan oynar mafsallı çubuk ile tekerleğe monte edilmiştir.



Şekil 3.3. Basınçölçerlerin ABS modülatörüne bağlanması

Ön tekerleklerin fren basıncı, Şekil 3.3’te görüldüğü gibi, T aparatlar ile ABS hidrolik basınç modülatörünün sağ ve sol ön tekerlek çıkışına bağlanan basınçölçerler ile ölçülmüştür. Araç fren basıncı karakteristiğine uygun olarak seçilen basınçölçerler, minimum 0,43 ve maksimum 4,5 volt ile 0-250 bar aralığını ölçebilmektedir.

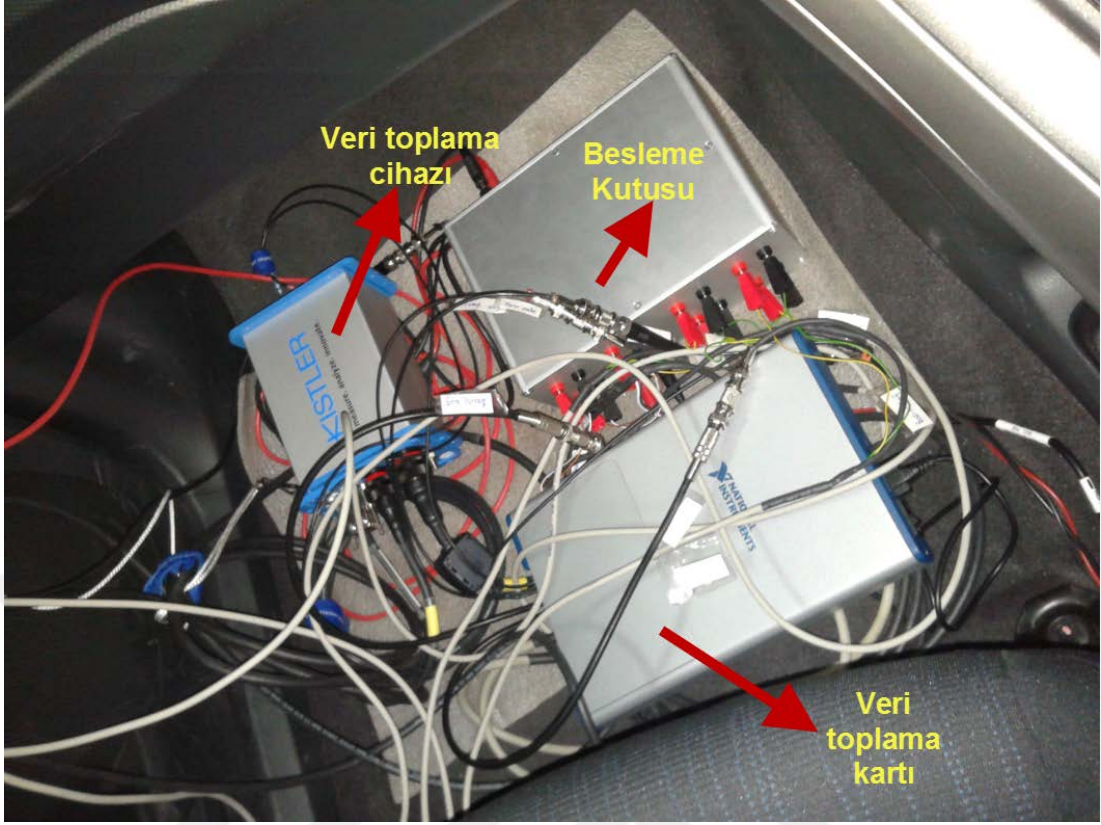


Taşıt hızı, Şekil 3.4'te görülen Kistler markasının L-350 modeline sahip ve minimum -10 volt ve maksimum +10 volt ile 0-250 km/sa aralığını ölçebilen ve taşıt gövdesine vakumlu yapıştırıcılarla bağlanan optik hız sensörü kullanılmıştır. Ölçüm yaparken, optik hız sensörünün yola paralel olup olmadığı, sensör üzerindeki su terazisi ile anlaşılmaktadır. Eğer, bu su terazisi dengede değilse, hız ölçümü doğru yapılamamaktadır. Hız sensörünün optik özelliği ise, tüm hava koşullarında ölçüm yapılabilmesini sağlamaktadır.



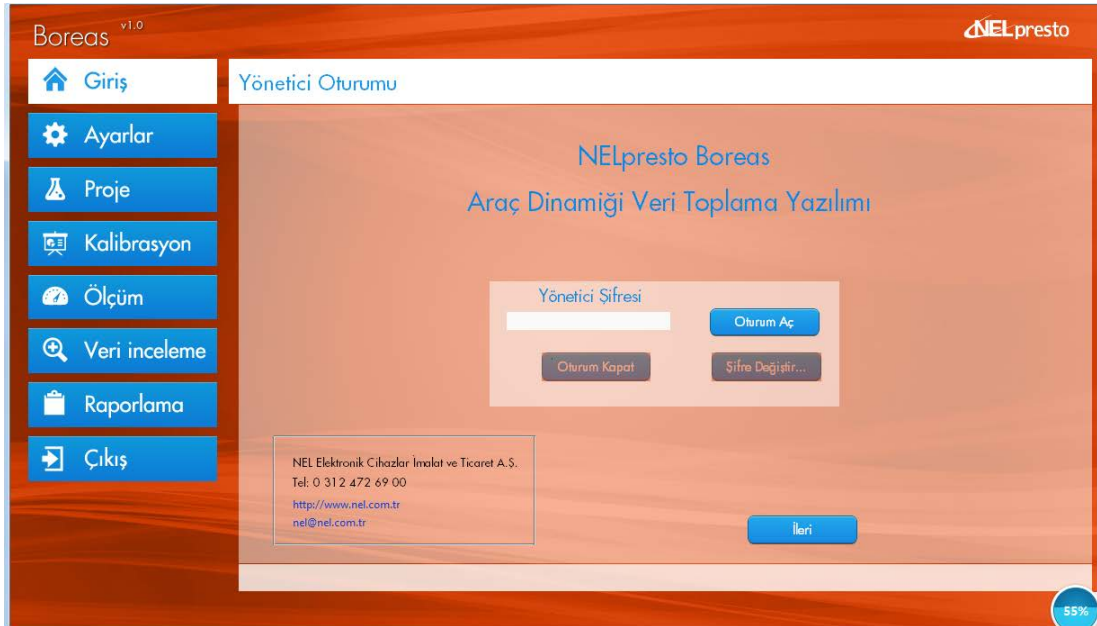
Şekil 3.4. Optik hız sensörü

Şekil 3.5'te görülen veri toplama sistemi; 16 kanallı besleme kutusu, taşıt hızı sensörünün bağlandığı Kistler markasının L-350 modeline sahip veri toplama cihazı, enkoderler ve diğer sensörlerin bağlandığı National Instrument marka veri toplama kartından oluşmaktadır. National Instrument marka veri toplama kartı, minimum -10 volt ve maksimum +10 volt aralığında çalışmaktadır ve veri toplama hızı 50 kHz'tir. Kistler marka veri toplama cihazı ise, 500 Hz veri toplama hızı ile çalışmaktadır.

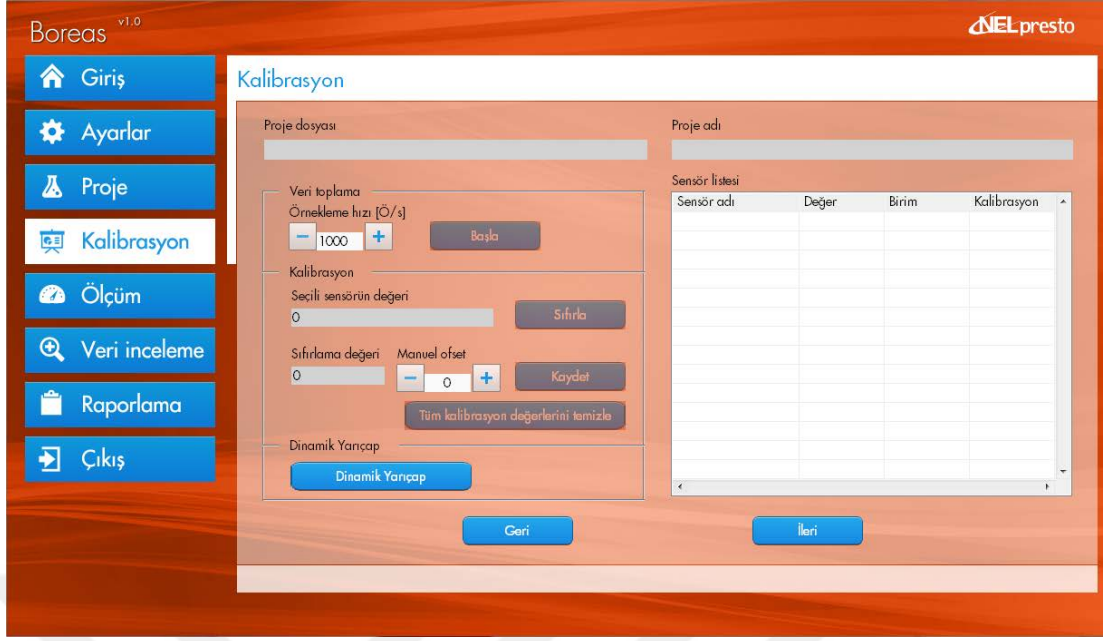


Şekil 3.5. Veri toplama sistemi

Veri toplama sistemi ile toplanan veriler, Şekil 3.6'da görülen veri toplama yazılımına aktarılmaktadır. Böylece, yapılan taşıt dinamiği testleri ile ilgili veriler, ölçüm sırasında, bu yazılım ile izlenebilmektedir.

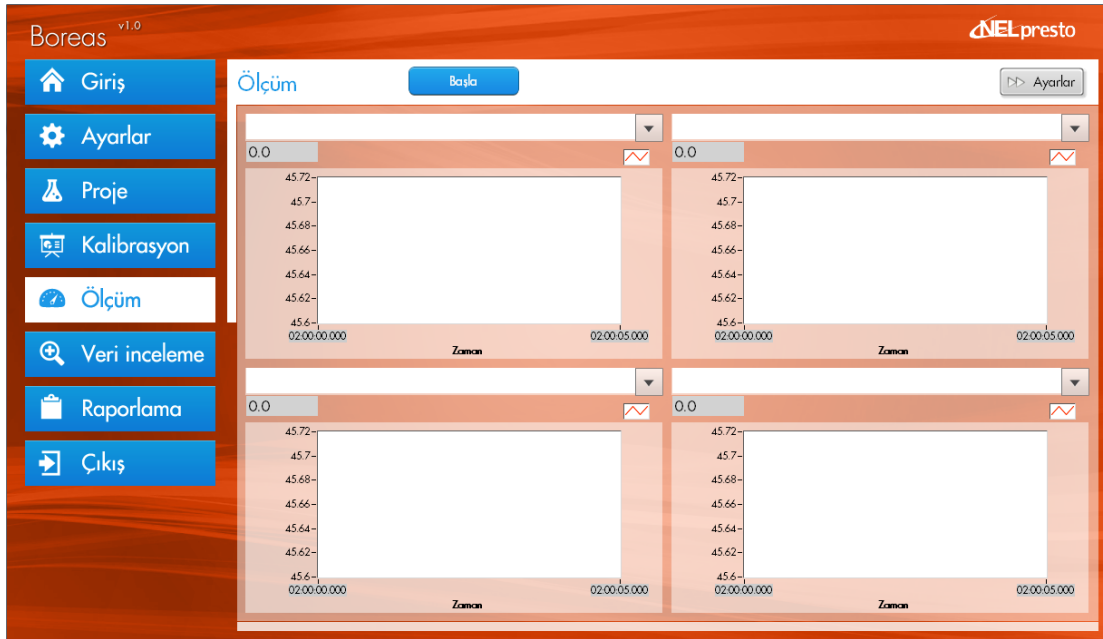


Şekil 3.6. Veri toplama yazılımı arayüzü



Şekil 3.7. Veri toplama yazılımının kalibrasyon bölümü

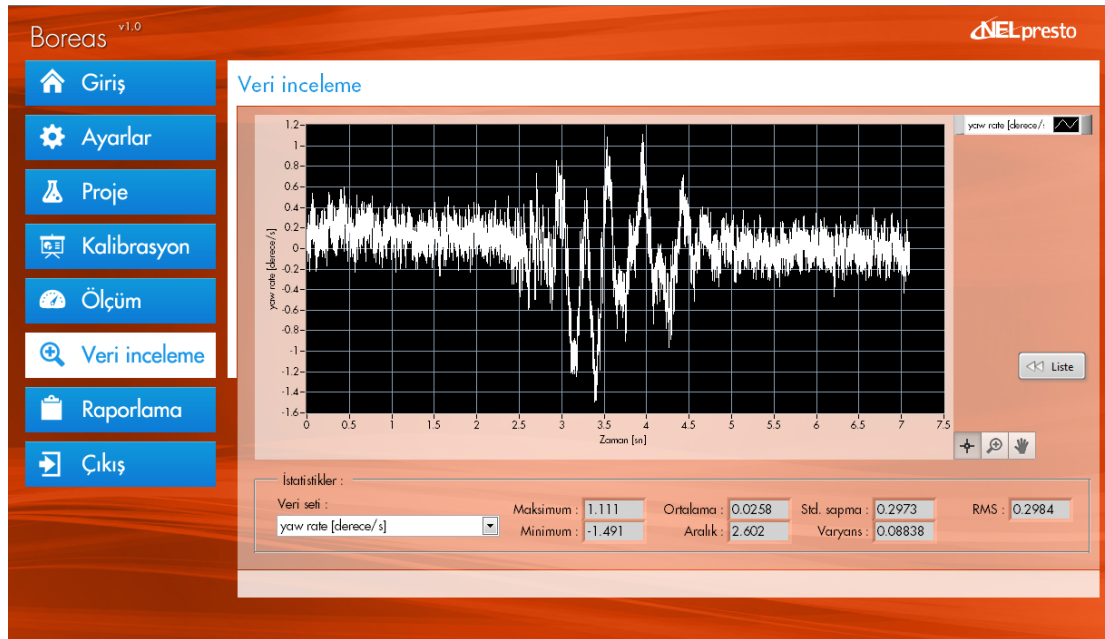
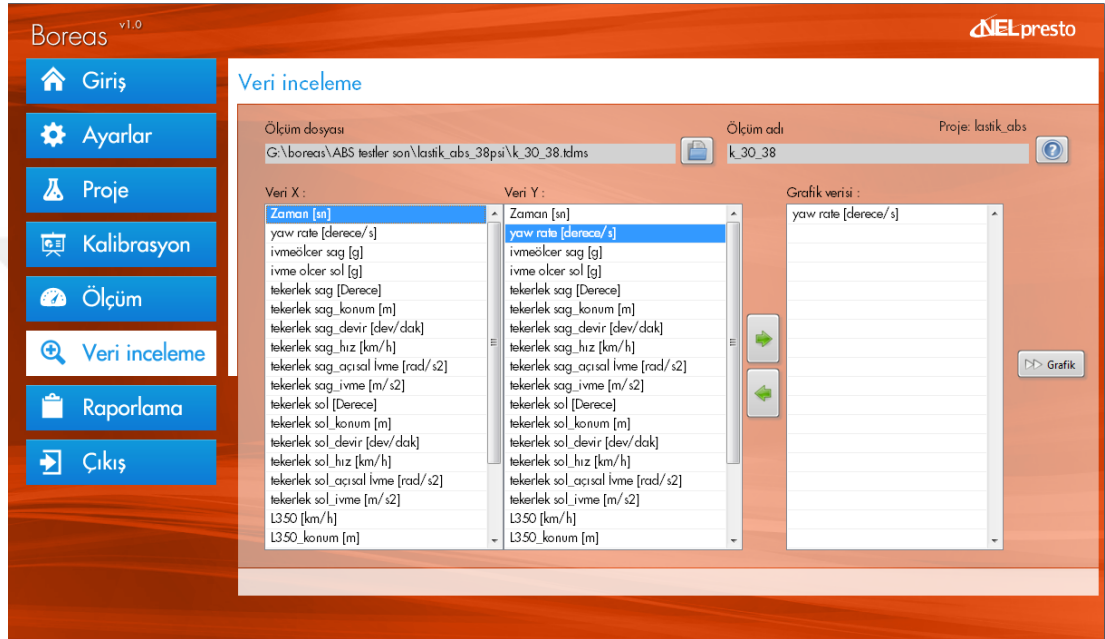
Ayrıca, ölçüm cihazından ölçülen değer, kalibre değerinden farklı ölçülmüş ise; Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, yazılımdaki Kalibrasyon bölümünde, ölçüm cihazının minimum ve maksimum voltaj değer aralığı değiştirilerek, istenilen kalibrasyon değeri elde edilebilmektedir. Tüm ölçüm parametrelerinin kalibrasyonu bu şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.8. Veri toplama yazılımının ölçüm bölümü

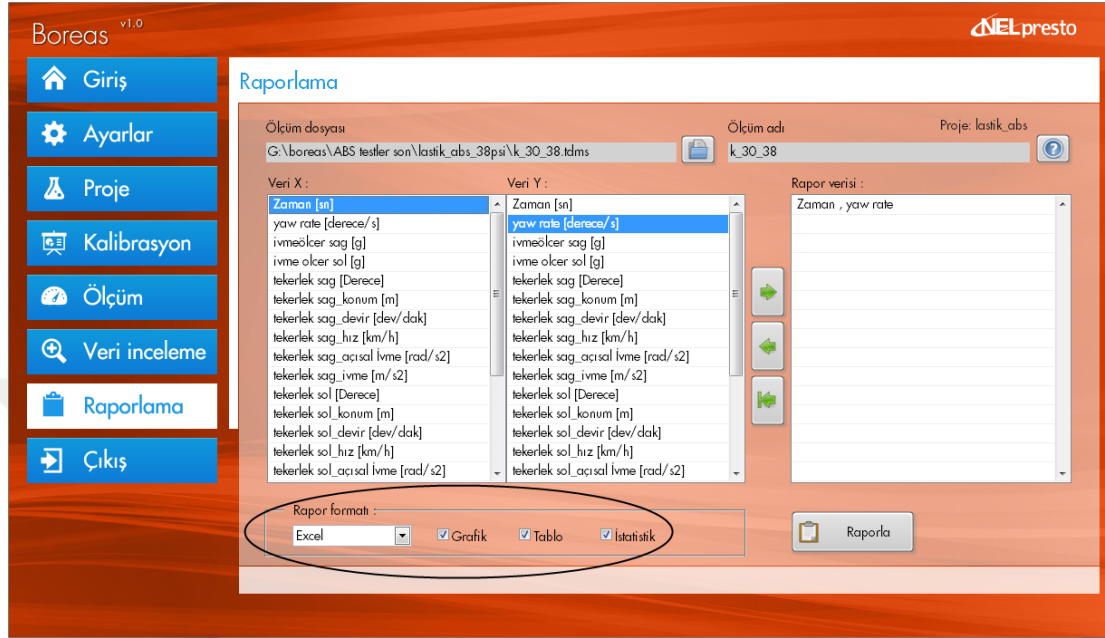
Şekil 3.8'deki ölçüm bölümünde, veri toplama sistemine bağlanan ölçüm cihazları ile savrulma hızı, düşey aks ivmesi, tekerlek hızı, taşıt hızı, frenleme mesafesi, frenleme ivmesi ve fren basıncı verileri elde edilebilmektedir.

