

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞIT SAVRULMA AÇISAL HIZININ SANAL SENSÖR KULLANILARAK
TAHMİN EDİLMESİ VE TAŞIT YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mümin Tolga EMİRLER**

Anabilim Dalı : Mekatronik Mühendisliği

Programı : Mekatronik Mühendisliği

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞIT SAVRULMA AÇISAL HIZININ SANAL SENSÖR KULLANILARAK
TAHMİN EDİLMESİ VE TAŞIT YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mümin Tolga EMİRLER
(518071014)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Ocak 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Ümit SÖNMEZ (İTÜ)
Prof. Dr. Elbrus CAFEROV (İTÜ)**

OCAK 2010

Anneme, Babama ve Kardeşime

ÖNSÖZ

Taşıt savrulma açısı hızı, taşıt yanal dinamiğinin kontrolünde taşıt dinamiği kontrolcüsü tarafından bilinmesi gereken parametrelerin başında gelmektedir. Taşıt savrulma açısı hızı, çeşitli taşıt parametreleri ve ölçülebilir değişkenler kullanılarak tahmin edilebilir. Taşıt yanal dinamiğinin kontrolü ise sürücünün taşıtı daha rahat ve güvenli sürmesini sağlayarak, trafik kazalarının önlenmesinde oldukça işe yaramaktadır. Bu çalışmada, taşıt savrulma açısı hızı sanal sensör kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca taşıt yanal dinamiğinin kontrolü için direksiyon ve tekil fren müdahalesini gerçekleştirebilen model öngörülü kontrol yöntemi tabanlı kontrol sistemi tasarımı yapılmaya çalışılmıştır.

Öncelikle tecrübeleri ve bilgisi ile bu çalışmanın her aşamasında bana yardımcı olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ'e şükranlarımı sunar, çalışmamın gerçekleşmesinde yaratıcı fikirleri ve yapıcı eleştirileri ile bana desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Levent GÜVENÇ'e ve tüm MEKAR çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmamda BİDEB 2210 yurt içi yüksek lisans burs programı ile bana destek veren TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam sırasında deneysel test imkanlarını sağlayan TOFAŞ-Fiat otomobil firmasına da desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Son olarak, tüm öğrenim hayatım boyunca beni destekleyen ve sevgilerini esirgemeyen aileme en içten sevgi ve saygılarımı sunarım.

Aralık 2009

Mümin Tolga EMİRLER

Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Konusu ve Amacı	1
1.2 Tezin Kapsamı.....	4
2. KULLANILAN TAŞIT MODELLERİ.....	5
2.1 Tek İzli Taşıt Modeli	5
2.2 CarMaker Taşıt Modeli	9
3. SANAL SENSÖR TASARIMI.....	13
3.1 Giriş	13
3.2 Kinematik Tahmin.....	15
3.3 Dinamik Tahmin	18
3.3.1 Luenberger gözetleyicisi	18
3.3.2 Kalman filtresi.....	19
3.4 Sanal Sensör Yapısı.....	21
4. SANAL SENSÖR TASARIMINDA YAPILAN İYİLEŞTİRMELER	23
4.1 Kinematik Tahminde Yapılan İyileştirmeler.....	23
4.1.1 Arka tekerleklerde iyileştirilmiş kinematik tahmin	25
4.1.2 Ön tekerleklerden iyileştirilmiş kinematik tahmin.....	27
4.2 Kinematik Tahmin için Tekerlek Seçim Algoritması	32
5. TAHMİN SONUÇLARI.....	35
5.1 Benzetim Çalışması.....	35
5.2 MEKAR Donanım İçeren Taşıt Benzetimcisi.....	36
5.3 Benzetim Sonuçları	38
5.4 Donanım İçeren Benzetim Sonuçları	40
5.5 Gerçek Yol Testleri Sonuçları.....	42
6. TAŞIT YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ.....	45
6.1 Önceki Çalışmalar	45
6.2 Kullanılan Kontrol Stratejisi	49
6.3 Üst Kontrolcü Tasarımı	52
6.3.1 Model öngörülü kontrol yöntemi	52
6.3.2 Model öngörülü kontrolcü tasarımı.....	55
6.4 Alt Kontrolcü Tasarımı	59
7. KONTROLÇÜ TASARIMININ SINANMASI.....	63
7.1 Tek İzli Taşıt Modeli Kullanılarak Yapılan Benzetim Sonuçları.....	63

7.2 CarMaker Taşıt Modeli Kullanılarak Yapılan Benzetimler	69
8. SANAL SENSÖRLÜ TAŞITIN YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ	73
8.1 Sanal Sensör İle Taşıt Yanal Dinamiği Kontrolcüsünün Birleştirilmesi	73
8.2 CarMaker Taşıt Modeli Kullanılarak Yapılan Benzetimler	75
9. SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	79
KAYNAKLAR.....	83
EKLER.....	89

KISALTMALAR

4WS	: Four Wheel Steering
ABS	: Antilock Brake System
AFS	: Active Front Steering
ARS	: Active Rear Steering
CAN	: Controller Area Network
DYC	: Direct Yaw Moment Control
ECU	: Electronic Control Unit
ESC	: Electronic Stability Control
ESP	: Electronic Stability Program
LIN	: Local Interconnect Network
LQG	: Linear Quadratic Gaussian
LQR	: Linear Quadratic Regulator
MEMS	: Micro-Electro-Mechanical Systems
MIMO	: Multi Input Multi Output Systems
MPC	: Model Predictive Control
RPC	: Rapid Prototyping Control
RTI	: Real Time Interface
SISO	: Single Input Single Output Systems
VDC	: Vehicle Dynamics Control
YSC	: Yaw Stability Control

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : ESP'nin kazaları önlemedeki rolü	2
Çizelge 2.1 : Taşıt modeline ait temel parametreler	6
Çizelge 6.1 : Model öngörülü kontrolcü tasarım kriterler	57
Çizelge 6.2 : Seçilen ağırlık değerleri	58
Çizelge 6.3 : Kontrolcü seçim algoritması	58
Çizelge 6.4 : Alt kontrolcü tasarımı taşıt durumları.	59

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kontrollü ve kontrolsüz taşıt davranışı, [1].....	2
Şekil 2.1 : Tek izli taşıt modelinin kinematik diyagramı	5
Şekil 2.2 : Doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli blok diyagramı, [10].....	8
Şekil 2.3 : CarMaker programı kullanıcı arayüzü	9
Şekil 2.4 : CarMaker programı Simulink blokları ve kullanıcının eklediği bloklar ..	10
Şekil 3.1 : Ticari savrulma açısal hızı sensörü, [16].....	14
Şekil 3.2 : Kinematik tahmin için taşıt şematik görünüşü	16
Şekil 3.3 : Arka tekerleklerden kinematik tahmin ile elde edilmiş tahmin sonucu ...	17
Şekil 3.4 : Sisteme ve gözetleyiciye ait blok diyagramı	19
Şekil 3.5 : Sanal sensör genel yapısı.....	21
Şekil 4.1 : Frenleme durumunda temel ve iyileştirilmiş tahmin karşılaştırılması	24
Şekil 4.2 : Arka tekerleklerden iyileştirilmiş kinematik tahmin algoritması	48
Şekil 4.3 : Ön tekerleklerden iyileştirilmiş tahmin algoritması	32
Şekil 4.4 : Kinematik tahmin için tekerlek seçimi akış diyagramı	33
Şekil 5.1 : Test manevraları: (a) Ani şerit değiştirme. (b) Sekiz. (c) Slalom.	35
Şekil 5.2 : Gerçek zamanlı MEKAR donanım içeren taşıt benzetimcisi.....	36
Şekil 5.3 : MEKAR taşıt benzetimcisinin çalışma diyagramı	37
Şekil 5.4 : Ani şerit değiştirme manevrası sonuçları	38
Şekil 5.5 : Sekiz manevrası sonuçları	39
Şekil 5.6 : Slalom manevrası sonuçları	39
Şekil 5.7 : Donanım içeren ani şerit değiştirme manevrası sonucu	40
Şekil 5.8 : Donanım içeren sekiz manevrası sonucu	41
Şekil 5.9 : Donanım içeren slalom manevrası sonucu	41
Şekil 5.10 : Deneysel test sonucu – 1.	42
Şekil 5.11 : Deneysel test sonucu – 2.	43
Şekil 5.12 : Deneysel test sonucu – 3.	43
Şekil 6.1 : Ön tekerlek tabanlı geri beslemeli savrulma açısal hızı kontrolü, [38]....	46
Şekil 6.2 : İleri beslemeli taşıt yana kayma açısı kontrolü, [38].....	28
Şekil 6.3 : Kullanılan kontrol strajesine ait blok diyagram	50
Şekil 6.4 : Kablo kontrollü direksiyon sistemi, [59].....	51
Şekil 6.5 : Model öngörülü kontrol içeren sistemin blok diyagramı, [63]	53
Şekil 6.6 : MPC'nin temel yapısı, [60]	53
Şekil 6.7 : Sinyal değişimleri: (a) Sistem çıkışı sinyali. (b) Kontrol sinyali, [64].....	54
Şekil 6.8 : Matlab MPC araç kutusu ekran görüntüsü	57
Şekil 6.9 : Taşıt durumları şematik gösterimi.....	60
Şekil 6.10 : Torklar için taşıt şematik görünüşü	61
Şekil 7.1 : Benzetim 1 , savrulma açısal hızı değişimi, $\delta_s = 90^\circ$, $M_{zd} = 0$	64
Şekil 7.2 : Benzetim 1, taşıt yana kayma açısı değişimi, $\delta_s = 90^\circ$, $M_{zd} = 0$	64
Şekil 7.3 : Benzetim 1, $V = 20 \text{ m/s}$, $\mu = 0.6$ durumu, taşıt yörüngesi	65
Şekil 7.4 : Benzetim 2 , savrulma açısal hızı değişimi, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$	66

Şekil 7.5 : Benzetim 2 , taşıt yana kayma açısı değişimi, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$	66
Şekil 7.6 : Benzetim 2, $V = 50 \text{ m/s}$, $\mu = 0.7$ durumu, taşıt yörüngesi	67
Şekil 7.7 : Benzetim 3 , savrulma açısal hızı değişimi, $\delta_s = 0$, $M_{zd} = 10000 \text{ Nm}$	67
Şekil 7.8 : Benzetim 3 , taşıt yana kayma açısı değişimi, $\delta_s = 0$, $M_{zd} = 10000 \text{ Nm}$.	68
Şekil 7.9 : Benzetim 3, $V = 70$, $\mu = 0.4$ durumu, taşıt yörüngesi	68
Şekil 7.10 : CarMaker benzetimi 1, savrulma açısal hızı, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$	69
Şekil 7.11 : CarMaker benzetimi 1, taşıt yana kayma açısı, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$	70
Şekil 7.12 : CarMaker benzetimi 2, savrulma açısal hızı, $\delta_s = 30^\circ$, $M_{zd} = 0$.	70
Şekil 7.13 : CarMaker benzetimi 2, taşıt yana kayma açısı, $\delta_s = 30^\circ$, $M_{zd} = 0$	71
Şekil 7.14 : CarMaker benzetimi 3, savrulma açısal hızı , $\delta_s = 15^\circ$, $M_{zd} = 0$	71
Şekil 7.15 : CarMaker benzetimi 3, savrulma açısal hızı , $\delta_s = 15^\circ$, $M_{zd} = 0$	72
Şekil 8.1 : Sanal sensör ve kontrolcü içeren sistemin blok diyagramı	74
Şekil 8.2 : Savrulma açısal hızı sonucu	76
Şekil 8.3 : Taşıt yana kayma açısı sonucu	76
Şekil 8.4 : Gerçek ve tahmini savrulma açısal hızı karşılaştırılması	77
Şekil B.1 : Deneysel test sonucu – 1, taşıt hızı	94
Şekil B.2 : Deneysel test sonucu – 1, savrulma açısal hızı	94
Şekil B.3 : Deneysel test sonucu – 1, fren durumu	95
Şekil B.4 : Deneysel test sonucu – 2, taşıt hızı	95
Şekil B.5 : Deneysel test sonucu – 2, savrulma açısal hızı	96
Şekil B.6 : Deneysel test sonucu – 2, fren durumu	96
Şekil B.7 : Deneysel test sonucu – 3, taşıt hızı	97
Şekil B.8 : Deneysel test sonucu – 3, savrulma açısal hızı	97
Şekil B.9 : Deneysel test sonucu – 3, fren durumu	98
Şekil C.1 : Benzetim 1, ön tekerlek dönüş açıları değişimi	99
Şekil C.2 : Benzetim 1, kontrol momenti değişimi	99
Şekil C.3 : Benzetim 2, ön tekerlek dönüş açıları değişimi	100
Şekil C.4 : Benzetim 2, kontrol momenti değişimi	100
Şekil C.5 : Benzetim 3, ön tekerlek dönüş açıları değişimi	101
Şekil C.6 : Benzetim 3, kontrol momenti değişimi	101
Şekil C.7 : CarMaker benzetimi 1, ön tekerlek dönüş açıları değişimi	102
Şekil C.8 : CarMaker benzetimi 1, fren torkları dağılımı	102
Şekil C.9 : CarMaker benzetimi 2, ön tekerlek dönüş açıları değişimi	103
Şekil C.10 : CarMaker benzetimi 2, fren torkları dağılımı	103
Şekil C.11 : CarMaker benzetimi 3, ön tekerlek dönüş açıları değişimi	104
Şekil C.12 : CarMaker benzetimi 3, fren torkları dağılımı	104

TAŞIT SAVRULMA AÇISAL HIZININ SANAL SENSÖR KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİ VE TAŞIT YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ

ÖZET

Bu tez çalışmasında otomotiv kontrolü ve mekatroniği alanında önemli çalışma konuları olan taşıt durum tahmini ve taşıt dinamiği kontrolü konuları ele alınmıştır.

Çalışmanın ilk ana konusu sanal sensör kullanılarak taşıt savrulma açısall hızının tahmin edilmesidir. Yapılan sanal sensör tasarımı, kinematik ve dinamik tahmin bölümlerinden oluşmaktadır.

Kinematik tahmin ABS'li taşıtlarda standart olarak bulunan tekerlek açısall hızı sensörlerinden elde edilen açısall hız bilgileri ve çeşitli taşıt parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tekerleklerde frenleme ve ani ivmelenme durumunda oluşan boyuna kayma da dikkate alınarak yeni bir kinematik tahmin algoritması geliştirilmiştir. Dinamik tahminde ise hıza bağlı kazancı değişen bir gözetleyici kullanılmıştır. Sanal sensör tasarımı standart manevralar kullanılarak benzetim ortamında, donanım içeren taşıt benzetimcisinde ve son olarak deneysel çalışmalarla sınanmış ve sonuçlar çalışmada gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci ana konusu taşıt yanal dinamiğinin kontrolü yani taşıt savrulma açısall hızının ve taşıt yana kayma açısının istenen değerde tutulmasıdır. Bu amaçla model tabanlı bir kontrolcü tasarlanmıştır. İstenen savrulma açısall hızı değerleri hıza bağlı tek izli taşıt modelinden elde edilmiş, istenen taşıt yana kayma açısı ise sıfır olarak alınmıştır.

Tasarlanan kontrolcü, üst ve alt kontrolcünden oluşmaktadır. Üst kontrolcü tasarımı, model öngörülü kontrol yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Üst kontrolcü, kablolu direksiyon sistemi yoluyla ön tekerlek dönüş açılarına ve fren sistemi yardımıyla tekerlek torklarına müdahalede bulunmaktadır. Alt kontrolcü, bir tekil frenleme algoritmasından oluşmaktadır. İstenen ve ölçülen savrulma açısall hızı değerleri alt kontrolcünde değerlendirilerek tekil frenleme yapılacak tekerlek belirlenmektedir. Kontrolcü tasarımı, doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli ve CarMaker taşıt modeli kullanılarak sınanmıştır ve sonuçlar çalışmada verilmiştir.

Tezin son bölümünde yukarıda bahsedilen iki ana konu birleştirilmiştir. Sanal sensörlü bir taşıtın yanal dinamiğinin kontrolü üzerinde durulmuştur. Burada amaç kontrol sisteminde kullanılması gereken savrulma açısall hızı değerlerinin sanal sensörden elde edilmesidir. Bu durumda kontrolcünün çalışması ve savrulma açısall hızı tahmini, CarMaker taşıt modeli kullanılarak benzetim ortamında test edilmiştir.

VEHICLE YAW RATE ESTIMATION USING VIRTUAL SENSOR AND VEHICLE LATERAL DYNAMICS CONTROL

SUMMARY

In this thesis, vehicle state estimation and vehicle dynamics control, which are the most important topics of automotive control and mechatronics, are discussed.

The first main topic of this thesis is vehicle yaw rate estimation using virtual sensor. This virtual sensor design consists of kinematic and dynamic estimation parts.

Kinematic estimation is performed using wheel speed data and some vehicle parameters. Wheel speed data are obtained from standard wheel speed sensors which are available in vehicles with ABS. A novel kinematic estimation algorithm is presented. This algorithm considers the slip of the tires during braking and sudden accelerating. In the dynamic estimation part of the virtual sensor, a velocity scheduled observer is used. Virtual sensor design is tested in the simulation environment, using vehicle simulator and lastly in the actual road testing. The obtained results are shown in this work.

The second main topic of this thesis is vehicle lateral dynamics control. Vehicle lateral dynamics control means keeping the vehicle yaw rate and the vehicle side slip in desired values. For that reason a model-based controller is designed. Desired yaw rate is obtained from the single track vehicle model and desired side slip angle is chosen as zero.

Designed controller consists of two parts, lower and upper controller. Upper controller is designed using model predictive control method. This upper controller changes front wheel steering angles via steer-by-wire system and also it interferes the wheel torques using vehicle braking system. Lower controller is an individual wheel braking algorithm. Lower controller determines the braking wheel using the desired and measured vehicle yaw rate. Designed controller is tested using the single track vehicle model and CarMaker vehicle model. Moreover, the results are shown in this thesis.

In the last part of the thesis, abovementioned two main topics are merged and lateral dynamics control of a virtual sensor equipped vehicle is examined. The purpose of this approach is to obtain the vehicle yaw rate values, which are required for control system, using designed virtual sensor. In this situation, the working of control system and the estimation of the vehicle yaw rate are tested together using CarMaker vehicle model in the simulation environment.

1. GİRİŞ

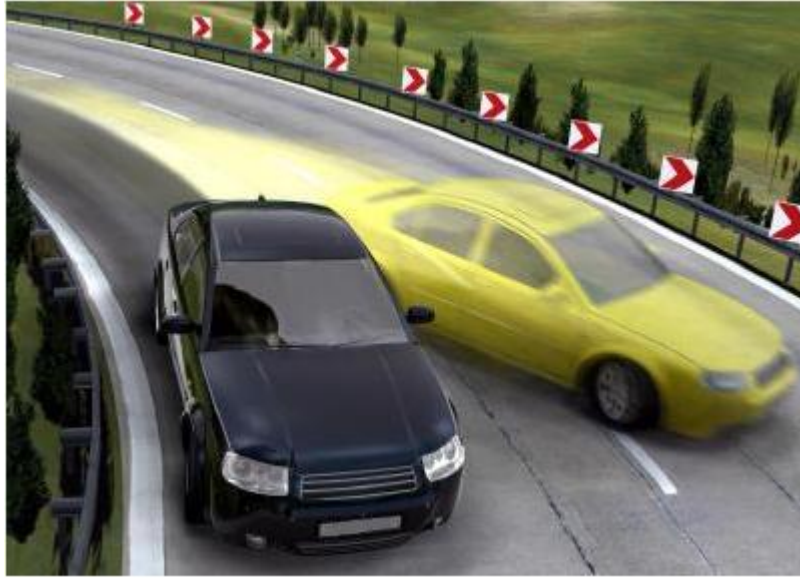
Bu bölümde önce tez çalışmasını belirleyen konular hakkında genel bilgiler verilmiştir. Konunun önemi, daha önce yapılan araştırmalar ortaya konarak belirtilmiştir. Bunun yanında bu konuda tez çalışması yapılmasıyla amaçlanan durumlar açıklanmıştır. Tez çalışmasında bahsi geçen konularla ilgili literatür araştırması sonuçları ilgili bölümlerde detaylı olarak verilmiştir. Son olarak tezin kapsamı kısmında, tezin içeriğini oluşturan bölümlerde nelerin anlatıldığı genel olarak verilmiştir.

1.1 Tezin Konusu ve Amacı

Yol taşıtlarında kullanılan aktif güvenlik sistemleri gün geçtikçe önemini artırmakta ve teknolojik gelişmelerle trafik kazalarında can kaybı ve yaralanmalarının azaltılmasında büyük önem taşımaktadır. Yapılan teorik çalışmalar, elektronik teknolojisindeki ilerlemelerle birleştirilerek pratikte çok iyi sonuçlar alınmaktadır. Taşıt aktif güvenlik sistemleri alanı hem akademik, hem de otomotiv firmalarının araştırma ve geliştirme bölümlerince detaylı olarak çalışılan aktif bir araştırma sahasıdır.

Aktif güvenlik sistemleri içerisinde yer alan, ticari olarak ESP, ESC, VDC, YSC gibi isimlerle anılan ve taşıtın kararlılığını sağlamaya ve korumaya yönelik olan sistemler konusunda son yıllarda büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Şekil 1.1’de Bosch firmasına ait ESP’li (elektronik kontrollü) bir taşıt ile böyle bir sistem kullanmayan (elektronik kontrolsüz) bir taşıtın viraj dönüşü sırasındaki davranışı şematik olarak gösterilmiştir [1].

ESP sistemi 1998 yılından itibaren seri üretim taşıtlarda kullanılmaya başlamıştır ve günümüzde otomobillerde kullanımı gittikçe artmaktadır. İsveç’te ESP’li taşıt kullanımı 2003 Mart ayında % 15 iken, bu oran 2004 Aralık ayında % 69’a çıkmıştır [2]. Bu sistemlerin ölümlü ve yaralanmalı kazaları önleme konusundaki başarısı pek çok çalışmayla kanıtlanmıştır.



Şekil 1.1 : Kontrollü ve kontrolsüz taşıt davranışı, [1].

Monash Üniversitesi Kaza Araştırma Merkezi tarafından ESP'nin kazaları önlemedeki rolü üzerine yapılan bir çalışmada, daha önce yapılan çalışmalarda dikkate alınarak ESP'nin kazaları önlemedeki etkisi gözler önüne serilmiştir [3]. Çizelge 1.1'de bu çalışmadan alınmış bir sonuç gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : ESP'nin kazaları önlemedeki rolü.

Kaza bölgesi, Yazar(lar), Tarih	Kaza tipi	Tahmini azalma (%)
Avrupa, Sferco ve diğ., 2001, [4].	Tüm yaralanmalı kazalar	18
	Tüm ölümlü kazalar	34
	Taşıt hakimiyeti kaybı kaynaklı	67
Almanya, Langwieder ve diğ., 2003, [5].	Tüm kazalar	20 – 25
	Taşıt savrulma (kayma) kaynaklı	42 – 60
Japonya, Aga ve Okada, 2003, [6].	Hafif kazalar	35
	Ağır kazalar	50
	Baştan çarpma kazaları	30
	Ağır baştan çarpma kazaları	40
Amerika, Farmer, 2004, [7].	Tüm tek taşıtlı kazalar	41
	Ölümcül tek taşıtlı kazalar	56
İsveç, Lie ve diğ., 2006, [2].	Ölümcül kazalar – ıslak yol	56.2
	Ölümcül kazalar – karlı veya buzlu yol	49.2

ESP kullanımı trafik kazalarının gerçekleşmesini önleyerek ekonomik olarak da büyük faydalar sağlamaktadır. Cologne Üniversitesi Ulaşım Ekonomisi Enstitüsünden Baum ve diğerlerinin 2007 yılında yaptığı çalışma sonuçlarına göre, hem can kaybı ve yaralanmalardan doğan işgücü kayıpları, hem de mal zararlarından doğan kayıplar dikkate alındığında, taşıtlarda ESP kullanılarak İngiltere’de yıllık yaklaşık 1.6 milyar Avro, Almanya’da yaklaşık 4.7 milyar Avro, İtalya’da yaklaşık 1.8 milyar Avro, İspanya’da yaklaşık 1.8 milyar Avro, Fransa’da yaklaşık 1.6 milyar Avro ve sonuç olarak 25 Avrupa Birliği ülkesinde toplam 16 milyar Avroluk ekonomik kayıp geri döndürülebilirdi [8].

Yukarıda sayılan başarılarından dolayı, 2012 yılından itibaren genel olarak ESP olarak adlandırılan sistemlerin otomobil firmaları tarafından piyasaya yeni sürülecek tüm taşıtlarda bulundurulması bir zorunluluk olacaktır. Otomobil firmaları bu durumu gözönüne alarak taşıt içerisindeki tüm parçalarda olduğu gibi bu sistemlerinde otomobillerdeki maliyetini düşürme konusunda isteklidirler.

Taşıt dinamiği kontrolcülerini, taşıttan çeşitli sensörler vasıtasıyla, savrulma açısız hızı tekerlek hızları gibi bilgileri toplamakta ve gelen bilgiler ışığında eyleyiciler vasıtasıyla kontrol algoritmalarını uygulamaktadırlar. Savrulma açısız hızı bilgisi, taşıtta kullanılan taşıt dinamiği kontrolcüsü için bilinmesi gereken en önemli parametredir ve günümüz otomobillerinde MEMS formunda jiroskop benzeri bir sensörle ölçülmektedir.

Bu tez çalışması yukarıda önemi bahsedilen savrulma açısız hızı tahmini ve taşıt yanal dinamiğinin kontrolü ile ilgilidir. Çalışmada savrulma açısız hızı sensörü yerine, ortalama ABS’li bir taşıtta bulunan mevcut sensör bilgilerini kullanarak gerçekçi savrulma açısız hızı tahminleri gerçekleştirebilecek sanal sensör tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Böylece taşıt dinamiği kontrolcülerinin daha çok taşıtta, daha ekonomik olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bununla birlikte taşıt yanal dinamiği kontrolü için literatürde başka kontrol problemlerinin çözümünde sıkça kullanılan ancak taşıt kontrolüne uygulaması hemen hemen hiç yapılmamış model öngörölü kontrolcülerin (MPC) tasarlanarak, denenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu tasarlanan kontrolcü için bilinmesi gereken savrulma açısız hızının sanal sensörden elde edilmesi konusunun araştırılması hedeflenmiştir.

1.2 Tezin Kapsamı

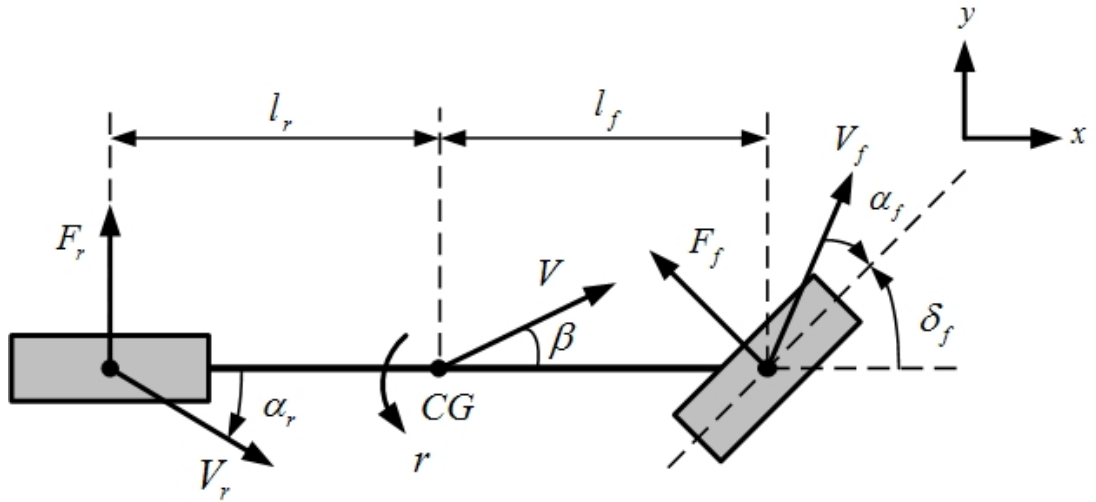
Bu tez çalışmasında taşıt savrulma açısal hızının sanal sensör kullanılarak tahmin edilmesi ve taşıt yanal dinamiğinin kontrolü konusu üzerinde durulmuştur. Tez çalışmasının birinci bölümünde tezin amacı, önceden bu konularda yapılmış çalışmalara genel bir bakış verilmiş ve tezin kapsamı belirtilmiştir. İkinci bölüm, çalışmada kullanılan taşıt modellerinin açıklanmasına ayrılmıştır. Önce tek izli taşıt modeli anlatılmıştır. Doğrusal olmayan tek izli taşıt modelinin elde edilişi ve doğrusal taşıt modelinin çıkarılışı anlatılmıştır. Daha sonra yüksek serbestlik dereceli ve güvenilirlikli taşıt modelleri içeren CarMaker programından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde sanal sensör tasarımı anlatılmıştır. Sanal sensörü oluşturan kinematik ve dinamik tahmin yöntemleri verilmiştir. Dördüncü bölümde sanal sensör tasarımında yapılan iyileştirmelerden bahsedilmiştir. Tekerleklerdeki boyuna kaymanın tahmin üzerindeki etkisi dikkate alınarak, geliştirilmiş kinematik tahminin elde edilişi anlatılmıştır. Yine bu bölümde kısaca dinamik tahminin iyileştirilmesi hususunda hıza bağlı kazancı değişen gözetleyiciden bahsedilmiştir. Beşinci bölüm elde edilen sonuçlara ve sonuçların elde edilme yöntemlerine ayrılmıştır. Önce benzetim çalışmasının yöntemi ve donanım içeren taşıt benzetimcisi anlatılmıştır. Daha sonra sırasıyla bilgisayar ortamında, donanım içeren taşıt benzetimcisi ortamında elde edilen sonuçlar verilmiş ve son olarak da deneysel sonuçlar gösterilmiştir. Altıncı bölüm taşıt yanal dinamiği kontrolü başlığı altında verilmiştir. Önce bu konuda literatürde yer alan önceki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra tez çalışmasında kullanılan kontrol stratejisi anlatılmış, üst kontrolcü ve alt kontrolcü tasarımına değinilmiştir. Yedinci bölümde kontrolcü tasarımı doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli ve CarMaker taşıt modeli kullanılarak sınanmıştır. Sekizinci bölümde sanal sensör içeren taşıtın yanal dinamiğinin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sanal sensörün taşıt modeline eklenmesi ve CarMaker taşıt modeli kullanılarak yapılan benzetim sonuçları verilmiştir. Dokuzuncu bölümde tez çalışması sonuçlar ve yorumlar bölümüyle tamamlanmıştır.

2. KULLANILAN TAŞIT MODELLERİ

Sanal sensör tasarımı ve taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü tasarımı gerçekleştirilmeden önce, bu bölümde bu çalışmada kullanılan taşıt modellerinden kısaca bahsedilmiştir. Sanal sensör tasarımının dinamik bölümünde ve taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü tasarımında tek izli taşıt modeli kullanılmıştır. Yüksek serbestlik dereceli ve yüksek güvenilirlikli CarMaker taşıt modeli ise tasarlanan sanal sensörün ve kontrolcünün sınanmasında kullanılmıştır.

2.1 Tek İzli Taşıt Modeli

Tek izli taşıt modeli ilk olarak 1940 yılında Rieker ve Schunk tarafından kullanılmıştır [9]. Literatürde bu model için bisiklet modeli ifadesi de kullanılmaktadır. Genel olarak tek izli taşıt modeli, ön ve arka tekerleklerin araç eksenine boyunca birer tekerlekle ifade edilecek şekilde indirgenmesiyle elde edilmektedir. Şekil 2.1’de tek izli taşıt modelinin kinematik diyagramı, Çizelge 2.1’de ise bu modele ait temel parametreler görülmektedir.



Şekil 2.1 : Tek izli taşıt modelinin kinematik diyagramı.

Çizelge 2.1 : Taşıt modeline ait temel parametreler.

Sembol	Tanım	Birim
r	Savrulma açısal hızı	rad/s
β	Şasi (taşıt) yana kayma açısı	rad
V	Ağırlık merkezindeki taşıt hızı	m/s
μ	Tekerlek – yol sürtünme katsayısı	-
$\alpha_f (\alpha_r)$	Ön (arka) tekerlek yana kayma açısı	rad
δ_f	Ön tekerleklerdeki dönüş açısı	rad
$c_{fo} (c_{ro})$	Ön (arka) tekerleklerdeki nominal dönüş sertliği	N/rad
m	Taşıt kütlesi	m
J	z eksenine göre taşıtın atalet momenti	Nm
$l_f (l_r)$	Ön (arka) aks – ağırlık merkezi mesafesi	m
$l_{wF} (l_{wR})$	Ön (arka) iz genişliği	m
R	Dinamik tekerlek yarıçapı	m

Taşıtın dönme hareketi (x eksenini etrafındaki açısal dönmesi), yunuslama hareketi (y eksenini etrafındaki açısal dönmesi) ve tekerleklerle boylamsal yönde etki eden kuvvetlerin sıfır olduğu modelde varsayılmaktadır [10]. Tek izli taşıt modeli 0.3 – 0.4 g yanal ivme değerlerine kadar yanal taşıt dinamiğini oldukça iyi yansıtmaktadır. Bu durum sanal sensör tasarımında ve taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü tasarımında oldukça faydalı olmuştur.

Tek izli taşıt modeli oluşturulurken tekerleklerde oluşan yanal kuvvetler tekerlek yana kayma açılarıyla doğru orantılı değişecek şekilde modellenmiştir. Tekerleklerdeki yanal kuvvet ifadeleri (2.1) ve (2.2) nolu denklemlerindeki gibi yazılabilir:

$$F_f = c_{fo} \mu \alpha_f \quad (2.1)$$

$$F_r = c_{ro} \mu \alpha_r \quad (2.2)$$

Burada c_{fo} ön tekerlekteki nominal dönüş sertliğini, c_{ro} arka tekerlekteki nominal dönüş sertliğini, μ tekerlek – yol sürtünme katsayısını göstermektedir.

Tek izli taşıt modeline ait boylamsal hareket, yanal hareket ve savrulma hareketi denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F_x = m \left[\dot{V} \cos \beta - V (\dot{\beta} + \dot{\psi}) \sin \beta \right] \quad (2.3)$$

$$F_y = m \left[\dot{V} \sin \beta - V (\dot{\beta} + \dot{\psi}) \cos \beta \right] \quad (2.4)$$

$$M_z = J \ddot{\psi} \quad (2.5)$$

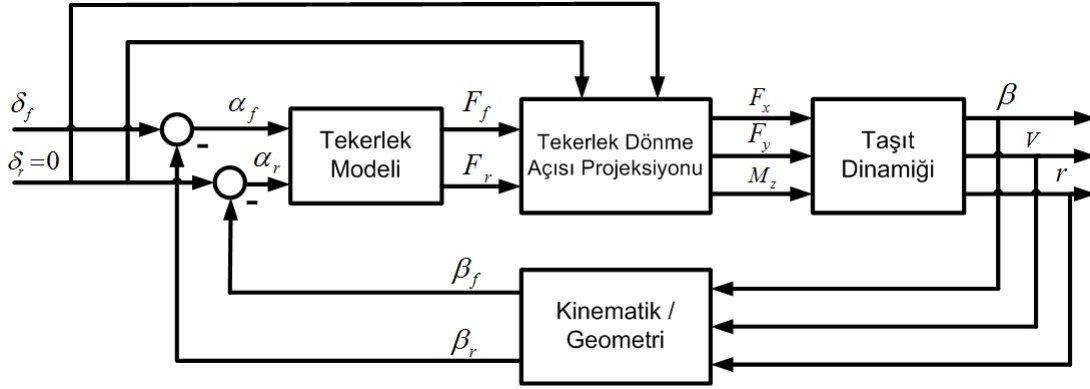
(2.3), (2.4) ve (2.5) nolu denklemler düzenlenip matris halinde yazılırsa (2.6)'da gösterilen matris eşitliği elde edilir.

$$\begin{bmatrix} -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + \dot{\psi}) \\ m\dot{V} \\ J\ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sinüs ve kosinüs terimleri içeren matrisin tersi, kendine eşit olduğu için (2.6) nolu matris denklemi taşıt dinamiğini ifade etmek üzere (2.7)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + \dot{\psi}) \\ m\dot{V} \\ J\ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Genel olarak doğrusal olmayan tek izli taşıt modeline ait blok diyagramı Şekil 2.2'deki gibidir. Bu blok diyagramındaki bölümler ve bu bölümde gösterilmeyen denklemler Ek A'da verilmiştir.



Şekil 2.2 : Doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli blok diyagramı, [10].

Doğrusal olmayan modelden doğrusal modele geçerken gözönüne alınan varsayımlar şunlardır:

Varsayım 1: Taşıt yana kayma açısının küçük değerler olduğu varsayılmıştır.

Varsayım 2: Taşıt hızının türevi sıfırdır. Bunun anlamı taşıt ağırlık merkezinin hızının genliğinin sabit olduğu ancak hız vektörünün yönünün değişebileceğidir.

Varsayım 3: Tekerlek dönme açılarının küçük değerlere sahip olduğu varsayılmıştır.

Varsayım 4: Ön ve arka şasi yana kayma açılarının küçük değerlere sahip olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlar altında yapılan işlemler Ek A'da verilmiştir. Sonuç olarak doğrusallaştırılmış tek izli taşıt modeline ait aşağıdaki durum uzay modeli aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

burada

$$a_{11} = -(c_{ro} + c_{fo})\mu/mV \quad a_{12} = -1 + (c_{ro}l_r - c_{fo}l_f)\mu/mV^2$$

$$a_{21} = (c_{ro}l_r - c_{fo}l_f)\mu/J \quad a_{22} = -(c_{ro}l_r^2 + c_{fo}l_f^2)\mu/JV$$

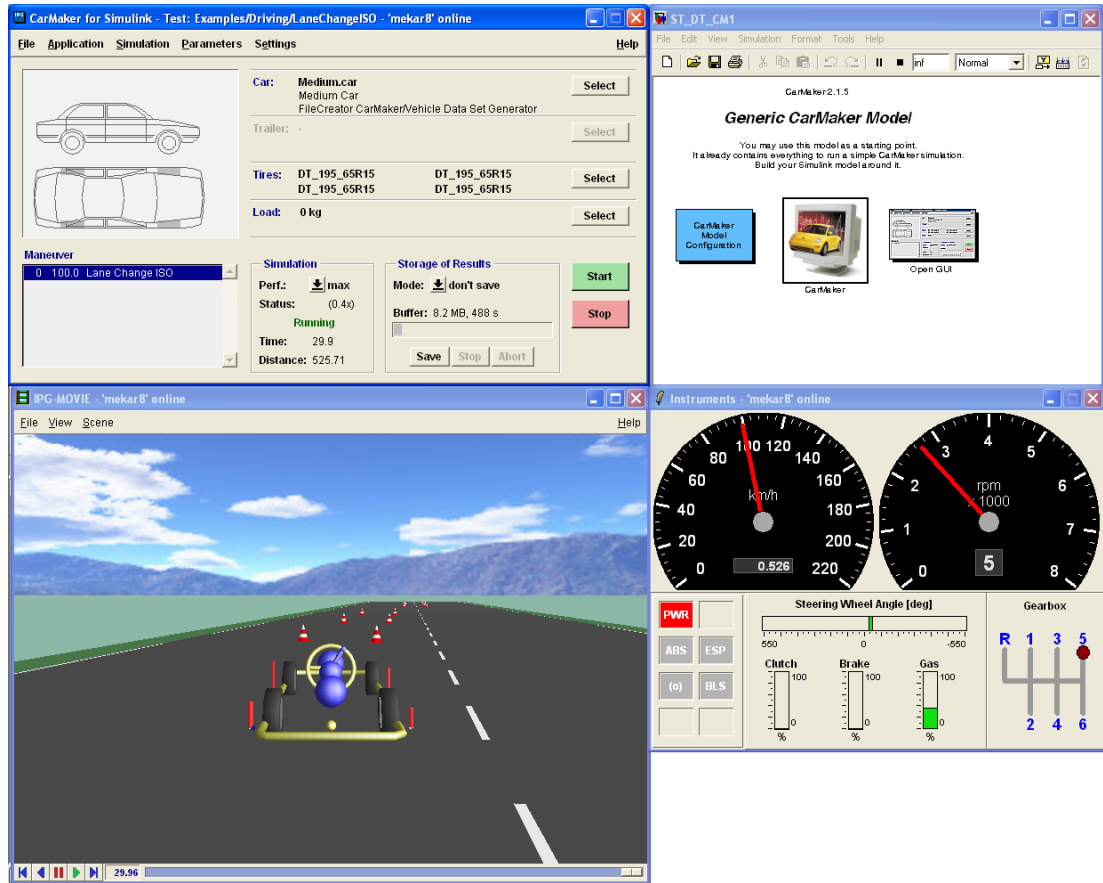
$$b_{11} = c_{fo}\mu/mV \quad b_{12} = c_{ro}\mu/mV$$

$$b_{21} = c_{fo}l_f\mu/J \quad b_{22} = -c_{ro}l_r\mu/J$$

göstermektedir.

