

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YOL TAŞITLARI İÇİN TAŞIT SAVRULMA AÇISAL HIZI TAHMİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Kerim KAHRAMAN**

**Anabilim Dalı : Mekatronik Mühendisliği**

**Programı : Mekatronik Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Levent GÜVENÇ**

**TEMMUZ 2011**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YOL TAŞITLARI İÇİN TAŞIT SAVRULMA AÇISAL HIZI TAHMİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kerim KAHRAMAN**

**(5180810108)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Temmuz 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Temmuz 2011**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Levent GÜVENÇ (OKAN ÜNİV.)**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Bilin Aksun GÜVENÇ (OKAN ÜNİV.)**  
**Yrd. Doç. Dr. Erdiñ ALTUĞ (İTÜ)**

**TEMMUZ 2011**



*Anne ve Babama,*



## ÖNSÖZ

Tez çalışmasının her aşamasında yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Levent GÜVENÇ'e, mensubu olduğum Mekar Laboratuvarları çalışanlarına ve deneysel taşıt üzerinde yapılan test çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Tofaş personeline teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasına destek veren Tofaş Platform A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ayrıca laboratuvarlarını kullanım imkanı sağlayan Okan Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Yıllardır eğitim ve öğretimim için hiçbirşeyi esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.

Temmuz 2011

Kerim Kahraman  
Kontrol Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Konusu, Amacı ve Problem Tanımı.....	1
1.2 Literatür Özeti .....	2
1.3 Çalışmanın Kapsamı .....	6
<b>2. TAŞIT MODELLERİ.....</b>	<b>7</b>
2.1 Tek İzli Doğrusal Taşıt Modeli .....	7
2.2 Çift İzli Taşıt Modeli.....	12
2.3 CarMaker Taşıt Modeli .....	15
2.4 Taşıtların Gerçek Verileri ile Doğrulama .....	16
2.4.1 CarMaker modeli ile doğrulama .....	16
2.4.2 Deneysel taşıtların verileri ile doğrulama .....	18
<b>3. DENEYSEL SİSTEMLER.....</b>	<b>21</b>
3.1 Mekar Donanım İçeren Benzetimci.....	21
3.2 Taşıtların Üzerinde Yapılan Çalışmalar .....	23
<b>4. KALMAN FİLTRESİ.....</b>	<b>25</b>
4.1 Giriş.....	25
4.2 Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi .....	26
4.3 Sistem Durumlarının ve Kovaryanslarının Elde Edilmesi .....	28
4.4 Kalman Filtresi .....	30
4.5 Yakınsama Problemleri .....	33
4.6 Gözetlenebilirlik ve Kontrol Edilebilirlik .....	34
4.6.1 Gözetlenebilirlik.....	34
4.6.2 Kontrol edilebilirlik.....	34
<b>5. TAŞIT YANAL DİNAMİĞİ İÇİN DİNAMİK SANAL ALGILAYICILAR. 37</b>	<b>37</b>
5.1 Savrulma Açıl Hızının Tahmin Edilmesi.....	37
5.1.1 Kinematik tahmin.....	38
5.1.2 Dinamik tahmin.....	41
5.1.2.1 Amaç .....	41
5.1.2.2 Kinematik tahminin alçak geçiren filtre ile filtrelenmesi .....	41
5.1.2.3 Kinematik tahminin kalman filtresi ile filtrelenmesi .....	44
5.2 Benzetim ve Deneysel Çalışmalar.....	46
5.2.1 Çift izli taşıtların modeli ile yapılan benzetim çalışması .....	46

5.2.2 CarMaker taşıt modeli ile yapılan benzetim çalışması.....	48
5.2.3 Donanım içeren benzetimci ile yapılan benzetim çalışması .....	50
5.2.4 Deneysel taşıt ile yapılan test sonuçları .....	52
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>55</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>57</b>

## **KISALTMALAR**

<b>ABS</b>	: Anti-lock Brake System
<b>CAN</b>	: Controller Area Network
<b>ESP</b>	: Electronic Stability Program
<b>ESC</b>	: Electronic Stability Control
<b>GPS</b>	: Global Positioning System
<b>HIL</b>	: Hardware in the Loop
<b>VDC</b>	: Vehicle Dynamics Control
<b>YSC</b>	: Yaw Stability Control



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 2.1</b> : Tek izli taşıt modelinde kullanılan parametreler.....	8
<b>Çizelge 2.2</b> : Çift İzli Taşıt Modelinde kullanılan semboller. ....	13
<b>Çizelge 4.1</b> : Enküçük Kareler Yöntemi ve Kalman Filtresi İlişkisi [42]. ....	32



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Tek İzli Taşıt Modeli Üzerindeki Kuvvetler .....	7
Şekil 2.2 : Çift İzli Taşıt Modeli.....	12
Şekil 2.3 : CarMaker Benzetim Programı.....	16
Şekil 2.4 : Direksiyon Açısı.....	17
Şekil 2.5 : Modellerin Taşıt Hızları.....	17
Şekil 2.6 : Savrulma Açısız Hızları.....	18
Şekil 2.7 : Direksiyon Açısı.....	19
Şekil 2.8 : Taşıt Hızları.....	19
Şekil 2.9 : Savrulma Açısız Hızları.....	20
Şekil 3.1 : Mekar Taşıt Benzetimci.....	22
Şekil 3.2 : Deneylerin Yapıldığı Binek Taşıt.....	23
Şekil 3.3 : Tofaş Test Pistinin Uydu Görünümü .....	23
Şekil 5.1 : Taşıt Savrulma Açısız Hızı Tahmini Genel Şema.....	37
Şekil 5.2 : Kinematik Tahmin İçin Taşıt Geometrisi.....	38
Şekil 5.3 : Kinematik Tahmin ve Gerçek Algılayıcı Verisi.....	42
Şekil 5.4 : Doğrusal Taşıt Modeli Frekans Cevabı.....	42
Şekil 5.5 : Kinematik Tahminin Alçak Geçiren Filtre ile Süzülmesi.....	43
Şekil 5.6 : Kinematik Tahminin Kalman Filtresi ile Süzülmesi.....	45
Şekil 5.7 : Direksiyon Açısı.....	46
Şekil 5.8 : Yanal İvme.....	47
Şekil 5.9 : Çift İzli Model İle Savrulma Açısız Hızı Tahminleri.....	47
Şekil 5.10 : Çift İzli Model İle Taşıt Yana Kayma Açısız Tahminleri.....	48
Şekil 5.11 : Direksiyon Açısı.....	48
Şekil 5.12 : Taşıt Yanal İvmesi.....	49
Şekil 5.13 : CarMaker Ortamında Savrulma Açısız Hızı Tahminleri.....	49
Şekil 5.14 : Taşıt Yana Kayma Açısız Dinamik Tahmin Bilgisi.....	50
Şekil 5.15 : Direksiyon Açısı.....	50
Şekil 5.16 : Taşıt Hızı.....	51
Şekil 5.17 : Taşıtın Yanal İvmesi.....	51
Şekil 5.18 : Gerçek ve Tahmin Edilen Savrulma Açısız Hızları.....	52
Şekil 5.19 : Direksiyon Açısı.....	52
Şekil 5.20 : Taşıt Hızı.....	53
Şekil 5.21 : Taşıt Yanal İvmesi.....	53
Şekil 5.22 : Gerçek ve Tahmin Edilen Savrulma Açısız Hızları.....	54





## SEMBOL LİSTESİ

$p$	: Taşıtın yalpa eksenindeki(x) açısal hızı
$q$	: Taşıtın yunuslama eksenindeki(y) açısal hızı
$r, \psi$	: Taşıtın savrulma eksenindeki(z) açısal hızı
$r_{kin}$	: Kinematik savrulma açısal hızı tahmini
$\beta$	: Taşıt Yana Kayma Açısı
$\beta_f(\beta_r)$	: Ön(Arka) tekerlek yana kayma açısı
$V$	: Taşıt ağırlık merkezindeki hız
$V_{ref}$	: Taşıt CAN hattından okunan referans taşıt hızı
$V_x$	: Taşıt ağırlık merkezindeki boyuna hız
$V_y$	: Taşıt ağırlık merkezindeki yanal hız
$V_z$	: Taşıt ağırlık merkezindeki dikey hız
$V_{xi}$	: Tekerlek merkezindeki boyuna hız, $i= FL, FR, RL, RR$
$V_{wi}$	: Tekerlek merkezindeki hız, $i= FL, FR, RL, RR$
$a_x$	: Taşıtın boyuna ivme değeri
$a_y$	: Taşıtın yanal ivme değeri
$a_z$	: Taşıtın dikey ekseninde ivme değeri
$\alpha_f(\alpha_r)$	: Ön (Arka) Tekerlek Yana Kayma Açısı
$a_i$	: Tekerlek yana kayma açıları, $i= FL, FR, RL, RR$
$\delta_f$	: Ön tekerlek yönlendirme açısı
$C_{af}(C_{ar})$	: Ön(Arka) tekerlek dönüş katlılıkları
$C_x$	: Tekerlek boyuna dönüş katlılığı
$C_y$	: Tekerlek yanal dönüş katlılığı
$m$	: Taşıt kütlesi
$\tilde{m}$	: Eşdeğer taşıt kütlesi
$I_z$	: Savrulma eksenine göre taşıtın atalet momenti
$\tilde{I}_z$	: Savrulma eksenine göre taşıtın eşdeğer atalet momenti
$I_w$	: Tekerleğin atalet momenti
$l_f(l_r)$	: Ön(Arka) aks ile ağırlık merkezi arasındaki uzaklık
$l_{w1}(l_{w2})$	: Taşıt ön(arka) aks iz genişliği
$R$	: Dinamik tekerlek yarıçapı
$R_w$	: Efektif tekerlek yarıçapı
$F_x$	: Taşıt ağırlık merkezindeki boyuna kuvvetler toplamı
$F_y$	: Taşıt ağırlık merkezindeki yanal kuvvetler toplamı
$F_{xi}$	: Tekerlek boyuna sürtünme kuvveti, $i= FL, FR, RL, RR$
$F_{yi}$	: Tekerlek yanal sürtünme kuvveti, $i= FL, FR, RL, RR$
$F_r$	: Tekerlek yuvarlanma direnci kuvveti
$M_z$	: Taşıtın savrulma eksenine göre momenti
$F_f(F_r)$	: Ön (Arka) Tekerlek Yanal Kuvveti
$\mu$	: Tekerlek yol sürtünme katsayısı
$w$	: Tekerleğin eksenine etrafındaki dönüş hızı
$T_d$	: Tekerleğe uygulanan sürüş torku

$T_b$	: Tekerleğe uygulanan fren torku
$\lambda_i$	: Tekerlek boyuna kayma oranı, $i= FL, FR, RL, RR$
$\mu_r$	: Tekerlek yuvarlanma direnç katsayısı
$A, F_k$	: Sistem durum matrisi
$B, G_k$	: Sistem giriş matrisi
$C, H$	: Sistem ölçüm matrisi
$L$	: Gözetleyici kazanç matrisi
$K_k$	: Kalman Filtresi kazanç matrisi
$P_k$	: Hata kovaryans matrisi
$Q$	: Sistem gürültü kovaryans matrisi
$R$	: Ölçüm gürültü kovaryans matrisi
$x, x_k$	: Sistem durumları
$\tilde{x}, \tilde{x}_k$	: Tahmin edilen sistem durumları
$M_o$	: Gözetlenebilirlik matrisi

## YOL TAŞITLARI İÇİN TAŞIT SAVRULMA AÇISAL HIZI TAHMİNİ

### ÖZET

Taşıt güvenlik sistemleri, teknoloji ve konforun arttığı günümüzde daha fazla ön plana çıkmaya başlamıştır. Artan trafik kazaları, can ve mal kayıpları güvenlik sistemlerini ön plana çıkarmıştır. Taşıt dinamiği kontrolcileri (ESP, VDC, vs) bir taşıttaki en önemli güvenlik sistemlerinden birisidir ve yakın gelecekte yeni üretilen tüm taşıtlarda standart haline getirilecektir. Fakat taşıt dinamik kontrolcileri taşıt üretim maliyetlerini önemli bir miktar artıracaktır. Bu tez çalışmasında taşıt dinamik kontrolcülerinin ihtiyaç duyduğu savrulma açısız hızı bilgisi, bu amaçla kullanılan savrulma açısız hızı sensörü yerine tekerlek hızları ve taşıt yanal dinamik modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Böylece taşıt dinamik kontrolcülerinin maliyetinin azaltılması hedeflenmiştir.

Bu amaçla birinci bölümde çalışmanın amacı, kapsamı ve daha önce yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

İkinci bölümde çalışmada kullanılan taşıt modelleri basitten karmaşık olanına doğru tanıtılmış ve gerçek taşıt verileri ile karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan donanımlar, Mekar donanım içeren benzetimci ve Tofaş'ın sağladığı deneysel taşıt tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde gözetleyiciler ve tez çalışmasında kullanılan Kalman Filtresi tasarımı hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, taşıt savrulma açısız hızının tahmini anlatılmış, ikinci bölümde anlatılan taşıt modelleriyle ve üçüncü bölümde anlatılan deneysel ortamlarda tasarımı yapılan sanal sensör test edilmiştir. Çeşitli manevralar için test sonuçları paylaşılmıştır.

Son olarak altıncı bölümde elde edilen test sonuçları yorumlanmış ve daha sonra yapılabilecekler belirtilmiştir.



## **VEHICLE YAW RATE ESTIMATION FOR ROAD VEHICLES**

### **SUMMARY**

Vehicle safety systems is getting more important with developing technology and growing comfort demand. Vehicle safety systems come into come into prominence while increasing traffic accidents and loss of human lives. Vehicle dynamics controllers (ESP, VDC, etc.) are one of the most important safety systems and will be mandatory for new vehicle in the near future. Therefore, vehicle dynamics controllers will increase the vehicle manufacturing costs. In this thesis, the vehicle yaw rate that is required by the vehicle dynamics controller is estimated by using wheel speed signals, steering angle signal and vehicle lateral dynamics model instead of actual yaw rate sensor. So, the production cost of vehicle dynamics controllers will decrease.

In the first chapter, the purpose and scope of the work is introduced and previous studies are explained.

In second chapter, the vehicle models that are used in the thesis are introduced and compared with actual vehicle results.

In the third chapter, the hardwares, Mekar hardware in the loop simulator and actual experimental vehicle are introduced.

In the fourth chapter, basic informations are given about observers and Kalman filters.

In the fifth chapter, the yaw rate estimator is designed and tested with vehicle models, hardware in the loop simulator and experimental vehicle.

Finally, in the sixth chapter, some comments on the test results are given and talked about the future works.



## 1. GİRİŞ

Bu bölümde tez çalışmasının konu aldığı taşıt dinamiği kontrolcileri ile ilgili ön bilgilere ve konunun önemini gösteren araştırmalara yer verilmiştir. Öncelikle tez çalışmasının amacı ortaya koyulacak, sonrasında bu alanda yapılmış önceki çalışmalara yer verilecek ve tez kapsamında hangi konuların ele alınacağı ile ilgili bilgi verilecektir.

### 1.1 Çalışmanın Konusu, Amacı ve Problem Tanımı

Günümüzde yol taşıtları, yaşantımızın vazgeçilmez araçları haline gelmişlerdir. Yol taşıtlarının sayıca artması ile birlikte bir takım dikkatsizlikler sonucu çeşitli kazalar meydana gelebilmekte, maddi ve manevi kayıplara sebep olabilmektedir. Bu nedenle taşıt güvenliği de gün geçtikçe önemini artırmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre trafik kazalarının yaklaşık %40'ı taşıtın savrulmasından kaynaklandığı ortaya çıkmıştır [1]. Yani taşıt, sürücüye cevap verememekte ve taşıt yanal kararlılığını kaybedip kontrolden çıkarak kaza yapmaktadır.

Savrulma engelleyici taşıt kontrolcileri piyasada, ESP (Electronic Stability Program), ESC (Electronic Stability Control), VDC(Vehicle Dynamics Control), YSC (Yaw Stability Control) gibi adlarla taşıtlarda sunulmaktadır. Bu çalışmada taşıt yanal dinamiği kontrolcileri için ESP adı kullanılacaktır.

İlk ticari taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü, Bosch tarafından 1995 yılında tanıtılmıştır [1]. ESP, sürücünün taşıtın yanal hakimiyetini kaybettiği durumlarda devreye girerek taşıtı kararlı hale getirir. Direksiyon açısı, gaz pedal pozisyonu, fren basıncı, savrulma açısal hızı ve yanal ivme bilgilerini değerlendirerek sürücüden bağımsız olarak taşıtın motor torkuna ve tekerleklerin fren basıncına müdahale eder ve taşıtı istenilen kararlı duruma getirmeye yardımcı olur [2].

ESP'nin sürücüden bağımsız olarak taşıtın frenlemesine ve hızına müdahale edebilmesi, taşıtın güvenli seyredebilmesi hem taşıt içinde bulunanlar hem de yayalar açısından oldukça önemlidir.

ESP'nin kazaları önlemedeki etkinliği ile ilgili olarak birçok çalışma yapılmıştır. Bir araştırmaya göre taşıtlarda ESP kullanımı, tek taşıtlı ölümcül kazaların %49; çok taşıtlı ölümcül kazaların ise %32 azalmasını sağlamıştır [3]. Bir başka araştırmada ise, Amerika'da üç yıl boyunca meydana gelen tüm ölümcül kazalarda ESP'li taşıtların tek taşıtlı ölümcül kaza yapma riskinin %56 daha az olduğunu ortaya koymuştur [4].

Yapılan alışmalar ESP'nin özellikle ölümcül kaza riskini oldukça azalttığını ortaya koymaktadır. Nitekim yakın gelecekte tüm yeni model taşıtlarda ESP'nin standart olması gerektiği planlanmaktadır. Avrupa parlamentosu, 1 Kasım 2011'den sonra üretilen yeni model taşıtlarda taşıt dinamiği kontrolcülerinin zorunlu olacağını bildirmiştir. Halen retimi devam eden taşıtlar ise 1 Kasım 2014'ten sonra taşıt dinamiği kontrolcüsü olmadan satılamayacak [5].

ESP sistemlerinin taşıtlarda zorunlu olacak olması taşıt üretim maliyetlerinde bir artışa sebep olacaktır. ESP sisteminin çalışması için taşıtlarda tekerlek devir sensörleri, direksiyon açısı sensörü, savrulma açısal hızı sensörü, boyuna ve yanall ivme sensörleri olması gerekmektedir. Taşıt reticileri ve ESP'nin getirdiği bu maliyeti azaltmak için bir takım çalışmalara destek olmaktadır.

Savrulma açısal hızı bilgisi taşıt dinamiğinin kontrolü için oldukça önemlidir. ESP'nin diğer sensörlerinden, ivmelerlere nazaran daha maliyetlidir [6]. Savrulma açısal hızı sensörünün pahalı olmasından dolayı, taşıtın savrulma açısal hızı bilgisini verebilecek alternatif yöntemler geliştirilmiş ve gerçek sensör ile karşılaştırması yapılmıştır [7,8].

Bu tezde, taşıt dinamiği kontrolcüleri için oldukça önemli olan savrulma açısal hızı bilgisinin tahmin edilmesi üzerinde durulacaktır.

## **1.2 Literatür zeti**

Taşıt dinamiği kontrolcülerinin tasarımında bir takım tahminciler kullanılmaktadır. Tahminciler genellikle ölçülmesi imkansız veya maliyetli olan taşıt durumları için tercih edilirler. Ayrıca gerçek sensörlerin arızalanması durumunda gerçek sensörün yerine de kullanılmaktadırlar [9]. Literatürde taşıt hızı, taşıt yana kayma açısı, tekerlek kayma oranı, tekerlek dönüş katılığı, tekerlek yol arasındaki sürtünme katsayısı ve taşıt savrulma açısal hızı tahmini için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.



Bir çalışmada tekerlek devir sensörleri, savrulma açısal hızı, boyuna ve yanal ivmeölçerler ve doğrusal olmayan bir gözetleyici kullanarak bir taşıtın tekerlek yana kayma açılarının tahmin edilmiştir[10]. Tekerlek yana kayma açıları bir taşıtın az veya aşırı yönelme (understeering/ oversteering) hareketi ile ilgili bilgi verirler.

Özellikle frenleme ve ivmelenme durumlarında veya ani manevralarda tekerlekte öteleme hareketi meydana gelir. Bu durumda tekerlek devir sensörü tekerleğin gerçek hız bilgisini doğru olarak veremez. Taşıt hızını doğrudan hesaplayabilecek olan GPS gibi sensörler ise bu işlem için oldukça pahalıdır. Bu yüzden taşıt hızı daha ucuz sensörler ve çeşitli yöntemler kullanılarak tahmin edilebilir [11].

Taşıt hızının ölçülmesindeki problemlerden dolayı tekerleklerdeki kayma oranlarının hesaplanmasında problemler ortaya çıkmaktadır. Özellikle ABS ve TCS sistemleri tekerleklerdeki kayma oranlarını kullanılmaktadırlar. Bu sebeple tekerlek kayma oranları tahmin edilmektedir [12].

Taşıt parametlerinin elde edilmesi taşıtın nominal davranışının belirlenmesinde önemli bir yer kaplamaktadır. Bu kapsamda efektif tekerlek yarıçapı, tekerlek boyuna katılığı gibi tekerlek parametrelerinin tahmin edilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [13-15]. Tekerlek basıncının tahmin edilmesi de taşıt dinamiği kontrolünün etkinliğini artırmakta, tekerlek ömrünü artırıp yakıt ekonomisini iyileştirmektedir [16].

Taşıt parametlerinin yanında yol durumunun bilinmesi de taşıtın özellikle yanal dinamiğinin kontrolü için önemlidir. Islak ve buzlu yollarda tekerlek ile yol arasındaki sürtünme kuvveti azalacağından dolayı tekerleğin yol üzerinde oluşturabileceği boyuna ve yanal kuvvetler azalacaktır. Bu sebepten dolayı literatürde tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısının tahmini ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır.

Bir çalışmada tekerlek kayma oranının eğimi, Kalman filtresi ve farklı yollarda yapılan istatistiksel çalışmalar kullanılarak tekerlek yol sürtünme katsayısı tahmin edilmeye çalışılmış ve deneysel bir taşıt ile yapılan testin sonuçları verilmiştir [17]. Bir başka çalışmada tekerlek kayma oranı, tekerlek yana kayma açısı, tekerlek dikey kuvvetleri ve genişletilmiş Kalman Bucy filtresi kullanılarak sürtünme katsayısı tahmin edilmiştir [18].

Taşıt yanal dinamiği kullanılarak yapılan sürtünme katsayısı tahmini çalışmaları da bulunmaktadır. Bir çalışmada DGPS ve jiroskop kullanılarak tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısı tahmin edilmiştir [19]. Başka bir çalışmada tekerlek dönüş katılığı, tekerlek yana kayma açısı tahmincileri, boyuna ve yanal ivme sensörleri, savrulma açısal hızı sensörleri kullanılarak en büyük tekerlek yol sürtünme katsayısı tahmin edilmeye çalışılmıştır [20].

Taşıt yana kayma açısı da ESP gibi taşıt yanal dinamik kontrolcülerini tarafından kontrol edilen bir durumdur. Özellikle buzlu yollarda taşıt kontrolden çıkarak yana kayma açısının aşırı büyümesine sebep olabilir. Bu yüzden taşıt yana kayma açısı da oldukça önemlidir. Yalnız, taşıt yana kayma açısı sensörleri oldukça pahalıdır ve normalde taşıtlarda pek kullanılmazlar. Bu yüzden taşıt yana kayma açısı, diğer taşıt sensörleri ve gözetleyiciler kullanılarak tahmin edilirler.

