

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKERLEK YOL SÜRTÜNME KATSAYISI İÇİN GÖZETLEYİCİ
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektronik Müh. Mümin AKTAŞ**

Anabilim Dalı : Mekatronik Mühendisliği

Programı : Mekatronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Levent GÜVENÇ

KASIM 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKERLEK YOL SÜRTÜNME KATSAYISI İÇİN GÖZETLEYİCİ
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektronik Müh. Mümin AKTAŞ**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Kasım 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Kasım 2008

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Levent GÜVENÇ (İTÜ)
Tez Eş Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Tankut ACARMAN (GSÜ)
Diğer Juri Üyeleri : Doç. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Erdiñ ALTUĞ (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Gökhan İNALHAN(İTÜ)**

Kasım 2008

ÖNSÖZ

Son zamanlarda gerçekleştirilen araç dinamiği kontrol çalışmalarında sanal algılayıcı olarak isimlendirilen, durum kestirimcilerinin kullanımı artış göstermiştir. Araç dinamiği kontrolcülerinde kullanılan durum kestirimcileri, gerçek araçlara uygulanması mümkün olmayan algılayıcıların yerine ve ölçmenin zor olduğu durumları algılayabilmek için kullanılmaktadır. Tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısını sağlıklı şekilde ölçebilen algılayıcılar mevcut değildir. Tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısı kilitlemeye karşı fren sistemleri (ABS), elektronik kararlılık sistemleri (ESP), çekiş kontrol sistemleri (TCS) ve adaptif seyir sistemleri (ACC) gibi aktif güvenlik sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada tekerlek-yol arasındaki sürtünme katsayısı, boyuna tekerlek kayma oranı tabanlı bir kestirimci geliştirilerek gözlemlenmiştir. Tekerlek yol sürtünme katsayısı için tasarlanan kestirimcinin etkinliği değişik yol koşullarında çeşitli sürüş senaryoları ile sınanarak gösterilmiştir.

Tecrübeleri ve bilgileri ile çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Levent GÜVENÇ ve Yrd. Doç.Dr Tankut ACARMAN'a, BİDEB 2228 Son Sınıf Lisans Öğrencileri için Yurtiçi Yüksek Lisans Programı ile bana destek veren TÜBİTAK'a, Uyanık isimli deneysel aracın model parametrelerinin elde edilmesine bana yardımcı olan Erkin DİNÇMEN'e ve çalışmam boyunca bana her türlü desteği veren tüm MEKAR çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım ve tez çalışmam boyunca bana her türlü desteği, hoşgörüyü ve anlayışı gösteren aileme minnetlerimi sunarım.

Hayatımın ışığına, Arzum'a sevgilerimle...

Kasım 2008

Mümin AKTAŞ
Elektronik Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÇİZELGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	xi
1.GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı.....	3
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1 Tekerlek-Yol Sürtünme Katsayısı	4
2.2.Tekerlek-Yol Sürtünme Katsayısı Kestirimi Genel Bakış	5
2.2.1 Nedensel tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri	5
2.2.1 Sonuç tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri	7
3. ARAÇ VE TEKERLEK MODELLERİ	14
3.1 Giriş.....	14
3.2Çift İzli Araç Modeli	14
3.3.3 Pajacka tekerlek modeli	19
3.3.4 Dugoff tekerlek modeli	21
4. KALMAN SÜZGEÇİ	24
4.1 Giriş.....	24
4.2 Kestirimin Temelleri	24
4.3 Kalman Süzgecinin Tanıtımı.....	25
4.4 Genişletilmiş Kalman Süzgeci	29
5. TEKERLEK YOL SÜRTÜNME KATSAYISI KESTİRİMİ.....	32
5.1 Giriş.....	32
5.2 Tekerlek Boyuna Sürtünme Kuvvetlerinin Kestirilmesi.....	34
5.2.1. Çift izli araç modeli.....	35
5.2.2. Araç durumlarının ve tekerlek kuvvetlerinin kestirimi	37
5.3 Tekerlek Dikey Kuvvetlerinin Hesaplanması	40
5.4 Tekerlek Kayma Açısının ve Tekerlek Kayma Değerinin Kestirilmesi.....	41
5.5 Normal Çekiş Kuvveti – Tekerlek Kayma Değeri Eğiminin Kestirilmesi.....	42
5.5.1 Giriş.....	42
5.5.1.Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi	43
6 BENZETİM ÇALIŞMALARI	46
6.1 Giriş.....	46
6.2 Deneysel Araç ve Oluşturulan Araç Modeli	46
6.3 Çeşitli Manevralar ile Tekerlek Yol Sürtünme Katsayısının Kestirilmesi.....	50
7 SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	55
KAYNAKLAR	56
EKLER.....	59

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 Araç modeli oluşturulurken kullanılan araç parametreleri.....50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1:	Tekerlek üzerinde etkili olan kuvvetler.....	4
Şekil 2.2:	Tekerlek-yol Sürtünme katsayısı kestiriminde kullanılan yöntemler [5]	6
Şekil 2.3:	Tekerlek-yol sürtünme katsayısı ile kayma oranı arasındaki ilişki.....	9
Şekil 3.1:	Çift izli araç modeli	15
Şekil 3.2:	Tekerlek kuvvetleri ve momentleri [16]	17
Şekil 3.3:	Boyuna tekerlek kuvvetinin tekerlek kayma değerine göre değişimi.....	17
Şekil 3.4:	Yanal tekerlek kuvvetinin tekerlek kayma açısı ile değişimi.....	18
Şekil 3.5:	Değişik yol koşulları için boyuna tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma değeri ile değişimi.....	20
Şekil 3.6:	Değişik yol koşulları için yanal tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma açısı ile değişimi.....	22
Şekil 3.7:	Boyuna ve yanal tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma oranına göre değişimi.....	23
Şekil 3.8:	Boyuna ve yanal tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma açısına göre değişimi.....	23
Şekil 4.1:	Kestirim algoritmaları türleri [18].....	24
Şekil 4.2:	Tipik Kalman süzgeci yapısı.....	25
Şekil 4.3:	Durum kestirimlerinin ve hata kovaryanslarının zaman çizelgesindeki görünümü.....	27
Şekil 4.4:	Kalman süzgeci algoritması.....	28
Şekil 4.5:	Kalman süzgecinin yapısı.....	29
Şekil 4.6:	Genişletilmiş Kalman Süzgeci Algoritması.....	31
Şekil 5.1:	Normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti – kayma değişimi.....	33
Şekil 5.2:	Tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirim süreci.....	34
Şekil 5.3:	Çift İzli Araç Modeli	36
Şekil 5.4:	Genişletilmiş Kalman süzgeci ile tekerlek kuvvetlerinin ve araç durumlarının kestirilmesine ait blok diyagram.....	39
Şekil 5.5:	Farklı yol koşulları için normal tekerlek çekiş kuvveti tekerlek kayma değeri değişimi.....	43
Şekil 6.1:	UYANIK isimli deneysel araç ve veri toplama üniteleri.....	47
Şekil 6.2:	Gerçek araç direksiyon verisi	48
Şekil 6.3:	Gerçek araç hız verisi ile araç modeli hız verisi	49
Şekil 6.4:	Gerçek araç boyuna ivme verisi ile araç modeli boyuna ivme verisi.....	49
Şekil 6.5:	Gerçek araç yanal ivme verisi ile araç modeli yanal ivme verisi.....	49
Şekil 6.6:	Gerçek araç savrulma açısı verisi ile araç modeli savrulma açısı verisi.....	50
Şekil 6.7:	Aracın x ve y eksenindeki konumu.....	50
Şekil 6.8:	Tekerlek boyuna sürtünme kuvvetinin kestirimi.....	51
Şekil 6.9:	Tekerlek dikey kuvveti kestirim sonuçları.....	51

Şekil 6.10:	Manevra sırasında araç boyuna hızı	52
Şekil 6.11:	Şerit değiştirme manevrasının farklı yol koşulları için kayma eğiminin kestirimi.....	52
Şekil 6.12:	Şerit değiştirme manevrasının farklı yol koşulları için tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirimi	53
Şekil 6.13:	Araç hız profili.....	53
Şekil 6.14:	Tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimi.....	53
Şekil 6.15:	İvmelenme durumuna ait aracın boyuna hız değişimi.....	54
Şekil 6.16:	İvmelenme durumunda sürtünme katsayısı kestirimi	54

SEMBOL LİSTESİ

F_x	: Tekerlek boyuna sürtünme kuvveti
F_x	: Tekerlek yanall sürtünme kuvveti
F_x	: Tekerlek dikey kuvveti
ρ	: Normalize edilmiş tekerlek boyuna sürtünme kuvveti
μ	: Tekerlek yol sürtünme katsayısı
s	: Tekerlek kayma oranı
r_{eff}	: Efektif tekerlek yarıçapı
ω	: Tekerlek açısal hızı
V_x	: Araç boyuna hızı
r	: Araç savrulma hızı
δ	: Direksiyon dönüş açısı
m	: Araç ağırlığı
I_z	: Araç atalet momenti
L_f	: Araç ağırlık merkezinden ön aksa olan uzaklık
L_r	: Araç ağırlık merkezinden arka aksa olan uzaklık
T_f	: Araç ön iz genişliği
T_r	: Araç arka iz genişliği
R_w	: Tekerlek yarıçapı
I_w	: Tekerlek atalet momenti
V_y	: Araç yanall hızı
T_b	: Tekerleklerle uygulanan fren torku
C_f	: Ön tekerlek dönüş sertliği
C_r	: Arka tekerlek dönüş sertliği
α	: Tekerlek kayma açısı
x_k	: Sistem durumları
z_k	: Ölçüm değerleri
H_k	: Ölçüm matrisi
A_k	: Sistem durum matrisi
B_k	: Sistem giriş matrisi
u_k	: Sistem girişleri
w_k	: Sistem gürültüsü
v_k	: Ölçüm gürültüsü
P_k	: Hata kovaryans matrisi
R_k	: Gürültü kovaryans matrisi
$\hat{x}_k$	: Kestirim değerleri
a_x	: Araç boyuna ivme değeri
a_y	: Araç yanall ivme değeri
a_{yf}	: Ön aks yanall ivme değeri
a_{yr}	: Arka aks yanall ivme değeri
V_f	: Ön aks araç boyuna hızı
V_f	: Ön aks araç boyuna hızı
K_k	: Kalman kazanç matrisi

J_k : Maliyet fonksiyonu

TEKERLEK SÜRTÜNME KATSAYISI İÇİN GÖZETLEYİCİ TASARIMI

ÖZET

Bu tez kapsamında tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısını kestirmek amacıyla tekerlek boyuna kayma oranı tabanlı bir kestirimci tasarlanmıştır. Kayma tabanlı tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yönteminde kullanılan temel yaklaşım normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek boyuna kayma oranı arasındaki doğrusal ilişkinin kullanılmasıdır. Tasarlanan tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisinin etkinliği CarMaker programı kullanılarak değişik yol durumları ve çeşitli sürüş senaryoları ile yapılan benzetimler ile gösterilmiştir. Benzetimlerde kullanılan araç modeli parametreleri Güvenli Sürüş projesinde hazırlanan UYANIK isimli araca aittir.

Birinci bölümde çalışmanın amacı, çalışmanın kapsamı ve tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemlerinden genel olarak bahsedilmiştir.

İkinci bölümde tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısını kestirmek için geliştirilen kestirimciler ile ilgili kaynak taramasına yer verilmiştir. Bu bölümde sırasıyla nedensel ve sonuç tabanlı tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri detaylandırılmıştır.

Üçüncü bölümde, kestirim aşamında kullanılan çift izli araç modeli ve araç tekerleğini modellemek için geliştirilmiş tekerlek modellerli anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, boyuna tekerlek sürtünme kuvvetlerinin kestirilmesinde kullanılan genişletilmiş Kalman süzgeci gerekli temel bilgiler sağlanarak anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, ilk olarak genişletilmiş Kalman süzgeci ile araç durumlarının ve boyuna tekerlek kuvvetlerinin kestirilmesi anlatılmıştır. Daha sonra tekerlek dikey kuvvetleri araç boyuna ve yanal ivmesini dikkate alan dinamik bir model kullanılarak hesaplanmıştır. Bir sonraki kısımda genişletilmiş Kalman süzgeci ile kestirilen araç durumları kullanılarak tekerlek boyuna kayma oranının kestirilmesine değinilmiştir. Son olarak normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek boyuna kayma oranı arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanarak tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirilmesi anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, güvenli sürüş projesi kapsamında kullanılan Uyanık isimli deneysel aracın CarMaker ile oluşturulan modeli ile elde edilen sonuçlar ile gerçek veriler karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ayrıca CarMaker programında araç modeli oluştururken kullanılan araç parametreleri sunulmuştur.

Bu bölümün ikinci kısmında değişik yol koşullarında çeşitli sürüş senaryolarının benzetimi yapılmış ve geliştirilen tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisinin etkinliği bu benzetimler ile gösterilmiştir.

Yedinci ve son bölümde elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar hakkında yorumda bulunulmuştur.

OBSERVER DESIGN FOR TIRE ROAD FRICTION COEFFICIENT

SUMMARY

In this thesis, a longitudinal tire slip-based estimator is designed to observe tire road friction coefficient. Designed slip based estimator is using the linear relationship between normalized traction force and the tire slip to determine the tire road friction coefficient. The effectiveness of the designed tire road friction coefficient estimator is shown by making some simulations for different types of road.

In the first chapter, the main purpose of this thesis is declared and different tire road friction coefficient estimation methods are presented.

In the second chapter, the state of the art of the tire road friction coefficient estimation is presented. The effect based and the caused based tire road friction estimation methods are detailed in this section.

In the third chapter, double track vehicle model and various tire models are presented.

In the fourth chapter, the Kalman filter method, which is used, for estimating longitudinal tire friction forces and vehicle states is presented with necessary basic knowledge about estimation theory.

In the fifth chapter, first of all the estimation of the longitudinal tire friction forces and vehicle states by using extended Kalman filter is explained. Next, tire normal forces calculating by using dynamic normal force model which uses only longitudinal and lateral acceleration. Then tire longitudinal slip estimation is detailed. At last, tire road friction coefficient estimation is explained by using the linear relationship between tire normal traction force and tire slip.

In the sixth chapter, the experimental vehicle parameters are presented. The vehicle is called Uyanık, which is prepared with in Drive Safe Project. The simulation results, which are obtained with these parameters, are compared with the experimental vehicle data. The simulation results and the real vehicle data are very close each other. Also in this section, some simulations are made for different types of road and for different maneuvers. The effectiveness of the designed tire road friction estimator is shown with these simulations.

The seventh and last chapter of this thesis includes comments and recommendations for the future work.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Araçların dış dünya ile olan tüm etkileşimi aracın tekerlekleri ve yol arasında olmaktadır. Araçların motorunda oluşturulan kuvvetler tekerlekler aracılığıyla yola aktarılmaktadır. Araç kararlılığı ve aracın yol tutuşu açısından tekerlek ile yol arasındaki sürtünme çok önemlidir. Son zamanlarda gelişen taşıt teknolojisi ile araçlardaki geleneksel sistemlerin yerini elektronik kontrollü sistemler almıştır. Birçok araç kontrol sistemi, özellikle adaptif seyir sistemleri (ACC), ABS fren sistemi, çekiş kontrol sistemi, çarpışma uyarıcı ve engelleyici sistemler gibi aktif kontrol sistemleri tekerlek–yol sürtünme bilgisiyle çok daha etkin çalışmaktadır.

Tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısını belirlemek üzere birçok çalışma yapılmıştır [1]. Bu çalışmalar iki temel yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yaklaşımlardan birincisi tekerlek ile yol arasındaki sürtünmeye neden olan faktörleri elde ederek sürtünme bilgisine ulaşmaya çalışmaktadır. Nedensel tabanlı tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri sürtünmeye neden olan parametreleri ölçerek, çeşitli modeller yardımıyla sürtünme katsayısını kestirmektedir. Tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısının değişimine neden olan birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden en önemlileri yolun tipi ve yolun kayganlık durumudur. Tekerlek ile yol arasındaki sürtünmeye neden olan parametrelerin ölçümü için özel algılayıcılar geliştirilmiştir. Nedensel tabanlı tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemlerinin en önemli dezavantajı boyut ve değer olarak gerçek araçlarda kullanılamayacak algılayıcılara ihtiyaç duymasıdır. Tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısını belirlemek için kullanılan yaklaşımlardan diğeri sonuç tabanlı yaklaşımdır. Bu yaklaşım tekerlek ile yol arasındaki sürtünme değişikliği sonucunda çeşitli parametrelerde olan değişimlerden yola çıkarak sürtünmeyi kestirmektedir. Bu yaklaşım doğrultusunda yapılan çalışmalardan birinde tekerleğin sesi bir mikrofon aracılığıyla tekerlek ile yol sürtünme bilgisi kestirilmiştir [2]. Diğer bir çalışmada ise tekerlek yüzeyine yerleştirilen algılayıcılar ile tekerlek yüzeyinde oluşan deformasyon ölçülmektedir. Tekerlek yüzeyinden ölçülen bu deformasyon aracın

boyuna, yanal ve dikey kuvvetleri hakkında bilgi içermektedir. Bu bilgiler kullanılarak tekerlek ile yol sürtünme bilgisi kestirilmektedir. Sonuç tabanlı yaklaşımlardan biri olan kayma tabanlı tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemi çok fazla kullanım alanı bulmuştur. Bu yaklaşım tekerlek ile yol arasındaki sürtünmeyi kestirebilmek için özel algılayıcılara ihtiyaç duymamaktadır. Tekerlek kayma bilgisi kullanılarak yol birkaç sürtünme seviyesine sınıflandırılabilir. Kayma tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemindeki temel düşünce, düşük kayma oranına sahip bölgeden (sürtünme eğrisinin doğrusal bölgesinden) toplanan verileri kullanarak, normalize edilmiş tekerlek kuvveti ile kayma arasındaki doğrusal ilişkiyi (kayma eğimi) ortaya çıkarmaktır. Daha sonra bu kayma eğimi, deneysel tecrübelerle göre oluşturulmuş sınıflandırma fonksiyonu ile değerlendirilerek tekerlek-yol sürtünme katsayısı tespit edilmektedir.

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen tekerlek yol sürtünme katsayısı yöntemlerinden kayma tabanlı kestirim yöntemi kullanılarak tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirilmiştir. İlk olarak araç boyuna tekerlek sürtünme kuvvetleri ve çeşitli araç durumları genişletilmiş Kalman süzgeci yöntemi kestirilmiştir. Tekerlek dikey kuvvetleri dinamik bir model ile hesaplanmıştır. Boyuna tekerlek sürtünme kuvvetinin tekerlek dikey kuvvetine bölünmesi ile normalize edilmiş tekerlek kuvveti elde edilmiştir. Genişletilmiş Kalman süzgeci kestirilen araç durumları kullanılarak tekerlek kayma açısı ve boyuna tekerlek kayma değeri kestirilmiştir. Sonuç olarak normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değerinin değişimi elde edilmiştir. Tekerlek yol sürtünme katsayısına normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değeri arasındaki doğrusal ilişki kullanılarak ulaşılmıştır. Düşük tekerlek kayma değerleri için normalize edilmiş çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değeri doğrusal olarak değişmektedir. Bu çalışmada gerçek araç benzetimlerini CarMaker isimli araç benzetim programı ile gerçekleştirilmiştir. CarMaker programı araç dinamiğini gerçeğe çok yakın modelleyebilmektedir [3]. CarMaker programı ile yapılan benzetimlerde güvenli sürüş projesi kapsamında çeşitli algılayıcılarla donatılmış Uyanık isimli deneysel aracın parametreleri kullanılmıştır [4]. Uyanık isimli araç üzerinden çeşitli manevralar gerçekleştirilerek alınan veriler ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim sonuçları ile gerçek veriler büyük benzerlik göstermektedir. CarMaker değişik türde manevralar yapılarak kestirimde kullanılan gerekli algılayıcı verileri toplanmıştır. Tekerlek yol

sürtünme katsayısı kestirimcisi çeşitli manevralarla sınanarak kestirimcinin etkinliği gösterilmiştir.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bu tez kapsamında tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısını gözlemlemek amacıyla kayma tabanlı bir kestirimci tasarlanmıştır. Tasarlanan tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisi CarMaker programı ile yapılan değişik manevra benzetimleri ile denenmiştir. Farklı yol koşulları için elde edilen kestirim sonuçları karşılaştırmalı grafik olarak ilgili bölümlerde verilmiştir.

Birinci bölümde çalışmanın amacı ve tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemlerinden genel olarak bahsedilmiştir. İkinci bölümde tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısını kestirmek için geliştirilen kestirimciler ile ilgili kaynak taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde çift izli araç modeli ve araç tekerleğini modellemek için geliştirilmiş tekerlek modellerli anlatılmıştır. Bu bölümde sırasıyla nedensel ve sonuç tabanlı tekerlek yol sürtünme katsayısı yöntemleri detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, boyuna tekerlek sürtünme kuvvetlerinin kestirilmesinde kullanılan genişletilmiş Kalman süzgeci gerekli temel bilgiler sağlanarak anlatılmıştır. Beşinci bölümde, ilk olarak genişletilmiş Kalman süzgeci ile boyuna tekerlek kuvvetlerinin ve araç durumlarının kestirilmesi anlatılmıştır. Daha sonraki kısımda genişletilmiş Kalman süzgeci ile kestirilen araç durumları kullanılarak tekerlek dikey kuvvetleri dinamik bir model kullanılarak hesaplanmıştır. Bir sonraki kısımda tekerlek kayma açısı ve tekerlek kayma değerinin hesaplanmasına değinilmiştir. Son olarak normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ile kayma arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanarak tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirilmesi anlatılmıştır. Altıncı bölümde, güvenli sürüş projesi kapsamında kullanılan Uyanık isimli deneysel aracın parametreleri verilmiş ve kullanılan parametrelerle elde edilen benzetim verileri ile gerçek veriler karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu bölümde değişik yol koşullarında değişik manevraların benzetimi yapılmış ve geliştirilen tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisinin etkinliği bu manevralar ile gösterilmiştir. Yedinci ve son bölümde elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar hakkında yorumda bulunulmuştur.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1 Tekerlek-Yol Sürtünme Katsayısı

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere F_x , F_y ve F_z sırasıyla tekerlek üzerindeki etkili olan boyuna kuvveti, yanal kuvveti ve dikey kuvveti temsil etmektedir.