2.2 CarMaker Taşıt Modeli

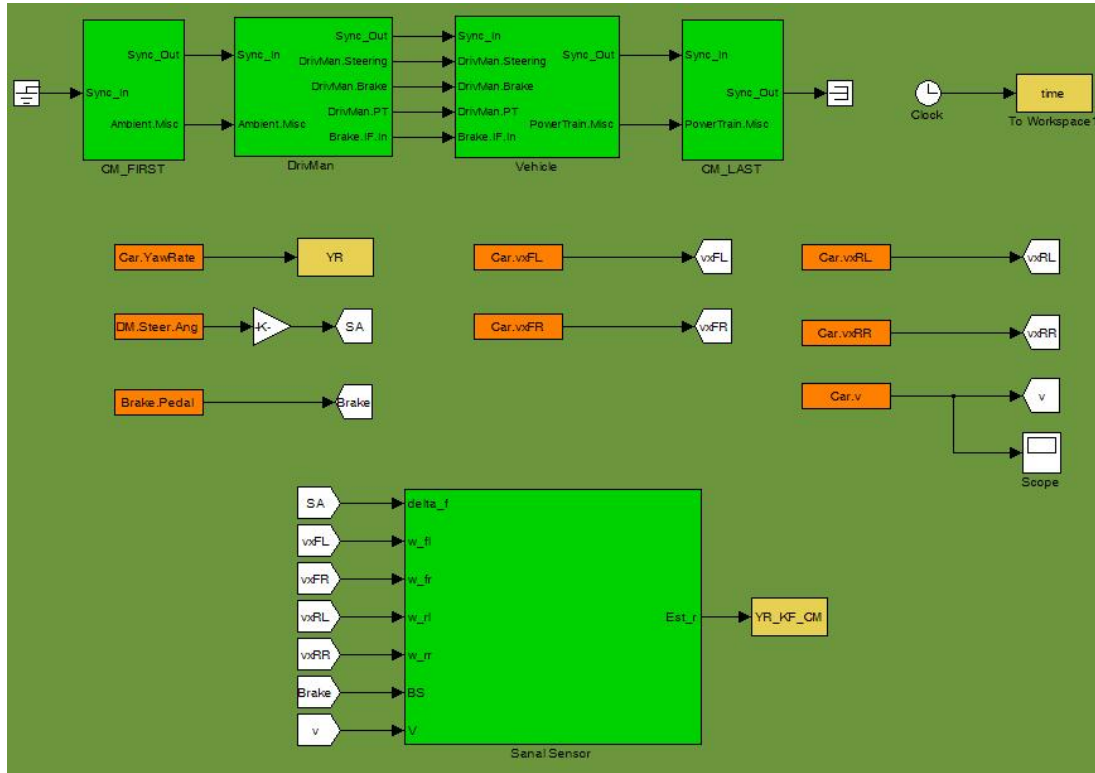
CarMaker programı, yüksek serbestlik dereceli, yüksek güvenilirlikli ve gerçekçi taşıt modelleri içeren ticari bir yazılımdır. CarMaker programı, içerdiği gerçekçi taşıt modelleri sayesinde pekçok ticari firma, üniversite ve araştırma merkezi tarafından kullanılmaktadır. CarMaker taşıt modelleri, basit motor dinamiği, tekerlek dinamiği, direksiyon sistemi dinamiği, boyuna ve yanal taşıt dinamiği modelleri içermektedir. Ayrıca programda bir sürücü modeli, çeşitli yol ve çevre modelleri bulunmaktadır [11]. Şekil 2.3'te CarMaker programı kullanıcı arayüzü görülmektedir.



Şekil 2.3 : CarMaker programı kullanıcı arayüzü.

CarMaker programı, Matlab/Simulink tabanlı çalışan bir programdır. Programa ait modeller Simulink blokları kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece kullanıcı kendi tasarımı olan kontrolcüler, tahminçileri ve gözetleyicileri yüksek gerçeklikteki CarMaker modellerinde, gerçek taşıt testlerinden önce deneyebilmektedir. Şekil 2.4'te CarMaker taşıt modellerine ait bloklar ve sonradan kullanıcı tarafından eklenen Simulink blokları görülmektedir.

CarMaker programında çeşitli markalardan araçlara ait hazır taşıt parametreleri olduğu gibi, program yardımıyla yeni taşıtlarda oluşturulabilmektedir. Sanal sensör tasarımında deneysel verilerle uyumun sağlanması için deneylerin yapıldığı taşıta ait parametreler sisteme girilerek deneysel taşıt bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Çalışmadaki donanım içeren benzetimlerde ise CarMaker/HIL programı kullanılmıştır. Bu CarMaker versiyonu sayesinde taşıt modelleri gerçek zamanlı olarak dışarıdan donanım ve insan müdahalesine uygun bir şekilde çalıştırılmıştır. CarMaker/HIL ile dSpace sistemleri uyumlu halde çalıştırılarak taşıt simülatorü oluşturulmuştur, gerçek zamanlı donanım içeren benzetimler yapılmıştır. Bu konuyla ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.



Şekil 2.4 : CarMaker programı Simulink blokları ve kullanıcının eklediği bloklar

CarMaker programı iki ana bölümden oluşmaktadır, birinci bölüm sanal taşıt ortamı, ikinci bölüm ise CarMaker arayüz araç kutusudur. Sanal taşıt ortamı, sanal taşıt, yol ve sürücü birimlerinden oluşmaktadır.

Sanal taşıt, taşıtın hareket denklemlerini ve kinematikğini belirten matematiksel modelleri içermektedir. Bu matematiksel model seçilen taşıtla ilgili parametreler kullanılarak parametrik halde çalıştırılmaktadır. Sanal taşıt, aktarma organları, tekerlekler, taşıt şasisi, frenler gibi tüm alt bölümleri içermektedir. Sanal taşıt ortamı bölümünün sanal yol kısmı ise ya CarMaker’da hazır olarak bulunan yol segmentleri yada gerçek bir yoldan alınan veriler kullanılarak iki şekilde oluşturulabilir.

Sanal sürücü ise gerçek sürücü davranışlarını simüle eden bilgisayar tabanlı bir sürücüdür. CarMaker’da sanal sürücü birimi iki farklı yöntemle oluşturulmuştur, bu yöntemler temel kontrol metodu ve IPG Driver’dır.

Temel kontrol metodunda, benzetim süresine göre sürücü davranışları önceden sisteme girilmektedir. IPG Driver ise pist özelliklerine, taşıt hareketlerine ve izlenmesi istenen yola göre direksiyon açısı ve torkunu, pedal pozisyonlarını, vites seçimlerini yapabilecek şekilde tasarlanmış, gerçek sürücü davranışlarını simüle eden oldukça etkili ve kullanışlı bir sürücü modelidir. Program içinde IPG Driver modülüne taşıtın izlemesi gereken yol, istenen hız, taşıt durumları (boyuna ve yanıl ivme değerleri vb.) girmekte ve bu sürücü modelinden ihtiyaç duyulan pedal pozisyonları, vites seçimi, direksiyon açısı ve torku gibi bilgiler alınmaktadır.

CarMaker programının ikinci ana bölümü ise CarMaker arayüz araç kutusudur. Bu arayüzle benzetimler başlatılıp durdurulabilir, benzetime ait parametreler değiştirilebilir, çeşitli test manevraları seçilebilir, benzetime ait animasyonlar izlenebilir ve taşıta ait çeşitli parametrelerin değişimi benzetim sırasında gerçek zamanlı olarak görülebilir [11].

3. SANAL SENSÖR TASARIMI

3.1 Giriş

Bir yol taşıtının yanal kararlılığını, yanal ivmelenmenin yüksek olduğu uç manevralarda, yol durumunun kötü olduğu şartlarda (buzlu, yağmurlu yol koşullarında), ani rüzgarın olduğu durumlarda, ani tekerlek basınç kaybının olduğu durumlarda vb. koruyabilmesi, taşıt içerisinde yolculuk eden insanların güvenliği açısından çok önemlidir. Son yıllarda otomotiv endüstrisinde aktif güvenlik sistemlerinin kullanımı artmış, taşıtların yanal kararlılığını elverişsiz koşullarda da sağlayabilecek savrulma dinamiği kontrolcülerini konusunda büyük gelişmeler yaşanmış ve bu kontrolcülerin taşıtlarda kullanım oranı çok artmıştır.

Birçok otomobil üreticisi firma bazı modellerinde bu kontrolcülerini kullanmıştır. Bahsedilen savrulma dinamiği kontrolcülerini ESP, ESC, VDC, YSC gibi farklı ticari isimlerle otomobillerdeki yerini almıştır. 2012 yılından itibaren otomobil üreticilerine piyasaya yeni çıkan taşıt modellerinde bahsi geçen savrulma dinamiği kontrolcülerinin zorunlu hale getirilmesiyle, firmalar özellikle maliyeti düşürme açısından araştırma geliştirme faaliyetlerine hız verilmiştir [12,13].

Savrulma açısai hızı, taşıtta kullanılan savrulma dinamiği kontrolcüsü tarafından bilinmesi gereken en önemli parametredir. Günümüz otomobillerinde savrulma açısai hızı bir sensörle ölçülmektedir.

Piyasada bulunan ESP'li taşıtlarda kullanılan ticari savrulma açısai hızı sensörleri, iki farklı tipte bulunmaktadır. Bunlar piezoelektrik savrulma açısai hızı sensörü ve mikroelektrik savrulma açısai hızı sensörüdür [14].

Günümüzde piezo-tabanlı sensörlere göre daha çok tercih edilen mikromekanik (MEMS tabanlı) savrulma açısai hızı sensörleri, içerdikleri mikromekanik jiroskoplarla ölçüm yapmaktadırlar.

Bosch firması tarafından piyasaya hem savrulma açısal hızını, hem de içerdği mikromekanik ivmeölçerlerle yanal ivme ölçebilen bütünleşik sensörler sunulmuştur. Ayrıca firma tarafından 2010 yılının ikinci çeyreğinden itibaren hem savrulma açısal hızı, hem yanal ivme, hem de boyuna ivme ölçebilen MEMS tabanlı bütünleşik bir sensörün müşterilere sunulacağı duyurulmuştur [15]. Şekil 3.1’de ticari bir savrulma açısal hızı sensörü görülmektedir [16]. Otomobil üreticileri açısından bu sensörün maliyetinin düşürülmesi ilgi çekici bir durumdur. [17,18].



Şekil 3.1 : Ticari savrulma açısal hızı sensörü, [16].

Bazı ölçülmesi güç ve pahalı olan taşıt değişkenlerinin tahmin edilmesiyle ilgili literatürde çeşitli çalışmalar vardır. Bu çalışmalar genel olarak taşıt hızının, taşıt şasi yana kayma açısının, tekerlek-yol sürtünme katsayısının ve savrulma açısal hızının tahmin edilmesiyle ilgilidir [19-23].

Genel olarak savrulma açısal hızı tahmini, ya taşıtın kinematik özellikleri kullanılarak [17,24], ya da savrulma açısal hızı sensörü kaldırılıp yerine konulan diğer sensör bilgilerinden yararlanılarak gözetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir [17,18,25,26]. Genellikle diğer sensör bilgisi olarak ivmeölçerlerden yararlanılmıştır. İvmeölçer kullanılan çözümlerde, ivmeölçerler taşıtın ağırlık merkezine göre boyuna veya yanal doğrultuda yerleştirilmiştir [17,18].

Sivashankar ve arkadaşları, taşıt yanal doğrultusunda taşıtın ağırlık merkezine göre sağda ve solda birer adet olmak üzere kullandıkları iki ivmeölçerle savrulma açısal hızını tahmin edip, bu tahmini bir Kalman filtresinden geçirerek bir çözüm yapmışlardır.

Bahsi geçen bütünleşik tahminin ilk bölümünü kinematik, ikinci bölümünü ise dinamik tahmin olarak adlandırmışlardır. Yaptıkları çalışmada iki ivmeölçer kullanılarak yapılan kinematik tahminde savrulma açısal hızının düşük olduğu durumlarda ivmeölçer (sensör) gürültüsünün baskın olduğunu ve hatalı tahmin yapıldığını, dinamik tahminde ise uç manevralarda tekerleğin doğrusal olmayan davranışı gibi nedenlerle tahmin hatasının arttığını bu yüzden bütünleşik bir çözüm önerdiklerini iddia etmişlerdir [17]. Bunun yanında tekerlek hız sensörleri ve ivmeölçer bilgisini birleştirerek savrulma açısal hızı tahmini yapılan bir çalışmada bulunmaktadır [26].

Gözetleyici kullanılarak yapılan savrulma açısal hızı tahmini çalışmalarında çok çeşitli gözetleyiciler kullanılmıştır, bunlar Luenberger gözetleyicisi, Kalman filtresi, geliştirilmiş (extended) Kalman filtresi, kayan ufuklu gözetleyici (moving horizon observer), kayan kipli gözetleyici (sliding mode observer) olarak sayılabilir [17,18,25,27,28].

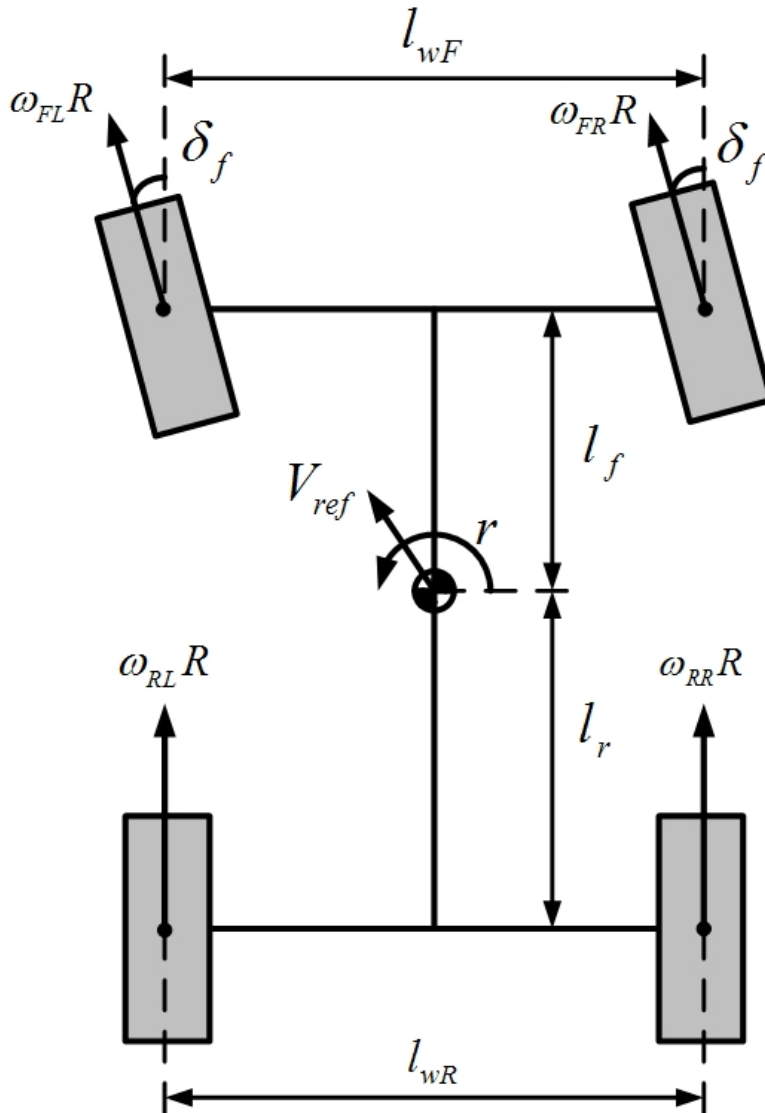
Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak tekerlek hız bilgilerini temel alan kinematik tahmin ve taşıt dinamiğini ele alarak elde edilen dinamik tahmin yöntemleri birleştirilerek, savrulma açısal hızının tahmini için sanal sensör oluşturulmuştur. Sanal sensörü oluşturan kinematik tahmin ve dinamik tahmin bölümlerinin ayrıntılı açıklaması ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

3.2 Kinematik Tahmin

Günümüzde hemen hemen tüm taşıtlarda ABS sistemi bulunmaktadır. ABS, ani frenlemelerde tekerleklerin kilitlenmesini önleyerek, sürücü tarafından taşıtın sürülebilir (kontrol edilebilir) halde kalmasını sağlayan önemli bir sistemdir. ABS sistemi için önemli bir veri tekerlek hızlarıdır. Tekerlek hızlarına bakılarak tekerleklerdeki frenleme basıncı ABS ile ayarlanmakta ve ani frenlemelerde tekerleklerin kilitlenmesi önlenmektedir [29].

Bu çalışmada, ABS sisteminin yaygınlığı düşünülerek taşıta yeni bir sensör eklenmeden taşıt savrulma açısal hızının tahmin edilmesine çalışılmıştır. Bu çözüm daha önce yapılan taşıta ivmeölçer ekleyerek taşıt savrulma açısal hızının tahmin edilmesine göre oldukça ekonomik ve pratiktir.

Savrulma açısal hızı teorik olarak tekerlek hızlarından, tekerlek dönüş açılarından ve taşıta ait dinamik tekerlek yarıçapı, taşıt ön ve arka aksına ait iz genişlikleri gibi bilgilerden tahmin edilebilir. Şekil 3.2’de görülen taşıt için arka tekerleklerden (3.1) nolu denklem ve ön tekerleklerden ise (3.2) nolu denklem kullanılarak tahmin yapılabilir. Ön tekerleklerden tahminde ön tekerleklerin dönüş açısı bilgisine ihtiyaç vardır, ancak bu bilgi ABS’li taşıtlarda mevcut bulunan direksiyon dönüş açısını okuyan sensör yardımıyla tespit edilebilir. Ön tekerleklerin dönüş açısı da, direksiyon dönüş açısının direksiyon – tekerlek aktarma organı çevrim oranına bölünmesiyle elde edilebilir.



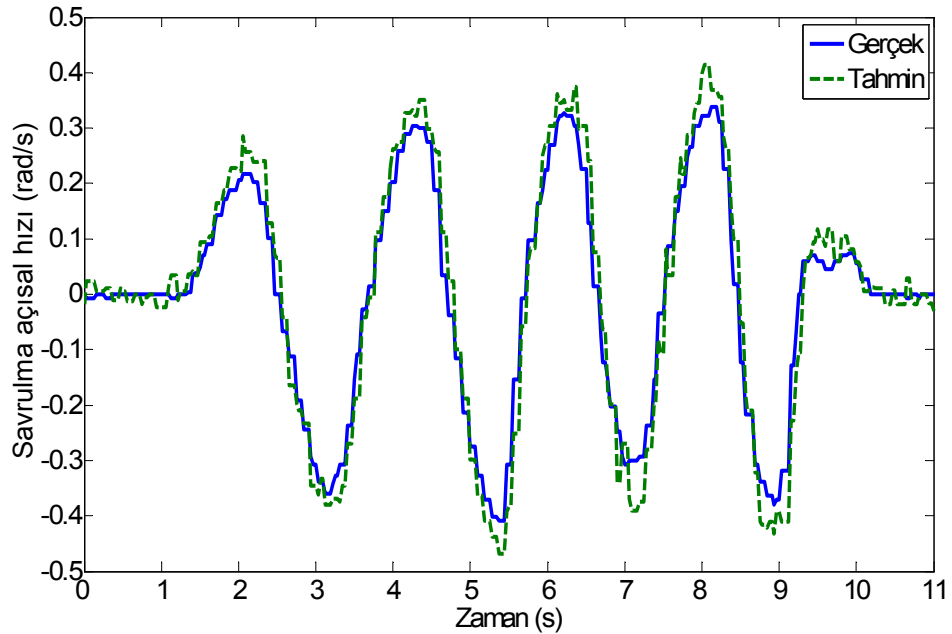
Şekil 3.2 : Kinematik tahmin için taşıt şematik görünüşü.

$$r = \frac{\omega_{RR}R - \omega_{RL}R}{l_{wR}} \quad (3.1)$$

$$r = \frac{\omega_{FR}R - \omega_{FL}R}{l_{wF} \cos \delta_f} \quad (3.2)$$

Burada ω_{FL} , ω_{FR} , ω_{RL} , ω_{RR} sırasıyla ön sol tekerlek açısai hızını, ön sağ tekerlek açısai hızını, arka sol tekerlek açısai hızını ve arka sağ tekerlek açısai hızını göstermektedir. l_{wF} ve l_{wR} ön ve arka taşıt iz genişliklerini göstermektedir.

Yapılan gerçek test çalışmaları ve daha önce ivmeölçerler kullanılarak yapılan çalışma sonuçları [17] dikkate alındığında, sadece ABS tekerlek hız sensörleri kullanılarak yapılan savrulma açısai hızı tahminin pek başarılı olmadığı görülmüştür. Tekerlek hız sensör bilgileri oldukça gürültülü, bunun sonucunda yapılan tahminlerde tatmin edici değildir. Şekil 3.3'te Güvenli Sürüş (DriveSafe) [30] projesi kapsamında kullanılan Renault Megane Uyanık deneysel aracı kullanılarak arka tekerleklerden sadece kinematik tahmin ile elde edilmiş bir slalom testi sonucu gösterilmiştir. Tek başına kinematik tahmin sonucu yeterli görülmemektedir.



Şekil 3.3 : Arka tekerleklerden kinematik tahmin ile elde edilmiş tahmin sonucu.

3.3 Dinamik Tahmin

Kinematik tahmin ile elde edilmiş savrulma açısal hızı, taşıt savrulma dinamiği kontrol sistemlerinde kullanılacak yeterlilikte değildir. Bu yüzden hem kinematik olarak elde edilen tahmini filtrelemek, hem de taşıt dinamiğinin tahmine olan etkisini hesaplamaların içine katmak için, bu çalışmada dinamik tahmin gerçekleştirilmiştir. Dinamik tahminde pek çok gözetleyici kullanılabilir. Bu çalışmada Luenberger gözetleyicisi ve Kalman filtresi ayrı ayrı kullanılmıştır.

3.3.1 Luenberger gözetleyicisi

Bir sistemi oluşturan durumlar, genellikle sensörlerle ölçülerek bilinebilir hale getirilip sistemin durum geri beslemeli kontrolünde bir bilgi olarak kullanılırlar. Fakat bazen sensörlerin kullanımı maliyet açısından elverişli olmayabilir, bazı durumlarda o ölçümü sağlayacak bir sensör bulunmayabilir. Bu gibi durumlarda ölçülemeyen durum değişkenlerinin tahmin edilmesi gerekir. İşte bu ölçülemeyen durum değişkenlerinin, ölçülebilir durum değişkenleri ve sistemin ölçülebilir çıkışları kullanılarak tahmin edilmesine durum gözetleme (state observation) ve bu işlem için kullanılan araçlara da durum gözetleyicisi veya kısaca gözetleyici (observer) denir. En bilinen ve en sık kullanılan gözetleyici Luenberger gözetleyicisidir [31,32].

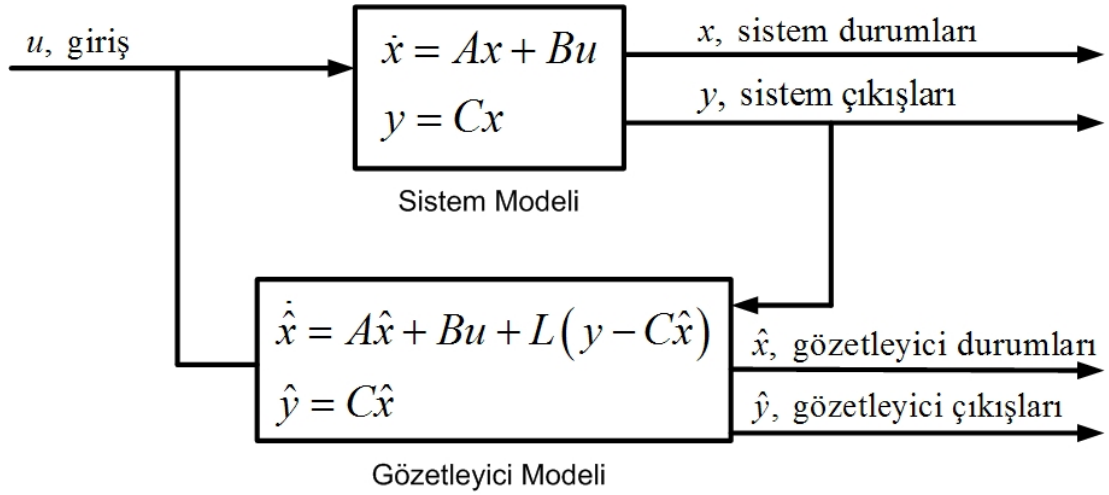
Bu çalışmadaki problem savrulma açısal hızının tahminini içermektedir. Tek izli taşıt modelinin durum uzay modeli ve kinematik tahminle bulunan savrulma açısal hızı kullanılarak, savrulma açısal hızı gözetleyici kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu tahmin bölümü dinamik tahmin olarak adlandırılmıştır.

Gözetleyiciye ait durum uzay modeli denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (3.4)$$

$$y = C\hat{x} + v \quad (3.5)$$

Burada $\hat{x}$ tahmin edilen durumları, u girişleri, y çıkışları, L gözetleyici kazanç matrisini, v ölçüm gürültüsünü göstermektedir. Sisteme ve gözetleyici ait blok diyagramı Şekil 3.4'te görülebilir.



Şekil 3.4 : Sisteme ve gözetleyiciye ait blok diyagramı.

Gözetleyici kazanç matrisi L bulunurken, gözetleyicinin kutupları sistem kutuplarından en az 5 kat hızlı olacak şekilde sistem kutuplarının solunda seçilmiş böylece gözetleyicinin tahmin hatasının çabukça sıfıra yakınsaması ve gözetleyicinin sistem cevabı üzerindeki etkisinin en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bu durumda sistemin kutuplarının, sistem cevabı üzerindeki baskın etkisi korunmuştur. Çalışmada, gözetleyici kazanç matrisi L , Matlab programında bulunan Ackermann kutup atama yöntemini kullanan “acker” komutu kullanılarak hesaplanmıştır.

Bir sistem için gözetleyici tasarlanabilmesi için o sistemin gözetlenebilir olması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarla taşıt modelinde değişen tüm hız ve tekerlek yol sürtünme katsayıları için sistem tam gözetlenebilir bulunmuştur.

Sanal sensör tasarımında yapılan ilk geliştirme çalışmalarda Luenberger gözetleyicisi kullanılmış, daha sonra daha gelişmiş (optimal) bir gözetleyici olan Kalman filtresi tüm çalışma boyunca sanal sensörün dinamik tahmin bölümü için kullanılmıştır.

3.3.2 Kalman filtresi

Kalman filtresi, ele alınan bir sistemin modelini kullanarak, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin hatasının karesinin ortalamasını minimize edecek şekilde belirlemeye yarayan bunun yanında ölçüm gürültüsünü filtreleyen optimal bir gözetleyici çeşididir [33,34]. 1960 yılında, Rudolf Emil Kalman veri filtreleme problemine getirdiği tekrarlamalı çözümleri içeren makalesini yayınlamış ve günümüze kadar pek çok gelişmeyle gelen Kalman filtresini bilim dünyasına armağan etmiştir. Kalman filtresi ilk olarak NASA'nın Apollo projesinde uzay aracının yörüngesinin tahmini ve kontrolü için kullanılmıştır [34].

Genel olarak Kalman filtresi algoritması iki aşamadan oluşmaktadır; bunlar tahmin ve düzeltme aşamalarıdır. İlk aşamada sistemin dinamik modeli kullanılarak ölçülemeyen durumlar tahmin edilmektedir ve hata kovaryansı hesaplanmaktadır. İkinci aşamada ise Kalman filtresi kazancı hesaplanmakta, yapılabilen sensör ölçümleri ile durumların tahminleri güncellenmekte ve hata kovaryansı yenilenerek tekrar birinci aşamaya geçilmektedir. Bu prosedür her zaman aralığında tekrarlanmaktadır.

Kalman filtresi ilk kez doğrusal problemler için ayrık formda kullanılmıştır, bu çalışmada ise sürekli Kalman filtresi kullanılmıştır. Bazı kaynaklarda bu gözetleyici Kalman – Bucy filtresi adıyla anılmaktadır [34,35].

Proses ve ölçüm gürültüsü olan sistemin ve Kalman filtresinin durum uzay modeli denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w \quad (3.6)$$

$$y = Cx + v \quad (3.7)$$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (3.8)$$

$$y = C\hat{x} + v \quad (3.9)$$

$$L = PC^T R^{-1} \quad (3.10)$$

Burada w sistem (proses) gürültüsünü ve v ölçüm (sensör) gürültüsünü göstermektedir. Sistem ve ölçüm gürültüsü sıfır ortalamalı beyaz gürültüdür ($E(w) = E(v) = 0$). (3.10) nolu denklemde belirtilen P cebirsel Riccati denkleminin çözümü ile bulunabilir. Cebirsel Riccati denklemi (3.11)’te gösterilmiştir.

$$PA^T + AP - PC^T R^{-1} CP + Q = \dot{P} \quad (3.11)$$

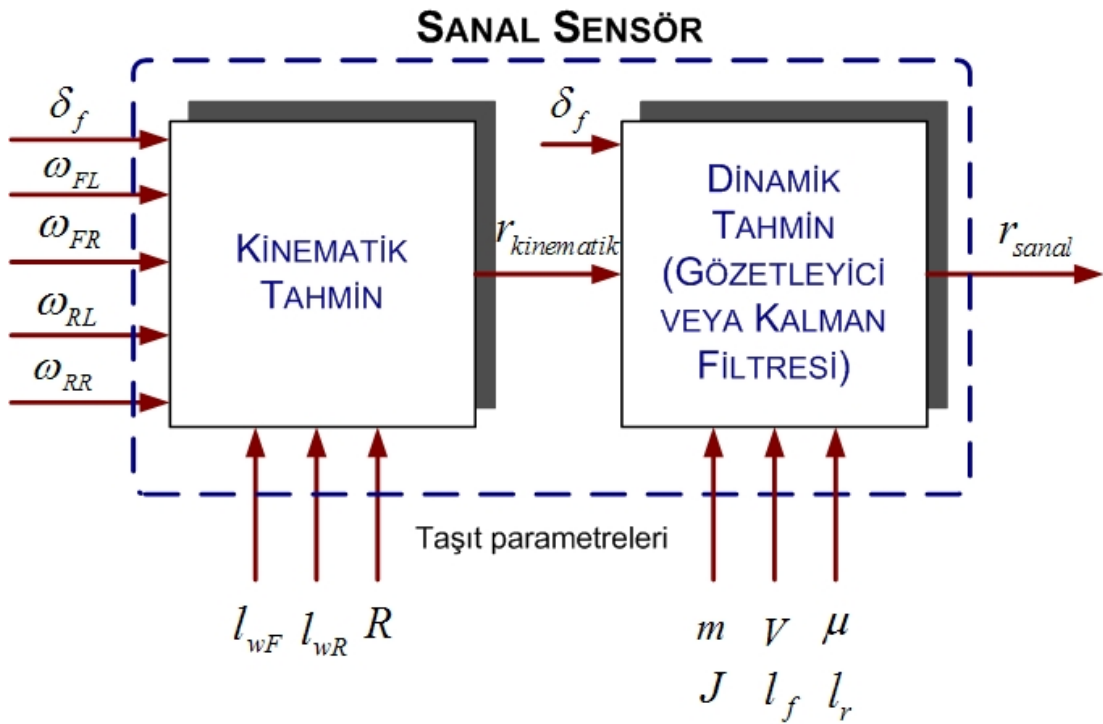
Q ve R sırasıyla sistem gürültü kovaryansını ve ölçüm gürültü kovaryansı göstermektedir. Q ve R kovaryans matrislerinin belirlenmesinde daha iyi tahmin ile daha iyi filtreleme özellikleri arasında bir mübadele (trade – off) bulunmaktadır. [36]’da belirtildiği gibi, gerçek zamanlı uygulamalarda Kalman filtresinin kazanç

matrisi, hatanın kovaryansını en küçükleyecek şekilde Q ve R matrisleri değiştirilerek çevrimdışı benzetimlerle ayarlanabilmektedir.

Kalman filtresinde, Luenberger gözetleyicisinden farklı olarak gözetleyicinin kutuplarının belirlenmesi yerine, Q ve R matrisleri belirlenerek gözetleyici kazancı bulunabilmektedir.

3.4 Sanal Sensör Yapısı

Kinematik tahmin ve dinamik tahmin bölümlerinin birleştirilmesinden oluşan sanal sensör, ABS tekerlek hız sensörlerinden ve direksiyon dönüş açısı sensöründen aldığı bilgileri ve bazı taşıt parametre değerlerini kullanarak savrulma açısal hızı tahmininde kullanılabilir. Sanal sensör, gerçek savrulma açısal hızı sensörü yerine çalışmasının haricinde, gerçek sensör ile paralel olarak çalıştırılarak hata bulgulamada da (fault diagnosis) kullanılabilir.



Şekil 3.5 : Sanal sensör genel yapısı.

Şekil 3.5'te sanal sensör genel yapısı gösterilmiştir. Arka tekerleklerden kinematik tahminde ω_{RL} ve ω_{RR} ile gösterilen tekerlek açısal hızları, tekerlek dinamik yarıçapı (R) ve taşıt iz genişlikleri (l_{wF} , l_{wR}) kullanılmaktadır. Kinematik tahmin bölümünde bahsedilen kinematik bağıntılar kullanılarak önce $r_{kinematik}$ yani kinematik olarak

belirlenen tahmini savrulma açısal hızı bulunmaktadır. Bu tahmin, taşıt dinamiği etkilerinin tahmine eklenmesi ve ABS tekerlek hız sensörlerinden kaynaklanan gürültünün filtrelenmesi için dinamik tahmin bölümüne girmektedir. Dinamik tahmin, tekerlek dönüş açıları (δ_f), taşıt kütlesi (m), taşıt hızı (V), tekerlek yol sürtünme katsayısı (μ), taşıtın z eksenindeki atalet momenti (J), taşıt ön ve arka aksının ağırlık merkezine uzaklığı (l_f, l_r) gibi taşıt parametrelerinin yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ön tekerleklerden yapılan tahminde tekerlek dönüş açılarına göre kinematik tahmin bölümünde bir değişiklik olmaktadır. Dinamik tahminde ise arka tekerleklerde olduğu gibi gerçekleştirilmektedir.

4. SANAL SENSÖR TASARIMINDA YAPILAN İYİLEŞTİRMELER

Bu bölümde önceki bölümde tanıtılan sanal sensör yapısından daha iyi savrulma açısal hızı tahminleri elde edilmesi için yapılan iyileştirmeler anlatılmıştır. Önce kinematik tahminde yapılan iyileştirmeler detaylı olarak incelenmiştir. Arka ve ön tekerleklerden savrulma açısal hızı tahmini tekerleklerin boyuna kayma durumu dikkate alınarak iyileştirilmiştir. Arka ve ön tekerlekler için iyileştirilmiş tahmin algoritması ve tekerleklerden gelen sinyallere göre hangi tekerleklerden tahminin yapılacağını (ön veya arka) belirten tekerlek seçim algoritması bu bölümde verilmiştir. Son olarak kısaca dinamik tahminde kullanılan gözetleyicilerin hıza bağlı kazancı değişen hale getirilerek tahminin iyileştirilmesi konusu üzerinde durulmuştur.

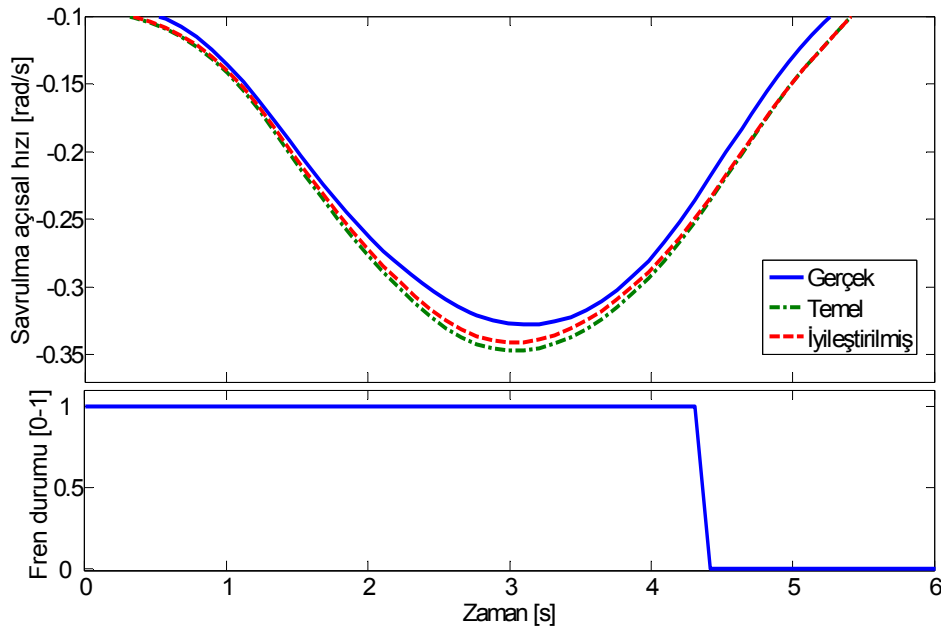
4.1 Kinematik Tahminde Yapılan İyileştirmeler

Üçüncü bölümde taşıt kinematik ve geometrik özelliklerinden yararlanılarak taşıt savrulma açısal hızının (3.1) nolu denklem ile arka tekerleklerden, (3.2) nolu denklem ile de ön tekerleklerden tahmin edilebileceği belirtilmişti.

Hem bu tez çalışması için yapılan benzetim ve deneysel çalışma sonuçları neticesinde, hem de daha önce Ghoneim ve diğerlerinin konuyla ilgili yaptıkları çalışmada, tekerlek hızı kullanılarak yapılan savrulma açısal hızı tahmininin tekerlekte oluşan boyuna kaymadan etkilendiği görülmüştür [24].

Ghoneim ve diğerlerinin yaptığı çalışma ve bunun sonucunda aldıkları patentte frenleme durumunda tekerlek boyuna kayma miktarını da içeren bir kinematik tahmin algoritması ortaya koymuşlardır [24]. Bu çalışmada ise hem frenleme, hem de ani ivmelenme (patinaj) durumunda tekerleklerdeki boyuna kaymayı kinematik tahmin algoritmasının içerisine yerleştiren yeni bir algoritma önerilmiştir.

Konuyla ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde verilmeden önce, Şekil 4.1’de arka tekerleklerden frenleme durumunda denklem (3.1) ile ifade edilen temel kinematik yöntem ile elde edilen savrulma açısal hızı tahmini ile önerilen iyileştirilmiş kinematik tahmin metodu ile yapılan tahmin karşılaştırılmıştır. Burada ticari sensör ile elde edilen taşıt savrulma açısal hızı, temel kinematik tahmin ile elde edilen sonuç ve iyileştirilmiş kinematik tahmin ile elde edilen sonuç bir arada görülmektedir. Deneysel sonuç daha önce bahsedilen Güvenli Sürüş projesi kapsamında kullanılan Renault Megane (Uyanık) taşıtı kullanılarak elde edilmiştir [30]. Savrulma açısal hızı değeri arttıkça (daha zorlu manevralarda) temel kinematik tahmin ile iyileştirilmiş kinematik tahmin arasındaki fark artmaktadır. Gerçek koşullarda tekerlek hızı sensörlerinden gelen veriler oldukça gürültülü olduğu için sadece kinematik tahmin yapılarak savrulma açısal hızı tahmini tatmin edici olmamaktadır. Şekil 4.1’de sadece kinematik tahmin kullanılarak karşılaştırma yapılabilmesi için tekerlek hızlarından bulunan temel ve iyileştirilmiş tahminler sıfır faz gecikmeli bir filtreden geçirilerek verilmiştir. Bu filtreler, filtreleme gerçekleştirirken gelecekte gelen veri noktalarını da kullandığı için gerçek zamanlı olarak kullanılamamaktadırlar. Bu yüzden sanal sensörün dinamik tahmin bölümünde Kalman filtresi kullanılmıştır.