Bir çalışmada taşıta eklenen bir GPS'den alınan taşıt hızı ve savrulma açısal hızı sensörü bilgisinden yararlanılarak taşıtın yana kayma açısı tahmin edilmiştir[21]. Başka bir çalışmada elektrikli direksiyon sistemindeki elektrik motorunun ürettiği tork bilgisinden faydalanarak taşıt yana kayma açısı tahmin edilmiştir[22]. Taşıt yana kayma açısının tahmin edilmesi üzerine çeşitli doğrusal olmayan yöntemler de mevcuttur [23-26].

Taşıtın yalpa ve kafa vurma açıları da taşıt dinamik kontrolcülerini tarafından kullanılmaktadırlar. Yalpa açısı, taşıtın devrilmesini engelleyen kontrolcüler tarafından kullanılmaktadır. Bir takım sensörler ve gözetleyici kullanarak taşıtın yalpa ve kafa vurma açıları tahmin edilebilmektedir [27].

Taşıt dinamiği kontrolcülerinde taşıt savrulma açısal hızı da tahmin edilebilmektedir. Literatürde savrulma açısal hızı sensörleri yerine daha ucuz olan ivmeölçer gibi sensörler kullanılarak yapılan çalışmaların yanında standart ABSli taşıtlarda var olan sensörleri kullanarak yapılan çalışmalar da mevcuttur.

Bir çalışmada taşıtın sağına ve soluna eklenen iki yanal ivmeölçer bilgisi kullanılarak savrulma açısal hızı kinematik olarak hesaplanmış. İkincil olarak taşıtın merkezindeki yanal ivme bilgisi ve kalman filtresi kullanılarak savrulma açısal hızı gözetleyicisi tasarlanmış ve bu iki yaklaşım birleştirilerek savrulma açısal hızı tahmincisi elde edilmiştir [6].

İki yanal ivmeölçer kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise bu sefer ivmeölçerler taşıtın önüne ve arkasına konulmuş ve Kalman filtresi ile birlikte savrulma açısız hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır [28].

Tek ivmeölçer ile yapılan çalışmalarda ise taşıt hızı ile birlikte bir gözetleyici kullanılarak savrulma açısız hızı tahmin edilmiştir[29-31].

Bir çalışmada tekerlek hızlarından ve yanal ivmeden iki başlangıç savrulma hızı tahminleri elde edilmiş; bu iki savrulma açısız hızı tahmininin güvenilirlik seviyesine göre ağırlıklı ortalaması alınmıştır. Bu başlangıç tahmini kapalı çevrim doğrusal olmayan bir gözetleyicide kullanılarak savrulma açısız hızı son tahmini elde edilir. Çalışmada kullanılan gözetleyicideki parametreler tahmin edilen taşıt-yol sürtünme katsayısına bağlıdır [32].

Başka bir çalışmada 3 ve 4 ivmeölçerli iki sensör takımıyla taşıt savrulma açısız hızı, taşıt yana kayma açısı, tekerlek dönüş katılığı, yalpa açısız hızlarının tahmini üzerinde çalışmıştır [33].

GPS kullanılarak yapılan bir çalışmada, GPS'ten alınan taşıt hızı bilgisi kullanılarak tekerleklerin yarıçapı tahmin edilmiş; kalman filtresi, arka tekerleklerden alınan hız bilgisi ve tekerlek yarıçapını kullanılarak taşıt savrulma açısız hızı elde edilmiştir [34].

Buraya kadarki olan çalışmalarda savrulma açısız hızının tahmini için savrulma açısız hızı sensörü yerine başka sensörler kullanılmıştır. Başka sensör ve sensörlerin kullanılması taşıt dinamiği kontrol sistemine maliyet getirecektir. Ayrıca fazladan bir sensörün kullanılması kontrol sisteminin sensör arızalarından dolayı devre dışı kalması olasılığı artmış olacaktır.

Standart ABS sensörleri kullanılarak yapılan bir çalışmada tekerlek hızı sensörlerinden alınan bilgiler kullanılarak savrulma açısız hızı hesaplanmıştır; fakat bu hesap oldukça gürültülü sonuç vermektedir. Kalman filtresi kullanılarak gürültü azaltılır ve savrulma açısız hızı tahmin edilir [35].

Benzer başka bir çalışmada ise kinematik bir yöntemle tekerlek hızları, direksiyon açısı ve fren durumu sensörleri kullanılarak savrulma açısız hızı bilgisi hesaplanmıştır. Bu hesaplamada frenleme durumu da göz önüne alınarak daha iyi bir yaklaşım elde edilmiştir [36].

Bu tezde ise Venhovens ve Ghoneim çalışmasındaki gibi tekerlek hızı, direksiyon açısı sensörleri gibi ABS'li taşıtlarda standart olan sensörler kullanılmıştır. Ek olarak yine ABS'li taşıtlarda standart olan fren ve gaz bilgileri algoritmada kullanılmıştır. Çalışma temel olarak kinematik ve dinamik olmak üzere iki aşamadan meydana gelmektedir. Kinematik kısım [36] çalışmasına benzemekle birlikte ek olarak taşıtın ivmelenme durumu da göz önünde bulundurulmuştur. Dinamik kısımda ise kinematik kısımda hesaplanan savrulma açısal hızı bilgisi ve kalman filtresi kullanılarak savrulma açısal hızı tahmin edilmiştir.

### **1.3 Çalışmanın Kapsamı**

Bu tez çalışmasında taşıt savrulma açısal hızı bilgisi kinematik ve dinamik olarak tahmin edilmeye çalışılmış ve bir takım deneysel sonuçlara yer verilmiştir.

Birinci bölümde ana konu ile ilgili bilgilendirme yapılarak savrulma açısal hızı bilgisinin önemine vurgu yapılmıştır. Bu konuda daha önce yapılan çalışmalara yer verildikten sonra tezin kapsamı belirtilmiştir.

İkinci bölümde tez çalışmasında kullanılan taşıt modellerine yer verilmiştir. Kontrolcü için kullanılan doğrusal taşıt modeli, benzetim için kullanılan çift izli taşıt modeli ve deneysel testlerin öncesinde kullanılan gerçekçi CarMaker taşıt modeli anlatılmış ve gerçek taşıt verileriyle karşılaştırılarak taşıt parametreleri doğrulanmıştır.

Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan deneysel sistemlere yer verilmiş, laboratuvar ve test pistinde yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan doğrusal Kalman Filtresi ile ilgili teorik bilgilere yer verilmiştir.

Beşinci bölümde ise savrulma açısal hızı bilgisinin tahmin aşamaları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Tez kapsamında yapılan bilgisayar benzetimlerine ve gerçek taşıt ile yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir.

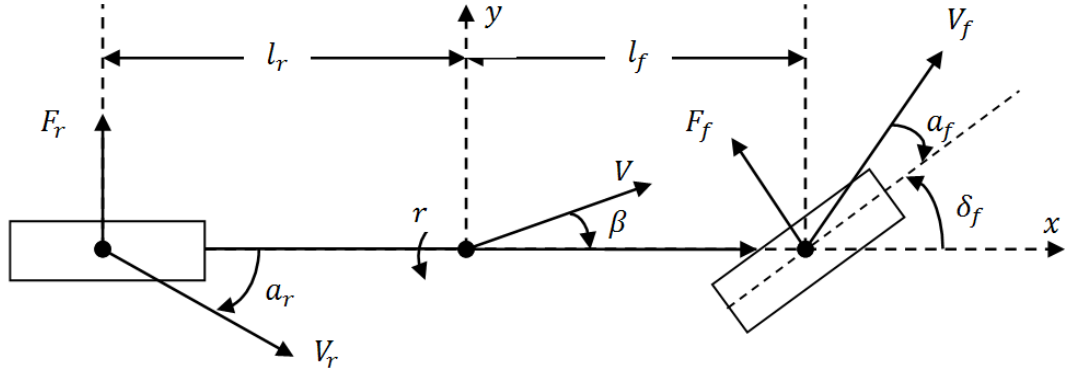
Altıncı bölümde ise tez çalışması ve sonuçları ile ilgili yorumlara yer verilmiştir.

## 2. TAŞIT MODELLERİ

Tez çalışmasının geliştirilmesi ve denenmesi aşamasında çeşitli taşıt modelleri oluşturulmuş ve kullanılmıştır. Tasarlanan tahminciye kullanılmak ve taşıtın kararlılık analizini yapmak üzere taşıtın doğrusal modeli elde oluşturulmuştur. Algoritmanın geliştirilmesi aşamasında kullanılmak üzere çift izli taşıt modeli kullanılmış ve algoritmanın laboratuvar ortamında test edilmesi amacıyla yüksek serbestlik dereceli taşıt modeli olan CarMaker kullanılmıştır. Üçüncü bölümde tahmin algoritması gerçek bir taşıt üzerinden alınan veriler ile test edilmiştir.

### 2.1 Tek İzli Doğrusal Taşıt Modeli

Tasarımda kullanılan Kalman filtresi, doğrusal bir tahmin yöntemi olup, sistemin doğrusal modeline ihtiyaç duyar. Doğrusal taşıt modeli, tek izli doğrusal olmayan taşıt modelinin bir çalışma noktasında doğrusallaştırılması ile elde edilir.



Şekil 2.1 : Tek İzli Taşıt Modeli Üzerindeki Kuvvetler

Şekil 2.1'de Riekert &Schunk'a ait tek izli taşıt modelinin yapısı görülmektedir[37]. Bu modelde ön ve arka tekerlekler taşıtın merkez çizgisi üzerinde birer tekerlek ile temsil edilir. Bu nedenle yalpa dinamiği olmayan bisiklet modeli olarak da adlandırılabilir. Yalnızca yanal dinamiğin analizi için geliştirildiğinden motor modeli ve boyuna tekerlek dinamiğini içermez. Ayrıca taşıtın yalpa hareketi (x eksenini etrafındaki açısal hareket) ve yunuslama hareketi (y eksenini etrafındaki açısal hareket)nin olmadığı varsayılır[38].

**Çizelge 2.1 :** Tek izli taşıt modelinde kullanılan parametreler.

Sembol	Tanım	Birim
$r, \dot{\psi}$	Savrulma açısal hızı	rad/s
$\beta$	Taşıt yana kayma açısı	rad
$V$	Ağırlık merkezindeki taşıt hızı	m/s
$\alpha_f(\alpha_r)$	Ön (arka) tekerlek yana kayma açısı	rad
$\delta_f$	Ön tekerleklerdeki dönüş açısı	rad
$C_{af}(C_{ar})$	Ön (arka) tekerlek dönüş katılıkları	N/rad
$m$	Taşıt kütlesi	kg
$I_z$	Savrulma eksenine göre taşıtın atalet momenti	Nm
$l_f(l_r)$	Ön (arka) aks – ağırlık merkezi mesafesi	m
$R$	Dinamik tekerlek yarıçapı	m

Çizelge 2.1’de taşıt modelinde kullanılan parametreler verilmiştir. Burada savrulma açısal hızı, taşıtın z eksenini etrafındaki açısal hızını ifade etmekte, taşıt yana kayma açısı ise taşıtın merkezindeki taşıt hızı vektörünün taşıtın x eksenini ile yaptığı açıyı ifade etmektedir. Tekerlek yana kayma açıları da yine aynı şekilde tekerlek merkezindeki hız ile tekerleğin x eksenini arasındaki açıyı ifade etmektedir.

Şekil 2.1’de gösterilen kinematik gösterim üzerinde Newton kanunları uygulanarak taşıt yanal dinamik denklemleri elde edilir.

$$F_x = ma_x = -F_f \sin \delta_f \quad (2.1)$$

$$F_y = ma_y = F_f \cos \delta_f + F_r \quad (2.2)$$

$$M_z = I_z \ddot{\psi} = F_f l_f \cos \delta_f + F_r l_r \quad (2.3)$$

Denklem 2.1-2.3 teki ivme değerleri taşıt hızının türevi alınarak bulunabilir. Taşıt hızı ve taşıt eksenindeki hareketler denklem 2.4 teki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, \vec{\omega} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Buna göre taşıt hızının türevi alınırsa,

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \left( \frac{d\vec{V}}{dt} \right)_{rel} + \vec{\omega} \times \vec{V} \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{d\vec{V}}{dt}\right)_{rel} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Vektörel çarpım işlemi yapılırsa,

$$\vec{\omega} \times \vec{V} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ V_x & V_y & V_z \end{bmatrix} = \vec{i}(qV_z - rV_y) - \vec{j}(pV_z - rV_x) + \vec{k}(pV_y - qV_x) \quad (2.7)$$

Buna göre türev ifadesi birleştirilirse,

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} + \vec{i}(qV_z - rV_y) - \vec{j}(pV_z - rV_x) + \vec{k}(pV_y - qV_x) \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de dikey taşıt hızı ve ivmesi sıfır kabul edilirse, boyuna ve yanıl taşıt ivmesi denklem 2.9 ve 2.10'daki gibi verilebilir.

$$a_x = \dot{V}_x - rV_y \quad (2.9)$$

$$a_y = \dot{V}_y + rV_x \quad (2.10)$$

Denklem 2.9 ve 2.10 daki denklemler taşıt hızı ve taşıt yana kayma açısı cinsinden yazılabilir.

$$V_x = V \cos \beta \quad (2.11)$$

$$V_y = V \sin \beta$$

Boyuna ve yanıl taşıt hızının türevleri alınırsa

$$\dot{V}_x = \dot{V} \cos \beta - V(\sin \beta)\dot{\beta} \quad (2.12)$$

$$\dot{V}_y = \dot{V} \sin \beta + V(\cos \beta)\dot{\beta} \quad (2.13)$$

2.11-2.13 denklemleri 2.9 ve 2.10 denklemlerinde kullanılırsa 2.14 ve 2.15 ifadeleri elde edilir.

$$a_x = \dot{V} \cos \beta - V \sin \beta (\dot{\beta} + r) \quad (2.14)$$

$$a_y = \dot{V} \sin \beta - V \cos \beta (\dot{\beta} + r)$$

2.14 denklemlerini 2.1-2.3 denklemlerine yazıp düzenlersek:

$$\begin{bmatrix} -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + r) \\ m\dot{V} \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \delta_f & 0 \\ \cos \delta_f & 1 \\ l_f \cos \delta_f & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_f \\ F_r \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.15 denklemindeki ilk çarpanın determinanı 1 dir. Bu çarpanın tersi ile her iki taraf çarpılırsa 2.17 dinamik denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + r) \\ m\dot{V} \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.17 denkleminde küçük  $\beta$  açıları için  $\sin \beta = \beta$ ,  $\cos \beta = 1$  yaklaşımı ile doğrusallaştırma yapılırsa 2.18 denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + r) \\ m\dot{V} \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta & 1 & 0 \\ 1 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Taşıt hızının sabit olduğuna göre,  $\dot{V} = 0$ , varsayımı yapılabilir.

Buna göre 2.18 denklemi 2.19'daki hale gelir.

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + r) \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.17 denkleminde  $F_f$  ve  $F_r$  doğrusal tekerlek modelinde elde edilir. Buna göre,

$$\begin{aligned} F_f &= C_{af} \mu a_f = C_{af} \mu (\delta_f - \beta_f) \\ F_r &= C_{ar} \mu a_r = C_{ar} \mu (-\beta_r) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Taşıtta boyuna yöndeki hız bileşenlerinin eşit olması beklenir.



$$V_r \cos \beta_r = V \cos \beta = V_f \cos \beta_f \quad (2.21)$$

Yanal hız bileşenleri ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_f \sin \beta_f = V \sin \beta + l_f r \quad (2.22)$$

$$V_r \sin \beta_r = V \sin \beta - l_r r$$

2.21 ve 2.22 denklemleri kullanılırsa  $\beta_f$  ve  $\beta_r$  ifadeleri elde edilir:

$$\tan \beta_f = \tan \beta + \frac{l_f r}{V \cos \beta} \quad (2.23)$$

$$\tan \beta_r = \tan \beta - \frac{l_r r}{V \cos \beta}$$

2.23 denklemi doğrusallaştırılırsa 2.24 denklemi elde edilir.

$$\beta_f = \beta + \frac{l_f r}{V} \quad (2.24)$$

$$\beta_r = \beta - \frac{l_r r}{V}$$

2.16 denklemi de doğrusallaştırılırsa,

$$\begin{bmatrix} F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ l_f & -l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_f \\ F_r \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

2.19, 2.20, 2.24 ve 2.25 ifadeleri düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + r) \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ l_f & -l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{af} \mu (\delta_f - \beta - \frac{l_f r}{V}) \\ C_{ar} \mu (-\beta + \frac{l_r r}{V}) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\dot{\beta} = \frac{1}{mV} \left[ C_{af} \mu (\delta_f - \beta - \frac{l_f r}{V}) \right] - r + \frac{1}{mV} \left[ C_{ar} \mu (-\beta + \frac{l_r r}{V}) \right] \quad (2.27)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_z} \left[ C_{af} \mu l_f (\delta_f - \beta - \frac{l_f r}{V}) - C_{ar} \mu l_r (-\beta + \frac{l_r r}{V}) \right]$$

2.26 ifadesi düzenlenirse taşıt yana kayma açısına ve savrulma açısal hızına göre doğrusal ifadeler elde edilir:

Tekerlek-yol sürtünme katsayısının ( $\mu$ ) düşmesi, taşıt kütlesi ( $m$ ) ve savrulma momentinin ( $I_z$ ) artması ile aynı etkiyi oluşturmaktadır [38].

$$\tilde{m} = m/\mu \quad (2.28)$$

$$\tilde{I}_z = I_z/\mu$$

Buna göre 2.28 ifadeleri 2.27'de yerine yazıp durum uzayı modelini halinde yazarsak tek izli taşıt doğrusal modeli elde edilir:

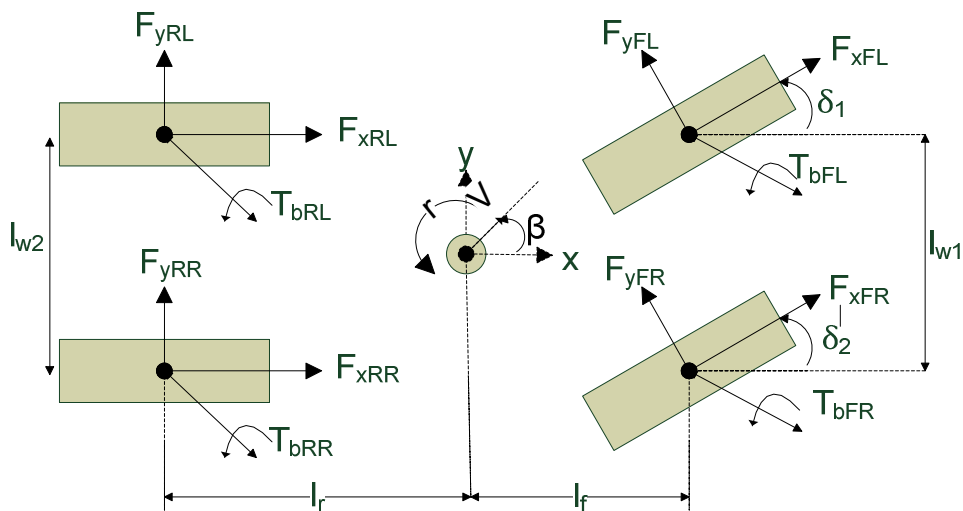
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(C_{af} + C_{ar})}{\tilde{m}V} & \frac{(-C_{af}l_f + C_{ar}l_r)}{\tilde{m}V^2} - 1 \\ \frac{-C_{af}l_f + C_{ar}l_r}{\tilde{I}_z} & \frac{-C_{af}l_f^2 - C_{ar}l_r^2}{\tilde{I}_zV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_{af}}{\tilde{m}V} \\ \frac{C_{af}l_f}{\tilde{I}_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (2.29)$$

## 2.2 Çift İzli Taşıt Modeli

Çift izli taşıt modeli tasarlanan çalışmanın geliştirilmesi sırasında çalışmanın test edilmesi amacıyla oluşturulmuştur.

Çift izli taşıt modeli, sürücü modeli, aktarma organları modeli, tekerlek modeli ve yanal taşıt dinamiğini içermektedir ve Matlab-Simulink programında oluşturulmuştur. Süspansiyon dinamiği ve yalpa dinamiği ihmal edilmiştir.

Sürücü modeli taşıt hızını, referans taşıt hızına yaklaştırmak için gaz pedalını kontrol eder ve hız kontrolünü gerçekleştirmiş olur.



Şekil 2.2 : Çift İzli Taşıt Modeli.

Şekil 2.2’de çift izli taşıtın x ve y yönlerindeki kuvvet ve z eksenini etrafındaki moment denklemleri şu şekilde verilebilir.

$$\begin{aligned}
\sum F_{xi} &= F_{xFL} \cos \delta_1 + F_{xFR} \cos \delta_2 + F_{xRL} + F_{xRR} \\
&\quad - F_{yFL} \sin \delta_1 - F_{yFR} \sin \delta_2 \\
\sum F_{yi} &= F_{yFL} \cos \delta_1 + F_{yFR} \cos \delta_2 + F_{yRL} + F_{yRR} \\
&\quad + F_{xFL} \sin \delta_1 + F_{xFR} \sin \delta_2 \\
\sum M_z &= [F_{yFL} \cos \delta_1 + F_{yFR} \cos \delta_2 + F_{xFL} \sin \delta_1 + F_{xFR} \sin \delta_2] l_f \\
&\quad + [F_{yFL} \sin \delta_1 - F_{yFR} \sin \delta_2 - F_{xFL} \cos \delta_1 + F_{xFR} \cos \delta_2] \frac{l_{w1}}{2} \\
&\quad + [-F_{yRL} - F_{yRR}] l_r + [-F_{xRL} + F_{xRR}] \frac{l_{w2}}{2}
\end{aligned} \tag{2.30}$$

**Çizelge 2.2 :** Çift İzli Taşıt Modelinde kullanılan semboller.

Sembol	Tanım	Birim
$I_w$	Tekerlek atalet momenti	kg-m <sup>2</sup>
$w$	Tekerlek Dönüş Hızı	rad/s
$T_d$	Sürüş Torku	Nm
$T_b$	Fren Torku	Nm
$F_x$	Tekerlek Boyuna Kuvveti	N
$R_w$	Tekerlek Efektif Yarıçapı	m
$F_r$	Yuvarlanma Direnci Kuvveti	N
$V_{xi}$	Tekerlek boyuna hızları	m/s
$V_{wi}$	Tekerlek merkezindeki hız	m/s
$\alpha_i$	Tekerlek yana kayma açıları	rad
$C_x(C_y)$	Tekerlek boyuna(yanal)dönüş katlıkları	N/rad

Burada  $F_i$  ( $i=FL,FR,RL,RR$ ) kuvvetleri Dugoff lastik modeli ile elde edilmiştir. Dugoff lastik modeli doğrusal olmayan bir modeldir ve taşıt dinamiği analizinde ve literatürde çok kullanılmaktadır. Dugoff lastik modeli denklem 2.31 ve 2.32 ile verilebilir [39].

$$F_{xi} = f_i C_{xi} S_i \tag{2.31}$$

$$F_{yi} = f_i C_{yi} \alpha_i$$

$$f_i = \begin{cases} 1, & F_{Ri} \leq \frac{\mu_i F_{zi}}{2} \\ \left(2 - \frac{\mu_i F_{zi}}{2F_{Ri}}\right) \frac{\mu_i F_{zi}}{2F_{Ri}}, & F_{Ri} > \frac{\mu_i F_{zi}}{2} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$F_{Ri} = \sqrt{(C_{xi}s_i)^2 + (C_{yi}a_i)^2}$$

Tekerlek yana kayma açıları ise şu denklemlerle ifade edilebilir:

$$a_{FL} = \delta - \tan^{-1} \left( \frac{V_y + l_f r}{V_x - \frac{l_{w1}}{2} r} \right)$$

$$a_{FR} = \delta - \tan^{-1} \left( \frac{V_y + l_f r}{V_x + \frac{l_{w1}}{2} r} \right) \quad (2.33)$$

$$a_{RL} = -\tan^{-1} \left( \frac{V_y - l_r r}{V_x - \frac{l_{w2}}{2} r} \right)$$

$$a_{RL} = -\tan^{-1} \left( \frac{V_y - l_r r}{V_x + \frac{l_{w2}}{2} r} \right)$$

Tekerlek boyuna kayma oranları taşıtın ivmelenme ve frenleme anlarında tekerlek ve yol arasında meydana gelen kayma miktarını ifade etmektedir. Tekerlek kayma oranları şu şekilde ifade edilebilir:

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{w_i R_w - V_{xi}}{V_{xi}}, w_i R_w - V_{xi} < 0 \text{ (frenleme)} \\ \frac{w_i R_w - V_{xi}}{w_i R_w}, w_i R_w - V_{xi} \geq 0 \text{ (ivmelenme)} \end{cases} \quad (2.34)$$

2.34 denkleminde tekerlek dönüş hızları tekerlek dinamiğinden; tekerlek boyuna hızları ise 2.35 denkleminde elde edilir.