Şekil 2. 2: Tekerlek üzerinde etkili olan kuvvetler

Normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ρ şu şekilde tanımlanır.

$$\rho = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \quad (2.1)$$

Sadece boyuna hareketi dikkate alır ve yanal hareketi ihmal edersek, normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti şu şekilde ifade edilir.

$$\rho = \frac{F_x}{F_z} \quad (2.2)$$

Normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti ρ tekerlek kayma oranının ve tekerlek-yol sürtünme katsayısının μ bir fonksiyonudur. Herhangi bir yol yüzeyi için tekerlek-yol sürtünme katsayısı μ , bu yüzeyde herhangi bir kayma oranı değeri için normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvvetinin alabileceği en fazla değer olarak tanımlanmaktadır.

Herhangi bir durumda verilen tekerlek dikey kuvveti F_z için, tekerlek boyuna kuvveti F_x tekerlek kayma oranı artıkça artış gösterir ve uygun kayma değerinde olabilecek en fazla değer olan $\mu.F_z$ değerine ulaşır. Eğer tekerlek-yol sürtünme katsayısı μ 1’e

eşit ise üretilebilecek en fazla boyuna kuvvet F_x , tekerlek dikey kuvveti F_z kadar olur. Bu değere uygun tekerlek kayma oranında ulaşılmaktadır. Uygun tekerlek kayma oranı tekerlek tipi gibi çeşitli parametrelere göre değişim göstermektedir.

2.2. Tekerlek-Yol Sürtünme Katsayısı Kestirimi Genel Bakış

Araç dinamiği ve kontrolü açısından tekerlek tarafından üretilen kuvvetler çok önemlidir. Tekerleklerin yüzeye aktarabileceği en fazla kuvvet tekerlek-yol arasındaki sürtünme katsayısının değerine bağlıdır.

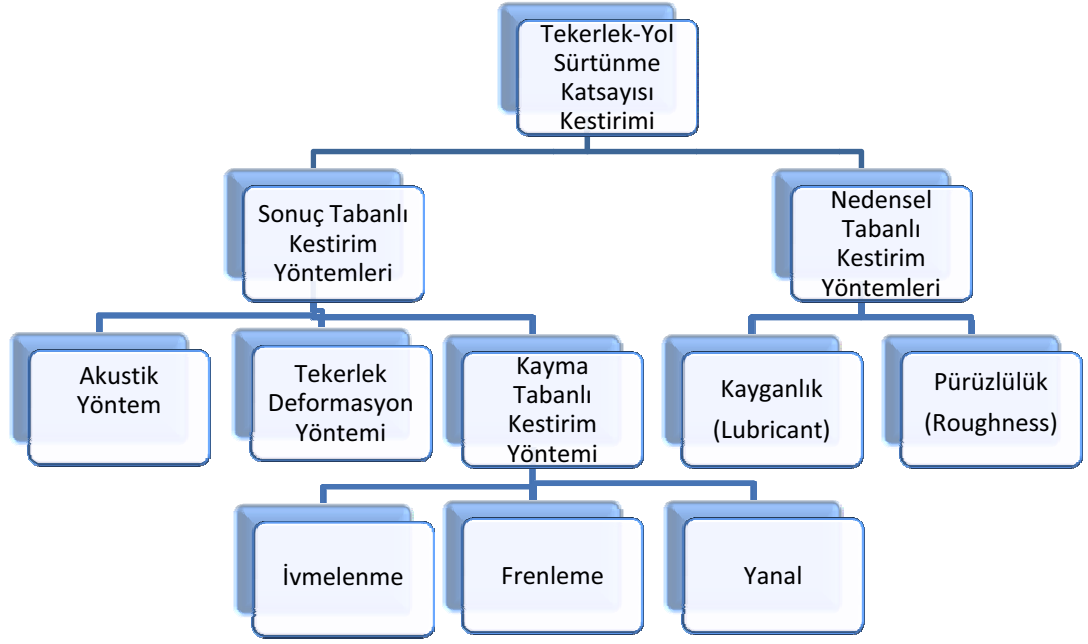
Birçok araç kontrol sistemi, özellikle adaptif seyir sistemleri (ACC), ABS fren sistemi, çekiş kontrol sistemi, çarpışma uyarıcı ve engelleyici sistemler gibi aktif kontrol sistemleri tekerlek-yol sürtünme bilgisiyle çok daha etkin çalışmaktadır. Örnek olarak adaptif seyir sistemi öndeki araç ile olan mesafeyi tekerlek-yol sürtünme bilgisini kullanarak güvenli şekilde ayarlamaktadır.

Tekerlek-yol arasındaki sürtünme katsayısı kestirimi geniş bir araştırma alanıdır ve bu alanda çok değişik yöntemler kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından kullanılan tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri Şekil 2.2’de genel olarak gösterilmiştir. Tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri genel olarak iki ana kolda incelenmiştir. Bunlardan biri nedensel tabanlı yaklaşım, diğeri ise sonuç tabanlı yaklaşımdır. Nedensel tabanlı yaklaşımda sürtünmeye neden olan çeşitli faktörler ölçülerek, önceki tecrübeler ve çeşitli sürtünme modelleri ışığında sürtünme katsayısı kestirilmeye çalışılmaktadır. Sonuç tabanlı yaklaşımda ise sürtünme değişiklikleri sonucunda çeşitli değişkenlerde oluşan değişiklikler takip edilerek tekerlek-yol arasındaki sürtünme katsayısı kestirilmeye çalışılmaktadır. Sırasıyla nedensel tabanlı yaklaşımlar ve sonuç tabanlı yaklaşımlar ileriki bölümlerde anlatılacaktır. Sonuç tabanlı kestirim yöntemleri arasında bulunan kayma tabanlı yaklaşım detaylı olarak incelenecektir. Bu çalışmada da kayma tabanlı kestirim yöntemi kullanılmaktadır.

2.2.1 Nedensel tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri

Tekerlek-yol sürtünme katsayısının değişimine neden olan birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler genel olarak araç parametreleri, tekerlek parametreleri, yol kayganlık durum parametreleri ve yol parametreleri şeklinde sınıflandırılmaktadır. Araç parametreleri araç hızı, kamber açısı ve tekerlek yükü,

tekerlek parametreleri tekerlek türü, tekerlek malzemesi ve tekerlek hava basıncı, yol kayganlık durum parametreleri sıcaklık ve yol tipi (ıslak, karlı, buzlu ve yağlı) ve yol parametreleri yol türü, mikro-geometri ve makro-geometri gibi değişkenleri içermektedir. Nedensel tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri sürtünmeye neden olan bu parametrelerden en fazla etkiye sahip olan değişkenleri ölçerek, bu değişkenler ile sürtünme arasındaki ilişkiden faydalanarak sürtünme katsayısını kestirmeye çalışmaktadır.



Şekil 2.2: Tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestiriminde kullanılan yöntemler [5]

Tekerlek-yol arasındaki sürtünme katsayısını etkileyen değişkenlerden çoğu kolaylıkla ölçülebilmektedir. Örnek olarak araç hızı, yaklaşık olarak tekerlek yükü, tekerlek türü ve kamber açısı ölçümleri kolay bir şekilde elde edilmektedir. Ancak tekerlek-yol arasındaki sürtünmeyi etkileyen önemli iki parametre yol kayganlık durumu ve yol tipi hakkında bilgiye sahip olmak için özel algılayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Nedensel tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestiricilerinin en önemli dezavantajı özel algılayıcılara ihtiyaç duymasıdır.

Çeşitli araştırmacılar tekerlek-yol sürtünme katsayısını kestirmek için özel kayganlık algılayıcıları tasarlamışlardır. Kayganlık algılayıcıları yol üzerindeki ıslak bölgelere ve diğer yağlı kısımlara, algılayıcı tarafından yola gönderilen optik ışığın yol tarafından yansıtılması ve içerilmesi durumuna göre karar vermektedir. Yol pürüzlülüğünü ölçmek için de çeşitli optik algılayıcılar tasarlanmıştır.

Tekerlek-yol arasındaki sürtünme katsayısını etkileyen paramaterler ölçüldükten sonraki aşamada elde edilen değişkenler çeşitli fiziksel sürtünme modelleri ile ilişkilendirilerek sürtünme katsayısı kestirimi yapılmaktadır. Tümüyle gerçekçi fiziksel modeller gerçekleştirilemediği için çeşitli araştırmacılar yapay sinir ağları ve çeşitli öğrenme algoritmaları ile fiziksel olmayan modeller üzerinde çalışmışlardır. Bu tür çalışmaların dezavantajı ise şartlar eğitilen durumlardan uzaklaştığında kestirim sonuçlarındaki hassasiyet kaybolmaktadır. Buna rağmen, nedensel tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri ile elde edilen deneysel sonuçlar yüksek hassasiyet göstermektedir.

Nedensel tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemlerinin avantajı yüksek hassasiyette sonuçlar vermesi ve düşük sürtünme katsayılarını kestirmek için daha elverişli olmasıdır. Bunun yanında nedensel tabanlı kestirim yöntemlerinin birtakım dezavantajları bulunmaktadır. İlk olarak nedensel tabanlı kestirim yöntemleri fazladan özel algılayıcılara ihtiyaç duymaktadır. Nedensel tabanlı kestirim yöntemlerinin iyi sonuç verebilmesi için çeşitli eğitim aşamalarından geçmek zorundadır. Nedensel tabanlı kestirim yöntemleri eğitilmediği durumlarla karşılatığında hassasiyeti kaybetmektedir.

2.2.1 Sonuç tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri

Sonuç tabanlı kestirim yöntemleri Şekil 2.1’de görüldüğü gibi üç ana başlıktan oluşmaktadır. Bu yöntemler akustik yaklaşım, tekerlek deformasyon yaklaşımı ve kayma tabanlı yaklaşımdır. İlk olarak akustik ve tekerlek deformasyon yaklaşımından bahsedilecek daha sonra ise bu tezin de konusunu oluşturan kayma tabanlı yaklaşım detaylı olarak incelenecektir.

Akustik yaklaşımda, tekerleğin sesini dinlemek üzere araca bir adet mikrofon yerleştirilmiştir. Mikrofon aracılığıyla elde edilen tekerlek sesi tekerlek-yol sürtünme katsayısını yorumlamak için kullanılmaktadır. Tekerlek sesi tekerlek-yol sürtünme katsayısı ile ilişkilidir. Ayrıca tekerleğin sesi yol tipi, yolun ıslaklığı ve aracın hızı gibi sürtünmeyi etkileyen parametreler ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle akustik yaklaşım aynı zamanda nedensel tabanlı kestirim yöntemi olarak da sınıflandırılabilir. Akustik yöntem ile tekerlek-yol sürtünme katsayısını kestirmek tekerlek sesinin karmaşıklığı nedeniyle kolay olmamaktadır.

Tekerlek deformasyon yaklaşımında tekerleğin yüzeyine yerleştirilen tekerlek yüzeyindeki x, y ve z deformasyonlarını ölçen algılayıcılar kullanılmaktadır. Her için ölçülen bu deformasyonlar tekerlek yol etkileşim yüzeyine aktarılan kuvvetler ile doğrudan alakalıdır. Bu ölçümler ayrıca toplam boyuna, yanal ve dikey kuvvetler ve bunların tekerlek-yol etkileşim yüzeyine olarak dağılımları hakkında bilgi içermektedir.

Bu çalışmalarda kullanılan algılayıcılar tekerlek yüzeyinin içine gömülmektedir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre çok düşük tekerlek-yol sürtünme katsayısı değerleri bile bu yöntem ile tespit edilebilmektedir. Bu tür çalışmalarda yolun sürtünme katsayısını değiştiren etkenlerin hiç birisinin bilinmesine gerek yoktur çünkü bu yöntem sadece düşük sürtünme yüzeylerinin sonuçlarını ölçerek çalışmaktadır. Bu nedenle nedensel tabanlı kestirim yöntemleri için problem olan bir çok durumda tekerlek deformasyon yöntemi daha etkin çalışmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise karmaşık enstrümanlarla donatılmış tekerleklerle ihtiyaç duymasıdır. Tekerlek yüzeyinde kullanılan algılayıcıların beslemesi için harici bir besleme ünitesi ve yapılan ölçümlerin işlem birimine aktarılması için kablosuz iletişim altyapısı kullanılmaktadır. Bu nedenle bu yöntemin araçlarda yaygın olarak kullanılması şimdilik uygun görülmemektedir.

Bu kısımda inceleyeceğimiz son kestirim yöntemi olan kayma tabanlı yaklaşım yöntemi bahsettiğimiz yöntemlerin aksine özel algılayıcılar gerektirmemekte, aktif araç dinamiği kontrol sistemlerinin kullandığı algılayıcıları kullanmaktadır. Bu nedenle kayma tabanlı kestirim yaklaşımı uygulama açısından daha çekici olmaktadır. Tekerlek kayma bilgisi kullanılarak yol birkaç sürtünme seviyelerine göre sınıflandırılabilir. Şekil 2.2’de kayma tabanlı kestirim yöntemi kolunda görüldüğü üzere, araştırmacılar kayma tabanlı kestirim yöntemini ivmelenme, frenleme ve dönüş manevraları için ayrı olarak incelemişlerdir.

Tekerlek kayma değeri, tekerlek aksındaki boyuna hızı V_x ile tekerlek dönüş hızı $r_{eff} \cdot \omega$ arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Boyuna kayma oranı aşağıdaki denklemler ile ivmelenme ve frenleme durumları için ayrı ayrı tanımlanmıştır.

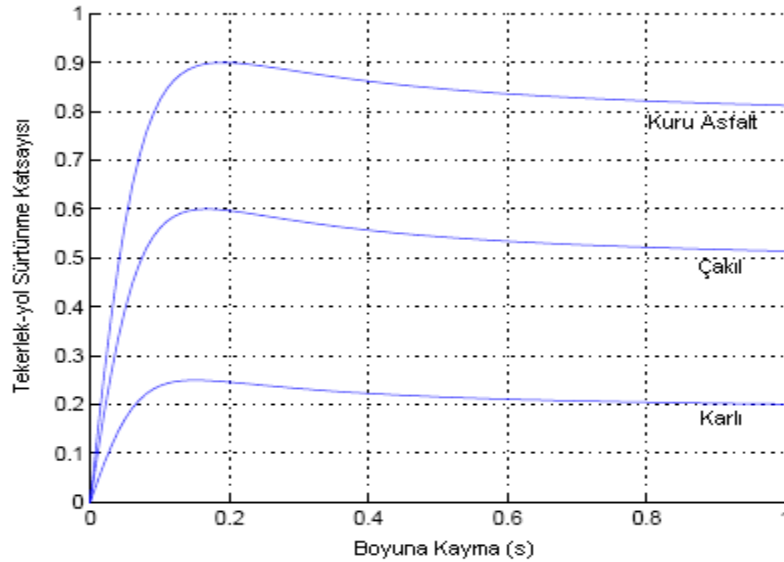
$$s = \frac{r_{eff} \cdot \omega - V_x}{V_x} \quad \text{Frenleme} \quad (2.3)$$

$$s = \frac{r_{eff} \cdot \omega - V_x}{r_{eff} \cdot \omega} \text{ İvmelenme} \quad (2.4)$$

Denklemlerde geçen ω tekerlek açısal hızını ve r_{eff} efektif tekerlek açısal hızını ifade etmektedir.

Frenleme durumunda tekerlek dönüş hızı tekerlek boyuna hızından daha küçük değerler almaktadır. Bu durumda elde edilen kayma değeri negatif olmaktadır. Frenleme durumunda kayma değeri en fazla $s = -1$ değerini alır, bu değer tekerleğin kilitlenme durumunda ortaya çıkmaktadır. İvmelenme durumunda ise frenleme durumunun tersine kayma oranı pozitif değerler almaktadır. İvmelenme durumunda kayma değeri en fazla $s = 1$ değerini alır, bu değer tekerleğin patinaj yaptığı durumda ortaya çıkmaktadır.

Tekerlek-yol sürtünme katsayısı, μ , tekerlek kayma oranı ile bağlantılı olarak değişmektedir. Pacejka tarafından geliştirilmiş Magic Tire Formula [6] olarak bilinen tekerlek modeli kullanılarak çeşitli yol durumları için tekerlek-yol sürtünme katsayısı ile kayma oranı arasındaki ilişki Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Şekil 2.3’ de görüldüğü üzere sürtünme katsayısı kayma oranının belli bir değerine kadar artış göstermekte, kritik kayma değeri için maksimum değerine ulaşmakta ve daha sonra kayma değerinin artışına rağmen azalmaktadır.



Şekil 2.3: Tekerlek-yol sürtünme katsayısı ile kayma oranı arasındaki ilişki

Kayma tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemindeki temel düşünce, düşük kayma oranına sahip bölgeden veya sürtünme eğrisinin doğrusal bölgesinden toplanan verileri kullanarak, normalize edilmiş tekerlek kuvveti ile kayma arasındaki doğrusal ilişkiyi (kayma eğimi- slip slope) ortaya çıkarmaktır. Daha sonra bu kayma eğimi, deneysel tecrübelerle göre oluşturulmuş sınıflandırma fonksiyonu değerlendirilerek tekerlek yol sürtünme katsayısı tespit edilmektedir. Kayma eğimi tabanlı sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri ivmelenme durumu için geniş bir şekilde araştırılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bu konudaki ilk çalışmalardan biri Deckmann [7] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ivmelenme durumunda sadece standart ABS algılayıcıları kullanılarak kayma değeri çok hassas bir şekilde ölçülmektedir. Hız referansı olarak aracın motoru tarafından tahrik edilmeyen arka tekerleklerin hızları kullanılmıştır. Ön tekerlekler ise kayma değeri için referans alınmıştır. Bu ölçüm sistemi ile normal sürüşlerde çok değişik yol koşulları ve değişik tekerlek türleri için kayma değeri başarıyla elde edilmiştir. Bu ölçümler sonucunda aynı tekerlek kuvvetini elde etmek için düşük sürtünme katsayılı yüzeylerde yüksek sürtünme katsayılı yüzeylere göre daha büyük kayma değerine ihtiyaç olduğu ortaya çıkmıştır. Son olarak ölçüm verileri tekerlek-yol simülasyonları ile karşılaştırılmıştır.

İlk defa Gustafsson [8] kayma eğimi tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemini önermiştir. Sürtünme eğrisinin kayma eğimini kestirmek için Kalman süzgeci kullanmıştır. Sistem önden çekişli bir yolcu aracında çalışmaktadır. Arka tekerlekler mutlak hız referansı olarak, ön tekerlekler kayma referansı olarak görev yapmaktadır. Arka tekerleklerin çekişe olan katkısı ihmal edilmiştir. Kayma değeri direk olarak ön tekerlek hızları ile arka tekerlek hızları arasındaki fark kullanarak hesaplanmıştır. Normalize edilmiş çekiş kuvveti , μ , motor torku ve dikey kuvvet kullanılarak hesaplanmıştır. Motor torku, injeksiyon zamanı ve motor hızı kullanılarak kestirilmektedir. Kalman süzgeci yinelemeli olarak kayma eğimini ivmelenme durumunda hesaplamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kestirilen kayma eğimi değişik sürtünme değerlerine sahip yüzeyleri sınıflandırabilmektedir.

Bu konuda daha sonra çalışma yapan Hwang ve Song [9] ve Yi, Hedrick ve Lee [10] kayma tabanlı sürtünme kestirimin mümkün olabileceğini daha geniş deneysel

alışmalar ile bir kez daha ispatlamışlardır. Her iki çalışmada kullanılan sürtünme kestirim yöntemi Gustafsson alışması ile büyük benzerlik göstermektedir. Yi, Hedrick ve Lee, yaptıkları çalışmada sürüş aksındaki torku kestirmek gözlemleyici kullanmışlar ve ıslak ve kuru zemin için elde edilen sonuçlarda kayma eğimleri farklılık göstermektedir. Hwang ve Song, yaptıkları çalışmada kuru ($\mu=1$) zeminde elde edilen kayma eğimi, ABS testleri için kullanılan yapay kaygan ($\mu=0.3$) zeminde elde edilen kayma eğiminden önemli ölçüde büyük çıkmıştır.

Bu çalışmalara ek olarak, yüksek sürtünme katsayısına sahip zeminlerde normal sürüş durumları için sürtünme katsayısını tahmin etmek için sürtünme katsayısı ve kayma arasında polinomsal yaklaşıklık metodunu Germann, Wrtenberger ve Daiss [11] kullanmıştır. Deneysel alışmalar sonucunda bu yöntemin sürtünme katsayısı düşük zeminlerde kayma eğimi olması gereken durumdan çok farklı çıkmaktadır.

Bu yöntemlerin dezavantajlarından bir tanesi mutlak hızı kestirebilmek için sürülen tekerlek hızını referans olarak almasıdır. Bu yöntemler dört çekişli araçlarda ve frenleme durumlarında düzgün sonuçlar vermeyeceklerdir. Frenleme durumlarında tüm tekerleklerde kayma oluşmakta ve kuvvetler tüm tekerleklerde etkili olmaktadır. Bunun yanında bu yöntemler, düşük kayma bölgelerinde hızlanma durumlarında büyük bir hassasiyetle kayma eğimini kestirebilmektedir.

Frenleme durumu için kayma tabanlı sürtünme katsayısı kestirim yöntemi daha az uygulanmıştır. Bunun nedenlerinden biri mutlak hızı belirleme zorluğudur. Frenleme durumunda tüm tekerleklerde kayma oluştuğu için mutlak hızı belirlemek için farklı yöntemler araştırılmıştır. Birtakım araştırmacılar araca boşta ekstra tekerlek eklemişler ve bu tekerleğin hızı referans hız olarak kullanılmıştır. Bu yöntemi gerçek araçlarda uygulamak mümkün görülmemektedir. Bazı araştırmacılar ise aracın mutlak hızını Global Konumlandırma Sistemi (GPS) ile elde etmeye çalışmışlardır. Tekerlek kuvvetlerini frenleme durumunda kestirebilmek normal sürüş durumlarına göre daha zor olmaktadır. Dikkat edildiğinde araç sürüşlerinde fren genellikle çok az ve acil durumlarda kullanılmaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı frenleme durumu için yapılan çalışmalar azınlıktadır.

Tekerlek-yol sürtünme katsayısını frenleme durumu için kestirmek biraz zor olsada bu alanda da çalışmalar yapılmıştır. Kiencke ve Daiss [12], sert frenleme

durumlarındaki yüksek sürtünme isteğinin avantajını kullanarak tekerlek modelinin sürtünme ile ilgili parametresini kestirmişlerdir. Ray [13], dönüş ve frenleme manevralarını içeren çalışması ile tekerlek-yol sürtünme katsayısını en iyi şekilde tahmin etmeye çalışmıştır. Kayma ve normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti kestirimleri için genişletilmiş Kalman-Bucy süzgeci durum kestiricisi kullanılmıştır. Genişletilmiş Kalman-Bucy süzgeci ölçüm olarak savrulma oranı, dönme oranı, tekerlek hızları, ve her iki eksen için ivmeler kullanmıştır. Son olarak normalize edilmiş tekerlek kuvvetleri ve kayma değeri değerlendirilerek tekerlek-yol sürtünme katsayısı elde edilmektedir. Müller ve Uchanski [14], yaptıkları çalışmada kayma tabanlı sürtünme katsayısı kestirim yöntemini frenleme durumları için uygulamışlardır. Bu çalışmada fren torklarını elde etmek için fren basınç algılayıcısı kullanılmıştır. Fren torkları tekerlek kuvvetlerini hesaplamakta yardımcı olmaktadır. Aracın arka tekerleklerindeki frenler pasif hale getirilerek arka tekerlek hızları mutlak hızı hesaplamakta kullanılmıştır. Bu çalışma gerçek hayata uygulanabilmesi açısından problemler içermektedir. Fren basınç algılayıcısı üretim araçlarına yerleştirmek için çok maliyetlidir ve ayrıca arka tekerleklerdeki freni kullanmamak kabul edilemez.