Şekil 4.1 : Frenleme durumunda temel ve iyileştirilmiş tahmin karşılaştırılması.

Yapılan çalışmada önden çekişli bir taşıt ele alınmıştır. Bu yüzden arka tekerleklerdeki ani ivmelenme (patinaj) durumu söz konusu değildir. Ancak belirtilecek yöntemler arkadan itişli ve dört çeker taşıtlarda da küçük değişikliklerle kullanılabilir. Bundan sonraki alt bölümlerde önce arka tekerlekler için, sonra ön tekerlekler için tahmin denklemlerinin nasıl çıkartıldığı ve bu denklemlerin birleştirildiği algoritmalar anlatılmıştır.

4.1.1 Arka tekerleklerde iyileştirilmiş kinematik tahmin

Hem doğrusal, hem de doğrusal olmayan sürüş koşullarında arka tekerleklerden taşıt savrulma açısal hızı (4.1) nolu formül ile Şekil 3.2’de gösterilen taşıt için herhangi bir yaklaşım yapılmadan bulunabilir. Bu şekilde bulunulabilen savrulma açısal hızına gerçek savrulma açısal hızı denilip r_{ger} ile gösterilsin.

$$r_{ger} = \frac{V_{RR} - V_{RL}}{l_{wR}} \quad (4.1)$$

Ancak V_{RR} ve V_{RL} ile gösterilen tekerlek boyuna hızlarının direkt tespit edilmesi oldukça zordur. Bu yüzden belli bir yaklaşımla tahmini savrulma açısal hızı (4.2) nolu denklem ile bulunabilir.

$$r_{tah} = \frac{\omega_{RR}R - \omega_{RL}R}{l_{wR}} \quad (4.2)$$

Burada tekerlek boyuna hızları yerine direkt ölçülebilen tekerlek açısal hızları ile tekerlek yarıçapı çarpımı kullanılmıştır.

Taşıt arka tekerleklerinin boyuna hızları taşıt ağırlık merkezinin hızı kullanılarak tespit edilebilir. Taşıt ağırlık merkezindeki hıza referans hız (V_{ref}) denirse sırasıyla sağ arka ve sol arka tekerlek için tekerlek boyuna hızları (4.3) ve (4.4) nolu denklemlerdeki gibi yazılabilir [8].

$$V_{RR} = V_{ref} + (l_{wR} / 2) r_{ger} \quad (4.3)$$

$$V_{RL} = V_{ref} - (l_{wR} / 2) r_{ger} \quad (4.4)$$

Bu bilgiler ışığında arka tekerleklerden frenleme durumunda taşıt savrulma açısal hızı tahmininin yapılışı aşağıda verilmiştir.

Frenleme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı **(4.5)** nolu formülle verilir.

$$s_i = \frac{R\omega_i - V_i}{V_i}, \quad V > R\omega_i, \quad -1 < s < 0 \quad (4.5)$$

Yukarıda verilen frenleme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı tanımı ve **(4.2)** nolu r_{tah} 'i veren denklem kullanılarak,

$$r_{tah} = \frac{V_{RR}(1+s_{RR}) - V_{RL}(1+s_{RL})}{l_{wR}} = \frac{V_{RR} - V_{RL}}{l_{wR}} + \frac{V_{RR}s_{RR} - V_{RL}s_{RL}}{l_{wR}} \quad (4.6)$$

olarak yazılabilir.

(4.6) nolu denklemde eşitliğin sağındaki kesirli ilk ifade **(4.1)** nolu denklem ile gösterilen r_{ger} 'i ifade etmektedir. **(4.6)** nolu ifadenin düzenlenmiş hali aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$r_{ger} = r_{tah} - \left(\frac{V_{RR}s_{RR} - V_{RL}s_{RL}}{l_{wR}} \right) \quad (4.7)$$

V_{RR} ve V_{RL} ile ifade edilen arka tekerlek boyuna hızları yerine **(4.3)** ve **(4.4)** ile ifade edilen tanımlar kullanılarak **(4.7)**'de verilen ifade düzenlenirse,

$$r_{ger} = \frac{r_{tah} - \left[V_{ref} (s_{RR} - s_{RL}) / l_{wR} \right]}{1 + \left(\frac{s_{RR} + s_{RL}}{2} \right)} \quad (4.8)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade tahmin algoritmasında kullanılmak üzere,

$$r = \frac{r(t - \Delta t) - \left[V_{ref} (s_{RR} - s_{RL}) / l_{wR} \right]}{1 + \left(\frac{s_{RR} + s_{RL}}{2} \right)} \quad (4.9)$$

olarak yazılabilir. Burada t o anı, Δt hesaplama zamanlama aralığını, r tahmini savrulma açısal hızını ve $r(t - \Delta t)$ bir hesaplama zaman aralığı öncesindeki tahmini savrulma açısal hızını göstermektedir.

(4.5) nolu denklemde verilen frenleme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı, bununla birlikte (4.3) ve (4.4) nolu denklemler ile gösterilen tekerlek boyuna hızları kullanılarak, (4.9) nolu denklemde kullanılması gereken sağ arka ve sol arka tekerlek kayma miktarları,

$$s_{RR} = \frac{\omega_{RR} R - [V_{ref} + (l_{wR}/2) r(t - \Delta t)]}{V_{ref} + (l_{wR}/2) r(t - \Delta t)} \quad (4.10)$$

$$s_{RL} = \frac{\omega_{RL} R - [V_{ref} - (l_{wR}/2) r(t - \Delta t)]}{V_{ref} - (l_{wR}/2) r(t - \Delta t)} \quad (4.11)$$

olarak ifade edilir.

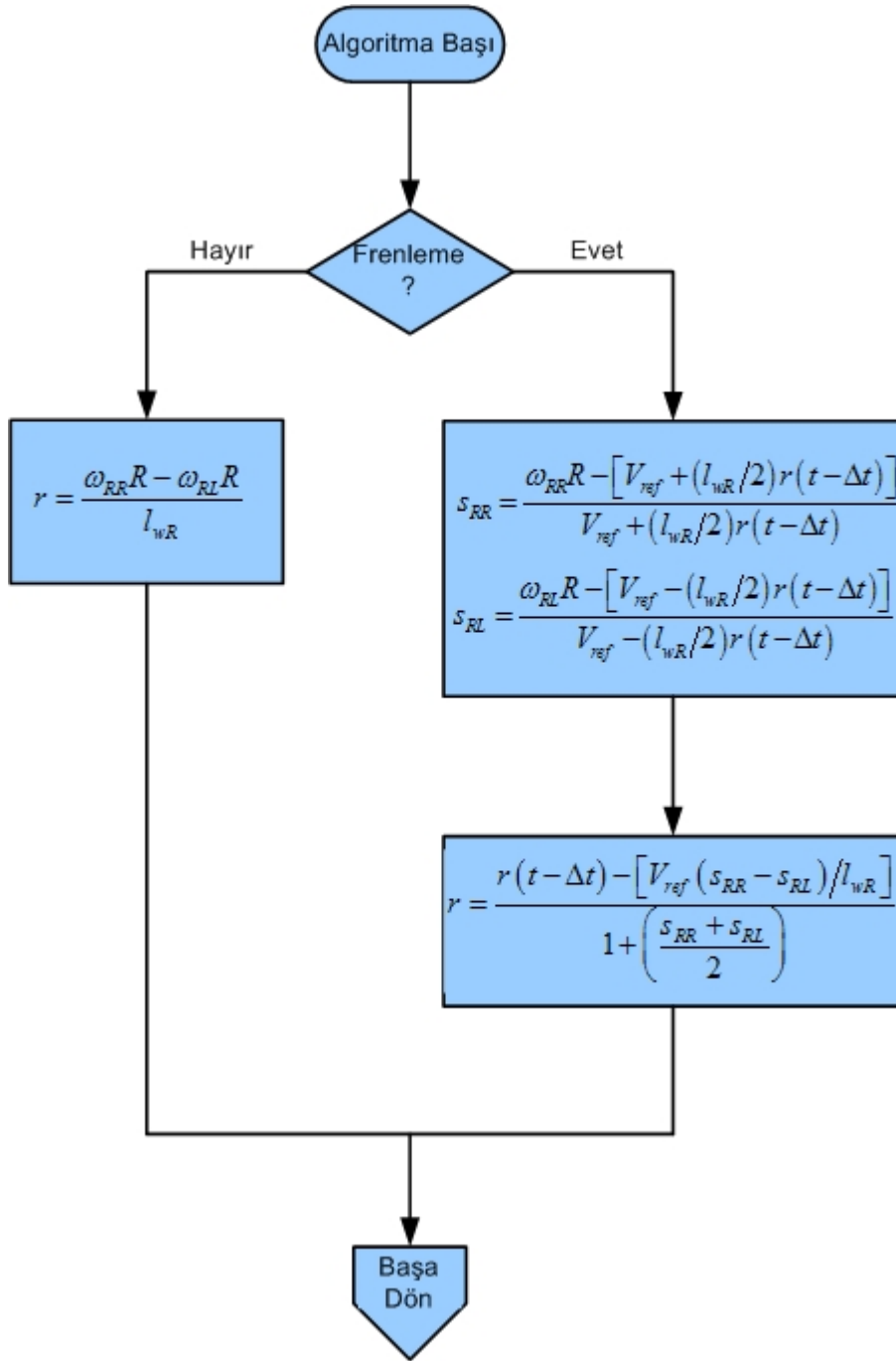
Şekil 4.2’de arka tekerleklerden iyileştirilmiş kinematik tahmin algoritması görülmektedir. Frenleme durumu dikkate alınarak denklemler arası geçiş yapılmaktadır.

4.1.2 Ön tekerleklerden iyileştirilmiş kinematik tahmin

Taşıt ön tekerleklerinden savrulma açısal hızı tahmininde önden çekişli taşıt gözönüne alındığından hem frenleme, hem de ani ivmelenme durumunda tekerlerde boyuna kayma olmaktadır. Bu durum gözönüne alınarak hem frenleme, hem de ani ivmelenme durumu için denklemler çıkarılmıştır.

Öncelikle hem doğrusal, hem de doğrusal olmayan sürüş koşullarında ön tekerleklerden taşıt savrulma açısal hızı (4.12) nolu denklem ile herhangi bir yaklaşım yapılmadan bulunabilir.

$$r_{ger} = \frac{V_{FR} - V_{FL}}{l_{wF} \cos \delta_f} \quad (4.12)$$



Şekil 4.2 : Arka tekerleklerden iyileştirilmiş kinematik tahmin algoritması.

Boyuna tekerlek hızlarının tespit zorluğundan, tekerlek açısal hızları ve dinamik tekerlek yarıçapı kullanılarak r_{tah} aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

$$r_{tah} = \frac{\omega_{FR}R - \omega_{FL}R}{l_{wF} \cos \delta_f} \quad (4.13)$$

V_{ref} , taşıt ağırlık merkezinin hızı olmak üzere, ön tekerlek boyuna hızları,

$$V_{FR} = V_{ref} + (l_{wF} / 2) \cos \delta_f \cdot r_{ger} \quad (4.14)$$

$$V_{FL} = V_{ref} - (l_{wF} / 2) \cos \delta_f \cdot r_{ger} \quad (4.15)$$

olarak ifade edilebilir.

(4.5) nolu denklemde verilen frenleme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı tanımı ve (4.13) nolu denklemde r_{tah} 'i veren denklem kullanılarak,

$$r_{tah} = \frac{V_{FR}(1 + s_{FR}) - V_{FL}(1 + s_{FL})}{l_{wF} \cos \delta_f} = \frac{V_{FR} - V_{FL}}{l_{wF} \cos \delta_f} + \frac{V_{FR}s_{FR} - V_{FL}s_{FL}}{l_{wF} \cos \delta_f} \quad (4.16)$$

olarak yazılabilir.

(4.16) nolu denklemde eşitliğin sağındaki kesirli ilk ifade (4.12) nolu denklemde ifade edilen r_{ger} 'e eşittir.

(4.16) nolu denklemin düzenlenmiş hali aşağıdaki gibidir.

$$r_{ger} = r_{tah} - \left(\frac{V_{FR}s_{FR} - V_{FL}s_{FL}}{l_{wF} \cos \delta_f} \right) \quad (4.17)$$

(4.14) ve (4.15) ile ifade edilen ön tekerlek boyuna kayma hızları kullanılarak (4.17)'deki ifade düzenlenirse,

$$r_{ger} = \frac{r_{tah} - [V_{ref}(s_{FR} - s_{FL})/l_{wF} \cos \delta_f]}{1 + \left(\frac{s_{FR} + s_{FL}}{2} \right)} \quad (4.18)$$

elde edilir.

Bu ifadenin tahmin algoritmalarında kullanılmak üzere,

$$r = \frac{r(t - \Delta t) - [V_{ref}(s_{FR} - s_{FL})/l_{wF} \cos \delta_f]}{1 + \left(\frac{s_{FR} + s_{FL}}{2} \right)} \quad (4.19)$$

şeklinde yazılabilir.

(4.5) nolu denklemde verilen frenleme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı, bununla birlikte (4.14) ve (4.15) ile gösterilen tekerlek boyuna kayma hızları kullanılarak, (4.19) nolu denklemde kullanılması gereken sağ ön ve sol ön tekerlek boyuna kayma miktarları,

$$s_{FR} = \frac{\omega_{FR} R - [V_{ref} + (l_{wF}/2) \cos \delta_f \cdot r(t - \Delta t)]}{V_{ref} + (l_{wF}/2) \cos \delta_f \cdot r(t - \Delta t)} \quad (4.20)$$

$$s_{FL} = \frac{\omega_{FL} R - [V_{ref} - (l_{wF}/2) \cos \delta_f \cdot r(t - \Delta t)]}{V_{ref} - (l_{wF}/2) \cos \delta_f \cdot r(t - \Delta t)} \quad (4.21)$$

olarak ifade edilir.

Ani ivmelenme (patinaj) durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı (4.22) nolu denklem ile verilebilir.

$$s_i = \frac{R\omega_i - V_i}{R\omega_i}, \quad V < R\omega_i, \quad 0 < s < 1 \quad (4.22)$$

Yukarıda verilen ani ivmelenme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı tanımı ve (4.13) nolu denklemde gösterilen r_{tah} 'i veren bağıntı kullanılarak,

$$r_{tah} = \frac{\frac{V_{FR}}{1 - s_{FR}} - \frac{V_{FL}}{1 - s_{FL}}}{l_{wF} \cos \delta_f} \quad (4.23)$$

olarak bulunur.

(4.23) denklemi düzenlenirse ve (4.12) nolu denklemdeki r_{ger} tanımı kullanılırsa,

$$r_{tah} = \frac{r_{ger}}{(1 - s_{FR})(1 - s_{FL})} - \frac{(V_{FR}s_{FL} - V_{FL}s_{FR})}{l_{wF} \cos \delta_f (1 - s_{FR})(1 - s_{FL})} \quad (4.24)$$

elde edilir.

(4.14) ve (4.15) ile ifade edilen ön tekerlek boyuna kayma hızları kullanılarak (4.24)'teki ifade tekrar yazılırsa,

$$r_{ger} = \frac{r_{tah} (1 - s_{FR}) (1 - s_{FL}) + [V_{ref} (s_{FL} - s_{FR}) / l_{wF} \cos \delta_f]}{1 - \left(\frac{s_{FR} + s_{FL}}{2} \right)} \quad (4.25)$$

elde edilir.

Bu ifadenin tahmin algoritmalarında kullanılmak üzere,

$$r = \frac{r(t - \Delta t) (1 - s_{FR}) (1 - s_{FL}) + [V_{ref} (s_{FL} - s_{FR}) / l_{wF} \cos \delta_f]}{1 - \left(\frac{s_{FR} + s_{FL}}{2} \right)} \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir.

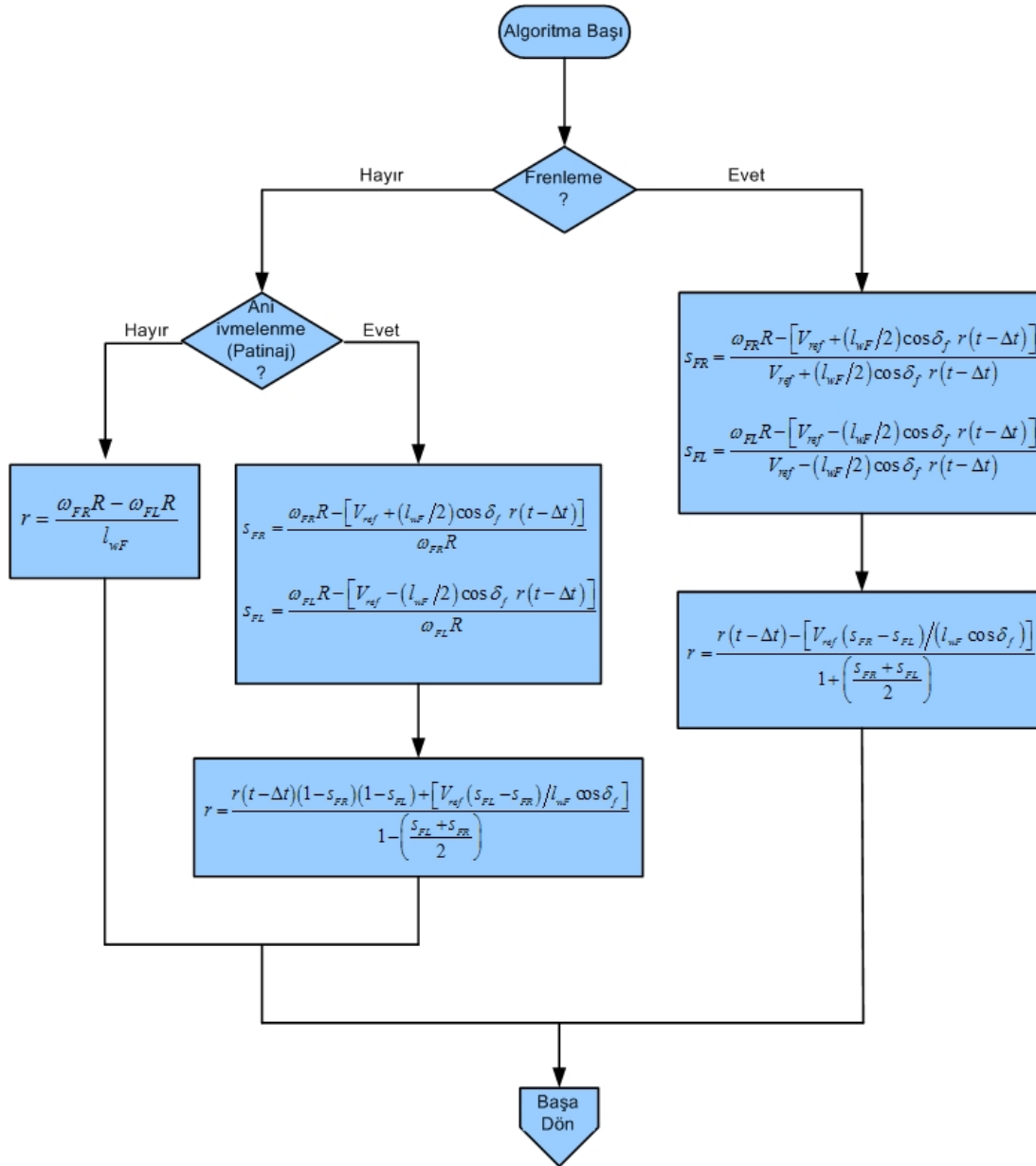
(4.22) nolu denklemde verilen ivmelenme durumunda tekerleklerdeki kayma miktarı, bununla birlikte (4.14) ve (4.15) ile gösterilen tekerlek boyuna kayma hızları kullanılarak, (4.26) nolu denklemde kullanılması gereken sağ ön ve sol ön tekerlek boyuna kayma miktarları,

$$s_{FR} = \frac{\omega_{FR} R - [V_{ref} + (l_{wF} / 2) \cos \delta_f \cdot r(t - \Delta t)]}{\omega_{FR} R} \quad (4.27)$$

$$s_{FL} = \frac{\omega_{FL} R - [V_{ref} - (l_{wF} / 2) \cos \delta_f \cdot r(t - \Delta t)]}{\omega_{FL} R} \quad (4.28)$$

olarak ifade edilir.

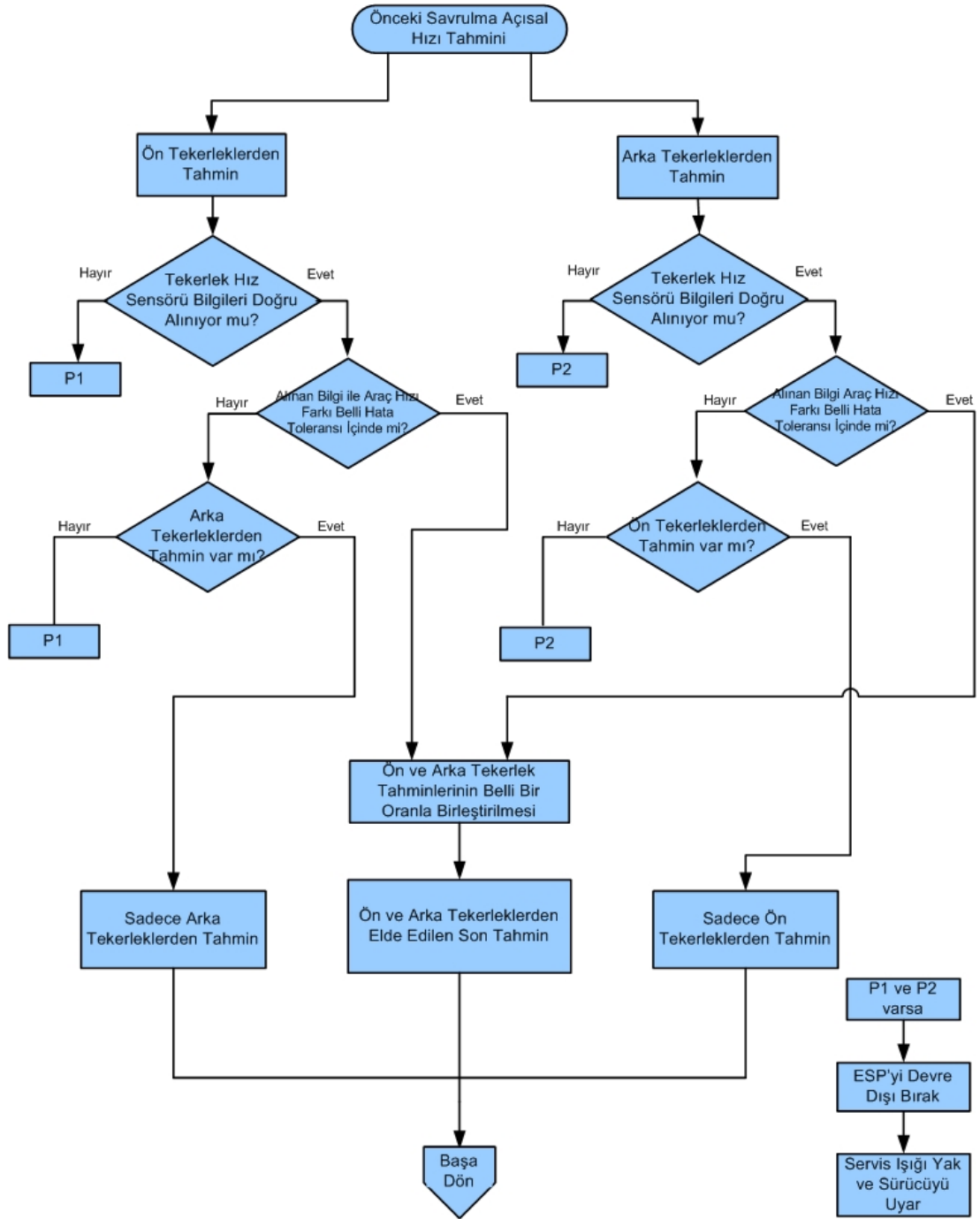
Şekil 4.3'te frenleme ve ani ivmelenme (patinaj) durumunda ön tekerleklerden iyileştirilmiş tahmin algoritması görülmektedir. Algoritma önce frenleme durumunun var olup olmadığına göre hangi tahminin kullanılacağına karar vermekte, frenleme olmaması durumunda ani ivmelenmenin olup olmamasına dikkat etmektedir.



Şekil 4.3 : Ön tekerleklerden iyileştirilmiş tahmin algoritması.

4.2 Kinematik Tahmin için Tekerlek Seçim Algoritması

Önceki bölümlerde belirtilen arka ve ön tekerleklerden kinematik tahmin için hangi (ön veya arka) tekerleklerin seçileceği Şekil 4.4'teki akış diyagramında gösterildiği gibi düzenlenmiştir. Bu algoritmada hem arka, hem de ön tekerleklerden tahminde öncelikle tekerlek hız sensörü bilgilerinin doğru alınıp alınmadığına bakılmaktadır, doğru bilgi alınmadığı takdirde sistemde ilgili tekerleklere ait arıza uyarısı (P₁ veya P₂) verilmektedir. Hem arka, hem de ön tekerleklerden aynı anda tekerlek hız sensörü bilgisi alınmadığı takdirde (P₁ ve P₂ durumunda), ESP devre dışı bırakılıp, sürücü hız gösterge panelindeki servis ışığı yakılarak sürücü uyarılmaktadır.



Şekil 4.4 : Kinematik tahmin için tekerlek seçimi akış diyagramı.

Daha sonra yine hem ön ve hem arka için tekerlek hız sensörlerinden alınan hız bilgisi ile ABS sisteminden alınan hız verisi (V_{ref}) karşılaştırılmakta, her iki tekerlek grubu içinde (ön ve arka) hata belli bir tolerans içindeyse, ön ve arka tekerleklerden yapılan tahmin belli bir oranda birleştirilmektedir.

Sözü edilen oran arka tekerleklerden tahminin $2/3$ 'ü, ön tekerleklerden tahminin $1/3$ 'ü olacak şekilde seçilmiştir. Bu seçim çokça yapılan deneysel sonuç analizleri ve elde edilen benzetim sonuçları kullanılarak yapılmıştır. Bu tekerlek sensörü hız bilgisi ile taşıt referans hız değeri farkı ön veya arka tekerleklerden tahmin için tolere edilebilir değerin dışındaysa, hata toleransı içinde olan tekerleklerden tahmin yapılır. Eğer hem ön, hem de arka için hata toleransı dışında kalınırsa (P_1 ve P_2 durumunda), daha önce belirtildiği gibi ESP devre dışı bırakılıp, servis ışığı yakılarak sürücü uyarılır.

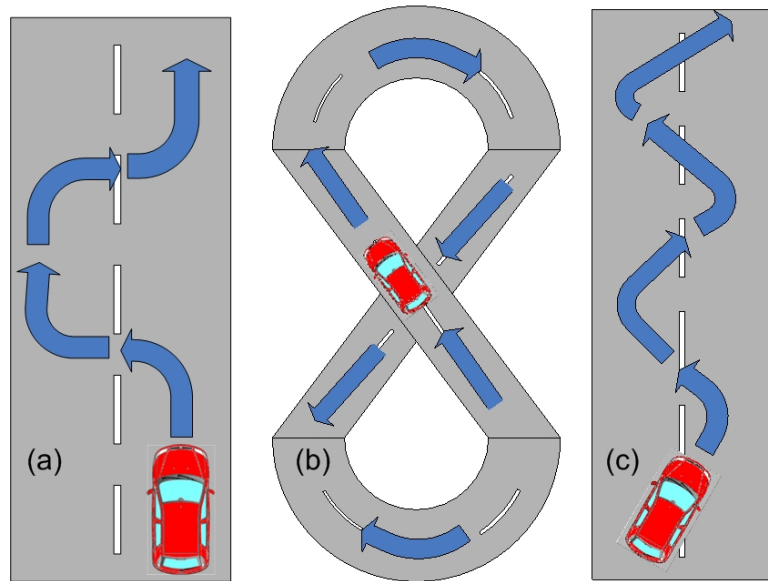
Dinamik tahminin iyileştirilmesi için ise Kalman filtresi kazancının hesaplanması, hıza bağlı değişir hale getirilmiştir. Böylece tahminde kullanılan modelde en büyük belirsizliğe yol açan hız parametresi değişiminin, tahmin üzerindeki etkisi en aza indirilmiştir. Bu işlem Kalman filtresinde kullanılan tek izli taşıt modelinin matrislerinin, Simulink ortamında okunan hız değerine göre güncellenmesi sağlanarak gerçekleştirilmiştir.

5. TAHMİN SONUÇLARI

Çalışmanın bu bölümünde önce sanal sensör tasarımına ait benzetim çalışmalarında hangi manevraların kullanıldığı ve benzetim ortamı hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Daha sonra donanım içeren benzetimlerin gerçekleştirildiği taşıt benzetimcisi hakkında bilgi verilmiştir. Bundan sonraki kısımlarda ise sırasıyla bilgisayar ortamında, donanım içeren taşıt benzetimcisi ortamında yapılan ve son olarak da gerçek taşıt kullanılarak yapılan testlerin sonuçları verilmiştir.

5.1 Benzetim Çalışması

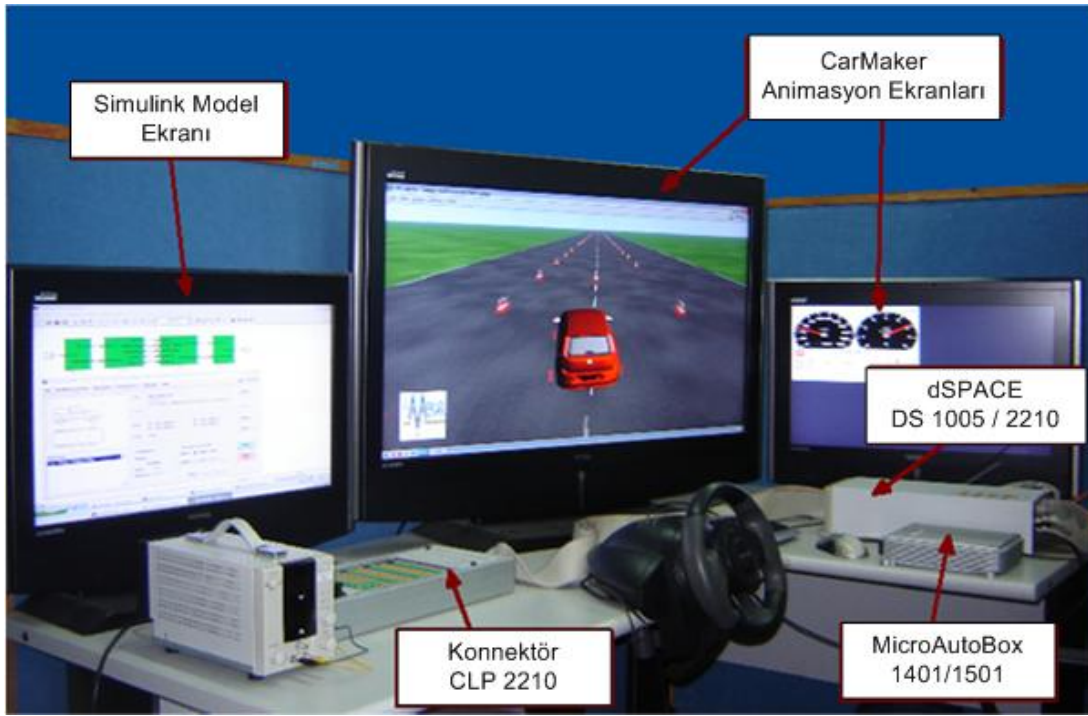
Hem bilgisayar ortamında yapılan çalışmalarda, hem de donanım içeren benzetim çalışmalarında standart taşıt test manevraları kullanılarak önceki bölümlerde yapılan sanal sensör tasarımı denenmiştir. Benzetimlerde standart taşıt manevraları olarak ani şerit değiştirme manevrası, sekiz manevrası ve slalom manevrası kullanılmıştır. Şekil 5.1’de bu manevralara ait şematik bir çizim verilmiştir. Savrulma açısal hızı tahmini, sonuçları hem yüksek güvenilirlikli CarMaker taşıt modeli için, hem de tek izli taşıt modeli için ayrı ayrı verilmiştir. Bununla birlikte, beşinci bölümün sonunda gerçek bir taşıtta sanal sensör kullanımı sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5.1 : Test manevraları: (a) Ani şerit değiştirme. (b) Sekiz. (c) Slalom.

5.2 MEKAR Donanım İçeren Taşıt Benzetimcisi

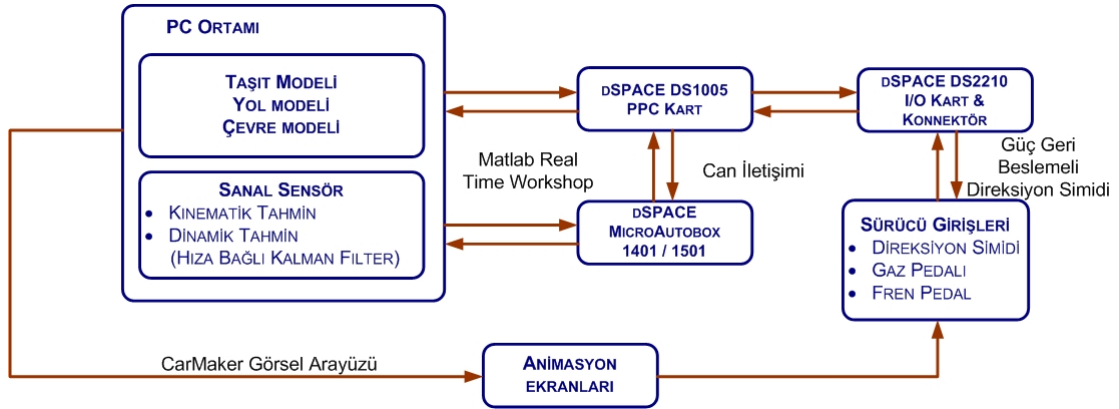
Laboratuarlarda hazırlanan donanım içeren taşıt benzetimcileri (simülatörleri), gerçek yol testlerine önemli bir alternatif oluşturmakta ve daha sonra gerçekleştirilmesi düşünülen yol testleri öncesinde hataların bulunması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaca uygun olarak Şekil 5.2’de görülen MEKAR donanım içeren taşıt benzetimcisi savrulma açısal hızı tahmininde kullanılacak hale getirilmiştir. Taşıt benzetimcisinin kullanıcı biriminde güç geri beslemeli bir direksiyon, fren ve gaz pedal sistemi ile üç büyük ekran bulunmaktadır. Bu ekranlar ile çevre ve araç koşulları sürücüye yansıtılmakta ve önemli taşıt parametreleri gerçek zamanlı gözlemlenmektedir [12,13].



Şekil 5.2 : Gerçek zamanlı MEKAR donanım içeren taşıt benzetimcisi.

Hazırlanan tüm taşıt modelleri ve sanal sensör gerçek zamanlı olarak dSPACE DS 1005, DS 2210 ve MicroAutoBox 1401/1501 sistemleri kullanılarak çalıştırılmış ve test edilmiştir. dSPACE DS 1005 PPC kart, 1 GHz’de çalışabilen IBM PowerPC 750GX işlemci içeren bir ünedir. Simulink üzerinden programlanabilmekte ve dSPACE giriş/çıkış (I/O) kartları ile yüksek hızlı olarak uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir. dSPACE DS 2210 HiL I/O kartı, dSPACE DS 1005 PPC kartı ile birlikte donanım içeren benzetimcinin çekirdeğini oluşturmaktadır.

DS 2210 giriş/çıkış kartı özellikle otomotiv elektronikinde kullanılan, sinyal seviyelerini desteklemektedir. Benzetimcide kullanılan üçüncü birim dSPACE MicroAutoBox 1401/1501'dir. MicroAutoBox hızlı kontrol prototiplendirme (rapid control prototyping RCP) uygulamalarında gerçek zamanlı olarak kullanılabilen bir ünitedir. Uygulama alanlarına taşıt dinamiği, şasi, aktarma organları kontrolü, havacılık uygulamaları ve benzeri pek çok alan verilebilir. MicroAutoBox kullanıcı müdahalesi olmadan tek başına bir ECU gibi çalışabilmektedir. MicroAutoBox'a bağlı bir dizüstü bilgisayar yardımıyla toplanan veriler gerçek zamanlı olarak izlenebilir. MicroAutoBox 800 MHz' de çalışabilen IBM PowerPC 750FX işlemci ve kendi üzerinde giriş/çıkış birimi içermektedir. MicroAutoBox CAN, LIN, K/L Line ve FlexRay gibi en önemli otomotiv iletişim sistemleri ile uyumlu çalışabilmektedir [37].



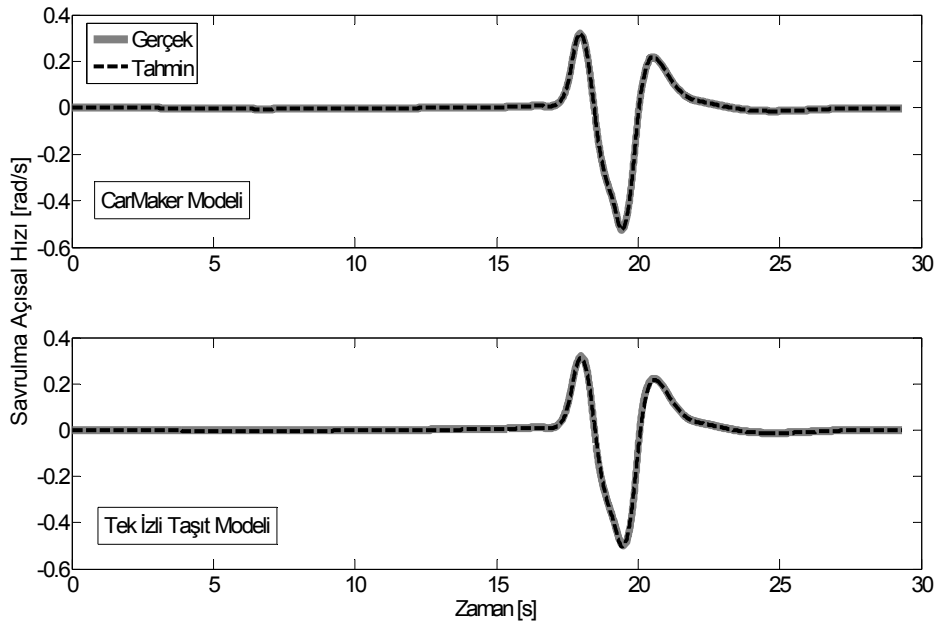
Şekil 5.3 : MEKAR taşıt benzetimcisinin çalışma diyagramı.