Tekerleklerin boyuna hızları ise 2.35 denklemi ile verilebilir:

$$V_{xi} = |V_{wi}| \cos(\alpha_i) \quad (2.35)$$

Burada  $V_{wi}$  tekerlek merkezindeki hızlar 2.36 denklemleriyle ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
V_{wfl} &= (V_x - r l_{w1}/2)i + (V_y + r l_f)j \\
V_{wfr} &= (V_x + r l_{w1}/2)i + (V_y + r l_f)j \\
V_{wrl} &= (V_x - r l_{w2}/2)i + (V_y - r l_r)j \\
V_{wrr} &= (V_x + r l_{w2}/2)i + (V_y - r l_r)j
\end{aligned}
\tag{2.36}$$

Tekerlek dinamiği şu şekilde ifade edilebilir:

$$I_{wi}\dot{\omega} = T_d - T_b - F_{xi}R_w - F_rR_w \tag{2.37}$$

Burada yuvarlanma direnci kuvveti,  $F_r$ , aşağıdaki gibi verilebilir:

$$F_r = mg\mu_r \tag{2.38}$$

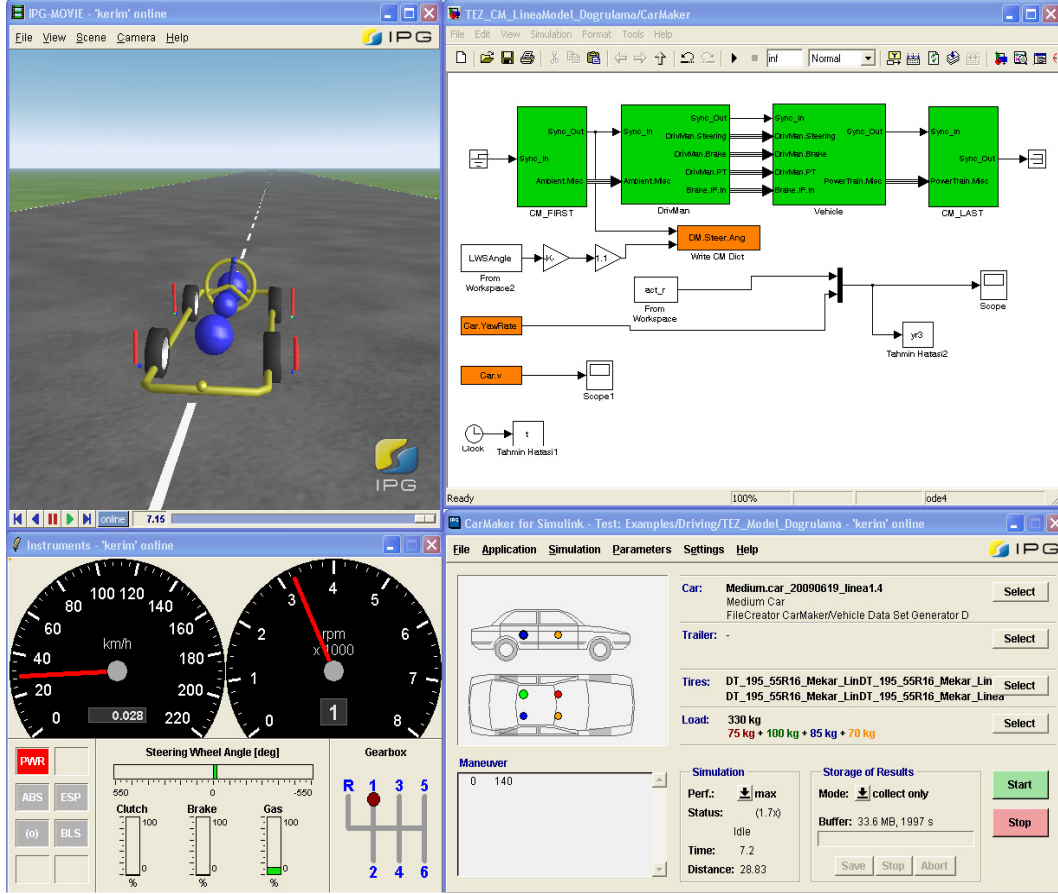
$\mu_r$ : yuvarlanma direnç katsayısı

### 2.3 CarMaker Taşıt Modeli

CarMaker, sürücü modeli, süspansiyon dinamiği, taşıt boyuna ve yanal dinamiklerinin modellendiği gerçeğe yakın yüksek dereceli bir benzetim ortamıdır. Geliştirilen taşıt kontrolcülerinin yola çıkmadan önce bilgisayar üzerinde test edilmesine olanak veren gelişmiş yüksek serbestlik derecesine sahip bir programdır. CarMaker model blokları simulink üzerinde çalışabilir ve model bloklarına kısmen de olsa müdahale edilebildiği için değişik kontrolcüler test edilebilmekte, ABS, ESP, TCS gibi boyuna ve yanal dinamik kontrolcülerini denenebilmektedir. Bu şekilde geliştirilen bir taşıt kontrolcüsü gerçek taşıt testlerinden önce bilgisayar ortamında denenebilir ve gerçek taşıt testlerinde harcanacak vakit ve maliyetten tasarruf sağlanmış olacaktır. Ayrıca daha güvenli bir ortam sağlanmış olacaktır.

Bu tezdeki çalışmalar gerçek taşıt üzerinde test edilmeden önce CarMaker taşıt modelinde denenmiştir. Gerçek taşıt üzerinde test yapmadan önce algoritmanın bilgisayar üzerinde denenerek doğruluğunun sınanması, hem vakit tasarrufu hem de güvenlik açısından önemlidir.

Şekil 2.3'te CarMaker programının ekran görüntüsü yer almaktadır. CarMaker'da yapılan benzetimlerde taşıtın yaptığı manevranın anlık video görüntüsü de izlenebilmektedir.



Şekil 2.3 : CarMaker Benzetim Programı.

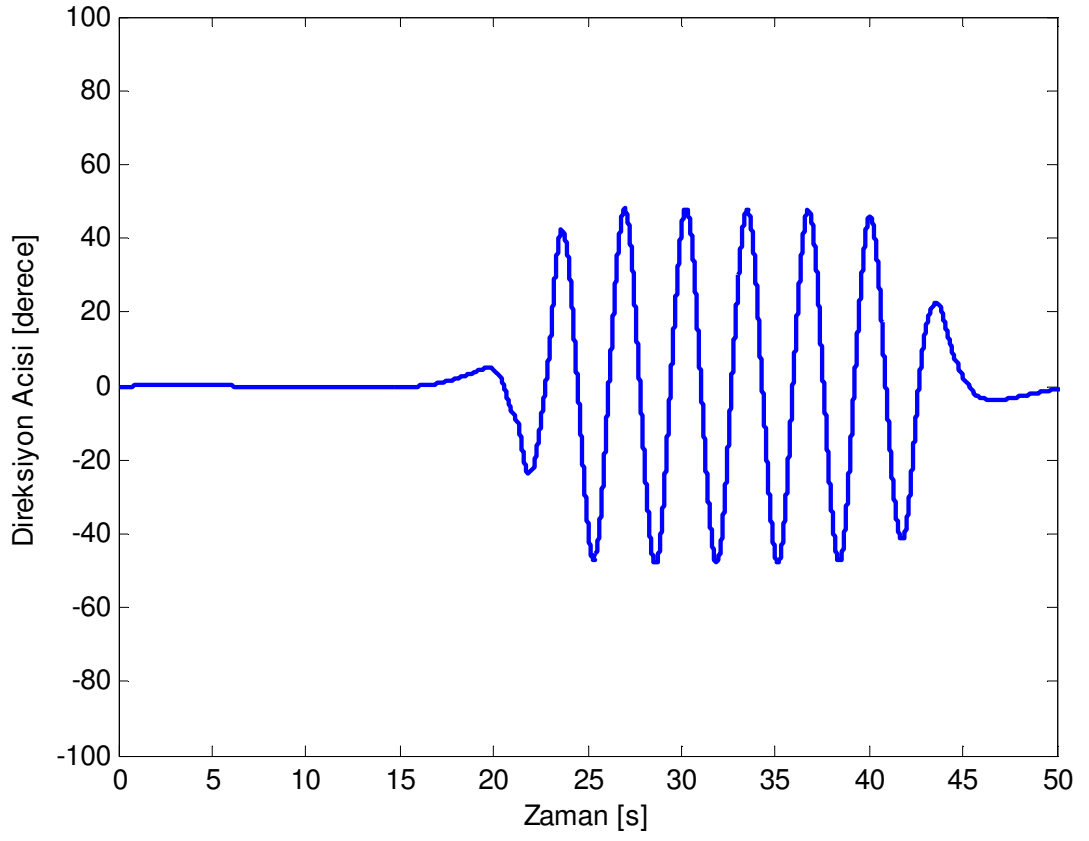
## 2.4 Taşıt Modellerinin Gerçek Taşıtlar Verileri ile Doğrulaması

Oluşturulan modellerin etkinliğini göstermek için, taşıtlar modelleri CarMaker ve gerçek taşıtlar verileri ile doğrulanmıştır. CarMaker’da yapılan doğrulama çalışmasında her üç model de aynı anda çalıştırılmıştır. Gerçek taşıtlar verileri ile yapılan doğrulama çalışmasında ise daha önce alınan deneysel veriler tek izli ve çift izli taşıtlar modellerine giriş olarak verilmiştir.

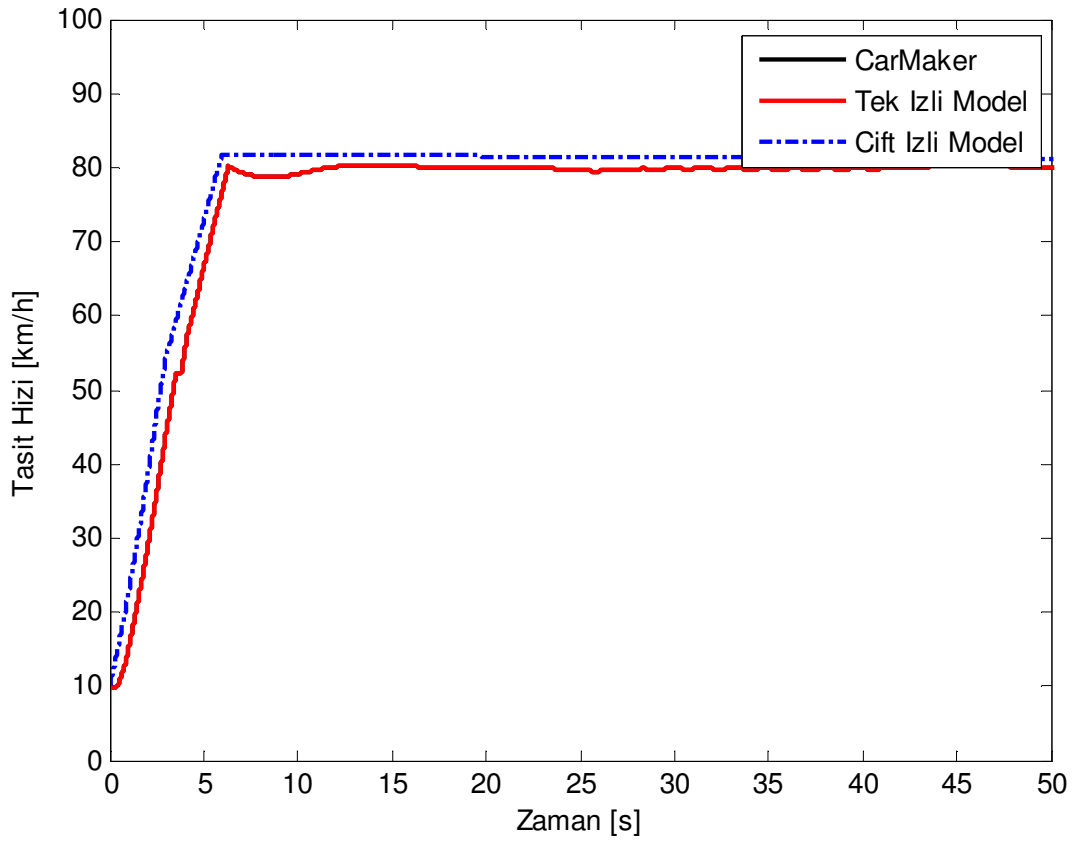
### 2.4.1 CarMaker modeli ile doğrulama

Doğrusal tek izli taşıtlar modeli ve çift izli taşıtlar modeli, CarMaker’da test edilmiştir. CarMaker gelişmiş ve doğrulanmış taşıtlar modellerine sahip olduğu varsayılmış ve literatürde çokça kullanılan doğrusal tek izli ve çift izli taşıtlar modelleri aynı direksiyon açısı ve taşıtlar hızlarında çalıştırılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

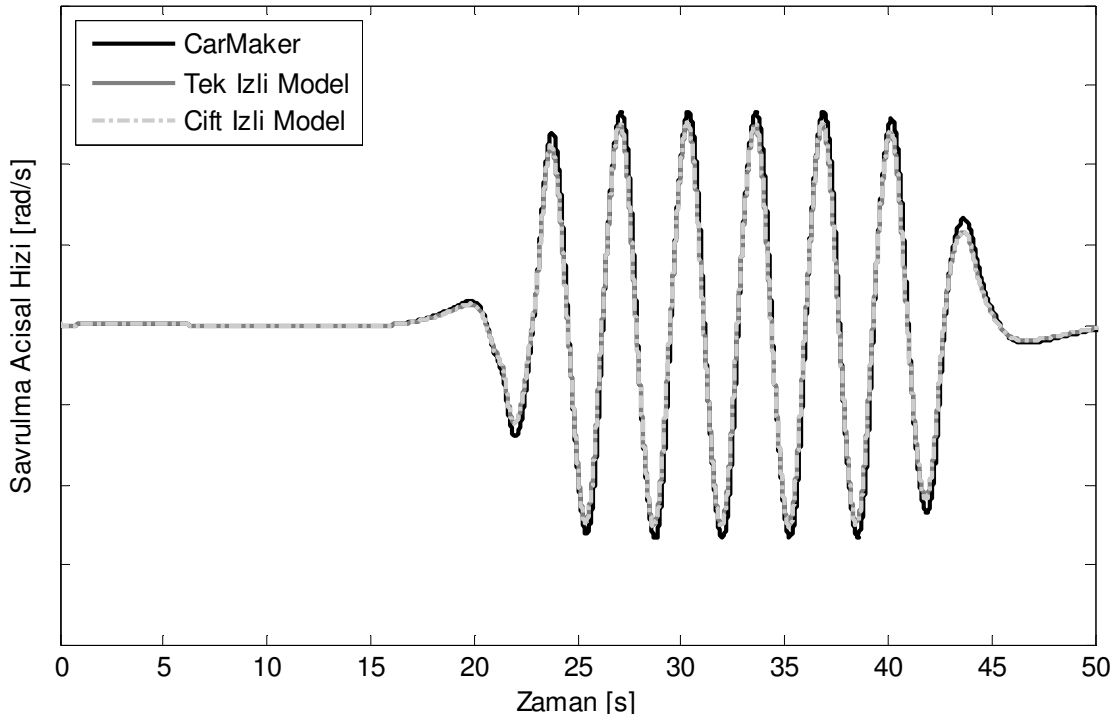
Şekil 2.4’te model doğrulaması için kullanılan direksiyon açısı ve şekil 2.5’te bu manevra sırasındaki modellerin taşıtlar hızları görülmektedir.



Şekil 2.4 : Direksiyon Açısı.



Şekil 2.5 : Modellerin Taşıt Hızları.



**Şekil 2.6 : Savrulma Açısal Hızları.**

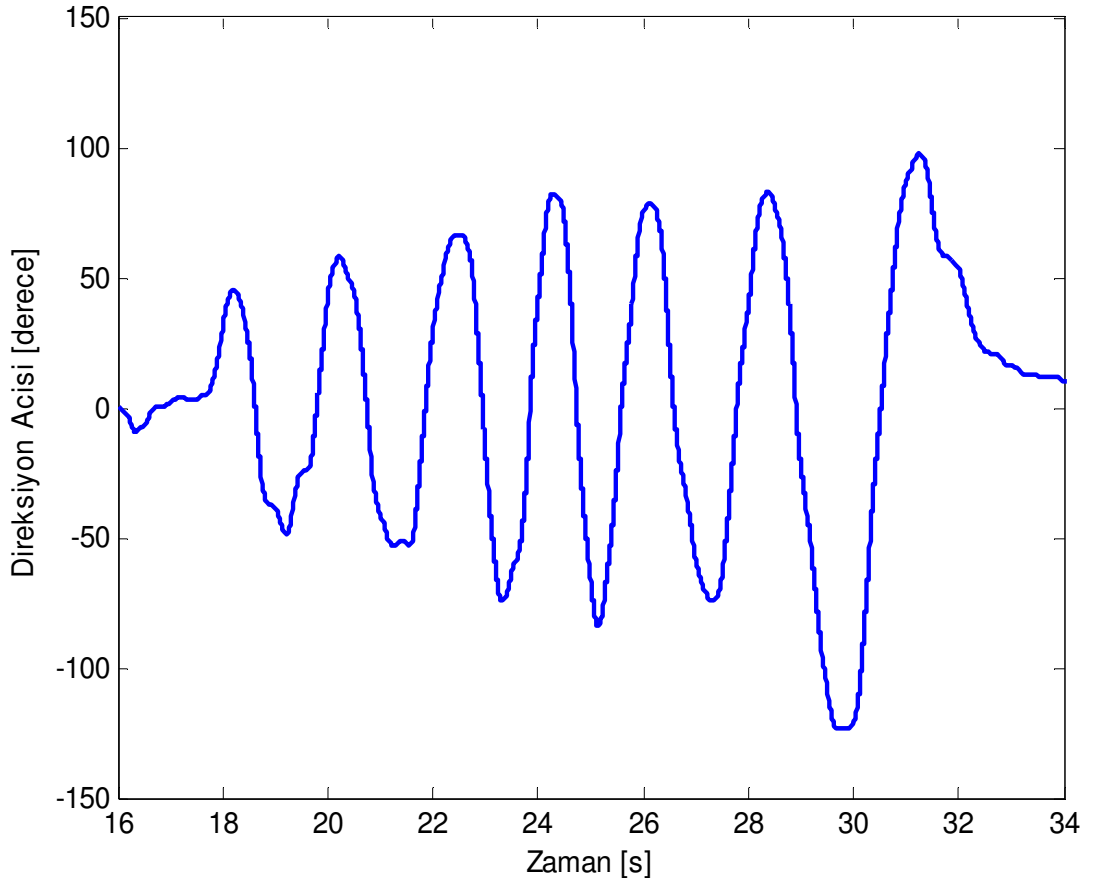
Şekil 2.6’da taşıt modellerinin şekil 2.4’te gösterilen direksiyon açılarına gösterdikleri savrulma açısal hızları cevapları görülmektedir. CarMaker’da yapılan bu çalışmada sürücü modeline sağ-sol manevrası yaptırılmıştır. Her üç modelin de savrulma açısal hız cevapları birbirine çok yakındır ve tek izli taşıt modeli ile çift izli taşıt modelinden elde edilen savrulma açısal hızı bilgileri CarMaker taşıt modelinden elde edilen savrulma açısal hızı bilgisini %94 doğrulukla ifade edebilmektedir. O halde doğrusal tek izli model ve çift izli taşıt modeli sanal sensör tasarımı ve testleri için uygundur denilebilir.

#### **2.4.2 Deneysel taşıt verileri ile doğrulama**

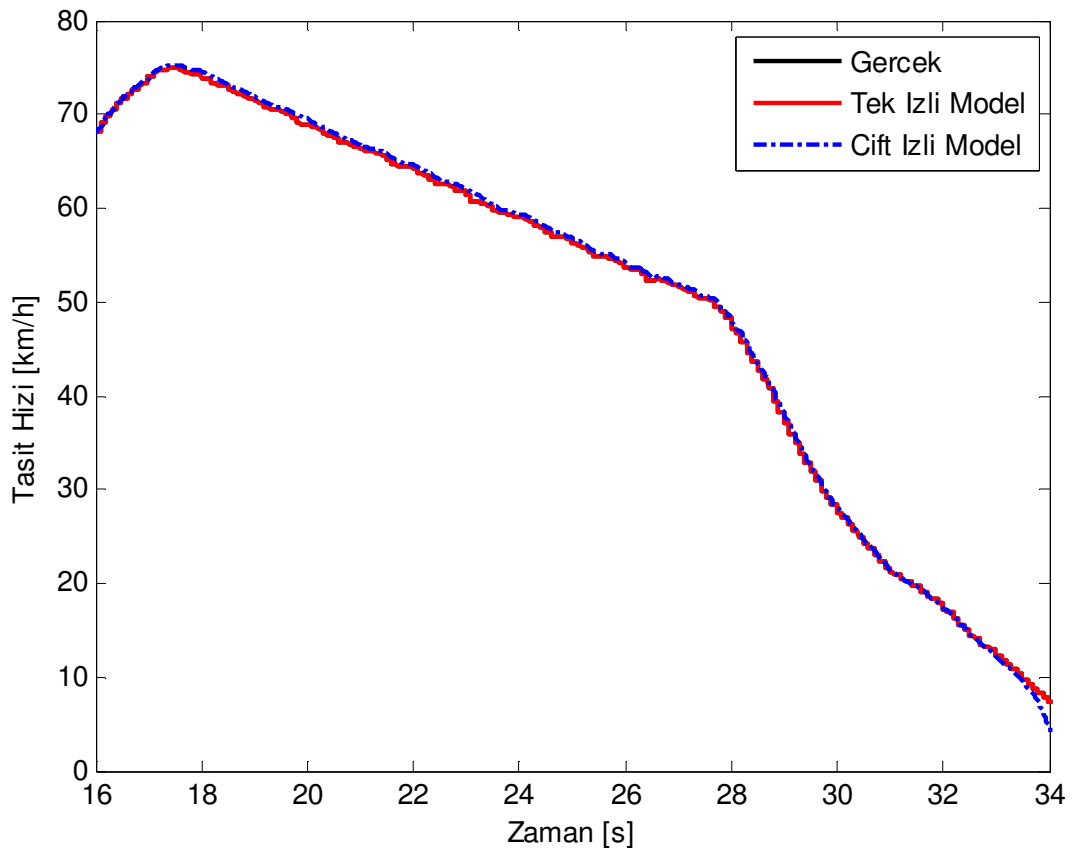
Deneysel taşıttan elde edilen veriler doğrusal tek izli taşıt modeli ve çift izli taşıt modelinde kullanılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel taşıt verileri Tofaş fabrikasının Bursa’daki test pistinde gerçekleştirilen testlerden elde edilmiştir ve bu testlerden elde edilen veriler daha sonra taşıt modellerinin doğrulanmasında ve tez çalışmasında tasarımı yapılan sanal algılayıcının etkinliğinin test edilmesinde kullanılmıştır.