Hahn ve Rajamani [15], araç yanal dinamiği yaklaşımlarını kullanarak sürtünme katsayısını kestirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada kayma açısı diferansiyel GPS yardımıyla hesaplanmıştır.

Kayma tabanlı tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemleri diğer yöntemlere göre daha az algılayıcıya ihtiyaç duymaktadır. Kayma tabanlı yaklaşım ile çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir ama bu yöntemde birtakım problemler barındırmaktadır. Bu yöntem dayanıklılık ve ölçümleme açısından problemler içermektedir. Araştırmacıların yol durumunu belirlemek için kullandığı kayma eğimi gibi parametreler tekerlek türü, tekerlek hava basıncı, tekerlek yapısı ve araç konfigürasyonuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Kayma tabanlı yöntemle en iyi sonuçlar düz bir yolda ivmelenme durumunda elde edilmiştir.

Bu tezde de kayma tabanlı sürtünme katsayısı kestirim yöntemi kullanılmıştır. İvmelenme ve frenleme durumları için sürtünme katsayısı kestirilmeye çalışılmıştır. Sürtünme eğrisini elde edebilmek için çeşitli değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar kayma değeri, tekerlek dikey kuvvetleri ve tekerlek çekiş kuvvetleridir. Tekerlek

ekiş kuvvetleri elde edebilmek için genişletilmiş Kalman süzgeci durum kestrici tasarlanmıştır. Bu durum kestiricisinden çıkan sonuçlar ile kayma değeri ve tekerlek dikey kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler yardımıyla sürtünme katsayısı kestirilmiştir.

3. ARAÇ VE TEKERLEK MODELLERİ

3.1 Giriş

Bu bölümde tekerlek kuvvetlerinin ve tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirilmesinde kullanılan olan araç modeli tanıtılacaktır. Kestirimlerde çift izli araç modeli kullanılmıştır. Burada tanıtılan araç modelleri Kalman süzgecindeki sistem modelinin oluşturulmasında kullanılacaktır. Araç modelleri boyuna ve yanal tekerlek kuvvetlerini içermektedir. Araç modelleri doğrusal olmayan durum denklemleri içermektedir.

Ayrıca bu bölümde tekerlek boyuna ve yanal kuvvetlerinin modellenmesinde kullanılan tekerlek modelleri anlatılacaktır. Araç dinamiği ve kontrolü uygulamalarında kullanılan araç modellerinin hazırlanması sırasında en önemli adımlardan biri, aracın yol ile temasının olduğu tek bileşen olan tekerleklerin doğru ve mümkün olduğunca gerçekçi modellenmesidir. Araç modellerinde kullanmak üzere deneysel ya da analitik verileri kullanan birçok farklı tekerlek modeli mevcuttur. Burada sırasıyla doğrusal tekerlek modeli, Dugoff tekerlek modeli ve Magic Tire tekerlek modeli tanıtılacaktır.

3.2 Çift İzli Araç Modeli

Araç dinamiği çalışmalarında sıkça kullanılan araç modellerinden biri de çift izli araç modelidir. Model, x ekseninde boyuna hareket, y ekseninde yanal hareket, z ekseninde etrafında savrulma hareketi ve her bir tekerleğe ait dairesel hareket şeklinde yedi serbestlik derecesine sahiptir. Yedi serbestlik dereceli çift izli araç modeli Şekil 3.1’de görülmektedir.

Çift izli araç modeli, motor modeli içermemektedir. Ayrıca çift izli araç modelinde süspansiyon bulunmadığından araç, kamber açısı değişimleri ile oluşan direksiyon açısı değişimi, yanal yük transferi sonucu oluşan y ekseninde etrafındaki dönme hareketi ve boylamsal yük transferi ile oluşan x ekseninde etrafındaki dönme hareketinin

benzetimi yapılamamaktadır. Direksiyon açısı her ön tekerlek için aynı büyüklüktedir.

Aşağıda araç hareket denklemleri verilmiştir.

Doğrusal yönde hareket dinamiği,

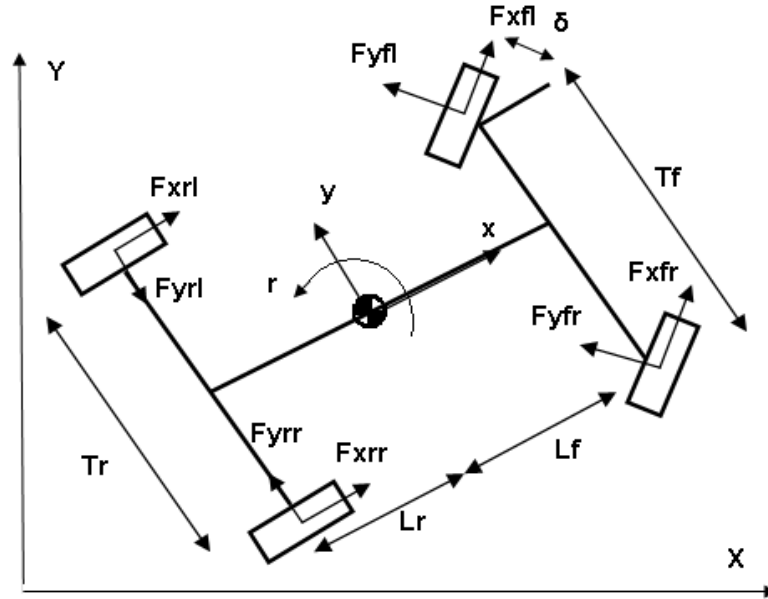
$$\dot{v}_x = v_y \cdot r + \frac{1}{m} [(F_{xfl} + F_{xfr}) \cos(\delta) - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin(\delta) + F_{xrl} + F_{xrr}] \quad (3.1)$$

Enlemsel hareket dinamiği,

$$\dot{v}_y = -v_x \cdot r + \frac{1}{m} [(F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos(\delta) + F_{yrl} + F_{yrr}] \quad (3.2)$$

Yerel düşey eksen üzerinde dönme dinamiği,

$$\dot{r} = \frac{1}{I_z} [L_f (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + L_f (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos(\delta) - L_r (F_{yrl} + F_{yrr}) - \frac{T_f}{2} (F_{xfl} - F_{xrl}) \cos(\delta) - \frac{T_f}{2} (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin(\delta) - \frac{T_r}{2} (F_{xrl} - F_{xrr})] \quad (3.3)$$



Şekil 3.1 Çift izli araç modeli

$$\dot{\omega}_{fl} = \frac{1}{I_{\omega}} (-R_{\omega} \cdot F_{xfl} - T b_{fl}) \quad (3.4)$$

$$\dot{\omega}_{fr} = \frac{1}{I_{\omega}} (-R_{\omega} \cdot F_{xfr} - T b_{fr}) \quad (3.5)$$

$$\dot{\omega}_{rr} = \frac{1}{I_{\omega}} (-R_{\omega} \cdot F_{xrr} - Tb_{rr}) \quad (3.6)$$

$$\dot{\omega}_{rl} = \frac{1}{I_{\omega}} (-R_{\omega} \cdot F_{xrl} - Tb_{rl}) \quad (3.7)$$

Denklemlerde geçen v_x ve v_y araç boyuna ve yanal hızını, r savrulma hızını göstermektedir. Alt indis olarak fl , ön sol, fr , ön sağ, rr , arka sağ ve rl , arka sol tekerleği belirtmek için kullanılmaktadır. ω_{fl} , ω_{fr} , ω_{rr} ve ω_{rl} her bir tekerlek için dönüş hızlarını Tb_{fl} , Tb_{fr} , Tb_{rr} ve Tb_{rl} her bir tekerleğe uygulanan fren tork değerlerini F_{xfl} , F_{xfr} , F_{xrr} ve F_{xrl} tekerlek boyuna kuvvetlerini F_{yfl} , F_{yfr} , F_{yrr} ve F_{yrl} tekerlek yanal kuvvetlerini temsil etmektedir. Araç boyuna ivmesi $a_x = \dot{v}_x - r \cdot v_y$ ve araç ağırlık merkezindeki yanal ivme $a_y = \dot{v}_y + r \cdot v_x$ şeklinde ifade edilmektedir.

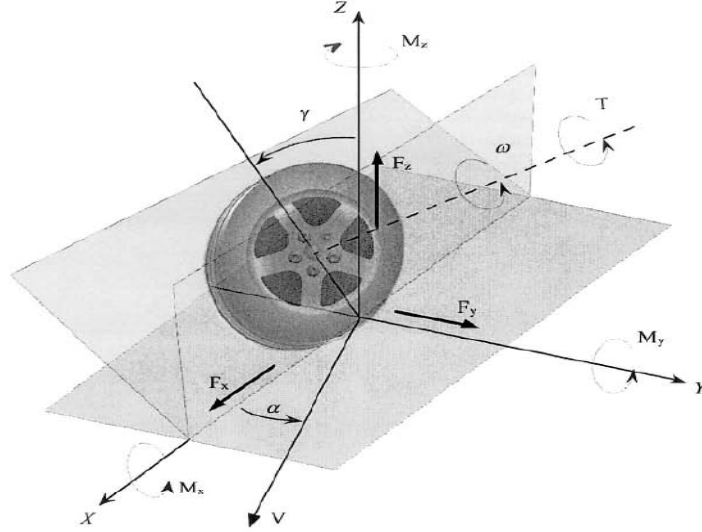
3.3 Tekerlek Modelleri

3.3.1 Giriş

Araç dinamiği büyük ölçüde tekerlek üzerinde oluşan boyuna, yanal ve dikey kuvvetlerden etkilenmektedir. Araç dinamiğini yakından etkileyen tekerlek kuvvetleri gerçeği en iyi şekilde yansıtacak şekilde modellenmelidir. Ancak geliştirilen tekerlek modelleri hiçbir zaman doğru şekilde gerçek tekerlek davranışını temsil edememektedir. Geliştirilentekerlek modelleri analitik ve deneysel çalışmalara bağlı olarak modellenmektedir. Bu bölümde ilk olarak düşük tekerlek kayma oranı için doğru sonuçlar veren doğrusal tekerlek modeli, sonra deneysel çalışmalara dayalı olarak geliştirilen doğrusal olmayan Pacejka tekerlek modeli ve son olarak boyuna ve yanal tekerlek kuvvetlerini birlikte modelleyen Dugoff tekerlek modeli anlamıştır. Şekil 3.2’de tekerlek üzerinde oluşan tekerlek kuvvetleri ve momentleri görülmektedir. F_x boyuna tekerlek kuvvetini, F_y yanal tekerlek kuvvetini, F_z tekerlek dikey kuvvetini ve M_z geri çevirme momentini ifade etmektedir.

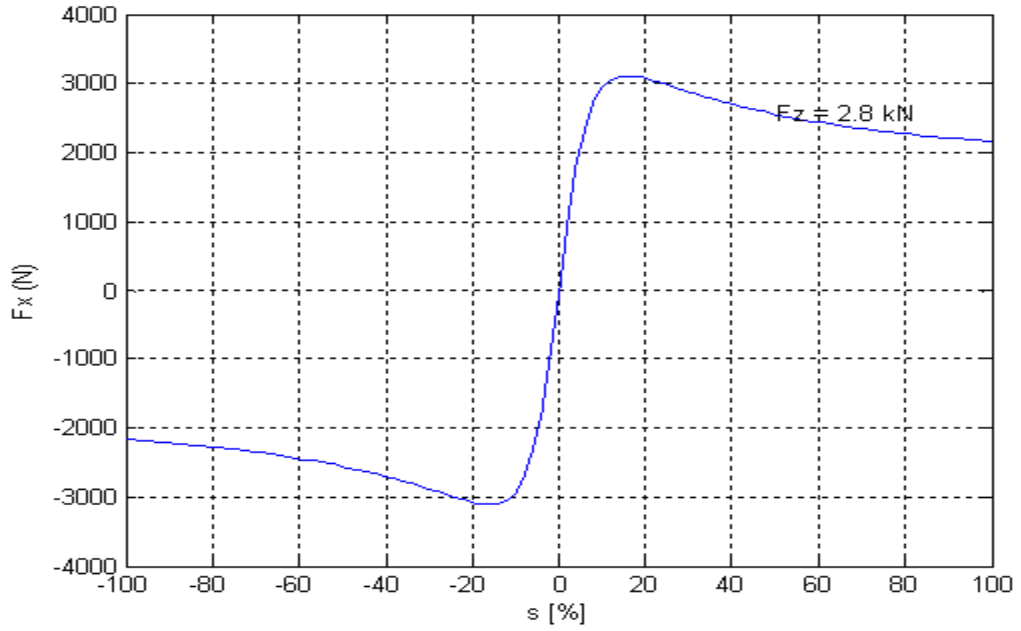
3.3.2 Doğrusal tekerlek modeli

Deneysel çalışmalar sonucunda boyuna tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma değeri, tekerlek üzerindeki dikey kuvvet ve tekerlek sürtünme katsayısı ile değiştiği görülmüştür.



Şekil 3.2 Tekerlek kuvvetleri ve momentleri [16]

Sürtünme katsayısının 1 olduğu ve tekerlek dikey kuvvetinin sabit olduğu kabulü altında boyuna tekerlek kuvvetinin değişimi Şekil 3.3’de görülmektedir.



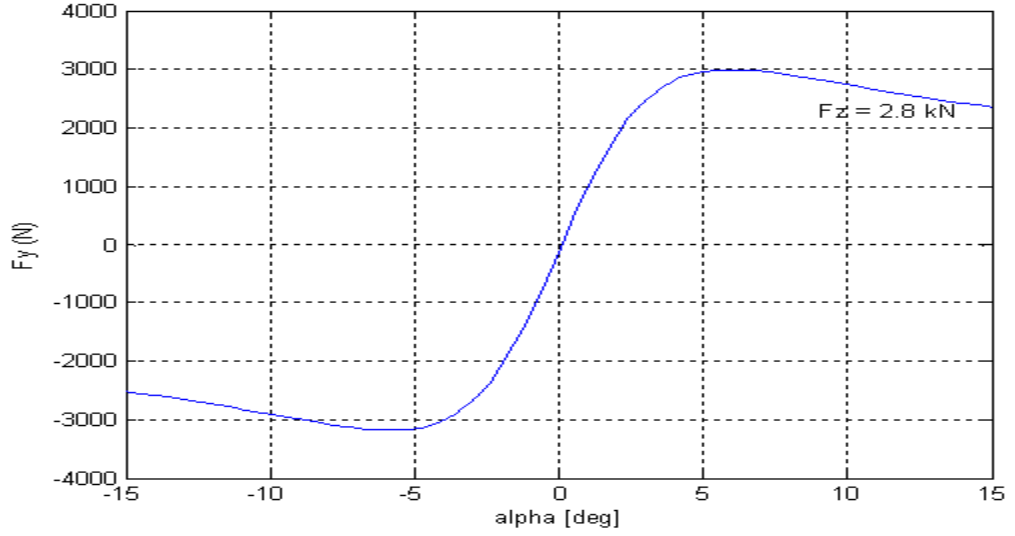
Şekil 3.3 Boyuna tekerlek kuvvetinin tekerlek kayma değerine göre değişimi

Şekil 3.3’den görüldüğü üzere boyuna tekerlek kuvveti tekerlek kayma değerinin belli değerin altında olduğu durumda kayma değeri ile doğrusal olarak değişmektedir. Bu durumda boyuna tekerlek kuvveti aşağıda verildiği şekilde modellenebilir.

$$F_{xf} = C_f s_{xf} \quad (3.8)$$

$$F_{xr} = C_r s_{xr} \quad (3.9)$$

Burada C_f ve C_r parametreleri boyuna tekerlek sertliği (longitudinal tire stiffness) olarak adlandırılmakta ve tekerlek boyuna kuvvetleri ve tekerlek kayma değeri arasındaki doğrusal ilişki tanımlanmaktadır.



Şekil 3.4 Yanal tekerlek kuvvetinin tekerlek kayma açısı ile değişimi

Şekil 3.4’de görüldüğü üzere yanal tekerlek kuvveti küçük tekerlek kayma açısı değerleri için tekerlek kayma açısı ile doğrusal değişim göstermektedir. Doğrusal tekerlek modelinde tekerlek yanal kuvvetleri tekerlek yanal kayma açısının sabit katsayı ile çarpımı sonucu elde edilir. Bu katsayı, ön ve arka tekerlekler için ayrı ayrı tanımlanmaktadır.

$$F_{yf} = C_f \alpha_{xf} \quad (3.10)$$

$$F_{yr} = C_r \alpha_{xr} \quad (3.11)$$

Burada C_f ve C_r parametreleri dönüş sertliği (cornering stiffness) olarak adlandırılmakta ve tekerlek kuvvetleri ve tekerlek kayma değeri arasındaki doğrusal ilişki tanımlanmaktadır.

Doğrusal tekerlek modeli küçük tekerlek kayma değerleri ve küçük tekerlek kayma açısı değerleri için iyi sonuç vermektedir. Bu nedenle tekerlek kayma değeri ve

tekerlek kayma açısının büyük olduğu durumlar için başka tekerlek modelleri geliştirilmiştir.

3.3.3 Pajecka tekerlek modeli

Doğrusal tekerlek modelinin küçük tekerlek kayma değerleri ve küçük tekerlek kayma açısı değerleri için doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Pacejka tekerlek modeli (Magic Tire Formula) tekerlek boyuna ve yanal kuvvetlerini büyük tekerlek kayma değerleri ve büyük tekerlek kayma açısı değerleri için doğru şekilde modelleyebilen doğrusal olmayan bir tekerlek modelidir. Pajecka tekerlek modeli deneysel olarak tekerlek kuvvet verilerini doğrusal olmayan bir eğriye uyduran geniş kullanım alanı bulmuş tekerlek modelidir. Aşağıda boyuna tekerlek kuvvetleri ve yanal kuvvetleri için oluşturulmuş denklemler görülmektedir.

Pajecka boyuna tekerlek modeli

$$F_x(s) = D \sin \left[C \arctan \left(B(s + S_h) - E \left(B(s + S_h) - \arctan \left(B(s + S_h) \right) \right) \right) \right] + S_v \quad (3.12)$$

Burada B, C, D, E, S_v ve S_h tekerlek dikey kuvvetine ve tekerlek kambar açısına bağlı birimsiz katsayılarıdır[17]. Bu katsayılar deneysel testler sonucunda belirlenmektedir ve hiçbir fiziksel anlamım bulunmamaktadır. Aşağıda bu katsayıları ifade eden denklemler verilmiştir.

$$C = b_0 \quad (3.13)$$

$$D = \mu_p F_z \quad (3.14)$$

$$\mu_p = b_1 F_z + b_2 \quad (3.15)$$

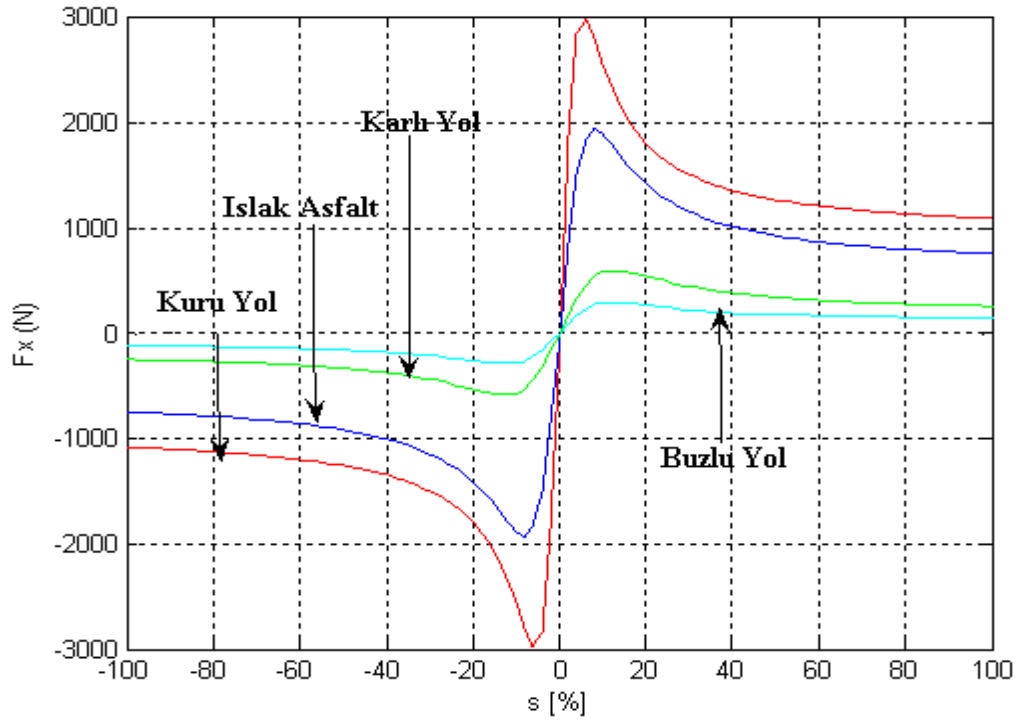
$$BCD = (b_3 F_z^2 + b_4 F_z) e^{-b_5 F_z} \quad (3.16)$$

$$E = b_6 F_z^2 + b_7 F_z + b_8 \quad (3.17)$$

$$S_h = b_9 F_z + b_{10} \quad (3.18)$$

$$S_v = 0 \quad (3.19)$$

D katsayısı boyuna tekerlek kuvvetinin en büyük değerini ifade etmektedir. C katsayısı şekil faktörü, B katsayısı sertlik faktörü, D katsayısı eğrilik faktörü, E katsayısı eğrilik faktörü, S_v dikey öteleme ve S_h yatay öteleme olarak tanımlanmaktadır. BCD katsayısı tekerlek kuvvetinin orijindeki eğimini tanımlamaktadır. BCD katsayısı doğrusal tekerlek modelindeki sertlik parametresine karşılık gelmektedir. Pacejka boyuna tekerlek modelindeki katsayılar b_i katsayıları ile tanımlanmaktadır. Bu katsayılar özel olarak bir tekerleğe dayanmakta ayrıca bu katsayılar hız ve yol koşullarına göre değişim göstermektedir. Şekil 3.5’de değişik yol koşulları için Pajeka tekerlek modeli (Magic Tire Formula) ile üretilmiş boyuna tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma değeri ile değişimi görülmektedir.