Test sırasında, elde edilen veriler, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, listeden seçilerek grafik şeklinde incelenebilmektedir.



Şekil 3.9. Veri toplama yazılımının veri inceleme bölümü

Sonuç olarak ise, veriler Şekil 3.10’da görüldüğü gibi, Excel, Word, Web sayfası (html), CSV ve düz metin (txt) formatlarında grafik, tablo ve istatistik şeklinde raporlanabilmektedir.



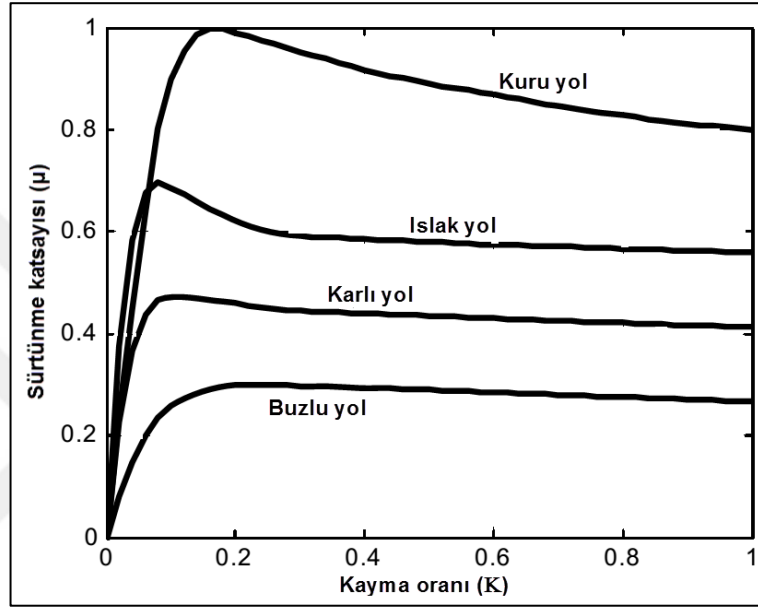
Şekil 3.10. Veri toplama yazılımının raporlama bölümü

Kayma oranı; taşıt hızı ve tekerlek hızı bilgisi kullanılarak elde edilmiştir;

$$K = \frac{v - R_{ef} \cdot \omega}{v} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)’de,  $v$  taşıt hızını ve  $R_{ef} \cdot \omega$  ise tekerleğin çizgisel hızını ifade etmektedir. Buna göre, kayma oranı; taşıt hızı ile tekerleğin çizgisel hızı arasındaki relatif farkı ifade etmektedir. Buradaki taşıt hızı  $v$  ölçülmüş olup, tekerleğin çizgisel hızı ise ölçülen tekerlek açısız hızı ile tekerlek efektif yuvarlanma yarıçapı çarpılarak elde edilmiştir. Frenleme anında, kayma oranı, 0-1 aralığında değişmektedir. Kayma oranı 1’e yaklaştıkça, tekerlekler kilitlenme sınırına yaklaştığı için, tekerleklerin kilitlenme eğilimi artmaktadır. Denklem (3.1)’ye göre,  $v > R_{ef} \cdot \omega$  iken,  $K$ ’nın 1’e eşit olması tekerleğin kilitlendiğini; yani bu anda tekerleğe frenleme momenti uygulandığında tekerlek açısız hızı sıfır iken, taşıt hızının sıfır olmadığını ifade etmektedir. Kayma oranı 0’a yaklaştıkça, tekerlekler kilitlenme sınırından uzaklaştığı için, tekerleklerin kilitlenme eğilimi azalarak, tekerlekler kilitlenmeden frenlenmektedir. Denklem (3.1)’ye göre,  $v = R_{ef} \cdot \omega$  olduğunda,  $K$ ’nın 0’a eşit olması tekerleğin kaymadan

yuvarlandığını; yani tekerleğin çizgisel hızının taşıt hızına eşit olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca, yol yüzeyine göre, kayma oranı farklı pik değerleri almaktadır. Farklı yol koşulları için, kayma oranına göre sürtünme katsayısı eğrilerinin verildiği Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, yol kayganlaştıkça; eğrinin eğimi artmakta ve kayma oranının pik değeri azalmaktadır. Bundan dolayı, buzlu ve karlı yol gibi kaygan yol yüzeylerinde, kayma oranının tahmin edilmesi zorlaşmaktadır.



Şekil 3.11. Farklı yollar için kayma oranı-sürtünme katsayısı (Precup ve diğ., 2004)

### 3.3. ABS Test Metodu

ABS testleri, test aracı ile 4 farklı yol şartında, Şekil 3.12’de verilen test ortamında gerçekleştirilmiştir. Uzunluğu 80 m ve genişliği 6 m olan bu test ortamında elde edilen test şartları aşağıdaki gibidir;

1. Kaygan yol testi
2. Islak yoldan kaygan yola geçiş testi ( $\mu$ -jump)
3. Kaygan yolda ıslak yola geçiş testi ( $\mu$ -jump)
4. Ayırık yol testi ( $\mu$ -split)



Şekil 3.12. ABS test ortamı

Kaygan yol,  $\mu$ -jump ve  $\mu$ -split ABS testleri için, Şekil 3.12’de görülen ıslak asfalt zemin ve yeşil renk ile görülen epoksi zemin kullanılmıştır.

Kaygan yol testi; kaygan yolu oluşturan epoksi zemin üzerinde, ABS aktif hale gelecek şekilde başlatıldı ve yine kaygan zemin üzerinde frenleme sona erdirilmiştir. Şekil 3.13’te kaygan yol test anı verilmiştir.



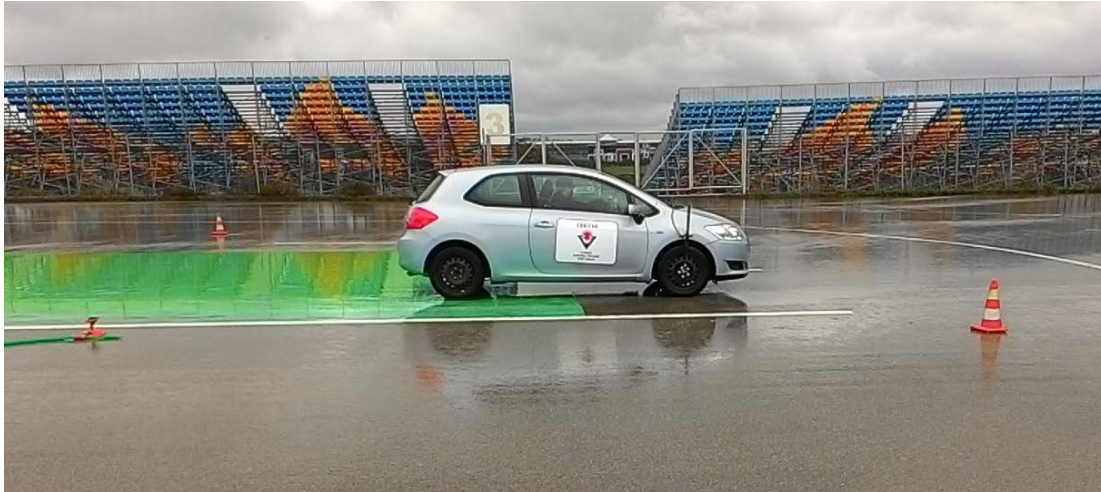
Şekil 3.13. Kaygan yol testi

Islak yoldan kaygan yola geçiş testi; ıslak asfalt zemin üzerinde, ABS aktif hale gelecek şekilde başlatıldı ve kaygan zemin üzerinde frenleme sona erdirilmiştir. Şekil 3.14'te ıslak yoldan kaygan yola geçiş test anı verilmiştir.



Şekil 3.14. Islak yoldan kaygan yola geçiş testi

Kaygan yoldan ıslak yola geçiş testi; kaygan zemin üzerinde, ABS aktif hale gelecek şekilde başlatıldı ve ıslak asfalt zemin üzerinde frenleme sona erdirilmiştir. Şekil 3.15'te kaygan yoldan ıslak yola geçiş test anı verilmiştir.



Şekil 3.15. Kaygan yoldan ıslak yola geçiş testi



Ayrık yol testi, sağ tekerlekler kaygan zeminde sol tekerlekler ıslak asfalt zeminde iken, ABS aktif olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. şekil 3.16’da ayrık yol test anı verilmiştir.



şekil 3.16. Ayrık yol testi

Bu yol şartlarında, fren başlangıç hızı olarak 30 km/sa düşük hız ve 60 km/sa yüksek hız testleri gerçekleştirilmiştir. Bu ABS fren sistemi testlerinde, araç belirtilen hızlarda iken, ABS aktif hale gelecek şekilde frenleme başlatılmıştır. Tüm testlerde, frenleme boyunca ABS’nin aktif halde kalması için gerekli olan fren pedal kuvveti, frenleme boyunca sabit bir şekilde uygulanarak, frenleme gerçekleştirilmiştir. Yazılım ile test kaydı, fren başlangıç anındaki taşıt hızı 30 km/sa ve 60 km/sa için ayrı ayrı başlatılıp taşıt hızı 0 km/sa olana kadar, ABS fren sisteminin performansını belirleyen birçok parametre eř zamanlı olarak ölçülmüştür. Böylece, testler aynı zeminde 30 km/sa ve 60 km/sa şeklindeki iki farklı fren başlangıç hızında ve aynı taşıt hızında 4 farklı zeminde, Tablo 3.3’te görülen test dizaynındaki gibi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.3. Deney tasarımı

ABS frenleme senaryoları	Yol tipi	Lastik boyutu	Lastik basıncı (psi)*	Taşıt hızı (km/sa)
Senaryo 1	Kaygan	205/55 R16	25, 33, 38	30, 60
Senaryo 2	Islak yoldan kaygan yola geçiş	205/55 R16	25, 33, 38	30, 60
Senaryo 3	Kaygan yoldan ıslak yola geçiş	205/55 R16	25, 33, 38	30, 60
Senaryo 4	Ayrık	205/55 R16	25, 33, 38	30, 60

\*Nominal lastik basıncı, 33 psi'dir.

### 3.4. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalarda, ani frenleme durumu; 25(~1720,37 kPa), 33(~227,53 kPa) ve 38(~262 kPa) psi lastik basınçları için incelenmiştir.

Kaygan, Islak-Kaygan, Kaygan-Islak ve Ayrık yol şartlarında, ABS testleri; ABS performansını değerlendirmek için, uygun olduğu düşünülen 30 km/sa düşük ve 60 km/sa yüksek fren başlangıç hızında gerçekleştirilmiştir. Böylece, her bir yol şartı için, düşük hız ile yüksek hız test sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, test sonuçları aşağıdaki durumlara göre incelenmiştir;

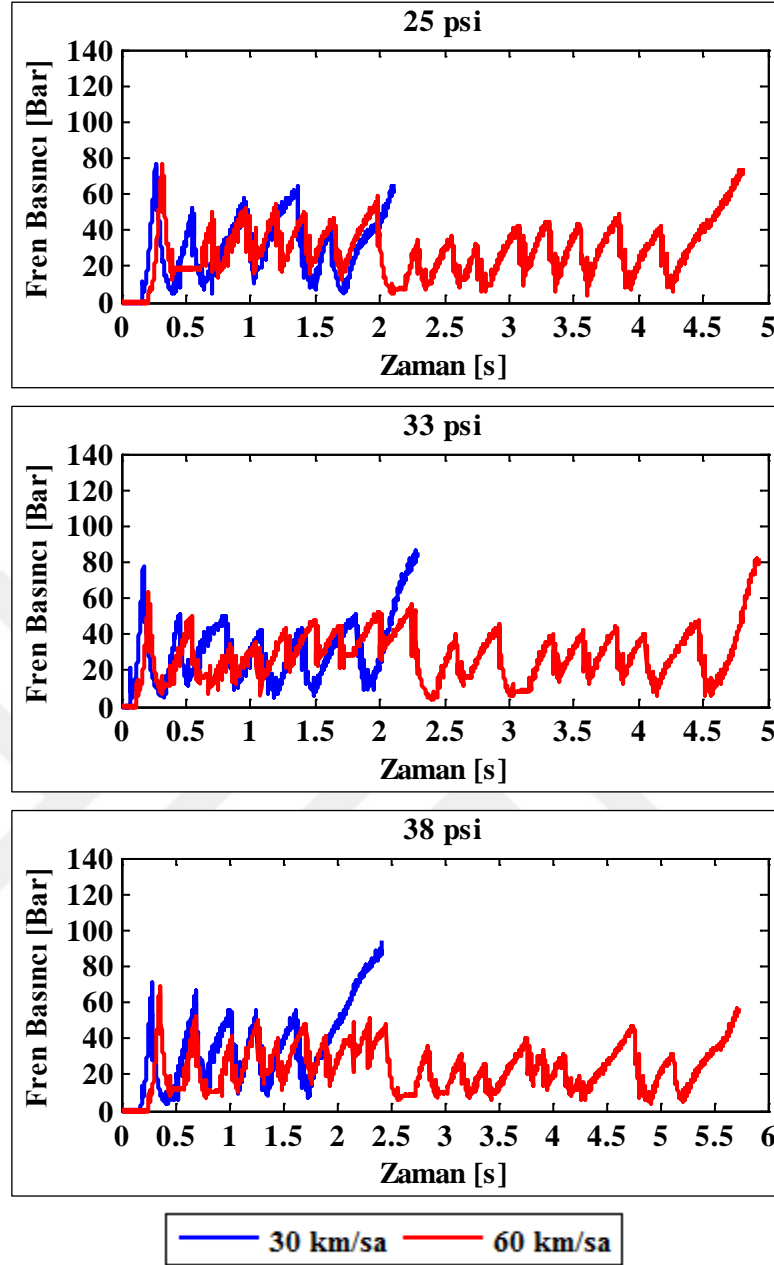
1. ABS kontrol sisteminin fren performansını değerlendirme
2. Taşıtın frenleme performansı değerlendirme

ABS kontrol sisteminin fren performansı; tekerlek hızı, fren basıncı, kayma oranı, frenleme ivmesi parametrelerinin sonuçları ile analiz edilmiştir. Taşıtın frenleme performansı; yol tipine bağlı frenleme mesafesi değişimi ve frenleme ivmesi parametrelerinin sonuçları ile analiz edilmiştir.

Burada lastik basıncına göre elde edilen sonuçlar, frenleme simülasyonlarının performansını belirlemek için önemlidir.

#### 3.4.1. Kaygan yol test sonuçları

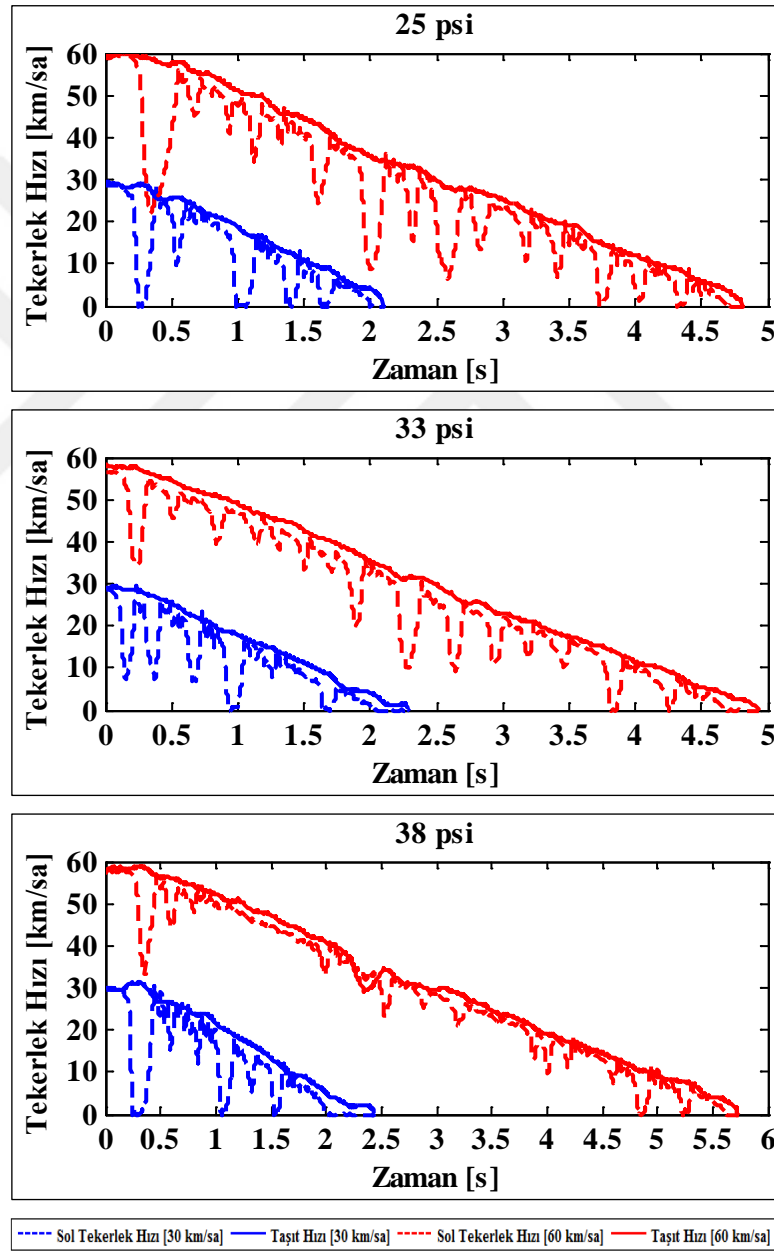
Tekerlek ve taşıt hızı sonuçlarının açık bir şekilde görülebildiği fren basıncı değişim sonuçları, kaygan yol için, Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Kaygan yol için fren basıncı sonuçları

Taşıt hızı ve lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 3.17'ye göre; tüm testlerde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre, fren basıncı salınım sayısı daha az iken; fren basıncı şiddetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, frenlemenin son kısımlarında, fren basıncındaki artışın lastik basıncı arttıkça, daha uzun sürede gerçekleştiği görülmüştür. Bu, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, frenlemenin son kısımlarında, fren basıncı salınım sayısının lastik basıncı arttıkça, daha az olmasına neden olmuştur.