Şekil 5.3'te MEKAR taşıt benzetimcisinin çalışma diyagramı gösterilmiştir. Öncelikle PC ortamında taşıt, yol ve çevre modelleri ile sanal sensör Matlab/Simulink kullanılarak modellenmektedir. Daha sonra bu Simulink modelleri, Matlab Real Time Workshop kullanılarak gerçek zamanlı C koduna çevrilmektedir. Çevrilen taşıt, yol ve çevre modelleri dSPACE gerçek zamanlı arayüzü (Real Time Interface RTI) ile dSPACE DS 1005 kartına, sanal sensör modeli ise dSPACE MicroAutoBox'a yüklenmektedir. Gerçek yol testleri öncesinde taşıt modeli gerçek zamanlı olarak dSPACE DS 1005'te çalışmakta ve sanal hesaplamaları için gerekli olan tekerlek hızları, direksiyon dönüş açısı gibi bilgiler gerçek zamanlı CAN seri iletişim hattı üzerinden MicroAutoBox'a iletilmektedir, böylece taşıt benzetimcisiyle, gerçek yol testleri öncesi oldukça gerçekçi benzetimler yapılmıştır. Taşıt benzetimcisine, direksiyon simidi, gaz ve fren pedalı gibi sürücü girişleri ise

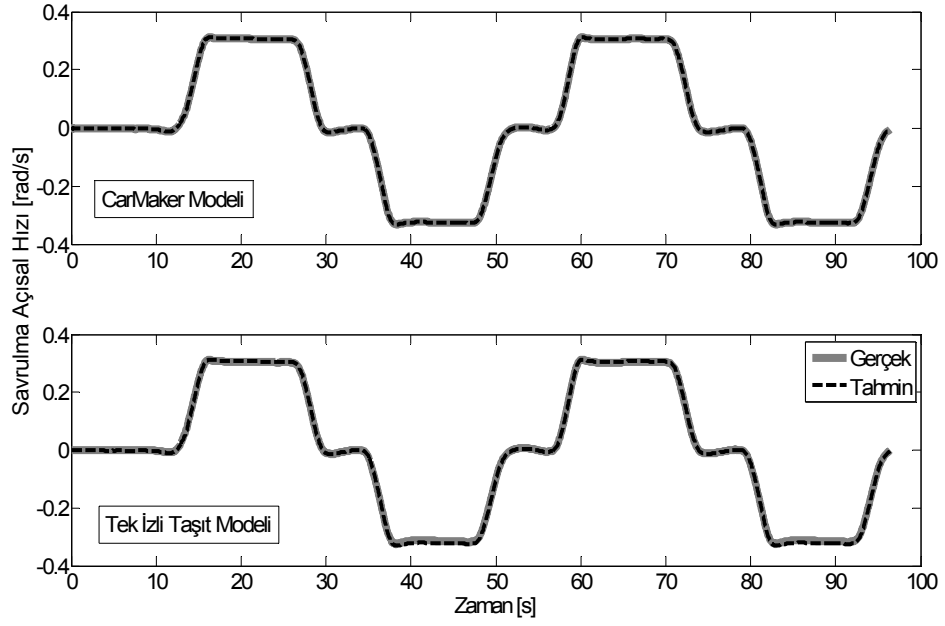
DS 2210 giriş/çıkış kartı ile eklenmektedir. DS 2210 giriş/çıkış kartına kablo bağlantıları ise CLP 2210 konnektör birimi tarafından gerçekleştirilmektedir. Taşıt benzetimcisi kullanan sürücü ise geri beslemeli direksiyon simidi ve gerçek zamanlı animasyonların görüldüğü ekranlar yardımıyla simülatörle etkileşim kurmaktadır. Çalışmada verilen tüm donanım içeren benzetim sonuçları bu bahsi geçen taşıt benzetimcisi kullanılarak yapılmıştır.

5.3 Benzetim Sonuçları

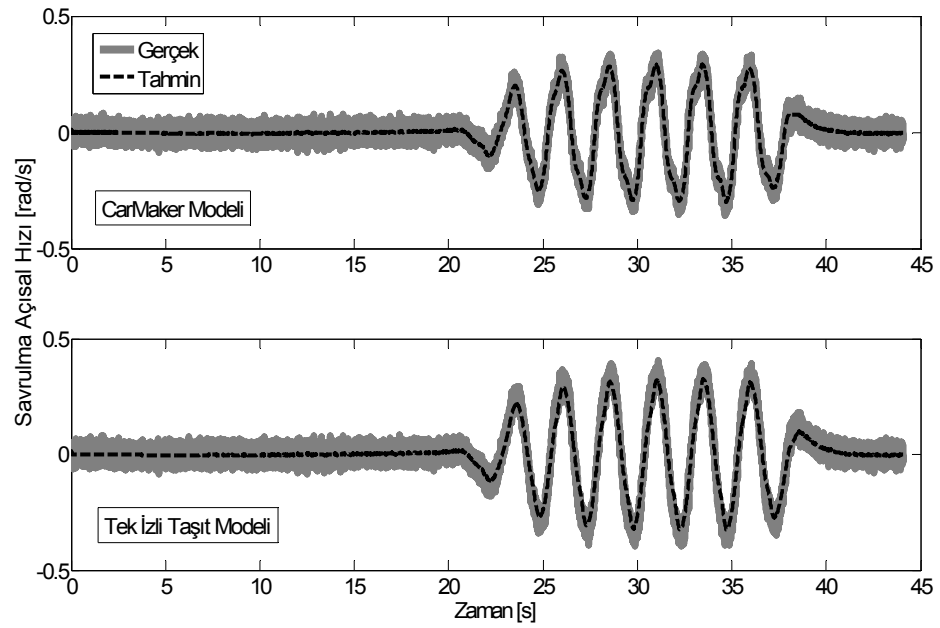
Bilgisayar ortamında yapılan benzetimler, CarMaker ve Matlab/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.4'te ani şerit değiştirme manevrası sonuçları, Şekil 5.5'te sekiz manevrası sonuçları ve Şekil 5.6'da slalom manevrası sonuçları görülmektedir. Sanal sensörün dinamik tahmin bölümünün (Kalman filtresi) gürültü filtreleme özelliğini de sınamak üzere slalom manevrası sonuçlarında, kinematik tahmin öncesinde tekerlek hız bilgilerine beyaz gürültü eklenmiştir. Böylece tekerlek hızı sensör gürültüsünün mevcut olduğu durumdaki sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 5.4 : Ani şerit değiştirme manevrası sonuçları.



Şekil 5.5 : Sekiz manevrası sonuçları.



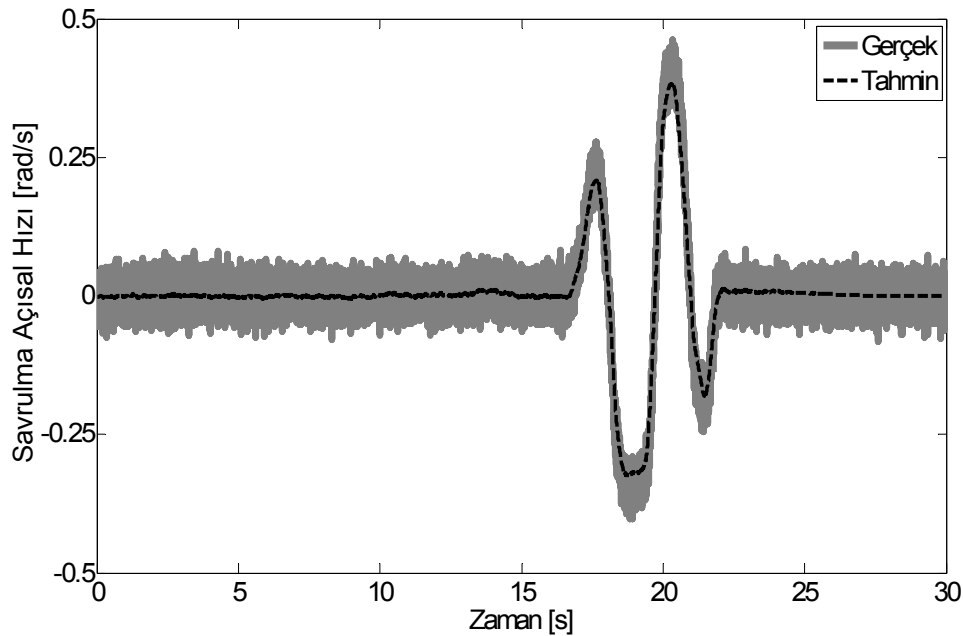
Şekil 5.6 : Slalom manevrası sonuçları.

Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görülen şekillerde gerçek ile ifade edilen sinyaller CarMaker ve tek izli taşıt modellerinden direkt okunan savrulma açısal hızlarını göstermektedir. Tahmin olarak ifade edilen sinyaller ise sanal sensör ile elde edilen savrulma açısal hızını göstermektedir. Şekil 5.6’da gerçek ile gösterilen sinyal, taşıt modellerinden elde edilen savrulma açısal hızına beyaz gürültü eklenmiş halidir. Bu gürültü modellerden elde edilen tekerlek hızı bilgilerine de eklenmiş ve bu gürültülü

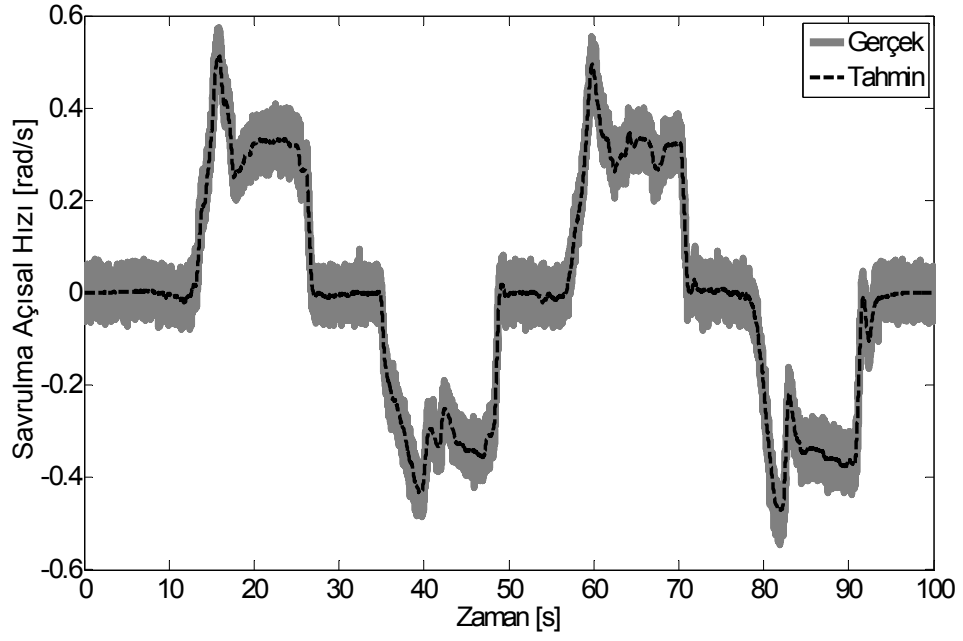
tekerlek hızı bilgileri ve diğer gerekli bilgiler (tekerlek dönme açıları, taşıt parametreleri vb.) sanal sensörde kullanılarak tahmin gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde sanal sensörün gürültü filtreleme özelliği de test edilmiştir. Sonuç olarak bakıldığında bilgisayar ortamında yapılan benzetim sonuçları oldukça başarılı bulunmuştur.

5.4 Donanım İçeren Benzetim Sonuçları

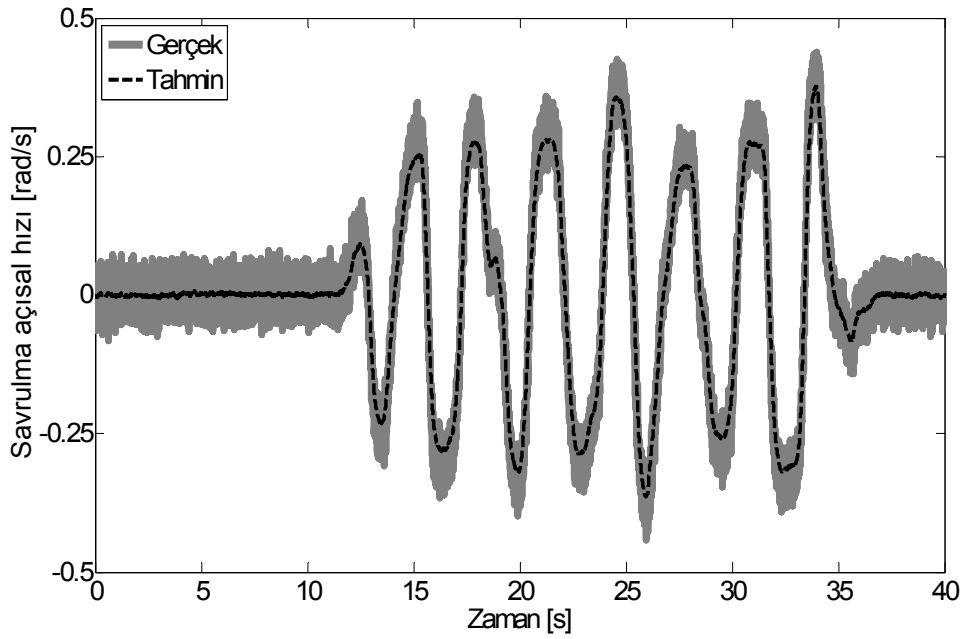
Bu bölümde daha önce anlatılan MEKAR gerçek zamanlı taşıt benzetimcisi tez yazarı tarafından kullanılarak donanım içeren testler gerçekleştirilmiştir. Testlerde ani şerit değiştirme manevrası, sekiz manevrası ve slalom manevrası gerçek sürücü tarafından gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Donanım içeren testlerde, yüksek serbestlik dereceli CarMaker taşıt modeli kullanılmıştır. Sanal sensörün kinematik tahmin bölümünden önce, tekerlek hızlarına beyaz gürültü eklenerek CarMaker modelinden gelen tekerlek hızları gürültülü hale getirilmiştir. Bu şekilde önceki bölümde sadece slalom testi için yapılan sanal sensörün gürültü filtreleme özelliği, bu bölümde tüm manevralarda sınanmıştır.



Şekil 5.7 : Donanım içeren ani şerit değiştirme manevrası sonucu.



Şekil 5.8 : Donanım içeren sekiz manevrası sonucu.



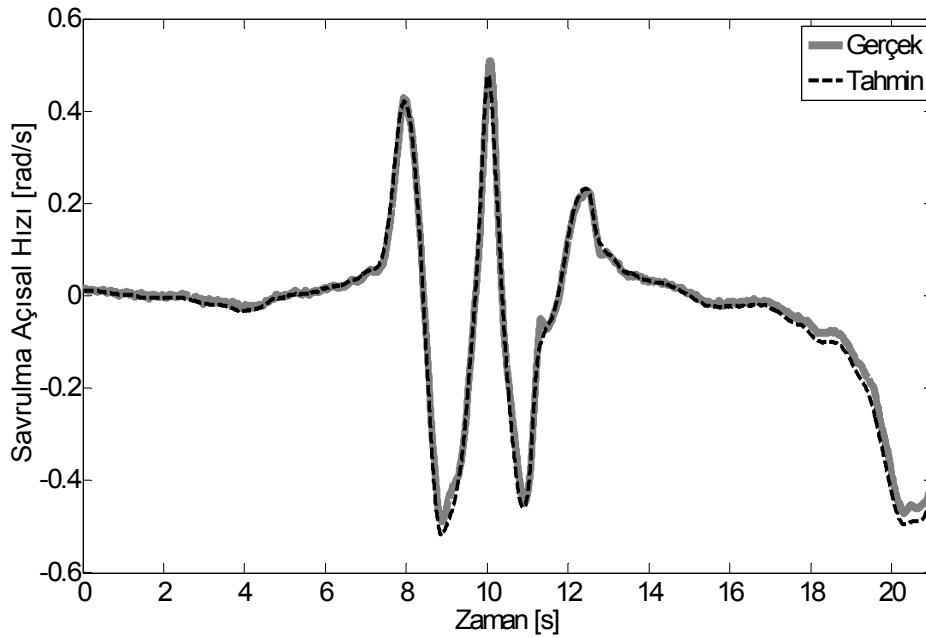
Şekil 5.9 : Donanım içeren slalom manevrası sonucu.

Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilen donanım içeren test sonuçlarına bakıldığında, gerçek ve tahmin değerleri hemen hemen tüm manevralarda üst üstedir. Bu sonuçlara göre gerçek yol testleri öncesi, donanım içeren testlerde sanal sensör tahminleri oldukça başarılı bulunmuştur.

5.5 Gerçek Yol Testleri Sonuçları

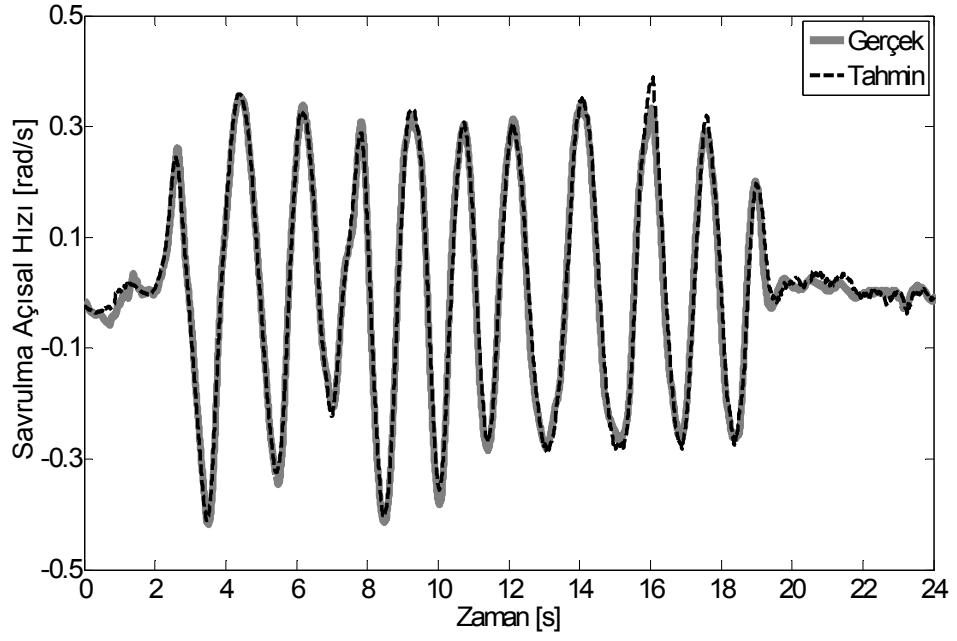
Donanım içeren testlerin başarıyla tamamlanması sonrası sanal sensör gerçek taşıt testlerinde sınanmıştır. Deneysel çalışmalarda Fiat Linea marka araç kullanılmıştır. Testler TOFAŞ Bursa test pistinde, test sürücülerini tarafından gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sanal sensör, dSPACE MicroAutoBox hızlı prototiplendirme ünitesi yardımıyla taşıt CAN hattı üzerinden taşıta bağlanmıştır.

Taşıtta bulunan gerçek ticari savrulma açısı hızı sensörü ile sanal sensör gerçek zamanlı olarak birlikte çalıştırılmış ve her iki veri birlikte gösterilerek karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. Farklı manevralara ait üç sonuç sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir.

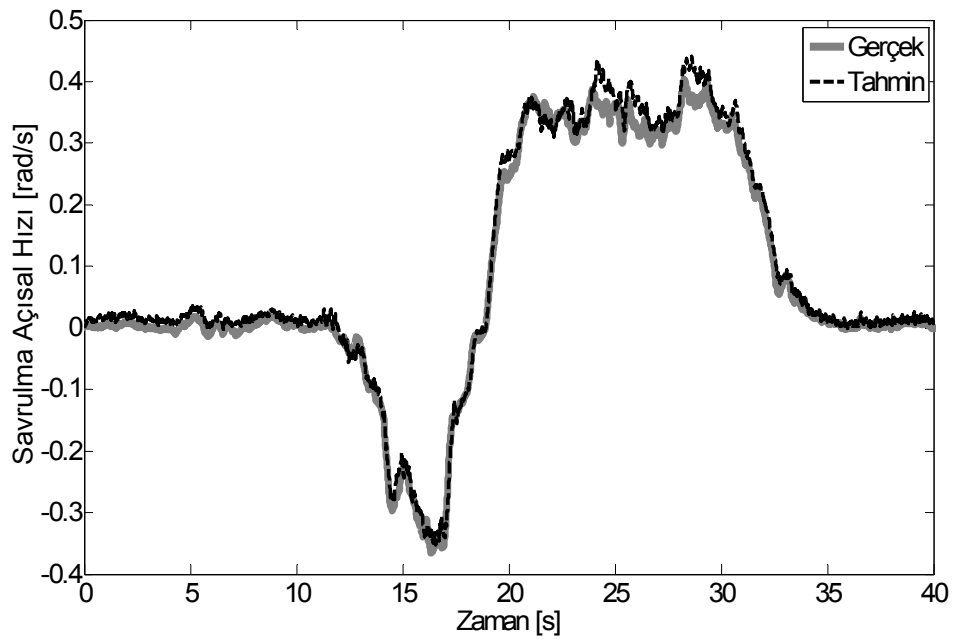


Şekil 5.10 : Deneysel test sonucu – 1.

Bu üç testte farklı direksiyon girişleri için, farklı hız değerlerinde ve farklı frenleme durumlarında sanal sensör denenmiştir. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de gösterilen üç teste ait taşıt hızı, direksiyon açısı ve fren durumunun zamana göre değişimi, Ek B’de grafikler halinde gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, gerçek taşıtta denenilen sanal sensör oldukça başarılı savrulma açısı hızı tahminleri vermektedir.



Şekil 5.11 : Deneysel test sonucu – 2.



Şekil 5.12 : Deneysel test sonucu – 3.

6. TAŞIT YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ

Bu bölümde önce taşıt yanal dinamiği kontrolünde bugüne kadar yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra bu çalışmada kullanılan kontrol stratejisi tarif edilmiş, model öngörülü kontrol yaklaşımı kullanılarak ön tekerlek dönüş açısı müdahalesine dayalı üst kontrolcü tasarımı ve tekil frenlemeye dayalı alt kontrolcü tasarımı anlatılmıştır.

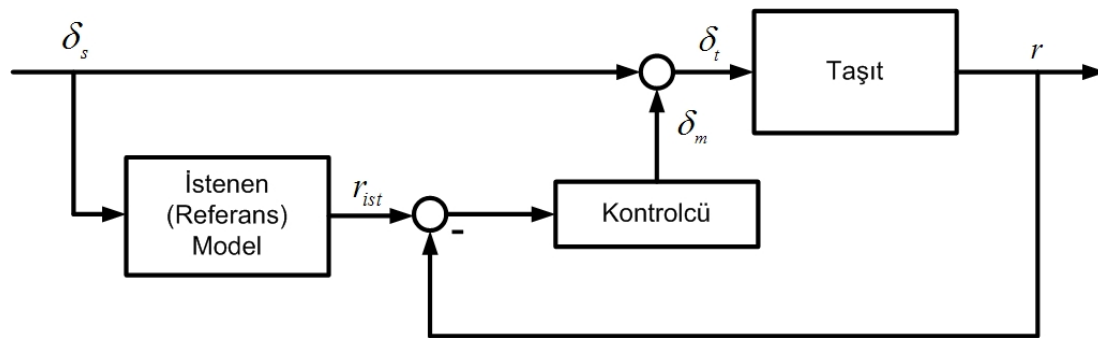
6.1 Önceki Çalışmalar

Bir taşıtın yanal kararlılığının belirlenmesinde çok önemli olan iki parametre, taşıt savrulma açısal hızı (r) ve taşıt (şasi) yana kayma açısı (β)'dır. Bu yüzden taşıt yanal dinamiği kontrolü, savrulma açısal hızının kontrolü ve yana kayma açısının kontrolü olarak belirtilebilir. Taşıt savrulma açısal hızı kontrolünde amaç daha çok taşıtın sürücü tarafından kullanılabilirliğini artırmak, sürücünün taşıttan istediği davranışın sağlanmasında yardımcı olmaktır. Taşıt yana kayma açısı kontrolünde ise amaç limit koşullarda taşıtın kararlılığını artırmaktır [38]. Burada limit koşul, taşıtın doğrusal olmayan sürüş özellikleri gösterdiği durumu ifade etmektedir. Taşıtlar sürülürken iki tip davranış sergilerler. Bunlardan biri doğrusal davranıştır. Doğrusal davranışta tekerlek yanal kuvvetleri ile tekerlek yana kayma açıları arasındaki değişim doğrusaldır ve savrulma açısal hızı küçük bir gecikmeyle de olsa direksiyon tepkisine oransal tepki verir. İkinci davranış doğrusal olmayan taşıt davranışdır. Bu durum, taşıt tekerlekleri ile yol arasındaki tutunma fiziksel limitlerin sınırına yaklaşıncaya gerçekleşir. Bu durumda tekerlek yanal kuvvetleri, tekerlek yana kayma açılarıyla doğrusal değişmez. Bu koşullarda tekerlek yana kayma açıları dolayısıyla taşıt yana kayma açısı tekerlek yanal kuvvetlerinden bağımsız olarak hızla yükselir. Doğrusal olmayan bir davranış gösteren taşıt, sürücü direksiyon girişine çok az tepki verir ve taşıtın yoldaki davranışı, doğrusal davranışına göre çok daha tahmin edilemez olur.

Taşıt yanal dinamiği kontrolünde genellikle iki tip müdahaleye dayanan kontrol gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki tekerlek dönüş kontrolüdür (steering control), diğeri ise tekerlek boyuna kuvvetlerinin aktarma organları veya frenleme yoluyla değiştirilmesiyle taşıt savrulma momentinin kontrolüdür. Tekerlek dönüş kontrolü, aktif ön tekerlek kontrolü (active front steering AFS), aktif arka tekerlek kontrolü (active rear steering ARS) ve hem ön, hem arka yani dört tekerleğinde kontrolü (four wheel steering 4WS) şeklinde olabilir. Savrulma momenti kontrolü ise tekil frenleme veya direkt savrulma momenti kontrolü (direct yaw moment control DYC) adı verilen hem frenleme, hem de tekerlek kuvvetlerinin aktarma organlarının yardımıyla değiştirilmesi durumlarını içeren yöntemle gerçekleştirilebilir. Bunlar haricinde taşıt yanal dinamiğini sağlamak için aktif diferansiyel kontrolü gibi yöntemler kullanılabilir.

Literatür incelendiğinde yapılan çalışmaların üç kategoride toplandığı görülebilir. Bu üç kategori; savrulma açısız hızının kontrolü, taşıt yana kayma açısının kontrolü ve iki yaklaşımın bir arada olduğu bütünleşik savrulma açısız hızı ve taşıt yana kayma açısı kontrolüdür. Bu kategorilerde farklı kontrol yöntemleri üstte belirtilen çeşitli müdahale yöntemleri dolayısıyla çeşitli eyleyiciler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak bakıldığında savrulma açısız hızı kontrolü, bir model referans alınıp savrulma açısız hızı tespitine dayanan, geri beslemeli kontrol sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir [38]. Burada kontrolcü doğrusal olmayan savrulma açısız hızı dinamiğini doğrusal bisiklet modelindeki gibi davranmaya zorlamaktadır. Şekil 6.1’de en genel ön tekerlek tabanlı geri beslemeli savrulma açısız hızı kontrolü blok diyagramı görülmektedir. Burada ön tekerleklerin dönüşü sürücünün direksiyona verdiği dönüşe göre oluşan açı ve kontrolcü tarafından üretilen açının toplamı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 6.1 : Ön tekerlek tabanlı geri beslemeli savrulma açısız hızı kontrolü, [38].

Ackermann ve diğerleri tarafından hem ön tekerlek, hem arka tekerlek, hem de her ikisinin birlikte kontrol edildiği dayanıklı kontrolcü tasarımı çalışmaları yapılmıştır [39-42]. Bu çalışmalarda taşıtı kullanan sürücünün taşıtı kullanırken istenen yolda taşıtı hareket ettirmek ve bozucu etkilere karşı taşıtı yolda tutma gibi iki görevi olduğundan bahsedilmiş, bir ayrıklaştırma kuralı yardımıyla (decoupling law) bu iki görev birbirinden ayrıklaştırmış ve bozucu etkinin kompanse edilmesi otomatik kontrol sistemi tarafından sağlanmıştır. Bu şekilde savrulma açısal hızı için gerçekleştirilen kontrolcü, sürücünün istenen yolda taşıtı hareket ettirme işine müdahale etmemektedir [41].

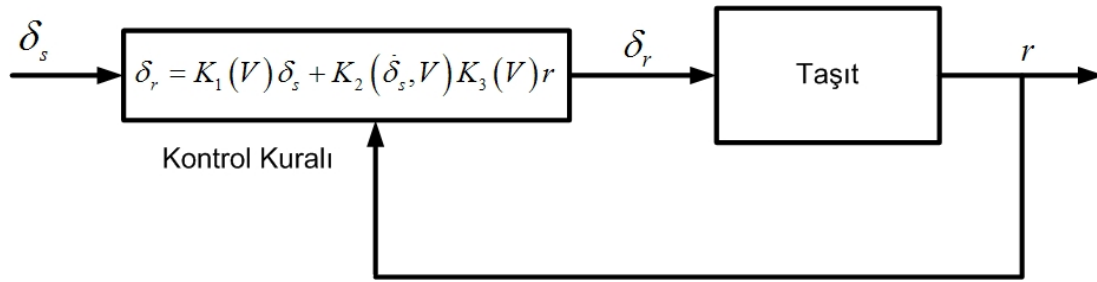
Aksun Güvenç ve diğerleri tarafından taşıta müdahale yöntemi olarak ön tekerlekleri kullanan model regülatörü tabanlı iki serbestlik dereceli kontrolcü tasarımı savrulma açısal hızı problemine uygulanmış ve oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır [43,44]. Bu yöntemle hem modelleme hatalarına karşı kontrolcü duyarsız hale getirilmiş, hem de bozucu etken olarak alınan savrulma açısal momentinin giderilmesi (disturbance rejection) gerçekleştirilmiştir. Yöntem benzetim, donanım içeren benzetimci ve deney çalışmalarıyla sınanmıştır [45,46]. Ayrıca hem ön tekerlek dönüş açısı kontrolü, hem de tekil frenleme içeren model regülatörü tabanlı çalışmalar yapılmıştır [47,48,49]

Canale ve diğerlerinin çalışmalarında, iç model kontrolü (internal model control IMC) ve aktif arka diferansiyel kullanılarak dayanıklı savrulma açısal hızı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Geri beslemeli kontrol stratejisinin yanında savrulma açısal hızının geçici rejim cevabını iyileştirebilmek için ileri beslemeli bir kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Böylece iki serbestlik dereceli bir kontrol yapısı elde edilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak referans (istenen) savrulma açısal hızı, direksiyona açısına ve taşıt hızına bağlı olarak doğrusal olmayan bir statik haritadan belirlenmektedir [50,51]. Aynı çalışma grubunun bir başka çalışmasında ise ileri beslemeli kontrolcüyle birlikte geri beslemeli kontrolde kayan kipli kontrol tekniğiyle tasarlanmış bir kontrolcü kullanılmıştır [52]. Drakunov ve diğerleri tarafından da tekil frenleme müdahalesine dayanan kayan kipli kontrol yöntemi kullanan savrulma açısal hızı kontrolü çalışması yapılmıştır [53].

Zheng ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, aktif ön tekerlek kullanımına dayanan savrulma açısal hızı kontrol algoritması verilmiştir. Verilen algoritma, Ackermann ve diğerleri tarafından belirtilen ayrıklaştırma kuralına benzer şekilde

taşıtın yolu takip etmesi ve savrulma hareketinin stabilize edilmesi olgularını ayırıklaştırmaktadır. Çalışmada tasarlanan kontrolcü deneysel olarak da denenmiştir [54].

Taşıt yana kayma açısının arka tekerlekler kullanılarak ileri beslemeli bir kontrol yöntemiyle kontrol edilmesiyle ilgili çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Şekil 6.2’de basit ileri beslemeli taşıt yana kayma açısı kontrol sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Buradaki kontrol algoritması tek izli taşıt modelinin sürekli zamanda sıfır yana kayma açısı için çözülmesiyle elde edilebilir.



Şekil 6.2 : İleri beslemeli taşıt yana kayma açısı kontrolü, [38].

Bunun haricinde özellikle ticari olarak tekerlek fren torklarının dağılımının düzenlenerek savrulma momentinin kontrol edildiği çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır [38].

Üçüncü kategoride göreceğimiz bütünleşik taşıt savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı kontrolüyle ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Nagai ve diğerleri tarafından arka tekerlek dönüş açısı ve direkt savrulma momenti kontrolü gerçekleştirilerek taşıtın hem savrulma açısal hızı, hem de taşıt yana kayma açısı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Çok girişli çok çıkışlı sistemin kontrolünde durum geri beslemeli kontrol yapısı kullanılmıştır. Durum geri beslemesinin kazancı LQR, LQG, H_∞ gibi tasarım yöntemleri kullanılarak bulunulabileceği belirtilmiştir. Referans (istenen) savrulma açısal hızının ve taşıt yana kayma açısının bulunmasında taşıtın tek izli davranışına yakın sonuçlar veren birinci dereceden bir model kullanılmıştır [55,56].

Yang ve diğerlerinin çalışmasında bütünleşik savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı kontrolü, aktif ön tekerlek ve direkt savrulma momenti kontrolü uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Referans savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı birinci dereceden modeller kullanılarak elde edilmiştir. Çalışma da referans taşıt yana kayma açısının bazı kaynaklarda sıfır olarak alındığı belirtilmiştir. Makalede

kontrol sistemi üst ve alt kontrolcü şeklinde teşkil edilmiştir. Üst kontrolcü olarak bir çeşit optimal kontrol algoritması (optimal garantili değer kontrolcüsü) ve alt kontrolcü olarak da istenen savrulma momentini sağlayacak fren basınç dağıtım algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar irdelenirken optimal garantili değer kontrolcüsü ile LQR metoduyla tasarladıkları kontrolcüden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmış ve optimal değer kontrolcüsünün eyleyiciyi doyurma ihtimali gözönünde tutularak daha başarılı olduğu gösterilmiştir [57].

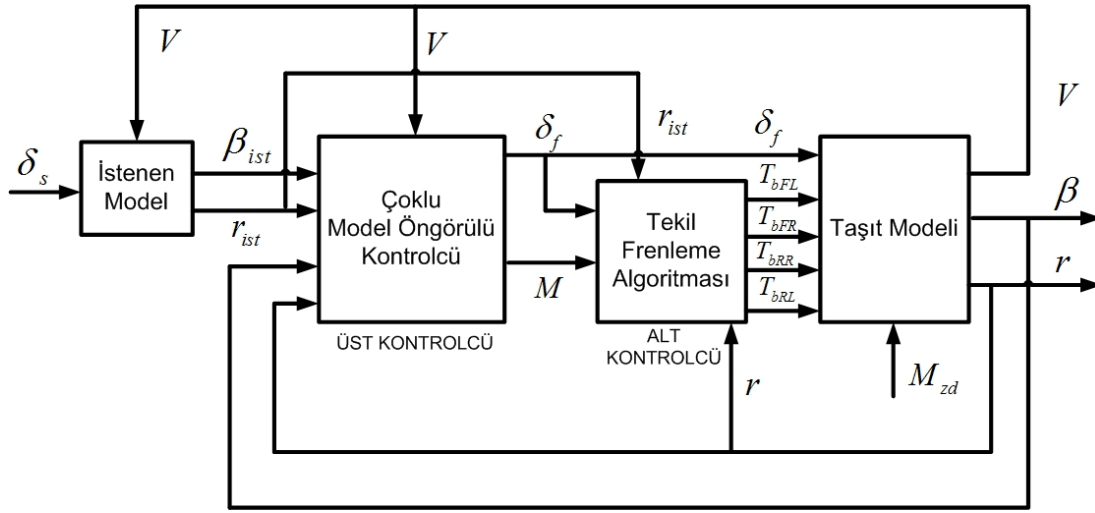
Falcone ve diğerlerinin çalışmasında taşıt yol takibi problemine aktif ön tekerlek ve frenleme müdahalesi olan model öngörülü kontrol yöntemi tabanlı bir çözüm üretmişlerdir. Makalelerinde şuan bu alanda yapılan çalışmaların bütünleşik frenleme ve direksiyon (steering) müdahalesi kullanılarak taşıt yanal kararlılığının artırılması olduğunu belirtmişler ve kendi makalelerinde engelden kaçma ve ani şerit değiştirme manevralarında model öngörülü kontrolcü kullanılarak taşıtın istenen yolu takip etme özelliğini hem benzetimlerle, hem de deneysel testlerle sınıamışlardır [58].

6.2 Kullanılan Kontrol Stratejisi

Bu tez çalışmasında taşıt yanal dinamiğinin kontrolü problemine aktif ön tekerlek kontrolü kullanılarak ve taşıta tekil frenleme müdahalesi yapılarak çözüm getirilmeye çalışılmıştır. Şekil 6.3'te bu çalışmada kullanılan kontrol stratejisini içeren ait sistemi de içeren blok diyagramı görülmektedir.

Genel olarak kontrol stratejisi, üst kontrolcü olan model öngörülü kontrol yöntemi ve alt kontrolcü olan tekil frenleme (fren torklarının dağılım) algoritmasının birleşiminden oluşmaktadır.

Öncelikle sürücü girişi doğrusal tek izli taşıt modelinden geçirilerek taşıta ait istenen (referans) savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı tespit edilmektedir. İstenen taşıt yana kayma açısı sıfır olarak alınmıştır. Referans doğrusal tek izli taşıt modelinde tekerlek yol sürtünme katsayısı 1 olarak alınmıştır. Ayrıca taşıt modeli Şekil 6.3'te gösterildiği gibi hıza bağlı alınarak istenen modelde büyük belirsizliğe yol açabilecek bir parametre olan taşıt hızı elemine edilmiştir.



Şekil 6.3 : Kullanılan kontrol strajesine ait blok diyagramı.

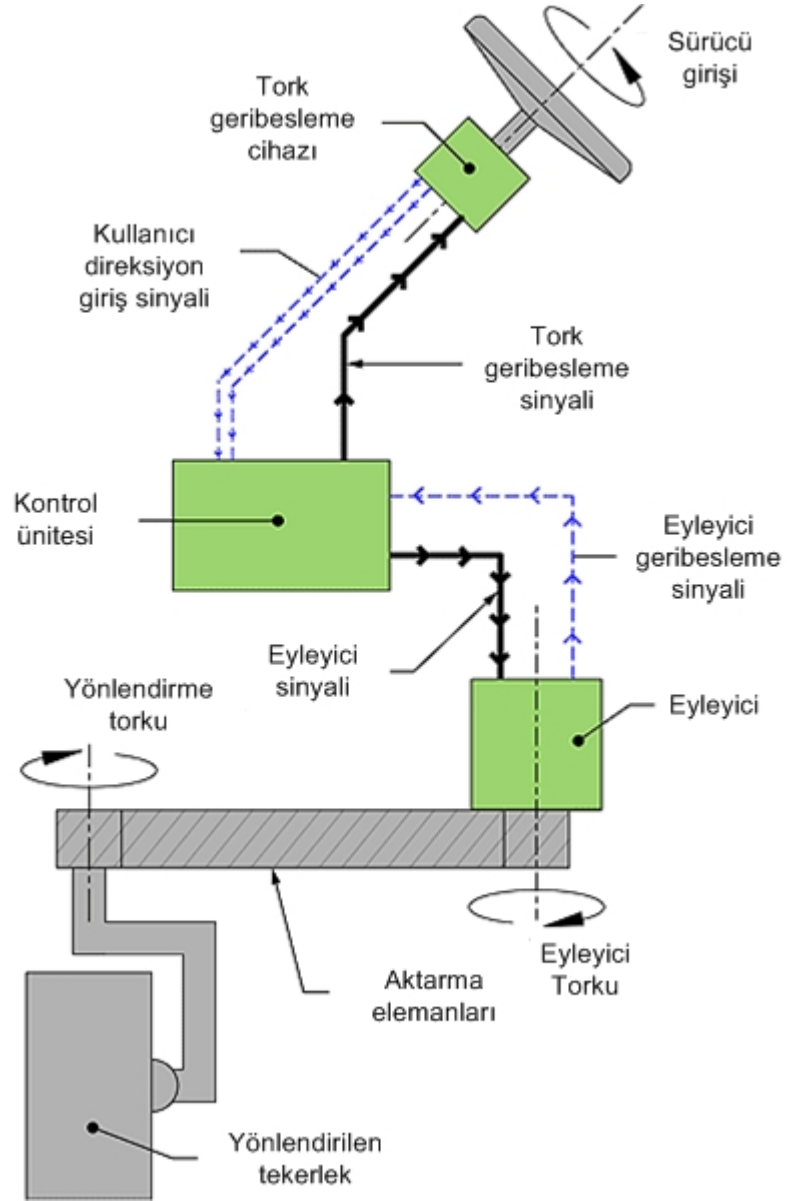
İstenen savrulma açısı ve taşıt yana kayma açısı değerleri, taşıt modelinden okunan savrulma açısı ve taşıt yana açısı değerleriyle birlikte çoklu model öngörülü kontrolcüye girmektedir. Buradaki “çoklu” kelimesi kontrolcünün hıza bağlı olduğunu belirtmek için kullanılmıştır.