Şekil 3.5 Değişik yol koşulları için boyuna tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma değeri ile değişimi

Pajeka yanal tekerlek modeli

$$F_y(\alpha) = D \sin \left[C \arctan \left(B(\alpha + S_h) - E \left(B\alpha - \arctan \left(B(\alpha + S_h) \right) \right) \right) \right] + S_v \quad (3.20)$$

Pajeka yanal tekerlek modeli tekerlek kayma açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Yanal tekerlek kuvvetini ifade eden denklemdeki parametreler aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.

$$C = a_0 \quad (3.21)$$

$$D = \mu_{y_p} F_z \quad (3.22)$$

$$\mu_{y_p} = a_1 F_z + a_2 \quad (3.23)$$

$$E = a_6 F_z + a_7 \quad (3.24)$$

$$BCD = a_3 \sin \left[2 \arctan \left(\frac{F_z}{a_4} \right) \right] (1 - a_5 |\gamma|) \quad (3.25)$$

$$S_h = a_8 \gamma + a_9 F_z + a_{10} \quad (3.26)$$

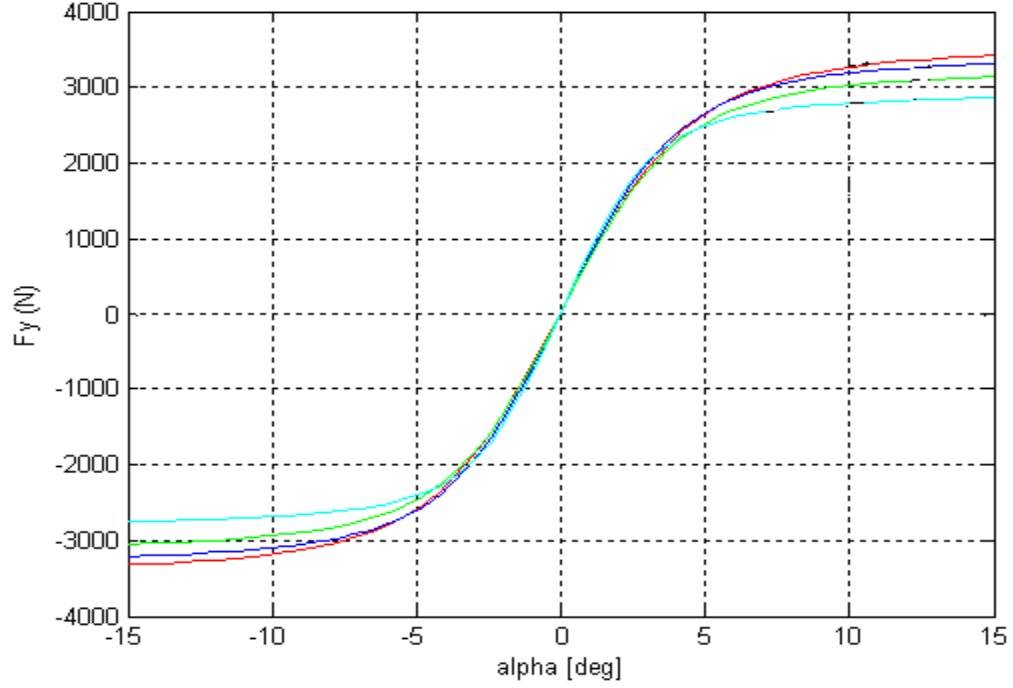
$$S_v = a_{11} \gamma F_z + a_{12} F_z + a_{13} \quad (3.27)$$

D katsayısı boyuna tekerlek kuvvetinin en büyük değerini ifade etmektedir. BCD katsayısı tekerlek kuvvetinin orijindeki eğimini tanımlamaktadır. BCD katsayısı doğrusal tekerlek modelindeki dönüş sertliği parametresine karşılık gelmektedir. Pacejka boyuna tekerlek modelindeki katsayılar a_i katsayıları ile tanımlanmaktadır. Bu katsayılar özel olarak bir tekerleğe dayanmakta ayrıca bu katsayılar hız ve yol koşullarına göre değişim göstermektedir Şekil 3.6’de değişik yol koşulları için Pajecka tekerlek modeli (Magic Tire Formula) ile üretilmiş yanıl tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma açısı ile değişimi görölmektedir

3.3.4 Dugoff tekerlek modeli

Dugoff tekerlek modeli boyuna ve yanıl kuvvetleri beraber modelleyebilen analitik olarak geliştirilmiş bir tekerlek modelidir. Dugoff tekerlek modeli boyuna ve yanıl kuvvetlerinin hesaplanmasında ayrı olarak boyuna ve yanıl dönüş sertliği parametrelerinin kullanılmasına izin vermektedir.

Dugoff tekerlek modeli, temel olarak tekerlek kuvvetlerini, kuvvet doğrultusundaki kayma değerine bağılı olarak hesaplamaktadır. Buna göre, tekerlek üzerindeki boyuna ve yanıl kuvvet, tekerleğin boyuna ve yanıl yöndeki kayma değerinin bir fonksiyonudur. Aşağıda Dugoff tekerlek modeline ait boyuna ve yanıl kuvvet denklemleri görölmektedir.



Şekil 3.6 Değişik yol koşulları için yanal tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma açısı ile değişimi

$$F_{xi} = f_i \cdot C_{xi} \cdot s_{xi} \quad (3.28)$$

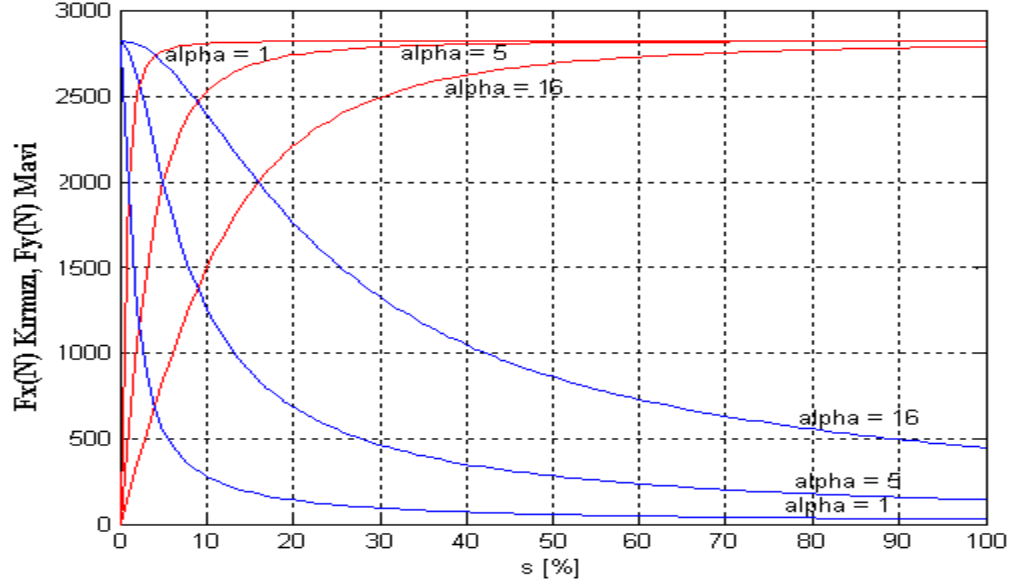
$$F_{yi} = f_i \cdot C_{yi} \cdot \alpha_i \quad (3.29)$$

Burada F_{xi} , tekerlek koordinat eksenine göre tekerlek üzerindeki boyuna kuvvet, s tekerlek boyuna kayma değeri, F_{yi} , tekerlek koordinat eksenine göre tekerlek yanal tekerlek kuvvet, α tekerlek yanal kayma değeri, C_{xi} ve C_{yi} dönüş sertliği katsayılarıdır. f ise boyuna ve yanal kayma değerlerine, tekerlek üzerindeki dikey kuvvete, boyuna ve yanal doğrultudaki, boyuna ve yanal dönüş sertliği katsayısı ve sürtünme katsayısına göre hesaplanan bir parametredir.

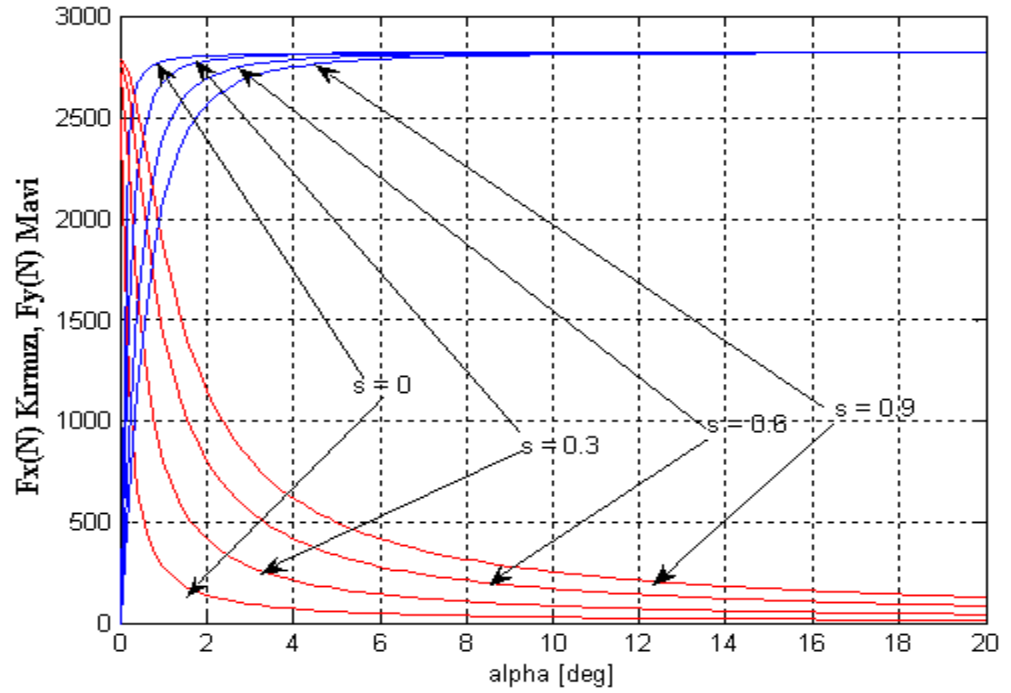
$$f_i = \begin{cases} 1, & F_{R_i} \leq \frac{\mu_i F_{Z_i}}{2} \\ \left(2 - \frac{\mu_i F_{Z_i}}{2 F_{R_i}}\right) \frac{\mu_i F_{Z_i}}{2 F_{R_i}}, & F_{R_i} > \frac{\mu_i F_{Z_i}}{2} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$F_{R_i} = \sqrt{(C_{xi} s_i)^2 + (C_{yi} \alpha_i)^2} \quad (3.31)$$

Şekil 3.7 ‘de farklı tekerlek kayma açıları için tekerlek boyuna ve yanal kuvvetlerinin tekerlek kayma oranı ile değişimi görülmektedir. Şekil 3.8 ‘de farklı tekerlek kayma oranları için tekerlek boyuna ve yanal kuvvetlerinin tekerlek kayma açısı ile değişimi görülmektedir



Şekil 3.7 Boyuna ve yanal tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma oranına göre değişimi



Şekil 3.8 Boyuna ve yanal tekerlek kuvvetlerinin tekerlek kayma açısına göre değişimi

4. KALMAN SÜZGEÇİ

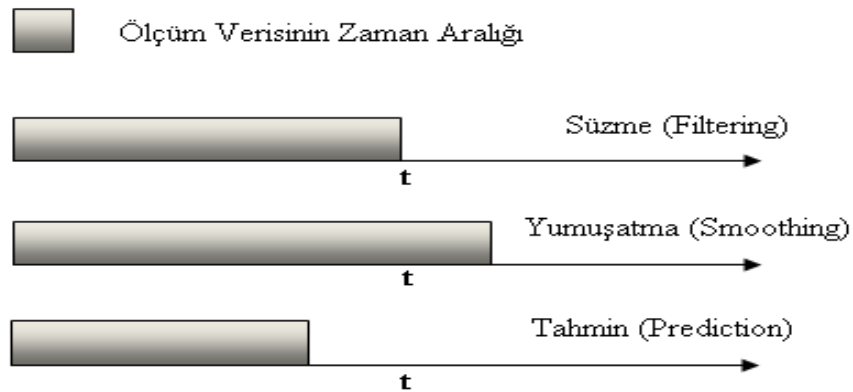
4.1 Giriş

Bu bölümde doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerin analizinde kullanılan Kalman süzgeci algoritması detaylı olarak tanıtılacaktır.

Kalman süzgeci ilk olarak 1960 yılında Rudolf Kalman ve Bucy tarafından tanıtılmıştır. Kalman süzgeci yinelemeli yapısı sayesinde belirli sistemler için en uygun olduğundan geniş kullanım alanı bulmuştur. Kalman süzgecinin en uygun olduğu sistemler doğrusal zamanla değişmeyen ve beyaz gauss gürültülü sistemlerdir.

4.2 Kestirimin Temelleri

Kestirim algoritmaları üç değişik biçimde ele alınmaktadır. Ölçülen sistem verisi ile kestirim noktası aynı noktayı ifade ediyorsa ise bu algoritma süzme (filtering) adını alır. Kestirim noktası elde edilen ölçüm verisinin zaman aralığında kalıyorsa bu algoritma yumuşatma (smoothing) adını alır. Eğer kestirim noktası ölçüm verisinin zaman aralığının dışında ise bu algoritma tahmin (prediction) adını alır. Şekil 4.1’de yukarıda açıklanan kestirim biçimleri gösterilmektedir. Şekil 4.1’de kestirimler t anında yapılmaktadır. Bu çalışmada bu kestirim algoritmalarından süzme (filtering) algoritması kullanılacaktır.

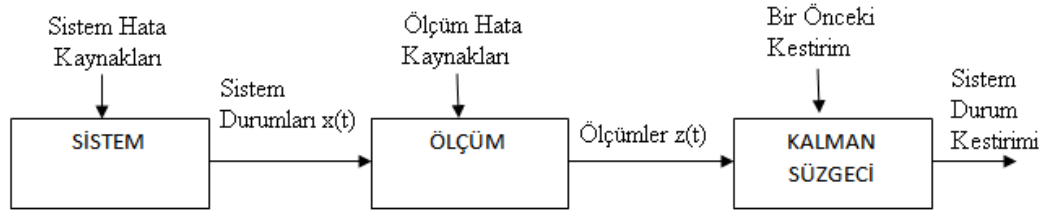


Şekil 4.1 Kestirim algoritmaları türleri [18]

4.3 Kalman Süzgecinin Tanıtımı

Elektronik devrelerde süzgeç terimi, istenmeyen gürültülerin, çıkışta istenilen işaretten ya da sisteme alınan işaretlerden ayrıştırılması anlamında kullanılmaktadır. Kalman Süzgeci, gürültülü verilerden, sistem çıkışında doğru bilgi elde edilmesinde kullanılır. Bu algoritmanın süzgeç olarak nitelendirilmesinin nedeni, çıkışta elde edilen verilerin giriş işaretlerindeki gürültülerden ayrıştırılarak doğru bir şekilde elde edilmesini sağladığı içindir.

Kalman süzgeci genel olarak sistemden alınan ölçüm verilerinin nasıl işleneceğini tanımlamakatadır. Bu tanımlamayı yaparken sistem ve ölçüm modeline, sistem ve ölçüm hatalarını karakterize eden istatistiksel modellere ve sistemin başlangıç koşullarına ihtiyaç duymaktadır. Şekil 4.2’de Kalman süzgecinin örnek bir sisteme uygulanmış hali görülmektedir.



Şekil 4.2 Tipik kalman süzgeci yapısı

Kalman süzgeci doğrusal zamanla değişmeyen sistemlere uygulandığında en uygun sonucu vermektedir. Doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için durum-uzay modeli ayrık zaman fark denklemlerinden elde edilir. Doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için sistem ve ölçüm durum-uzay modeli aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.1)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 sistemin fiziksel durumunu ifade eder. Denklem 4.2 ise sistem durumlarının ölçümü ile ilgilidir.

Yukarıdaki denklemlerde A nxn boyutunda durum geçiş matrisi, B nxl boyutunda kontrol matrisi, H ise sistem durumlarından alınan ölçüm miktarına boyutu değişen ölçüm matrisidir. Bu matrisler ayrık zaman indeksinden bağımsızdır.

Sistem modelinde görülen w_k sisteme eklenen gürültüyü ifade etmektedir. Ayrıca ölçüm denkleminde görülen v_k ise ölçüm gürültüsü olarak tanımlanmıştır. Kalman döngüsünün kurulabilmesi ve en uygun kestirimlerin elde edilebilmesi için bu gürültüler için çeşitli varsayımlarda bulunulmuştur.

Gürültü süreçleri w_k ve v_k bağımsız sıfır ortalamalı normal dağılım süreçleridir.

Aşağıda gürültü süreçlerinin istatistiksel özellikleri verilmiştir.[19]

$$E[w_k] = 0 \quad (4.3)$$

$$E[w_j w_k^T] = Q \delta_{jk} \quad (4.4)$$

$$E[v_k] = 0 \quad (4.5)$$

$$E[v_j v_k^T] = R \delta_{jk} \quad (4.6)$$

$$E[w_j v_k^T] = 0 \quad (4.7)$$

Denklem 4.4 ve 4.6 'da görülen Kronecker Delta işlevi aşağıdaki gibidir

$$\delta_{jk} = \begin{cases} j = k, 1 \\ j \neq k, 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Q sistem gürültüsü kovaryans matrisi, R ise ölçme gürültüsü kovaryans matrisidir. Bu matrisler köşegensel matrislerdir. Kovaryans matrisleri gürültüde mevcut olan gücü temsil etmektedir. Sistem gürültüsü ile ölçme gürültüsü arasında herhangi bir ilişki yoktur.

Şekil 4.3'de Kalman süzgecinin zaman ve ölçme güncelleme denklemleri içerisinde kullanılan durum kestirim ve hata kovaryanslar ifadeierinin zamana bağlı olarak nasıl hesaplandığı gösterilmiştir. Şekilde kullanılan ifadeler aşağıda açıklanmıştır.

$\hat{x}_{k-1}^-$: (k-1) anındaki ölçüm değeri kullanılmadan elde edilen kestirim değeri

$\hat{x}_{k-1}^+$: (k-1) anındaki ölçüm değeri kullanılmadan elde edilen kestirim değeri

P_{k-1}^- : (k-1) anındaki ölçüm değeri kullanılmadan elde edilen hata kovaryans matrisi

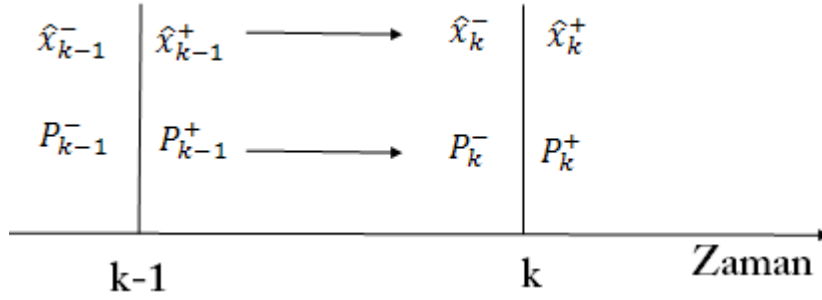
P_{k-1}^+ : (k-1) anındaki ölçüm değeri kullanılarak elde edilen hata kovaryans matrisi

$\hat{x}_k^-$: (k) anındaki ölçüm değeri kullanılmadan elde edilen kestirim değeri

$\hat{x}_k^+$: (k) anındaki ölçüm değeri kullanılmadan elde edilen kestirim değeri

P_k^- : (k) anındaki ölçüm değeri kullanılmadan elde edilen hata kovaryans matrisi

P_k^+ : (k) anındaki ölçüm değeri kullanılarak elde edilen hata kovaryans matrisi



Şekil 4.3 Durum kestirimlerinin ve hata kovaryanslarının zaman çizelgesindeki görünümü

Kalman süzgeci, kestirim değerleri ve gerçek değerler arasındaki fark olarak tanımlanan kestirim hatasını en aza indirmek için çalışmaktadır. Kestirim hataları aşağıdaki denklemler ile verilmiştir. $\tilde{x}$ gösterilen değişken durumların gerçek değeri ile kestirim değeri arasındaki fark olarak tanımlanan hatayı, $\hat{x}$ ile gösterilen değişken ise durum kestirimlerini ifade etmektedir.

$$\tilde{x}_k^- = x_k - \hat{x}_k^- \quad (4.9)$$

$$\tilde{x}_k^+ = x_k - \hat{x}_k^+ \quad (4.10)$$

Hata kovaryansları kestirim hatalarının beklenen büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. Hata kovaryansları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_k^- = E[\tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T}] \quad (4.11)$$

$$P_k^+ = E[\tilde{x}_k^+ \tilde{x}_k^{+T}] \quad (4.12)$$

Kalman süzgecinde en aza indirilecek hata güncelleştirilmiş kestirimler sonunda elde edilen hatadır. Kalman süzgecinde güncelleştirme işlemi Denklem (4.13) ile aşağıda verilmiştir.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K[z_k - H\hat{x}_k^-] \quad (4.13)$$

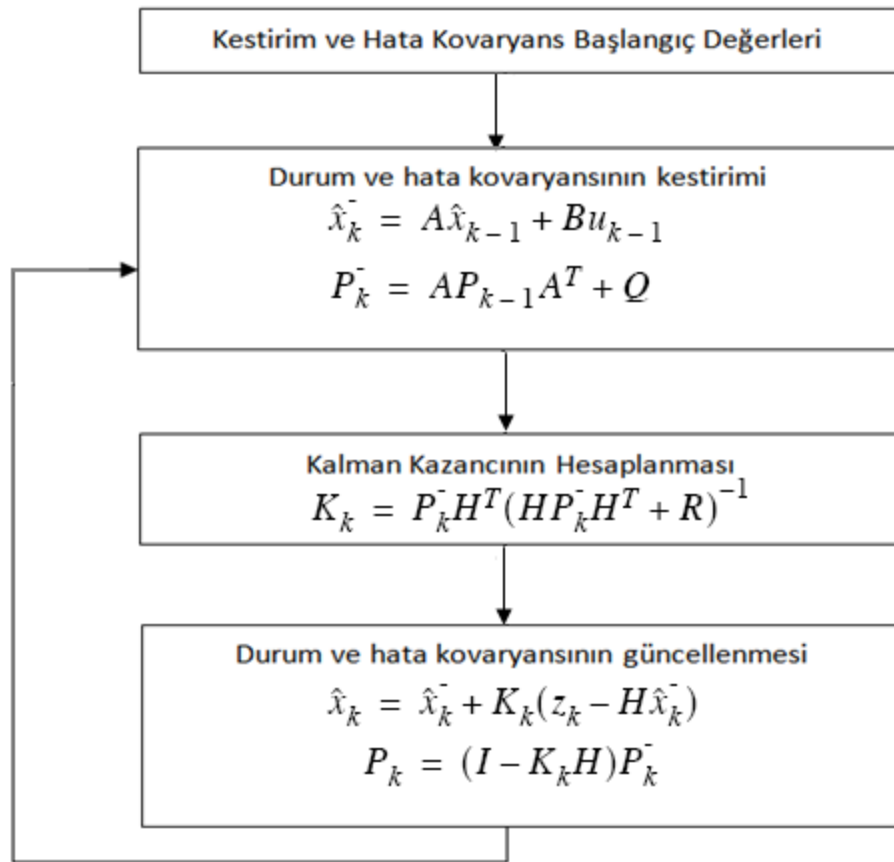
Denklem (4.13)'de görülen K Kalman kazanç matrisini temsil etmektedir. Kestirimin güncelleştirilmesi için Kalman kazanç matrisinin değeri belirlenmelidir. Kalman kazanç matrisi güncelleştirilmiş hata kovaryansını en aza indiren değerdir. En uygun Kalman kazancını bulmak için [1] ve [2] de görülebileceği gibi çeşitli işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemler sonucunda Kalman kazancının en uygun değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (4.14)$$

Kalman süzgeci her bir çevrimde detaylı bir hata analizi yaparak en uygun Kalman kazancını hesaplamaktadır. Kalman süzgecinin denklemleri yinmeli yapıdadır.