Düşük hızlarda yapılan frenlemlerde, lastik basıncı arttıkça, maksimum fren basıncı şiddetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemlerde ise, nominal lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, maksimum fren basıncı şiddetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Maksimum fren basıncının uygulandığı yerde, Şekil 3.18'de; düşük hızlarda yapılan frenlemlerde, lastik basıncı arttıkça; yüksek hızlarda yapılan frenlemlerde ise, nominal lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmektedir.



Şekil 3.18. Kaygan yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları

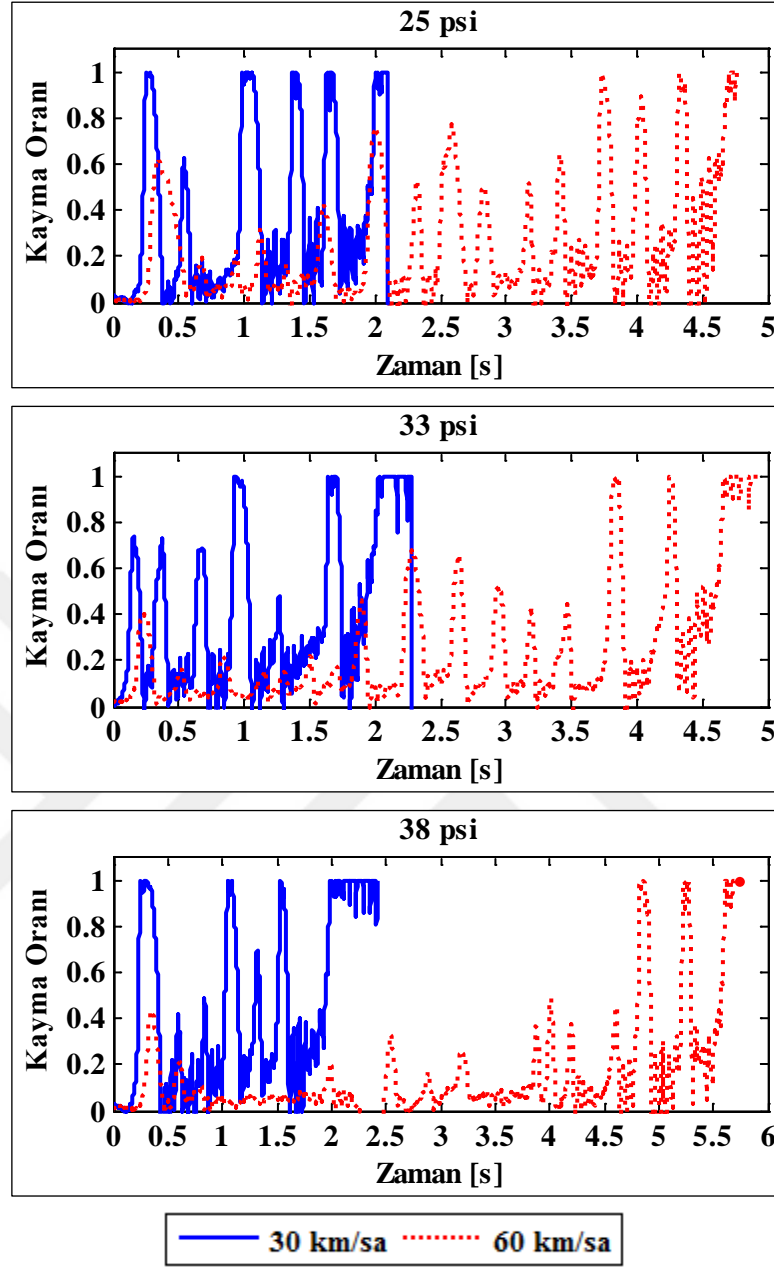
Kaygan yol için, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 3.18’de verilmiştir. Şekil 3.18’deki gibi, fren başlangıç anındaki taşıt hızı 30 km/sa olan düşük taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde, tekerleğin birçok kez kilitlendiği görülmüştür. Fren başlangıç anındaki taşıt hızı 60 km/sa olan yüksek taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde ise, tekerlek kilitlenmesinin daha az yaşandığı görülmüştür.

Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik basıncı arttıkça, yüksek hıza göre, tekerlek hız düşüşlerinin azaldığı görülmüştür. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, nominal lastik basıncına göre, diğer lastik basınçlarında tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmüştür.

Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre tekerleğin daha fazla sayıda kilitlendiği görülmüştür. 38 psi lastik basıncı testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde ise; tekerlek hız düşüş şiddetinin düşük hıza göre daha az olduğu görülmüştür.

Taşıt hızı ve lastik basıncına göre kayma oranı değişim sonuçları Şekil 3.19’da verilmiştir. Şekil 3.19’a göre; kaygan yol testlerinde, yüksek hızlarda, lastik basıncı azaldıkça, kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür, ama tekerleklerin 33 psi lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre; kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı ve tekerleklerin daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Ayrıca, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik basıncı azaldıkça, kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür, ama tekerleklerin lastik basıncı arttıkça, daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür.

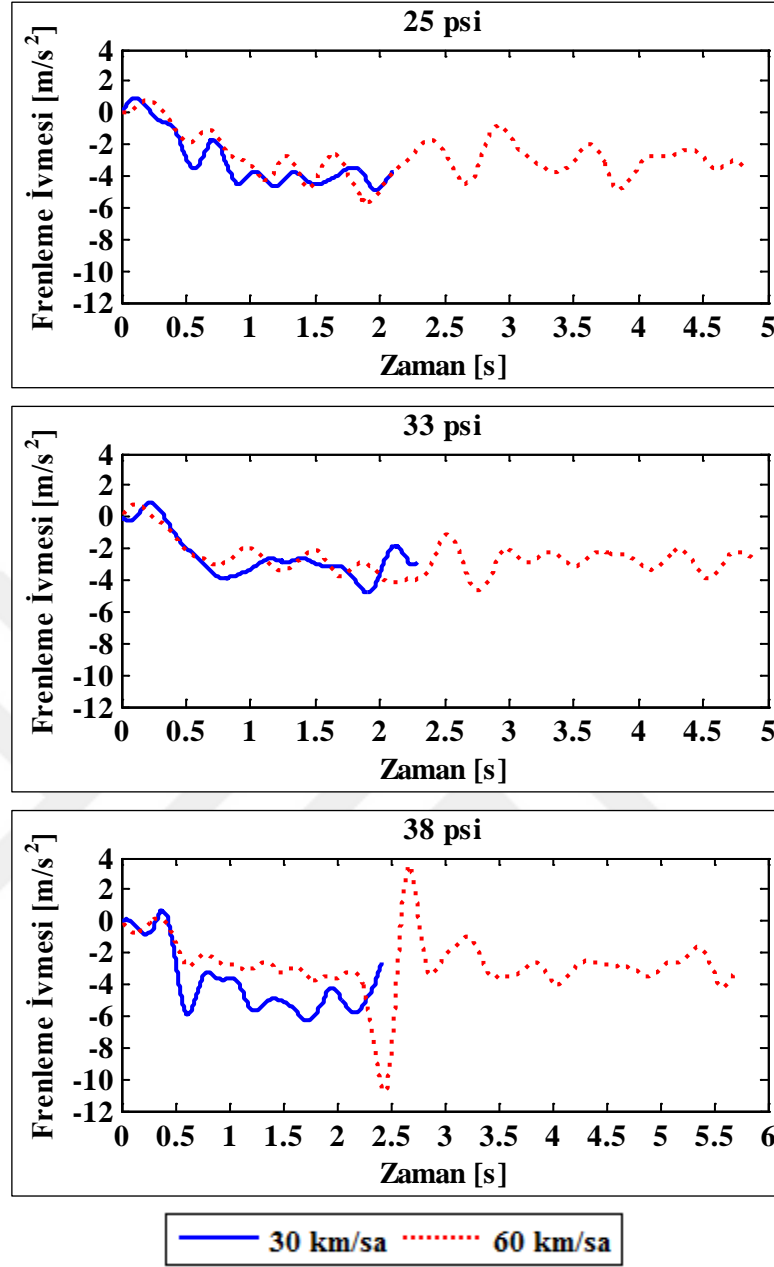
Şekil 3.17’de fren basıncı şiddeti ve Şekil 3.18’de tekerlek hız düşüş şiddetinin, yüksek hızda yapılan frenlemelerde, lastik basıncı arttıkça, daha az olduğu görülmektedir. Bu nedenle kaygan yol testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik basıncı arttıkça, kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı görülmüştür.



Şekil 3.19. Kaygan yol için kayma oranı sonuçları

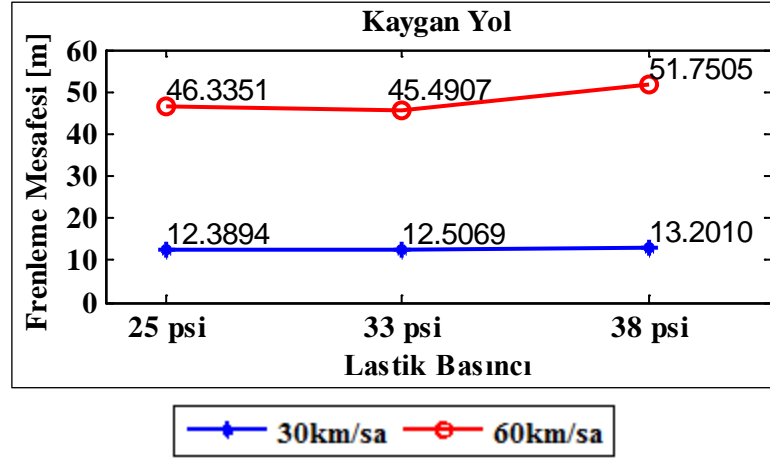
Kaygan yolda, taşıtın frenleme performansını değerlendirmek için; Şekil 3.20'de frenleme ivmesi incelenmiştir. Kaygan yol testlerinde, 38 psi lastik basıncında düşük hızlarda yapılan frenlemelerde; diğer lastik basıncı testlerinde düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, frenleme ivmesinin daha yüksek değerlerde kaldığı görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, frenleme ivmesinin lastik basıncı arttıkça, daha düşük değerlerde kaldığı görülmüştür.

38 psi lastik basıncı testinde, yüksek hızda yapılan frenlemede, 2,5. saniyedeki frenleme ivmesindeki artışın bir anda yavaşlayıp, salınımlı hale geldiği görülmüştür.



Şekil 3.20. Kaygan yol için frenleme ivmesi sonuçları

Kaygan yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Şekil 3.21’de verilmiştir. Şekil 3.21’e göre, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en uzun frenleme mesafesi 38 psi lastik basıncı testinde; en kısa frenleme mesafesi ise 33 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, 25 ve 33 psi lastik basıncı testinde elde edilen frenleme mesafeleri ise birbirine oldukça yakındır. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, frenleme mesafesinde en çok artış 38 psi lastik basıncı testinde elde edilirken, en az artış 33 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir.



Şekil 3.21. Kaygan yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları

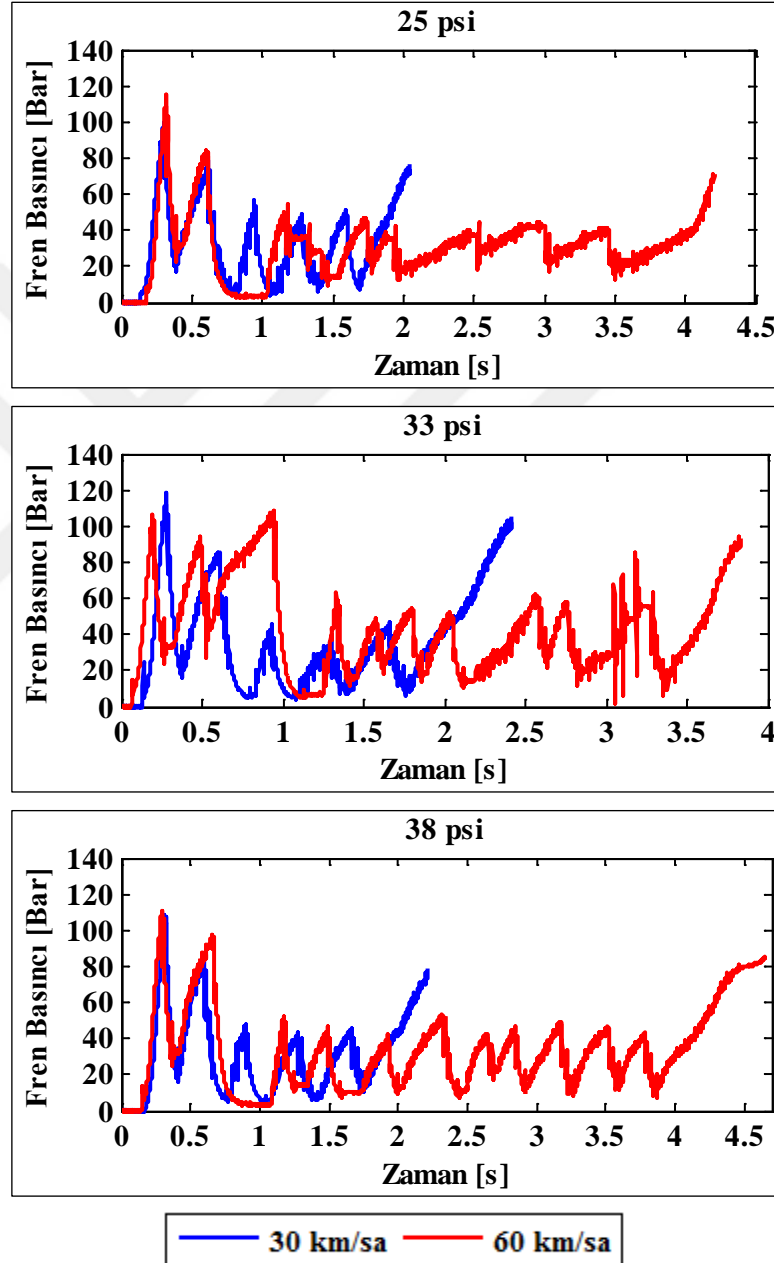
Test sonuçları ile yapılan performans analizinde lastik basıncının ABS'nin kontrol ve frenleme performansına etkileri, nominal lastik basıncı olan 33 psi referans alınarak değerlendirilmiştir. Böylece, 25 psi, lastik basıncındaki %24 lük azalmayı ve 38 psi de lastik basıncındaki %15'lik artışı temsil etmektedir. Böylelikle, kaygan yolda, düşük hızda yapılan testlerde; 25 psi, frenleme mesafesinin % 0,94 azalmasını sağlarken; 38 psi, frenleme mesafesinin % 5,5 artmasına neden olmuştur. Kaygan yolda, yüksek hızda yapılan testlerde ise; 25 psi, frenleme mesafesinin % 1,86 ve 38 psi de % 13,76 artmasına neden olmuştur. Böylece, ABS ile kaygan yolda yapılan frenleme anında, lastik basıncındaki artış frenleme performansını fren başlangıç hızından bağımsız olarak dikkate değer bir şekilde kötüleştirmiştir. Lastik basıncındaki düşüş ise; düşük hızda iyi performans sağlarken, yüksek hızda biraz kötüleşmesine neden olmuştur. Bu, lastik basıncındaki artışın kaygan yolda ABS'nin frenleme performansını kötüleştirdiğini göstermektedir. Bunun yanında lastik basıncındaki düşüşün etkileri de, fren başlangıç hızının artması ile kendini göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; 33 psi'nin hem düşük hem de özellikle yüksek hızda frenleme performansını kötüleştirmemesidir.

### 3.4.2. Islak-Kaygan yol test sonuçları

Tekerlek ve taşıt hızı sonuçlarının açık bir şekilde görülebildiği fren basıncı değişim sonuçları, Islak-Kaygan yol için, Şekil 3.22'de verilmiştir. Taşıt hızı ve lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 3.22'de göre; 25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde, kaygan yol kısmında, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde,



fren basıncı salınım sayısı, yüksek hıza göre daha az iken; fren basıncı şiddetinin yüksek hızdakine yakın olduğu görülmüştür. 33 psi lastik basıncı testinde ise, kaygan yol kısmında, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncı salınım sayısı, yüksek hıza göre daha az iken; fren basıncı şiddetinin yüksek hızdakinden daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 3.22. Islak-Kaygan yol için fren basıncı sonuçları

Tüm lastik basıncı testlerinde; hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncı şiddetinin ıslak yolda kaygan yola göre daha fazla olduğu görülmüştür. Uygulanan bu yüksek fren basıncı nedeniyle, Şekil 3.23'te, 25 ve 38 psi

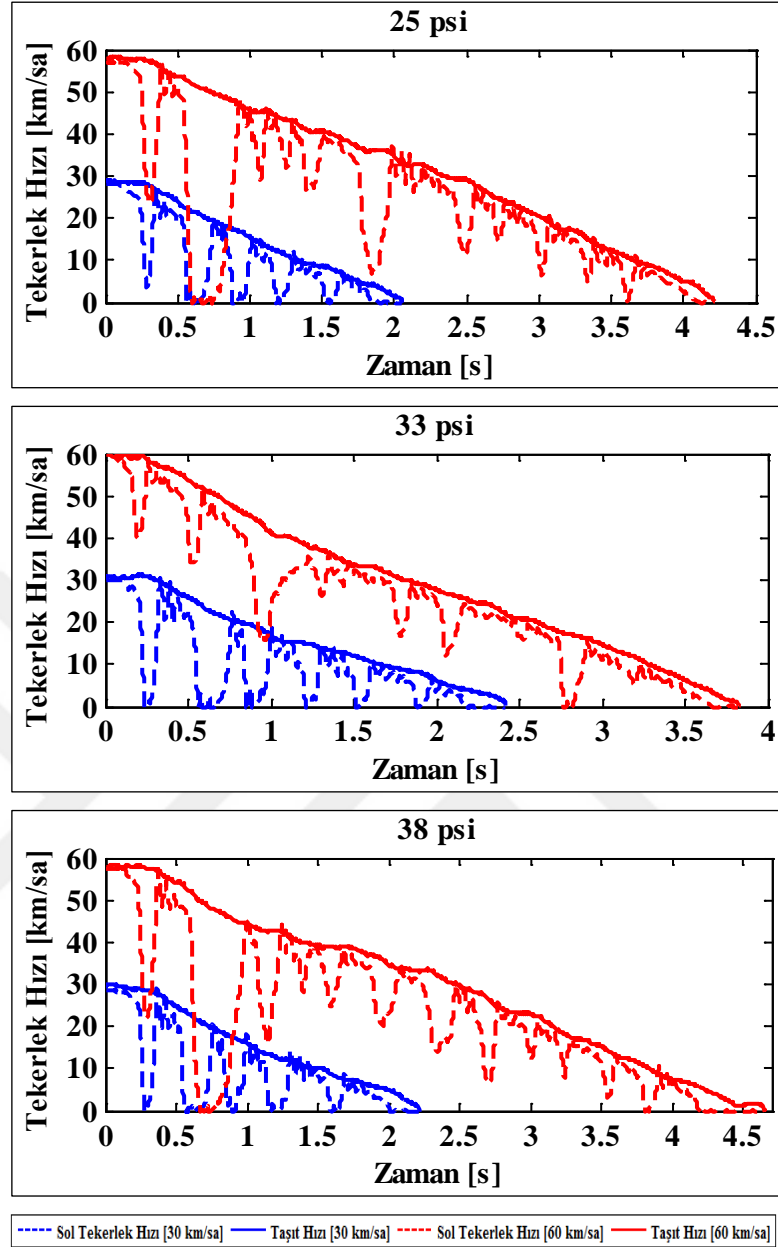
lastik basıncı testlerinde, hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hız düşüş şiddetinin, ıslak yol kısmında kaygan yol kısmına göre, daha fazla olduğu ve bu nedenle tekerleğin ıslak yol kısmında kaygan yol kısmına göre, aniden ve daha uzun süre kilitlendiği görülmektedir. Fakat, 33 psi lastik basıncı testinde ise, ıslak yol kısmında kaygan yol kısmına göre, daha fazla tekerlek hız düşüşü ve bu nedenle tekerleğin ıslak yol kısmında kaygan yol kısmına göre, aniden kilitlenme görülmemektedir.