Üst kontrolcü tasarımı bölümünde açıklanacak şekilde belirli hız değerleri için farklı kontrolcüler tasarlanmış ve bunlar belli bir kural dahilinde kullanılacak şekilde birleştirilmiştir.

Kontrolcünden kontrol sinyali olarak iki değer çıkmaktadır. Bunlardan biri ön tekerleklerin dönüş açısı (δ_f) ve diğeri de taşıtın istenen davranışı göstermesini sağlayan kontrol momenti (M) değeridir.

Bulunan kontrol momentinin taşıta etki ettirilmesi için tekil frenleme tabanlı bir alt kontrolcü algoritması tasarlanmıştır. Ayrıntıları alt kontrolcü tasarımında verilmek üzere, taşıt kinematik ve geometrik özelliklerinden yararlanılarak hesaplanan tekil fren torklarını dağıtacak bir algoritma geliştirilmiştir. Bu dağılım taşıtın o anki durumu ile istenen durum karşılaştırılarak hangi tekerleğin frenlenmesine karar verilerek gerçekleştirilmiştir.

Olabilecek tüm durumlar değerlendirilip bir araya getirilerek alt kontrolcü tasarımı için bir tekil frenleme algoritması oluşturulmuştur. Bu algoritma çoklu model öngörülü üst kontrolcü ile birlikte uyumlu bir şekilde çalıştırılarak taşıt yanal dinamiği kontrol edilmiştir.



Şekil 6.4 : Kablo kontrollü direksiyon sistemi, [59].

Kontrolcü tasarımı yapılırken ve ilk tasarım aşamasında bu kontrol eylemini gerçekleştirecek eyleyiciler düşünülmüştür. Ön tekerlek dönüş kontrolünün kablo kontrollü bir direksiyon sistemiyle (steer-by-wire) ve tekil frenleme müdahalesinin ise taşıtlarda mevcut olan fren sistemleriyle gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Şekil 6.4'te kullanılabilecek kablo kontrollü bir direksiyon sistemi görülmektedir. Burada sürücü direksiyon girişi (direksiyon açısı, açısal hızı ve bunun yanında kimi durumlarda torku) elektrik sinyali olarak kontrol ünitesine iletilmektedir. Bu sinyale gerekli kontrol kuralı uygulandıktan sonra elde edilen sinyal eyleyiciye iletilmekte, eyleyicinin oluşturduğu torkta aktarma organları üzerinden tekerleğe iletilerek gerekli tekerlek dönüş torku oluşturulmaktadır.

Kablolu direksiyon sistemlerinin ilk ortaya çıkışında tekerleklerden dolayısıyla yoldan gelen titreşimlerin (geri beslemenin) sürücü tarafından hissedilemediği ve bununla sürücünün yol algısını azalttığı eleştirilmekteydi. Bu durum Şekil 6.4'te gösterilen örnek sistemde gösterildiği gibi tork geri besleme cihazı (eyleyicisi) kullanılarak çözülmüştür. Tekerleklerden gelen etkiler eyleyici üzerinden ve sonrasında eyleyici geri besleme sinyali ile kontrolcüye ulaştırılmaktadır. Burada işlenen sinyal tork geri besleme cihazına gönderilmekte ve bu şekilde oluşturulan geri besleme ile yolun sürücü tarafından hissedilmesi sağlanmaktadır.

6.3 Üst Kontrolcü Tasarımı

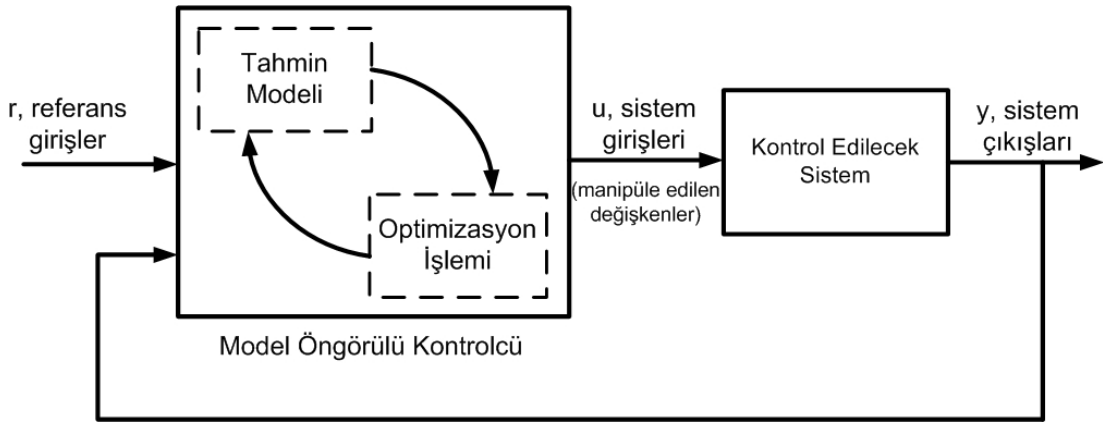
Bu alt bölümde önce bu çalışmada otomotiv kontrolü uygulaması gerçekleştirilmeye çalışılan model öngörülü kontrol metodu hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Daha sonra bu çalışmada model öngörülü kontrolcü tasarlanırken hangi tasarım aşamalarının izlendiği belirtilmiştir.

6.3.1 Model öngörülü kontrol yöntemi

Model öngörülü kontrol (MPC), 1970'lerin sonundan itibaren özellikle endüstriyel proses kontrolünde kullanılan ileri düzeyde bir kontrol metodudur. Kontrol işlemi sırasında gerçek zamanlı optimizasyon işlemi gerçekleştirilmesi gerektiğinden önce yavaş tepki veren sistemlerde örneğin endüstriyel fırınların sıcaklık kontrolünde kullanılmıştır. Daha sonra mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeyle birlikte hızlı tepki veren (örnekleme zamanının az olması gereken) sistemlerinde kontrolünde de model öngörülü kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanım alanları günümüzde uzay-havacılık ve otomotiv endüstrisini içerecek şekilde gittikçe artmaktadır [60].

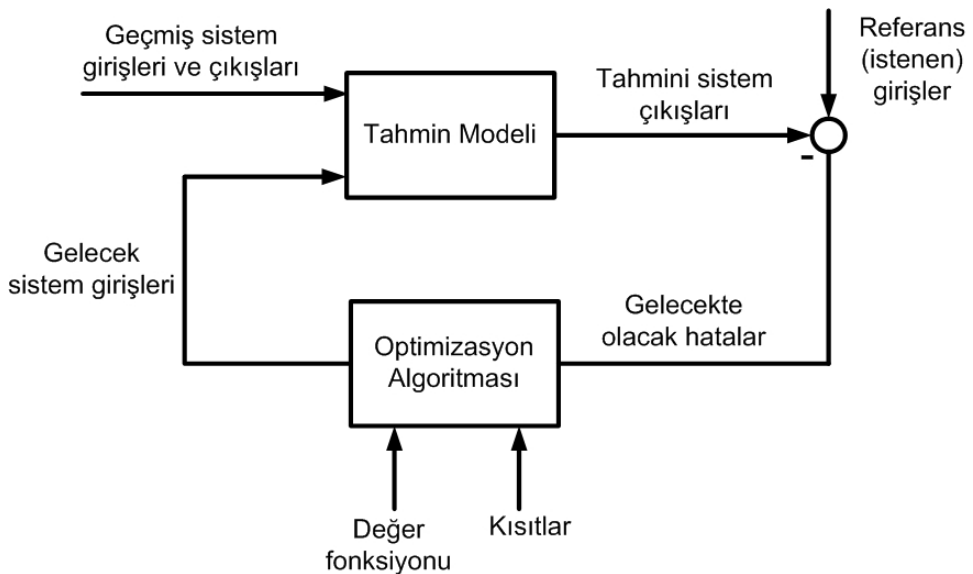
Model öngörülü kontrol metodunun temeli, sisteme ait bir tahmin modeli kullanılarak sisteme ait çıkışların (predicted output) belli bir tahmin ufunda elde edilmesi, sonrasında takip edilmesi istenen referans değerler ile bu tahmini çıkışların gelecek hatasını minimize eden bir optimizasyon rutini kullanılarak, kontrol ufunda gerekli kontrol hareketlerinin belirlenmesi ayrıca bu işlemin her örnekleme zaman aralığında tekrar edilerek gerçekleştirilmesidir. Yani her zaman aralığında sonlu ufuklu açık çevrim optimal kontrol problemi çözülmektedir [61,62].

Model öngörülü kontrol tek girişli-tek çıkışlı sistemlerde (SISO) kullanılabildiği gibi, çok girişli-çok çıkışlı (MIMO) ve girişlerinde ve/veya çıkışlarında çeşitli kısıtlar bulunan sistemlerin kontrolünde de kullanılabilen model tabanlı çok değişkenli ayrık zamanlı bir kontrol metodudur. Şekil 6.5'te model öngörülü bir kontrolcü eklenmiş bir sistemin blok diyagramı görülmektedir. Model öngörülü kontrolcü temel olarak tahmin modeli ve optimizasyon işleminin yapıldığı birimlerden oluşmaktadır. Buradaki tahmin modeli bilinen modelleme yöntemleriyle veya sistem tanımlama yöntemleri kullanılarak elde edilebilir. Tahmin modelinin doğrusal veya doğrusal olmamasına göre model öngörülü kontrol, doğrusal model öngörülü kontrol ve doğrusal olmayan model öngörülü kontrol isimleriyle adlandırılabilir.



Şekil 6.5 : Model öngörülü kontrol içeren sistemin blok diyagramı, [63].

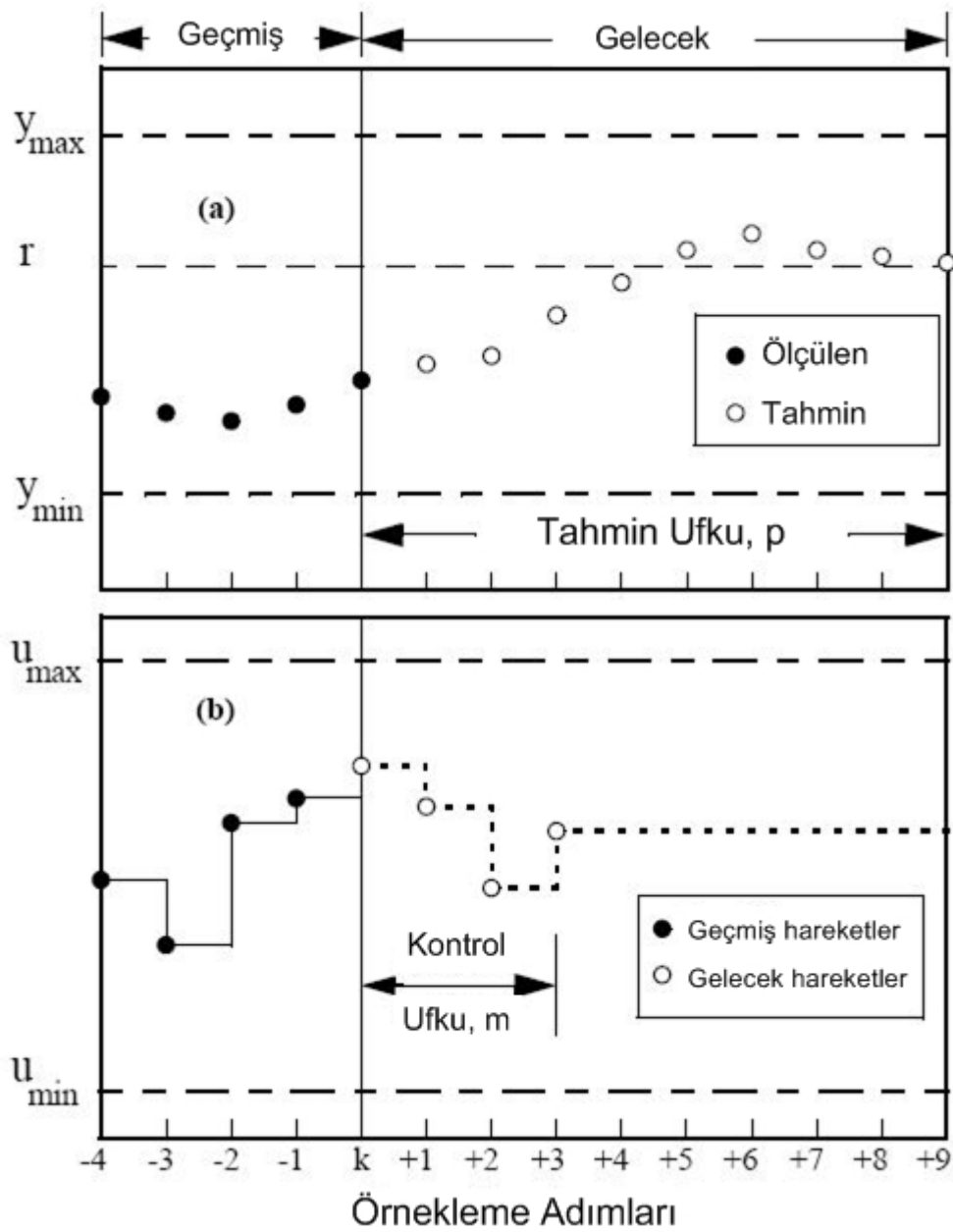
Şekil 6.6'da ise yukarıda sistem modeliyle birlikte verilen model öngörülü kontrolcü daha yakından ve detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.6 : MPC'nin temel yapısı, [60].

Tahmin ufkunun uzunluğu boyunca belirlenen tahmini sistem çıkışları tahmin modeli kullanılarak belirlenir. Bu tahmini sistem çıkışları o ana kadar olan geçmiş sistem giriş ve çıkışları ile gelecekte hesaplanan kontrol sinyaline dayanmaktadır. Gelecekteki kontrol sinyali, optimizasyon algoritması tarafından sistem çıkışlarını referans (istenen) değerlere tutacak şekilde hesaplanır. Bu optimizasyon değer fonksiyonu genellikle tahmini sistem çıkışları ile referans girişler arasındaki hatanın karesel (quadratic) fonksiyonu olacak şekilde alınır [60].

Şekil 6.7’de sistem çıkışlarının ve kontrol sinyalinin (sistem girişi) değişimi bir örnek üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 6.7 : Sinyal değişimleri: (a) Sistem çıkışı sinyali. (b) Kontrol sinyali, [64].

Şekil 6.7’de üstteki grafikte siyah noktalar geçmiş, ölçülmüş sistem çıkışlarını göstermektedir. İçi beyaz noktalar ise tahmin modeli tarafından hesaplanan tahmini çıkışları göstermektedir. Alttaki grafikte ise içi beyaz noktalar optimizasyon algoritması kullanılarak kontrol ufkunda belirlenen kontrol hareketlerini göstermektedir. Her iki grafikte gösterilen maksimum ve minimum değerler çıkışların ve girişlerin kısıtlarını göstermektedir. Her zaman aralığında tahmin modeli, tahmini sistem davranışını belirlemekte ve yine her zaman aralığında optimizasyon ile kontrol kısıtları ($u_{\min}$, $u_{\max}$) gözönünde bulundurularak hesaplanan kontrol hareketiyle (u), tahmini sistem çıkışının (y) çıkış kısıtları ($y_{\min}$, $y_{\max}$) arasında referansı izlemesi sağlanmaktadır.

Model öngörülü kontrolcü, model tabanlı bir kontrol yöntemi olduğu için kontrolcü performansı modelleme hatalarına karşı duyarlıdır. Ancak kontrolcünde geribesleme kullanıldığı için bu hatalar kompanse edilebilmekte ayrıca bozucu etken giderilmesi (disturbance rejection) yapılabilmektedir.

6.3.2 Model öngörülü kontrolcü tasarımı

Bu bölümde, bir önceki bölümde temelleri verilmeye çalışılan model öngörülü kontrol yönteminin bu çalışma için uygulanırken yapılan tasarım aşamaları anlatılmıştır. Öncelikle model öngörülü kontrolcünde kullanılan tahmin modelinin durum uzay modeli aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{6.1}$$

burada

$$x = [\beta \quad r]^T \quad u = [\delta_f \quad M]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-(C_{ro} + C_{fo})\mu}{mV} & -1 + \frac{(C_{ro}l_r - C_{fo}l_f)\mu}{mV^2} \\ \frac{(C_{ro}l_r - C_{fo}l_f)\mu}{J} & \frac{-(C_{ro}l_r^2 + C_{fo}l_f^2)\mu}{JV} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{C_{fo}\mu}{mV} & 0 \\ \frac{C_{fo}l_f\mu}{I_z} & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{dir.}$$

(6.1)’de verilen durum uzay modeli, sanal sensör tasarımı bölümünde kullanılan doğrusal tek izli taşıt modelinin sistem girişleri yeniden düzenlenerek elde edilmiştir.

Sistem girişlerinde δ_r yerine M gelmiş ve buna bağlı A ve B matrisleri düzenlenmiştir.

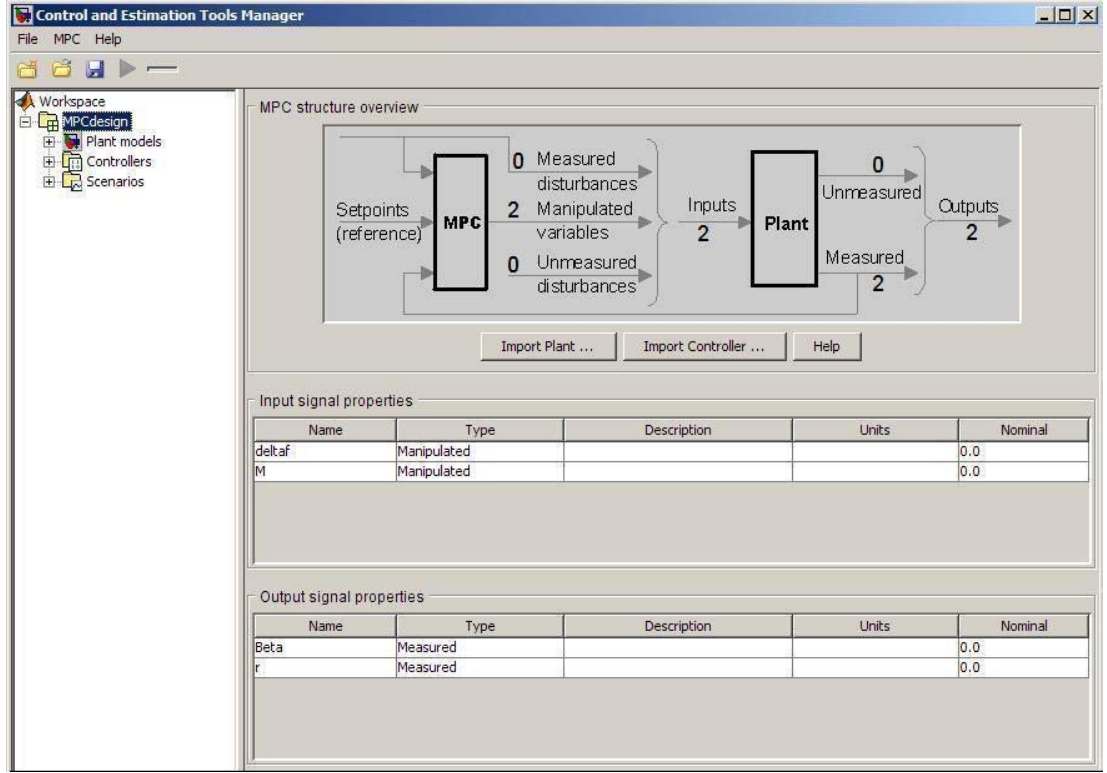
Çalışmada kontrolcü tasarımı “Model Predictive Toolbox v.3” adlı Matlab eklentisi kullanılmıştır. Şekil 6.8’de bu araç kutusuna ait ekran görüntüsü görülmektedir. Bu eklenti yardımıyla tasarlanan kontrolcüler tasarım sırasında doğrusal taşıt modeli kullanılarak daha sonrada doğrusal olmayan tek izli taşıt modelinde ve yüksek serbestlik dereceli ve yüksek güvenilirlikli CarMaker taşıt modelinde sınanmıştır. Not olarak belirtilmelidir ki Matlab Model Predictive Toolbox kullanılarak tasarımdan önce sürekli şekilde (6.1)’de verilen sistem modeli, ayrık zamana çevrilmiştir. Model öngörülü kontrolcü tasarımı önemli noktalardan biri olan optimizasyon işlemi de, (6.2) nolu denklemde belirtilen Model Predictive Toolbox’ta bulunan değer fonksiyonu minimize edilerek gerçekleştirilmiştir.

$$J(\Delta u, \varepsilon) = \min \left[\sum_{i=1}^{p-1} [y(k+i+1|k) - r(k+i+1)]^T Q [y(k+i+1|k) - r(k+i+1)] + \dots \right. \\ \left. \dots + \Delta u(k+i+1|k)^T R_{\Delta u} \Delta u(k+i+1|k) + \dots \right. \\ \left. \dots + u(k+i|k)^T R_u u(k+i|k) + \rho_\varepsilon \varepsilon^2 \right] \quad (6.3)$$

burada

$$Q = \begin{bmatrix} w_{y11}^2 & 0 \\ 0 & w_{y22}^2 \end{bmatrix}, R_{\Delta u} = \begin{bmatrix} w_{\Delta u11}^2 & 0 \\ 0 & w_{\Delta u22}^2 \end{bmatrix} \text{ ve } R_u = \begin{bmatrix} w_{u11}^2 & 0 \\ 0 & w_{u22}^2 \end{bmatrix} \text{ göstermektedir.}$$

(6.3) nolu denklemde ve takip eden matrislerde u sistem girişlerini (manipüle edilen değişkenler veya kontrolcü çıkışları da denebilir), Δu girişlerin değişim hızını, y sistem çıkışlarını, w_i , alt indis i sistem girişlerini, girişlerin değişim hızını ve sistem çıkışlarını belirtmek üzere ilgili değişkenlere ait ağırlıkları belirtmektedir. (6.3) nolu optimizasyon değer fonksiyonunda görülen ε ; u , Δu ve y üzerindeki kısıtları bir miktar gevşeten (slack) bir elemandır. ε ’nin önündeki ρ_ε bu elemana ait ağırlığı göstermektedir. Matlab tarafından ön tanımlı değerler kullanıldığında tüm giriş kısıtları çok sıkı olarak alınmakta, çıkış kısıtları ise biraz daha gevşek tutulmaktadır [64]. Buradaki taşıt yanal dinamiği probleminde giriş kısıtları önemli olup, çıkışlara kısıt sınır dahi konulmadığından burada ön tanımlı değerler ve diğer ağırlıklara göre otomatik tespit edilen değerler kullanılmıştır.



Şekil 6.8 : Matlab MPC araç kutusu ekran görüntüsü.

Çizelge 6.1’de kontrolcü tasarımında kullanılan tasarım kriterleri verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Model öngörülü kontrolcü tasarım kriterleri.

Kriter	Seçilen değerler
Örnekleme zamanı	$T = 0.001 \text{ s}$
Tahmin ufku uzunluğu	$p = 15$
Kontrol ufku uzunluğu	$m = 2$
Giriş kısıtları	$\delta_{f \min} = -15 \text{ derece}$ $\delta_{f \max} = 15 \text{ derece}$ $M_{\min} = -10000 \text{ Nm}$ $M_{\max} = 10000 \text{ Nm}$
Giriş kısıtları değişim hızı	$\Delta \delta_{f \min} = -1 \text{ derece}$, $\Delta \delta_{f \max} = 1 \text{ derece}$ $\Delta M_{\min} = -100 \text{ Nm}$ $\Delta M_{\max} = 100 \text{ Nm}$

Sistem durumları olan β ve r üzerinde herhangi bir kısıtlama yapılmamıştır.

Tasarım sırasında kullanılan ve ince ayarlanan çıkış, giriş ve giriş değişim hızı ağırlıkları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Seçilen ağırlık değerleri.

Ağırlıklar	Değerler
Giriş	$w_{u11} = 0$
	$w_{u22} = 0$
Giriş değişim hızı	$w_{\Delta u11} = 4.5 \times 10^{-4}$
	$w_{\Delta u22} = 4.5 \times 10^{-4}$
Çıkış	$w_{y11} = 2.2255$
	$w_{y22} = 2.2255$

Manipüle edilen değişkenlerin (sistem girişlerinin) ağırlığı sıfır alınarak, giriş kısıtları arasında bu değişkenlerin istediği değeri alabilmesi sağlanmıştır. Manipüle edilen değişkenlerin değişim hızları ağırlıkları oldukça küçük alınarak kontrolcü tepki süresi hızlandırılmış, istenen değere oturma süresi kısaltılmıştır. Sistem çıkışlarının ise ağırlıkları eşit alınarak hem savrulma açısal hızı kontrolüne, hem de taşıt yana kayma açısı kontrolüne eşit ağırlık verilmiştir.

Kontrolcüde kullanılan tahmin modeli hıza bağlı olarak 20m/s'den başlayarak 10m/s'lik aralıklarla 70m/s'ye kadar farklı farklı hesaplanmış ve buna göre farklı 6 adet model öngörülü kontrolcü tasarlanmıştır. Böylece çoklu model öngörülü kontrolcü oluşturulmuştur. Bu kontrolcülerin benzetimler sırasında seçim ve anahtarlama işlemi yazılan bir kontrolcü seçim algoritması ile sağlanmıştır. Bu algoritmaya ait detaylar Çizelge 6.3'te verilmiştir. Kontrolcü seçim algoritması özellikle yüksek hızlarda, tek bir hıza göre örneğin 20m/s hız için yapılan tasarıma göre daha başarılı sonuçlar vermektedir.

Çizelge 6.3 : Kontrolcü seçim algoritması.

Taşıt hızı [m/s]	Seçilen kontrolcü	Tahmin modelinde alınan hız değeri [m/s]
$V < 25$	Kontrolcü 1	20
$25 \leq V < 35$	Kontrolcü 2	30
$35 \leq V < 45$	Kontrolcü 3	40
$45 \leq V < 55$	Kontrolcü 4	50
$45 \leq V < 55$	Kontrolcü 5	60
$V \geq 65$	Kontrolcü 6	70

6.4 Alt Kontrolcü Tasarımı

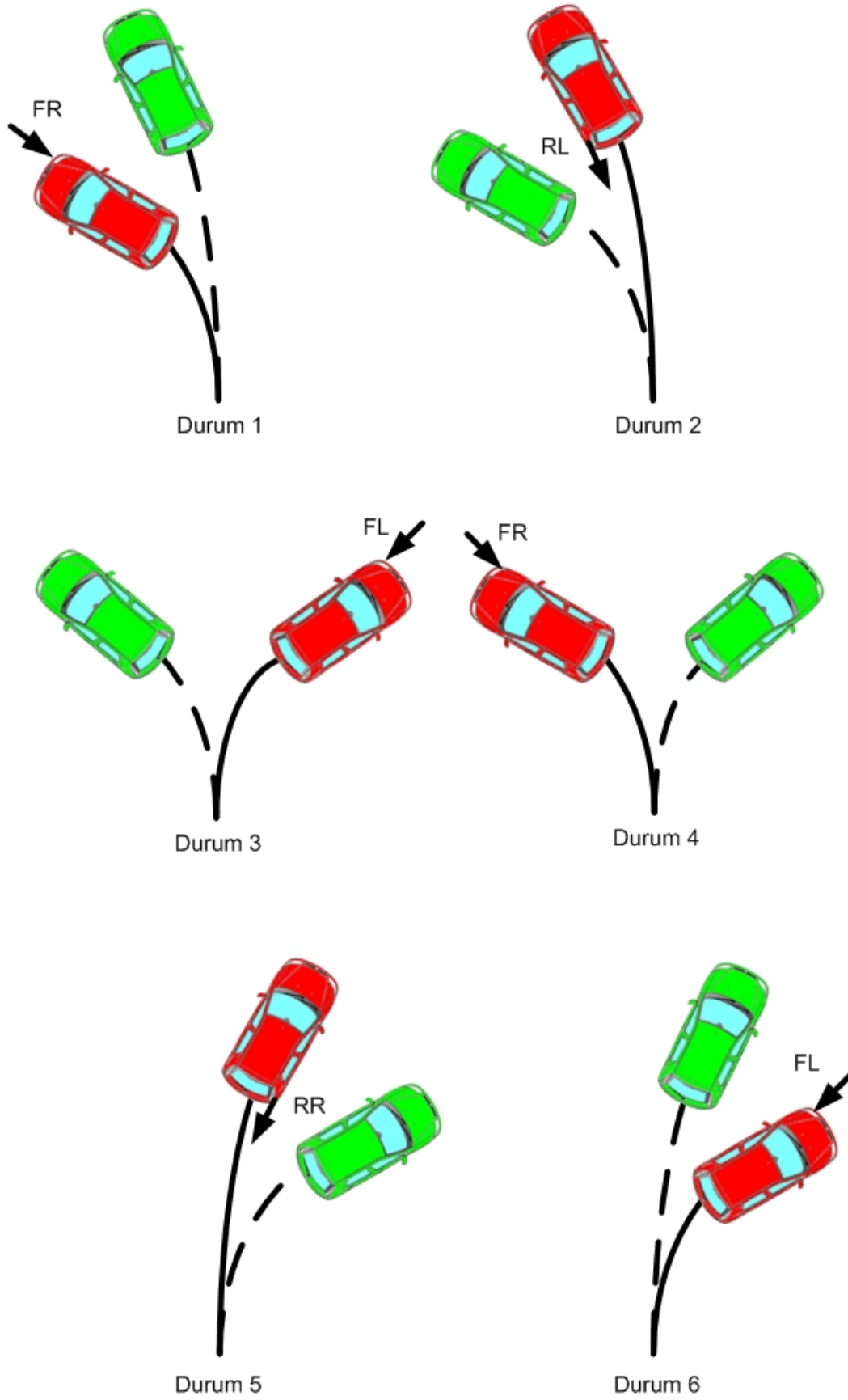
Model öngörülü kontrolcü çıkışında elde edilen kontrol momentinin taşıta etki ettirilmesi, taşıt tekerleklerine tekil frenleme ile müdahale edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Tekil frenleme dağılımı (fren torklarının dağılımı) için kural tabanlı bir alt kontrol algoritması yazılmıştır. Bu algoritma yazılırken şu şekilde bir yöntem izlenmiştir; önce taşıtta olabilecek tüm savrulma açısal hızı ve istenen savrulma açısal hızı durumları listelenmiştir. Örneğin, Çizelge 6.4'te Durum 1'de taşıt savrulma açısal hızı sıfırdan büyük iken, istenen savrulma açısal hızı da sıfır ve sıfırdan büyük olduğu durum ve birbirleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Bu şekilde, tek bir tekerleğin frenlenerek taşıtın savrulma açısal hızının, istenen savrulma açısal hızına yaklaştırılması durumunda toplam altı farklı durum vardır [57]. Daha sonra, bu altı farklı durum için hangi tekerleğin tek başına frenlenmesi gerektiği belirlenmiştir. Çizelge 6.4'te ve görsel olarak da Şekil 6.9'daki taşıt durumları ve frenlenmesi gereken tekerlekler belirtilmiştir.

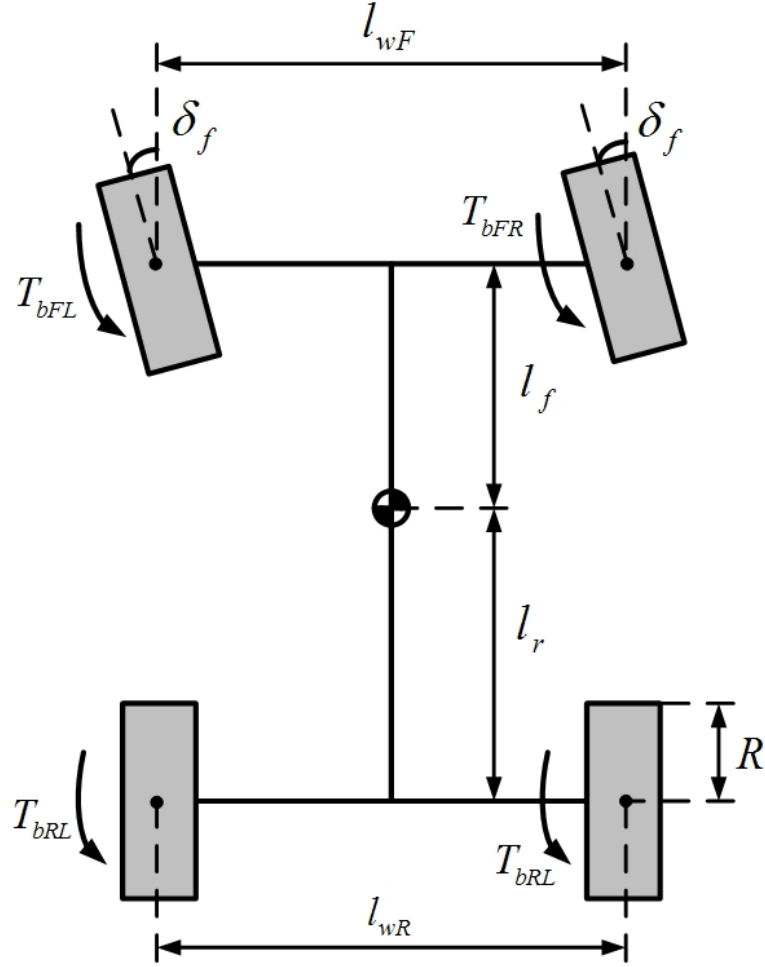
Çizelge 6.4 : Alt kontrolcü tasarımı taşıt durumları.

Durum	Taşıt savrulma açısal hızı	İstenen savrulma açısal hızı	Birbirlerine göre durumları	Frenlenmesi gereken tekerlek
1	$r > 0$	$r_{ist} \geq 0$	$r_{ist} < r$	Ön sol (FL)
2	$r \geq 0$	$r_{ist} > 0$	$r_{ist} > r$	Arka sağ (RR)
3	$r < 0$	$r_{ist} \geq 0$	$r_{ist} > r$	Ön sağ (FR)
4	$r > 0$	$r_{ist} < 0$	$r_{ist} < r$	Ön sol (FL)
5	$r \leq 0$	$r_{ist} < 0$	$r_{ist} < r$	Arka sol (RL)
6	$r < 0$	$r_{ist} < 0$	$r_{ist} > r$	Ön sağ (FR)

Kontrolcünden elde edilen kontrol momenti (M), tekerlek yarıçapı, ön ve arka taşıt iz genişlikleri, taşıt ön ve arka aksının ağırlık merkezine uzaklıkları ve ön tekerlek dönüş açıları kullanılarak her bir tekerlek için gereken frenleme torku taşıt geometrisi ve kinematiğinden yararlanılarak bulunabilir [58]. Hesap için gerekli taşıt parametreleri ve sonuçta elde edilecek torklar Şekil 6.10'daki taşıt şematik gösteriminde belirtilmiştir.



Şekil 6.9 : Taşıt durumları şematik gösterimi.



Şekil 6.10 : Torklar için taşıt şematik görünüşü.

(6.4) ve (6.5) nolu denklemlerde fren torklarının hesabı için kullanılan bağıntılar verilmiştir [58]. Ön sol ve ön sağ tekerlekler için olan denklemler ile arka sol ve sağ tekerlekler için olan denklemler aynıdır. Denklemler arasındaki fark genel olarak ön tekerleklerin dönüşünün etkisinden ve taşıtın ön ve arka bölümlerine ait parametrelerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

$$T_{bFL} = T_{bFR} = \frac{|M|R}{\sin \left[\arctan \left(\frac{(l_{wF}/2)}{l_f} \right) - \delta_f \right] \sqrt{l_f^2 + (l_{wF}/2)^2}} \quad (6.4)$$

$$T_{bRL} = T_{bRR} = \frac{|M|R}{\sin \left[\arctan \left(\frac{(l_{wR}/2)}{l_r} \right) \right] \sqrt{l_r^2 + (l_{wR}/2)^2}} \quad (6.5)$$

Algoritma girişi savrulma açısal hızı (r), istenen savrulma açısal hızı (r_{ist}), kontrolcü moment çıkışı (r_{ist}), ön tekerleklerin dönme açısı (δ_f), çıkışı ise tekerlekler için fren

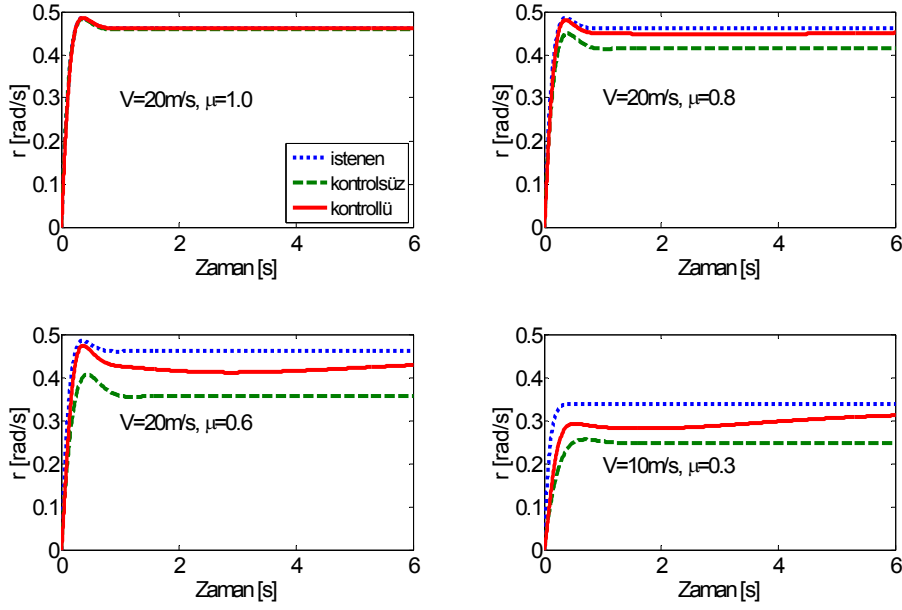
torkları (T_{bFR} , T_{bFL} , T_{bRR} ve T_{bRL}) olmak üzere gömülü Matlab m kodu olarak oluşturulmuştur. Bu kod Simulink programında hazırlanan genel taşıt yanal dinamiği kontrol algoritmasının içine yerleştirilmiştir.

7. KONTROLCÜ TASARIMININ SINANMASI

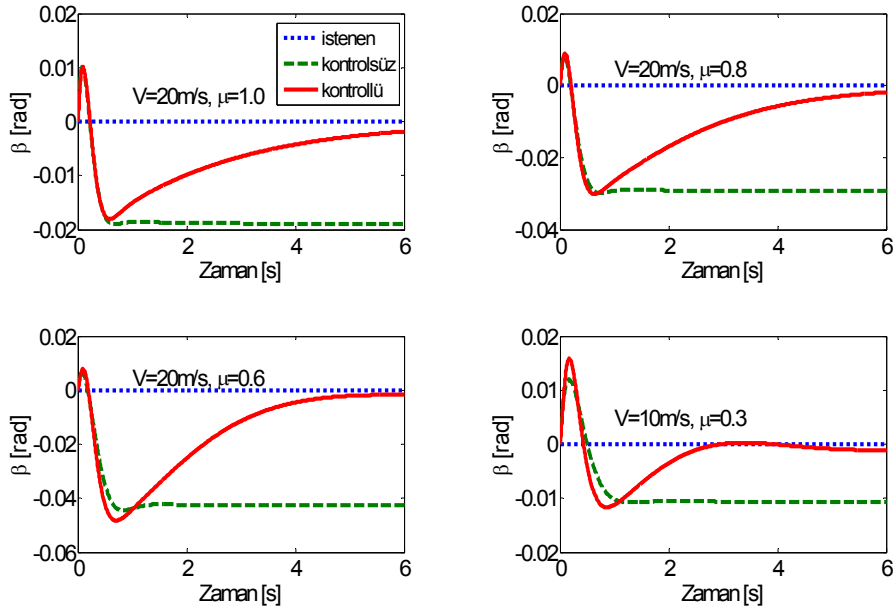
Altıncı bölümde üst ve alt kontrolcü bölümleri olarak tasarlanan taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü bu bölümde test edilmiştir. Önce taşıt modeli olarak doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli kullanılarak çeşitli benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimler iki farklı step direksiyon girişi ve bir step bozucu moment girişi için yapılmıştır. Benzetim koşullarında hız ve tekerlek yol sürtünme katsayısı manipüle edilerek değiştirilmiştir. Böylece kontrolcü geniş bir aralıkta test edilmiştir. Farklı özelliklerdeki benzetimlerden üçü için stroskopik çizimlerde verilerek görsel olarak taşıtın izlediği yörünge gösterilmiştir. CarMaker taşıt modeli kullanılan benzetimlerde üç farklı step direksiyon girişi kullanılmıştır. Birbirlerinden farklı özellik gösteren üç farklı hız ve tekerlek yol sürtünme katsayısı kullanılarak kontrolcü sınanmıştır.