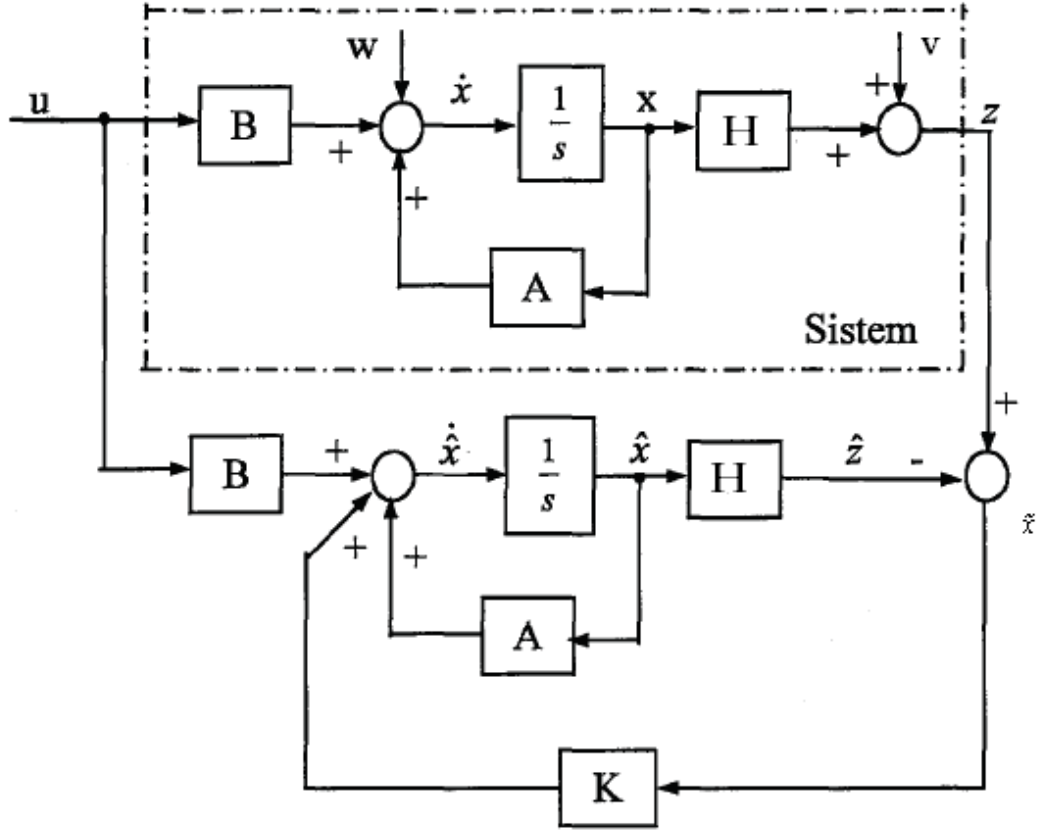
Kalman süzgeci döngüsünün başlatılabilmesi için başlangıç kestirimine ve başlangıç hata kovaryansına ihtiyaç duyulmaktadır. Kestirim sonuçlarının sağlıklı olması için başlangıç değerlerinin belirlenmesinde dikkatli olunmalıdır. Şekil 4.3’de Kalman süzgeci algoritmasının aşamaları görülmektedir.

Kalman süzgeci algoritması iki temel kısımdan oluşmaktadır. Kalman süzgeci algoritmasının birinci kısımda sistemin başlangıç değerlerine ya da sistemin bir önceki değerlerini dikkate alarak bir sonraki adımın kestirimi yapılmaktadır. İkinci kısımda ise elde edilen ölçüm verileri ile kestirim sonuçları düzeltilmektedir.



Şekil 4.4 Kalman süzgeci algoritması

Bahsedilen kestirim ve düzeltim işlemleri Kalman süzgecinin temelini oluşturmaktadır. İlk olarak sistem modeli kullanılarak sistem durumlarının kestirimi gerçekleştirilir. Daha sonra sistemin ölçüm modeli kullanılarak kestirimdeki hata düzeltilerek bir adım sonraki kestirimi yapılmaktadır. Şekil 4.4’de Kalman süzgecinin yapısı görülmektedir.



Şekil 4.5 Kalman süzgecinin yapısı

4.4 Genişletilmiş Kalman Süzgeci

Kalman süzgeci doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerde en uygun kestirim sonuçları vermektedir. Ancak gerçek yaşamda karşılaşılan sistemlerin çoğu doğrusal olmayan sistemlerdir. Doğrusal olmayan sistemlerde en uygun kestirimler elde edebilmek için Kalman süzgeci algoritmasının yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Kalman süzgecinin doğrusal olmayan sistemlere uygulanmasının dezavantajı bulunmaktadır. Kalman süzgeci doğrusal olmayan sistemlerde çok fazla zaman harcamaya gerektirir. Durum ve ölçüm matrisi her çevrimde değiştiğinden bu matrislerin her çevrimde güncellenmesi gerekmektedir. Kalman süzgecinin doğrusal olmayan sistemlere uygulanabilmesi için çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmaktadır. Sistem ve ölçüm fonksiyonları mevcut kestirim etrafında Taylor serisi yaklaşımı ve kısmi türevler kullanılarak doğrusallaştırılmaktadır. Doğrusal olmayan sistemlere uygulanan Kalman süzgeci genişletilmiş Kalman süzgeci ismini almıştır. Doğrusal olmayan sistem ve ölçüm modeli aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (4.15)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (4.16)$$

Denklem (4.15) sistemin fiziksel modelini ve denklem (4.16) sistem durumlarının ölçümü ile ilgilidir. Sistem modelinde görülen w_k sisteme eklenen gürültüyü ifade etmektedir. Ayrıca ölçüm denkleminde görülen v_k ise ölçüm gürültüsü olarak tanımlanmıştır.

Denklem (4.15) ve (4.16) ile verilen doğrusal olmayan sistem ve ölçüm denklemlerinin, mevcut kestirim etrafında Taylor serisine açılarak doğrusallaştırılmış hali denklem (4.17) ve (4.18) ile verilmiştir.

$$x_k \approx \tilde{x}_k + A(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + Ww_{k-1} \quad (4.17)$$

$$z_k \approx \tilde{z}_k + H(x_k - \tilde{x}_k) + Vv_k \quad (4.18)$$

x_k ve z_k sırasıyla mevcut durum ve ölçüm vektörlerini $\tilde{x}_k$ ve $\tilde{z}_k$ yaklaşık durum ve ölçüm vektörlerini ifade etmektedir. $\hat{x}_k$ k anındaki durum kestirimlerini göstermektedir. A, W, H ve V matrisleri çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmış matrislerdir. Bu matrislerin doğrusallaştırma ifadeleri (4.19), (4.20), (4.21) ve (4.22) aracılığıyla verilmiştir.

A matrisi f fonksiyonunun x 'e göre kısmi türevlerinin Jacobian matrisidir.

$$A_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (4.19)$$

W matrisi f fonksiyonunun w 'e göre kısmi türevlerinin Jacobian matrisidir.

$$W_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (4.20)$$

H matrisi h fonksiyonunun x 'e göre kısmi türevlerinin Jacobian matrisidir.

$$H_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\tilde{x}_k, 0) \quad (4.21)$$

V matrisi h fonksiyonunun v 'e göre kısmi türevlerinin Jacobian matrisidir.

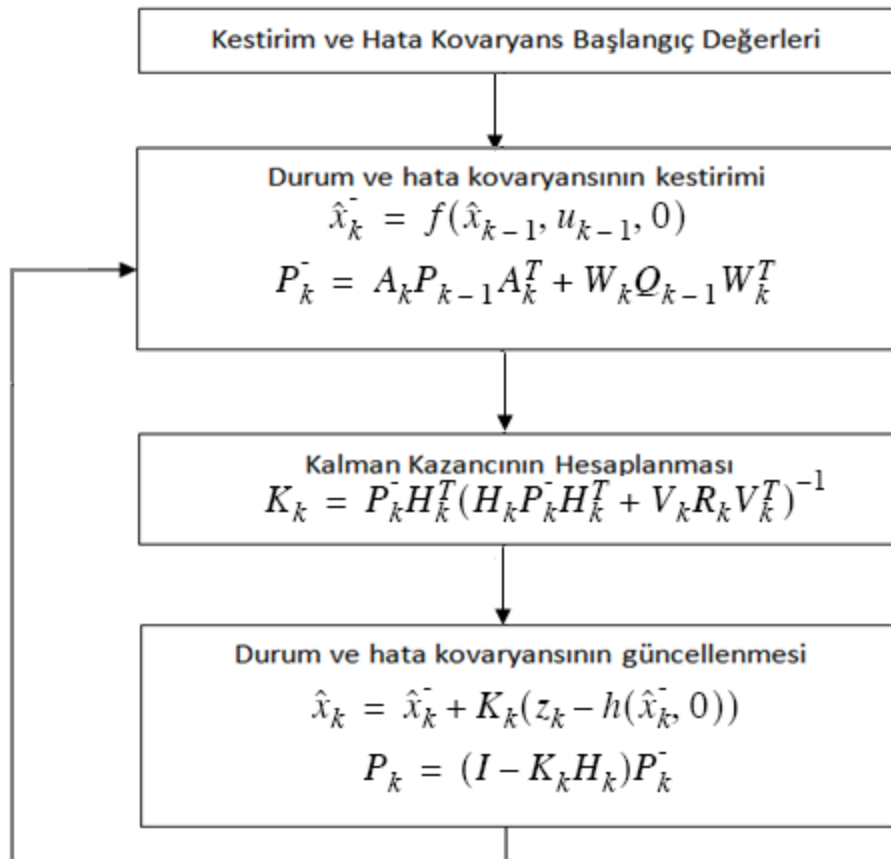
$$V_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\tilde{x}_k, 0) \quad (4.22)$$

Genişletilmiş Kalman süzgecinin denklemleri Kalman süzgeci ile benzerlik göstermektedir sadece gürültü kovaryans matrislerinin hesaplanmasında ve kullanılan matrislerin her çevrimde güncelleştirilmesi yönünden farklılık

bulunmaktadır. Kalman süzgeci algoritmasına benzer şekilde Şekil 4.5’de Genişletilmiş Kalman süzgeci algoritması görülmektedir.

Şekil 4.5’de Genişletilmiş Kalman süzgecinin yinelemeli yapısı başlanıç koşulları ve kestirim hata kovaryansı ile başlatılmaktadır. Durum kestirimleri ve hata kovaryansları doğrusallaştırılmış sistem ve ölçüm matrisleri ile hesaplanmaktadır. Hata kovaryansları kullanılarak Kalman kazancı hesaplanmaktadır. Uyarlamalı olarak hesaplanan Kalman kazancı yapılan gözlemler ile birlikte kestirimlerin güncellenmesinde kullanılmaktadır. Genişletilmiş Kalman süzgeci denklemleri ile sistem ve ölçüm gürültüsünün etkisi en aza indirgenerek gözlemlerden gelen veriler en iyi şekilde değerlendirilmeye çalışılmaktadır.

Genişletilmiş Kalman süzgeci doğrusal olmayan sistemlere uygulanan Kalman süzgeci türevidir. Büyük oranda Kalman süzgecine benzemektedir. Sadece soğrusal olmayan sistem ve ölçüm denklemleri mevcut kestirim etrafında doğrusallaştırılmaktadır. Genişletilmiş Kalman süzgeci en iyi sonucu veren alt bir süzgeçtir. Dikkatli seçilen başlanıç koşulları ve hatasız şekilde gerçekleştirilen doğrusallaştırmalar ile genişletilmiş Kalman süzgeci etkili sonuçlar verebilmektedir.



Şekil 4.6 Genişletilmiş Kalman süzgeci algoritması

5. TEKERLEK YOL SÜRTÜNME KATSAYISI KESTİRİMİ

5.1 Giriş

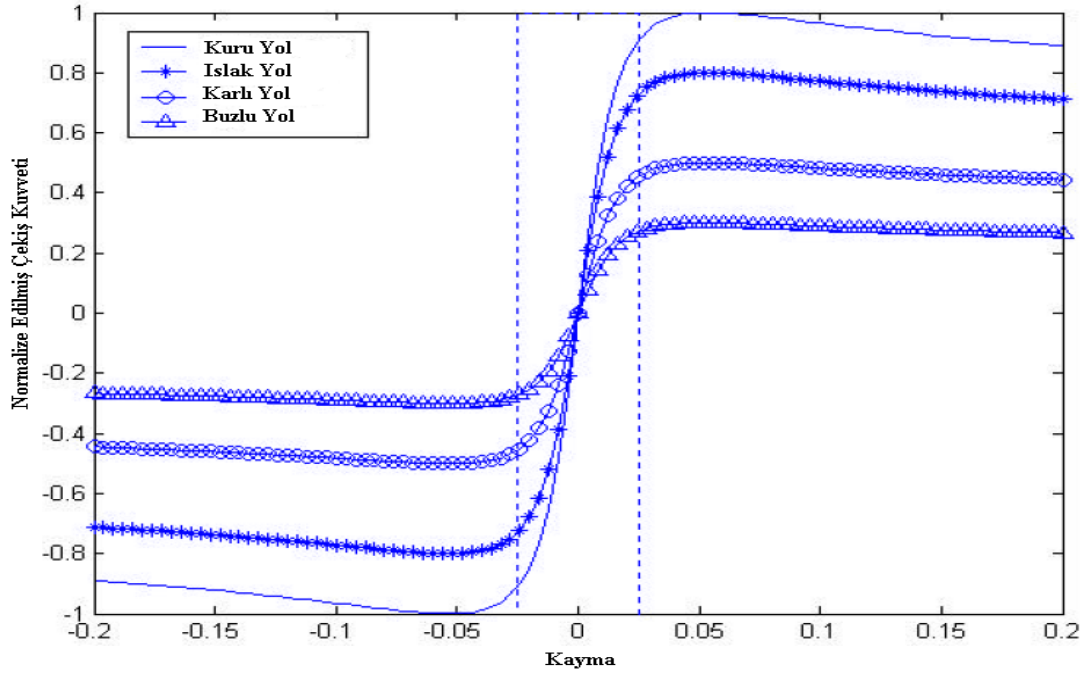
Bu bölümde araçların kararlılığında ve yol tutuşlarını etkileyen en önemli faktör alan tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirimi anlatılacaktır.

Tekerlek yol etkileşimi, araç dinamiği ve kontrolü açısından büyük önem taşımaktadır. Aracın motorun tarafından oluşturulan tork çeşitli aşamalardan geçerek tekerleklere kuvvet olarak aktarılmaktadır. Oluşturulan bu tekerlek kuvvetleri tekerlek yol etkileşiminde çok önemlidir. Tekerlek kuvvetlerinin maksimum büyüklüğü tekerlek üzerindeki oluşan yük değeri için tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısı tarafından belirlenmektedir.

Birçok araç kontrol sistemi, özellikle adaptif seyir sistemleri (ACC), kilitlenmeye karşı fren sistemleri (ABS), çekiş kontrol sistemleri (TCS), çarpışma engelleyici ve uyarıcı sistemler ve araç kararlılık sistemleri gibi aktif güvenlik sistemleri tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısı bilgisi ile daha etkin sonuçlar vermektedir. Gerçek zamanda elde edilen tekerlek yol sürtünme bilgisi ile araç kontrol sistemleri yola uyumlu hale gelmekte ve algoritmalarını yol durumlarına göre değiştirmektedir. Örnek olarak adaptif seyir sistemlerinde (ACC), araçlar arasındaki uygun mesafenin belirlenmesinde tekerlek yol sürtünme bilgisi kullanılabilir.

Bu çalışmada tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimi için kaynak taraması kısmında anlatılan kestirim yöntemlerinden kayma tabanlı kestirim yöntemi kullanılmıştır. Tekerlek normalize edilmiş kuvveti, araç yanal hareketini ihmal ettiğimiz durumda boyuna tekerlek kuvvetinin tekerlek üzerindeki dikey kuvvete oranlanması ile edilir. Normalize edilmiş tekerlek kuvveti tekerlek kayma değerinin bir fonksiyonudur. Değişik yol durumları için normalize edilmiş tekerlek kuvvetleri farklılık göstermektedir. Normalize edilmiş tekerlek kuvveti, tekerlek kuvvetinin kritik bir değerine kadar artış göstermektedir. Normalize edilmiş tekerlek kuvveti maksimum değerine ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bu durumda Şekil 5.1’de

görüldüğü üzere normalize edilmiş çekiş kuvvetinin tekerlek kayma değeri ile değişiminde doğrusal ve doğrusal olmayan iki kısım mevcuttur. Kayma tabanlı tekerlek sürtünme katsayısı kestirimi normalize edilmiş çekiş kuvvetinin doğrusal bölgesindeki, çekiş kuvveti ile kayma arasındaki doğrusal ilişkiyi tahmin ederek sürtünme bilgisine ulaşmaktadır. Bu doğrusal ilişkiden elde edilen eğim değeri gerekli dönüşümler yapılarak tekerlek yol sürtünme bilgisi elde edilmektedir.

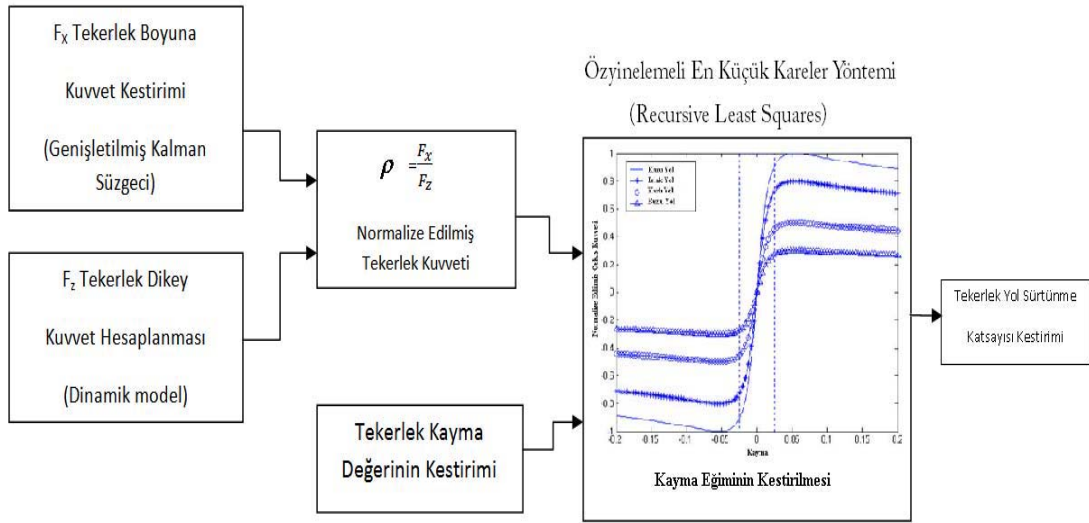


Şekil 5.1 Normalize edilmiş tekerlek çekiş kuvveti – kayma değişimi

Bu çalışmada ilk olarak araç durumları ve boyuna tekerlek kuvvetleri genişletilmiş Kalman süzgeci algoritması ile kestirilmiştir. Tekerlekler üzerindeki dikey kuvvetler dinamik bir model kullanılarak hesaplanmıştır. Tekerlek boyuna kuvvetleri dikey kuvvetlere oranlanarak normalize edilmiş çekiş kuvveti elde edilmiştir. İkinci aşamada ise tekerlek kayma değeri kestirilmiştir. İlk olarak genişletilmiş Kalman süzgeci ile kestirilen araç durumları kullanılarak kayma açısı kestirilmiştir. Elde edilen kayma açısı ile tekerlek kayma değeri tespit edilmiştir. Son olarak düşük kayma değerleri için normalize edilmiş çekiş kuvveti ile kayma değeri arasındaki ilişki kullanılarak tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirilmektedir. Şekil 5.2 'de tekerlek yol sürtünme katsayısının kestiriminin tüm aşamaları gösterilmiştir.

Tezin bundan sonrası şu şekilde düzenlenmiştir. İlk olarak genişletilmiş Kalman süzgeci ile boyuna tekerlek kuvvetlerinin kestirimi anlatılmıştır. İkinci bölümde tekerlek üzerindeki dikey kuvvetlerinin hesaplanması anlatılmıştır. Üçüncü bölümde

kayma değerin kestirilmesi, dördüncü bölümde ise kayma eğiminin kestirilerek tekerlek yol sürtünme katsayısının elde edilmesi anlatılmıştır.