Şekil 2.7’de deneysel taşıttan alınan direksiyon açısı görülmektedir. Deneysel taşıttan alınan veriler kullanıldığında tek izli ve çift izli taşıt modellerinde meydana gelen taşıt hızları şekil 2.8’de gösterilmiştir.

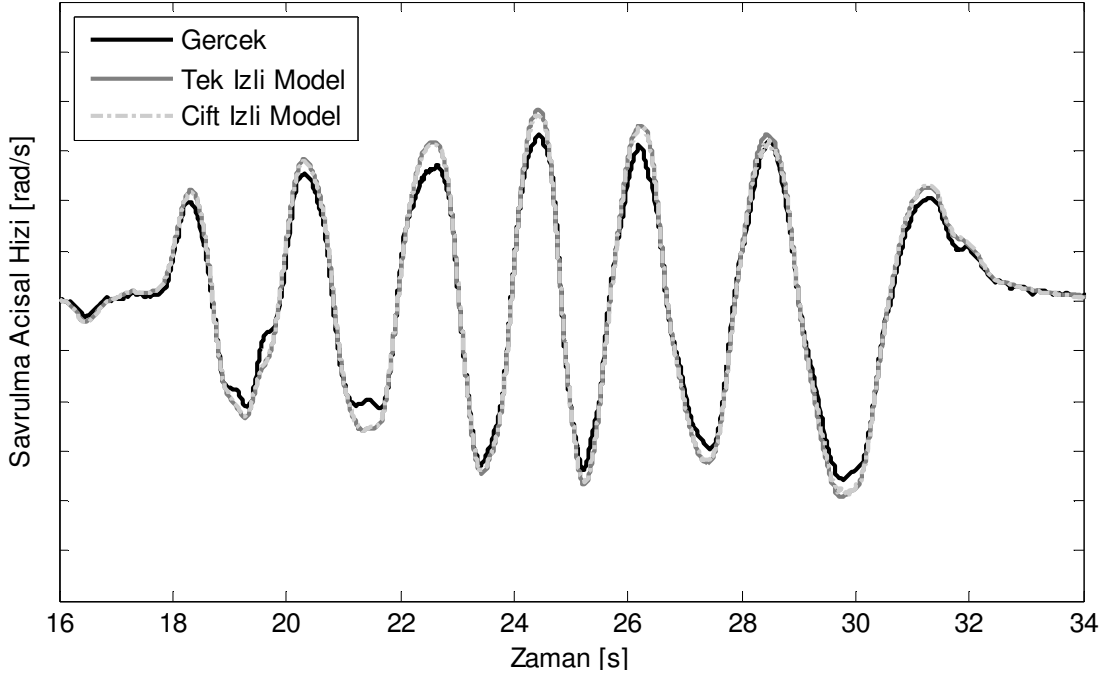




Şekil 2.7 : Direksiyon Açısı.



Şekil 2.8 : Taşıt Hızları.



**Şekil 2.9** : Savrulma Açısal Hızları.

Şekil 2.9’da deneysel taşıtın ve taşıt modellerinin savrulma açısal hızları görülmektedir. Taşıt modellerinin savrulma açısal hızları gerçek sonuca oldukça yakındır ve oluşturulan tek izli ve çift izli taşıt modellerinden elde edilen savrulma açısal hızı bilgileri, gerçek taşıttan alınan savrulma açısal hızı bilgisine %91 doğrulukla benzemektedir. O halde oluşturulan modeller gerçek modeli oldukça iyi yansıtabiliyor denilebilir.

### **3. DENEYSEL SİSTEMLER**

Tez çalışması bilgisayar ortamındaki benzetimler dışında gerçek zamanlı ortamda da denenmiş ve çalışır olduğu görülmüştür. Gerçek zamanlı testler laboratuvar ortamında ve taşıt üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar ortamındaki testler Mekar laboratuvarında bulunan taşıt benzetimcisinde gerçekleştirilmiştir. Taşıt üzerindeki testler ise Fiat-Tofaş'ın Bursa'daki test pistinde gerçekleştirilmiştir.

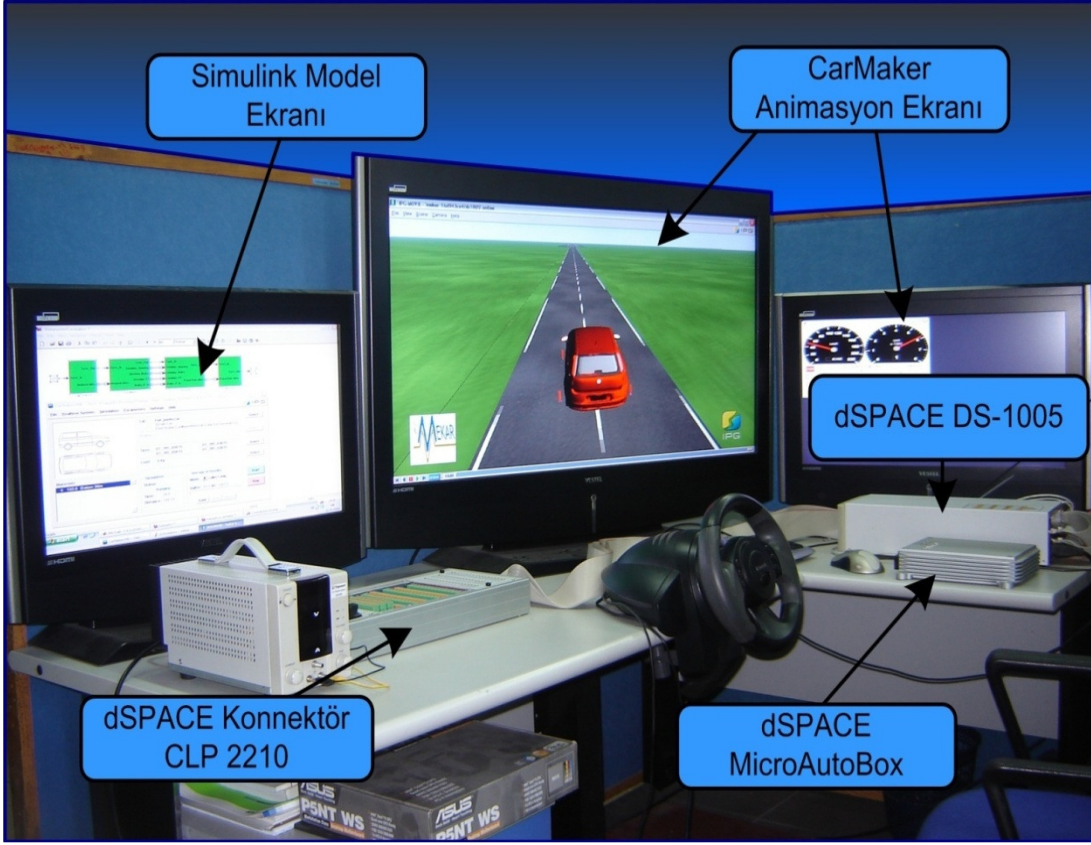
#### **3.1 Mekar Donanım İçeren Benzetimcisi**

Gerçek zamanlı benzetimler İTÜ Mekar'da bulunan taşıt benzetimcisi üzerinde yapılmıştır. Benzetimci üzerinde direksiyon, gaz ve fren pedalı, dSpace DS1005 işlemcisi ile dSpace DS2210 giriş/çıkış birimi ve MicroAutobox bulunmaktadır. Bu donanımlar bir bilgisayara bağlı ve bilgisayarda yüklü olan CarMaker HIL, Matlab/Simulink, dSpace Control Desk programları ile birlikte çalışmaktadır.

dSpace DS1005 işlemcisi ve dSpace DS2210 giriş/çıkış birimi gerçek zamanlı benzetimler için kullanılan benzetimci setidir [41]. Matlab/Simulink programı ile işbirliği içerisinde çalışabilmektedir. Bilgisayarda simulinkte kurulan program derlenerek doğrudan DS1005 işlemcinin hafıza modülüne yüklenebilmektedir. DS2210 ara birimi ile sayısal ve analog kontrol işaretler üretilebilmekte; sayısal ve analog işaretler giriş olarak alınabilmektedir.

CarMaker HIL, sürücü modeli, süspansiyon dinamiği, taşıt boyuna ve yanal dinamiklerinin modellendiği gerçeğe yakın yüksek dereceli bir benzetim ortamıdır ve DS1005 ile DS2210 birimleri ile birlikte çalışabilmektedir [40]. Böylece gerçek zamanlı ortamda taşıt modeli çalışabilmekte, daha gerçekçi benzetimler yapılabilmektedir.

MicroAutobox yine dSpace firmasının bir ürünüdür. Daha çok taşıt üzerindeki uygulamalar için üretilmiş küçük hacimli bir işlemcidir. İçerisinde işlemci, hafıza modülü ve giriş çıkış birimleri bulunmaktadır [42].



**Şekil 3.1 :** Mekar Taşıt Benzetimcisi.

Şekil 3.1’de Mekar taşıt benzetimcisinin fotoğrafı görülmektedir. Bilgisayarda yüklü olan CarMaker taşıt modeli, direksiyon pedal sistemi ile gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. Simulink’e aktarılan taşıt modeli ve tasarlanan kontrolcüler derlenerek otomatik olarak DS1005 işlemcisine yüklenir. Yükleme işlemi yapıldıktan sonra model değişkenleri Control Desk yazılımı ile izlenebilir, izin verilen değişkenler değiştirilebilir ve veriler kaydedilebilir.

Bu tez kapsamında gerçek taşıt testleri öncesi son denemeler Mekar taşıt benzetimcisinde yapılmıştır. Burada CarMaker ve dSpace DS1005 ve DS2210 yazılım ve donanımları, direksiyon ve pedal sistemi ile birlikte gerçek taşıtı temsil etmektedir. Gerçek taşıt testlerinde geliştirilen tahmin algoritmasını taşıt üzerindeki kontrolcülere yüklemek kısa vadede kolay olmayacağı için tahmin algoritması yine dSpace ürünü olan MicroAutobox kontrolcüsüne yüklenmiştir. Aynı durumun benzetimini yapmak açısından Mekar taşıt benzetimcisinde CarMaker taşıt modeli çalışırken, geliştirilen taşıt savrulma açısal hızı tahmin algoritması MicroAutobox kontrolcüsüne yüklenmiştir. Böylece gerçek taşıt testleri öncesi algoritmayı donanım içeren benzetimcide test ederek zamandan tasarruf etmiş olunur.

### 3.2 Taşıt Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Taşıt modeli doğrulama deneyi ve sonraki bölümlerde anlatılacak olan dinamik sanal algılayıcı tasarımının uygulandığı taşıt olarak Fiat Linea 1.6 kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : Deneylerin Yapıldığı Binek Taşıt.

Şekil 3.2’de Tofaş’a ait ESPLi bir Fiat Linea 1.6 araç görülmektedir. Deneysel veriler, Şekil 3.3’te görülen Tofaş’ın Bursa’daki fabrika alanı içerisinde bulunan taşıt pistinde yapılmıştır.



Şekil 3.3 : Tofaş Test Pistinin Uydu Görünümü

Deneysel veriler İTÜ-Mekar’a ait olan dSpace- MicroAutobox cihazı ile alınmıştır. MicroAutobox bilgisayar arayüzü olmadan, taşıt kontrolcüsü olarak gerçek zamanda çalışabilen dijital bir kontrolcüdür. MicroAutobox taşıt ile haberleşmeyi sağlayacak CAN protokolünü destekler.

Taşıt üzerindeki kontrolcü ve birimler birbirleriyle CAN iletişim protokolü ile haberleşirler. Microautobox üzerinde giriş ve çıkış için kullanılacak iki adet CAN hattı vardır. Taşıtın CAN hattında araya girilerek bazı taşıt CAN bilgileri değiştirilebilir.

Tez kapsamında, Bursa'da Tofaş test pisti üzerinde yapılan testler ile ikinci bölümde oluşturulan taşıt modelinin doğrulaması yapılmıştır. Taşıtın CAN hattından alınan tekerlek hızı, direksiyon açısı, boyuna ve yanıl ivme, savrulma açısı bilgileri ile taşıt modelinden elde edilen bilgiler karşılaştırılmıştır. CAN hattı vasıtasıyla taşıt üzerindeki savrulma açısı sensöründen okunan savrulma açısı bilgisi, tez kapsamında tahmin edilen savrulma açısı bilgisi ile karşılaştırması yapılmıştır.

## 4. KALMAN FİLTRESİ

Tez kapsamında tasarımı yapılan sanal sensör bilgisini taşıt dinamiğinden yararlanarak süzmek amacıyla Kalman filtresi kullanılmıştır. Bu bölümde Kalman filtresiyle ilgili teorik ve pratik bilgiler verilecektir.

### 4.1 Giriş

Bir sistemi kontrol edebilmek için o sistemin durumlarının bilinmesi gereklidir fakat bir sistemin tüm durumlarının bilinmesi veya ölçülmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bazı sistem durumlarının ölçülmesi çok zor veya çok pahalı olabilir. Bu durumda ölçülemeyen sistem durumlarının tahmin edilmesi gerekmektedir. Kalman Filtresi, ölçülebilen ve gürültülü sistem durumlarını kullanarak diğer sistem durumlarının tahmin edilmesi sağlar [43].

Ayrık zamanlı Kalman Filtresi 1960 yılında Rudolph Kalman tarafından geliştirilmiştir [44]. 1961 yılında da Kalman ve Bucy sürekli zamanlı Kalman Filtresini geliştirmişlerdir [44].

Kalman ilk olarak kontrol edilebilirlik üzerinde çalışmıştır. Kalman Filtresinin keşfinden sonra Kalman ve Bucy, sistem kararsız olsa bile, sistem gözetlenebilir ve kontrol edilebilir olduğu sürece Riccati denkleminin kararlı bir çözümü olduğunu ispat ettiler [43].

Kalman Filtresi ilk olarak doğrusal sistemler için geliştirilmiştir fakat daha sonraları doğrusal olmayan sistemler için Genişletilmiş Kalman Filtresi geliştirilmiştir. Kalman Filtresinin geliştirilmesi ile beraber havacılık ve uzay sanayi, otomotiv sanayi gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle ölçülmesi imkansız veya çok maliyetli olan sistem durumlarının tahmin edilmesinde önemli bir yere sahiptir.

Bu bölümün geri kalanında, gözetleyici kazanç matrisi en küçük kareler yöntemine göre hesaplanacak, sistem kovaryans matrisinin hesaplanması anlatılacak ve daha sonra Kalman Filtresi için bu ifadeler [45]'e göre güncellenecektir.

## 4.2 Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi

Gözetleyici kazanç matrisi, özyinelemeli en küçük kareler yöntemine göre bulabiliriz. Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi sabit bir  $x$  vektörü tahmin edilebilir. Buna göre, doğrusal özyinelemeli bir gözetleyici 4.1 daki gibi gösterilebilir:

$$\begin{aligned} y_k &= H_k x + v_k \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_{k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de  $\hat{x}_k$ , bir önceki  $\hat{x}_{k-1}$  tahminine ve  $y_k$  ölçüm değerine göre hesaplanan tahmini,  $v_k$  ise ölçüm gürültüsünü belirtmektedir.  $K_k$  matrisi gözetleyici kazanç matrisi olarak adlandırılır,  $(y_k - H_k \hat{x}_{k-1})$  terimi ise ölçüm değeri ile tahmin edilen değer arasındaki hata miktarını belirtir. Bu terim sıfır olduğunda tahmin değeri değişmez.

Gözetleyici kazanç matrisini hesaplamak için öncelikle tahmin hatasının beklenen değeri ve hatanın kovaryans matrisi hesaplanacak; daha sonra  $J_k$  maliyet fonksiyonu elde edilecek.

Tahmin hatası denklem 4.2'deki gibi ifade edilebilir:

$$e_{x,k} = x - \hat{x}_k \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 ve 4.2 kullanılarak tahmin hatasının beklenen değeri 4.3'deki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} E(e_{x,k}) &= E(x - \hat{x}_k) \\ E(e_k) &= E[x - \hat{x}_{k-1} - K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k-1})] \\ E(e_k) &= E[e_{x,k-1} - K_k (H_k x + v_k - H_k \hat{x}_{k-1})] \\ E(e_k) &= E[e_{x,k-1} - K_k H_k (x - \hat{x}_{k-1}) - K_k v_k] \\ E(e_k) &= (I - K_k H_k) E(e_{x,k-1}) - K_k E(v_k) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Optimal gözetleyici kazanç matrisini hesaplamak için maliyet fonksiyonuna karar verilmelidir. Maliyet fonksiyonu  $k$  anındaki tahmin hatalarının varyanslarının toplamı şeklinde seçilebilir.

Maliyet fonksiyonu denklem 4.4'teki gibi ifade edilebilir.



$$\begin{aligned}
J_k &= E[(x_1 - \hat{x}_1)^2] + \dots + E[(x_n - \hat{x}_n)^2] \\
J_k &= E(e_{x1,k}^2 + \dots + e_{xn,k}^2) \\
J_k &= E(e_{x,k} e_{xk,k}^T) \\
J_k &= E[Tr(e_{xk} e_{x,k}^T)] \\
J_k &= Tr(P_k)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Denklem 4.4'te  $P_k$ , tahmin hata kovaryansıdır.

Tahmin hata kovaryansı, 4.3 denklemi de kullanılarak hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
P_k &= E(e_{x,k} e_{x,k}^T) \\
P_k &= E\{(I - K_k H_k) e_{x,k-1} - K_k v_k\} \dots \}^T \\
P_k &= (I - K_k H_k) E(e_{x,k-1} e_{x,k-1}^T) (I - K_k H_k)^T \\
&\quad - K_k E(v_k e_{x,k-1}^T) (I - K_k H_k)^T \\
&\quad - (I - K_k H_k) E(e_{x,k-1} v_k^T) K_k^T + K_k E(v_k v_k^T) K_k^T
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Denklem 4.5'te  $[k - 1]$  anındaki tahmin hatası ( $e_{xk,k-1}$ ),  $[k]$  anındaki ölçüm gürültüsünden bağımsızdır. O halde,

$$\begin{aligned}
E(v_k e_{x,k-1}^T) &= E(v_k) E(e_{x,k-1}) \\
E(v_k e_{xk,k-1}^T) &= 0
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Ölçüm gürültüsünün kovaryans matrisi 4.7'deki gibi ifade edilebilir:

$$R_k = E(v_k v_k^T) \tag{4.7}$$

Bu durumda 4.5 denklemi şu şekilde elde edilir:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \tag{4.8}$$

Bu denklemde  $P_{k-1}$  ve  $R_k$  pozitif olduğu varsayılırsa,  $P_k$  denklemi de pozitif tanımlı olacaktır.

Maliyet fonksiyonunu en küçük yapan gözetleyici kazanç matrisini ( $K_k$ ) bulmak için maliyet fonksiyonunun gözetleyici kazanç matrisine göre kısmi türevini alıp sıfıra eşitleyebiliriz.

$$\frac{\partial J_k}{\partial K_k} = \frac{\partial (Tr(P_k))}{\partial K_k} = 0 \tag{4.9}$$

4.9 denklemini çözmek için denklem 4.10'dan faydalanırız. A ve B matris olmak üzere, B matrisi simetrik ise,

$$\frac{\partial(\text{Tr}(ABA^T))}{\partial A} = 2AB \quad (4.10)$$

4.8 – 4.10 denklemleri kullanılarak gözetleyici kazanç matrisi elde edilir.

$$\frac{\partial J_k}{\partial K_k} = 2(I - K_k H_k) P_{k-1} (-H_k)^T + 2K_k R_k = 0 \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} K_k R_k &= (I - K_k H_k) P_{k-1} H_k^T \\ K_k R_k &= P_{k-1} H_k^T - K_k H_k P_{k-1} H_k^T \\ K_k H_k P_{k-1} H_k^T + K_k R_k &= P_{k-1} H_k^T \\ K_k (H_k P_{k-1} H_k^T + R_k) &= P_{k-1} H_k^T \\ K_k &= P_{k-1} H_k^T (H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Buna göre 4.1, 4.8 ve 4.12 denklemleriyle sabit bir x vektörünün tahmini en küçük kareler yöntemi denklemleriyle ifade edilmiştir. Bu denklemler Kalman filtresi denklemlerinin elde edilmesi için kullanılacaktır.

### 4.3 Sistem Durumlarının ve Kovaryanslarının Elde Edilmesi

Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi ile sabit bir vektörün tahmin edilmesi ile ilgili denklemler elde edildi, bu kısımda ise dinamik, zamanla değişen bir sistem ele alınacak.

Doğrusal ayrık zamanlı bir sistem denklem 4.13 deki gibi ifade edilebilir.

$$x_k = F_{k-1} x_{k-1} + G_{k-1} u_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.13)$$

4.13 denkleminde  $x_k$ , ayrık sistem durumlarını;  $u_k$ , bilinen sistem girişini;  $F_k$  sistem geçiş matrisini;  $G_k$ , sistem giriş matrisini ve  $w_k$  ise sıfır ortalamalı ve  $Q_k$  kovaryanslı beyaz gürültüyü ifade etmektedir.

4.13 denkleminin her iki tarafının beklenen değeri alınırsa 4.14 denklemi elde edilir. Burada  $\bar{x}_k$ , sistem durumlarının ortalaması olarak düşünülebilir.

$$\begin{aligned} \bar{x}_k &= E(x_k) \\ &= F_{k-1} \bar{x}_{k-1} + G_{k-1} u_{k-1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Sistem kovaryans matrisi,  $P_k$ , denklem 4.15'deki gibi tanımlanabilir:

$$P_k = E [(x_k - \bar{x}_k)(\dots)^T] \quad (4.15)$$

Denklem 4.13 - 4.15 kullanarak  $(x_k - \bar{x}_k)(\dots)^T$  ifadesi genişletilebilir:

$$\begin{aligned} (x_k - \bar{x}_k)(\dots)^T &= (F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} - \bar{x}_k)(\dots)^T \\ &= [F_{k-1}(x_{k-1} - \bar{x}_{k-1}) + w_{k-1}][\dots]^T \\ &= F_{k-1}(x_{k-1} - \bar{x}_{k-1})(x_{k-1} - \bar{x}_{k-1})^T F_{k-1}^T + w_{k-1}w_{k-1}^T \\ &\quad + F_{k-1}(x_{k-1} - \bar{x}_{k-1})w_{k-1}^T + w_{k-1}(x_{k-1} - \bar{x}_{k-1})^T F_{k-1}^T \end{aligned} \quad (4.16)$$

Denklem 4.16'da  $w_{k-1}$ 'nin  $(x_{k-1} - \bar{x}_{k-1})$  ile bağıntısının olmadığı varsayımını yaparsak, denklem 4.15'ten yararlanarak sistem kovaryansı ifadesini elde edebiliriz.

$$\begin{aligned} P_k &= E [(x_k - \bar{x}_k)(\dots)^T] \\ &= F_{k-1}P_{k-1}F_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Elde edilen bu ifade, ayrık zamanlı Lyapunov denklemi olarak da adlandırılır. Bu denklemin hangi koşullarda sürekli hal çözümü olduğunu teorem 4.1 açıklamaktadır [42]. Bu teoremin ispatı [46]'da bulunmaktadır.

**Teorem 4.1:**  $P = FPF^T + Q$  denkleminde  $F$  ve  $Q$  gerçel ve sabit varsayılınsın.  $\lambda_i(F)$ ,  $F$  matrisinin özdeğerlerini belirtmektedir.