7.1 Tek İzli Taşıt Modeli Kullanılarak Yapılan Benzetim Sonuçları

Şekil 6.3'te gösterilen kontrol stratejisi kullanılarak doğrusal olmayan taşıt modeli kullanılarak aşağıda gösterilen benzetim sonuçları elde edilmiştir. Direksiyon ile tekerlekler arasındaki çevrim oranı hem bu bölümdeki doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli için, hem de sonraki bölümdeki CarMaker taşıt modeli için 1/15 olarak alınmıştır. Doğrusal olmayan taşıt modeli için yapılan ilk benzetim çalışmasında direksiyon açısı 90° alınmıştır. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de görülen grafikler üzerinde benzetimde kullanılan taşıt hızı ve tekerlek yol sürtünme katsayısı belirtilmiştir. Sonuçlar kontrol edilmesi gereken savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı için ayrı ayrı verilmiştir. Noktalı çizgi istenen değeri, kesikli çizgi kontrolsüz durumu, normal çizgi kontrollü taşıtı göstermektedir. Bu sonuçları sağlamak için gerekli kontrol sinyallerinin (ön tekerlek dönüş açıları ve kontrol momenti) değişimleri Ek C'de gösterilen Şekil C.1 ve Şekil C.2'de verilmiştir. Şekil 7.3'te ise dört sonuç arasından seçilen bir durum için ($V = 20 \text{ m/s}$, $\mu = 0.6$) taşıtın izlediği yol (taşıt yörüngesi) verilmiştir.

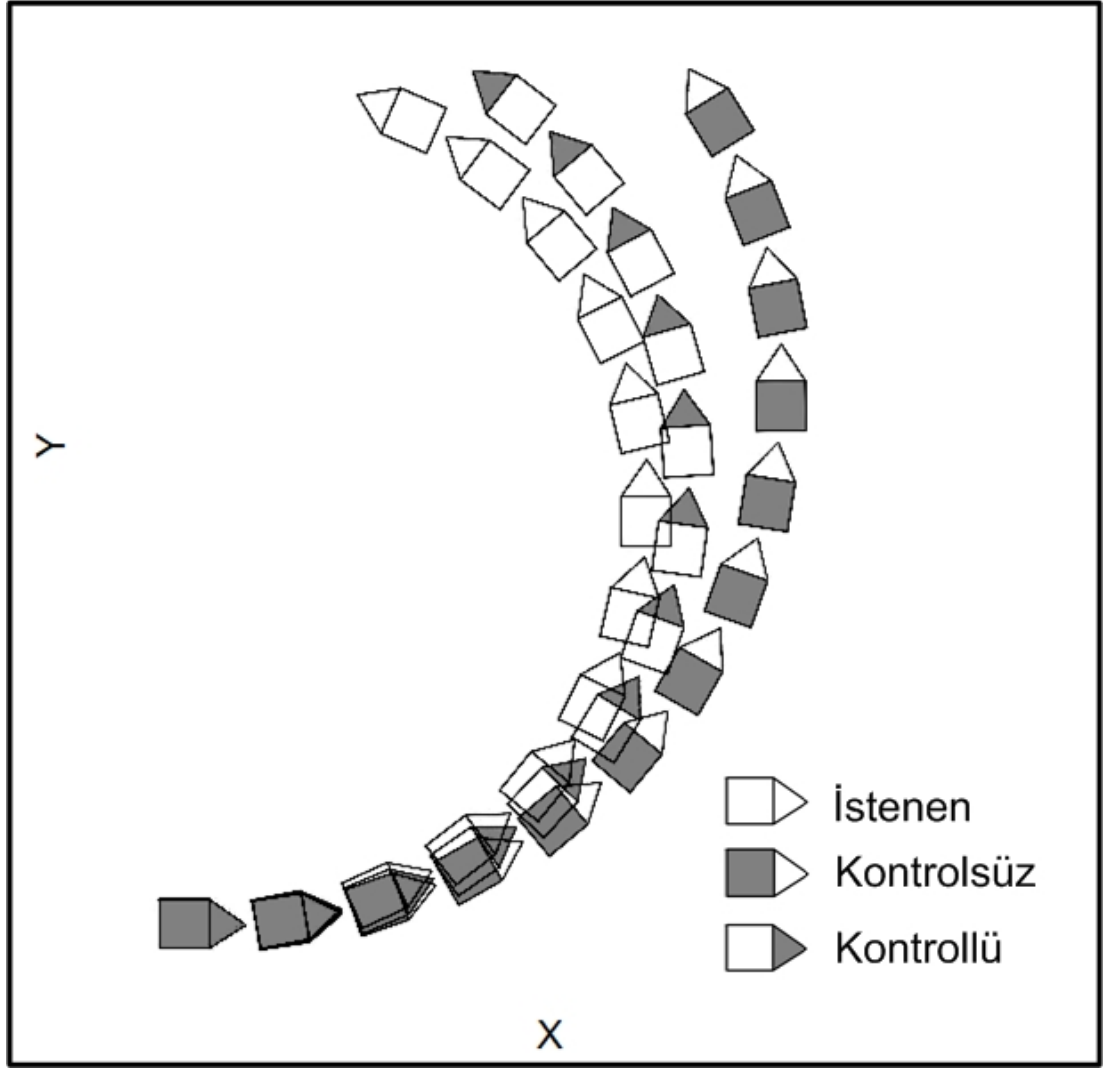


Şekil 7.1 : Benzetim 1 , savrulma açısal hızı değişimi, $\delta_s = 90^\circ$, $M_{zd} = 0$.



Şekil 7.2 : Benzetim 1, taşıt yana kayma açısı değişimi, $\delta_s = 90^\circ$, $M_{zd} = 0$.

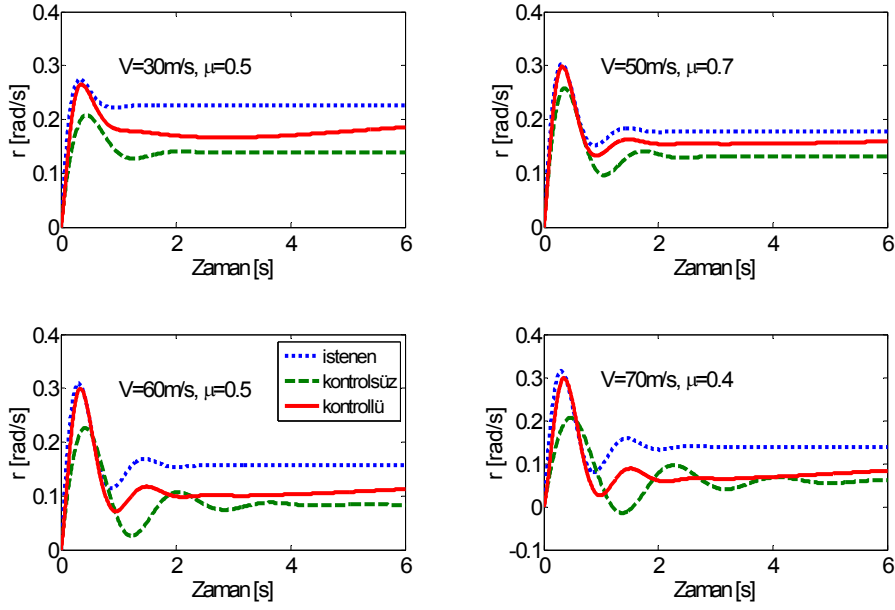
İstenen savrulma açısal hızı tek izli taşıt modelinden elde edilen savrulma açısal hızıdır, çalışmada taşıt yana kayma açısı ise sıfırda tutulmak istenmiştir. Çıkan sonuçlar oldukça başarılıdır. Şekil 7.3'te ise istenen, kontrolsüz ve kontrollü taşıtın izlediği yol gösterilmiştir. Kontrollü sistemin başarısı burada görülmektedir.



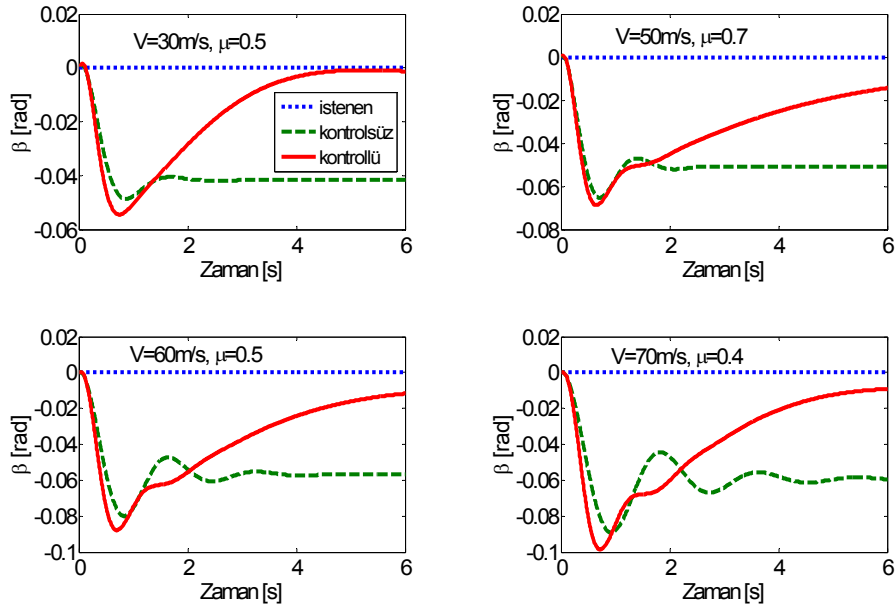
Şekil 7.3 : Benzetim 1, $V = 20 \text{ m/s}$, $\mu = 0.6$ durumu, taşıt yörüngesi.

Doğrusal olmayan tek izli taşıt modeli için yapılan ikinci benzetimlerde, direksiyon açısı ilk benzetimden farklı olarak 45 derece alınmıştır. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te grafikler üzerinde gösterilen hız ve tekerlek yol sürtünme katsayısı değerleri için benzetimler yapılmıştır. Hız ve tekerlek-yol sürtünme katsayısı değerleri geniş bir yelpazeden seçilmiştir. Böylece kontrolcü zor koşullarda sınanmıştır.

İkinci benzetimler 96 km/sa (30m/s), 180 km/sa (50 m/s), 196 km/sa (60 m/s) ve 212 km/sa (70 m/s) gibi yüksek hızlar için yapılmıştır ve sonuçlar yine oldukça istenen değerler oldukça yakın çıkmıştır. Ek C'de Şekil C.3 ve Şekil C.4'te sisteme uygulanması gereken kontrol sinyallerinin değişimi verilmiştir.

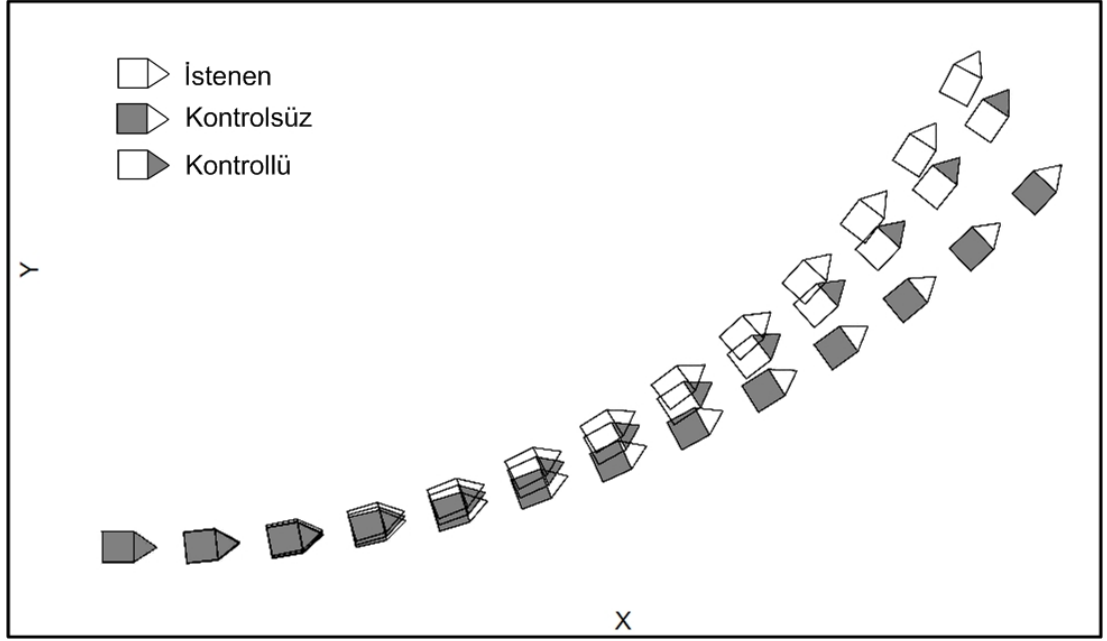


Şekil 7.4 : Benzetim 2 , savrulma açısal hızı değişimi, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$.

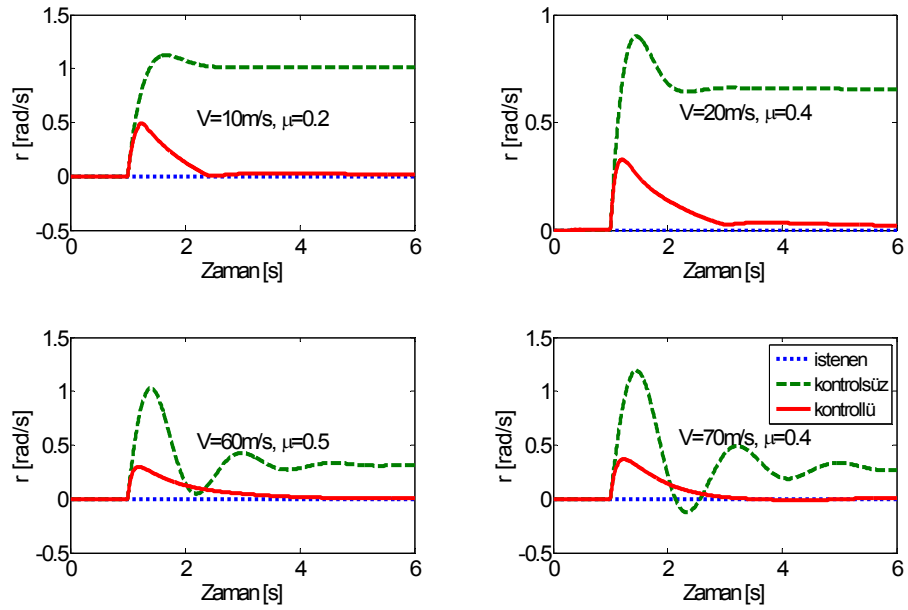


Şekil 7.5 : Benzetim 2 , taşıt yana kayma açısı değişimi, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$.

Şekil 7.6’te $V = 50\text{ m/s}$, $\mu = 0.6$ için istenen, kontrolsüz ve kontrollü taşıtın izlediği yol şematik olarak çizdirilmiştir. Kontrollü taşıt, kontrol sistemi bulunmayan taşıta göre istenen yörüngeye daha yakın seyretmektedir.



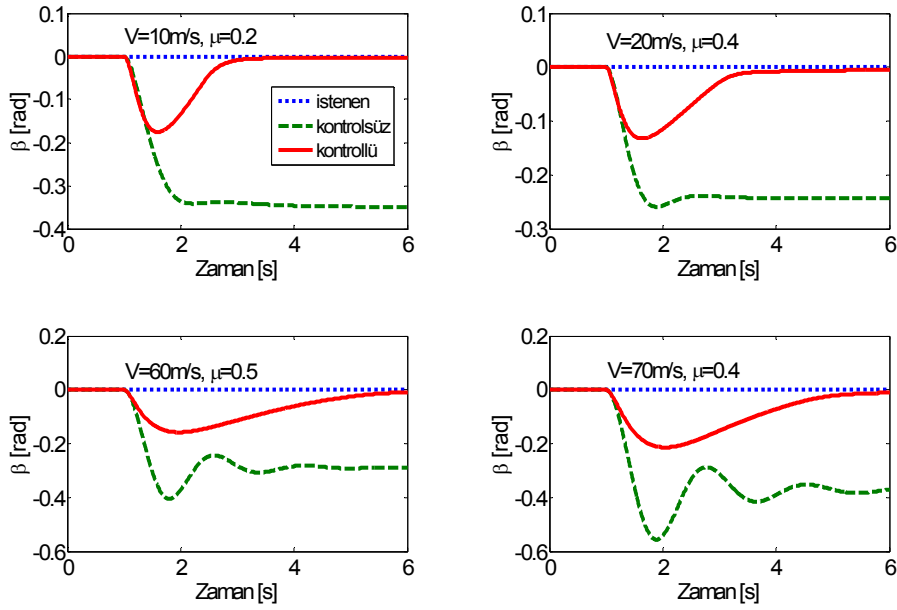
Şekil 7.6 : Benzetim 2, $V = 50 \text{ m/s}$, $\mu = 0.7$ durumu, taşıt yörüngesi.



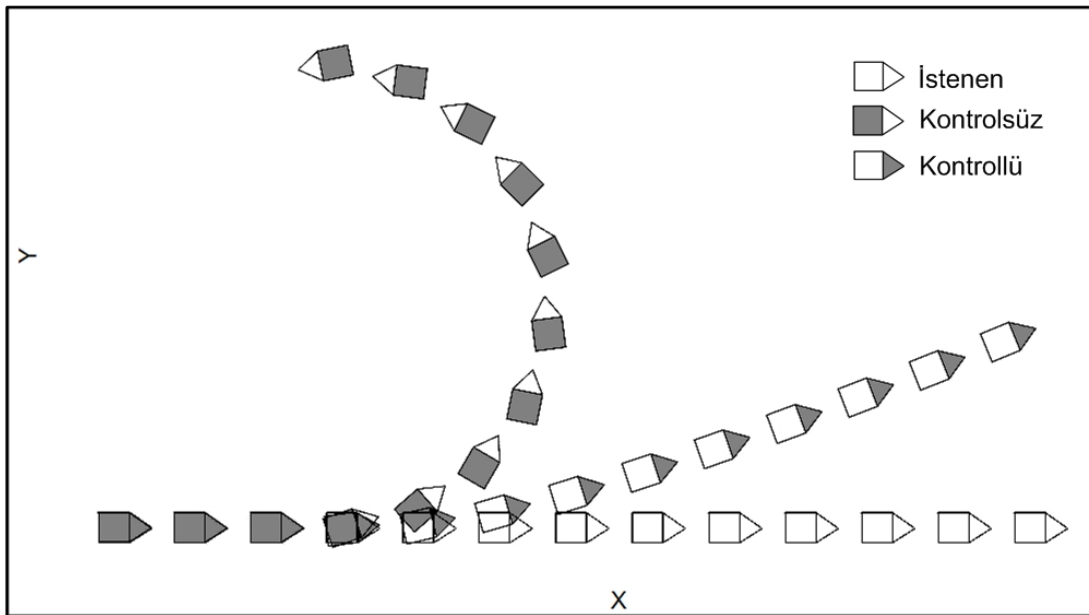
Şekil 7.7 : Benzetim 3 , savrulma açısız hızı değişimi, $\delta_s = 0$, $M_{zd} = 10000 \text{ Nm}$.

Yapılan üçüncü benzetimde direksiyon açısı sıfırda sabit tutularak, kontrolcünün taşıtın z ekseninde oluşan istenemeyen bozucu momente karşı görevini iyi yapıp yapmadığı sınanmıştır. Bu olay bir tünel çıkışında güçlü bir yan rüzgar etkisinde kalan bir taşıtın karşılaşılabileceği bir durumdur. Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de benzetim sonuçları verilmiştir. Burada amaç hem savrulma açısının, hem de taşıt yana kayma açısının sıfırda ve sıfıra yakın tutulmaya çalışılmasıdır. Gerekli

kontrol sinyalleri Ek C’de Şekil C.5 ve Şekil C.6’da tekerlek dönüş açısı ve kontrol momenti için olarak verilmiştir. Şekil 7.9’da ise $V = 20\text{ m/s}$, $\mu=0.4$ için taşıt yörüngesi verilmiştir. Sürücü kontrolsüz taşıtta sürüş hakimiyetini sağlayamamaktadır. Kontrollü taşıtta ise sürücü istediği rotada gidemese de taşıt kontrol edilebilir kalmaktadır.



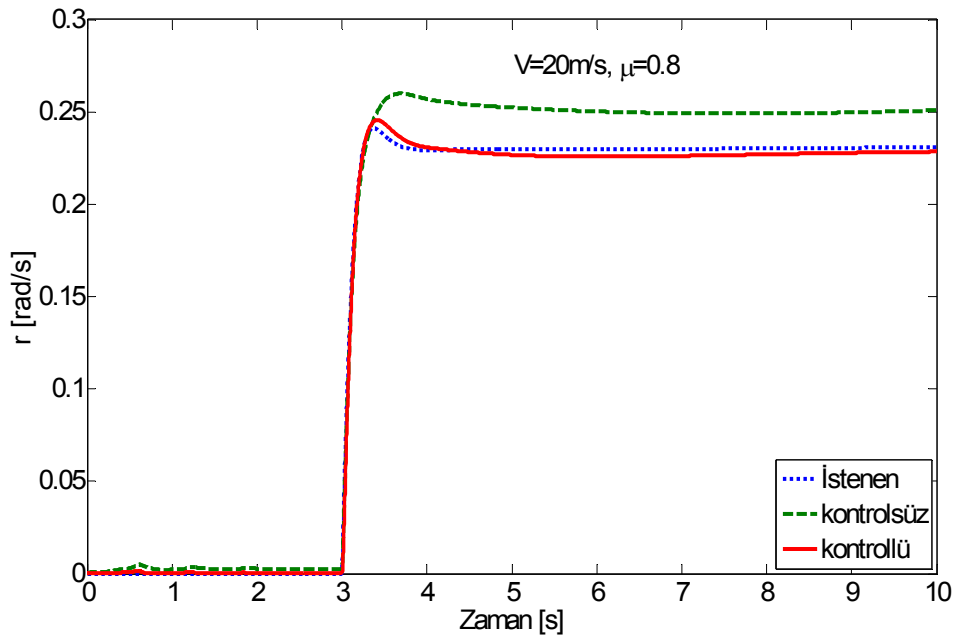
Şekil 7.8 : Benzetim 3 , taşıt yana kayma açısı değişimi, $\delta_s = 0$, $M_{zd} = 10000\text{ Nm}$.



Şekil 7.9 : Benzetim 3, $V = 70$, $\mu = 0.4$ durumu, taşıt yörüngesi.

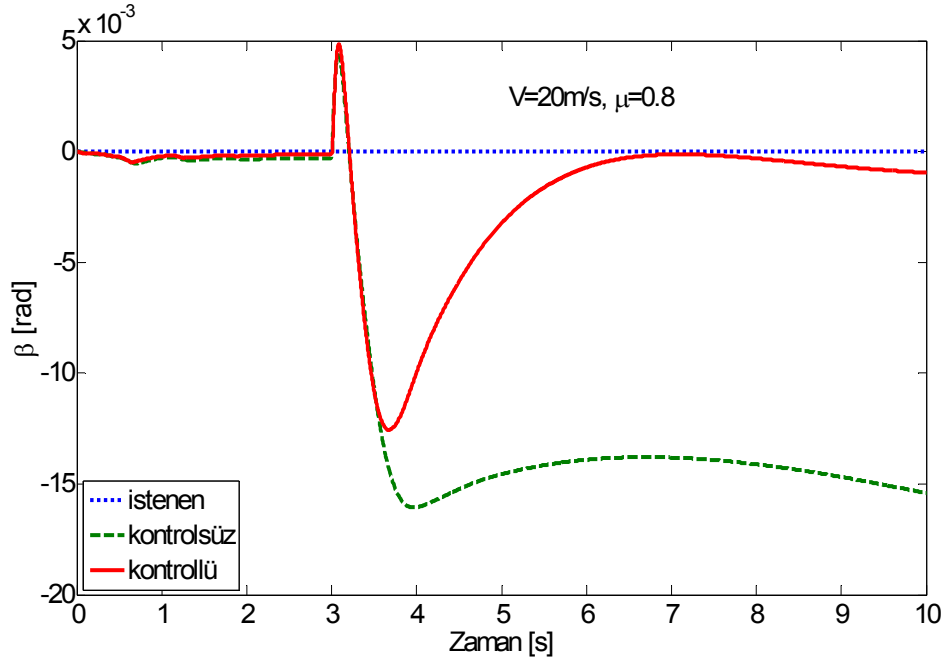
7.2 CarMaker Taşıt Modeli Kullanılarak Yapılan Benzetimler

Bölüm 6’da belirtildiği gibi tasarlanan taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü doğrusal olmayan tek izli taşıt modelinde denendikten sonra, bu bölümde üç farklı direksiyon açısı, taşıt hızı ve tekerlek yol sürtünme katsayısı için yüksek serbestlik dereceli CarMaker taşıt modelinde denenmiştir. Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de sırasıyla savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı için sonuçları görülen ilk benzetimde direksiyon açısı 45 derece, taşıt hızı 20 m/s (72 km/sa) ve tekerlek yol sürtünme katsayısı 0.8 olarak alınmıştır. Sonuçlar istenen savrulma açısal hızına ve istenen taşıt yana kayma açısına yakın ve oldukça başarılıdır.



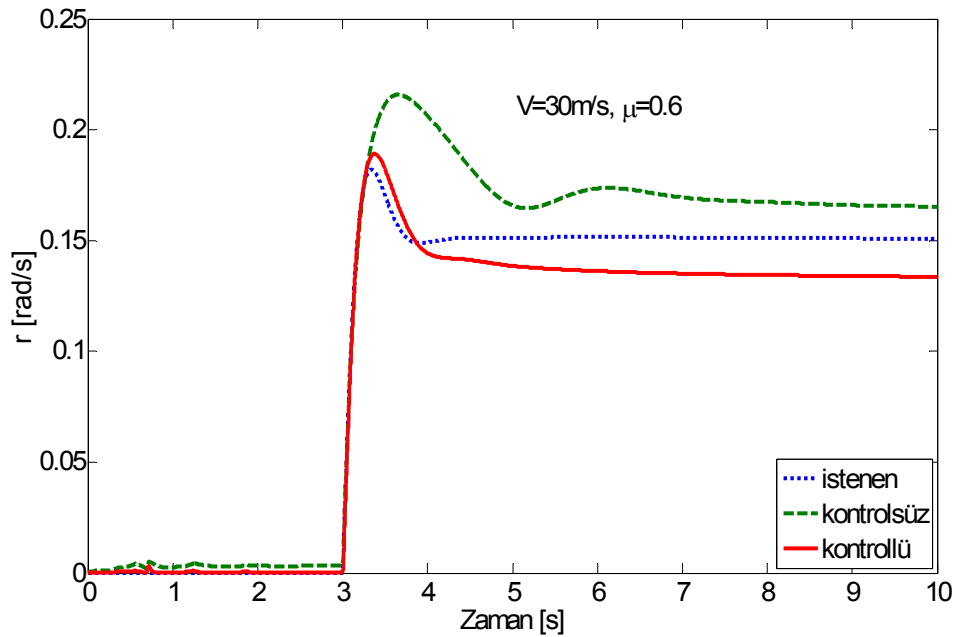
Şekil 7.10 : CarMaker benzetimi 1, savrulma açısal hızı, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$.

Gerekli kontrol sinyali değişimleri ön tekerlek dönüş açıları ve tekerlek fren tork olarak sırasıyla Şekil C.7 ve Şekil C.8’de verilmiştir. CarMaker taşıt modeli kullanılarak yapılan tüm benzetimlerde step giriş 3 saniyede verilmiştir, bunun nedeni oldukça gerçekçi bir model olan CarMaker modelinde en kısa olarak bu sürede sabit hızın sağlanmasıdır. İlk üç saniyede taşıt vites değiştirerek ilgili benzetim için istenen sabit hıza ulaşmaktadır. Bu bölüm sonuçlardan atılarak gerçekçilik bozulmak istenmiştir, bu yüzden benzetimlerde ilk üç saniyede çizdirilmiştir.

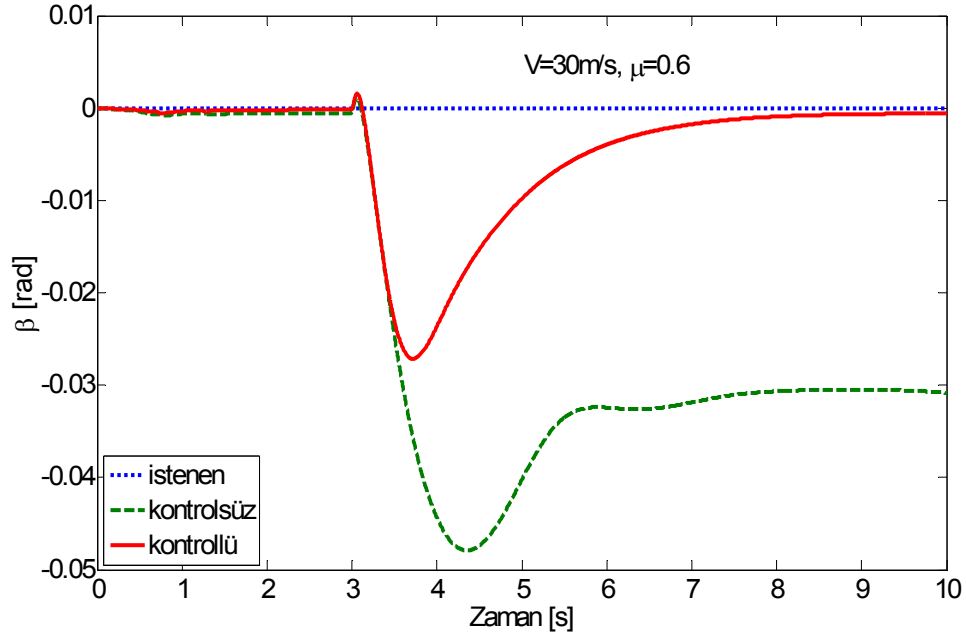


Şekil 7.11 : CarMaker benzetimi 1, taşıt yana kayma açısı, $\delta_s = 45^\circ$, $M_{zd} = 0$.

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'te sonuçları görülen ikinci benzetimde direksiyon açısı 30 derece, taşıt hızı 30 m/s (96 km/sa) ve tekerlek yol sürtünme katsayısı 0.6 olarak alınmıştır. Gerekli kontrol sinyali değişimleri ön tekerlek dönüş açıları ve tekerlek fren torkları olarak sırasıyla Şekil C.9 ve Şekil C.10'da verilmiştir. Burada da sonuçlar başarılı bulunmuştur.

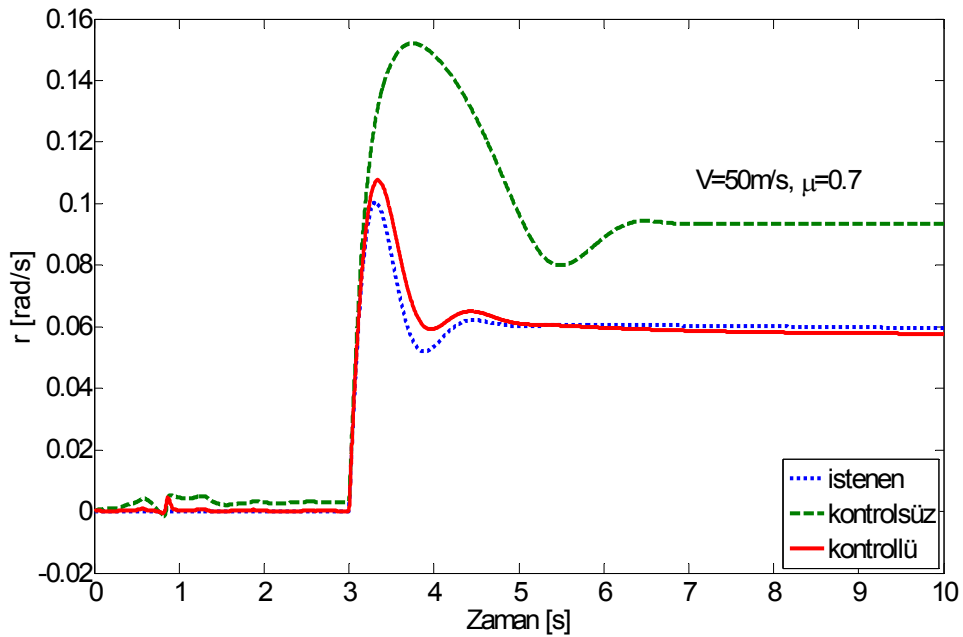


Şekil 7.12 : CarMaker benzetimi 2, savrulma açısal hızı, $\delta_s = 30^\circ$, $M_{zd} = 0$.

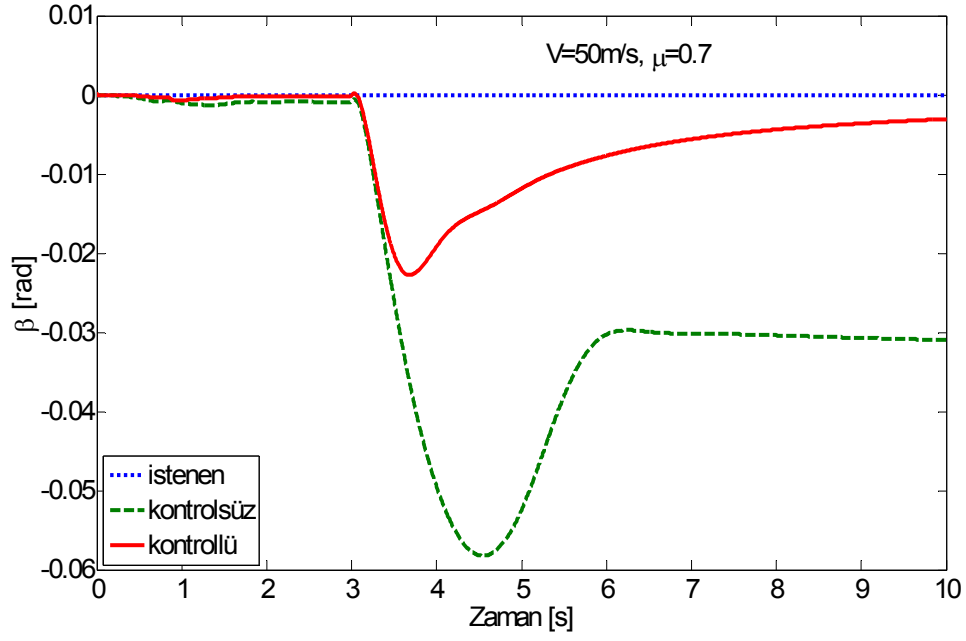


Şekil 7.13 : CarMaker benzetimi 2, taşıt yana kayma açısı, $\delta_s = 30^\circ$, $M_{zd} = 0$.

Üçüncü benzetimde direksiyon açısı 15 derece, taşıt hızı 50 m/s (180 km/sa) ve tekerlek yol sürtünme katsayısı 0.7 olarak alınmıştır. Oldukça yüksek hızda kontrolcü denenmiştir. Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'te görülen savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı istenen değere çok yakındır. Sonuçlar oldukça başarılı bulunmuştur.



Şekil 7.14 : CarMaker benzetimi 3, savrulma açısal hızı, $\delta_s = 15^\circ$, $M_{zd} = 0$.



Şekil 7.15 : CarMaker benzetimi 3, taşıt yana kayma açısı, $\delta_s = 15^\circ$, $M_{zd} = 0$.

Üçüncü CarMaker benzetimi için gerekli kontrol sinyali değişimleri ön tekerlek dönüş açıları ve tekerlek fren torkları olarak sırasıyla Şekil C.11 ve Şekil C.12’de verilmiştir.

8. SANAL SENSÖRLÜ TAŞITIN YANAL DİNAMİĞİNİN KONTROLÜ

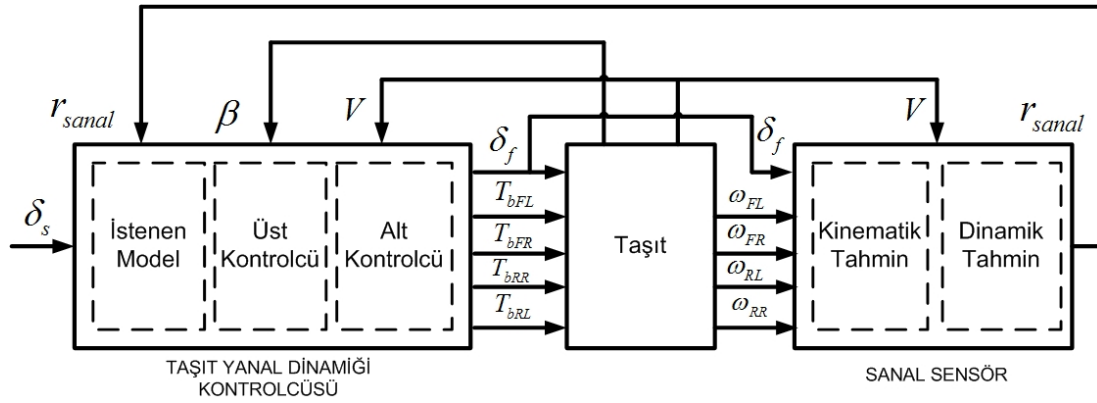
Bu tez çalışmasının ilk aşamasında savrulma açısal hızının sanal sensör kullanılarak tahmin edilmesi üzerinde durulmuştu. Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü tasarımı anlatılmıştı. Üst kontrolcünün model öngörülü kontrol yöntemi temel alınarak tasarlandığı, alt kontrolcünün ise tekil frenleme müdahalesine dayalı bir fren torku dağılım algoritması olduğu belirtilmişti. Taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü ile taşıt savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı istenen değerlere yakın tutulmaya çalışılmıştı. Bu bölümde ise çalışmada şuana kadar üzerinde durulan iki temel konu birleştirilmiş, sanal sensör içeren bir taşıtın yanal dinamiğinin kontrolü incelenmiştir.

İlk alt bölümde taşıt yanal dinamiği kontrol sistemi ile sanal sensörün nasıl birleştirildiği genel bir şekil üzerinden gösterilmiş ve bununla ilgili açıklamalar yapılmıştır. İkinci alt bölümde ise gerçekçi CarMaker taşıt modeli kullanılarak yapılan bir benzetimle; hem savrulma açısal hızıyla, taşıt yana kayma açısının istenen değerlerde tutulması, hem de savrulma açısal hızının tahmini test edilmiştir.

8.1 Sanal Sensör İle Taşıt Yanal Dinamiği Kontrolcüsünün Birleştirilmesi

Üçüncü ve dördüncü bölümde tasarım detayları anlatılan sanal sensör ile altıncı bölümde detayları verilen taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü Matlab/Simulink ortamında birleştirilmiştir. Sonuçta Şekil 8.1'deki genel blok diyagramında gösterilen sistem elde edilmiştir.

Şekil 8.1'de üç temel bölüm görülmektedir. Bu bölümler taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü, taşıt ve sanal sensördür. Taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü istenen model, üst kontrolcü ve alt kontrolcü alt bölümlerinden oluşmuştur. Taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü bloğuna direksiyon dönüş açısı, sanal sensör ile elde edilen savrulma açısal hızı, taşıt yana kayma açısı ve taşıt hızı girmekte, bloktan ise kontrol çıkışları olan ön tekerlek dönüş açıları ve her bir tekerleğe ait fren torkları çıkmaktadır.