Islak yoldan kaygan yola geçiş testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, yolun kaygan kısmında, fren basıncındaki artışın lastik basıncı azaldıkça, daha uzun sürede gerçekleştiği görülmüştür. Bu, ıslak yoldan kaygan yola geçiş testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, yolun kaygan kısmında, fren basıncı salınım sayısının lastik basıncı azaldıkça, daha az olmasına neden olmuştur.

Islak-Kaygan yol için, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 3.23'te verilmiştir. Şekil 3.23'teki gibi, fren başlangıç anındaki taşıt hızı 30 km/sa olan düşük taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde, tekerleğin birçok kez kilitlendiği görülmüştür. Fren başlangıç anındaki taşıt hızı 60 km/sa olan yüksek taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde ise, tekerlek kilitlenmesinin daha az yaşandığı görülmüştür.

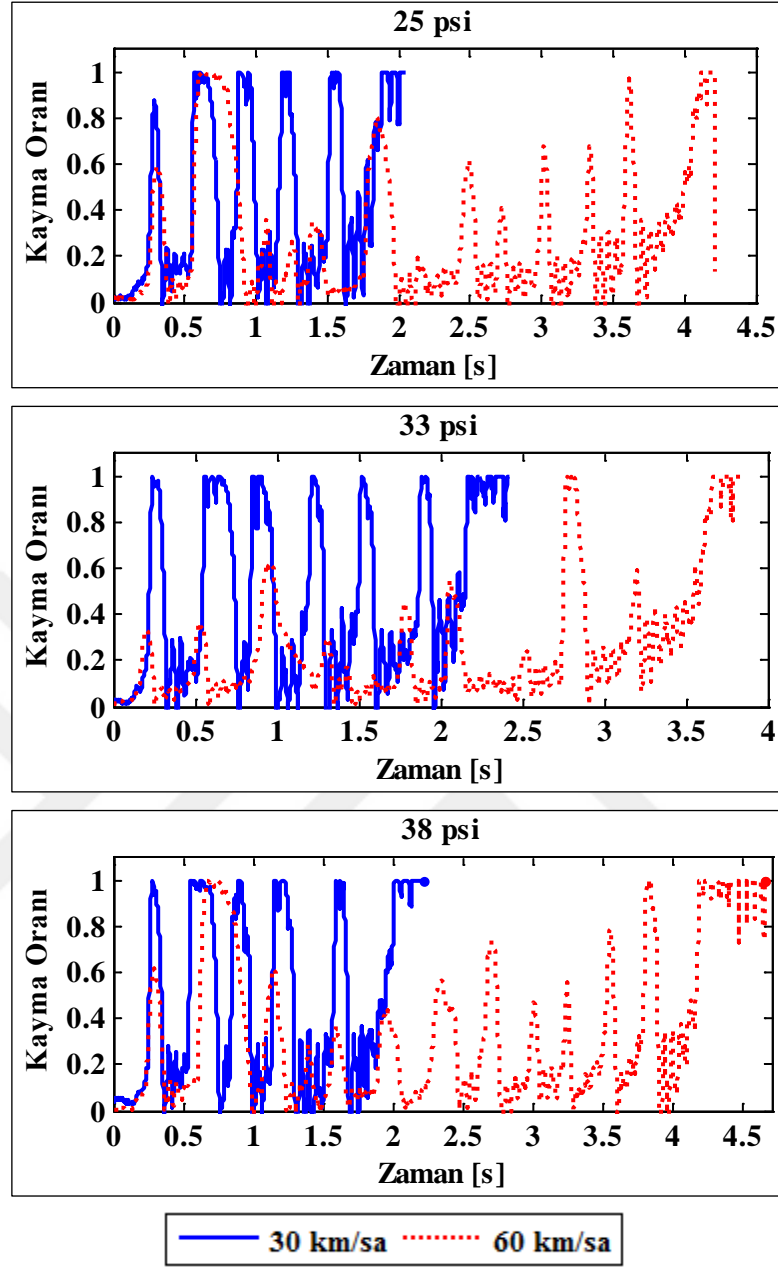
Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, nominal lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, tekerlek hız düşüşlerinin arttığı ve tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde ise, 38 psi lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, tekerlek hız düşüşlerinin arttığı ve tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmüştür. Islak yoldan kaygan yola geçiş testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik-yol arasındaki tutunma katsayısı yüksek olduğu ıslak yol kısmında, nominal lastik basıncına göre, diğer lastik basınçlarında tekerleğin aniden kilitlendiği görülmüştür.

Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre tekerleğin daha fazla sayıda kilitlendiği görülmüştür. Nominal lastik basıncı testlerinde, diğer lastik basıncı testlerine göre; yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hız düşüş şiddetinin düşük hıza göre daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 3.23. Islak-Kaygan yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları

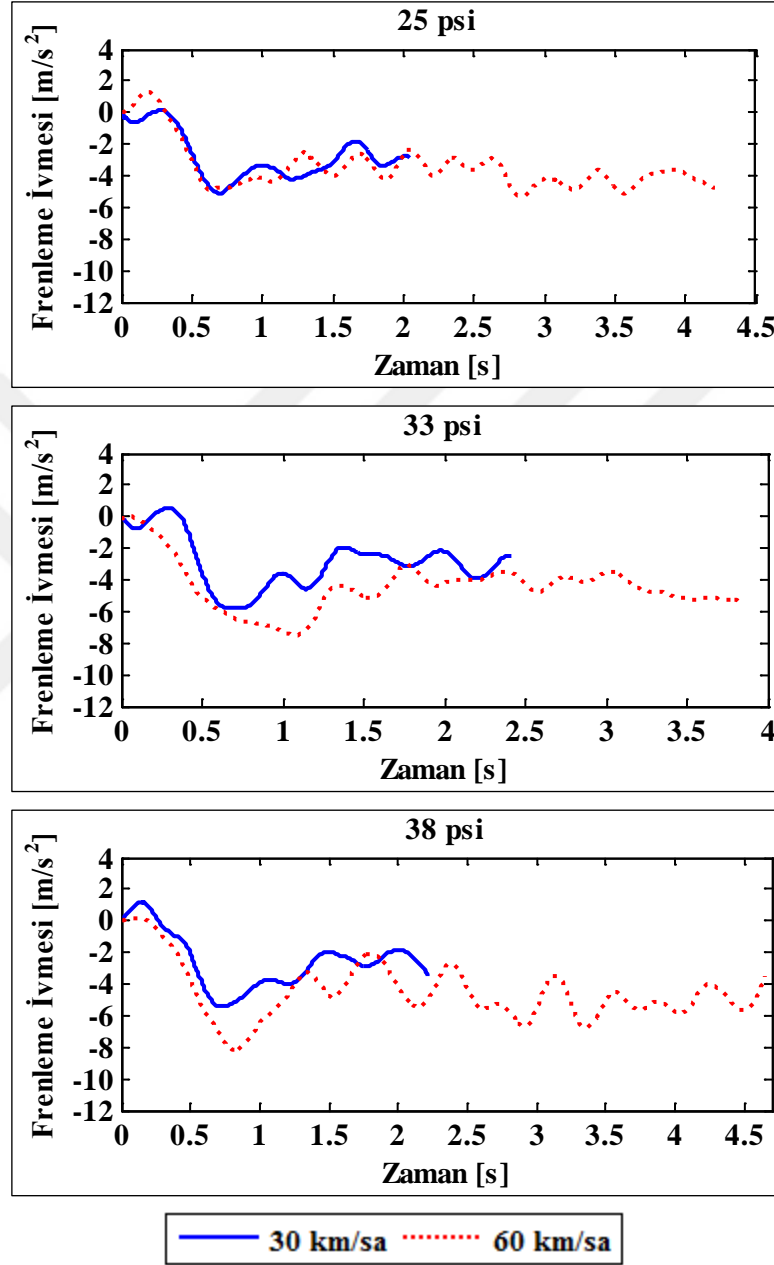
Taşıt hızı ve lastik basıncına göre kayma oranı değişim sonuçları Şekil 3.24'te verilmiştir. Şekil 3.24'e göre; ıslak yoldan kaygan yola geçiş testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre; kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, 33 psi lastik basıncı testinde, kaygan yol ile ıslak yol kayma oranı değerleri arasındaki farkın; 25 ve 38 psi lastik basıncına göre daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 3.24. Islak-Kaygan yol için kayma oranı sonuçları

Düşük hızda yapılan frenlemede, kaygan yol kısmında, 33 psi lastik basıncı testinde, 25 ve 38 psi lastik basıncına göre; tekerleklerin daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Yüksek hızlarda, kaygan yol kısmında, nominal lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, kayma oranının daha az kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür, ama tekerleklerin lastik basıncı arttıkça, daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Şekil 3.22’de fren basıncı şiddeti ve Şekil 3.23’te tekerlek hız düşüş şiddetinin, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde ıslak yol kısmında, 33 psi lastik basıncı testinde, 25 ve 38 psi lastik basıncına göre daha az olduğu görülmektedir. Bu

nedenle yüksek hızlarda yapılan frenlemlerde ıslak yol kısmında, 33 psi lastik basıncı testinde, 25 ve 38 psi lastik basıncına göre kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı görülmüştür.

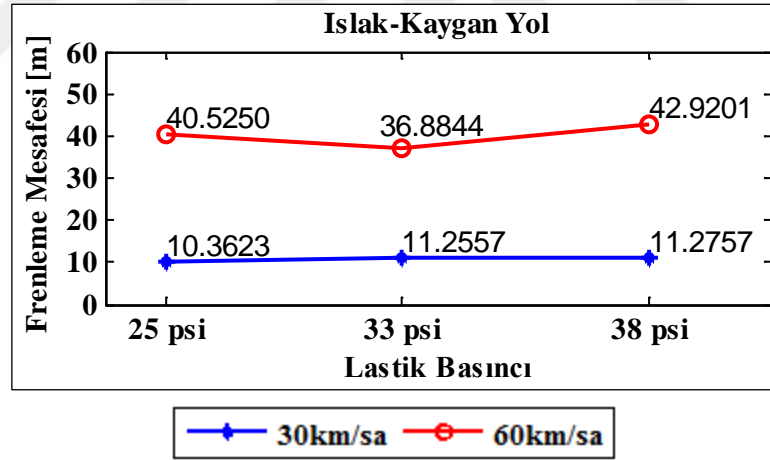


Şekil 3.25. Islak-Kaygan yol için frenleme ivmesi sonuçları

Islak-Kaygan yolda, taşıtın frenleme performansını değerlendirmek için; Şekil 3.25'te frenleme ivmesi incelenmiştir. 25 psi lastik basıncı testlerinde düşük hızlarda yapılan frenlemlerde; diğer lastik basıncı testlerinde düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, frenleme ivmesinin daha düşük değerlerde kaldığı görülmüştür. Yüksek hızda yapılan frenlemlerde, ıslak yol kısmındaki frenleme ivmesinin, 25 psi

lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre, daha düşük değerlerde kaldığı görülmüştür. Yüksek hızda yapılan frenlemelerde, kaygan yol kısmındaki frenleme ivmesinin, 38 psi lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre, daha yüksek değerlerde kaldığı görülmüştür. Islak yoldan kaygan yola geçiş testinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, yolun kaygan kısmında frenleme ivmesinin 25 psi ile 33 psi lastik basınçlarında, benzer şiddette kaldığı görülmüştür.

Islak-Kaygan yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Şekil 3.26'da verilmiştir. Şekil 3.26'ya göre, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en uzun frenleme mesafesi 38 psi lastik basıncı testinde; en kısa frenleme mesafesi ise 33 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, 33 ve 38 psi lastik basıncı testinde elde edilen frenleme mesafeleri ise birbirine oldukça yakındır. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, frenleme mesafesinde en çok artış 25 psi lastik basıncı testinde elde edilirken, en az artış 33 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir.

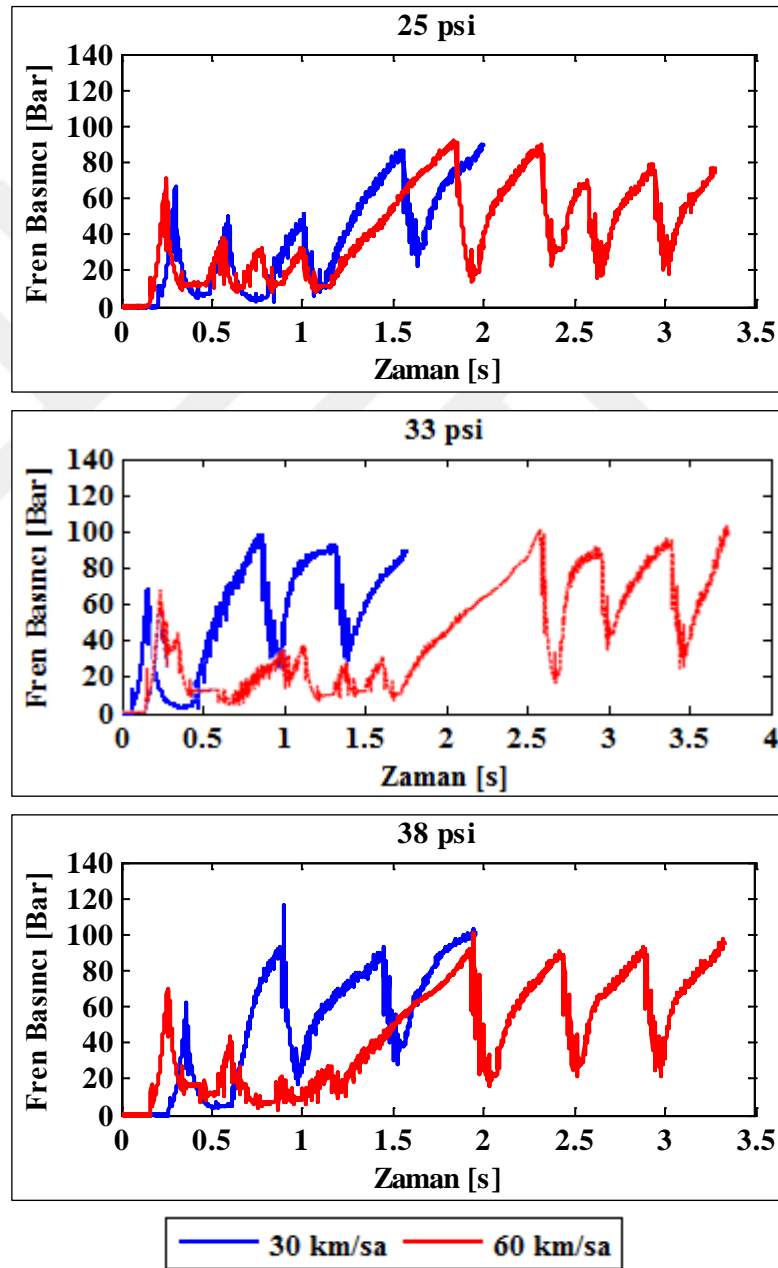


Şekil 3.26. Islak-Kaygan yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları

Islak-kaygan yolda, düşük hızda yapılan testlerde; 25 psi, frenleme mesafesini % 7,94 arttırmasına karşın; 38 psi, frenleme mesafesini % 0,18 arttırmıştır. Islak-kaygan yolda, yüksek hızda yapılan testlerde; 25 psi frenleme mesafesinin % 9,87 ve 38 psi frenleme mesafesinin % 16,36 artmasına neden olmuştur. Böylece, ABS ile yüksek hızda ıslak yol üzerinde yapılan frenleme sırasında aniden kaygan yola geçildiğinde frenleme mesafesinde, en az artış 33 psi ile sağlanırken en çok artışa da 25 psi neden olmuştur. Böylece; ABS ile frenleme sırasında ıslak yoldan kaygan yola

geçildiğinde, lastik basıncındaki artış ve azalış frenleme performansının kötüleşmesine neden olmuştur. Lastik basıncındaki düşüş, hem düşük hem de yüksek hızda, bunu daha ciddi hale getirirken; lastik basıncındaki artış, sadece yüksek hızlarda kendini göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; 33 psi'nin tüm hızlarda en iyi frenleme performansını sağlamasıdır.

### 3.4.3. Kaygan-İslak yol test sonuçları



Şekil 3.27. Kaygan-İslak yol için fren basıncı sonuçları

Tekerlek ve taşıt hızı sonuçlarının açık bir şekilde görülebildiği fren basıncı değişim sonuçları, Kaygan-İslak yol için, Şekil 3.27'de verilmiştir. Taşıt hızı ve lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 3.27'de göre; tüm lastik basıncı testlerinde, hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, ıslak yol kısmında kaygan yol kısmına göre, fren basıncındaki artışın daha uzun sürede gerçekleştiği ve fren basıncı şiddetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, yolun kaygan ve ıslak kısmında, fren basıncındaki artışın 25 psi lastik basıncı testlerinde, nominal ve 38 psi lastik basıncında yapılan frenlemelere göre, daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.

25 psi lastik basıncı testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, diğer lastik basınçlarına göre, fren basıncı şiddetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Uygulanan bu yüksek fren basıncı nedeniyle, Şekil 3.28'de, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hız düşüş şiddetinin, 25 psi lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre, daha fazla olduğu görülmektedir.