1. Ancak ve ancak  $\lambda_i(F)\lambda_j(F) \neq 1$  olduğunda  $P$ 'nin tek bir çözümü vardır. Bu tek çözüm simetriktir.
2. Birinci koşul  $F$ 'nin kararlı durumunu da içermektedir; çünkü  $F$  kararlı ise tüm özdeğerlerinin genliği birden küçüktür. Böylece  $F$  kararlı ise  $P$ 'nin tek ve simetrik bir çözümü vardır. Bu durumda çözüm 4.18'deki gibi yazılabilir.

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} F^n Q (F^T)^n \quad (4.18)$$

3. Eğer  $F$  kararlı ve  $Q$  pozitif yarı tanımlı ise, tek çözüm olan  $P$ , simetrik ve pozitif yarı tanımlıdır.
4. Eğer  $F$  kararlı,  $Q$  pozitif yarı tanımlı ve  $(F, Q^{\frac{1}{2}})$  kontrol edilebilir ise,  $P$ , tekil, simetrik ve pozitif tanımlıdır.

#### 4.4 Kalman Filtresi

Kalman filtresinde amaç,  $x_k$  sistem durumlarının, sistem dinamiği ve sistemden alınan gürültülü sensör bilgileri kullanılarak tahmin edilmesidir.

Denklem 4.19 ve 4.20'de doğrusal ayrık zamanlı sistem dinamiği modeli verilmiştir.

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.19)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (4.20)$$

Burada  $y_k$ ,  $k$  adımındaki sistem çıkışını,  $H$ , sistem çıkış matrisini,  $v_k$  ise ölçüm gürültüsünü ifade etmektedir.  $w_k$  ve  $v_k$ , sistem ve ölçüm gürültüleri sıfır ortalamalı, birbirleriyle bağlantılı olmayan ve kovaryansları sırasıyla  $Q_k$  ve  $R_k$  olan beyaz gürültülerdir. Matematiksel olarak 4.21'deki ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} w_k &\sim (0, Q_k) \\ v_k &\sim (0, R_k) \\ E[w_k w_k^T] &= Q_k \\ E[v_k v_k^T] &= R_k \\ E[v_k w_k^T] &= 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Eğer  $k$  adımından önceki ( $k$  dahil değil) tüm ölçümler  $x_k$ 'nin tahmini için elde edilmişse ilk tahmin ( $\hat{x}_k^-$ ) elde edilebilir. Bu kısımda  $\hat{x}_k^-$ 'e ilk tahmin adı verilebilir ve denklem 4.22'deki gibi gösterilebilir:

$$\hat{x}_k^- = E[x_k | y_1, y_2, \dots, y_{k-1}] = \text{ilk tahmin} \quad (4.22)$$

Eğer  $k$  adımına kadar ( $k$  dahil) tüm ölçümler  $x_k$ 'nin tahmini için elde edilmişse o an için ölçüm bilgisi de kullanılarak sistem durumu ( $\hat{x}_k^+$ ) tahmin edilebilir. Bu kısımda  $\hat{x}_k^+$ 'ya son tahmin adı verilebilir ve denklem 4.23'deki gibi gösterilebilir:

$$\hat{x}_k^+ = E[x_k | y_1, y_2, \dots, y_k] = \text{son tahmin} \quad (4.23)$$

Tahmin algoritmasının başladığı, henüz ilk ölçüm değerinin alınmadığı  $k = 0$  anındaki tahmin değeri,  $\hat{x}_0^+$ , denklem 4.24'teki gibi ilk sistem durumunun beklenen değeri olarak alınabilir.

$$\hat{x}_0^+ = E(x_0) \quad (4.24)$$

Tahmin hatasının kovaryansı  $P_k$  ile gösterilirse,  $P_k^-$ ,  $\hat{x}_k^-$ 'in tahmin hatasının kovaryansını;  $P_k^+$  ise  $\hat{x}_k^+$ 'nin tahmin hatasının kovaryansını belirtir.  $P_0^+$  dan başlanacak olursa, eğer sistem durumlarının ilk değerleri iyi bir şekilde biliniyorsa  $P_0^+ = 0$  alınabilir. Eğer sistem durumlarının ilk durumuyla ilgili bir bilgi yok ise  $P_0^+ = \infty I$  olarak alınabilir. Kısacası  $P_0^+$ ,  $x_0$ 'ın ilk değeriyle ilgili belirsizliğini ifade eder.

$$\begin{aligned} P_k^- &= E [(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \\ P_k^+ &= E [(x_k - \hat{x}_k^+)(x_k - \hat{x}_k^+)^T] \end{aligned} \quad (4.25)$$

Tahmin algoritmasına denklem 4.24 ile başlanabilir. Sonraki adıma geçmek için denklem 4.14'de elde edilen sistem durumlarının ortalama değeri ifade kullanılabilir. Böylece bir sonraki sistem durumunun ilk tahmini elde edilir:

$$\hat{x}_1^- = F_0 \hat{x}_0^+ + G_0 u_0 \quad (4.26)$$

Denklem 4.26 sadece bir durum için oluşturulmuştur. Bu ifade genelleştirilirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\hat{x}_k^- = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \quad (4.27)$$

Bu denkleme zaman güncelleme denklemi adı verilir. Bu şekilde sistem durumları, sistem dinamiği kullanılarak güncellenmiş olur.

Tahmin hata kovaryansı da yine aynı şekilde güncellenebilir. Denklem 4.17'de elde edilen denklem kullanılarak tahmin hata kovaryansı için zaman güncelleme denklemi elde edilir:

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (4.28)$$

Sistem durum tahmini ve hata kovaryans matrisi için zaman güncelleme denklemleri elde edildi. Bu tahminlere ölçümlerden elde edilen bilgiler de eklenmelidir. Yani  $\hat{x}_k^+$  ve  $P_k^+$  hesaplanmalıdır. Bu ifadeler özyinelemeli en küçük kareler yönteminden elde edilir.

Özyinelemeli en küçük kareler yöntemine göre sabit  $x$  vektörünün tahmin edilmesi ile ilgili denklemler aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\begin{aligned}
K_k &= P_{k-1}H_k^T(H_kP_{k-1}H_k^T + R_k)^{-1} \\
K_k &= P_{k-1}H_k^TR_k^{-1} \\
\hat{x}_k &= \hat{x}_{k-1} + K_k(y_k - H_k\hat{x}_{k-1}) \\
P_k &= (I - K_kH_k)P_{k-1}(I - K_kH_k)^T + K_kR_kK_k^T
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Burada,  $\hat{x}_{k-1}$  ile  $P_{k-1}$ ,  $y_k$  ölçümünden önce hesaplanan tahmin ve kovaryanslardır;  $\hat{x}_k$  ile  $P_k$ , ise  $y_k$  ölçümünden sonra hesaplanan tahmin ve kovaryanslardır. Bu kısımda ise bu terimler yerine çizelge 4.1'de gösterildiği gibi  $\hat{x}_k^-$  ve  $P_k^-$  kullanılacaktır.

**Çizelge 4.1 :** Enküçük Kareler Yöntemi ve Kalman Filtresi İlişkisi [42].

En küçük kareler yöntemi		Kalman Filtresi
$\hat{x}_k = y_k$ ölçümünden önceki tahmin	→	$\hat{x}_k^-$ = ilk tahmin
$P_{k-1} = y_k$ ölçümünden önceki kovaryans	→	$P_k^-$ = ilk kovaryans
$\hat{x}_k = y_k$ ölçümünden sonraki tahmin	→	$\hat{x}_k^+$ = son tahmin
$P_k = y_k$ ölçümünden sonraki kovaryans	→	$P_k^+$ = son kovaryans

Buna göre 4.29 denklemleri çizelge 4.1'e göre güncellenirse aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned}
K_k &= P_k^-H_k^T(H_kP_k^-H_k^T + R_k)^{-1} \\
K_k &= P_k^-H_k^TR_k^{-1} \\
\hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(y_k - H_k\hat{x}_{k-1}) \\
P_k^+ &= (I - K_kH_k)P_k^-(I - K_kH_k)^T + K_kR_kK_k^T
\end{aligned} \tag{4.30}$$

Buna göre ayrık zamanlı Kalman filtresi denklemleri şu şekilde özetlenebilir:

1. Dinamik sistem denklemleri:

$$\begin{aligned}
x_k &= F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \\
y_k &= H_kx_k + v_k \\
E[w_kw_k^T] &= Q_k \\
E[v_kv_k^T] &= R_k \\
E[v_kw_k^T] &= 0
\end{aligned} \tag{4.31}$$

2. İlk değerler hesaplanır:

$$\begin{aligned}\hat{x}_0^+ &= E(x_0) \\ P_0^+ &= E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]\end{aligned}\quad (4.32)$$

3. Kalman filtresi denklemleri her zaman adımında hesaplanır:

$$\begin{aligned}P_k^- &= F_{k-1}P_{k-1}^+F_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ K_k &= P_k^-H_k^T(H_kP_k^-H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k^- &= F_{k-1}\hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1}u_{k-1} \\ \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(y_k - H_k\hat{x}_{k-1}^-) \\ P_k^+ &= (I - K_kH_k)P_k^-(I - K_kH_k)^T + K_kR_kK_k^T\end{aligned}\quad (4.33)$$

Kalman filtresi algoritmasında eğer  $x_k$  sabit bir vektör ve  $F_k = I$ ,  $Q_k = 0$  olsaydı, 4.33 denklemi, 4.30'daki özyinelemeli en küçük kareler denklemlerine indirgenir. Ek olarak 4.33 denkleminde dikkat edilecek olursa  $P_k^-$ ,  $K_k$  ve  $P_k^+$  ifadeleri ölçüm değerlerine bağlı değildir. Yalnızca  $F_k$ ,  $H_k$ ,  $Q_k$ ,  $R_k$  sistem parametrelerine bağlıdır. Algoritmanın daha hızlı çalışması açısından algoritma çevrimdışı çalıştırıldıktan sonra  $K_k$  kazanç matrisi hesaplanabilir ve Kalman denklemleri içerisine yazılır. Böylece işlem sayısı ve işlemcinin hesap yükü azaltılabilir.

#### 4.5 Yakınsama Problemleri

Kalman Filtresi gerçek zamanlı bir ortama aktarıldığında teori ne kadar doğru olsa da çalışmayabilir. Başlıca iki neden, sonlu aritmetik keskinlik ve modelleme hatalarıdır [47].

Kalman filtresi teorisinde aritmetik işlemler sonsuz duyarlıkta olduğu varsayılır; fakat dijital işlemcilerde sayılar belirlenmiş bit sayısı ile temsil edildiğinden aritmetik keskinlik sonsuz değildir. Bu durum Kalman filtresinin uygulamasında iraksamalara ve kararsızlıklara sebep olabilir.

İkinci olarak Kalman filtresinde sistem modelinin kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır. Yani sistem matrisleri,  $F$ ,  $Q$ ,  $H$  ve  $R$  matrisleri tam olarak bilinmelidir. Ayrıca sistem ve ölçüm gürültülerinin birbiriyle ilişkisi olmayan, sıfır ortalamalı beyaz gürültü olmalıdır. Bu sorunları gidermek için Kalman filtresinin performansı iyileştirilebilir. Bu amaçla Kalman filtresinin kodlandığı işlemcide değişken isimleri daha yüksek kesinlikte tanımlanabilir. Örneğin değişken ismi "single" yerine "double" olarak tanımlanabilir.

Bu şekilde aritmetik keskinlik artırılarak aritmetik hatalar azaltılır. İkinci olarak hata kovaryans matrisi,  $P$ , aşırı değişmemesi için uygun bir değer seçilebilir. Ayrıca her zaman çevriminde  $P = (P + P^T)/2$  hesaplatılarak hata kovaryans matrisinin her zaman simetrik olması sağlanabilir. Üçüncü olarak Kalman filtresi algoritmasında hayali sistem gürültüsü eklenebilir. Sistem gürültüsünün fazla olduğu bilgisini eklemek (  $Q$  sistem gürültü kovaryans matrisini artırmak ) Kalman filtresinin sistem modeline olan güvenini azaltır ve ölçümlerine daha çok önem verir. Böylece sistem modelindeki modelleme hatalarından dolayı oluşabilecek kararsızlıklar giderilebilir.

#### 4.6 Gözetlenebilirlik ve Kontrol Edilebilirlik

Kalman filtresinde kullanılan sistem modelinin gözetlenebilir ve kontrol edilebilir olması sistem durumlarının tahmin edilmesi açısından önemlidir [43].

##### 4.6.1 Gözetlenebilirlik

Sistem durumlarının her biri sistem çıkışlarından en az birisine etki etmelidir. Bu şekilde olan sisteme gözetlenebilir sistem adı verilir. Eğer sistem durumlarından bir tanesi sistem çıkışlarına bir etkisi yok ise, bu sisteme gözetlenemez denir [48].

Bir sistemin gözetlenebilir olması için gözetlenebilirlik matrisinin rankı sistem durumlarının sayısına eşit olmalıdır.

$$M_o = \begin{bmatrix} H \\ HF \\ HF^2 \\ \vdots \\ HF^{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\text{rank}(M_o) = n$$

##### 4.6.2 Kontrol edilebilirlik

Kontrol edilebilirlik kavramı ilk kez R.E. Kalman [49] tarafından öne sürülmüştür. Eğer bir sistemin tüm durumları sistemin girişleri tarafından kontrol edilebiliyorsa bu sisteme kontrol edilebilir denir. Eğer sistem durumlarından herhangi birisi sistem girişlerinden etkilenmiyorsa sistem kontrol edilemez denir.

Bir sistemin kontrol edilebilir olması için kontrol edilebilirlik matrisinin rankı sistem durumlarının sayısına eşit olmalıdır:



$$M_C = [G \quad FG \quad F^2G \quad \dots \quad F^{n-1}G] \quad (4.35)$$
$$\text{rank}(M_C) = n$$

Bu bölümde anlatılan Kalman Filtresi algoritması, sonraki bölümde tasarlanacak olan kinematik savrulma açısal hızı tahmininin süzülmesinde kullanılacaktır. Böylece gürültülere karşı daha dayanıklı bir tasarım yapılmış olunacaktır.



## 5. TAŞIT YANAL DİNAMİĞİ İÇİN DİNAMİK SANAL ALGILAYICILAR

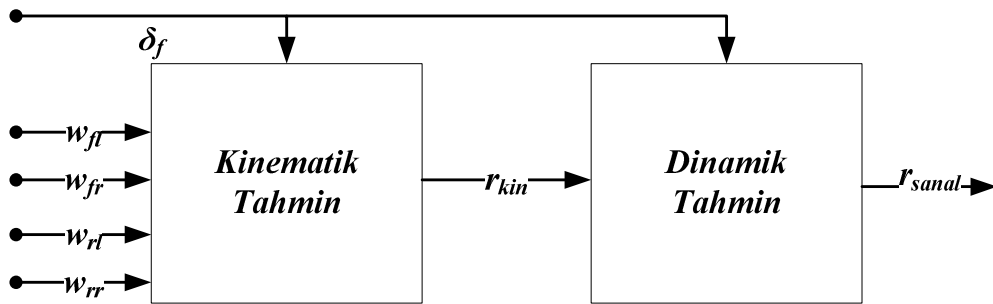
Bu kısımda tez çalışmasının tasarım aşaması ve gerçekleşmesi ile ilgili bilgilendirme yapılacaktır.

Taşıt savrulma açısız hızının tahmini için oluşturulan sanal algılayıcı iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada savrulma açısız hızı bilgisi tekerlek devir sensörlerinden alınan tekerlek hız bilgisi ve taşıt geometrisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu aşamaya kinematik tahmin adı verilmektedir [50]. İkinci aşamada ise birinci aşamada elde edilen kinematik tahmin taşıt dinamik modeli kullanılarak filtrelenerek daha kullanışlı bir hale getirilmiştir. Bu aşamaya ise dinamik tahmin adı verilmektedir.

Bu bölümde savrulma açısız hızının tahmin aşamalarının tasarımı anlatılmış, benzetim ve deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir.

### 5.1 Savrulma Açısız Hızının Tahmin Edilmesi

Savrulma açısız hızının tahmini iki kısımdan oluşmaktadır. Kinematik tahmin kısmında tekerlek hızları, direksiyon açısı, frenleme ve ivmelenme durumları göz önüne alınarak savrulma açısız hızı, bir takım yaklaşımlarla hesaplanabilir. Kinematik tahmin kısmında elde edilen savrulma açısız hızı bilgisi, tekerlek devir algılayıcılarından gelen gürültü sebebi ile oldukça gürültülidir. Dinamik tahmin kısmında oldukça gürültülü olan kinematik savrulma açısız hızı tahmin değeri kullanılan Kalman filtresi algoritması ile daha kullanışlı bir hale getirilmiştir.



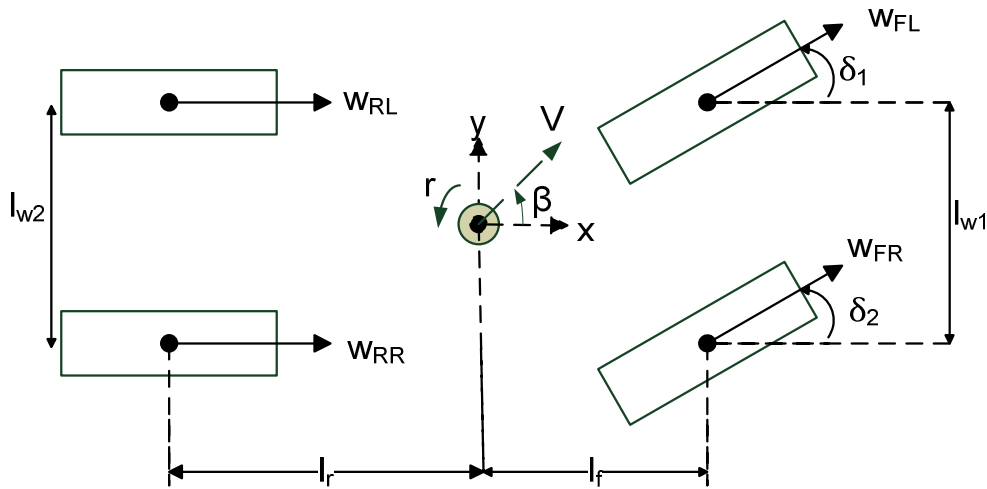
Şekil 5.1 : Taşıt Savrulma Açısız Hızı Tahmini Genel Şema

Şekil 5.1’de savrulma açısal hızı tahmininde kullanılan yapı görülmektedir. Buna göre tahmin algoritması standart ABS’li taşıtlarda bulunan tekerlek devir sensörleri ve direksiyon açısı sensörü bilgilerini giriş olarak olmaktadır. Tekerlek hızlarının değişiminden ivmelenme ve frenleme durumu tespit edilmekte ve bu iki duruma göre aynı aks üzerindeki tekerleklerin hızlarının farkından yararlanarak taşıt savrulma açısal hızı kinematik olarak tespit edilmektedir. Elde edilen bu kinematik tahmin bilgisi, dinamik tahmin bölümünde, taşıt dinamiği kullanılarak en son sanal tahmin değeri elde edilir.

### 5.1.1 Kinematik tahmin

Savrulma açısal hızı, tekerlek hızlarının farkından hesaplanabilmektedir [36]. Bu tezde kullanılan yöntemde tekerlek hızlarının farkı yanı sıra frenleme ve ivmelenme durumlarında tekerleklerde meydana gelen kayma (slip) da hesap içine dâhil edilmektedir [50].

Tekerlek dönüş hızlarının farkından ve taşıt geometrisinden yararlanılarak taşıt üzerindeki savrulma açısal hızı hesaplanabilir. Örnek olarak taşıt dönüş durumunda içte kalan tekerlek dış taraftaki tekerleklere göre daha yavaş dönecektir. Aynı aks üzerinde bulunan iç ve dış tekerlekler arasındaki hız farkının tekerlekler arasındaki mesafeye oranı savrulma açısal hızını verir. Fakat, dönüş anında frenleme ve ivmelenme olduğu durumlarda tekerleğin doğrusal olmayan etkileri bu hesaplamayı olumsuz etkilemektedir. Bu durumlarda tekerlek dönme özelliğinin yanında kayma hareketi de yapar. Bu yüzden bu kayma hareketinin de savrulma açısal hızı hesaplamasına dahil edilmesi gerekir [50].



Şekil 5.2 : Kinematik Tahmin İçin Taşıt Geometrisi.

Denklem 5.1 ve 5.2, frenleme ve ivmelenme durumu olmadığı durumdaki savrulma açısai hızı tahminini göstermektedir. Burada  $w_{FL}$ ,  $w_{FR}$ ,  $w_{RL}$ ,  $w_{RR}$  tekerleklerin dönüş hızlarını ifade etmektedir.

$$r_{kin} = \frac{w_{RR}R - w_{RL}R}{l_{WR}} \quad (5.1)$$

$$r_{kin} = \frac{w_{FR}R - w_{FL}R}{l_{WF} \cos \delta} \quad (5.2)$$

Önceki çalışmalar frenleme durumunda tekerleklerin boyuna kayma oranı değişiminin savrulma açısai hızı tahminini etkilediğini göstermektedir.[50].

Denklem 5.3 ve 5.4 frenleme ve ivmelenme durumdaki tekerlek kayma oranlarını ifade etmektedir.

$$\lambda_i = \frac{w_i R_w - V_i}{V_i}, w_i R_w - V_{xi} < 0 \text{ (frenleme)} \quad (5.3)$$

$$\lambda_i = \frac{w_i R_w - V_i}{w_i R_w}, w_i R_w - V_{xi} \geq 0 \text{ (ivmelenme)} \quad (5.4)$$

Burada  $w_i$  tekerleklerin dönüş hızlarını,  $V_i$  ise tekerleğin boyuna hızını göstermektedir.

$$V_{FL} = V_{ref} - (l_{WF}/2)r \cdot \cos \delta \quad (5.5)$$

$$V_{FR} = V_{ref} + (l_{WF}/2)r \cdot \cos \delta \quad (5.6)$$

$$V_{RL} = V_{ref} - (l_{WR}/2)r \quad (5.7)$$

$$V_{RR} = V_{ref} + (l_{WR}/2)r \quad (5.8)$$

$V_{ref}$ , referans taşıt hızını belirtmektedir. Referans taşıt hızı, taşıtın CAN hattından okunmakta ve doğru bir şekilde hesaplanabildiği varsayılmaktadır.

Frenleme durumunda (5.3), (5.7) ve (5.8) denklemleri kullanılarak arka tekerleklerden kinematik savrulma açısai hızı tahmin edilebilir.

$$r_{kin}(t) = \frac{r_{kin}(t-1) - [V_{ref}(\lambda_{RR} - \lambda_{RL})/l_{WR}]}{1 + \left(\frac{\lambda_{RR} + \lambda_{RL}}{2}\right)} \quad (5.9)$$

Burada  $t$ , o andaki değeri,  $(t - 1)$  ise bir önceki hesaplanan değeri belirtmektedir.