Şekil 8.1 : Sanal sensör ve kontrolcü içeren sistemin blok diyagramı.

Taşıt olarak bahsedilen ikinci bölüm bu çalışmada CarMaker taşıt modeli olarak alınmıştır. Gerçek taşıt kullanılarak yapılabilecek testlerde bu bölüm taşıtın kendisi olacaktır. Taşıt bloğuna kontrolcünden gelen ön tekerlek dönüş açıları ile fren torkları girmekte ve taşıt hızı, taşıt yana kayma açısı ile her bir tekerleğe ait tekerlek açısall hızları bloktan çıkmaktadır.

Son bölüm olan sanal sensör bölümü, kinematik tahmin ve dinamik tahmin alt bölümlerinden oluşmuştur. Sanal sensör bloğuna ön tekerlek dönüş açıları, her bir tekerleğe ait tekerlek açısall hızları ile taşıt hızı girmekte ve bloktantahmin edilen savrulma açısall hızı çıkmaktadır.

Şekil 8.1’de de görüldüğü gibi taşıttan sağlanan hız ve yana kayma açısı bilgileri taşıt kontrolcüsüne iletilmektedir. Taşıt hızının ABS sistemi tarafından belirlendiği ve taşıt yana kayma açısının günümüz ESP’li taşıtlarında olduğu gibi bulunduğu (tahmin edildiği) düşünülmüştür. Taşıt yana kayma açısının tahmin edilmesi de savrulma açısall hızı tahmini gibi önemli ve başlı başına bir problemdir. Taşıt yana kayma açısı tahmini bu tez kapsamında ele alınmamıştır. Literatürde bu konuda pek çok çalışma bulunmaktadır. Örnek olarak [65-67] nolu kaynaklar verilebilir.

Taşıt kontrolcüsüne hız bilgisi sağlanarak çoklu (hıza bağlı değişen) model öngörülü taşıt kontrolcüsü gerçekleştirilmektedir. Böylece değişen hızlarda, tek bir hıza göre yapılan tasarıma nazaran daha iyi sonuçlar alınmaktadır.

Taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü için bilinmesi gereken diğer önemli değişken savrulma açısall hızı ise sanal sensör vasıtasıyla elde edilmektedir. Sanal sensöre giren tekerlek açısall hızları ABS’li taşıtlarda standart olarak bulunan tekerlek hız sensörleri tarafından okunarak elde edilmektedir.

Kontrol işleminin gerçek zamanlı bir şekilde sağlanması sanal sensör tarafından sağlanan savrulma açısı tahmininin doğruluğuna ve kalitesine bağlıdır. Bu da sanal sensör tasarımının önemini işaret etmektedir.

Sanal sensör tasarımı bölümünde bahsedildiği gibi, sanal sensöre ön tekerlek dönüş açıları, ABS tekerlek açısı hız sensörlerinden gelen bilgiler, taşıt hızı bilgisi ve gerekli taşıt parametre bilgileri girmekte ve tahmini savrulma açısı elde edilmektedir. Taşıtın kontrollü olması durumunda, sanal sensörde kullanılan ön tekerlek dönüş açıları bilgisi, kontrolcünden elde edilen dönüş açısı bilgisi olarak alınmakta, böylece daha iyi bir tahmin sağlanmaktadır. Çünkü gerçek olarak tekerleklerde oluşan dönme, kontrolcü sinyali ile kablolu direksiyon sisteminin ön tekerlekleri döndürmesiyle elde edilmektedir. İlgili kablo kontrollü direksiyon sisteminin yapısı altıncı bölümde Şekil 6.4'te gösterilmişti.

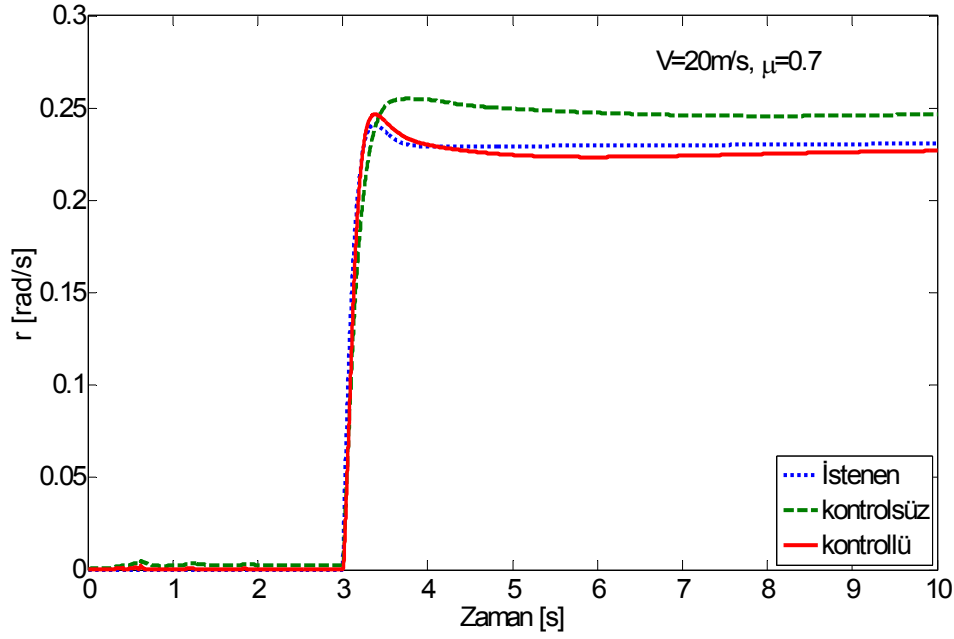
8.2 CarMaker Taşıt Modeli Kullanılarak Yapılan Benzetimler

Bu bölümde gerçekçi CarMaker taşıt modeli kullanılarak Şekil 8.1'de görülen blok diyagramı esas alınarak hem sanal sensör, hem de taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü yapılan bir benzetim çalışmasıyla test edilmiştir.

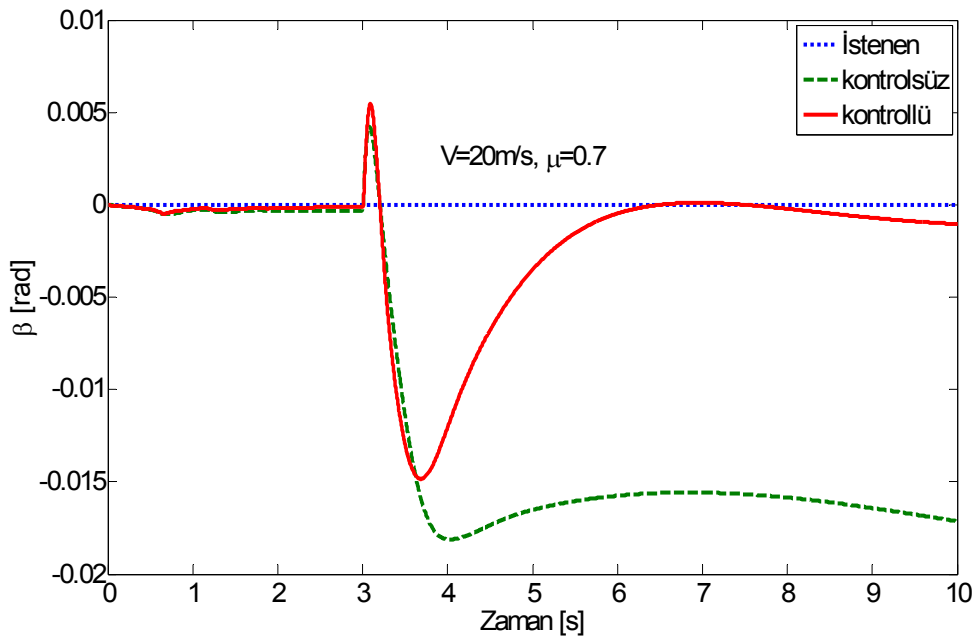
Taşıt modeli, sanal sensör ve taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü Matlab/Simulink ve CarMaker programları yardımıyla kurulmuştur. Benzetimde direksiyon açısı 45 derece, taşıt hızı 20 m/s (72 km/sa) ve tekerlek yol sürtünme katsayısı 0.7 olarak alınmıştır.

Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'te savrulma açısı ve taşıt yana kayma açısı için istenen, kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar görülmektedir. Burada hem kontrollü, hem de kontrolsüz taşıtta savrulma açısı sanal sensör yardımıyla bulunmuş, sanal sensör içeren kontrolsüz ve kontrollü taşıtın savrulma açısı ve taşıt yana kayma açısı değişimleri karşılaştırılmak istenmiştir.

Kontrollü taşıt için savrulma açısı tek izli taşıt modelinden elde edilen istenen savrulma açısına oldukça yakındır. Aynı şekilde kontrollü taşıtta, taşıt yana kayma açısı için de istenen değere oldukça yakın başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu şekilde önceki bölümlerde tasarlanan kontrolcü, gerekli savrulma açısının sanal sensörden elde edildiği bir benzetim ortamında başarıyla denenmiştir.

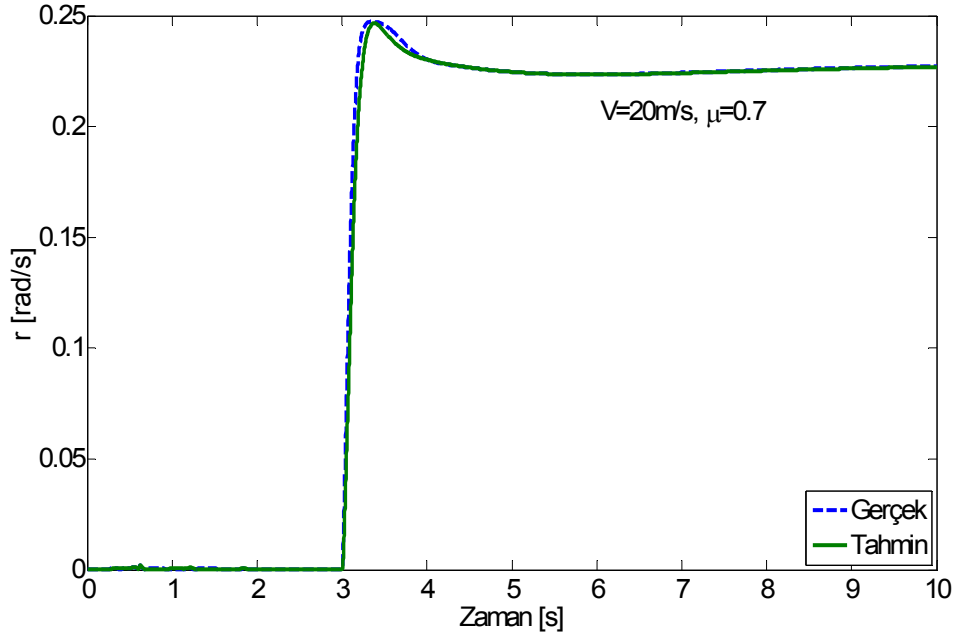


Şekil 8.2 : Savrulma açısal hızı sonucu.



Şekil 8.3 : Taşıt yana kayma açısı sonucu.

Şekil 8.4'te görülen sonuçta ise sanal sensör sınanmıştır. Kontrollü taşıt için aynı benzetim koşullarında CarMaker'dan elde edilen gerçek savrulma açısal hızı ile sanal sensörden elde edilen tahmini savrulma açısal hızı üst üste çizdirilmiştir. İki değer birbirine çok yakındır, burada da sanal sensör sonuçları oldukça başarılı bulunmuştur.



Şekil 8.4 : Gerçek ve tahmini savrulma açısal hızlarının karşılaştırılması.

9. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Otomatik kontrol teorisinin ve disiplinlerarası bir alan olan mekatroniğin taşıt sistemlerine uygulanması günümüzde birçok bilim insanı ve mühendis tarafından hem akademik çerçevede, hem de sanayide üzerinde yoğun olarak çalışılan çok önemli bir alandır. Pek çok kontrol uygulamasında daha alt sıralardan önem listesine giren ekonomiklik durumu, otomotiv uygulamalarının çok daha fazla tüketici odaklı olmasından dolayı başlarda yer almaktadır.

Bu tez çalışması iki ana konu ve bu konuların birleştirilerek sonuçların irdelenmesi kısımlarından oluşmuştur. Öncelikle sanal sensör kullanılarak taşıt savrulma açısız hızının tahmini üzerinde durulmuştur. Gerçek sensör kullanılmadan taşıt parametrelerinin tahmin edilmesi konusu oldukça canlıdır, özellikle taşıt yana kayma açısının ve savrulma açısız hızının tahmini üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tez konusu olan savrulma açısız hızının tahmininde, önceki çalışmalardan farklı olarak otomotiv uygulamalarındaki ekonomiklik durumu göz önünde bulundurularak standart ABS'li taşıtlarda mevcut bulunan sensörler kullanılarak tahmin işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sanal sensör, kinematik ve dinamik tahmin bölümlerinden oluşturulmuştur. Kinematik tahminde, ABS tekerlek hız sensörlerinden tekerlek açısız hızı ölçümüne dayalı bir yöntem kullanılmıştır. Frenleme ve ani ivmelenme (patinaj) sırasında tekerleklerdeki boyuna kayma tahmin algoritması içerisine sokularak daha başarılı tahminlerde bulunulmuştur. Daha önceki çalışmalardan farklı olarak ani ivmelenme durumunda tahmin algoritması geliştirilmiş; hem ön, hem de arka tekerleklerden tahmin gerçekleştirilmiş ve bunlar belli bir oranda birleştirilerek tahminde iyileştirme sağlanmıştır. Parça parça geliştirilen algoritmalar belli kurallarla birleştirilip genel geçer hale getirilmiştir. Dinamik tahmin bölümünde ise hıza bağlı kazancı değişen gözetleyiciler kullanılmıştır. Bu şekilde hızdaki değişimlere karşı daha dayanıklı ve daha iyi tahminler veren bir sanal sensör geliştirilmiştir.

Yapılan sanal sensör tasarımı benzetim ortamında ve deneysel çalışmalarla standart manevralar kullanılarak test edilmiştir. Benzetimlerde hem iki serbestlik dereceli

doğrusal olmayan taşıt modeli, hem de yüksek serbestlik dereceli CarMaker taşıt modeli kullanılmıştır. Bilgisayarda yapılan başarılı benzetim çalışmaları sonrasında, gerçek yol testlerinden önce sanal sensör taşıt benzetimcisinde denenmiştir. Sonuç olarak bilgisayar ortamında, donanım içeren taşıt benzetimcisinde ve gerçek yol testlerinde sanal sensör oldukça başarılı bulunmuştur. Bu alanda bundan sonra yapılacak çalışmalarda sanal sensöre parametre olarak giren bazı değişkenlerin de tahmin edilerek sanal sensöre girilmesi üzerinde durulabilir. Örneğin tekerlek-yol sürtünme katsayısı tahmincisi tasarlanarak özellikle düşük sürtünme katsayısının olduğu durumlarda savrulma açısı tahmini iyileştirilebilir. Bir diğer gelecek çalışmada hız ve tekerlek-yol sürtünme katsayısından sonra sistemde en büyük belirsizliğe yol açabilen yolcu ağırlıkları tahmin edilerek sanal sensörün değişken kütlelere karşı daha iyi çalışması sağlanabilir.

Tezin ikinci ana bölümünde taşıt parametrelerinin tahmini gibi, oldukça geliştirilmeye açık bir alan olan taşıt yanal dinamiğinin kontrolü üzerinde durulmuştur. Burada otomotiv kontrolünde çok sık kullanılmayan ileri bir kontrol metodu olan model öngörülü kontrol temel alınarak kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Genel olarak yavaş tepki veren sistemlerin kontrolünde kullanılan model öngörülü kontrol yöntemi, mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak hızlı sistemlerin kontrolünde de kullanılmaya başlanmıştır.

Taşıt yanal dinamiği kontrolünde kasıt hem savrulma açısı hızının, hem de taşıt yana kayma açısının istenen değerlerde tutularak kontrol edilmesidir. Bu tez çalışmasında istenen kontrol işleminin gerçekleştirilmesi için kontrolcü tarafından hem ön tekerlek dönüş açılarına, hem de frenleme ile tekerlek torklarına müdahale edilmiştir. Ön tekerlek dönüş açılarının değiştirilmesinde, önümüzdeki 15 yıl içerisinde sıklıkla taşıtlarda kullanılması öngörülen kablolu direksiyon sisteminin kullanılması düşünülmüştür.

Tasarlanan kontrolcü, üst ve alt kontrolcü olarak adlandırılan iki bölümden oluşmuştur. Üst kontrolcü olarak daha önce bahsedilen model öngörülü kontrol sistemi, alt kontrolcü olarak da taşıt durumlarına göre hangi tekerleğin frenlenmesi gerektiğini belirleyen karar algoritması kullanılmıştır. Kontrolcü hem doğrusal olmayan tek izli taşıt modelinde, hem de CarMaker taşıt modelinde, farklı manevralar için, çeşitli hız ve tekerlek-yol sürtünme katsayılarında denenmiş ve sonuçlar başarılı bulunmuştur.

Taşıt yanal dinamiği kontrolcüsü konusunda bundan sonraki çalışmalarda deneysel çalışmalar yapılarak, gerçek koşullarda kontrolcü sınanabilir. Bu tez konusunda taşıt dinamiği kontrolcüsünün özellikle manevraların ve dolayısıyla istenen taşıt savrulma açısal hızı ve taşıt yana kayma açısı değerlerinin önceden bilindiği otonom taşıtlarda daha iyi çalışması beklenmektedir.

Tezin son bölümünde tez konusunu oluşturan iki temel konu birleştirilerek sanal sensör içeren bir taşıtın yanal dinamiğinin kontrolü irdelenmiştir. Burada amaç kontrol işlemi için ölçülmesi gereken savrulma açısal hızının sanal sensör ile elde edilerek kontrol sistemine gönderilmesidir. Bu durum, gerçekçi CarMaker taşıt modeli kullanılarak benzetim ortamında test edilmiş, hem tahmin hem de kontrol işlemi sonuçları başarılı bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<http://www.bosch-esperience.com>>, alındığı tarih 04.11.2009.
- [2] **Lie, A., Tingvall, C., Krafft, M., and Kullgren, A.,** 2006. The effectiveness of electronic stability control (ESC) in reducing real life crashes and injuries, *Traffic Injury Prevention*, **5**, pp. 37-41.
- [3] **Scully, J., and Newstead, S.,** 2007. Preliminary evaluation of electronic stability control effectiveness in Australasia. Monash University, Accident Research Centre, Technical report no.271.
- [4] **Sferco, R., Page, Y., Le Coz, J. Y., and Newstead, S.,** 2001. Potential effectiveness of electronic stability programs (ESP) – What European field studies tell us, *17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, NHTSA, Amsterdam, 4-7 June.
- [5] **Langwieder, K., Gwehenberger, J., Hummel, T., and Bende, J.,** 2003. Benefit potential of ESP in real accident situations involving cars and trucks, *18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, NHTSA, Nagoya, 19-22 May.
- [6] **Aga, M., and Okada, A.,** 2003. Analysis of vehicle stability control (VSC)'s effectiveness from accident data, *18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, NHTSA, Nagoya, 19-22 May.
- [7] **Farmer, C. M.,** 2006. Effect of electronic stability control on automobile crash risk, *Traffic Injury Prevention*, **5**, pp. 317-325.
- [8] **Frampton, R., and Thomas, P.,** 2007. Effectiveness of electronic stability control systems in Great Britain, Loughborough University, Vehicle Safety Research Centre, Technical report PPAD 9/33/99.
- [9] **Riekert, P., and Schunck, T.,** 1940. Zur fahrmechanik des gummbereiften kraftfahrzeugs, *Ingenieur Archiv*. Vol. **11**, pp. 210-224.
- [10] **Aksun, Güvenç, B.,** 2006. Taşıt Sistem Dinamiği ve Kontrolü Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- [11] **CarMaker User's Guide Version 2.2.**
- [12] **Emirler, M. T., Kahraman K., Aksun, Güvenç B., Güvenç L. and Efendioğlu B.,** 2009. Estimation of vehicle yaw rate using a virtual sensor and an observer, *European Control Conference ECC'09*, August 23-26, Budapest, Hungary.
- [13] **Emirler, M. T., Kahraman K., Şentürk M., Aksun, Güvenç B., Güvenç L., ve Efendioğlu B.,** 2009. Sanal sensör kullanılarak taşıt savrulma açılma hızının tahmin edilmesi, *TOK'09 Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, 13-16 Ekim, 2009 İstanbul, Türkiye.

- [14] **Url-2** <<http://www.cvel.clemson.edu/auto/sensors/yaw-rate.html>>, alındığı tarih 04.10.2009.
- [15] **Url-3** <<http://www.automotivedesignline.com/products/219900014>>, alındığı tarih 04.10.2009.
- [16] **Url-4** <<http://apps.bosch.com.au/motorsport/>>, alındığı tarih 04.10.2009.
- [17] **Sivashankar, N., and Ulsoy, A. G.**, 1998. Yaw rate estimation for vehicle control applications, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. **120**, pp. 267-274.
- [18] **Chee, W.**, 2005. Yaw rate estimation using two laxis accelerometers, *Proceedings of the American Control Conference (ACC)*, Portland, USA.
- [19] **Kiencke, U., and Daiß, A.**, 1997. Observation of lateral vehicle dynamics, *Control Engineering Practice*, Vol. **5**, No. 8, pp.1145-1150.
- [20] **Cherouat, H., Braci, M., and Diop, S.**, 2005. Vehicle velocity, side slip angles and yaw rate estimation, *IEEE International Sym. of Industrial Electronics (ISIE)*, June 20-23.
- [21] **Stephant, J., Charara, A., and Meizel, D.**, 2005. Evaluation of a sliding mode observer for vehicle side slip angle, *Control Engineering Practice*, Vol. **15**, pp. 803-812.
- [22] **Imsland, L., Johansen, T. A., Fossen, T. I., Grip, H. F., Kalkkuhl, J. C., and Suissa, A.**, 2006. Vehicle velocity estimation using nonlinear observers, *Automatica*, Vol. **42**, pp. 2019-2103.
- [23] **Samadi, B., Kazemi, R., Nikraves, K. Y., and Kabganian, M.**, 2001. Realtime estimation of vehicle state and tire road friction forces, *Proceedings of the American Control Conference (ACC)*, June 25-27, Arlington VA.
- [24] **Ghoneim, Y. A., and Chin, YK.**, 2001. Active brake control having yaw rate estimation, *US Patent*, No: 6169951 B1.
- [25] **Zhenhai, G.**, 2003, Soft sensor application in vehicle yaw rate measurement based on Kalman filter and vehicle dynamics, *Proceedings of IEEE Intelligent Transportations Systems*, Vol. **2**, pp. 1352-1354.
- [26] **Hac, A., and Simpson, M.D.**, 2000, Estimation of vehicle side slip angle and yaw rate, *SAE paper*, No. 2000-01-0696.
- [27] **Zhao, H., and 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, pp. 1828-1832.
- [28] **Venhovens, P. J. TH., and Naab, K.**, 1999, Vehicle dynamics estimation using Kalman filters, *Vehicle System Dynamics, Int. Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. **32**, pp.171-184.
- [29] **Bauer, H. (Editor-in-Chief)**, 1999. Bosch Driving-safety Systems 2nd Edition, SAE International, Germany.
- [30] **Url-5** <<http://www.drivesafeproject.org>>, alındığı tarih 15.10.2009.

- [31] **Ogata, K.**, 2001: Modern Control Engineering 4th Edition, New York: Prentice Hall, USA.
- [32] **Nise N.**, 2008: Control Systems Engineering 5th Edition, Wiley, USA.
- [33] **Welch, G., and Stephant, J., Charara, A., and Meizel, D.**, 2006. An introduction to the Kalman filter, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel, NC.
- [34] **Grewal, M. And Andrews, A. P.**, 2001: Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab 2nd Edition, New York: Wiley, USA.
- [35] **Simon, D.**, 2006: Optimal State Estimation, New Jersey: Wiley, USA.
- [36] **Emekli, E. M.**, 2008. Hafif bir ticari araç için yarı aktif süspansiyon sistemi tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul.
- [37] **Url-6** <<http://www.dspaceinc.com>>, alındığı tarih 15.10.2009.
- [38] **Manning, W. J., and Crolla, D. A.**, 2007. A review of yaw rate and sideslip controllers for passenger vehicles, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. **29**, No. 2, pp. 117-135.
- [39] **Ackermann, J.**, 1990. Robust car steering by yaw rate control, in *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*, pp. 2033-2034, Honolulu, Hawaii.
- [40] **Ackermann, J.**, 1993. Robust control prevents car skidding, in *Proceedings IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. **1**, No. 1, pp. 15-20.
- [41] **Ackermann, J.**, 1997. Robust control prevents car skidding, in *Proceedings IEEE Control Systems Magazine*, Vol. **17**, Issue. 3, pp. 23-31.
- [42] **Ackermann, J., Blue, P., Bünte, T., Güvenç, L., Kaesbauer, M., Kordt, M., Muhler, M., and Odenthal, D.**, 2002: Robust Control: The Parameter Space Approach, New York: Springer-Verlag.
- [43] **Aksun, Güvenç, B., Güvenç, L., Odenthal, D., and Bünte, T.**, 2001. Robust two degree of freedom vehicle steering control satisfying mixed sensitivity constraint, in *Proceedings of European Control Conference*, pp. 1198-1203.
- [44] **Aksun, Güvenç, B., Bünte, T, Odenthal, D., and Güvenç, L.**, 2004. Robust two degree-of-freedom vehicle steering controller design, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. **12**, No. 4, pp. 627-636.
- [45] **Karaman, S., Öncü, S., Güvenç, L., Ersolmaz, Ş. S., Çetin, E., and Kanbolat, A.**, 2006. Robust velocity scheduled yaw stability control of a light commercial vehicle, in *Proceedings of Intelligent Vehicle Symposium (IV'06)*, pp. 504-509, June 13-15, Tokyo, Japan.
- [46] **Öncü, S., Karaman, S., Güvenç, L., Ersolmaz, Ş. S., Çetin, E., and Kanbolat, A.**, 2007. Robust yaw stability controller design for a light commercial vehicle using a hardware in the loop steering test rig, in *Proceedings of Intelligent Vehicle Symposium (IV'07)*, pp. 852-859, June 13-15, İstanbul, Turkey.

- [47] Aksun, Güvenç, B., Öztürk, E. S., Yiğit, T., and Güvenç, L., 2003. Model regulator based individual wheel braking control, in *Proceedings of IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pp. 31-36.
- [48] Aksun, Güvenç, B., Güvenç, L., Yiğit, T., and Öztürk, E., S., 2004. Coordination strategies for combined steering and individual wheel braking actuated vehicle yaw stability control, *4th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Salerno, April 19-23.
- [49] Öztürk, E. S., Güvenç, L., and Yiğit, T., Aksun, Güvenç, B., 2005. Application of combined steering and individual wheel braking actuated yaw stability control to a realistic vehicle model, *16th IFAC World Congress*, 4-8 July, Prague, Czech Republic.
- [50] Canale, M., Fagiano, L., Milanese, M., and Borodani, 2006, Robust vehicle yaw control using active differential and internal model control techniques, in *Proceedings of American Control Conference (ACC)*, June 14-16, USA.
- [51] Canale, M., Fagiano, L., Milanese, M., and Borodani, 2007, Robust vehicle yaw control using active differential and IMC techniques, *Control Engineering Practice*, Vol. **15**, pp. 923-941.
- [52] Canale, M., Fagiano, L., Ferrara, A., and Vecchio, C., 2008, Vehicle yaw control via sliding-mode technique, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. **55**, No. 11, pp. 3908-3916.
- [53] Drakunov, S. V., Ashrafi, B., and Rosiglion, A., 2000. Yaw control algorithm via sliding mode control, in *Proceedings of American Control Conference (ACC)*, pp. 580-583, Chicago, Illinois.
- [54] Zheng, B., and Anwar, S., 2009. Yaw stability control of a ster-by-wire equipped vehicle via active front wheel steering, *Mechatronics*, Vol. **19**, pp. 799-804.
- [55] Nagai, M., Hirano, Y., and Yamanaka, S., 1997. Integrated control of active rear wheel steering and direct yaw moment control, *Vehicle System Dynamics*, Vol. **27**, pp. 357-370.
- [56] Nagai, M., Hirano, Y., and Yamanaka, S., 1998. Integrated control of active rear wheel steering and direct yaw moment control, *Vehicle System Dynamics*, Vol. **28**, Supplement, pp. 416-421.
- [57] Yang, X., Wang, Z., and Peng, W., 2009. Coordinated control of AFS and DYC for vehicle handling and stability based on optimal guaranteed cost theory, *Vehicle System Dynamics*, Vol. **47**, pp. 57-79.
- [58] Falcone, P., Tseng, H. E., Borrelli F., Asgari, J., and Hrovat, D., 2008. MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking, *Vehicle System Dynamics*, Vol. **46**, Supplement, pp. 611-628.
- [59] Url-7 <http://www.iuvmag.com/articles/2009_01-03.html>, alındığı tarih 03.11.2009.
- [60] Camacho, E. F., and Bordons, C., 2004: Model Predictive Control 2nd Edition, Springer-Verlag, London.

- [61] **Morari, M., and Lee, J. H., Grewal, M. And Andrews, A. P.,** 1999. Model predivtive control: past, present and future, *Computer and Chemical Engineering*, Vol. **23**, pp. 667-682.
- [62] **Borrelli, F., Bemporad, A., and Morari, M.,** 2009: Constrained Optimal Control and Predictive Control for linear and hybrid systems, Draft book.
- [63] **Turevskiy, A.,** 2008. Introduction to Model Predictive Toolbox Webinar, The MathWorks, Inc, MA.
- [64] **Bemporad, A., Morari, M. And Ricker, N. L.,** 2008. Model Predictive Toolbox version 3.0 User's Guide, The MathWorks, Inc, MA.
- [65] **Yoshiki, F.,** 1999. Slip-angle estimation for vehicle stability control, *Vehicle System Dynamics*, Vol. **32**, pp. 375-388.
- [66] **Piyabongkarn, D., Rajamani, R., Grogg, J.A., and Lew, J. Y.,** 2006. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control, in *Proceedings of American Control Conference (ACC)*, June 14-16, USA.
- [67] **Piyabongkarn, D., Rajamani, R., Grogg, J.A., and Lew, J. Y.,** 2006. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control, *IEEE Transactions of Control Systems Technology*, Vol. **17**, No.1, pp. 78-88.

EKLER

EK A : Tek izli taşıt modeli için kullanılan ek denklemler ve yapılan ek işlemler

EK B : Sanal sensör deneysel sonuçlar.

EK C : Kontrol sistemine ait tasarımı kontrol sinyallerinin değişimleri.

EK A

Ek A bölümünde önce Şekil 2.2’de gösterilen blok diyagramındaki bloklarla ilgili denklemler verilmiştir. Daha sonra doğrusallaştırma yapılırken gözetilen varsayımlar sonucunda yapılan işlemlere yer verilmiştir.

Tek izli taşıt modeli için tekerlek modeli olarak (2.1) ve (2.2) nolu denklemlerle ifade edilen lineer (doğrusal) tekerlek modeli kullanılmıştır. Tekerlek dönme açısı projeksiyonu (kuvvet koordinat transformasyonu) bloğunda tekerlek yanal kuvvetleri F_f ve F_r , taşıta ait eksen takımına göre F_x , F_y ve M_z olarak dönüşüme tabii tutulmaktadır. Bu dönüşüm matrisi (A.1) nolu denklemde verilmiştir.

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

Taşıt dinamiği bloğunun içeriği (2.3), (2.4) ve (2.5) nolu denklemlerle ve (2.7)’de bu denklemleri düzenlenmiş haliyle matris şeklinde verilmiştir.

Kinematik / Geometri bloğunda taşıt yana kayma açısı, taşıt hızı ve taşıt savrulma açısal hızının ön ve arka tekerleklerdeki yana kayma açıları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Taşıt x eksenini yönündeki hız bileşenlerinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Bu durum (A.2)’deki gibi yazılabilir.

$$V_f \cos \beta_f = V \cos \beta = V_r \cos \beta_r \quad (\text{A.2})$$

Taşıt y eksenini yönündeki hız bileşenleri ise taşıt kinematığından yararlanılarak (A.3) ve (A.4) nolu denklemlerle sırasıyla ön ve arka tekerlekler için yazılabilir.

$$V_f \sin \beta_f = V \sin \beta + l_f \dot{\psi} \quad (\text{A.3})$$

$$V_r \sin \beta_r = V \sin \beta - l_r \dot{\psi} \quad (\text{A.4})$$

(A.3) nolu denkleminde, denklemin her yeri $V_f \cos \beta_f$ ile bölünürse, (A.2) eşitliğinden de yararlanılarak,

$$\frac{V_f \sin \beta_f}{V_f \cos \beta_f} = \frac{V \sin \beta + l_f \dot{\psi}}{V \cos \beta} \quad (\text{A.5})$$

elde edilir.

Tanjant tanıtımından yararlanılarak denklem düzenlenirse (A.6) nolu bağıntı elde edilir.

$$\tan \beta_f = \tan \beta + \frac{l_f \dot{\psi}}{V \cos \beta} \quad (\text{A.6})$$

Benzer şekilde (A.4) nolu denklemde her yer $V_r \cos \beta_r$ ile bölünüp (A.2)'deki eşitlik kullanılarak gerekli işlemler yapılarak, (A.7) nolu kinematik/geometri bağıntısı elde edilir.

$$\tan \beta_r = \tan \beta - \frac{l_r \dot{\psi}}{V \cos \beta} \quad (\text{A.7})$$

Doğrusallaştırma sırasında gözetilen varsayımlar doğrultusunda yapılan işlemler bundan sonraki kısımda verilmiştir.

Varsayım 1'de taşıt yana kayma açısının (β) küçük değerler olduğu varsayılmıştır.

Buna göre $\cos \beta \approx 1$ ve $\sin \beta \approx \beta$ değerlerini alacaktır. Böylece (2.7) nolu matris denklemi, (A.8) nolu denkleme dönüşmüştür.

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + \dot{\psi}) \\ m\dot{V} \\ J\ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta & 1 & 0 \\ 1 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Varsayım 2’de taşıt hızının türevi sıfır olarak kabul edilmişti. Bu durumda (A.8) matrisinin ikinci satırından,

$$F_x + \beta F_y = 0 \Rightarrow F_x = -\beta F_y \quad (\text{A.9})$$

ve 1. satırından,

$$mV(\dot{\beta} + \dot{\psi}) = -\beta F_x + F_y \quad (\text{A.10})$$

elde edilir.

(A.9) eşitliği (A.10)’da yerine konularak,

$$mV(\dot{\beta} + \dot{\psi}) = (\beta^2 + 1)F_y \quad (\text{A.11})$$

olarak bulunur. β^2 ’nin çok küçük olacağı varsayımından (A.11) denklemini, (A.12) nolu denkleme dönüştür.

$$\begin{bmatrix} mV(\dot{\beta} + \dot{\psi}) \\ J\ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Varsayım 3’te ön tekerlek dönme (yönlendirme) açılarının (δ_f ve δ_r) küçük değerlere sahip olduğu varsayılmıştı. Bu durumda $\cos \delta_f \approx 1$ ve $\cos \delta_r \approx 1$ olarak alınabilir. Böylece tekerlek dönme açısı projeksiyonu,

$$\begin{bmatrix} F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ l_f & -l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_f \\ F_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

şeklini alır.

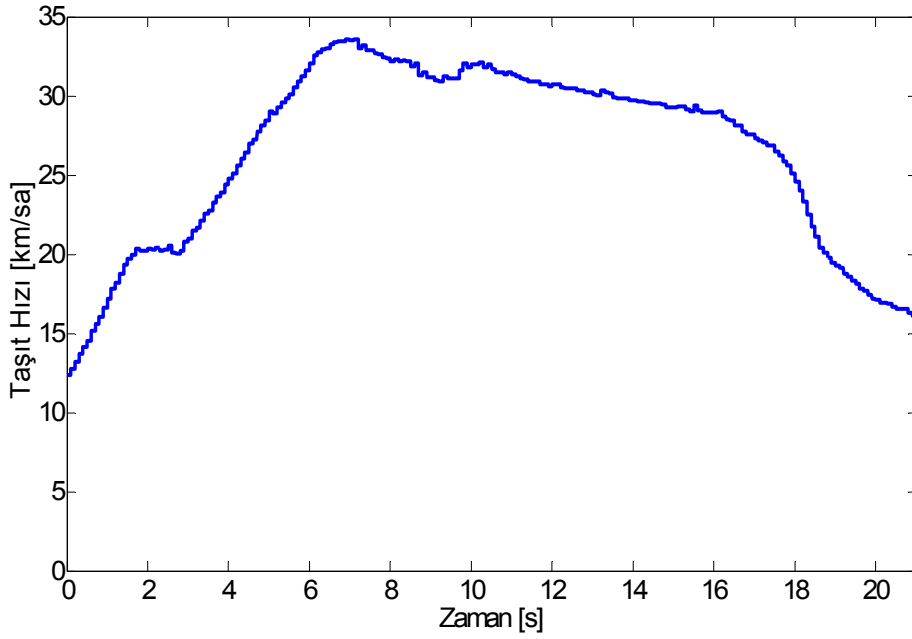
Varsayım 4’te ön ve arka tekerleklerdeki yana kayma açılarının (β_f ve β_r) küçük değerlere sahip olduğu varsayılmıştı. Bu durumda $\sin \beta_f \approx \beta_f$, $\cos \beta_f \approx 1$ ve $\tan \beta_f \approx \beta_f$ olarak alınabilir. Aynı şekilde $\sin \beta_r \approx \beta_r$, $\cos \beta_r \approx 1$ ve $\tan \beta_r \approx \beta_r$ olarak alınabilir. Varsayım 1’de göz önünde bulundurularak kinematik/geometri bağıntıları (A.14) ve (A.15)’te gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$\beta_f = \beta + \frac{l_f \dot{\psi}}{V} \quad (\text{A.14})$$

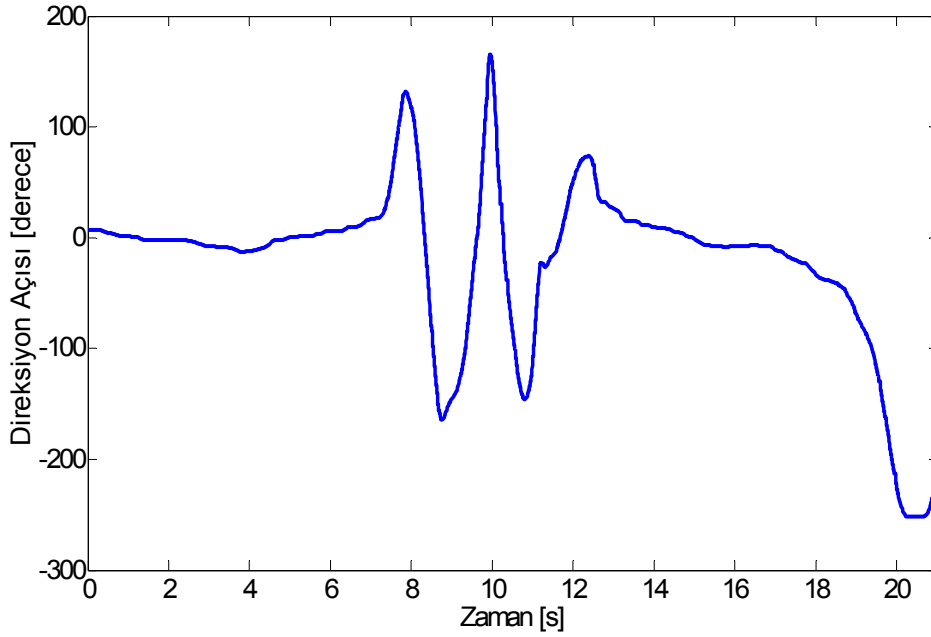
$$\beta_r = \beta - \frac{l_r \dot{\psi}}{V} \quad (\text{A.15})$$

Tek izli taşıt modeline ait daha ayrıntılı bilgiler [10] nolu kaynakta bulunabilir.