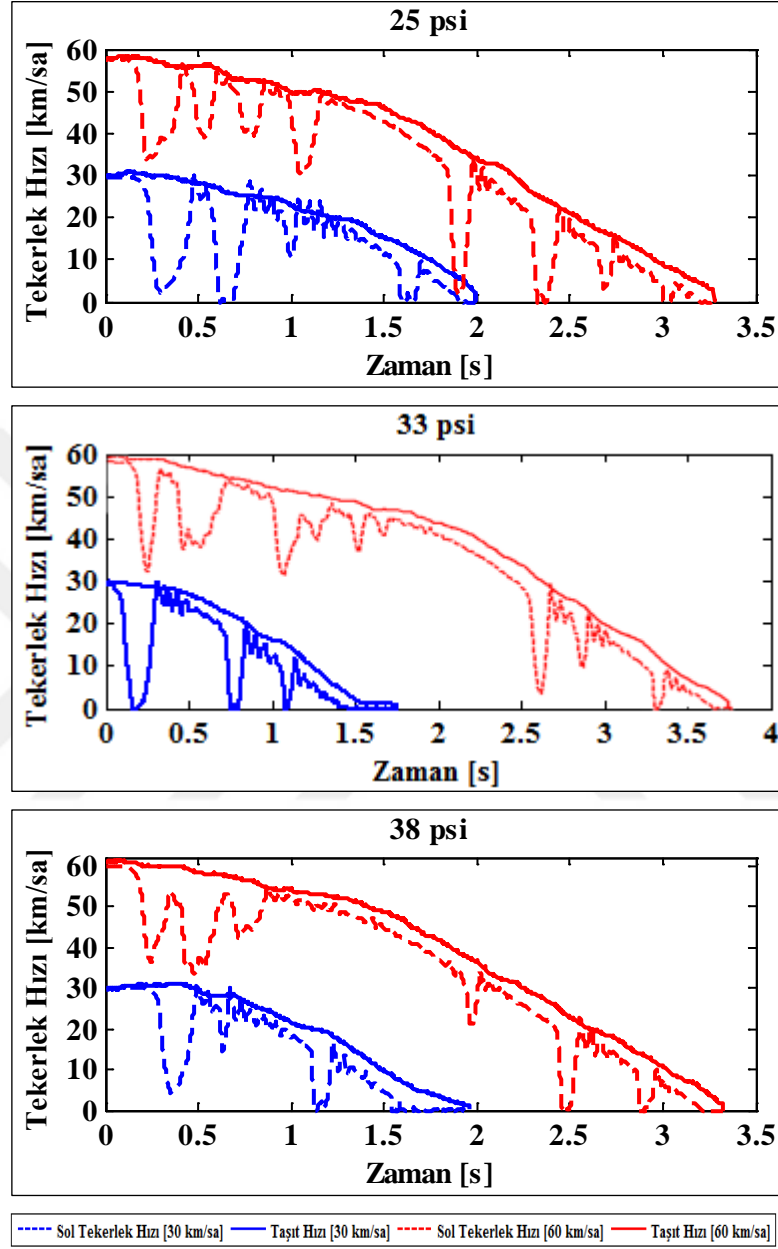
Kaygan-İslak yol için, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 3.28'de verilmiştir. Şekil 3.28'deki gibi, fren başlangıç anındaki taşıt hızı 30 km/sa olan düşük taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde, tekerleğin birçok kez kilitlendiği görülmüştür. Fren başlangıç anındaki taşıt hızı 60 km/sa olan yüksek taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde ise, tekerlek kilitlenmesinin daha az yaşandığı görülmüştür.

Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik basıncı arttıkça, tekerlek hız düşüşlerinin azaldığı görülmüştür. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, tüm lastik basıncı testlerinde; kaygan yol kısmında ıslak yol kısmına göre, tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmüştür. Ayrıca, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik basıncı arttıkça, tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmüştür. Kaygan yoldan ıslak yola geçiş testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, lastik-yol arasındaki tutunma katsayısının yüksek olduğu ıslak yol kısmında, tekerleğin aniden kilitlendiği görülmüştür.

Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre tekerleğin daha fazla sayıda kilitlendiği görülmüştür. Lastik basıncı arttıkça;



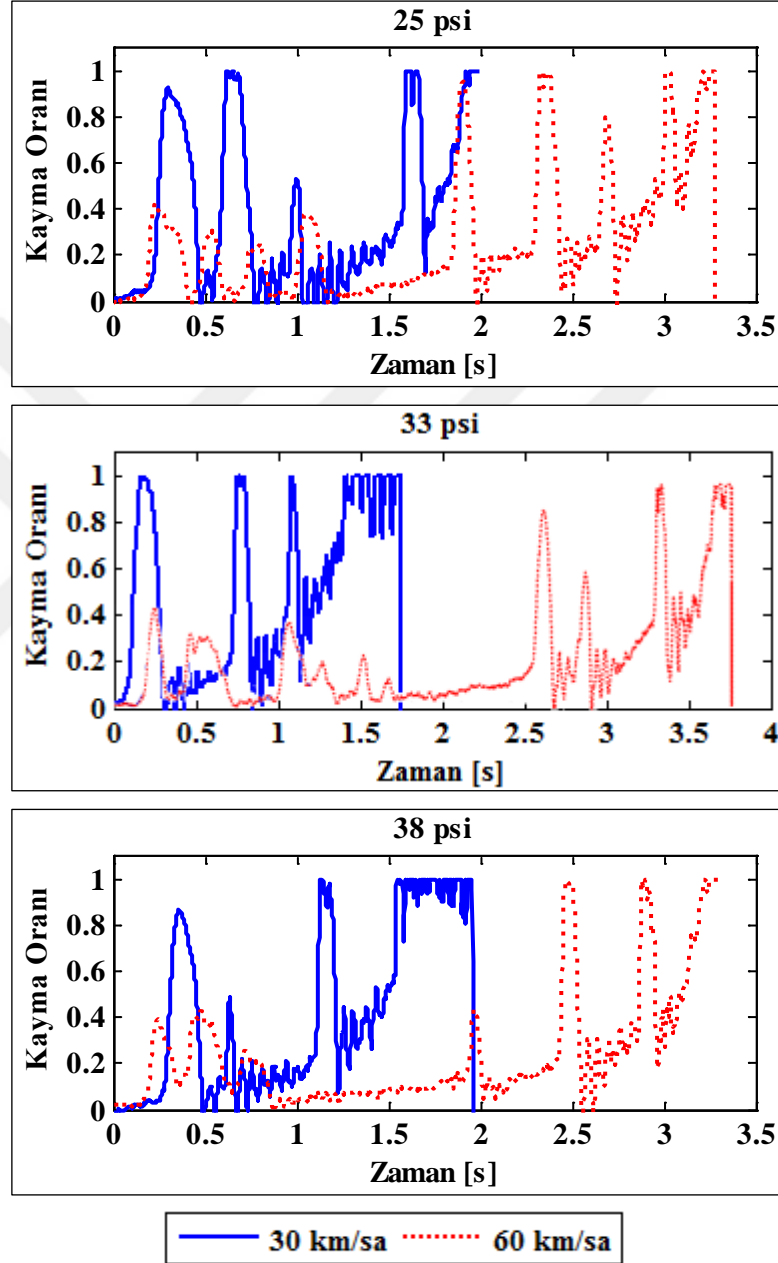
hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, tekerlek hız düşüş şiddetinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.28. Kaygan-İslak yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları

Taşıt hızı ve lastik basıncına göre kayma oranı değişim sonuçları Şekil 3.29'de verilmiştir. Şekil 3.29'a göre; düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hızlara göre; kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, Kaygan-İslak yol testlerinde, kaygan yol ile ıslak yol kayma oranı değerleri arasındaki farkın; 33 ve 38 psi lastik basıncı testlerine göre, 25

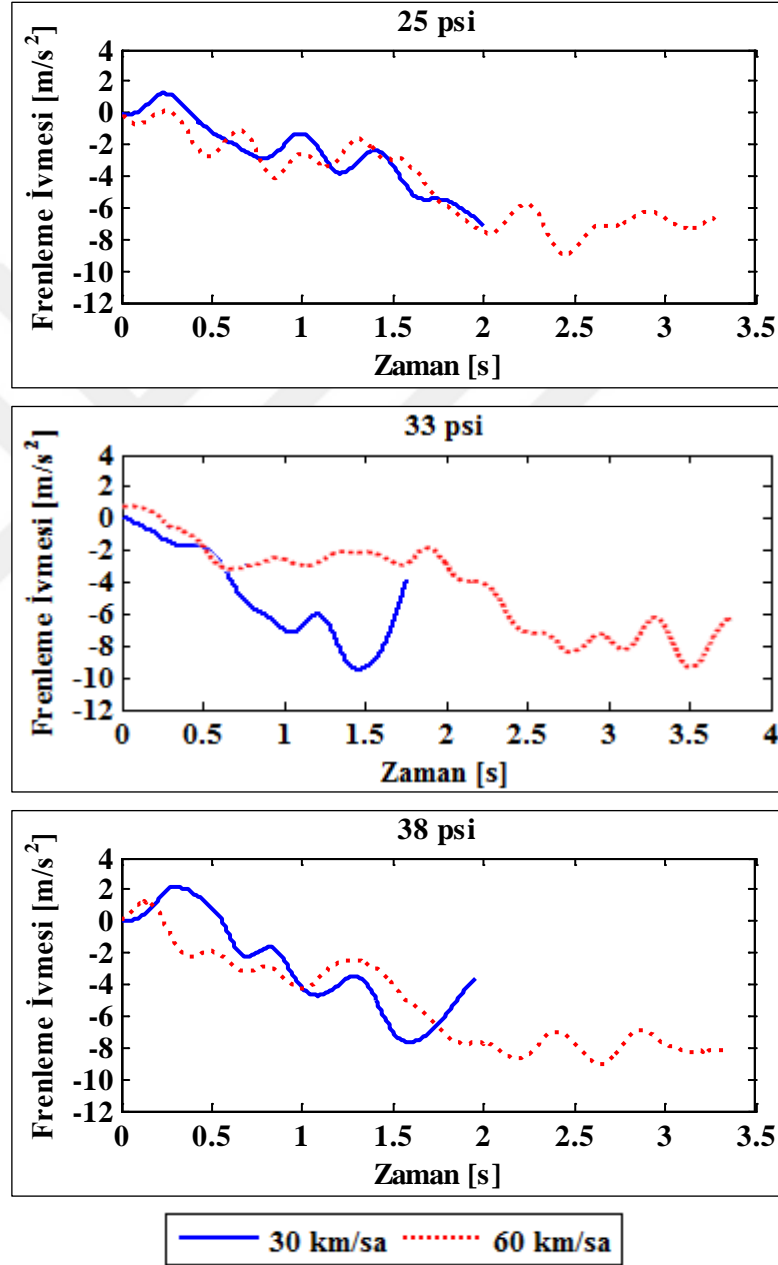
psi lastik basıncı testinde daha fazla olduğu görülmüştür. Yüksek hız testlerinde, yolun kaygan kısmında, kayma oranındaki değişimin diğer lastik basıncı testlerine göre, nominal lastik basıncı testinde yapılan frenlemelerde, daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 3.29. Kaygan-İslak yol için kayma oranı sonuçları

Düşük hızda yapılan frenlemede, ıslak yol kısmında frenlemenin sonuna doğru, lastik basıncı arttıkça, tekerleklerin daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Yüksek hızlarda, ıslak yol kısmında, 25 psi lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre, kayma oranının daha fazla kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. Şekil 3.27'de

fren basıncı şiddeti ve Şekil 3.28’de tekerlek hız düşüş şiddetinin, yüksek hızlarda yapılan frenlemlerde, 25 psi lastik basıncı testinde, 33 ve 38 psi lastik basıncı testine göre, daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yüksek hızlarda yapılan frenlemlerde, 25 psi lastik basıncı testinde, 33 ve 38 psi lastik basıncı testine göre kayma oranının daha yüksek değerlerde salındığı görülmüştür.

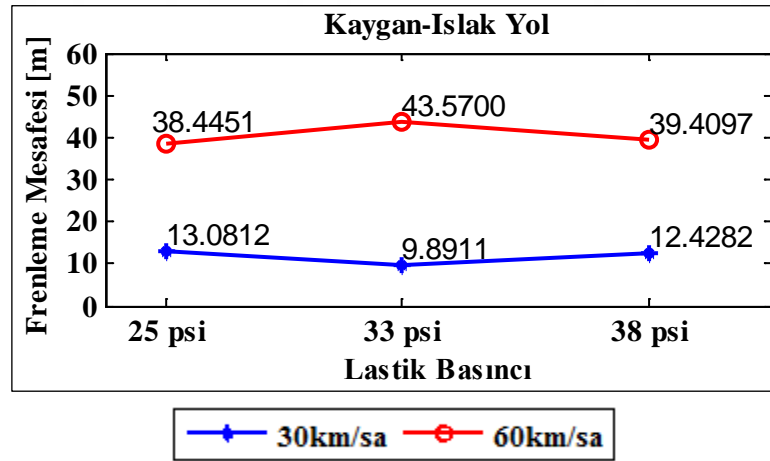


Şekil 3.30. Kaygan-İslak yol için frenleme ivmesi sonuçları

Kaygan-İslak yolda, taşıtın frenleme performansını değerlendirmek için; Şekil 3.30’da frenleme ivmesi incelenmiştir. 25 psi lastik basıncında düşük hızlarda yapılan frenlemlerde; diğer lastik basıncı testlerinde düşük hızlarda yapılan

frenlemelere göre, frenleme ivmesinin hem kaygan hem de ıslak yol kısmında, daha düşük değerlerde kaldığı görülmüştür. Kaygan yoldan ıslak yola geçiş testinde, yüksek hızda yapılan frenlemelerde, kaygan yol kısmındaki frenleme ivmesinin; 25 psi lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, daha düşük değerlerde kaldığı görülmüştür. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, yolun ıslak kısmındaki frenleme ivmesinin, tüm lastik basıncı testlerinde yapılan frenlemelerde benzer şiddette kaldığı görülmüştür.

Kaygan-ıslak yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Şekil 3.31’de verilmiştir. Şekil 3.31’e göre, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en uzun frenleme mesafesi 33 psi lastik basıncı testinde; en kısa frenleme mesafesi ise 25 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde ise, en uzun frenleme mesafesi 25 psi lastik basıncı testinde; en kısa frenleme mesafesi ise 33 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir. Buna göre, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, frenleme mesafesinde en çok artış 33 psi lastik basıncı testinde elde edilirken, en az artış 25 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir.



Şekil 3.31. Kaygan-ıslak yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları

Kaygan-ıslak yolda, düşük hızda yapılan testlerde, 25 psi, frenleme mesafesinin % 32,25 ve 38 psi % 25,65 artmasına neden olmuştur. Kaygan-ıslak yolda, yüksek hızda yapılan testlerde, 25 psi, frenleme mesafesinin % 11,76 ve 38 psi de % 9,55 azalmasını sağlamıştır. Böylece, ABS ile frenleme sırasında, kaygan yoldan ıslak yola düşük hızda geçildiğinde, lastik basıncındaki artış ve azalış frenleme

performansının kötüleşmesine neden olmuştur. Ancak, fren başlangıç hızı arttığında, lastik basıncındaki herhangi bir değişim, frenleme performansının dikkate değer bir şekilde iyileşmesini sağlamıştır. Bu, 33 psi'nin düşük hızlarda en iyi frenleme performansı sağlamasına karşın; yüksek hızlarda en kötüsüne neden olduğunu göstermektedir.

#### **3.4.4. Ayrık yol test sonuçları**

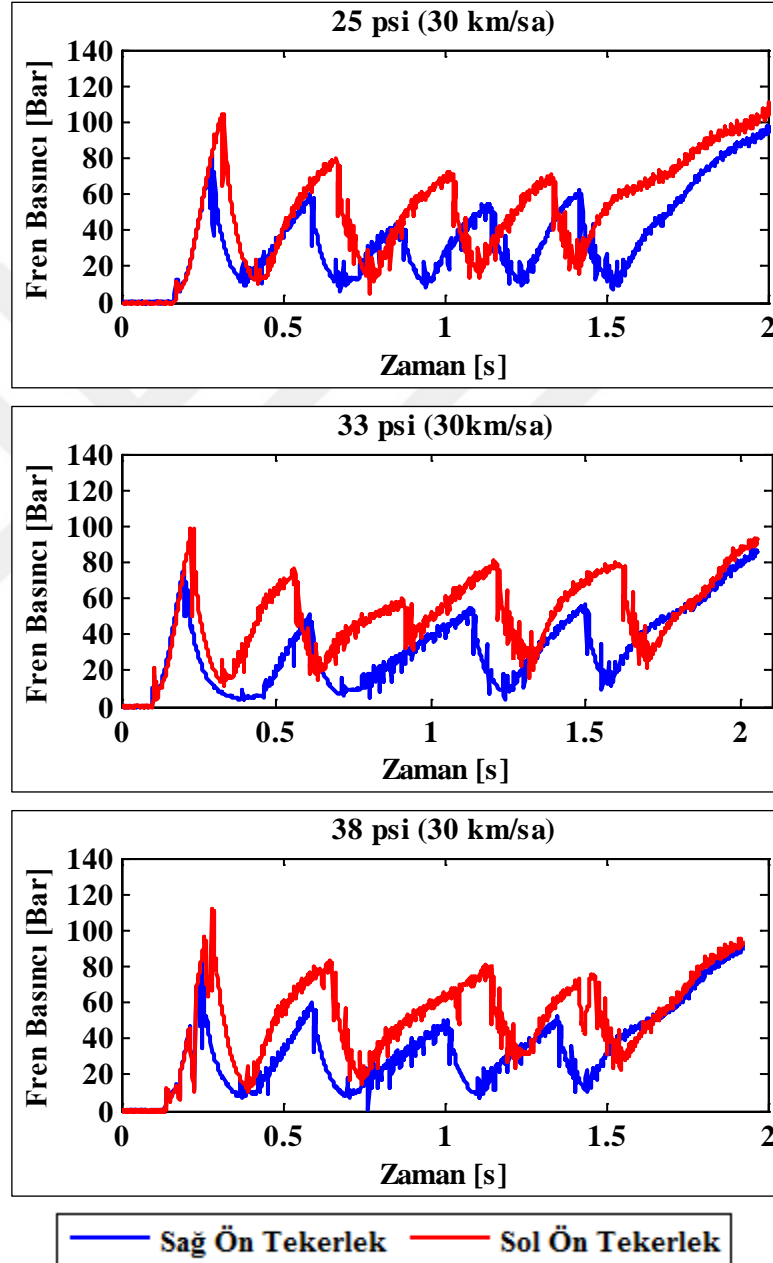
Tekerlek ve taşıt hızı sonuçlarının açık bir şekilde görülebildiği fren basıncı değişim sonuçları, ayrık yol için, Şekil 3.32 ve 3.33'te verilmiştir.

Düşük taşıt hızında, lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 3.32'e göre; tüm lastik basıncı testlerinde, fren basıncı şiddetinin ıslak yolda olan tekerleğin kaygan yolda tekerleğe göre daha fazla olduğu görülmüştür. Yolun kaygan kısmında olan tekerleğin, fren basıncındaki artışın yolun ıslak kısmında olan tekerleğe göre; 25 psi lastik basıncında daha kısa sürede, 33 psi lastik basıncında daha uzun sürede, 38 psi lastik basıncında benzer sürede gerçekleştiği görülmüştür. Bu, yolun kaygan kısmında olan tekerleğin, yolun ıslak kısmında olan tekerleğe göre, fren basıncı salınım sayısının 25 psi lastik basıncı testinde daha fazla, 33 psi lastik basıncı testinde daha az, 38 psi lastik basıncı testinde benzer olmasına neden olmuştur.