Şekil 5.2 Tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirim süreci

5.2 Tekerlek Boyuna Sürtünme Kuvvetlerinin Kestirilmesi

Kilitlenmeye karşı fren sistemleri (AntiBlock Braking Systems ABS), çekiş kontrol sistemleri (Traction Control Systems TCS), savrulma engelleyici sistemler gibi aktif araç kontrol sistemleri ani ve sert manevra, şerit değiştirme, sert frenleme gibi durumlarda araç durumlarının ve tekerlek sürtünme kuvvetlerinin bilgisini kullanarak araç hareket dinamiğini kontrol etmektedirler. Tekerlek sürtünme kuvvetleri, tekerlek kayma oranı ve tekerlek kayma açısı ile doğrusal olmayan bir şekilde değişim göstermektedirler. Aracın yol tutuş ve kararlılığı büyük ölçüde tekerlek sürtünme kuvvetlerine bağlıdır. Tekerlek sürtünme kuvvetleri aynı zamanda tekerlek-yol yüzey özellikleri, tekerlek hava basıncı, tekerlek yapısı ve aracın yükü gibi kontrol edilemeyen dış faktörlere bağlı olarak da değişmektedir. Tekerlek kuvvetleri, tekerlek kayma oranı, tekerlek kayma açısı ve tekerlek sürtünme kuvvetlerini etkileyen diğer dış faktörler kolaylıkla ölçülememektedir. Bu nedenle araç kontrol sistemlerinde tekerlek sürtünme kuvvetlerine ihtiyaç duyan analitik kontrol yöntemleri yerine büyük ölçüde deneysel çalışmalara dayanan kural tabanlı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Gelişmiş araç kontrol sistemleri olası tüm manevralarda aracın kararlılığını sağlamak için tekerlek sürtünme kuvvetlerinin ve araç durumlarının kestirimine ihtiyaç duymaktadır. Araç durumlarının ve tekerlek

sürtünme kuvvetlerinin mevcut araçlar üzerinde bulunan algılayıcılar ile kestirilmesi önemlidir.

Son yıllarda tekerlek sürtünme kuvvetleri ve tekerlek-yol sürtünme katsayısı kestirimi üzerine yapılan çalışmalar artış göstermiştir. Gustafsson [8], tekerlek-yol sürtünme katsayısını normal sürüş koşullarında kestirmek için çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma sürücüyü bilgilendirme, güvenli sürüş mesafesinin belirlenmesi ve adaptif seyir sistemleri için kullanışlıdır. L.Ray [20], araç boyuna ve yanal kuvvetlerini kestirmek için genişletilmiş Kalman süzgeci tabanlı kestirim yöntemi kullanmıştır. Yapılan çalışmada boyuna ivme, yanal ivme, tekerlek açısal hızları, savrulma hızı ve araca giriş olarak verilen direksiyon açısı ve fren tork bilgileri ölçüm olarak alınmıştır. Geliştirilen bu yöntem daha sonra benzetim verilerine ve deneysel verilere uygulanmıştır [13,21]. Behzad Semadi [22], sürtünme kuvvetlerinin kestirimde kullanılan genişletilmiş Kalman süzgecini nümerik olarak kararlı bir algoritma ile gerçekleştirmiştir. M.Aktaş [23], yaptığı çalışmada araç durumlarını ve boyuna tekerlek kuvvetlerini genişletilmiş Kalman süzgeci yöntemini kullanarak benzetim sonuçlarından kestirmiştir. Bu çalışma hesaplama kolaylığı, nümerik olarak kararlılık ve araç üzerindeki mevcut algılayıcıları kullanması gibi avantajlara sahiptir.

Bu çalışmada tekerlek boyuna sürtünme kuvvetleri genişletilmiş Kalman süzgeci kullanılarak araç kestirilmeye çalışılmıştır. Önerilen bu yaklaşım ile tekerlek modeli ve tekerlek-yol sürtünme katsayısı ile ilgili hiçbir bilgiye ihtiyaç duyulmadan araç durumları ve tekerlek sürtünme kuvvetleri kestirilmektedir. Kestirim süreçlerinde kullanılan tekerlek modelleri ile gerçek tekerlek yol etkileşimi arasında önemli farklar bulunduğundan bu yaklaşım önemli üstünlükler sağlamaktadır. Kestirimcinin analitik tasarımı için yedi serbestlik dereceli araç modeli kullanılmıştır. Benzetim sonuçları göstermektedir ki, geliştirilen genişletilmiş Kalman süzgeci araç durumlarının ve tekerlek sürtünme kuvvetlerinin kestirimi için etkili bir yöntemdir.

5.2.1. Çift izli araç modeli

Tekerlek boyuna sürtünme kuvvetlerinin kestirimi için geliştirilen genişletilmiş Kalman süzgecinde yedi serbestlik dereceli çift izli araç modeli Şekil 5.3’de görülmektedir. Araç modeli ana serbestlik dereceleri olarak boyuna hızı, yanal hızı

ve savrulma hızını içermektedir. Kalan diğer serbestlik dereceleri ise her bir tekerlek için tekerlek açısı ile ilgilidir.

Aşağıda araç hareket denklemleri verilmiştir.

Doğrusal yönde hareket dinamiği,

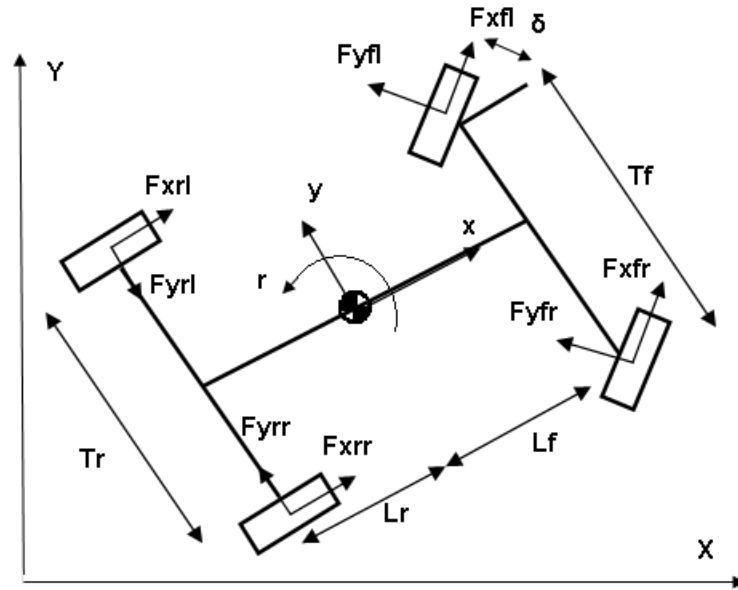
$$\dot{v}_x = v_y \cdot r + \frac{1}{m} [(F_{xfl} + F_{xfr}) \cos(\delta) - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin(\delta) + F_{xrl} + F_{xrr}] \quad (5.1)$$

Enlemsel hareket dinamiği,

$$\dot{v}_y = -v_x \cdot r + \frac{1}{m} [(F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos(\delta) + F_{yrl} + F_{yrr}] \quad (5.2)$$

Yerel düşey eksen üzerinde dönme dinamiği,

$$\dot{r} = \frac{1}{I_z} [L_f (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + L_f (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos(\delta) - L_r (F_{yrl} + F_{yrr}) - \frac{T_f}{2} (F_{xfl} - F_{xrl}) \cos(\delta) - \frac{T_f}{2} (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin(\delta) - \frac{T_r}{2} (F_{xrl} - F_{xrr})] \quad (5.3)$$



Şekil 5.3 Çift izli araç modeli

$$\dot{\omega}_{fl} = \frac{1}{I_{\omega}} (-R_{\omega} \cdot F_{xfl} - T b_{fl}) \quad (5.4)$$

$$\dot{\omega}_{fr} = \frac{1}{I_{\omega}} (-R_{\omega} \cdot F_{xfr} - T b_{fr}) \quad (5.5)$$

$$\dot{\omega}_{rr} = \frac{1}{I_{\omega}}(-R_{\omega} \cdot F_{xrr} - Tb_{rr}) \quad (5.6)$$

$$\dot{\omega}_{rl} = \frac{1}{I_{\omega}}(-R_{\omega} \cdot F_{xrl} - Tb_{rl}) \quad (5.7)$$

Denklemlerde geçen v_x ve v_y araç boyuna ve yanal hızını, r savrulma hızını göstermektedir. Alt indis olarak fl , ön sol, fr , ön sağ, rr , arka sağ ve rl , arka sol tekerleği belirtmek için kullanılmaktadır. ω_{fl} , ω_{fr} , ω_{rr} ve ω_{rl} her bir tekerlek için dönüş hızlarını Tb_{fl} , Tb_{fr} , Tb_{rr} ve Tb_{rl} her bir tekerleğe uygulanan fren tork değerlerini F_{xfl} , F_{xfr} , F_{xrr} ve F_{xrl} tekerlek boyuna kuvvetlerini F_{yfl} , F_{yfr} , F_{yrr} ve F_{yrl} tekerlek yanal kuvvetlerini temsil etmektedir. Araç boyuna ivmesi $a_x = \dot{v}_x - r \cdot v_y$ ve araç ağırlık merkezindeki yanal ivme $a_y = \dot{v}_y + r \cdot v_x$ şeklinde ifade edilmektedir.

5.2.2. Araç durumlarının ve tekerlek kuvvetlerinin kestirimi

Bu bölümde doğrusallaştırılmış araç hareket denklemleri kestirilecek tekerlek sürtünme kuvvetlerini içerecek şekilde düzenlenmiştir. Ölçüm olarak araç boyuna ivmesi, her bir aks için yanal ivme, savrulma hızı ve her bir tekerlek için tekerlek açısall hızları kullanılmıştır. Bunlara ek olarak sistem için giriş durumunda olan direksiyon açısı ve her bir tekerlek için fren tork değerleri ölçülerek sistem modelinde kullanılmıştır. Genişletilmiş Kalman süzgeci tekerlek sürtünme kuvvetlerini içeren sistem modeline uygulanarak araç durumları ve tekerlek sürtünme kuvvetleri kestirilmektedir.

Direksiyon açısı sıfır olduğu durumda, sadece her bir aks için toplam yanal kuvvetler araç hareket denklemlerinden kestirilebilmektedir. Bu nedenle araç hareket denklemleri her bir aks için toplam yanal kuvveti içerecek şekilde yeniden düzenlenmiştir.

$$F_{yf} = F_{yfl} + F_{yfr} \quad (5.8)$$

$$F_{yr} = F_{yrr} + F_{yrl} \quad (5.9)$$

$$\dot{v}_x = v_y \cdot r + \frac{1}{m}[(F_{xfl} + F_{xfr}) \cos(\delta) + F_{xrr} + F_{xrl} - F_{yf} \sin(\delta)] \quad (5.10)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \cdot r + \frac{1}{m}[(F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + F_{yf} \cos(\delta) + F_{yr}] \quad (5.11)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{L_z} [L_f (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + L_f F_{yf} \cos(\delta) - L_r F_{yr} - \frac{T_f}{2} (F_{xfl} - F_{xrl}) \cos(\delta) - \frac{T_f}{2} (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin(\delta) - \frac{T_r}{2} (F_{xrl} - F_{xrr})] \quad (5.12)$$

Durum vektörü $x(t) = [v_x \ v_y \ r \ \omega_{fl} \ \omega_{fr} \ \omega_{rr} \ \omega_{rl}]^T$ ve giriş vektörü $u(t) = [Tb_{fl} \ Tb_{fr} \ Tb_{rr} \ Tb_{rl}]^T$ şeklinde düzenlenmiştir. Bu çalışmada sistem girişi olan direksiyon açısı zamanla değişen parametre olarak kabul edilmiştir. Tekerlek sürtünme kuvvetlerini içeren vektör her bir tekerlek için boyuna kuvveti ve her bir aks için yanal kuvveti içermektedir $z(t) = [F_{xfl} \ F_{xfr} \ F_{xrr} \ F_{xrl} \ F_{yf} \ F_{yr}]^T$. Ölçüm vektörü $y(t) = [a_x \ a_{yf} \ a_{yr} \ r \ \omega_{fl} \ \omega_{fr} \ \omega_{rr} \ \omega_{rl}]^T$, boyuna ivme, her bir aks için yanal ivme, savrulma hızı ve her bir tekerlek için tekerlek açisal dönüş hızlarını içermektedir. Ön aks için yanal ivme $a_{yf} = a_y + L_f \cdot r$ ve arka aks için yanal ivme $a_{yr} = a_y - L_r \cdot r$ şeklinde ifade edilmektedir.

Durum vektörü her bir tekerlek kuvvetini kestirmek için tekerlek kuvvetlerini ifade eden diferansiyel denklemleri içerecek şekilde genişletilmiştir.

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_0 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} + w_y \quad (5.13)$$

y_0 kestirilecek tekerlek sürtünme kuvvetlerini, y_1 ve y_2 sırasıyla tekerlek sürtünme kuvvetlerinin birinci ve ikinci türevlerini ifade etmektedir. w_y beyaz rastgele gürültü vektörüdür.

Denklem (5.13) kestirim modeline eklenerek sonuç olarak 25. dereceden bir kestirim modeli elde edilmektedir. Genişletilmiş kestirim modeli denklem (5.17) ile verilmiştir. x_G orijinal sistem durumlarını ve kestirimi yapılacak tekerlek sürtünme kuvvetlerini içeren genişletilmiş durum vektörüdür. $z(t)$ kestirimi yapılacak tekerlek sürtünme kuvvetlerini içermektedir. G matrisi köşegen matristir. Şekil 5.4'de genişletilmiş Kalman süzgeci ile tekerlek kuvvetlerinin ve araç durumlarının kestirilmesine ait blok diyagram görülmektedir.

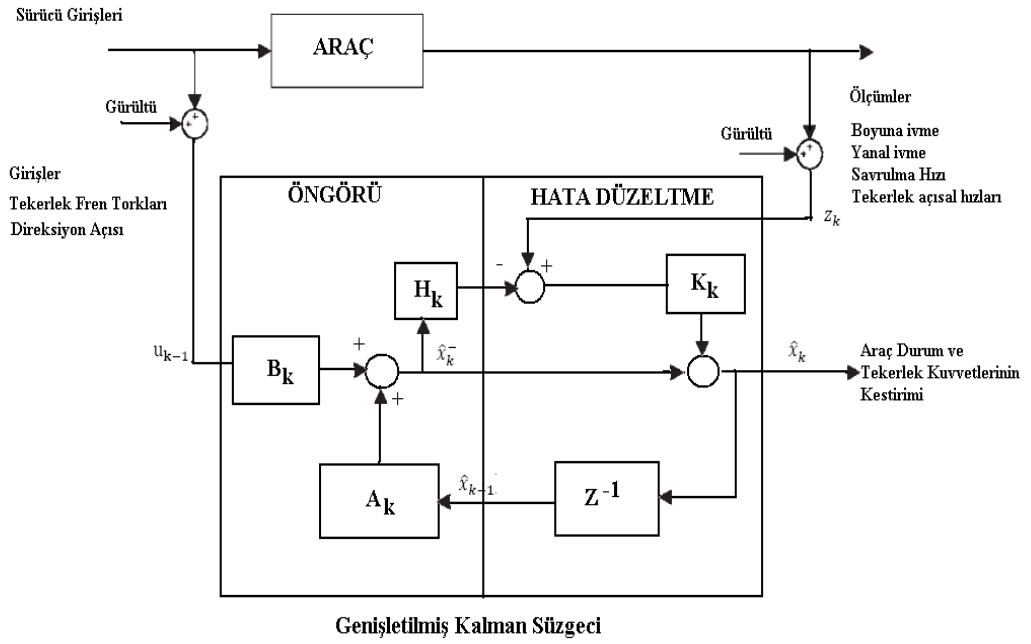
$$y_0 = [F_{xfl} \ F_{xfr} \ F_{xrr} \ F_{xrl} \ F_{yf} \ F_{yr}]^T \quad (5.14)$$

$$y_1 = [\dot{F}_{xfl} \dot{F}_{xfr} \dot{F}_{xrr} \dot{F}_{xrl} \dot{F}_{yf} \dot{F}_{yr}]^T \quad (5.15)$$

$$y_2 = [\ddot{F}_{xfl} \ddot{F}_{xfr} \ddot{F}_{xrr} \ddot{F}_{xrl} \ddot{F}_{yf} \ddot{F}_{yr}]^T \quad (5.16)$$

$$\dot{\hat{x}}_G = \begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{z}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\hat{x}(t), \hat{z}(t), u(t)) \\ G \hat{z}(t) \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

$$\hat{y}(t) = h_G(\hat{x}_G(t), u(t)) \quad (5.18)$$



Şekil 5.4 Genişletilmiş Kalman süzgeci ile tekerlek kuvvetlerinin ve araç durumlarının kestirilmesine ait blok diyagram

Genişletilmiş Kalman süzgeci bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde çift izli yedi serbestlik dereceli araç modeline kestirimi yapılacak tekerlek sürtünme kuvvetleri dâhil edilerek uygulanmıştır. Tekerlek boyuna sürtünme kuvvetleri genişletilmiş Kalman süzgeci aracılığıyla kestirilmiştir.

Aşağıda genişletilmiş Kalman süzgecinde kullanılan sistem, ölçüm ve giriş matrisleri verilmiştir.

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & 0_{7 \times 12} \\ 0_{12 \times 13} & I_{12 \times 12} \\ 0_{6 \times 13} & 0_{6 \times 12} \end{pmatrix}_{25 \times 25} \quad (5.19)$$

A matrisi araç dinamiği için oluşturulmuş genişletilmiş sistem matrisidir. A satır ve sütun sayısı 25 olan kare bir matrisdir. $0_{n \times m}$ n satır ve m sütundan oluşan sıfır

matrisini ve I_{kxl} , k satır ve l sütundan oluşan birim matrisi göstermektedir. A_1 matrisi Ek-1'de verilmektedir.

$$H = \begin{pmatrix} H_1 & 0_{3 \times 4} & 0_{3 \times 8} \\ 0_{4 \times 2} & I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 19} \end{pmatrix}_{7 \times 25} \quad (5.20)$$

H matrisi genişletilmiş ölçüm matrisini ifade etmektedir. 7 satır ve 25 sütunlu bir matristir. H_1 matrisinin açık hali Ek-1'de verilmektedir.

$$B = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 4} \\ B_1 \\ 0_{18 \times 4} \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

B matrisi genişletilmiş Kalman süzgecinin tasarımında kullanılan sistem girişlerini içermektedir. B matrisi 25 satır ve 4 sütundan oluşmaktadır. B_1 matrisinin açık hali Ekler kısmında verilmektedir.

5.3 Tekerlek Dikey Kuvvetlerinin Hesaplanması

Tekerlekler üzerinde araç ağırlığından kaynaklanan düşey bir kuvvet oluşmaktadır. Düşey tekerlek kuvvetlerinin dağılımı aracın yuvarlanma ve süspansiyon hareketlerinden etkilenmektedir. Bu çalışmada kullanılan yük dağılım modelinde araç yuvarlanma ve süspansiyon hareketleri ihmal edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yük dağılım modeli aşağıda verilmiştir.

$$F_{zfl} = \frac{L_r m}{2(L_f + L_r)} g - \frac{h_{cog} m}{2(L_f + L_r)} a_x - \frac{L_r h_{cog} m}{(L_f + L_r) T_f} a_y \quad (5.22)$$

$$F_{zfr} = \frac{L_r m}{2(L_f + L_r)} g - \frac{h_{cog} m}{2(L_f + L_r)} a_x + \frac{L_r h_{cog} m}{(L_f + L_r) T_f} a_y \quad (5.23)$$

$$F_{zrr} = \frac{L_f m}{2(L_f + L_r)} g + \frac{h_{cog} m}{2(L_f + L_r)} a_x + \frac{L_r h_{cog} m}{(L_f + L_r) T_f} a_y \quad (5.24)$$

$$F_{zrl} = \frac{L_f m}{2(L_f + L_r)} g + \frac{h_{cog} m}{2(L_f + L_r)} a_x - \frac{L_r h_{cog} m}{(L_f + L_r) T_f} a_y \quad (5.25)$$

Denklemlerde kullanılan h_{cog} aracın ağırlık merkezinin yerden yüksekliğini, g yerçekimini sabitini, a_x araç boyuna ivmesini ve a_y araç yanal ivmesini ifade etmektedir. Yük dağılım modeli, bağımsız boyuna ve yanal ivmelerinin yük dağılımı üzerindeki etkisi toplamsallık ilkesini kullanarak ifade edilmiştir.