EK B

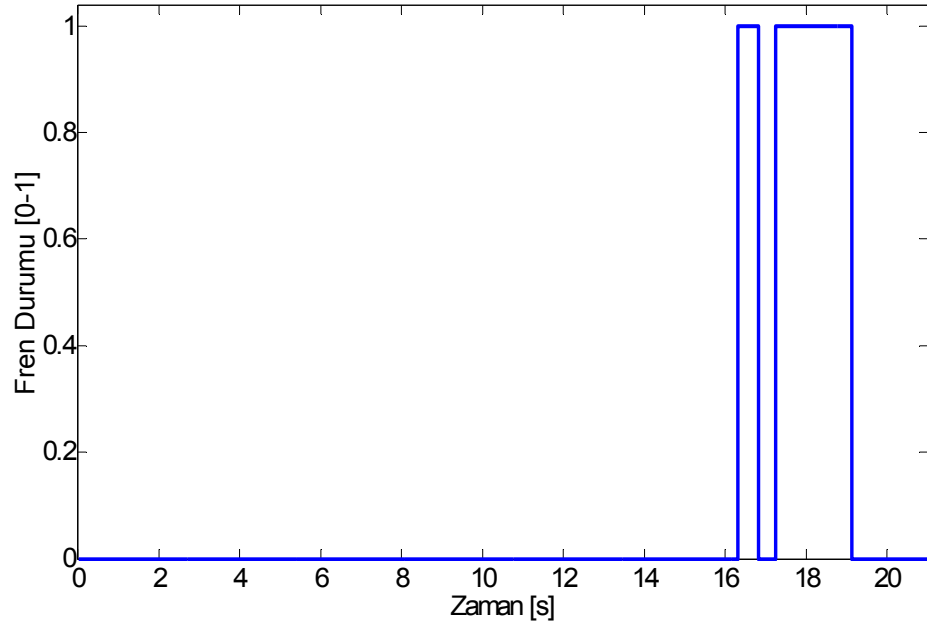


Şekil B.1 : Deneysel test sonucu – 1, taşıt hızı.

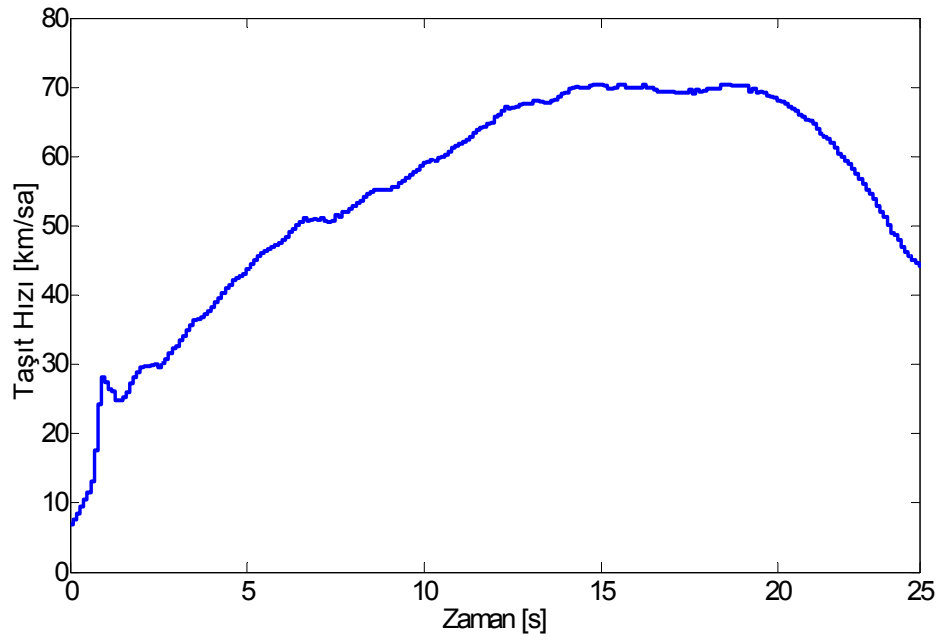


Şekil B.2 : Deneysel test sonucu – 1, direksiyon açısı.

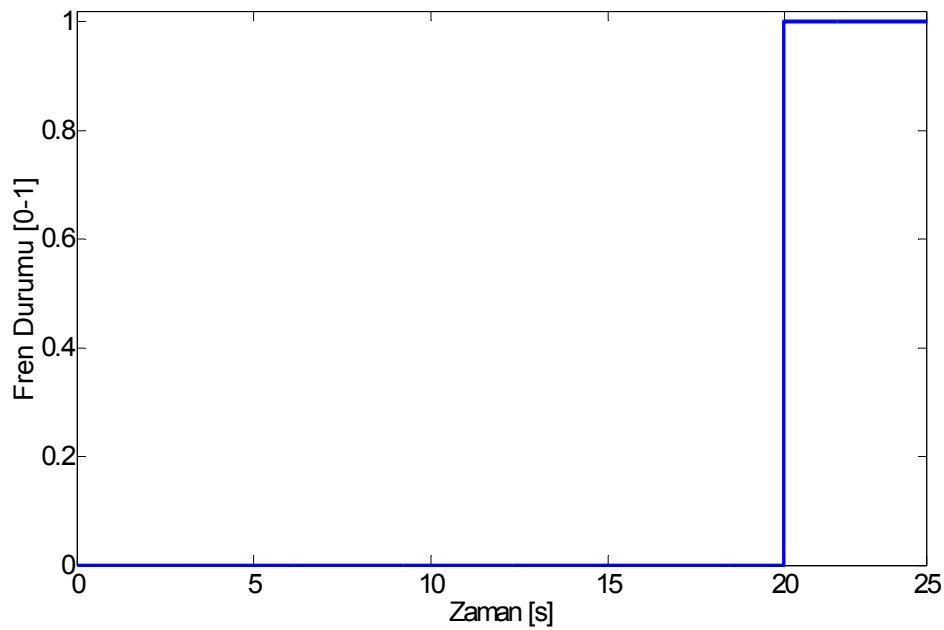
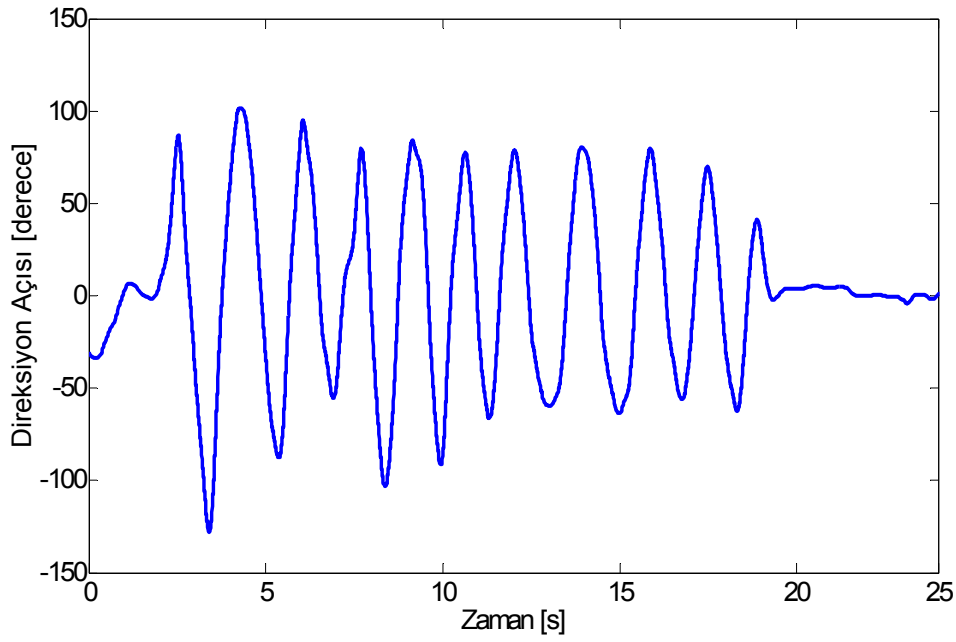
Şekil B.1, Şekil B.2 ve Şekil B.3'te birinci deneyde taşıt hızının, direksiyon açısının ve fren durumunun nasıl değiştiği gösterilmiştir. Taşıt ile slalom benzeri bir manevra yapılmıştır. Deneylerde frenleme özellikle yapılarak algoritma fren durumunda da denenmiştir.



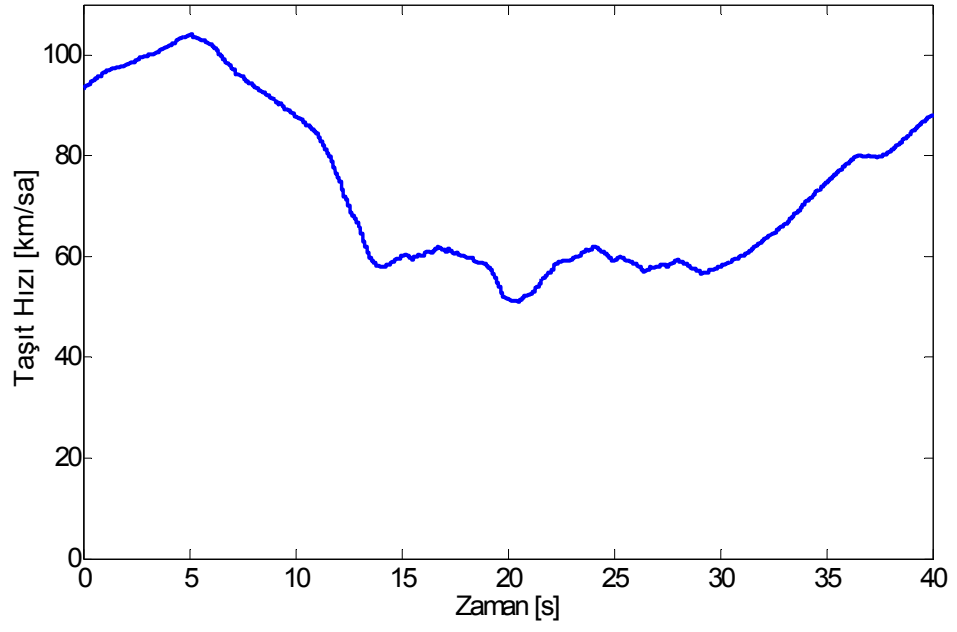
Şekil B.3 : Deneysel test sonucu – 1, fren durumu.



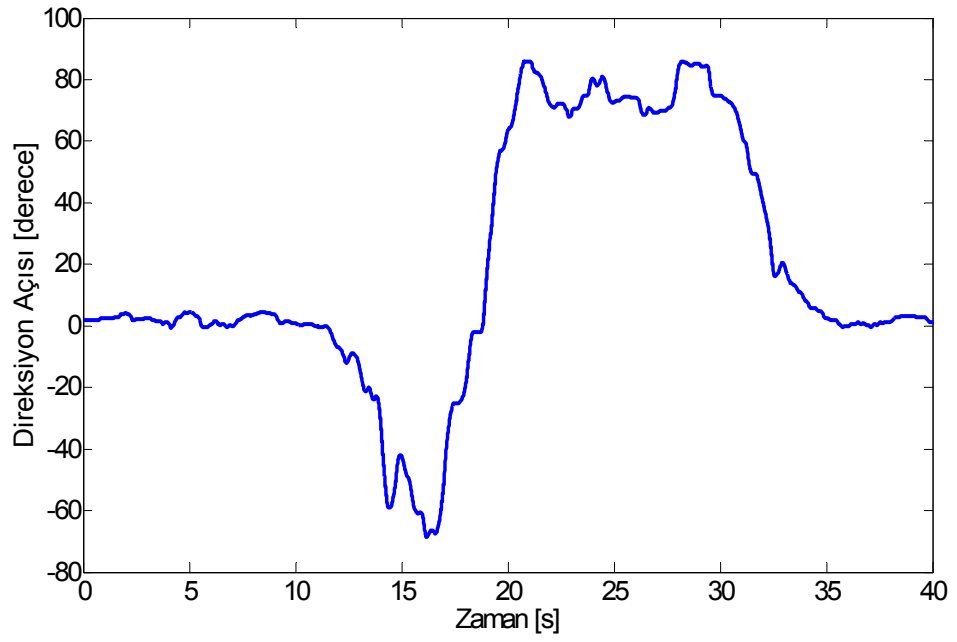
Şekil B.4 : Deneysel test sonucu – 2, taşıt hızı.



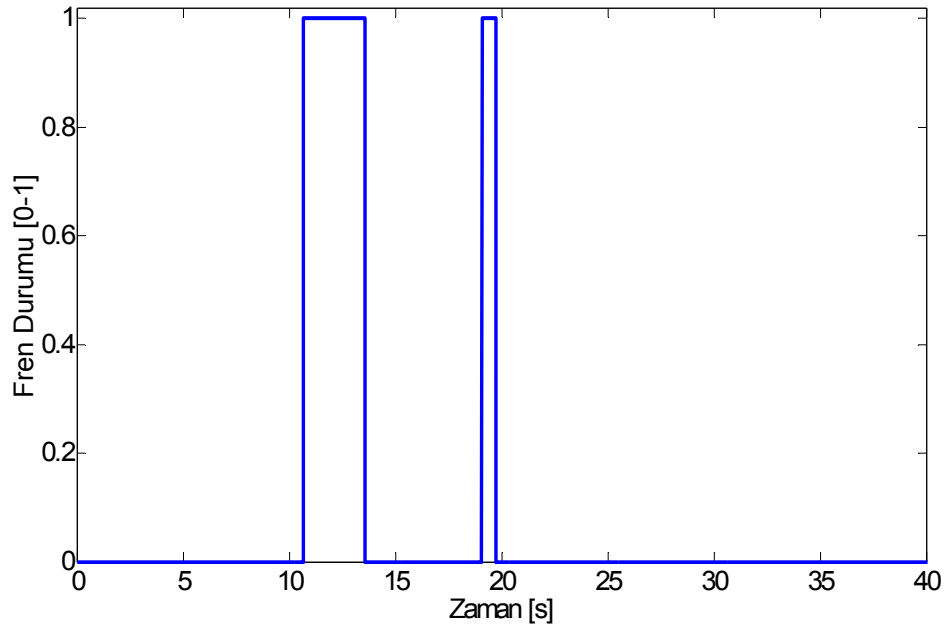
Şekil B.4, Şekil B.5 ve Şekil B.6’da ikinci deneyde taşıt hızının, direksiyon açısının ve fren durumunun değişimi gösterilmiştir. İlk deneye göre daha yüksek frekanslı bir slalom manevrası, yine ilk deneye göre daha yüksek taşıt hızında denenmiştir.



Şekil B.7 : Deneysel test sonucu – 3, taşıt hızı.



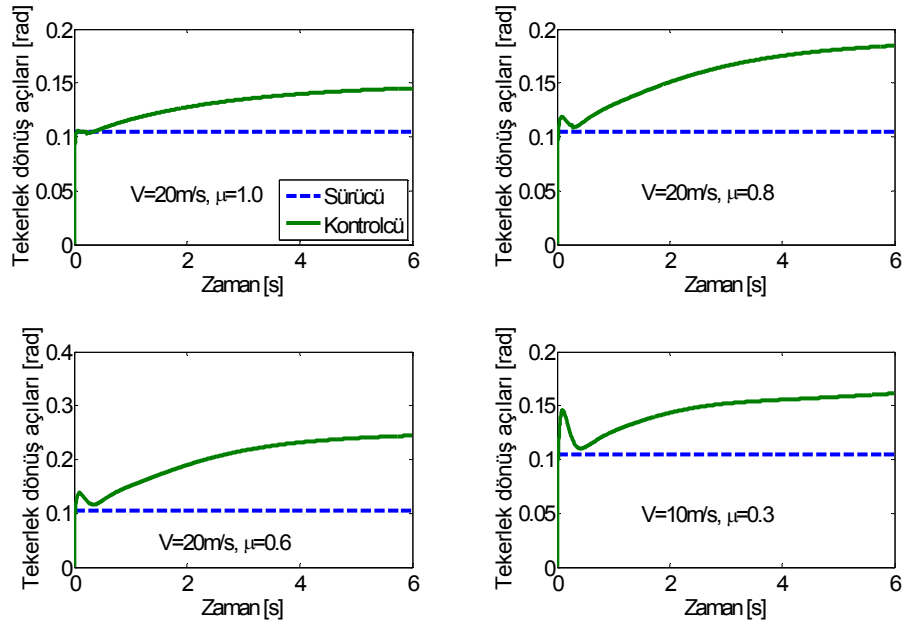
Şekil B.8 : Deneysel test sonucu – 3, direksiyon açısı.



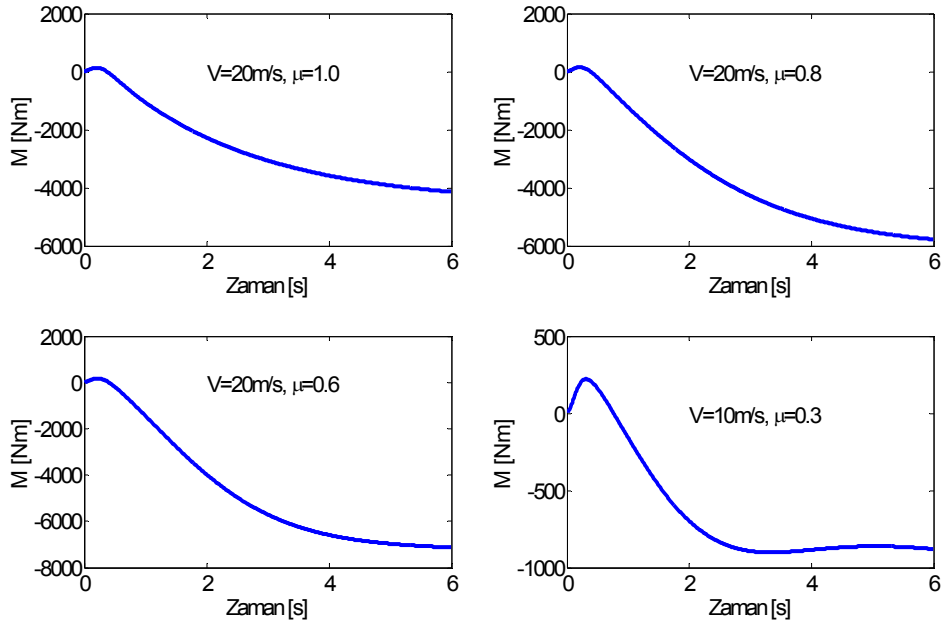
Şekil B.9 : Deneysel test sonucu – 3, fren durumu.

Şekil B.7, Şekil B.8 ve Şekil B.9’da üçüncü deneyde taşıt hızının, direksiyon açısının ve fren durumunun değişimi gösterilmiştir. Burada ortalama bir hızda taşıta J dönüşü yaptırılmaya çalışılmıştır.

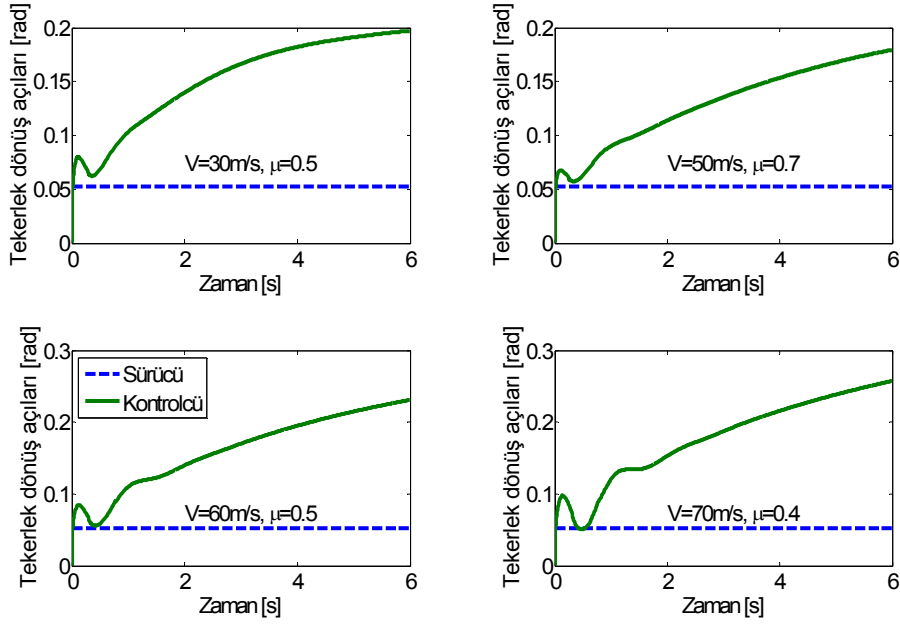
Ek C



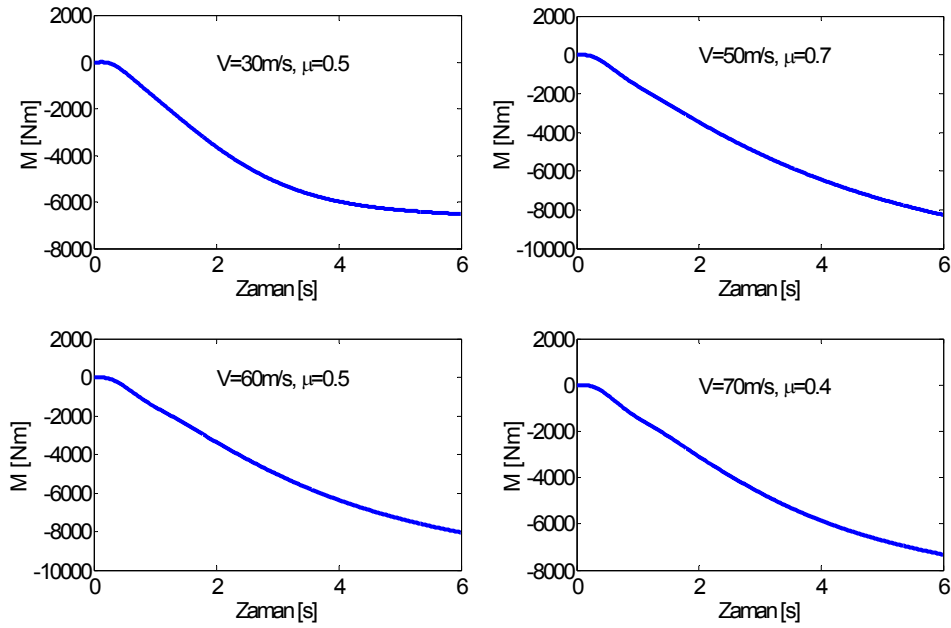
Şekil C.1 : Benzetim 1, ön tekerlek dönüş açıları değişimi.



Şekil C.2 : Benzetim 1, kontrol momenti değişimi.

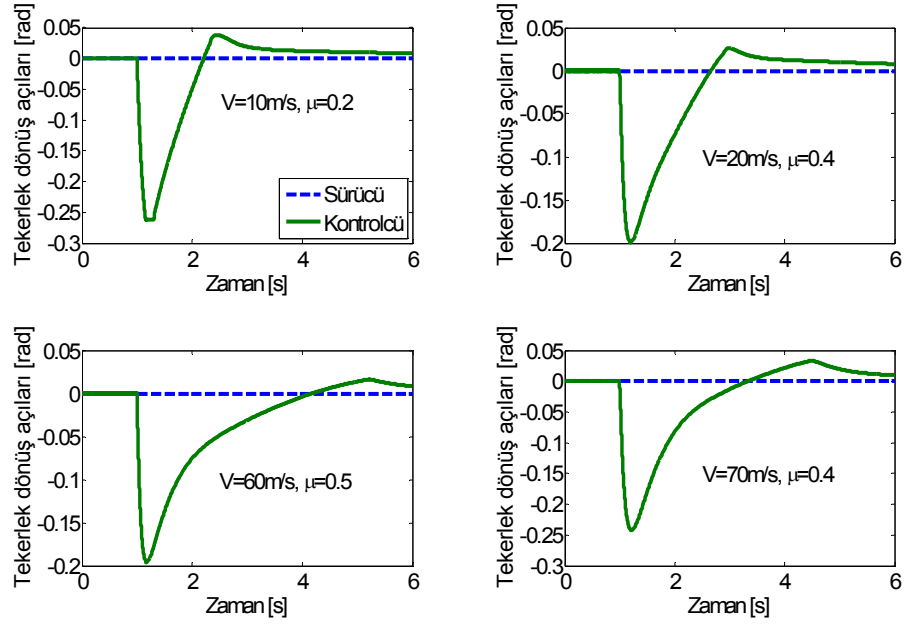


Şekil C.3 : Benzetim 2, ön tekerlek dönüş açıları değişimi.

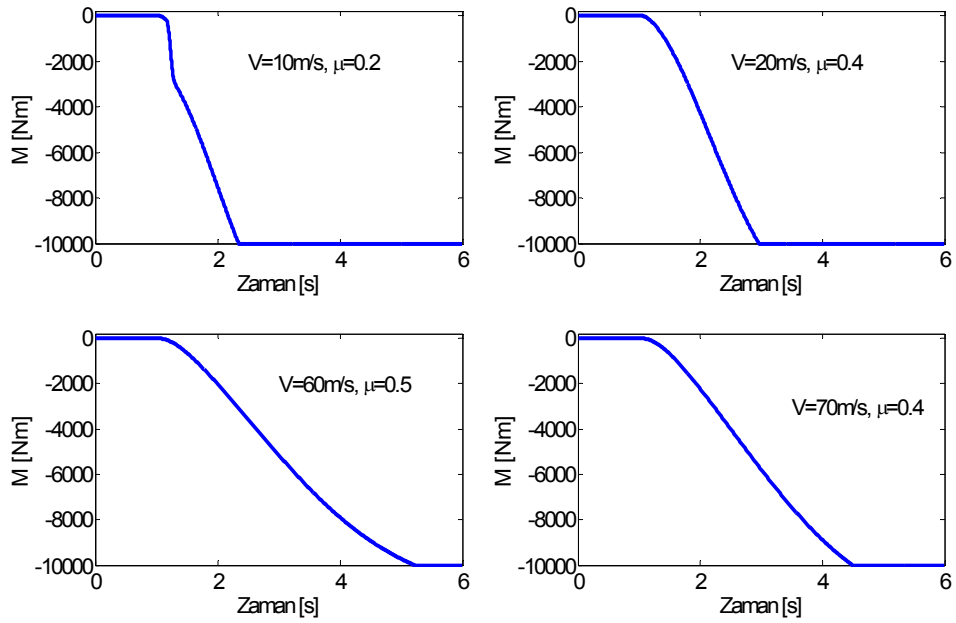


Şekil C.4 : Benzetim 2, kontrol momenti değişimi.

Ek C’de verilen tüm ön tekerlek dönüş açıları değişimi grafiklerinde normal çizgiler sürücünün direksiyonu çevirmesi sonucu ön tekerleklerde oluşan dönüş açısını, kesikli çizgiler ise kontrolcü müdahalesi sonucunda ön tekerleklerde oluşan dönüş açılarını göstermektedir.

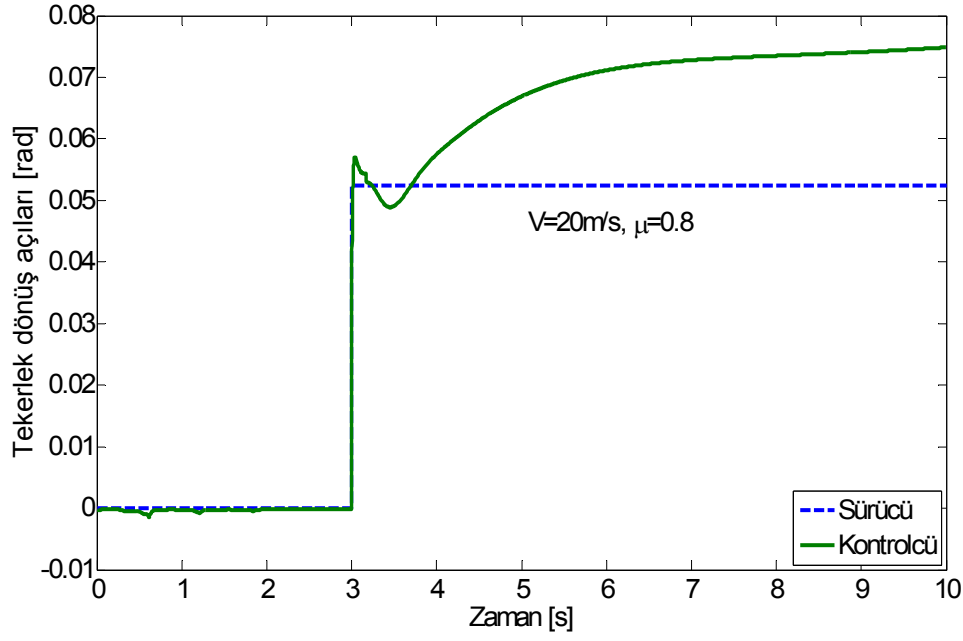


Şekil C.5 : Benzetim 3, ön tekerlek dönüş açıları değişimi.

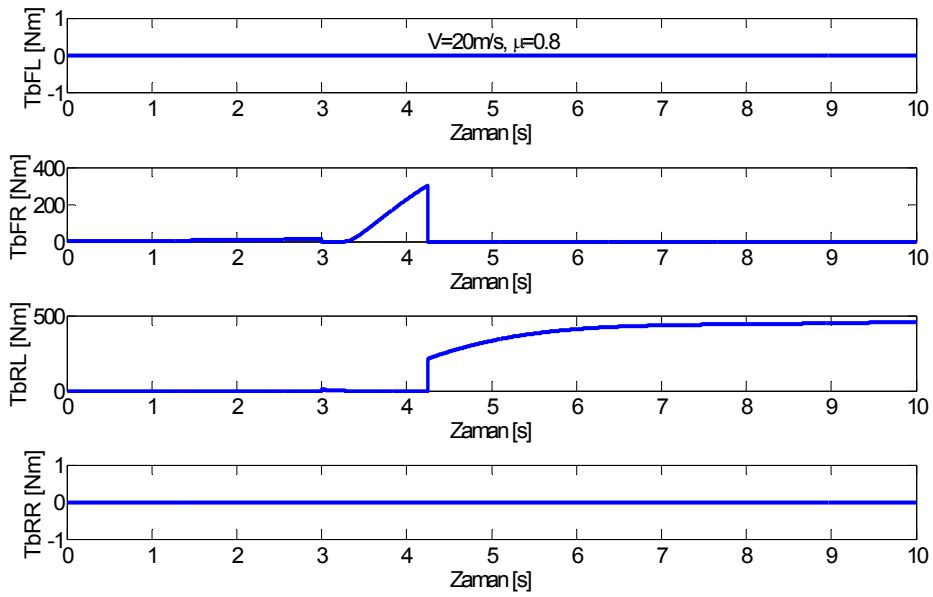


Şekil C.6 : Benzetim 3, kontrol momenti değişimi.

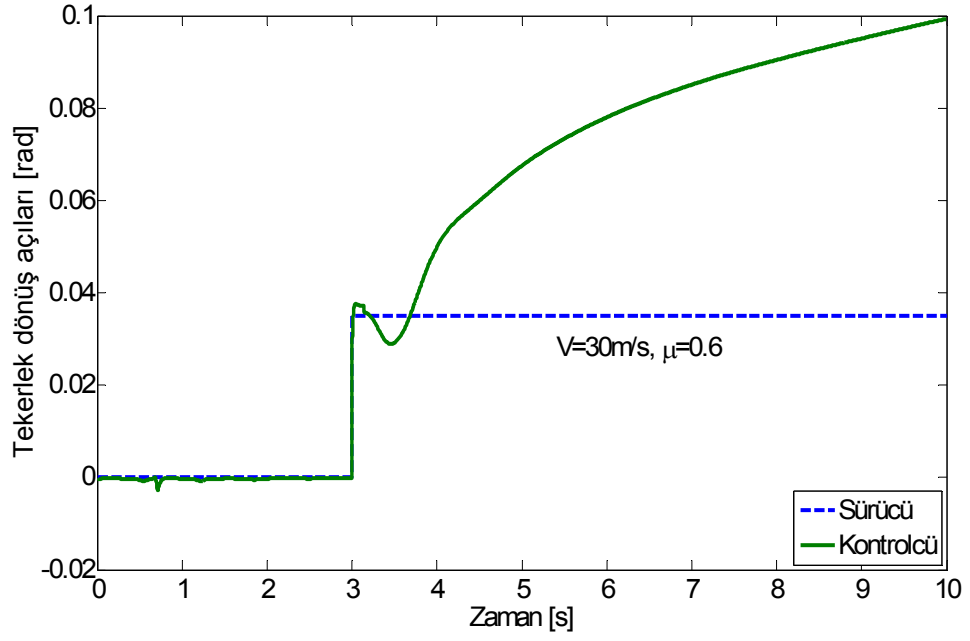
Doğrusal olmayan taşıt modeli kullanılan benzetimlerde kontrol momenti değişimi, CarMaker taşıt modeli kullanılan benzetimlerde ise fren torklarının dağılımı gösterilmiştir.



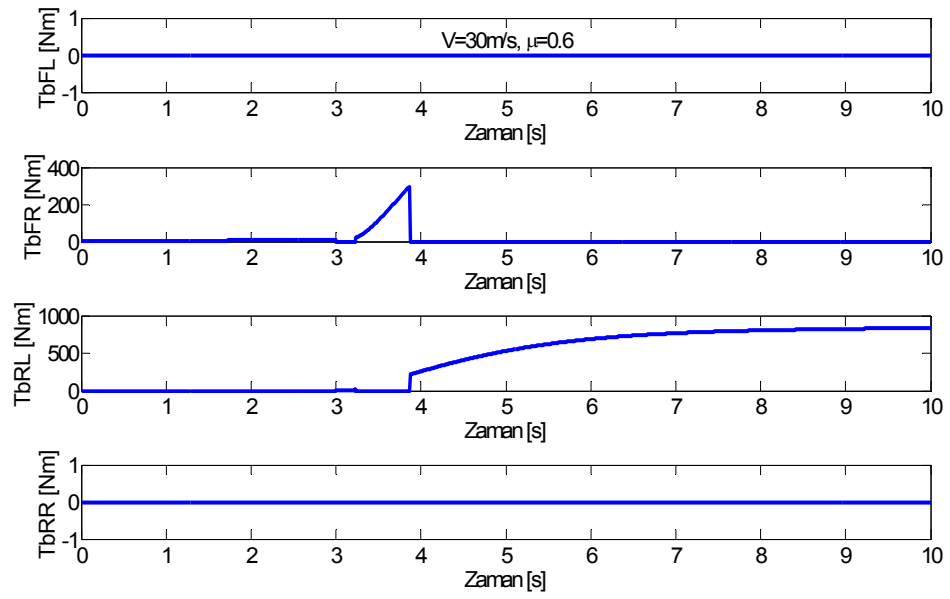
Şekil C.7 : CarMaker benzetimi 1, ön tekerlek dönüş açıları değişimi.



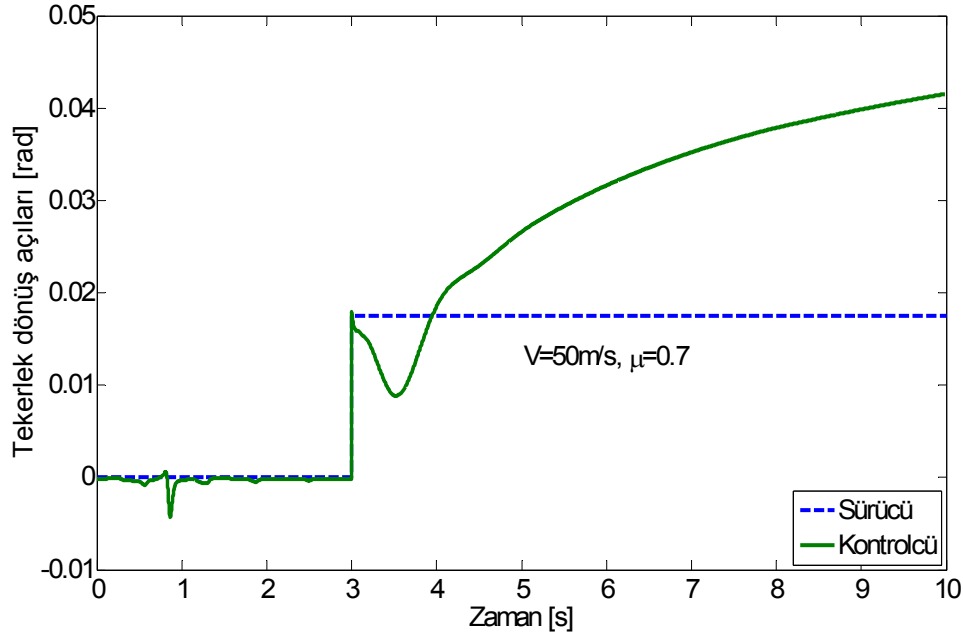
Şekil C.8 : CarMaker benzetimi 1, fren torkları dağılımı.



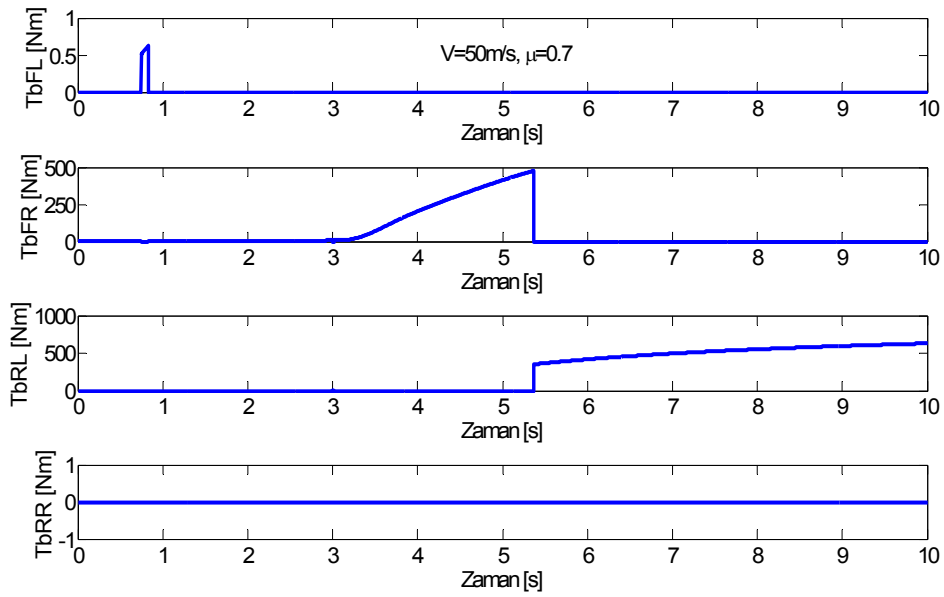
Şekil C.9 : CarMaker benzetimi 2, ön tekerlek dönüş açıları değişimi.



Şekil C.10 : CarMaker benzetimi 2, fren torkları dağılımı.



Şekil C.11 : CarMaker benzetimi 3, ön tekerlek dönüş açıları değişimi.



Şekil C.12 : CarMaker benzetimi 3, fren torkları dağılımı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mümin Tolga EMİRLER

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 04/11/1983

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Makina Mühendisliği (2002 – 2007)

İstanbul Teknik Üniversitesi

İmalat Mühendisliği (2004 – 2008)

Yayın Listesi:

- **Emirler, M. T.**, Kahraman K., Aksun, Güvenç B., Güvenç L. and Efendioğlu B., 2009. Estimation of vehicle yaw rate using a virtual sensor and an observer, *European Control Conference ECC'09*, August 23-26, Budapest, Hungary.
- **Emirler M. T.**, Kahraman K., Şentürk M., Güvenç B. A., Güvenç L., ve Efendioğlu B., 2009, Sanal sensör kullanılarak taşıt savrulma açısal hızının tahmin edilmesi, *TOK'09 Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, 13-16 Ekim, 2009 İstanbul, Türkiye.
- Demirel B., **Emirler M. T.**, Sönmez Ü., and Yörükoğlu A., 2009. Semi compliant mechanism sythesis for a required impact and contact force, *ASME Journal of Mechanism and Robotics*. (Kabul edildi.)
- Demirel B., **Emirler M. T.**, Yörükoğlu A., Koca N. and Sönmez Ü., 2008. Semi compliant mechanism sythesis for a required impact and contact force, *ASME IMECE International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, October 31 – November 06, Boston, MA, USA.