25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde, ıslak yol kısmında olan tekerlek için, nominal lastik basıncına göre, fren basıncı şiddetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Uygulanan bu yüksek fren basıncı nedeniyle, Şekil 3.34'te, ıslak yol kısmında olan tekerlek hız düşüş şiddetinin, 25 ve 38 psi lastik basıncında nominal lastik basıncına göre, daha fazla olduğu görülmektedir.

25 psi lastik basıncı testinde, diğer lastik basıncı testlerine göre; kaygan kısımda olan tekerleğe uygulanan fren basıncının salınım sayısının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu, 25 psi lastik basıncı testinde diğer lastik basıncı testlerine göre; kaygan kısımda olan tekerleğin fren basıncındaki artışın daha kısa sürede gerçekleştiğinin göstergesidir.

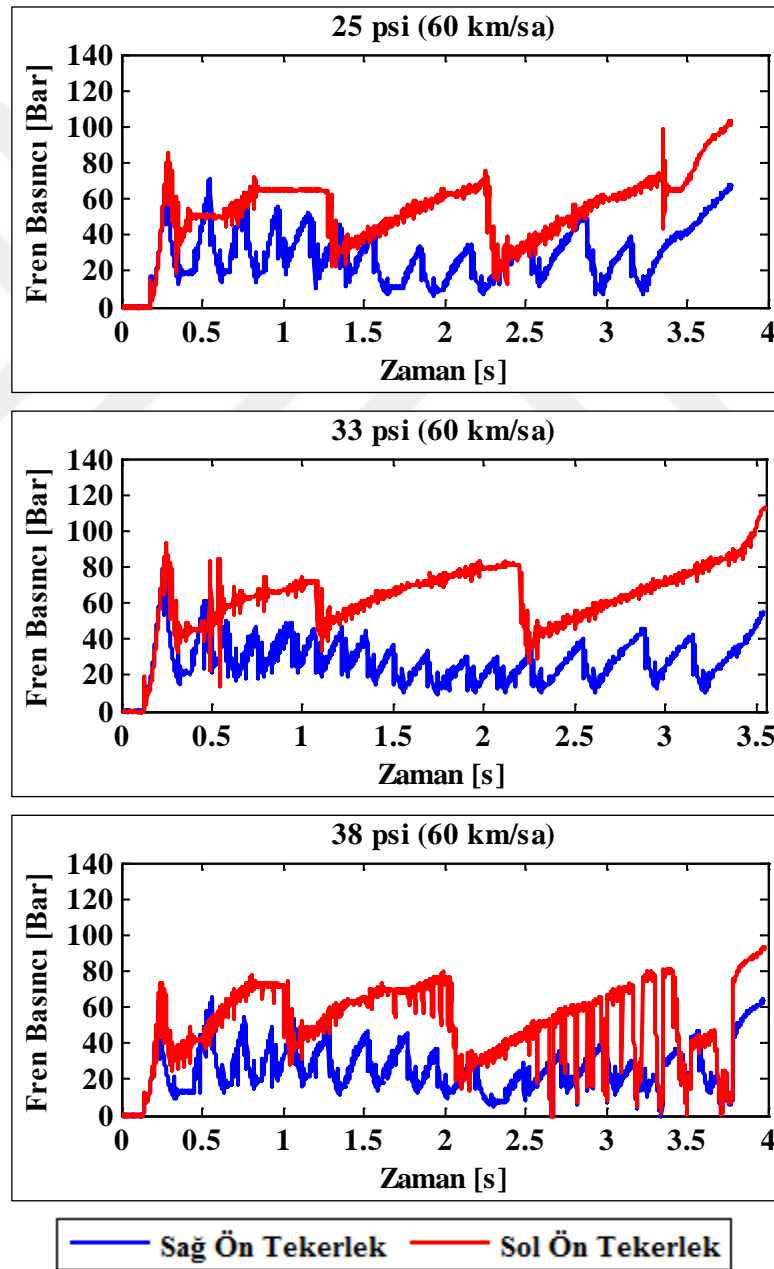
33 psi lastik basıncı testinde, diğer lastik basıncı testlerine göre; ıslak kısımda olan tekerleğe uygulanan fren basıncının salınım sayısının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu, 33 psi lastik basıncı testinde diğer lastik basıncı testlerine göre; ıslak kısımda olan tekerleğin fren basıncındaki artışın daha kısa sürede gerçekleştiğinin göstergesidir.



Şekil 3.32. Ayrık yol için 30 km/sa fren basıncı sonuçları

Yüksek taşıt hızında, lastik basıncına göre fren basıncı değişimlerinin verildiği Şekil 3.33'ya göre; tüm lastik basıncı testlerinde, ıslak yolda olan tekerleğin kaygan yolda tekerleğe göre, fren basıncı salınım sayısı daha az iken, fren basıncı şiddetinin daha

fazla olduğu görülmüştür. Yolun ıslak kısmında olan tekerleğin, fren basıncındaki artışın yolun kaygan kısmında olan tekerleğe göre; 25 ve 33 psi lastik basıncında daha uzun sürede, 38 psi lastik basıncında frenlemenin başında daha uzun frenlemenin sonunda daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür. Bu, yolun ıslak kısmında olan tekerleğin, yolun kaygan kısmında olan tekerleğe göre, fren basıncı salınım sayısının 25 ve 33 psi lastik basıncı testinde daha az, 38 psi lastik basıncı testinde frenlemenin başında daha az frenlemenin sonunda daha fazla olmasına neden olmuştur.



Şekil 3.33. Ayrık yol için 60 km/sa fren basıncı sonuçları

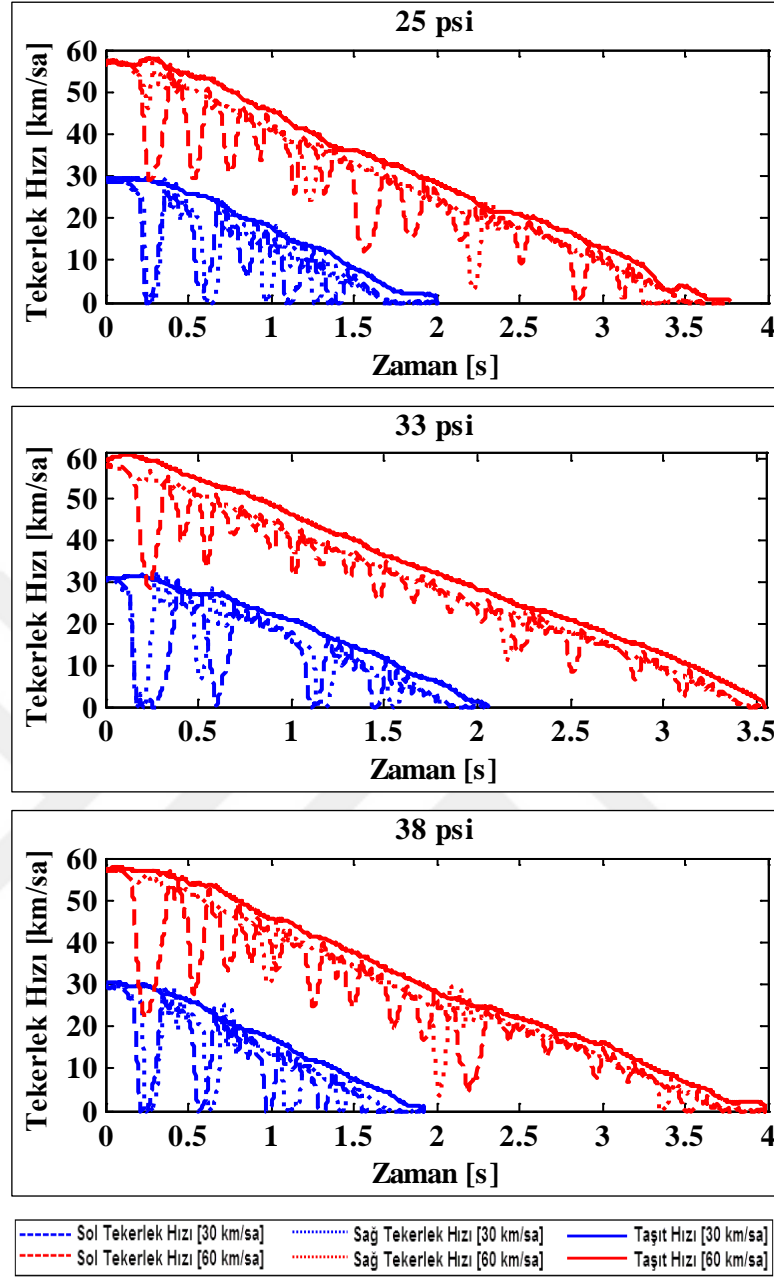
33 psi lastik basıncı testinde, diğer lastik basıncı testlerine göre; kaygan kısımda olan tekerleğe uygulanan fren basıncının salınım sayısının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu, kaygan yol kısmındaki olan tekerleğin 33 psi lastik basıncı testinde diğer lastik basıncı testlerine göre; fren basıncındaki artışın daha kısa sürede gerçekleştiğinin göstergesidir.

38 psi lastik basıncı testinde, diğer lastik basıncı testlerine göre; ıslak kısımda olan tekerleğe uygulanan fren basıncının salınım sayısının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu, ıslak yol kısmındaki olan tekerleğin 38 psi lastik basıncı testinde diğer lastik basıncı testlerine göre; fren basıncındaki artışın daha kısa sürede gerçekleştiğinin göstergesidir.

Ayrık yol için, tekerlek hızının taşıt hızına göre değişimi Şekil 3.34'te verilmiştir. Şekil 3.34'teki gibi, fren başlangıç anındaki taşıt hızı 30 km/sa olan düşük taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde, tekerleğin birçok kez kilitlendiği görülmüştür. Fren başlangıç anındaki taşıt hızı 60 km/sa olan yüksek taşıt hızında yapılan ABS fren testlerinde ise, tekerlek kilitlenmesinin daha az yaşandığı görülmüştür.

Tüm lastik basıncı testlerinde, düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, yüksek hıza göre tekerleğin daha fazla sayıda kilitlendiği; yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde ise tekerlek hız düşüş şiddetinin düşük hıza göre daha az olduğu görülmüştür. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, nominal lastik basıncında, diğer lastik basınçlarına göre, tekerlek hız düşüşlerinin azaldığı görülmüştür. Hem düşük hem de yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, 25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde, nominal lastik basıncı testine göre; tekerleğin daha uzun süre kilitlendiği görülmüştür.

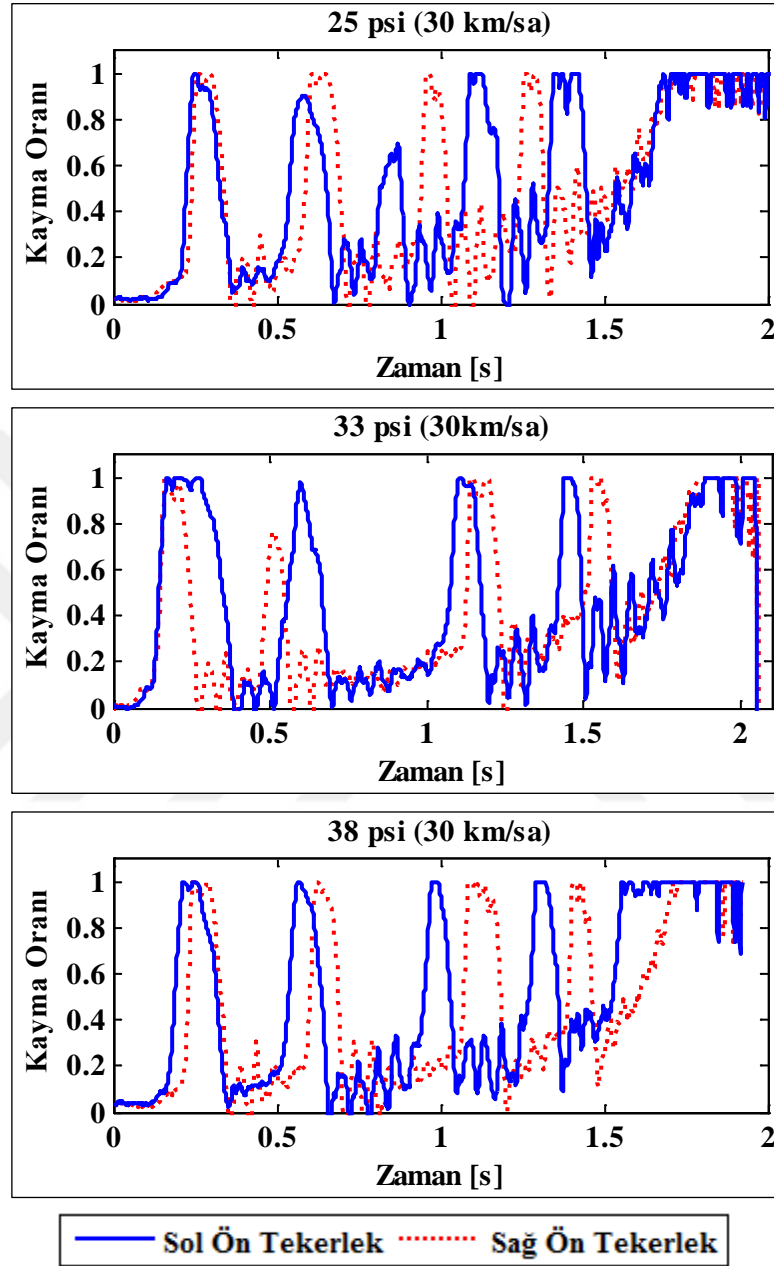




Şekil 3.34. Ayrık yol için tekerlek ve taşıt hızı sonuçları

Düşük taşıt hızında, lastik basıncına göre kayma oranı değişim sonuçları Şekil 3.35'te verilmiştir. Şekil 3.35'e göre; hem ıslak yol hem de kaygan kısmında olan tekerlek için, nominal lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre; kayma oranının daha az kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. Buna göre, hem ıslak yol hem de kaygan kısmında olan tekerlek için, nominal lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre, kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı görülmektedir. 25 psi lastik basıncı testlerinde, 33 ve 38 psi lastik basıncı testine göre, yolun ıslak

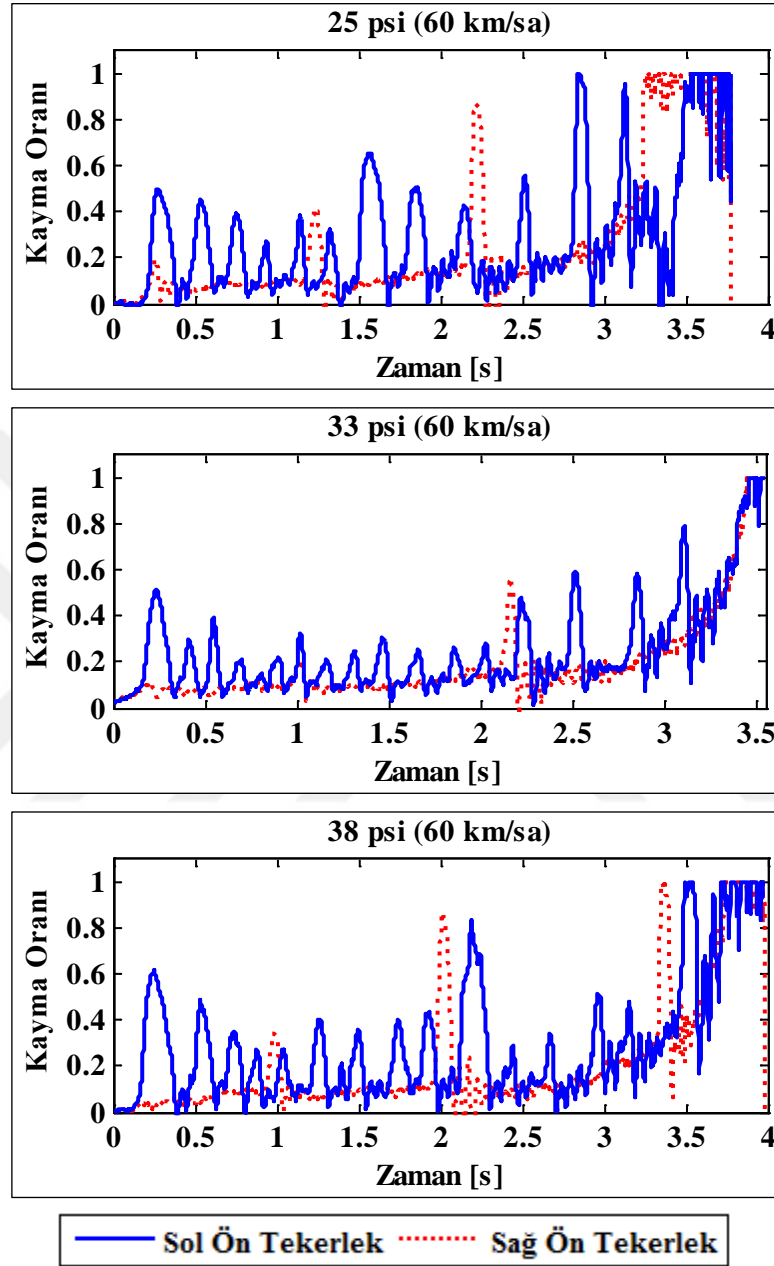
kısmında olan tekerleğin kayma oranındaki değişimin, daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 3.35. Ayrık yol için 30 km/sa kayma oranı sonuçları

Hem ıslak hem de kaygan kısımda olan tekerlek için; nominal lastik basıncında yapılan frenlemeye göre, 25 ve 38 psi lastik basıncında yapılan frenlemede, tekerleklerin daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Şekil 3.32’de fren basıncı şiddeti ve Şekil 3.34’te tekerlek hız düşüş şiddetinin, ıslak yol kısmında olan tekerlek için, 25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde nominal lastik basıncı testine göre, daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ıslak yol kısmında olan tekerlek için, 25 ve

38 psi lastik basıncı testlerinde nominal lastik basıncı testine göre, kayma oranının daha yüksek değerlerde salındığı görülmüştür.