Frenleme durumunda (5.3), (5.5) ve (5.6) denklemleri kullanılarak ön tekerleklerden de kinematik savrulma açısai hızı tahmin edilebilir.

$$r_{kin}(t) = \frac{r_{kin}(t-1) - [V_{ref}(\lambda_{FR} - \lambda_{FL})/l_{WF} \cos \delta]}{1 + \left(\frac{\lambda_{FR} + \lambda_{FL}}{2}\right)} \quad (5.10)$$

İvmelenme durumunda ise (5.4), (5.5) ve (5.6) denklemleri kullanılarak ön (sürüş) tekerleklerinden kinematik savrulma açısai hızı hesaplanabilir:

$$r_{kin}(t) = \frac{r_{kin}(t-1)(1 - \lambda_{FR})(1 - \lambda_{FL}) + [V_{ref}(\lambda_{FL} - \lambda_{FR})/l_{WF} \cos \delta]}{1 - \left(\frac{\lambda_{FR} + \lambda_{FL}}{2}\right)} \quad (5.11)$$

Tekerlek boyuna kayma oranları (5.3 - 5.4) ve (5.5 - 5.8) denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre tekerlek boyuna kayma oranları frenleme durumunda:

$$\lambda_{RR} = \frac{w_{RR}R_w - [V_{ref} + (l_{WR}/2)r(t-1)]}{[V_{ref} + (l_{WR}/2)r(t-1)]} \quad (5.12)$$

$$\lambda_{RL} = \frac{w_{RL}R_w - [V_{ref} - (l_{WR}/2)r(t-1)]}{[V_{ref} - (l_{WR}/2)r(t-1)]} \quad (5.13)$$

$$\lambda_{FR} = \frac{w_{FR}R_w - [V_{ref} + (l_{WF}/2) \cos \delta r(t-1)]}{[V_{ref} + (l_{WF}/2) \cos \delta r(t-1)]} \quad (5.14)$$

$$\lambda_{FL} = \frac{w_{FL}R_w - [V_{ref} - (l_{WF}/2) \cos \delta r(t-1)]}{[V_{ref} - (l_{WF}/2) \cos \delta r(t-1)]} \quad (5.15)$$

İvmelenme durumunda ön tekerleklerin boyuna kayma oranları ise:

$$\lambda_{FR} = \frac{w_{FR}R_w - [V_{ref} + (l_{WF}/2) \cos \delta r(t-1)]}{w_{FR}R_w} \quad (5.16)$$

$$\lambda_{FL} = \frac{w_{FL}R_w - [V_{ref} - (l_{WF}/2) \cos \delta r(t-1)]}{w_{FL}R_w} \quad (5.17)$$

Ön ve arka tekerleklerden yapılan tahminler arasında küçük farklılıklar meydana gelebilmektedir. Deneysel taşıt önden çekişli olduğu için arka tekerleklerden yapılan tahmin daha doğru olmaktadır. Arka tekerleklerden tahmin alınmadığı durumlar için ön tekerleklerden alınan kinematik tahmin ivmelenme durumu da gözönüne alınarak daha gerçekçi bir hale getirilmiştir.

### 5.1.2 Dinamik tahmin

Çalışmada tasarımı yapılan sanal algılayıcının ikinci kısmı dinamik tahmin bölümüdür. Taşıt dinamik modeli kullanılarak kinematik tahmin bölümünde elde edilen savrulma açısal hızı bilgisi filtrelenmiştir.

#### 5.1.2.1 Amaç

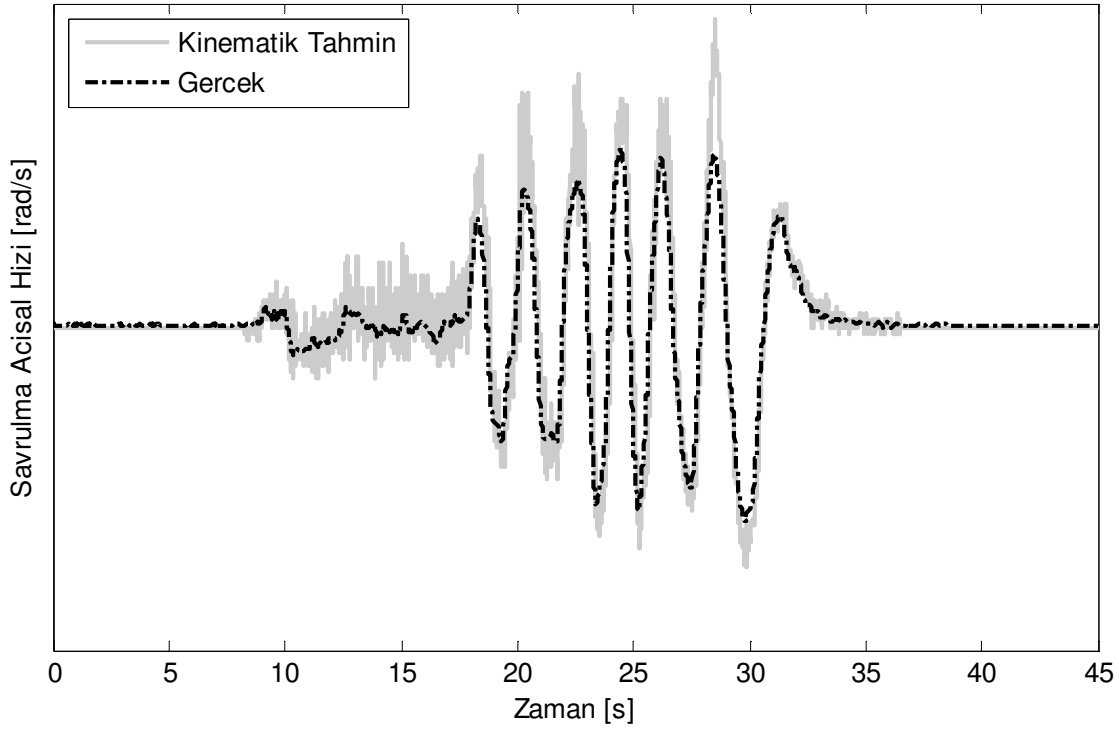
Kinematik tahminden elde edilen savrulma açısal hızı bilgisi oldukça gürültü içermektedir. Bu gürültü çeşitli yollarla filtrelenebilir. Tekerlek hızı bilgisi filtrelenebileceği gibi kinematik tahmin bilgisi de filtrelenebilir. Çalışmada kinematik tahmin bilgisinin alçak geçiren filtre ve Kalman filtresi ile filtrelenmesi ile elde edilen tahmin sonuçları verilmiştir.

#### 5.1.2.2 Kinematik tahminin alçak geçiren filtre ile filtrelenmesi

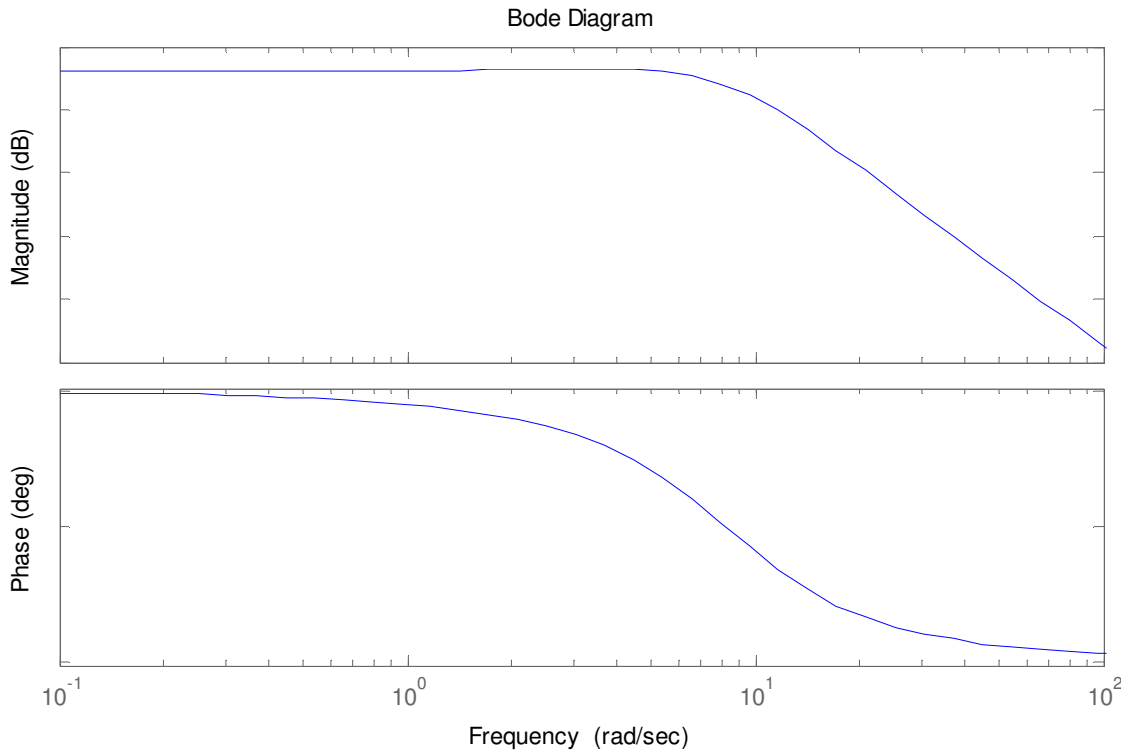
Tekerlek hızlarını ölçmeye yarayan tekerlek devir algılayıcıları da bir çok algılayıcı gibi üzerinde bir miktar gürültü barındırır. Kinematik tahmin bilgisi elde edilirken tekerlek hızlarının farkı kullanıldığı için gürültü biraz daha artmakta ve kinematik tahmin sonucu oldukça gürültülü olmaktadır.

Şekil 5.3 te kinematik tahminin gerçek savrulma açısal hızı sensörüne göre oldukça gürültülü olduğu görülmektedir. Kinematik tahmin üzerindeki bu gürültü yüksek frekanslı değişimleri süzebilen alçak geçiren filtre ile azaltılabilir.

Şekil 5.4'te 5 m/s hız için doğrusal taşıt modeli frekans cevabı görülmektedir. Buna göre bu hızdaki savrulma açısal hızı köşe frekansı bulunur.



Şekil 5.3 : Kinematik Tahmin ve Gerçek Algılayıcı Verisi.



Şekil 5.4 : Doğrusal Taşıt Modeli Frekans Cevabı.

Alçak geçiren filtre denklemini denklemin 5.18 deki gibi ifade edilebilir:

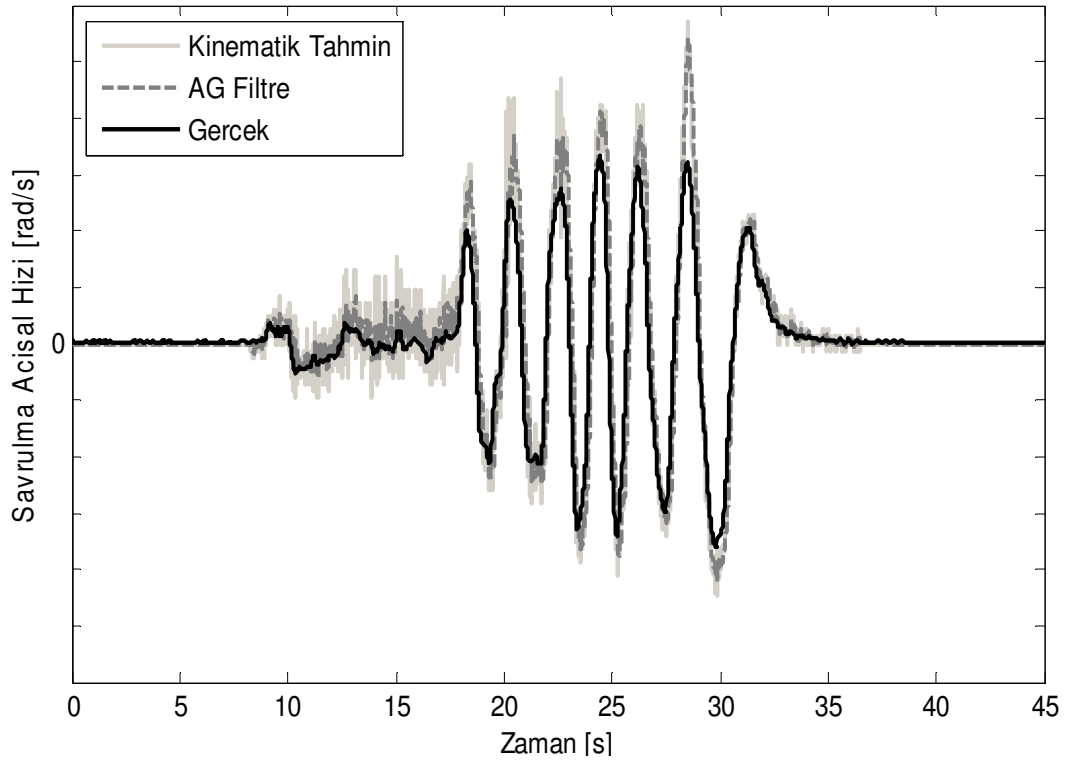
$$F_{AGF} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (5.18)$$



$\tau$ , alçak geçiren filtrenin zaman sabitidir. Örneğin 25 rad/s'nin üzerindeki işaretleri süzmek istiyorsak  $\tau=1/25$  alınabilir. Buna göre alçak geçiren filtre transfer fonksiyonu denklem 5.19 daki gibi olur:

$$F_{AGF} = \frac{1}{0.04s + 1} \quad (5.19)$$

Kinematik savrulma açısal hızı bilgisi denklem 5.19 daki alçak geçiren filtre ile süzülürse, gerçek, kinematik tahmin ve süzölmüş savrulma açısal hızı tahmin bilgileri şekil 5.5'teki gibidir:



**Şekil 5.5 :** Kinematik Tahminin Alçak Geçiren Filtre ile Süzülmesi.

Şekil 5.5'te alçak geçiren filtre ile elde edilen tahmin bilgisinin gerçek değere göre yaklaşık 40 ms kadar faz farkı olduğu görölmektedir ve kinematik tahmin üzerindeki gürültü halen oldukça yüksektir. Filtrenin zaman sabitini artırarak düşük frekanslardaki gürültüyü azaltabiliriz fakat bu sefer de hem savrulma açısal hızı değişimlerini de süzmüş oluruz hem de gerçek değer ile filtrelenmiş savrulma açısal hızı arasındaki faz farkını çok artırmış oluruz. Bu yüzden hem gürültüyü süzecek hem de yüksek faz farklarına sebep olmayacak hem de savrulma dinamiğinin etkilemeyecek başka bir filtre tercih edilmelidir.

### 5.1.2.3 Kinematik tahminin kalman filtresi ile filtrelenmesi

Bu tez çalışmasında [50] de tasarımı yapılan kinematik savrulma açısall hızı tahmini üzerindeki gürültüleri süzmek için kinematik tahmine ek olarak dinamik tahmin bölümü tasarlanmıştır.

Dinamik tahmin, taşıt yanal dinamik modelini içeren bir gözetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla standart gözetleyiciler kullanılabileceği gibi, Kalman filtresi de kullanılabilir. Tez çalışmasında kazancı taşıt hızına göre değişen ayrık zamanlı Kalman Filtresi kullanılmıştır.

Bunun için doğrusal tek izli taşıt modeli kullanılmıştır. Doğrusal tek izli taşıt modelinin durum uzayı modelinde taşıt hızı değişken olarak alınmış ve durum matrisleri taşıt hızına göre sürekli güncellenebilir hale getirilmiştir.

Deneyssel sistem olarak 3. bölümde bahsedilen Fiat Linea 1.6 binek taşıt kullanılmıştır. Bu taşıtın yanal dinamik parametreleri Fiat-Tofaş tarafından sağlanmıştır.

Kalman Filtresi tasarımından önce gözetlenen sistem durumunun gözetlenebilirliği incelenmelidir. Gözetlenebilirlik matrisi denklem 4.6 veya denklem 4.5 kullanılarak hesaplanabilir. Gözetlenebilirlik matrisinin rankı sistem durum sayısına veya determinantı sıfırdan farklı ise sistem gözetlenebilir denilebilir.

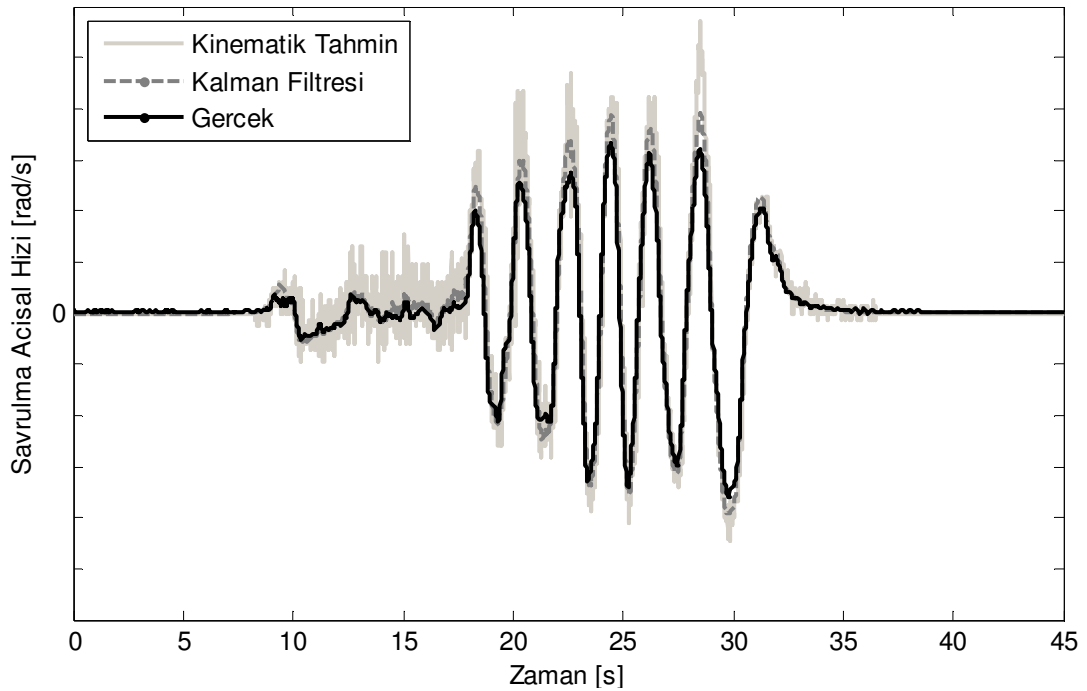
$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$\det(M_o) = -12.5357 \neq 0 \quad (5.21)$$

Deneyssel taşıt için gözetlenebilirlik matrisinin determinantı denklem 5.21 deki gibi sıfırdan farklı olduğuna göre savrulma açısall hızı her hız değeri için gözetlenebilirdir; yalnız taşıt hızının sıfır ( $V=0$ ) olduğu durum için gözetlenebilirlik matrisinin bir elemanı belirsiz olmaktadır bu yüzden gözetleyici için araç hızı, savrulma açısall hızı bilgisinin önemli olmadığı küçük bir hız ile sınırlandırılabilir. Tez çalışmasında gözetleyici tarafından kullanılacak taşıt hızının 1 [m/s] den büyük olduğu varsayılmaktadır. Kalman Filtresi tasarımı için ölçüm gürültü kovaryans matrisi ve sistem gürültü kovaryans matrisleri elde edilmelidir. Kalman Filtresi bu kovaryans matrislerine göre en iyi tahmini sağlayacak gözetleyici kazancını kendisi bulur ve doğrusal gözetleyici için en iyi çözümü sunar [45].

Kalman Filtresinin iyi çalışabilmesi için azaltılması istenen gürültünün ortalaması sıfır olan beyaz gürültü olması gerekir. Dinamik tahmin kısmında kullanılan Kalman Filtresi için ölçüm bilgisi kinematik kısımdan elde edilen savrulma açısai hızı bilgisidir. Kinematik savrulma açısai hızının gürültü kovaryansını bulmak için gerçek taşıttan gerçek zamanlı olarak alınan verilerden, kinematik savrulma hızının yaklaşık sıfır olduğu bölgelerdeki çok daha az gürültülü olan gerçek savrulma açısai hızı sensöründen alınan bilgi çıkarılmıştır. Daha sonra bu bölgelerdeki verinin ortalaması alınarak sıfıra yakın olup olmadığından emin olunduktan sonra, bu bölgedeki verisinin standart sapmasına bakılmıştır. Tekerleklerdeki gürültü, yol şartlarına, frenleme durumuna ve kinematik kısımdaki matematiksel işlemlerden dolayı sürekli değişmektedir ama yine de standart sapmalar farklı durumlarda birbirine yakın çıkmaktadır. Bu yüzden ölçüm gürültüsünün standart sapması için elde edilen değerlere yakın bir değer seçilmiştir. Ölçüm kovaryansı oluşturulurken elde edilen gürültü standart sapmasının karesi alınarak gürültünün varyansı hesaplanır.

Sistem gürültü kovaryansı,  $Q$  ise mühendislik tecrübesi ile kinematik olarak elde edilen bilgiye sadık olacak şekilde ve gürültüyü azaltacak şekilde ayarlanmıştır. Gürültüyü fazla azaltacak olursak oluşturulan gözetleyici daha çok modele bağılı olur, gürültüyü hiç azaltmazsak ise gözetleyici ölçtüğü değeri daha güvenilir bulacaktır.



**Şekil 5.6 :** Kinematik Tahminin Kalman Filtresi ile Süzülmesi.

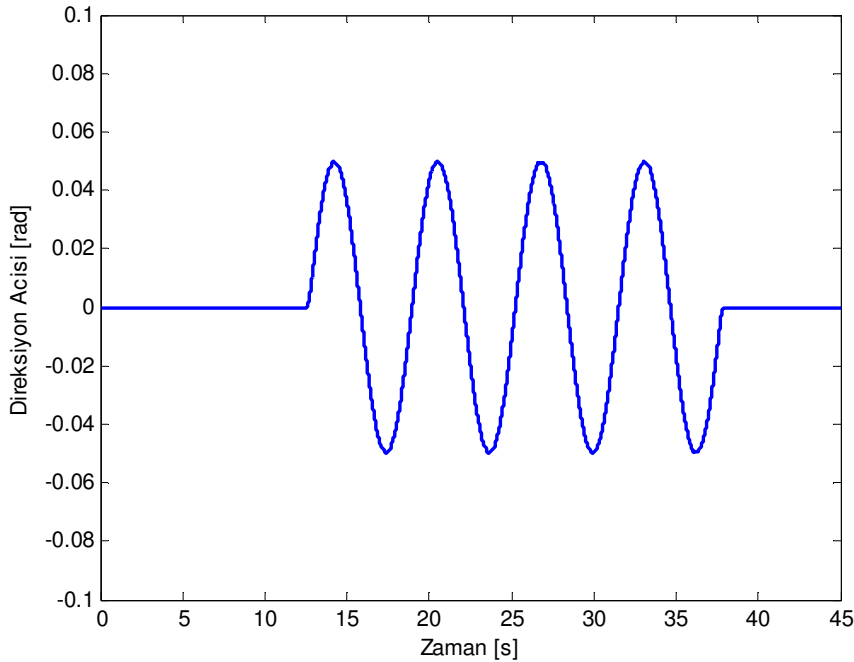
Şekil 5.6'da deneysel bir çalışmadan alınan sonuçlar görülmektedir. Kinematik tahmin bilgisi Kalman Filtresi ile filtrelenerek gerçek sensör verisine yakın bir sonuç elde edilmiştir. Öyle ki Kalman Filtresi ile yapılan tahminde hata oranı %3-13 arasında değişirken alçak geçiren filtrenin %70 hata yaptığı sondan iki önceki manevrada Kalman Filtresi en fazla %20 hata ile tahmin gerçekleştirmiştir. Buna göre bir önceki bölümde tasarlanan alçak geçiren filtre sonucuna göre daha az gürültülü ve sistem dinamiğini daha iyi yansıtan bir tasarım yapılmıştır.