5.4 Tekerlek Kayma Açısının ve Tekerlek Kayma Değerinin Kestirilmesi

Her bir tekerlekteki kayma açısı ve tekerlek kayma değeri genişletilmiş Kalman süzgeci ile kestirilen araç durumları kullanılarak elde edilmektedir. Tekerlek kayma açılarının kestirimleri $\hat{\alpha} = [\hat{\alpha}_{fl}, \hat{\alpha}_{fr}, \hat{\alpha}_{rr}, \hat{\alpha}_{rl}]$ ve tekerlek kayma değerlerinin kestirimleri $\hat{s} = [\hat{s}_{fl}, \hat{s}_{fr}, \hat{s}_{rr}, \hat{s}_{rl}]$ aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_{fl} \\ \hat{\alpha}_{fr} \\ \hat{\alpha}_{rr} \\ \hat{\alpha}_{rl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{fl} \\ \delta_{fr} \\ \delta_{rr} \\ \delta_{rl} \end{bmatrix} - \tan^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\hat{v}_{y+L_f\hat{r}}}{\hat{v}_x} \\ \frac{\hat{v}_{y+L_f\hat{r}}}{\hat{v}_x} \\ \frac{\hat{v}_{y-L_r\hat{r}}}{\hat{v}_x} \\ \frac{\hat{v}_{y-L_r\hat{r}}}{\hat{v}_x} \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

δ her bir tekerlek için dönüş açılarını, r ise aracın savrulma hızını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_{fl} \\ \hat{s}_{fr} \\ \hat{s}_{rr} \\ \hat{s}_{rl} \end{bmatrix} = 1 - R_w \begin{bmatrix} \frac{\hat{\omega}_{fl}}{\hat{v}_f \cos \hat{\alpha}_{fl}} \\ \frac{\hat{\omega}_{fr}}{\hat{v}_f \cos \hat{\alpha}_{fr}} \\ \frac{\hat{\omega}_{rr}}{\hat{v}_r \cos \hat{\alpha}_{rr}} \\ \frac{\hat{\omega}_{fl}}{\hat{v}_r \cos \hat{\alpha}_{rl}} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Denklemlerde kullanılan ω tekerlek açısal hızlarını, $\hat{v}_f$ ve $\hat{v}_r$ sırasıyla ön ve arka aks için kestirilen hızı ifade etmektedir. Ön ve arka aks için kestirilen hız değerlerinin ifadeleri aşağıdaki denklemler aracılığıyla verilmektedir.

$$\hat{v}_f = \sqrt{(\hat{v}_{y+L_f\hat{r}})^2 + \hat{v}_x^2} \quad (5.28)$$

$$\hat{v}_r = \sqrt{(\hat{v}_{y-L_r\hat{r}})^2 + \hat{v}_x^2} \quad (5.29)$$

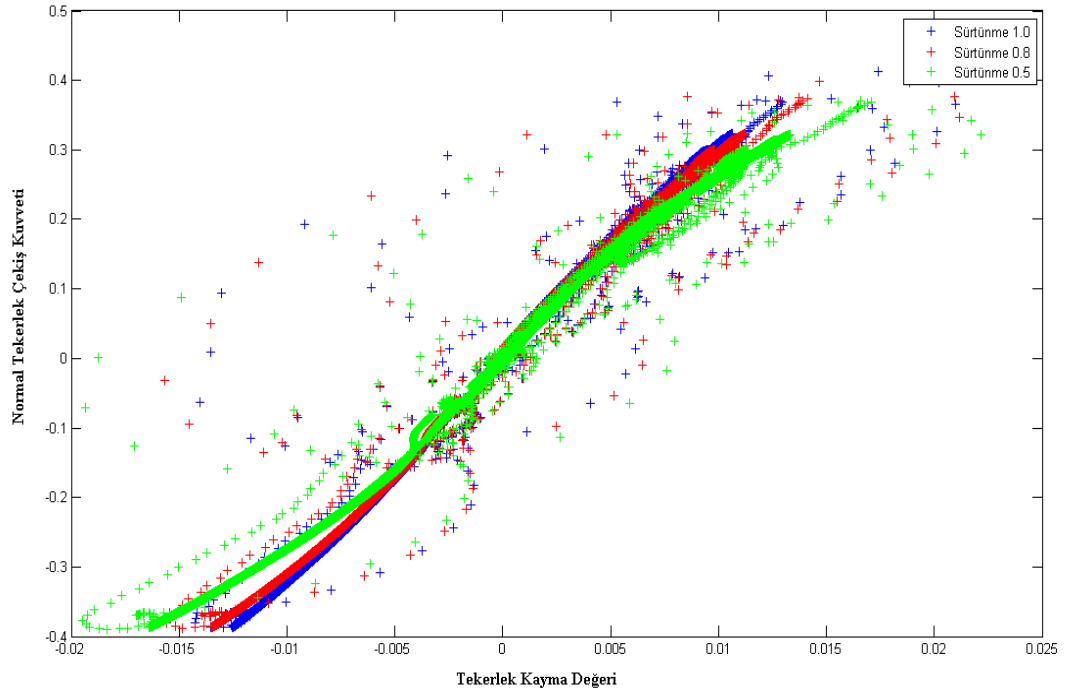
5.5 Normal Çekiş Kuvveti – Tekerlek Kayma Değeri Eğiminin Kestirilmesi

5.5.1 Giriş

Bu çalışmada tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirmek için normal çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değeri arasındaki ilişkiden faydalanılmıştır. Bilindiği üzere düşük tekerlek kayma değerleri için normal tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değeri doğrusal olarak değişmektedir. Sürtünme katsayısını kestirmek için kullanılan temel yaklaşım düşük kayma değerleri için normal tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değerinin doğrusal değişiminin eğiminin elde edilmesidir. Şekil 5.4’ de değişik tekerlek yol sürtünme katsayısına sahip yollar için normal tekerlek çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değeri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 5.4’den görüldüğü üzere farklı yol kşulları için düşük kayma değerlerinde tekerlek kayma değeri ile normal tekerlek çekiş kuvveti doğrusal olarak değişim göstermektedir. Farklı yol koşulları için kayma eğimi diye ifade edilen normal tekerlek kuvveti ile tekerlek kayma değeri arasındaki eğim farklı değişim göstermektedir. Sürtünme katsayısının değeri küçüldükçe kayma eğimi azalmaktadır. Sürtünme katsayısı kestirimi sırasında ilk olarak kayma eğimi eğimi kestirmekte daha sonra bir sınıflandırma fonksiyonu ile tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirimi yapılmaktadır. Kayma eğiminin kestirimi için özyinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Araç kontrol sistemleri bakış açısında bakıldığında aşağıdaki nedenlerden dolayı özyinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır.

- Tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimi en küçük hata ile gerçekk sürtünme katsayına yakın olmalı ve ayrıca kestirim sonuçlarındaki salınımlar en aza indirilmelidir.
- Tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisi yol durumdaki değışiklikleri takip edecek yeteneğe sahip olmalıdır.

Özyinemeli en küçük kareler yöntemi bir sonraki bölümde detaylı şekilde anlatılmıştır.



Şekil 5.5 Farklı yol koşulları için normal tekerlek çekiş kuvveti tekerlek kayma değeri değişimi

5.5.1. Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi

Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi doğrusal kestirim yöntemlerinden biridir. Temeli en küçük kareler yöntemine dayanmakla birlikte kestirim ile ölçüm arasındaki karesel hatayı en aza indirmeye çalışmaktadır [24]. Kestirim sonuçları ölçüm gürültülerinin etkisi azaltılarak elde edilmektedir.

Bu çalışmada özyinelemeli en küçük kareler kestirim yönteminin şu özelliklerinden faydalanılmıştır.

- Hızlı parametre yakınsama özelliği sayesinde bilinmeyen durumlarda ve ani parametre değişimlerinde etkili sonuçlar vermektedir.
- Diğer kestirim yöntemlerine göre daha küçük hesaplama zamanına ve gücüne ihtiyaç duymaktadır. Bu özellik gerçek zamanlı uygulamalarda oldukça önem kazanmaktadır.

- Sistem gürültülerine karşı bağışıklık kazarak kaliteli kestirim sonuçları vermektedir.

Doğrusal özyinelemeli bir kestirimci aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$y_k = H_k x + v_k \quad (5.30)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \quad (5.31)$$

y_k gürültülü ölçüm vektörünü, x kestirilecek parametre vektörünü, K_k kestirimci kazanç vektörünü, v_k ölçüm gürültü vektörünü ve son olarak $\hat{x}_k$ ise kestirim sonuçlarını ifade etmektedir. $y_k - H_k \hat{x}_{k-1}$ ifadesi düzeltme terimi olarak isimlendirilmektedir. Düzeltme terimi ya da kestirimci kazanç vektörü sıfır olduğunda kestirim sonuçları değişmemektedir.

Kestirimcinin kazanç vektörünü hesaplamadan önce özyinelemeli doğrusal kestirimcinin ortalama kestirim hatasını incelemek gerekmektedir. Ortalama kestirimci hatası aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$E(\epsilon_x, k) = E(x - \hat{x}_k) \quad (5.31)$$

$$E(\epsilon_x, k) = E(x - \hat{x}_{k-1} - K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k-1})) \quad (5.32)$$

$$E(\epsilon_x, k) = (I - K_k H_k) E(\epsilon_x, k-1) - K_k E(v_k) \quad (5.33)$$

Yukarıdaki denklemlerin ışığında gürültü vektörü v_k tüm değerler için sıfır ortalamalı ve x in başlangıç değeri x in beklenen değerine eşit olursa, x in kestirim değerlerinin beklenen değeri x e eşit olmaktadır.

Bundan sonraki en iyi kestirimi sağlayacak en uygun kestirimci kazancının belirlenmesidir. K_k kestirimci kazancının belirlemesi aşamasında, en uygun kazancı belirlemek için en uygunluk koşulu belirlenmelidir. Bu yöntemde seçilen en uygunluk koşulu kestirim hatalarının değişimlerinin toplamının en aza indirilmesidir. Bu durumu sağlayacak maliyet fonksiyonu aşağıdaki denklem ile tanımlanmıştır.

$$J_k = E(x_1 - \hat{x}_1)^2 + \dots + E(x_n - \hat{x}_n)^2] = Tr P_k \quad (5.34)$$

Denklem (5.34) de bulunan P_k kestirim hata kovaryans matrisini ifade etmektedir. Aşağıda P_k kestirim hata kovaryans matrisinin sistem durumları, gürültü kovaryans matrisi ve kestirimci kazancı ile tanımlanmış ifadesi görülmektedir.

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (5.35)$$

K_k kestirimci kazancını azaltmak için maliyet fonksiyonu J_k en aza indirilmelidir. J_k maliyet fonksiyonun türevi sıfıra eşitleyip elde edilen denklemde K_k çözülürse kestirimci kazancı için aşağıdaki ifade elde edilir

$$K_k = P_{k-1} H_k^T (H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (5.36)$$

6 BENZETİM ÇALIŞMALARI

6.1 Giriş

Bu bölümde ilk olarak Güvenli Sürüş projesi çerçevesinde hazırlanan UYANIK isimli deneysel araç hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra bu aracın bilgisayar üzerinde oluşturulan araç modeli tanıtılmıştır. Oluşturulan araç modelinin araç dinamiği verileri ile gerçek araç verileri karşılaştırılarak oluşturulan araç modelinin gerçeği ne kadar yansıttığı gösterilmiştir.

Daha sonraki kısımda ise 5. Bölümde anlatılan tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirim yöntemi oluşturulan araç modeli ile çeşitli senaryolar ve çeşitli yol koşullarını için test edilerek yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

6.2 Deneysel Araç ve Oluşturulan Araç Modeli

Güvenli Sürüş projesi kapsamında hazırlanan UYANIK isimli araç Renault Megane marka 2004 model 1.9 lt mazotlu motora sahip bir araçtır [4]. UYANIK adı verilen bu araç çeşitli algılayıcılar ile donatılmış ve veri toplamak için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. UYANIK isimli deneysel araç ve araç üzerinde bulunan veri toplama üniteleri Şekil 6.1’de görülmektedir.

Araç güvenli sürüş projesi kapsamında hazırlandığı için aracın üzerinde sürücünün davranışlarının takip eden çeşitli kameralar, ses kayıtları yapmak için çeşitli düzenekler bulunmaktadır. Ayrıca aracın önünde 180 derecelik açılı yelpazesini görebilen bir laser tarayıcı, xyz eksenlerinde ivme ölçen IMU cihazı, fren pedali basıncı algılayıcısı, aracın sekiz kosesine (her yone ikiser olmak üzere) birer ultrasonik mesafe ölçme algılayıcısı ve aracın konum bilgileri için GPS altsistemini içeren algılayıcılar araç üzerinde bulunmaktadır. Aracın CAN veri yolundan gerekli bilgileri alabilmek için CAN veri yolu arayüzü kullanılmaktadır. Aşağıda CAN veri yolundan alınan bilgiler sıralanmıştır.

- Direksiyon açısı (SWA)

- Direksiyon açısı hızı (SWRS)
- Motor devri (ERPM)
- Araç hızı (VS)
- Her bir tekerleğin açısı hızları (WSFL-WSRL)
- Gas Pedali Basım yüzdesi (PGP)
- Savrulma hızı (YR)
- Uyarı sinyalleri durumu
- Debriyaja basılma durumu (CS)
- Frene basılma durumu (BS)
- Kavrama durumu (CM)
- Vites boşta sinyali (NS)
- Geri vites sinyali (RG)
- Kayıt Tarih, Saat ve Saniye



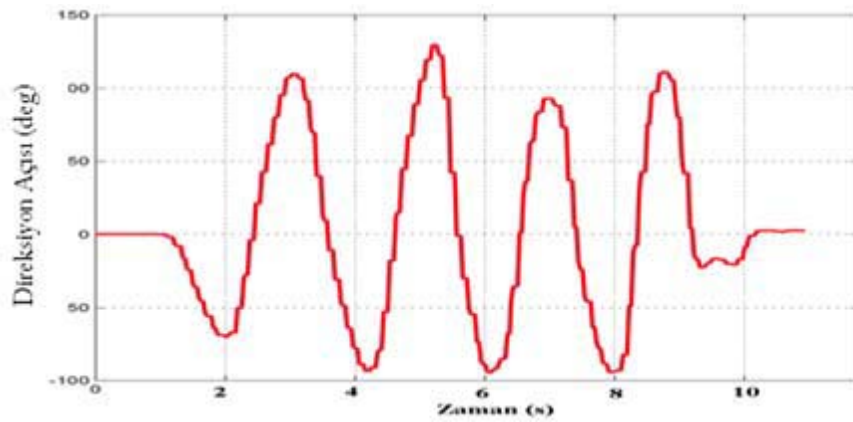
Şekil 6.1 UYANIK isimli deneysel araç ve veri toplama üniteleri

UYANIK isimli deneysel araca ait parametreler kullanılarak Carsim isimli araç dinamiği programı kullanılarak gerçek aracın davranışlarını yeteri yakınlıkta takip eden bir araç modeli geliştirilmiştir. Araç modeli oluşturulurken kullanılan araç parametreleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. CarSim çok dereceli araç modelleri ile araç dinamiğini gerçeğe yakın şekilde benzetim yapabilen araç dinamiği benzetim programıdır. Carsim programında oluşturulan araç modeline gerçek araçtan alınan hız ve direksiyon açısı verileri giriş olarak verilmiştir. Araç modelinden aracın boyuna ivmesi, yanal ivmesi, savrulma açısı ve tekerlek açısı hızı gibi bilgiler çıkış olarak alınmış ve gerçek veriler ile karşılaştırılmıştır.

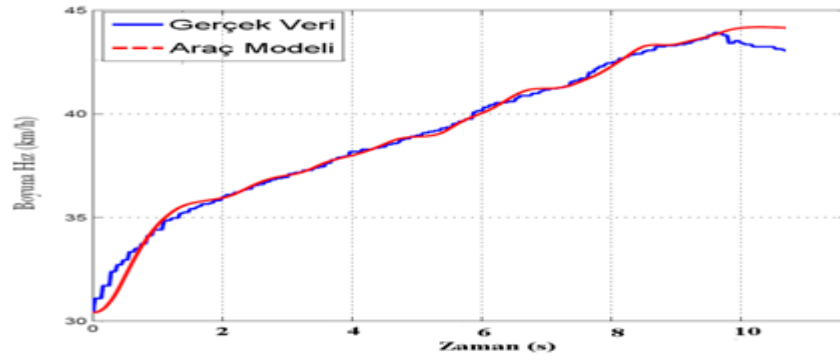
Çizelge 6.1 Araç Modeli Oluşturulurken Kullanılan Araç Parametreleri

Model Parametreleri	Değeri
Araç Ağırlığı (m)	1527 kg
Araç Atalet Momenti (I_z)	2740 kgm ²
Araç ağırlık merkezinden ön aksa olan uzaklık (L_f)	1.1014 m
Araç ağırlık merkezinden arka aksa olan uzaklık (L_r)	1.576 m
Ön iz genişliği (T_f)	1.540 m
Arka iz genişliği (T_r)	1.530 m
Tekerlek Atalet Momenti (I_w)	0.9 kgm ²
Tekerlek Yarıçapı	0.3 m

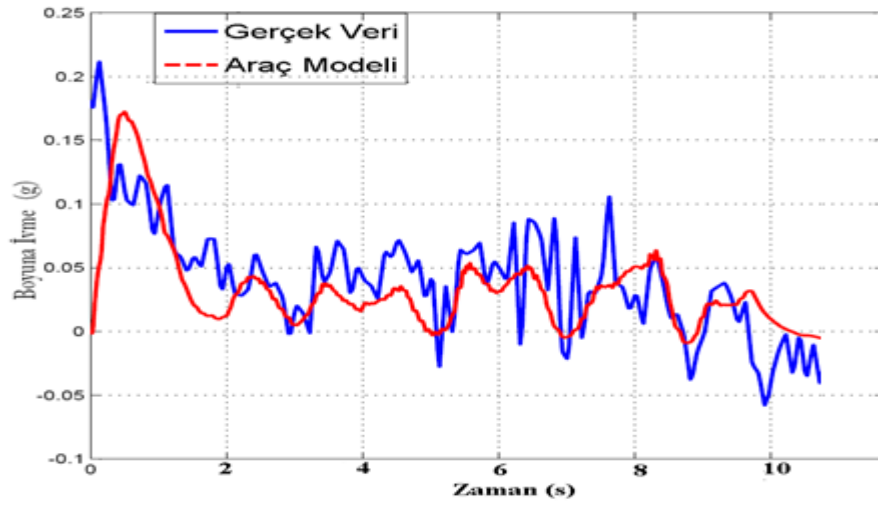
Gerçek araç verilerinin kullanıldığı bir benzetim yapılmıştır. Yapılan bu benzetimlerden bir tanesi Şekil 6.2 'de verilen direksiyon açısı girişi ve Şekil 6.3 'de verilen araç hızı girişi için yapılmıştır. Gerçek araç verileri ve araç modelinden elde edilen verilerin karşılaştırmaları sonuçları Şekil 6.4'de boyuna ivme, Şekil 6.5'da yanal ivme ve Şekil 6.6'de savrma hızı için gösterilmiştir. Oluşturulan araç modeli sonuçları verilerin şekillerden görüldüğü üzere gerçek araç verilerini belli bir yakınlıkta takip etmektedir.



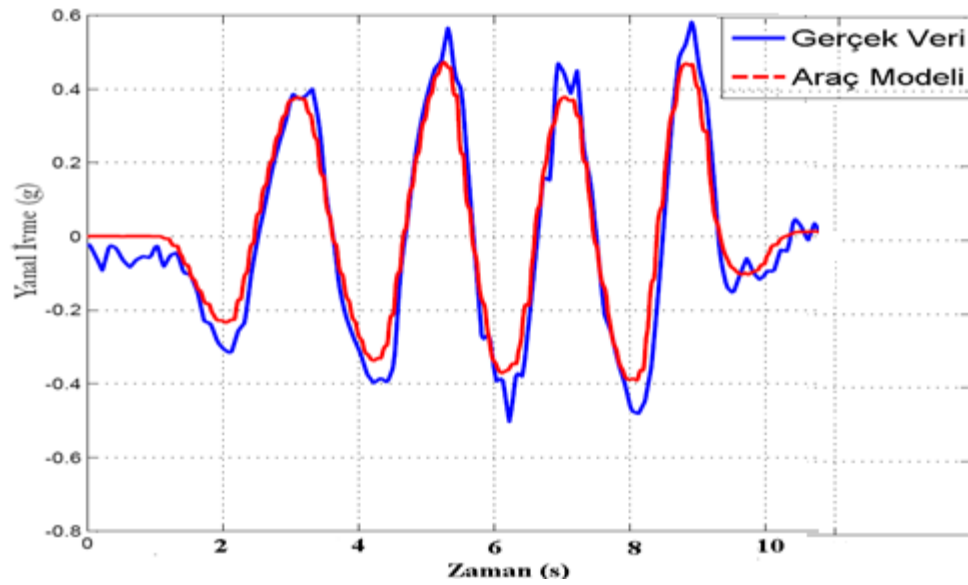
Şekil 6.2 Gerçek araç direksiyon verisi



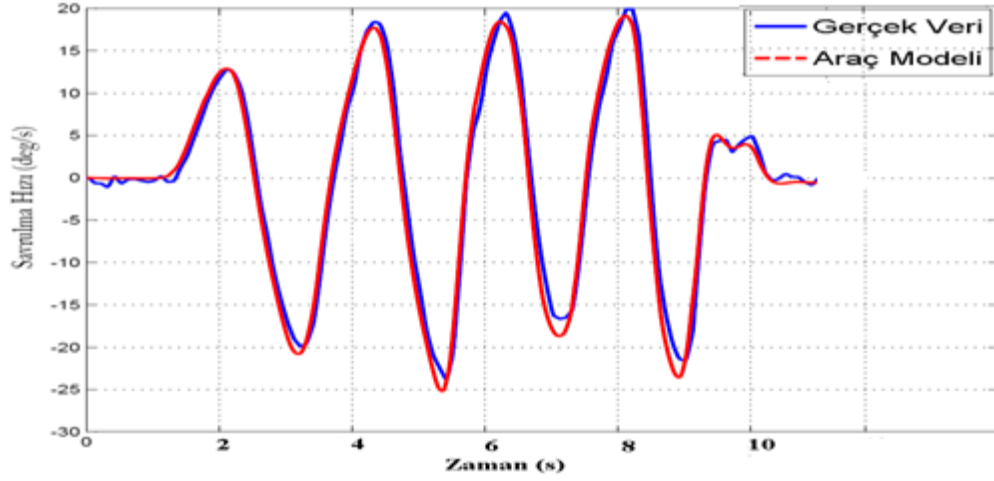
Şekil 6.3 Gerçek araç hız verisi ile araç modeli hız verisi



Şekil 6.4 Gerçek araç boyuna ivme verisi ile araç modeli boyuna ivme verisi



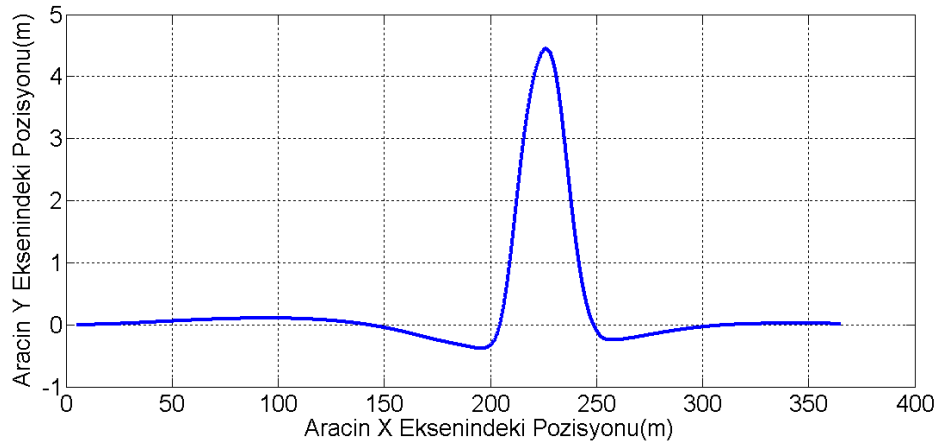
Şekil 6.5 Gerçek araç yanal ivme verisi ile araç modeli yanal ivme verisi



Şekil 6.6 Gerçek araç savrulma açısı verisi ile araç modeli savrulma açısı verisi

6.3 Çeşitli Manevralar ile Tekerlek Yol Sürtünme Katsayısının Kestirilmesi

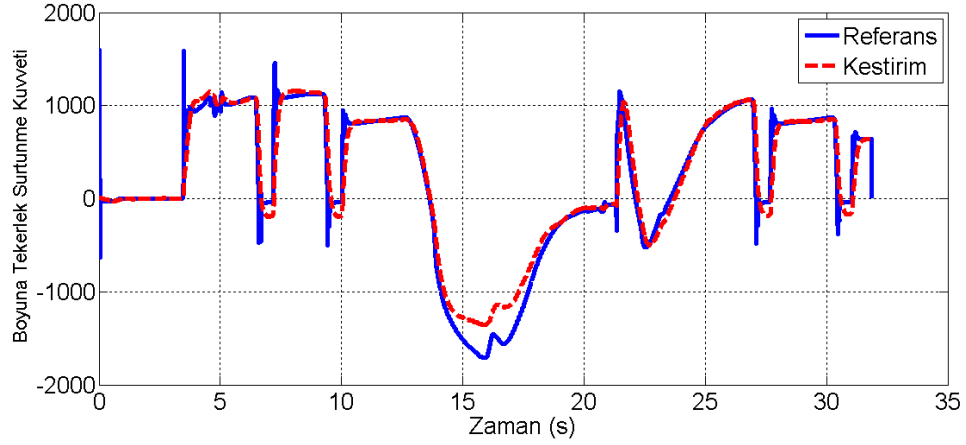
Oluşturulan araç modeli ile değişik yol koşullarında çeşitli manevraların benzetimi yapılarak tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisinin etkinliği gösterilmiştir. Gerçekleştirilen bu manevralardan ilk olarak şerit değiştirme manevrası 5. Bölümde anlatılan kestirim aşamalarını detaylı olarak içerecek şekilde incelenmiştir. Şekil 6.7’de aracın x ve y eksenindeki konumu gösterilmiştir. Tekerlek yol sürtünme katsayısını kestirebilmek için ilk olarak tekerlek boyuna sürtünme kuvvetleri genişletilmiş Kalman süzgeci kullanılarak kestirilmiştir.