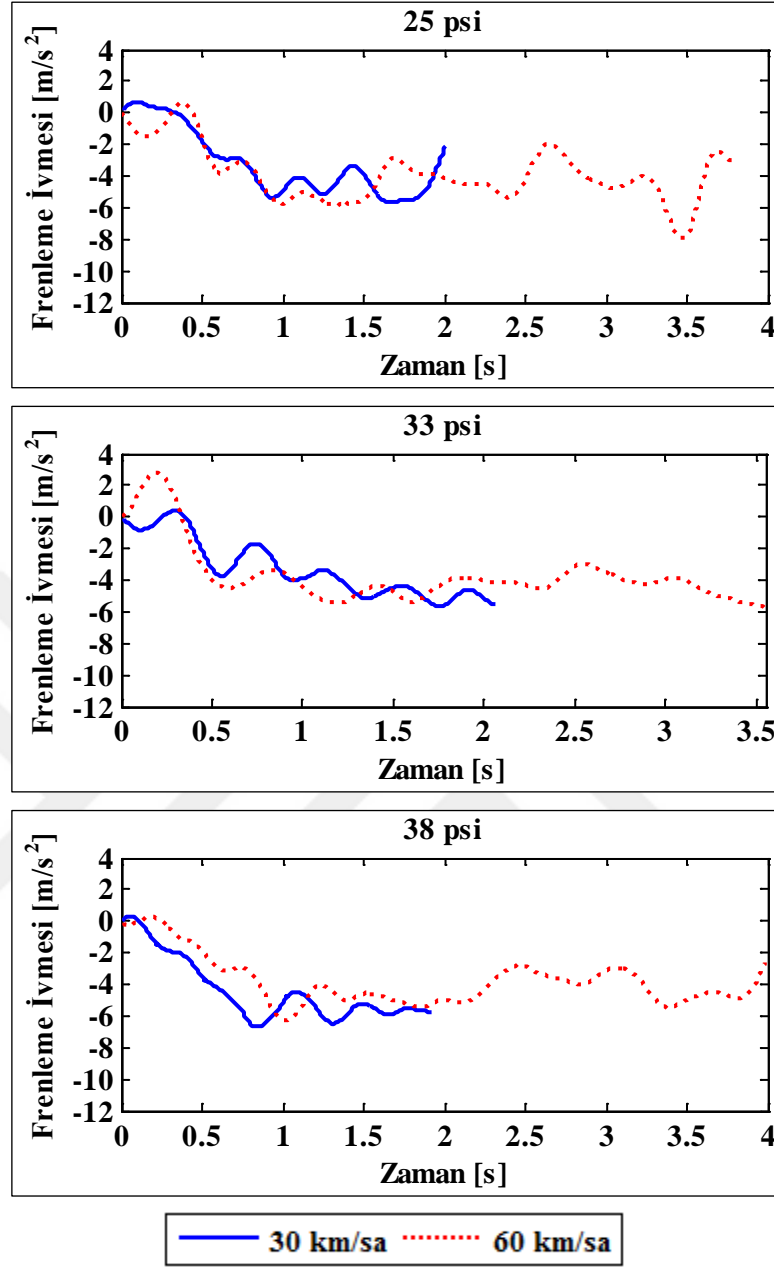
Şekil 3.36. Ayırık yol için 60 km/sa kayma oranı sonuçları

Yüksek taşıt hızında, lastik basıncına göre kayma oranı değişim sonuçları Şekil 3.36'da verilmiştir. Şekil 3.36'ya göre; hem ıslak yol hem de kaygan kısmında olan tekerlek için, nominal lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre; kayma oranının daha az kilitlenme sınırına yaklaştığı görülmüştür. Buna göre, hem ıslak yol hem de kaygan kısmında olan tekerlek için, nominal lastik basıncında diğer lastik basınçlarına göre, kayma oranının daha düşük değerlerde salındığı görülmektedir. 33

psi lastik basıncı testlerinde, 25 ve 38 psi lastik basıncı testine göre, yolun ıslak kısmında olan tekerleğin kayma oranındaki değişimin, daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.

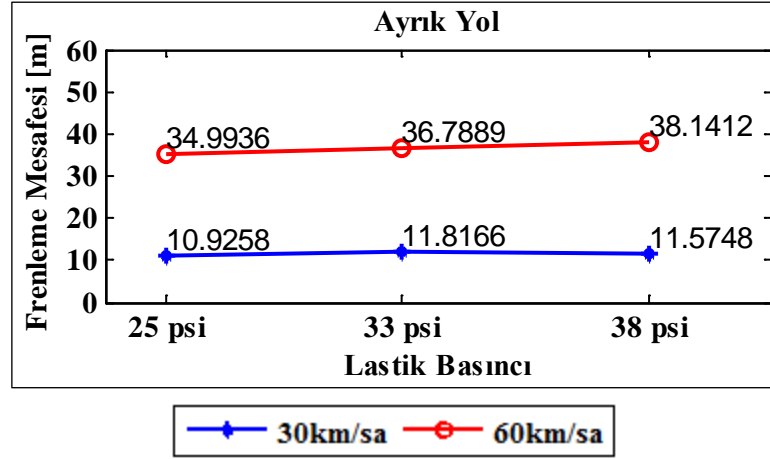
Hem ıslak hem de kaygan kısımda olan tekerlek için; nominal lastik basıncında yapılan frenlemeye göre, 25 ve 38 psi lastik basıncında yapılan frenlemede, tekerleklerin daha uzun süre kilitli kaldığı görülmüştür. Şekil 3.33'te fren basıncı şiddeti ve Şekil 3.34'te tekerlek hız düşüş şiddetinin, ıslak yol kısmında olan tekerlek için, 25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde nominal lastik basıncı testine göre, daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ıslak yol kısmında olan tekerlek için, 25 ve 38 psi lastik basıncı testlerinde nominal lastik basıncı testine göre, kayma oranının daha yüksek değerlerde salındığı görülmüştür.

Ayrık yolda, taşıtın frenleme performansını değerlendirmek için; Şekil 3.37'de frenleme ivmesi incelenmiştir. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde; 38 psi lastik basıncı testlerinde, diğer lastik basınçlarında yapılan frenlemelere göre, frenleme ivmesinin daha yüksek değerlerde kaldığı görülmüştür. 25 psi lastik basıncı testinde, yüksek hızda yapılan frenlemelerde, frenleme ivmesinin özellikle frenlemenin sonuna doğru artışa geçtiği görülmüştür. Tüm lastik basıncı testlerinde, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, frenleme ivmesinin benzer şiddette kaldığı görülmüştür. 33 psi lastik basıncı testinde, düşük hızda yapılan frenlemede, frenleme ivmesindeki artışın yavaşlayıp, salınımlı hale geldiği görülmüştür.



Şekil 3.37. Ayrık yol için frenleme ivmesi sonuçları

Ayrık yol için, lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi değişimi Şekil 3.38’de verilmiştir. Şekil 3.38’e göre, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, en uzun frenleme mesafesi 38 psi lastik basıncı testinde; en kısa frenleme mesafesi ise 25 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir. Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde, 33 ve 38 psi lastik basıncı testinde elde edilen frenleme mesafeleri ise birbirine oldukça yakındır. Yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre, frenleme mesafesinde en çok artış 38 psi lastik basıncı testinde elde edilirken, en az artış 25 psi lastik basıncı testinde elde edilmiştir.



Şekil 3.38. Ayrık yol için lastik basıncına bağlı frenleme mesafesi sonuçları

Ayrık yolda, düşük hızda yapılan testlerde; 25 psi frenleme mesafesinin % 7,54 ve 38 psi de frenleme mesafesinin % 2,05 azalmasını sağlamıştır. Ayrık yolda, yüksek hızda yapılan testlerde; 25 psi, frenleme mesafesinin, % 4,88 azalmasını sağlarken; 38 psi, frenleme mesafesinin % 3,67 artmasına neden olmuştur. Böylece, ABS ile ayrık yolda yapılan frenlemede, lastik basıncındaki düşüş tüm hızlarda en iyi frenleme performansını sağlamıştır. Buna karşın, lastik basıncındaki artış, yüksek hızlarda en kötü frenleme performansına neden olmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken husus; ayrık yolda, 33 psi'nin düşük hızda frenleme performansını oldukça kötüleştirmesidir.

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, lastik basıncının ABS'nin kontrol ve frenleme performansına etkilerini belirlemek için hem simülasyon çalışması hem de deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda ABS'nin kontrol performansı değerlendirilirken, tekerlek hızı, taşıt hızı ve kayma oranı parametreleri ve frenleme performansı için de frenleme mesafeleri ve fren ivmeleri değerlendirilmiştir.

### 4.1. Simülasyon Çalışması Sonuçları

Simülasyon çalışmasında, MATLAB/Simulink'te ABS kontrol sistemi ile çeyrek taşıtın taşıt gövdesi ve tekerleğin fren dinamiği modellenmiştir. Bu modelde lastik basıncının ABS'nin kontrol ve frenleme performansına etkilerini yansıtması için lastik modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen lastik modeli kullanılarak MATLAB/Simulink'te 25, 33(nominal) ve 38 psi lastik basınçları ile kuru, ıslak ve kaygan yol ortamlarında ani fren senaryoları ile ABS modeli koşturulmuştur. Bu işlem 30 km/sa ve 60km/sa olmak üzere iki farklı fren başlangıç hızı için tekrarlanmıştır. Bu model ile yapılan benzetimlerden elde edilen sonuçlar, nominal lastik basıncı sonuçları ile karşılaştırılarak düşük ve yüksek lastik basıncının ABS performansına etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında kuru yolda, düşük ve yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, fren basıncındaki artışın en uzun 25 psi lastik basıncında, 33 psi ve 38 psi lastik basıncındaki fren basıncı artışının ise birbirine yakın sürede tamamlandığı görülmüştür. Kaygan yolda, fren basıncındaki artışın en uzun 25 psi ve 38 psi lastik basıncında, en kısa 33 psi lastik basıncında sürdüğü görülmüştür. Böylece, düşük ve yüksek hızlarda yapılan tüm benzetimlerde; nominal ve 38 psi lastik basıncında, fren basıncı artışları daha kısa sürmüştür ve maksimum fren basıncı değeri daha hızlı yakalanmıştır. 25 psi lastik basıncı ise, fren basıncı artışının daha uzun sürmesine neden olmuştur ve bu nedenle maksimum fren basıncına daha geç ulaşılmıştır. Bu farklı fren basıncı değişimlerinden dolayı tekerlek hızı ve taşıt hızı arasındaki uyum

da lastik basıncına göre farklılaşmıştır. Böylece, düşük ve yüksek hızlarda; kuru, ıslak ve kaygan yolda, nominal lastik basıncı, tekerlek ve taşıt hızı arasındaki farkı azaltmasından dolayı, tekerlek hızının taşıt hızından çok daha yavaş ayrılmasını sağladığı ve bunun sonucunda tekerleklerin kilitlenmesini önlemiştir. Buna karşın, nominal altı ve üstü lastik basınçları, tekerlek ve taşıt hızı arasındaki farkı arttırarak tekerlek hızının taşıt hızından çok daha hızlı ayrılmasına ve bunun sonucunda tekerleklerin kilitlenmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, simülasyon çalışmasında, düşük ve yüksek hızlarda; kuru, ıslak ve kaygan yol testlerinde, tekerlek ve taşıt hızı arasındaki dengenin, nominal lastik basıncı ile elde edilmesinin daha kolay olması sayesinde, kayma oranının daha düşük değerlerde salınım yapmasını sağlamaktadır. Buna karşın, nominal altı ve üstü lastik basınçları tekerlek ve taşıt hızı arasındaki dengenin daha zor elde edilmesi nedeniyle kayma oranının daha yüksek değerlerde salınım yapmasına neden olmuştur. Simülasyon çalışma sonuçları taşıt hızlarına göre değerlendirildiğinde ABS'nin özellikle düşük hızlarda hız düşüşüne bağlı olarak kötüleşmesi nedeniyle daha iyi performans göstermesi gerektiği ortaya çıkarılmıştır. Böylece, simülasyon çalışmaları, lastik basıncındaki artış ve azalışın ABS performansını etkilediğini ve bu etkilerin fren başlangıç hızı değişimi ile farklılaştığını ortaya koymuştur.

#### **4.2. Deneysel Çalışma Sonuçları**

Deneysel çalışmaların şartları, elde edilen simülasyon sonuçları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Böylece, belirlenen şartlar altında farklı yol tipi ve farklı fren başlangıç hızlarında ABS testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler, ıslak ve kaygan yol gibi yol geçişlerinin olmadığı deney şartlarını içermesinin yanında, kaygan yoldan ıslak yola veya ıslak yoldan kaygan yola geçişlerinin bulunduğu deney şartlarını da içermektedir. Bu deneyler 25, 33 ve 38 psi lastik basınçları ile 30km/sa ve 60 km/sa olmak üzere iki farklı fren başlangıç hızında tekrarlanmıştır. Bu şekilde; ABS yol testleri için, tasarlanan test sistemi, lastik basıncının ABS kontrol sisteminin fren performansına ve taşıtın frenleme performansına etkilerinin hem taşıt hızına hem yol tipi değişimlerine göre belirlenmesini sağlamıştır.

Deneysel çalışmada, düşük veya yüksek hızlarda; elde edilen iyi frenleme performansı, kısa süren fren basıncı artışları sayesinde tekerlek hızının taşıt hızından



çok daha yavaş ayrılması ve bunun sonucunda daha düşük değerlerde salınım yapan kayma ile sağlanmıştır. Buna karşın kötü frenleme performansına, daha uzun süren fren basıncı artışları ile taşıt hızından çok hızlı ve şiddetli bir şekilde ayrılan tekerlek hızı ve bunun sonucunda daha yüksek değerlerde salınım yapan kayma neden olmuştur. Böylece, deneysel çalışmada, uyguladığı fren basıncı ile tekerlek ve taşıt hızı arasındaki dengeyi daha kolay ve çabuk elde eden lastik basıncı, daha iyi kontrol ve frenleme performansı elde etmiştir. Buna karşın, uyguladığı fren basıncı ile tekerlek ve taşıt hızı arasındaki dengeyi daha zor ve yavaş elde edilmesine neden olan lastik basıncı daha kötü kontrol ve frenleme performansına neden olmuştur.

Bu performans farklılıklarının nedenlerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için; lastik-yol etkileşimine dayalı olarak, lastik basıncı ile farklı karaktere sahip olabilen lastiğin boylamsal kayma sertliği ve düşey sertliği ile açıklanabilmektedir. Bu parametrelerin lastik basıncı ile değişimi, literatür çalışması ile doğrulanmıştır.

Buna göre, boylamsal kayma sertliği lastik basıncının azalmasıyla, artmaktadır. Boylamsal kayma sertliğindeki artış ile maksimum tutunma daha düşük kayma değerlerinde yakalanmaktadır. Düşük kayma sayesinde, daha yüksek fren basıncı uygulanması sonucunda artan frenleme ivmesi daha kısa frenleme mesafesi sağlamaktadır. Lastik basıncındaki artış, kayma sertliğini azalttığı için maksimum tutunmanın daha yüksek kayma değerlerinde yakalanmasına neden olmaktadır. Yüksek olan kayma değeri, uygulanacak fren basıncı şiddetini azaltması sonucunda frenleme ivmesini düşürerek frenleme mesafesinin uzamasına neden olabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; fren başlangıç hızı arttığında, bu sonuçların farklılık göstermesidir. Böylece, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde; lastik basıncındaki azalma nedeniyle, tekerlek üzerindeki düşey yük daha fazla azaldığı için; boylamsal kayma sertliğindeki düşüş, nominal lastik basıncına göre, daha fazla olacaktır. Bunun sonucunda, azalan boylamsal kayma sertliği, maksimum tutunmaya ulaşabileceğimiz kayma değerini arttırmaktadır. Bu da, frenleme anında, daha düşük fren basıncı uygulanmasına ve bunun sonucunda, frenleme mesafesinin uzamasına neden olmaktadır. Buna karşın, lastik basıncındaki artış, tam tersi etki göstermektedir. Böylelikle, fren başlangıç hızındaki artış, düşük lastik basıncı ile kayma sertliğini azalttığı için; düşük hıza göre, daha düşük fren basıncı uygulanmasına neden olmaktadır. Buna karşın, yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde, artan lastik basıncı,

kayma sertliğini arttırması sayesinde; düşük hıza göre, daha yüksek fren basıncı uygulanmasını sağlamaktadır.

Düşük hızlarda yapılan frenlemelerde elde edilen kısa fren mesafesi, düşey sertlikteki azalma ile de elde edilmektedir. Çünkü, düşey sertlik azaldıkça, lastiğin yukarıya doğru olan düşey tepki kuvvetinin düşmesi sonucu lastik yola daha yüksek kuvvet ile basacağından uygulanan fren kuvveti de artacaktır. Bu artış ile daha yüksek frenleme ivmesi ve daha kısa frenleme mesafesi elde edilebilmektedir. Ama, lastik basıncındaki artış ile düşey lastik sertliğinin artması, lastiğin düşey tepki kuvvetini arttıracaktır. Bunun sonucunda da, lastik yola daha düşük kuvvet ile basacağından daha düşük fren kuvvetine neden olacak ve fren mesafesi uzayacaktır. Kayma sertliğinde olduğu gibi, düşey sertlikte de fren başlangıç hızındaki artış ile bu sonuçlar farklılık göstermektedir. Bunun en önemli nedeni; düşey lastik sertliğinin fren başlangıç hızı arttıkça daha da azalmasıdır. Böylece, düşük lastik basıncında yüksek hızın etkisi ile daha da azalan tepki kuvveti, lastiğin daha büyük bir yük ile yola basmasına neden olacaktır. Bu, uygulanan düşey yükün, tutunmaya etkilerinin, maksimum tutunma için gerekli olan düşey yüke göre, değişikliğe neden olabileceğini göstermektedir. Buna göre, uygulanan düşey yük, maksimum tutunmayı sağlayan düşey yükten daha fazla olduğunda, daha düşük fren basıncına neden olurken; daha az olduğunda ise, daha yüksek fren basıncı sağlar. Buna karşın, yüksek lastik basıncı ile daha da artan tepki kuvveti nedeniyle azalan düşey yük, tutunmayı azaltacağı için, uygulanacak fren basıncı daha fazla düşecektir. Bu, frenleme mesafesinin düşük hıza göre, daha da artmasına neden olacaktır.

Lastik parametreleri kullanılarak yapılan değerlendirmelerde, dikkat edilmesi gereken husus; kayma ve düşey sertliğin frenleme mesafesine etkilerinin farklı tutunmaya sahip yollarda farklılık göstermesidir. Bu nedenle, yapılan deneysel çalışmalarda; düşük, nominal ve yüksek lastik basınçları ile farklı yollarda en iyi veya en kötü kontrol ve frenleme performansı elde etmiştir. Kötü performans, elde edilen kayma sertliğinin veya düşey sertliğin, üzerinde fren yapılan yolun ihtiyaç duyduğundan daha düşük veya daha yüksek kalması ile ifade edilebilir. İyi performans ise, elde edilen kayma sertliğinin veya düşey sertliğinin, üzerinde fren yapılan yolun ihtiyaç duyduğu seviyede kalması ile ifade edilebilir.