## 5.2 Benzetim ve Deneysel Çalışmalar

Benzetim ve deneysel çalışmalar çift izli taşıt modeli, CarMaker taşıt modeli ve deneysel taşıt verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çift izli taşıt modeli ile yapılan çalışma Simulink'te gerçekleştirilmiştir. CarMaker modeli ile yapılan iki benzetimden birincisi Simulink'te, ikincisi ise Mekar donanım içeren benzetimci kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son test ise Tofaş taşıt pisti üzerinde gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1 Çift izli taşıt modeli ile yapılan benzetim çalışması

Geliştirilen kinematik ve dinamik savrulma açısız tahmin algoritması çift izli taşıt modelinde denenmiştir. Çift izli taşıt modeli sürücüsüne şekil 5.7'deki gibi sinüs direksiyon açısı uygulanmıştır.

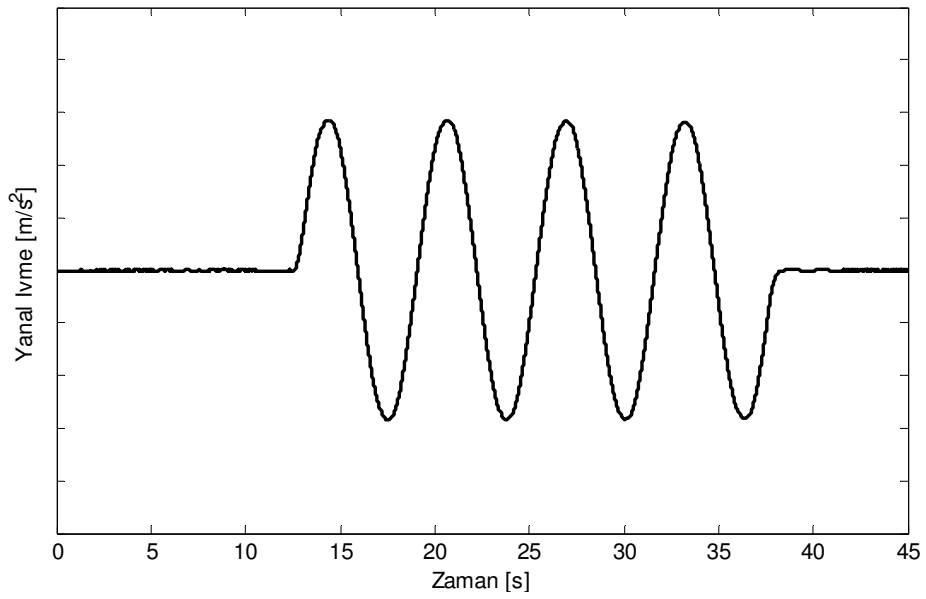


Şekil 5.7 : Direksiyon Açısı.

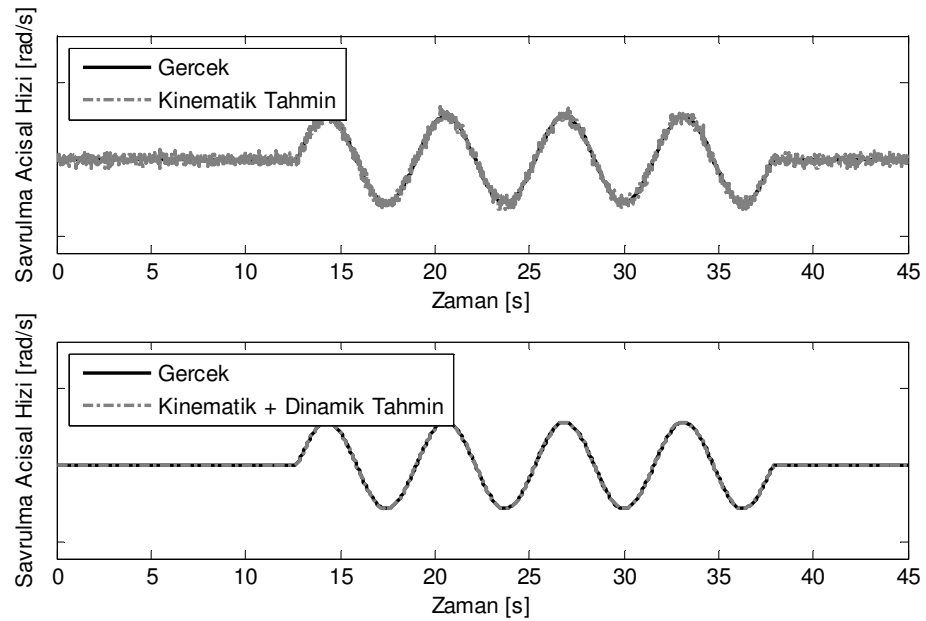
Şekil 5.8’de manevra sonucunda taşıtın ağırlık merkezindeki yanal ivme değeri görülmektedir. Buna göre taşıt oldukça yüksek bir yanal ivmeye maruz kalmıştır.

Benzetim çalışmasının gerçekçi olması bakımından kinematik tahmin sonucuna tekerlek sensörlerinden kaynaklanan beyaz Gaussian gürültü eklenmiştir.

Şekil 5.9’da çift izli taşıt modelindeki gerçek savrulma açısız hızı değer ile sanal sensör ile elde edilen kinematik ve dinamik tahmin değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre kinematik tahmin oldukça gürültülü olmasına karşın, dinamik tahmin ile birlikte gerçek sensör verisine yakın bir sonuç elde edilmiştir.

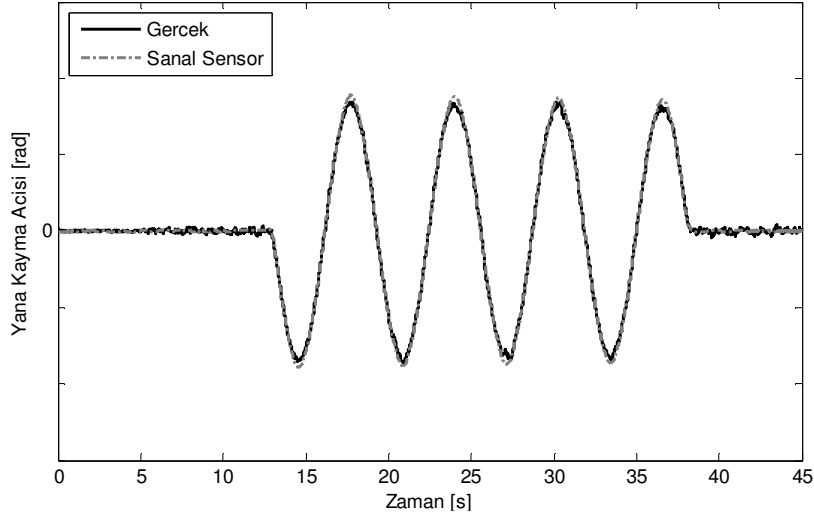


Şekil 5.8 : Yanal İvme.



Şekil 5.9 : Çift İzli Model İle Savrulma Açısız Hızı Tahminleri.

Şekil 5.10 ise dinamik tahmin kısmında kullanılan Kalman filtresinin tahmin ettiği taşıt yana kayma açısı değeri görülmektedir.

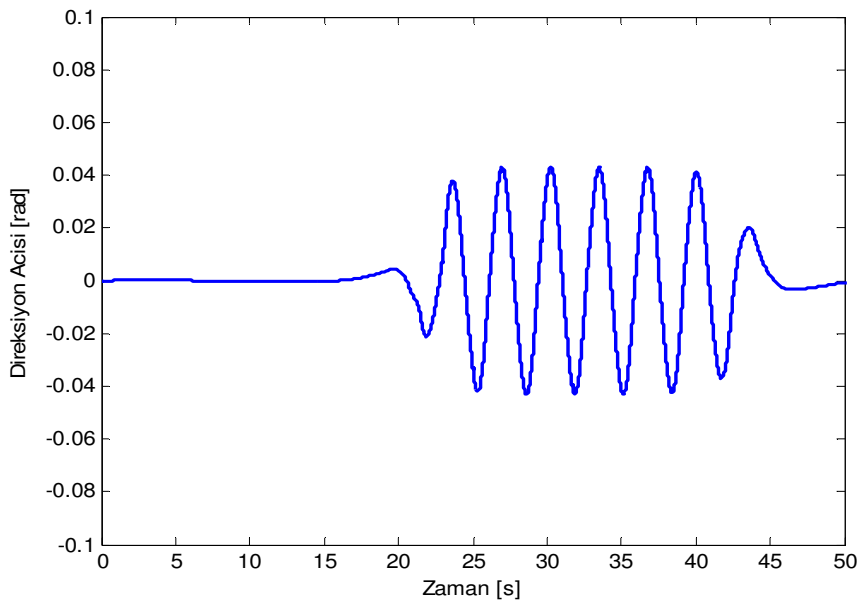


**Şekil 5.10 :** Çift İzli Model İle Taşıt Yana Kayma Açısı Tahminleri.

Şekil 5.9 ve 5.10' da taşıt durum değişkenleri iyi bir şekilde tahmin edilmiştir. Öyle ki taşıt savrulma açısal hızının tahminindeki hata miktarı %1'i aşmamıştır. Daha fazla sonuç için CarMaker ve gerçek taşıt verileri de gösterilmiştir..

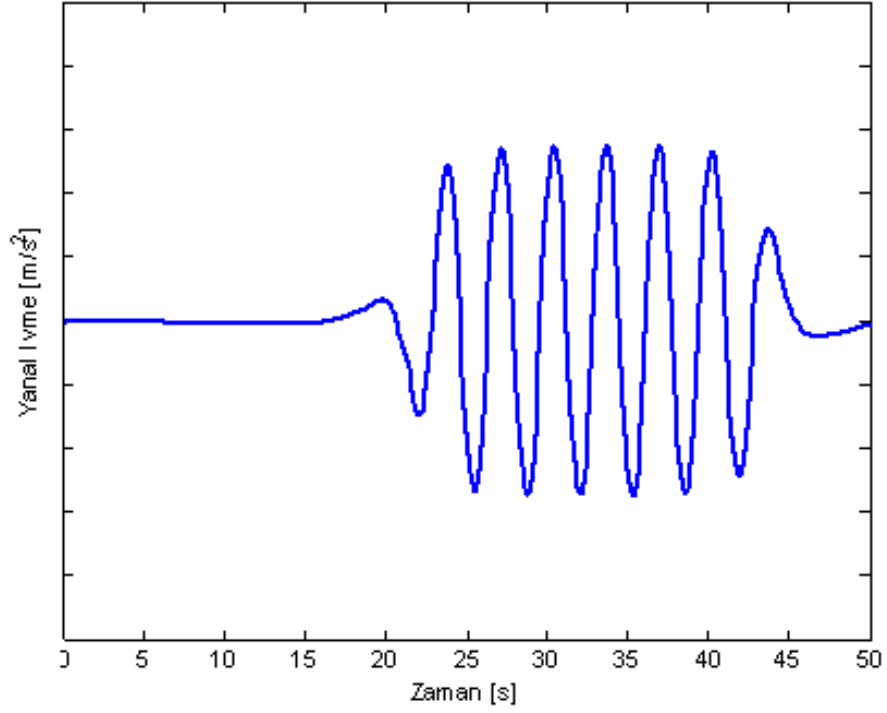
### 5.2.2 CarMaker taşıt modeli ile yapılan benzetim çalışması

Tasarımı yapılan sanal algılayıcı yüksek serbestlik dereceli taşıt modeli olan CarMaker'da da test edilmiştir. Buna göre taşıt modeline şekil 5.11'deki gibi sağa ve sola dönüş hareketi yaptırılmıştır.



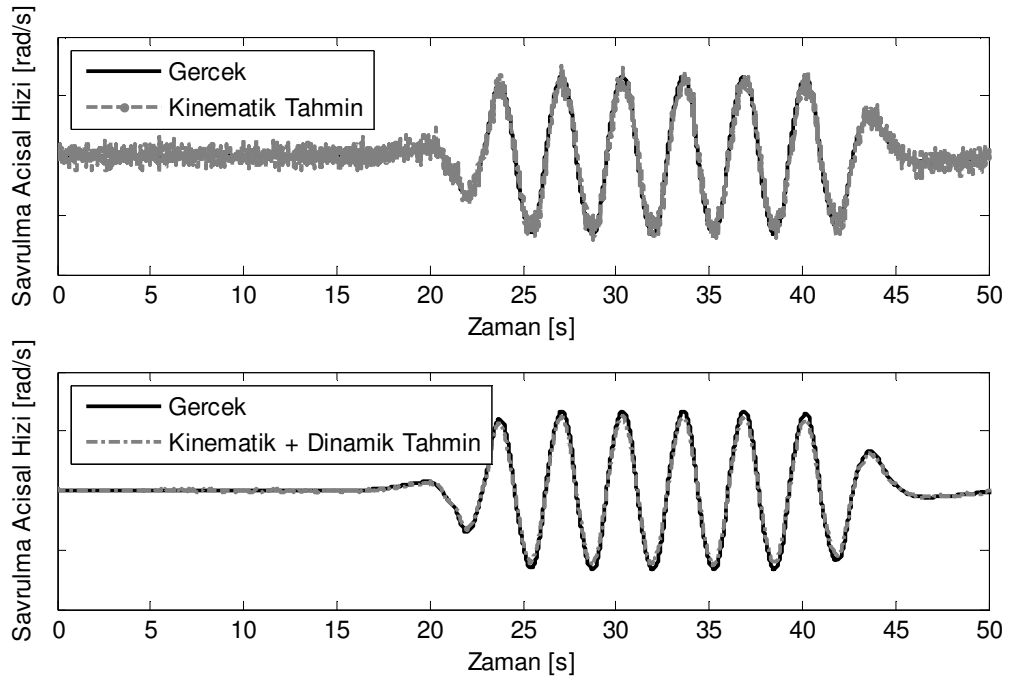
**Şekil 5.11 :** Direksiyon Açısı.

Şekil 5.12’de bu manevraya ait yanal ivme değeri görülmektedir. Yanal ivme değeri oldukça yüksek değerlere kadar çıkmıştır.

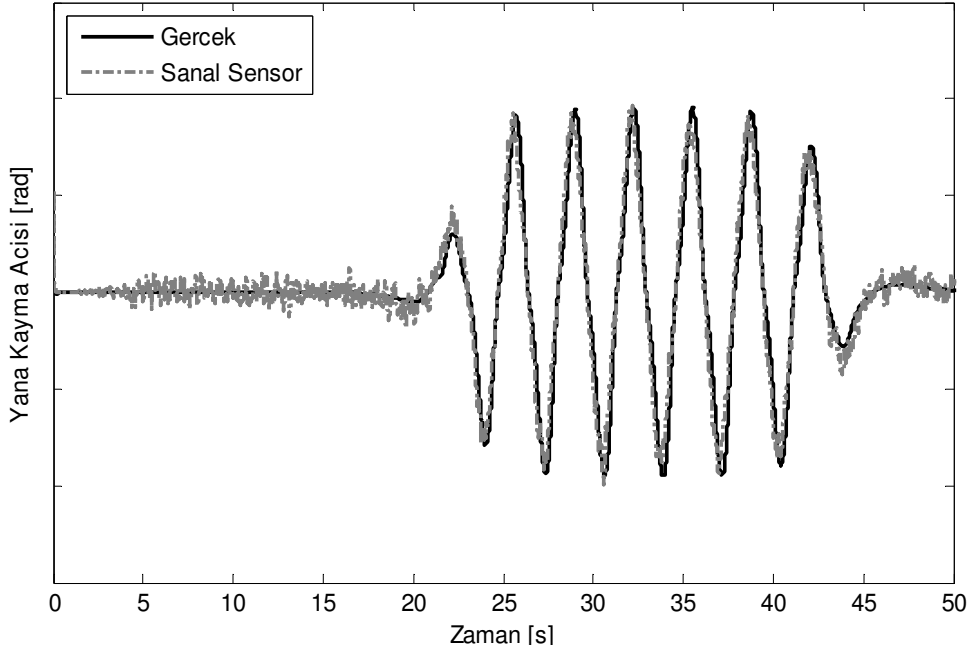


Şekil 5.12 : Taşıt Yanal İvmesi.

Şekil 5.13’ te sadece kinematik tahmin ve sanal algılayıcı sonuçları gösterilmiştir. Buna göre dinamik tahmin kısmı eklendikten sonra kinematik tahmin üzerinde görünen gürültüler büyük oranda giderilmiştir.



Şekil 5.13 : CarMaker Ortamında Savrulma Açısal Hızı Tahminleri.

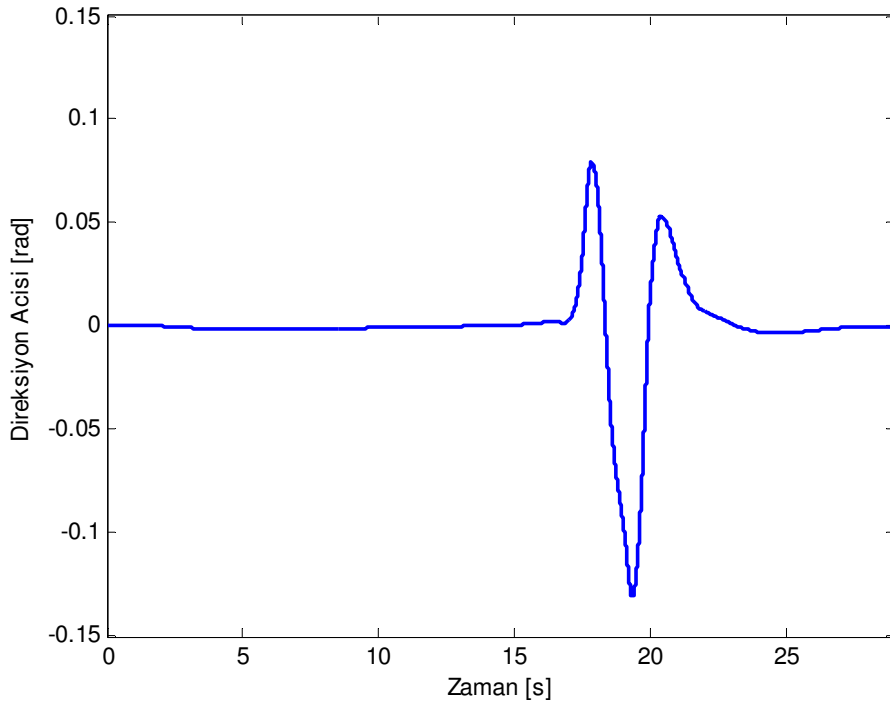


**Şekil 5.14 : Taşıt Yana Kayma Açısı Dinamik Tahmin Bilgisi.**

### **5.2.3 Donanım içeren benzetimci ile yapılan benzetim çalışması**

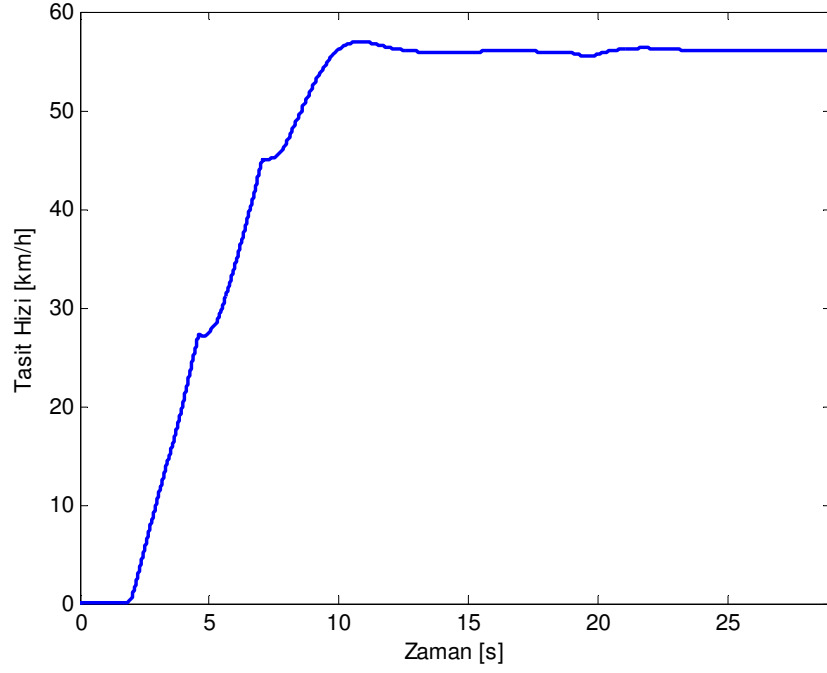
Bölüm 3'te tanımlanan Mekar donanım içeren benzetimcisi kullanılarak, yapılan çalışma gerçek zamanlı ortamda test edilmiştir. Sürücü direksiyon, gaz, fren girişleri ile taşıta şerit değiştirme manevrası yaptırmıştır.

Şekil 5.15-5.16 direksiyon açısını ve taşıtın hızını göstermektedir.



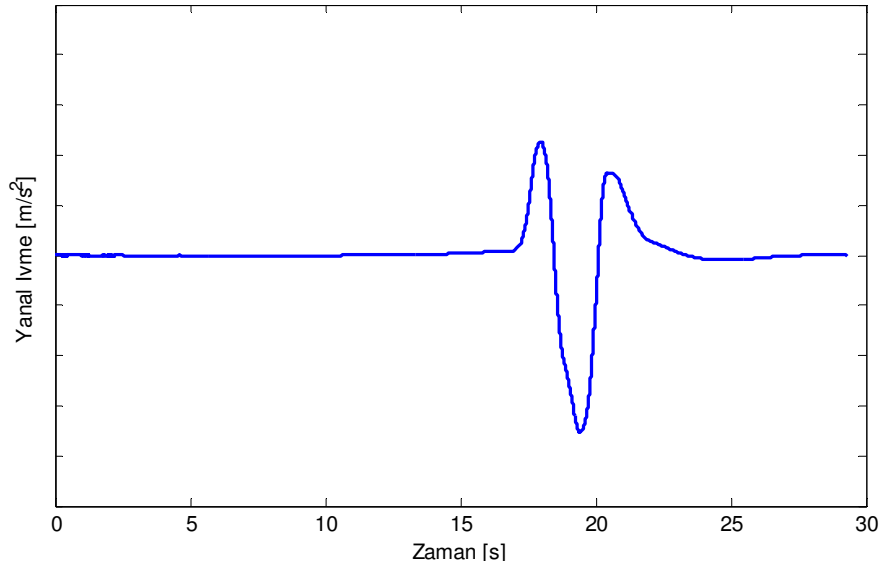
**Şekil 5.15 : Direksiyon Açısı.**





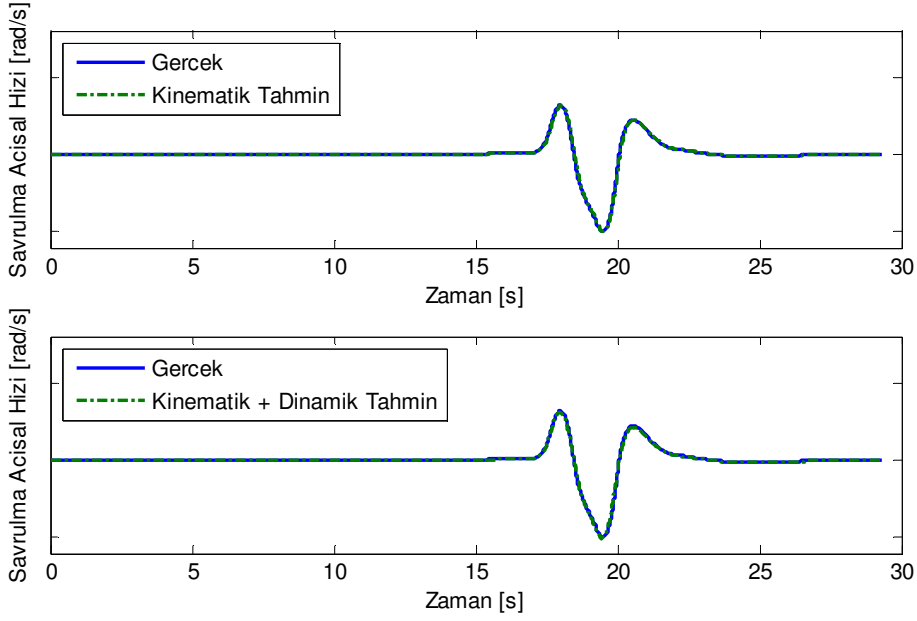
**Şekil 5.16 : Taşıt Hızı.**

Şekil 5.17’de taşıtın yanal ivmesini göstermektedir. Buna göre manevra sırasında taşıt yanal ivmesi 0.7 g mertebesine ulaşmıştır.