Şekil 6.7 Aracın x ve y eksenindeki konumu

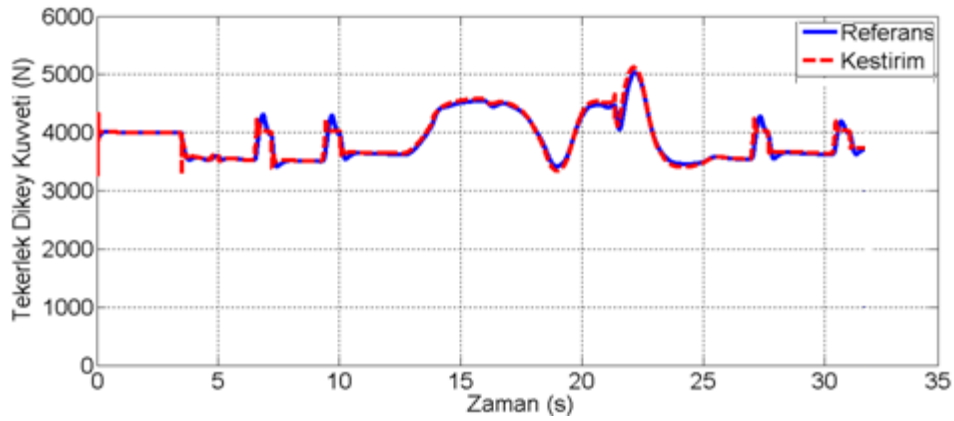
Şekil 6.8’de geniletilmiş Kalman süzgeci ile kestirilmiş aracın sağ ön tekerleğine ait tekerlek boyuna sürtünme kuvvetinin kestirimi görülmektedir. Diğer tekerleklerdeki

boyuna sürtünme kuvvetleri birbiriyle eş değer olduğu için diğer tekerleklere ait tekerlek boyuna sürtünme kuvvet kestirimleri burada verilmemiştir.



Şekil 6.8 Tekerlek boyuna sürtünme kuvvetinin kestirimi

Tekerlek boyuna sürtünme kuvvetlerinin kestirimin ardından yapılacak işlem normal tekerlek çekiş kuvvetini bulmak için tekerlek dikey kuvvetlerinin hesaplanmasıdır. Şekil 6.9’de ön sağ tekerlek için hesaplanan tekerlek dikey kuvvetinin zamana göre değişimi görülmektedir. Daha sonra hesaplanan tekerlek düşey kuvveti ve kestirilen boyuna sürtünme kuvveti kullanılarak normal tekerlek çekiş kuvveti elde edilir.

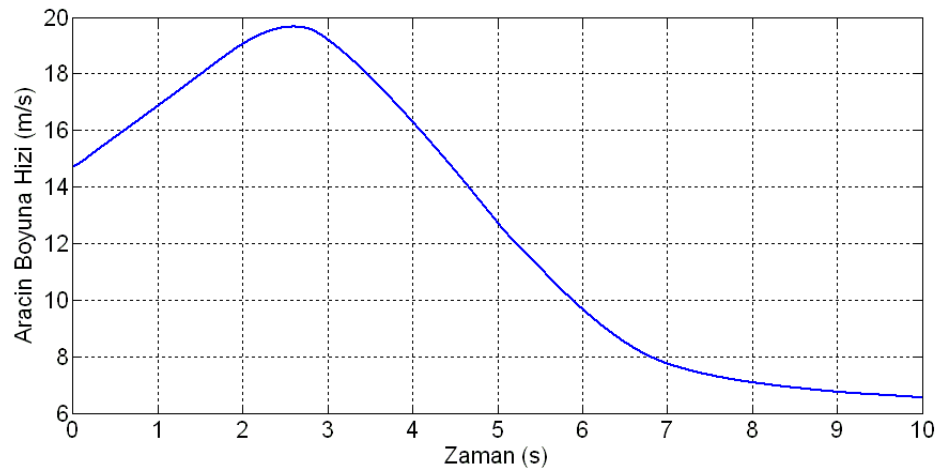


Şekil 6.9 Tekerlek dikey kuvveti kestirim sonuçları

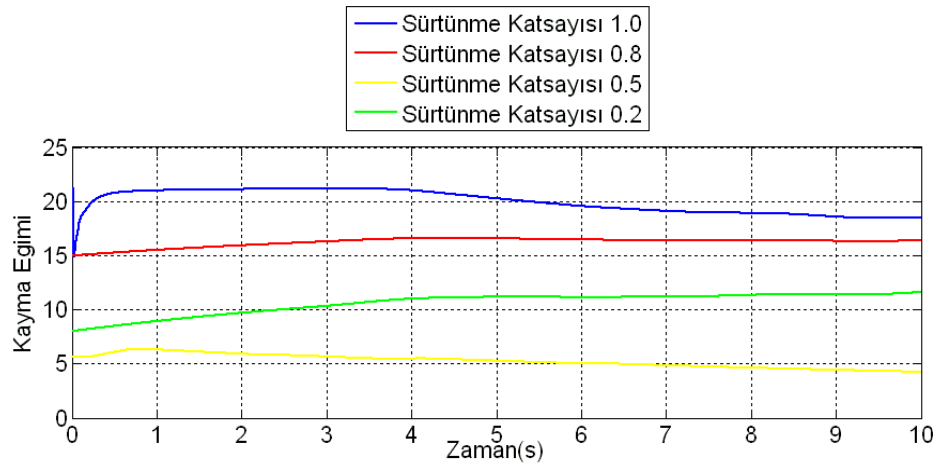
Genişletilmiş Kalman süzgeci ile kestirilen araç durumları kullanılarak tekerlek kayma açısı ve daha sonra tekerlek kayma değeri kestirilmektedir. Bu durumda tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısını kestirmek için gerekli bütün değişkenler elde edilmiş olmaktadır. Sürtünme katsayısı normal tekerlek çekiş kuvveti ile

tekerlek kayma değeri arasındaki eğimden yararlanarak kestirilmektedir. Kayma eğimi özyinelemeli en küçük kareler doğrusal kestirim yöntemi ile kestirilmektedir.

Şerit değiştirme manevrasının benzetimi tekerlek yol sürtünme katsayısı 1, 0.8, 0.5 ve 0.2 olan yol koşulları için yapılmıştır. Şekil 6.10'da yapılan benzetim sırasında araç boyuna hızının değişimi görülmektedir. Şekil 6.11'de farklı sürtünme durumları için kestirilen kayma eğimleri görülmektedir.

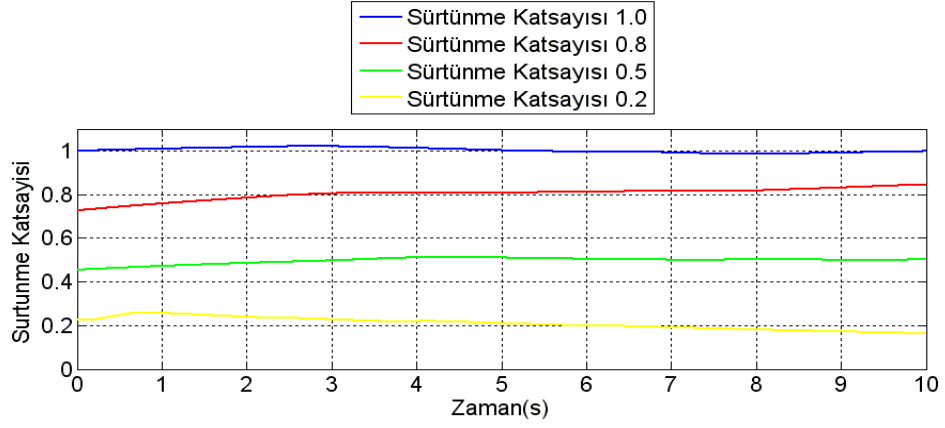


Şekil 6.10: Manevra sırasında araç boyuna hızı



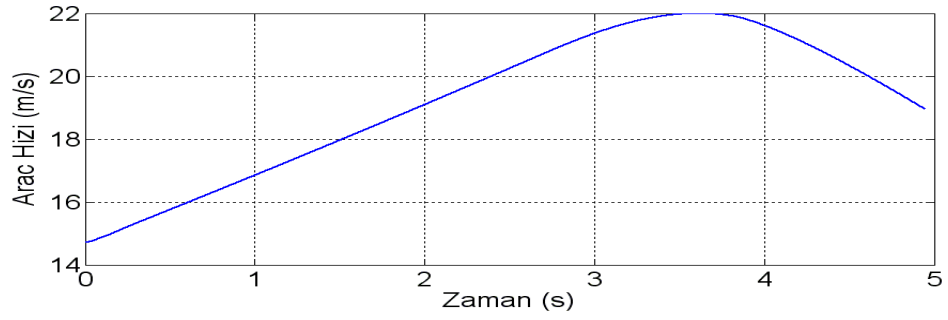
Şekil 6.11 Şerit değiştirme manevrasının farklı yol koşulları için kayma eğimi kestirimi

Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi ile kestirilen kayma eğimlerinden gerekli dönüşüm fonksiyonları kullanılarak tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısı elde edilmektedir. Şekil 6.12 'da kestirilmiş olan tekerlek yol sürtünme katsayıları görülmektedir.

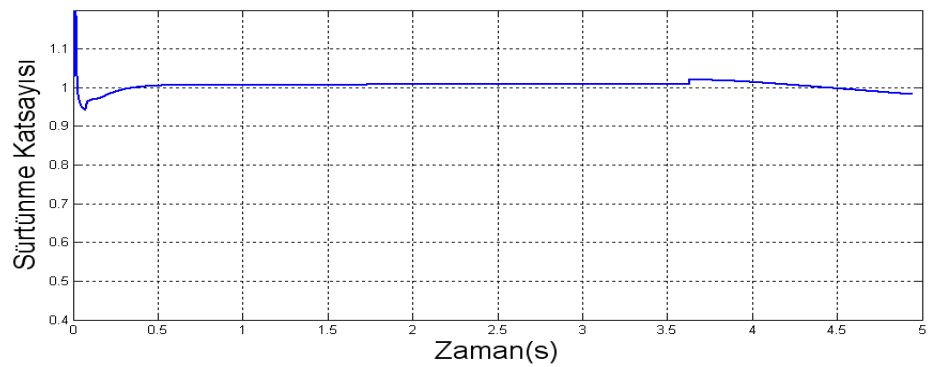


Şekil 6.12 Şerit değiştirme manevrasının farklı yol koşulları için tekerlek yol sürtünme katsayısının kestirimi

Şekil 6.13 'de görülen hız değişimi ile yapılan manevraya ait tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimi Şekil 6.14'de gösterilmiştir. Manevra yapılan yolun sürtünme katsayısı 1.0 olarak kabul edilmiştir.

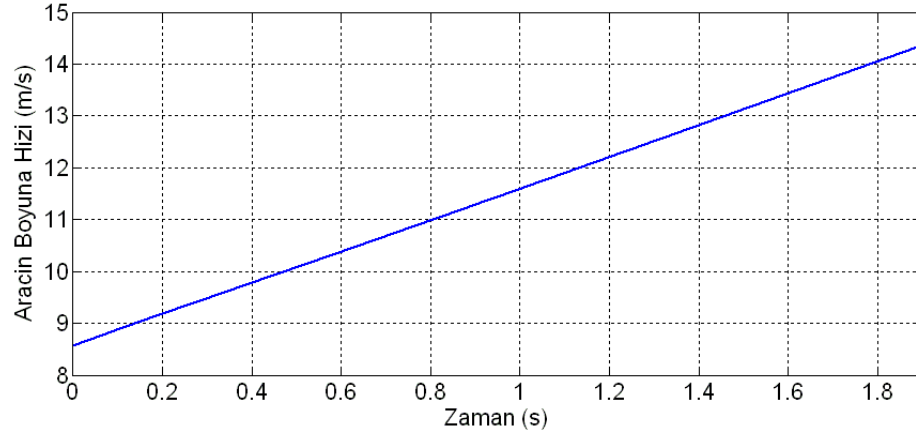


Şekil 6.13 Araç hız profili

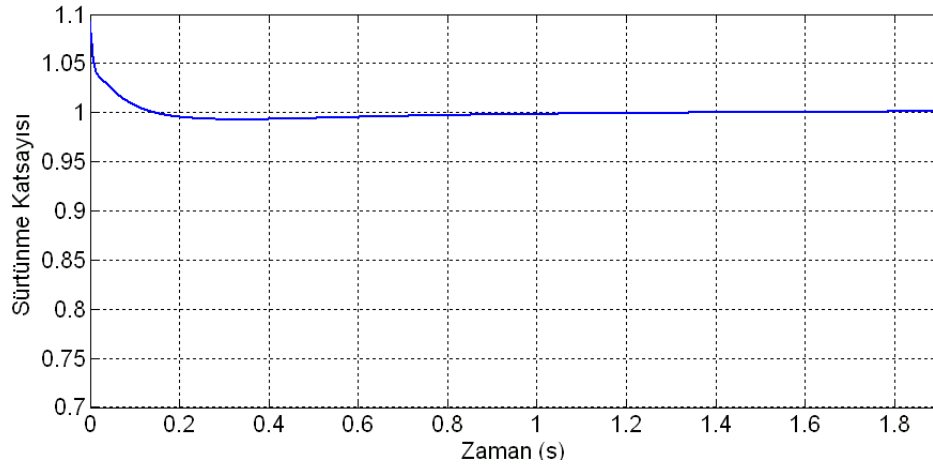


Şekil 6.14 Tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimi

Şekil 6.15'de aracın ivmelenme durumuna ait hız değişimi görülmektedir. Araç ivmelenme durumunda iken tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısı kestirilmiştir. Benzetim yapılan yolun sürtünme katsayısı 1.0 olarak kabul edilmiştir. Sürtünme katsayısı kestirim sonucu Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.15: İvmelenme durumuna ait aracın boyuna hız değişimi



Şekil 6.16: İvmelenme durumunda sürtünme katsayısı kestirimi

7 SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada tekerlek yol sürtünme katsayısı için gözlemleyici tasarımı yapılmıştır. İlk aşamada Güvenli Sürüş projesi kapsamında hazırlanan deneysel aracın bilgisayar üzerinde gerçekçi bir modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan gerçekçi araç modeli ile değişik manevraların benzetimi yapılmıştır. Tekerlek yol sürtünme katsayısını kestirmedeki ilk aşama tekerlek boyuna sürtünme kuvvetlerinin kestirilmesidir. Tekerlek boyuna sürtünme kuvvetlerini kestirmek için genişletilmiş Kalman süzgeci kullanılmıştır. Genişletilmiş Kalman süzgeci algoritması ile hem tekerlek boyuna sürtünme kuvvetleri hem de bazı araç durumları kestirilmiştir. Kestirilen araç durumları ve araç üzerindeki algılayıcılardan alınan veriler ile tekerleğe dikey kuvvetleri, tekerlek kayma açısı ve tekerlek kayma değerleri kestirilmiştir. Elde edilen tekerlek dikey kuvvetleri ile tekerlek normal çekiş kuvveti hesaplanmıştır. Hesaplanan tekerlek normal çekiş kuvvetinin tekerlek kayma değeri ile değişiminden yararlanarak tekerlek yol sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Düşük tekerlek kayma değerleri için tekerlek normal çekiş kuvveti ile tekerlek kayma değeri doğrusal olarak değişmektedir. Tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisi kestirim sırasında bu doğrusal ilişkiyi kullanmaktadır. Tekerlek normal çekiş kuvveti ve tekerlek kayma değeri eğim kayma eğimi olarak isimlendirilmektedir. Kayma eğimi özyinelemeli en küçük kareler yöntemi ile kestirilmektedir. Daha sonra elde edilen eğim bilgisinden gerekli dönüşümler yapılarak tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirilmektedir. Kestirimcinin etkinliğini göstermek üzere değişik manevralar üzerinde çalışılmıştır.

Bundan sonraki aşama bilgisayar üzerinde benzetimleri yapılan tekerlek yol sürtünme katsayısı kestirimcisinin deneysel araç üzerinde gerçek zamanda çalıştırılarak deneysel sonuçların elde edilmesidir.

KAYNAKLAR

- [1] Wang, J., Agrawal, P., Alexander, L., and Rajamani, R., 2003. An Experimental Study with Alternate Measurement Systems for Estimation of Tire-Road Friction Coefficient, *2003 American Control Conference*, Denver, Colorado
- [2] Eichhorn, U. and Roth, J., 1992. " Prediction and monitoring of tyre/road friction.", *XXIV FISITA Congress*, London
- [3] CarMaker User's Guide Version 2.1, IPG Automotive
- [4] Daniş, S., Aytakin, B., Dinçmen, E., Sezer, V., Ararat, Ö., Öncü, S., Güvenç, B.A., Acarman, T., Altuğ, E. and Güven, L., 2008. Framework For Development Of Driver Adaptive Warning and Assistance Systems That will be Triggered by a Driver Inattention Monitor", *OTEKON'08, 4th Automotive Technologies Congress*, Bursa
- [5] Uchanski, M.R., 2001. Road Friction Estimation for Automobiles Using Digital Signal Processing Methods, *PhD Thesis*, University of California, Berkeley.
- [6] Pasterkamp, W. R. and Pacejka, H. B., 1999. The Tyre as a Sensor to Estimate Friction, *Vehicle System Dynamics*
- [7] Dieckmann, Th., 1992. Assessment of Road Grip by Way of Measured Wheel Variables, *Proceedings of FISITA '92 Congress*, London
- [8] F. Gustaffson, 1997. Slip-Based Tire-Road Friction Estimation, *Automatica* Vol. 33 (6), pp1087-1099, 1997.
- [9] Wookug, H. and Byung-suk, S. 2000. Road Condition Monitoring System Using Tire-road Friction Estimation, *Proceedings of AVEC 2000*, Ann Arbor, Michigan, pp 437-442.
- [10] Yi, K., Hedrick, K., and Lee, S. C, 1999. Estimation of Tire-Road Friction Using Observer Based Identifiers, *Vehicle System Dynamics*, vol. 31, p. 233-261
- [11] Germann, St., Wurtenberger, M., and Daiß, A., 1994. Monitoring of the Friction Coefficient Between Tyre and Road Surface. *Proceedings of the third IEEE Conference on Control Applications*
- [12] Kiencke, U., and Daiß, A., 1994. Estimation of Tyre Friction for Enhanced ABS Systems, *Proceedings of AVEC '94*.

- [13] **Ray, L.**, 1997. Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification: Simulation and Experiments, Automatica
- [14] **Müller, S., Uchanski, M. and Hedrick, K.**, 2001. Slip-Based Tire-Road Friction Estimation During Braking, Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York.
- [15] **Hahn, J.-O. , Rajamani, R. And Alexander, Lee**, 2001. GPS-Based Real-Time Identification of Tire-Road Friction Coefficient, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol 10, No. 3
- [16] **Rajamani, R.**, 2006. Vehicle Dynamics and Control. Springer, New York.
- [17] **Güvenç, L.**, Lecture Notes on Vehicle Dynamics and Control
- [18] **Gelb, A.** 1974. Applied Optimal Estimation, MIT Press, Cambridge, MA.
- [19] **Maybeck, P.S.**, 1979. Stochastic Models, Estimation, and Control, Volume 1, Academic Press, Inc.
- [20] **Ray, L. R.**, 1995. Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control, *IEEE Control Systems Technology*, Cilt: 3, No: 1, s: 117-124
- [21] **L. R. Ray**, 1998. Experimental determination of tire forces and road friction, *Pmc. 1998 Amer. Contr. Conf.*, Philadelphia, PA, s:1843-1847
- [22] **Samadi, B., Kazemi, R., Nikraves, K.Y and Kabganian, M.**, 2001. Real-Time Estimation of Vehicle State and Tire-Road Friction Forces, *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington VA, s:3318-3323
- [23] **Aktaş, M., Acarman, T.**, 2008. Araç Durumlarının ve Tekerlek Sürtünme Kuvvetlerinin Genişletilmiş Kalman Süzgeci ile Kestilmesi , TOK 08.
- [24] **Simon, D.**, 2006, Optimal State Estimation Kalman H_{∞} and Nonlinear Approaches, Wiley

EKLER

(5.19) numaralı denklemde belirtilen A_1 matrisinin açık hali aşağıda verilmiştir.

$$= \begin{pmatrix} 0 & r & v_y & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_1 \cos(\delta)}{m} & \frac{\cos(\delta)}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & -\frac{\sin(\delta)}{m} & 0 \\ -r & 0 & v_x & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sin(\delta)}{m} & \frac{\sin(\delta)}{m} & 0 & 0 & \frac{\cos(\delta)}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \left(L_f \sin(\delta) - \frac{T_f}{2} \cos(\delta) \right) & \frac{1}{I_z} \left(L_f \sin(\delta) + \frac{T_f}{2} \cos(\delta) \right) & \frac{T_r}{2I_z} & -\frac{T_r}{2I_z} & \frac{L_f \cos(\delta)}{I_z} & -\frac{L_r}{I_z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_w}{I_w} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_w}{I_w} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_w}{I_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_w}{I_w} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(5.20) numaralı denklemde belirtilen H_1 matrisinin açık hali aşağıda verilmiştir.

$$H_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\cos(\delta)}{m} & \frac{\cos(\delta)}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & -\frac{\sin(\delta)}{m} & 0 \\ 0 & 0 & L_f & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sin(\delta)}{m} & \frac{\sin(\delta)}{m} & 0 & 0 & \frac{\cos(\delta)}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & 0 & -L_r & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sin(\delta)}{m} & \frac{\sin(\delta)}{m} & 0 & 0 & \frac{\cos(\delta)}{m} & \frac{1}{m} \end{pmatrix}$$

(5.21) numaralı denklemde belirtilen B_1 matrisinin açık hali aşağıda verilmiştir.

$$B_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{I_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{I_w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{I_w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{I_w} \end{pmatrix}$$

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Bursa’da doğdu. Lise öğrenimini Bursa Anadolu Lisesinde tamamladı. 2002 yılında Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2006 yılında Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünden birincilik derecesiyle mezun oldu. Eylül 2006 tarihinde İstanbul Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği yüksek lisans programına kabul edildi.