Simülasyonlarda ve deneylerde, ortak yol koşulu olan kaygan yol çalışmalarında; düşük hızlarda fren basıncındaki artışın en kısa 33 psi lastik basıncında sürmesi, düşük hızlarda frenlemenin sonuna doğru kilitlenme eğiliminin 33 psi lastik basıncında daha az olması, yüksek hızlarda tekerlek hızı değişim frekansının 33 psi lastik basıncında daha fazla olması, yüksek hızlarda kayma oranı salınım şiddetinin 33 psi lastik basıncında daha fazla olması, buna göre yüksek hızlarda tekerlek hızının taşıt hızına yaklaşma eğiliminin 33 psi lastik basıncında daha fazla olması, düşük ve yüksek hızlarda en kısa frenleme mesafesinin 33 psi lastik basıncı ile elde edilmesi, düşük hızlarda yapılan frenlemelere göre yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde frenleme mesafesinde en az artışın 33 psi lastik basıncı en çok artışın 38 psi lastik basıncı testinde elde edilmesi gibi benzer sonuçlar görüldüğü için; simülasyon ve deneyler arasında uyum sağlanmıştır.

### **4.3. Öneriler**

Böylece, fren basıncının ve buna bağlı olarak tekerlek hızı ve kayma oranının lastik basıncına göre farklılık göstermesi; ABS'nin kayma oranı kontrolünde, lastik basıncının dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir. Farklı lastik basınçlarında, ABS performansının değişmesinin ana sebeplerinden biri; lastiğin kayma ve düşey sertliklerinin yol tipi ve fren başlangıç hızına göre farklılık göstermesi ve bunların fren basıncı değişim karakteristiğini etkilemesidir. Bu farklılıkların etkisinde yapılan simülasyon çalışmalarında geliştirilen lastik modeli; maksimum tutunmayı sağlayan kaymanın lastik basıncına göre değiştiğini göstermiştir. Bu; ABS'nin fren basıncını değiştirmek için, kullanacağı referans kayma değerinin, lastik basıncına göre ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Mevcut ABS algoritması; nominal lastik basıncına göre ayarlanmış olan eşik değerlere göre çalışmaktadır. Farklı lastik basınçlarında, sürekli aynı eşik değerler kullanıldığı için, ABS performansı kötüleşmektedir.

ABS fren sisteminin çalıştırılmak istenildiği aralık, optimum kayma etrafındaki bölgedir. Bu noktadan daha büyük çalışma aralıklarında, lastik kuvveti uygun şekilde kullanılmadığı için, performans kötüleşmektedir. Bu nedenle, ABS fren sisteminden daha yüksek oranda faydalanabilmek için, lastik basıncına göre eşik değerler ayarlanmalıdır. Böylece, frenleme mesafesi önemli ölçüde azaltılacak ve performans

iyileştirilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; ABS'nin lastik basıncına uygun referans kayma ile performansı iyileştirilirken; aynı etki, ABS'nin referans aldığı kayma değerine uygun lastik basıncının elde edilmesi ile de elde edilebilecektir. Bu işlem, günümüzde yavaş yavaş gündeme gelen basıncı değiştirilebilen ve adaptif ABS algoritmasına lastik bilgisi sağlayabilecek akıllı lastikler ile mümkün olabilecektir.

Lastik basıncının ABS performansı üzerindeki kötü etkilerinin azaltılmasının diğer bir yöntemi de; lastik mekanik davranışına göre, fren basıncı karakteristiğini değiştirebilen ABS kontrolörüdür. Bu, ABS kontrolöründe lastiğin dinamik olarak ayarlanabilen parametreler kullanmaktadır ve böylece lastik kuvvetini en yüksek oranda kullanarak ABS performansını iyileştirecektir. Sonuç olarak, frenleme mesafesi azalacaktır. Böyle bir kontrolörün işleyişi; uygun düzeltme faktörlerini belirlemek için lastik yapısı bilgisini kullanan adaptif Magic Formula modeline lastik basıncı girdisini gönderme şeklindedir. Sonra bu girdilere bağlı olarak, adaptif Magic Formula modelinin ürettiği katsayılar; eşik kayma oranı, sertlik faktörü ve maksimum tutunma değeri gibi lastik karakteristiği ile ilgili hesaplamalarda kullanılmaktadır.

## KAYNAKLAR

Adcox J., Ayalew B., Rhyne T., Cron S., Knauff M., Interaction of Anti-Lock Braking Systems with Tire Torsional Dynamics, *Tire Science and Technology*, 2011, **40**(3), 171-185.

Al-Mola M. H., Mailah M., Samin P. M., Muhaimin A. H., Abdullah M. Y., Performance Comparison between Sliding Mode Control and Active Force Control for A Nonlinear Anti-Lock Brake System, *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2014, **9**(1), 101-107

Altıparmak D., Koca A., Taşıtlarda Tekerlek Kilitlenmesi ve Kaymasının Frenleme mesafesi ve Kararlılığa Etkisi, *TEKNOLOJİ*, 2001, **1**(2), 47-58.

Anwar S., Anti-lock braking control of a hybrid brake-by-wire system, *IMEchE Part D: Journal of Automobile Engineering*, DOI: 10.1243/09544070D22704.

Bosch R. G., *Driving Safety Systems*, 2nd Edition, SAE, USA, 1999.

Carlson C. R. and Gerdes J. C., Nonlinear estimation of longitudinal tire slip under several driving conditions, *Proceedings of American Control Conference*, Colorado, USA, 4-6 June 2003.

Cheli F., Concas A., Giangiulio E., Sabbioni E., A simplified ABS numerical model : Comparison with HIL and Full Scale Experimental Tests, *Computers and Structures*, 2008, **86**, 1494-1502.

Cheli F., Sabbioni E., Sbroisi M., Brusarosco M., Melzi S., d'Alessandro V., Enhancement of ABS Performance through On-Board Estimation of the Tires Response by Means of Smart Tires, *SAE Technical Paper*, DOI:10.4271/2011-01-0991.

Cho W., Yoon J., Yim S., Koo B., Yi K., Estimation of Tire Forces for Application to Vehicle Stability Control, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(2), 638-649.

de Hoogh J., Implementing Inflation Pressure and Velocity Effects into The Magic Formula Tyre Model, *Eindhoven University of Technology*, DCT-2005.46, 2005.

Dousti M., Başlamışlı S. Ç., Önder T., Solmaz S., ABS Fren Dinamiğine Yönelik Çoklu Model Geçişli Kontrol Algoritmalarının Tasarımı, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.

Dousti M., Başlamışlı S. Ç., Çoklu Model Geçiş Tabanlı ABS Tasarımı 2. kısım Durum ve Parametre Tahmini, *OTEKON'14 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, Türkiye, 26-27 Mayıs 2014.

Eldoğan O., Taşıt Dinamiği Uygulamalarında Kullanılan Lastik Tekerlek Modelleri ve Taşıt Kaza Simülasyonlarında Kullanılmaları, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1995, **1**(1), 59-63.

Guo J., Jian X., Lin G., Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller, *Energies* 2014, DOI:10.3390/en7106459.

Hong D., Yoon P., Kang H. J., Hwang I., Huh K., Wheel Slip Control Systems Utilizing the Estimated Tire Force, *Proceedings of American Control Conference*, Minnesota, USA, 14-16 June 2006.

Hoseinnezhad R., Hadiashar A. B., Efficient Antilock Braking by Direct Maximization of Tire-Road Frictions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(8), 3593-3600.

Jaiswal M., Mavros G., Rahnejat H., King P. D., Influence of tyre transience on anti-lock braking, *IMechE Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, DOI: 10.1243/14644193JMBD225.

John S., Pedro J. O., Neural Network-Based Adaptive Feedback Linearization Control of Antilock Braking System, *International Journal of Artificial Intelligence*, 2013, **10**(S13), 21-40.

Kidney J., Mani N., Roth V., Turner J., Branca T., Experimental and Computational Studies of Contact Mechanics for Tire Longitudinal Response, *Proceedings of the 30th Tire Society Conference*, Ohio, USA, 14 September 2011.

Kiencke U., Nielsen L., *Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle*, 2nd Edition, Springer, Germany, 2005.

Li J., Yu F., Zhang J. W., Feng J. Z., Zhao H. P., The Rapid Development of A Vehicle Electronic Control System and Its Application to An Anti-Lock Braking System Based on Hardware-In-The-Loop Simulation, *IMechE – Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2002, **216**, 95-105.

Lin J. S., Ting W. E., Nonlinear Control Design of Anti-Lock Braking Systems With Assistance of Active Suspension, *IET Control Theory & Applications*, 2007, **1**(1), 343-348.

Marshek K. M., Cuderman J. F., Performance of Anti-Lock Braking System Equipped Passenger Vehicles-Part III: Braking as a Function of Tire Inflation Pressure, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/2002-01-0306.

Miller S. L., Youngberg B., Schweizer P., Gerdes J. C., Calculating Longitudinal Wheel slip and Tire Parameters Using GPS Velocity, *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, USA, 25-27 June 2001.

op het Veld I. B. A., Enhancing the MF-Swift Tyre Model for Inflation Pressure Changes, Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, TNO Institute, Eindhoven, The Netherlands, 2007.

Pacejka H. B., *Tire and Vehicle Dynamics*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.

Patel N., Edwards C., Spurgeon S. K., Optimal Braking and Estimation of Tyre Friction in Automotive Vehicles Using Sliding Modes, *IEEE International Journal of Systems Science*, 2007, **38**(11), 901-912.

Precup R. E., Preitl S., Balas M., Balas V., Fuzzy controllers for tire slip control in anti-lock braking systems, *IEEE*, DOI: 10.1109/FUZZY.2004.1375359.

Rievaj V., Vrabel J., Hudak A., Tire Inflation Pressure Influence on a Vehicle Stopping Distances, *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, **2**(2), 9-13.

Savitski D., Hoepping K., Ivanov V., Augsburg K., Influence of the Tire Inflation Pressure Variation on Braking Efficiency and Driving Comfort of Full Electric Vehicle with Continuous Anti-Lock Braking System, *SAE International Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems*, 2015, **8**(2), 460-467.

Schwarz R., Nelles O., Scheerer P., Iserman R., Increasing Signal Accuracy Of Automobile Wheel Speed Sensors By On-Line Learning, *Proceedings Of the American Control Conference*, New Mexico, ABD, 4-6 June 1997.

Schmeitz A. J. C., Besselink I. J. M., de Hoogh J., Nijmeijer H., Extending the Magic Formula and SWIFT tyre models for inflation pressure changes, *VDI (Verein Deutscher Ingenieure)-Berichte*, 2005, **1912**, 201-225.

Seyedgoosheh A., LPV-Based Global Chassis Control Using Force Vectoring- An Approach To Local Tire-Force Controller Design for Anti-Lock Braking Operation, Master's Thesis, Delft University of Technology, Dutch Institute of Systems and Control, Delft, Netherland, 2010.

Singh K., Sivaramakrishnan S., An Adaptive Tire Model for Enhanced Vehicle Control Systems, *SAE International Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems*, DOI:10.4271/2015-01-1521.

Sivaramakrishnan S., Singh K. B., Lee P., Experimental Investigation of the Influence of Tire Design Parameters on Anti-lock Braking System (ABS) Performance, *SAE International Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems*, DOI:10.4271/2015-01-1511.

Sivaramakrishnan S., Singh K. B., Lee P., Influence of Tire Operating Conditions on ABS Performance, *Tire Science and Technology TSTCA*, 2015, **43**(3), 216-241.

Solyom S., Rantzer A., Lüdemann J., Synthesis of a Model-Based Tire Slip Controller, *Vehicle System Dynamics*, 2004, **41**(6), 475-499.

Tanelli M., Savaresi S. M., Cantoni C., Longitudinal Vehicle Speed Estimation for Traction and Braking Control Systems, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, 4-6 October 2006.

Unbehauen H. D., *Control Systems, Robotics and Automation-Volume XX: Industrial Applications of Control Systems III*, EOLSS Publishers, Oxford, 2009.

van Zyl S., van Goethem S., Kanarachos S., Rexels M., Hausberger S., Smokers R., Study on Tyre Pressure Monitoring Systems (TPMS) as a means to reduce Light-Commercial and Heavy-Duty Vehicles fuel consumption and CO2 emissions, *TNO*, TNO-060-DTM-2013-02025, 2013.

Varghese A., Influence of Tyre Inflation Pressure on Fuel Consumption, Vehicle Handling and Ride Quality, Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Chalmers Institute, Göteborg, Sweden, 2013.

Wang J., Song C., Jin L., *State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation*, Jilin University Changchun, China, 2008.

Weida W., Nenggen D., Xiangyang D., An Improved Self-Adaptive of Vehicle Reference Speeds for ABS, *IEEE*, DOI: 10.1109/ICVES.2006.371562.

Xin Z., Yuanyuan L., Xiufang Y., Study of control logic for Automobile Anti-Lock Braking System, *IEEE*, DOI: 10.1109/ICICTA.2008.476.

Zegelaar P. W. A., *The dynamic response of tyres to brake torque variations and road unevennesses*, Delft, Netherlands, 1998.

Zhang W., Guo X., Wang B., Research of VC Based Simulation Test System for Automotive ABS, *TELKOMNIKA*, 2013, **11**(1), 237-244.





## Ek-A

Aşağıda lastik basıncı değişimine bağlı olan modelin lastik parametreleri verilmiştir;

$p_i=25$ ; % tyre inflation pressure.

$p_{io}=33$ ; % nominal tyre inflation pressure.

$dp_i=(p_i-p_{io})/(p_{io})$ ; % inflation pressure increment.

$qFz_1=13.37$ ; % fit parameter in Magic Formula.

$qFz_2=15.4$ ; % fit parameter in Magic Formula.

$pFz_1=0.8$ ; % the parameter which is include the effect of a changing tyre inflation pressure on the tyre vertical stiffness.

$r_0=0.31595$ ; % free unloaded tyre radius.

$r_l=0.293$ ; % loaded tyre radius.

$R_{oz}=r_0-r_l$ ; % vertical deflection of tyre.

$R_{o0}=0.31595-0.296$ ; % vertical deflection at (nominal pressure).

$Fz_0=415*9.81$ ; % nominal vertical load.

$CFz_0=(Fz_0/r_0)*(qFz_1+2*qFz_2*R_{o0}/r_0)$ ; % the vertical stiffness at the nominal vertical load.

$CFz=CFz_0*(1+pFz_1*dp_i)$ ; % the vertical stiffness.

$Fz=CFz*R_{oz}$ ; % normal tyre load.

$dfz=(Fz-Fz_0)/Fz_0$ ; % vertical load increment.

$pVx_1=0$ ; % Magic Formula parameter.

$pVx_2=0$ ; % Magic Formula parameter.

$\lambda_{Vx}=1$ ; % vertical shift scaling factor.

lamdaMux=1; % peak friction scaling factor.

lamdaMuxussu=10\*lamdaMux/(1+9\*lamdaMux); % degressive friction factor.

Svx=Fz\*(pVx1+pVx2\*dfz)\*lamdaVx\*lamdaMuxussu; % vertical shift.

pHx1=-0.002; % Magic Formula parameter.

pHx2=0.002; % Magic Formula parameter.

lamdaHx=0; % horizontal shift scaling factor.

SHx=(pHx1+pHx2\*dfz)\*lamdaHx; % horizontal shift.

K=0:0.001:1; % longitudinal slip.

Kx=K+SHx;

pEx1=0.854; % Magic Formula parameter.

pEx2=0.0935; % Magic Formula parameter.

pEx3=-0.02; % Magic Formula parameter.

pEx4=0; % Magic Formula parameter.

lamdaEx=1; % curvature scaling factor.

Ex=(pEx1+pEx2\*dfz+pEx3\*(dfz^2))\*(1-pEx4\*sign(Kx))\*lamdaEx; % curvature factor.

pKx1=131.51; % Magic Formula parameter.

pKx2=-0.163; % Magic Formula parameter.

pKx3=-0.245; % Magic Formula parameter.

pPx1=-0.349; % Magic Formula parameter.

pPx2=0.378; % Magic Formula parameter.

lamdaK<sub>xk</sub>=1; % brake slip stiffness scaling factor.

$K_{xk} = F_z * (p_{Kx1} + p_{Kx2} * dfz) * (\exp(p_{Kx3} * dfz)) * (1 + p_{Px1} * dpi + p_{Px2} * (dpi^2)) * lamda$   
K<sub>xk</sub>; % longitudinal slip stiffness.

pC<sub>x1</sub>=1.685; % Magic Formula parameter.

C<sub>x</sub>=pC<sub>x1</sub>; % shape factor.

pP<sub>x3</sub>=-0.096; % Magic Formula parameter.

pP<sub>x4</sub>=0.065; % Magic Formula parameter.

pD<sub>x1</sub>=6.09; % Magic Formula parameter.

pD<sub>x2</sub>=-0.037; % Magic Formula parameter.

$M_{ux} = (p_{Dx1} + p_{Dx2} * dfz) * (1 + p_{Px3} * dpi + p_{Px4} * (dpi^2));$  % longitudinal friction coefficient.

D<sub>x</sub>=M<sub>ux</sub>\*F<sub>z</sub>; % D<sub>x</sub> describes the peak value of the force or moment.

epsilon<sub>x</sub>=0.1;

B<sub>x</sub>=K<sub>xk</sub>/(C<sub>x</sub>\*D<sub>x</sub>+epsilon<sub>x</sub>); % stiffness factor.

$F_x = D_x * \sin(C_x * \text{atan}(B_x * K_x - E_x * (B_x * K_x - \text{atan}(B_x * K_x)))) + S_{vx};$  % longitudinal force.

Mu=F<sub>x</sub>/F<sub>z</sub>; % friction coefficient.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Köylü H., **Tural E.**, ABS ile Frenleme Anında Referans Kayma Oranının Lastik Basıncına Göre Değişiminin Frenleme Performansına Etkilerinin Analizi, *IMSEC 2016 1. Uluslararası Akdeniz Bilim ve Mühendislik Kongresi*, Adana, Türkiye, 26-28 Ekim 2016.

Köylü H., **Tural E.**, Kritik Yol Şartlarında ABS'nin Kontrol Frenleme ve Fren Kararlılığı Performansını Belirleyecek Test Sisteminin Geliştirilmesi ve Test Edilmesi, *OTEKON 2016 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, Türkiye, 23-24 Mayıs 2016.

Köylü H., **Tural E.**, Kritik Yol Şartlarında Lastik Basıncı Değişimlerinin ABS Performansına Etkilerinin Deneysel Analizi, *ISITES 2016 4. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, 3-5 Kasım 2016.

Köylü H., **Tural E.**, Sabit Fren Test Sistemlerinde İleri Fren Hatalarını Belirleyebilecek Bir Arayüzün Geliştirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (PAJES)*, 2016, **22**(4), 267-279.

## ÖZGEÇMİŞ

Ersin Tural 1990 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 2008 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında mezun oldu. 2013-2014 öğretim yılı başında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2014 yılı Şubat ayından beri Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