**Şekil 5.17 : Taşıtın Yanal İvmesi.**

Şekil 5.18’de ise tekerlek hızları ve taşıt yanal dinamiğinin kullanıldığı sanal savrulma açısız hızı tahmincisi ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Buna göre tahminci ile elde edilen sonuçlara göre kinematik ve dinamik tahmin birlikte kullanıldığında gerçek sensör bilgisine göre hata miktarı %1’in altındadır. O halde algoritma gerçek zamanlı bir ortamda da iyi bir şekilde çalışmaktadır denilebilir.

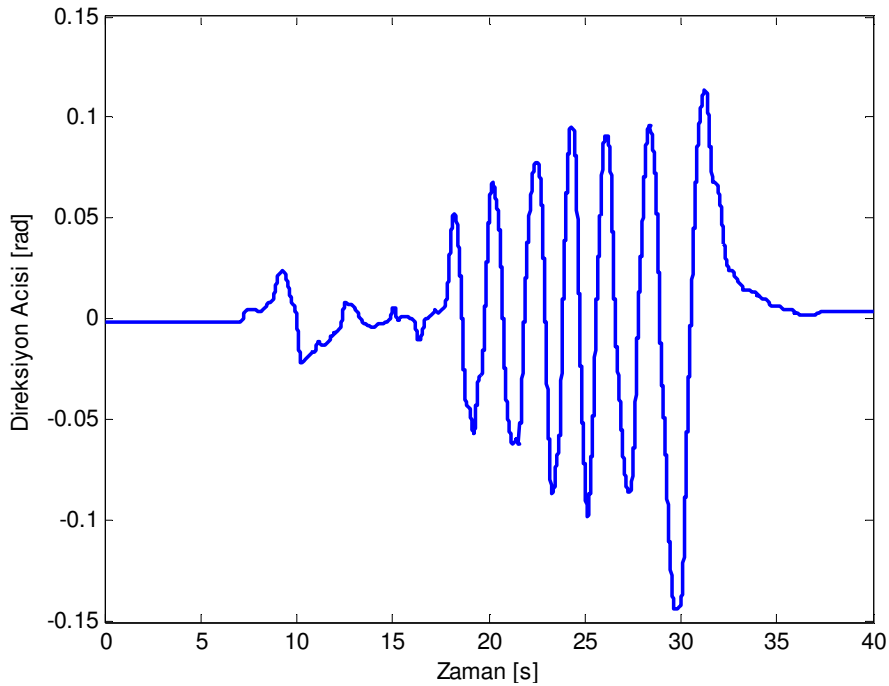


**Şekil 5.18 :** Gerçek ve Tahmin Edilen Savrulma Açısal Hızları.

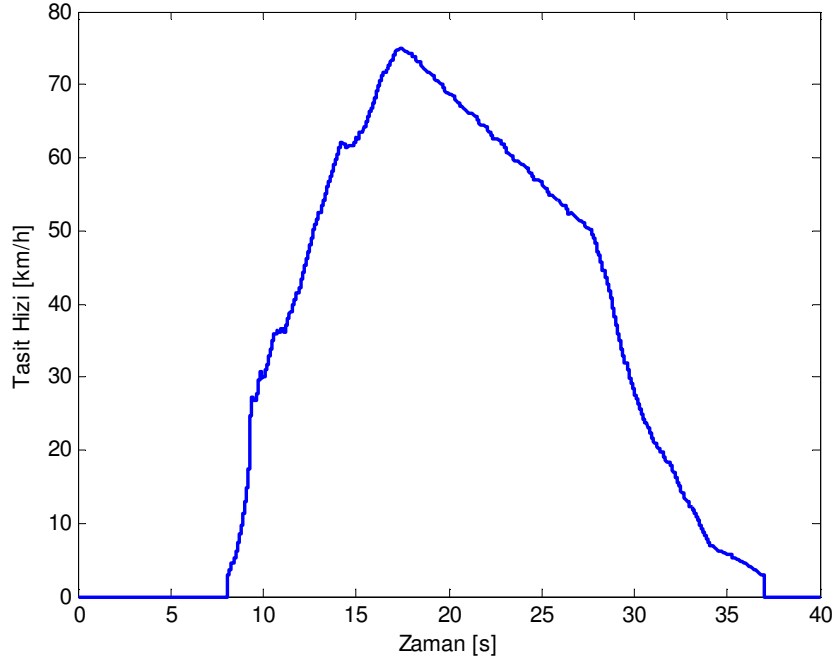
#### 5.2.4 Deneysel taşıt ile yapılan test sonuçları

Tez çalışması Bursa Fiat-Tofaş'a ait test pistinde gerçek zamanlı olarak deneysel taşıt üzerinde denenmiştir. Mekar'a ait MicroAutobox donanımı kullanılarak taşıtın CAN hattına bağlanılmış ve sanal algılayıcının ihtiyaç duyduğu bilgiler taşıt CAN hattından alınmıştır.

Şekil 5.19 ve 5.20'de deneysel taşıttan alınan direksiyon açısı ve taşıt hızı görülmektedir.



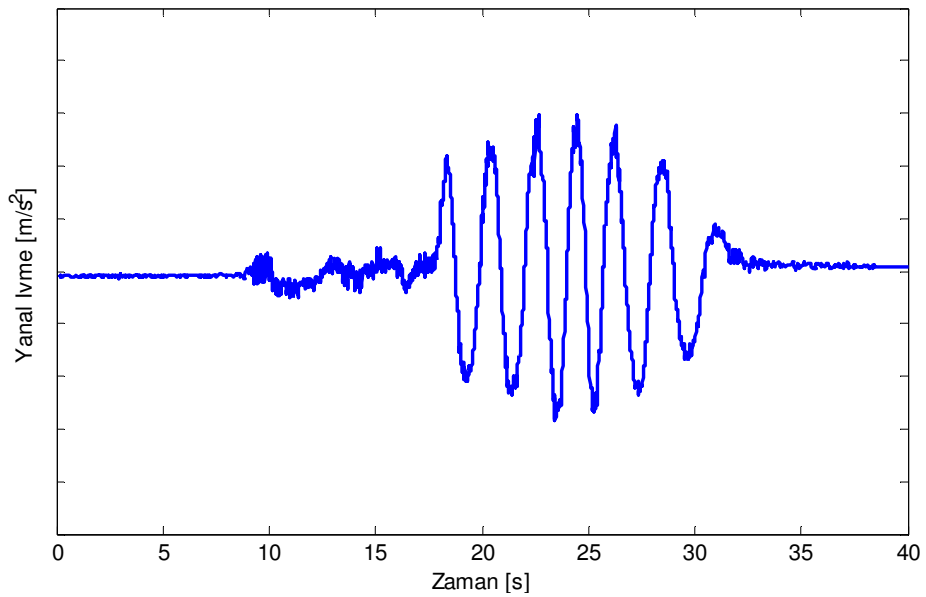
**Şekil 5.19 :** Direksiyon Açısı.



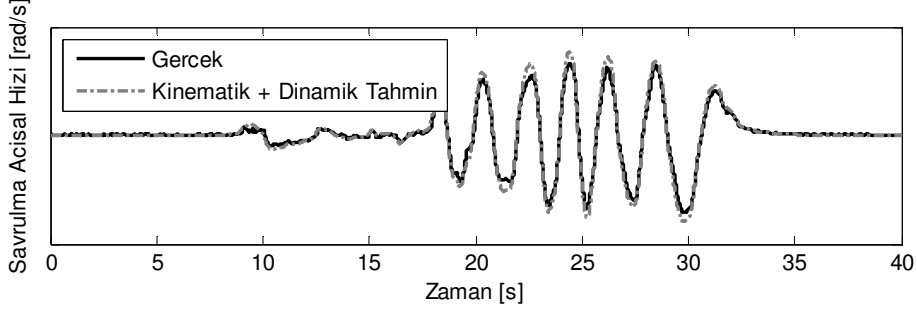
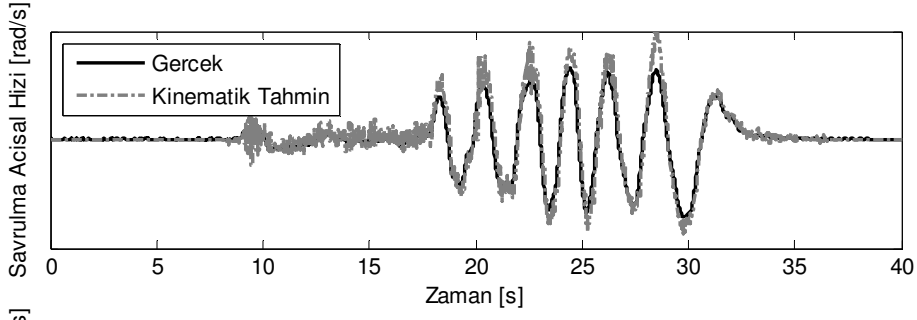
**Şekil 5.20 : Taşıt Hızı.**

Şekil 5.21’te manevra sırasında taşıttan alınan yanal ivme değerini göstermektedir. Buna göre yanal ivme değeri 0.6 g seviyesine kadar ulaşmıştır.

Şekil 5.22’de ise manevra sırasında taşıttaki savrulma açısız hızı sensöründen ve sanal algılayıcıdan alınan savrulma açısız hızı bilgileri karşılaştırılmıştır. Yanal ivmenin 0.6 g seviyelerine çıktığı yüksek değerlerde, savrulma açısız hızındaki tahminin hata miktarı ortalama %13 civarındadır. Bu sonuçlara göre savrulma açısız hızı gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilmiştir denilebilir.



**Şekil 5.21 : Taşıt Yanal İvmesi.**



**Şekil 5.22 :** Gerçek ve Tahmin Edilen Savrulma Açısai Hızları.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Taşıt teknolojisinin gelişmesi ve taşıt güvenliğine artan önem ile birlikte ABS, ESP gibi taşıt dinamiği kontrolcülerine daha çok önem verilmeye başlanmıştır. Avrupa Parlamentosu da 1 Kasım 2011'den itibaren üretilecek olan yeni model taşıtlarda taşıt dinamiği kontrolcülerinin olmasını şart koşmuştur [5]. Bu sebeple taşıt üreticileri ESP'nin yeni taşıtlarda zorunlu olmasından dolayı artacak olan taşıt üretim maliyetlerini azaltmak istemektedirler.

Bu tez çalışmasında, taşıt dinamiği kontrolcülerinin ihtiyaç duyduğu savrulma açısız hızı bilgisinin, gerçek savrulma açısız hızı sensörünün yerine standart ABS'li taşıtlarda bulunan tekerlek devir sensörleri ve direksiyon açısız sensörü kullanarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Bilgisayar üzerinde basit taşıt modeli ve yüksek serbestlik dereceli gerçekçi CarMaker taşıt modeli üzerinde yapılan deneylerde tasarımı yapılan yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Ayrıca Bursa Tofaş test pistinde yapılan deneysel çalışmalar da bu yöntemin etkinliğini göstermektedir. Buna göre tasarımı yapılan savrulma açısız hızı tahmincisi gerçek taşıt üzerindeki sensörden alınan verilere göre %3-13 aralığında hatalı tahmin yapmıştır. Bu hatanın içinde modelleme hataları, direksiyon sensörü ile tekerlek yönelimi açısız arasındaki fark, tekerleklerin nominal basınç değerinde olmaması, taşıt hızı tahmincisinin eksikliğinin etkileri de vardır. Bunlara rağmen gerçek taşıt verilerine göre ortalama %90 tahmin başarısı sağlanmıştır.

Gerçek savrulma açısız hızı sensörü yerine sanal savrulma açısız hızı sensörü kullanılarak ESP'li taşıtta kullanılması gereken bir sensörden tasarruf edilmiş olunur. Seri üretimde ise bu tasarruf çok daha büyüktür.

İkinci bir uygulama alanı olarak savrulma açısız hızı tahmincisi, gerçek sensörün doğru çalışıp çalışmadığının tespiti amacıyla kullanılabilir. Gerçek savrulma açısız hızı bilgisi ile tahmin edilen savrulma açısız hızı bilgisi arasında bariz fark var ise sürücü uyarılır ve gerçek sensör tamir edilene kadar savrulma açısız hızı tahmincisi ile taşıt yanal dinamiği kontrolü sağlanabilir.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar gözönüne alındığında anlatılan savrulma açısız hızı tahmincisine tekerlek-yol sürtünme katsayısı tahmincisi, taşıt hızı tahmincisi, taşıt kütlesi tahmincisi gibi tahminçiler eklenerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Sonuç olarak tez çalışmasında anlatılan savrulma açısız hızı tahmincisi başarılı sonuçlar vermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <[http://www.bosch.com.tr/content/language1/html/715\\_4923.htm](http://www.bosch.com.tr/content/language1/html/715_4923.htm)>, alındığı tarih 02.04.2011
- [2] **Van Zanten, A.T., Erhardt, R, and Pfaff, G. , 1995.** VDC, the Vehicle Dynamics Control System of Bosch, SAE Technical Paper No: 950759
- [3] **Erke, A., 2007.** Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence, *Accident Analysis and Prevention*, **40**, 167-173.
- [4] **Farmer, C. M., 2004.** Effect of electronic stability control on automobile crash risk, *Traffic Injury Prevention*, **5**, 317-325.
- [5] **European Parliament, 2009.** Type-approval requirements for the general safety of motor vehicles, 10 March 2009, P6\_TA-PROV(2009)03-10. European Parliament, Brussels, p. 41-76.
- [6] **Sivashankar, N., ve Ulsoy, A. G., 1998.** Yaw rate estimation for vehicle control applications, *J. of Dynamic Systems Measurement and Control*, **120**
- [7] **Kahraman, K., Emirler, M. T., Şentürk, M., Güvenç, L., Aksun, Güvenç, B. and Efendioğlu, B. 2010.** Estimation of Vehicle Yaw Rate Using a Virtual Sensor with a Speed Scheduled Observer. *IFAC AAC'10*, Munich.
- [8] **Emirler, M.T., Kahraman, K., Şentürk, M., Güvenç, B. A., Güvenç, L. and Efendioğlu, B., 2009.** Estimation of Road Vehicle Yaw Rate Using a Virtual Sensor and an Observer. *European Control Conference ECC'09*, August 23-26, 2009, Budapest, Hungary.
- [9] **Gao, Z., Ding, S. X., Ma, Y., 2006.** Robust lateral estimation for vehicle lateral Dynamics systems, *IFAC Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Beijing
- [10] **Kiencke, U. ve Daiß, A., 1997.** Observation of lateral vehicle dynamics, *Control Engineering Practice*, **5**, No.8, 1145-1150.
- [11] **Imsland, L., Johansen, T. A., Fossen, T. I., Grip, H. F., Kalkkuhl, J. C., Suissa, A., 2006.** Vehicle velocity estimation using nonlinear observers, *Automatica*, **42**, 2091-2103.
- [12] **Fujimoto, H. Fujii, K. ve Takahashi, N., 2007.** Vehicle stability control of electric vehicle with slip-ratio and cornering stiffness estimation, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Zurich
- [13] **Miller, S. L., Youngberg, B., Millie, A., Schweizer, P., Gerdes, J. C., 2001.** Calculating longitudinal wheel slip and tire parameters using gps velocity, *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington.

- [14] **Carlson C.R., Gerdes, J. C., 2002.** Identifying tire pressure variation by nonlinear estimation of longitudinal stiffness and effective radius, *Proceedings of AVEC 2002 6th International Symposium of Advanced Vehicle Control*.
- [15] **Shraim, H., Rabhi, A., Fridman, L., 2006.** Estimation and analysis of the tire pressure effects on the comportment of the vehicle center of gravity, *Proceedings of the 2006 International Workshop on Variable Structure Systems*, Alghero, Italya.
- [16] **Velupillai, S., Güvenç, L., 2007.** Tire pressure monitoring, *IEEE Control Systems Magazine*, **27**, pp. 22-25.
- [17] **F. Gustafsson, 1997.** Slip-based tire–road friction estimation, *Automatica*, **33**, no. 6, pp. 1087–1099.
- [18] **Ray, L.R., 1997.** Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification: Simulation and Experiments, *Automatica*, **33**, pp. 1819–1833.
- [19] **Hahn, J.O., Rajamani, R., Alexander, L., 2002.** GPS-based real-time identification of tire–road friction coefficient, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **10**, No. 3.
- [20] **Haffner, L., Kozek, M., Shi, J., J'orgl, H. P., 2008.** Estimation of the maximum friction coefficient for a passenger vehicle using the instantaneous cornering stiffness, *American Control Conference*, Washington, USA.
- [21] **Bevly, D. M., Gerdes, J. C., Wilson, C., 2003.** The use of GPS based velocity measurement of sideslip and wheelslip. *Vehicle System Dynamics, Int. J. of Vehicle Mechanics and Mobility*, **38**., pp.127-147.
- [22] **Yih, P., Ryu, J., Gerdes, J.C., 2004.** Vehicle state estimation using steering torque. *Proceedings of the American Cont. Conf. (ACC)*, Boston, USA.
- [23] **Stephant, J., Charara, A., Meizel, D., 2007.** Evaluation of a sliding mode observer for vehicle sideslip angle. *Control Engineering Practice*, **15** pp.803-812.
- [24] **Grip, H.V., Imsland, L., Johansen, T.A., Fossen, T.I., Kalkkuhl, J.C., Suissa, A., 2007.** Nonlinear vehicle side-slip estimation with friction adaptation. *Automatica*, **44**, pp.611-622.
- [25] **Baffet, G., Charara, A., Lechner, D., Thomas, D., 2008.** Experimental evaluation of observers for tire-road forces, sideslip angle and wheel cornering stiffness. *Vehicle System Dynamics*, **46**, pp.501-520.
- [26] **Solmaz, S. ve Başlamışlı, S. Ç., 2010.** A nonlinear sideslip observer design methodology for automotive vehicles based on a rational tire model., *5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON 2010*, Bursa.
- [27] **Tseng, H.E., Xu, Li, Hrovat, D., 2007.** Estimation of land vehicle roll and pitch angles, *Vehicle System Dynamics*, **45:5**, 433 – 443.
- [28] **Chee, W., 2005.** Yaw rate estimation using two laxis accelerometers, *Proceedings of the American Cont. Conf. (ACC)*, Portland, USA.



- [29] **Zhenhai, G., 2003.** Soft sensor application in vehicle yaw rate measurement based on Kalman filter and vehicle dynamics, *IEEE Intelligent Transportations Systems*.
- [30] **Zhao,H. ve Chen, H., 2006.** Estimation of Vehicle Yaw Rate and Side Slip Angle Using Moving Horizon Strategy, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, Chin.*
- [31] **Cherouat, H., Braci, M. ve Diop, S., 2005.** Vehicle velocity, side slip angles and yaw rate estimation, *IEEE International Sym. of Industrial Electronics (ISIE)*, June 20-23.
- [32] **Hac, A. ve Simpson, M.D. 2000.** Estimation of vehicle side slip angle and yaw rate, SAE paper no. 2000-01-0696.
- [33] **Best, M. C., Gordon T. J. ve Dixon, P. J., 2000.** An Extended Adaptive Kalman Filter for Real Time State Estimation of Vehicle Handling Dynamics. *Vehicle System Dynamics*, **34**, 57 – 75.
- [34] **Carlson C. R., Gerdes, J. C., Powell, J. D., 2002.** Practical position and yaw rate estimation with GPS and differential wheelspeeds, *In Proc. of 6th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control*, Hiroshima, 9–13 Eylül.
- [35] **Venhovens, P. J. TH. ve Naab, K., 1999.** Vehicle dynamics estimation using Kalman filters, *Vehicle System Dynamics, Int. J. of Vehicle Mechanics and Mobility*, **32.**, pp.171-184.
- [36] **Ghoneim, Y. A. ve Chin, Y.-K., 2001.** Active brake control having yaw rate estimation, US Patent 6 169 951 B1, Jan. 2.
- [37] **Riekert, P., Schunk T.,1940.** Zur Fahrmechanik des gummibereiften Krutfahrzeugs, *Ingenieur Archiv*, 11, pp. 210-224
- [38] **Aksun, Güvenç, B., 2006.** Taşıt Sistem Dinamiği ve Kontrolü Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- [39] **Dugoff H., Fancher P.S. ve Segel L., 1970.** An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance"; SAE Paper no. 700377
- [40] **Url-2** <http://www.ipg.de/CarMaker.609.0.html>, alındığı tarih 04.06.2011.
- [41] **Url-3** [http://www.dspaceinc.com/en/inc/home/products/hw/modular\\_hardware\\_introduction/processor\\_boards/ds1005.cfm](http://www.dspaceinc.com/en/inc/home/products/hw/modular_hardware_introduction/processor_boards/ds1005.cfm), alındığı tarih 04.06.2011.
- [42]**Url-4** <http://www.dspaceinc.com/en/inc/home/products/hw/micautob.cfm>, alındığı tarih 04.06.2011.
- [43] **Grewal, M. S., Andrews, A. P., 2001.** *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB.*, John Wiley & Sons, Inc.
- [44] **Kalman, R. ve Bucy, R., 1961.** New results in linear filtering and prediction theory., *ASME Journal of Basic Engineering*, **83**, pp. 95108 (March 1961).
- [45] **Simon, D.,2006.** *Optimal State Estimation*, John Wiley & Sons, Inc.

- [46] **Kailath, T., Sayed, A. H. ve Hassibi, B., 2000.** *Linear Estimation*. Prentice Hall.
- [47] **Fitzgerald, R., 1971.** Divergence of the Kalman filter, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-16, pp.736-747.
- [48] **Benjamin C. Kuo, 1999.** *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Literatür Yayıncılık
- [49] **Kalman, R.E.,1961.** On the General Theory of Control Systems, *Proc.IFAC*,1, pp.481,492, Butterworth,London.
- [50] **Emirler, M. T., 2010.** Taşıt savrulma açısal hızının sana sensör kullanılarak tahmin edilmesi ve taşıt yanal dinamiğinin kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Kerim KAHRAMAN

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Keles, 03.06.1986

**Adres:** Orhaneli / BURSA

**Lisans Üniversitesi:** İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği Programı

### Yayın Listesi:

- **Kahraman, K., Emirler, M. T., Şentürk, M., Güvenç, L., Aksun, Güvenç, B. and Efendioğlu, B.** 2010. Estimation of Vehicle Yaw Rate Using a Virtual Sensor with a Speed Scheduled Observer. *IFAC AAC'10*, Munich.
- **Şentürk, M., Turan, M.C., Tekin, A., Sönmez, Ü., Kahraman, K., Bozkurt, E.,** 2010. Magnetic pulse driven semi compliant four bar mechanism. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. İstanbul.
- **Emirler, M.T., Kahraman, K., Şentürk, M., Güvenç, B. A., Güvenç, L. and Efendioğlu, B.,** 2009. Estimation of Road Vehicle Yaw Rate Using a Virtual Sensor and an Observer. *European Control Conference ECC'09*, August 23-26, 2009, Budapest, Hungary.
- **Emirler, M. T., Kahraman, K., Şentürk, M., Aksun, Güvenç, B., Güvenç, L. and Efendioğlu, B.** 2009. Sanal Sensör Kullanılarak Taşıt Savrulma Açısız Hızının Tahmin Edilmesi. *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'09*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.