

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN
AYRIK-ZAMAN OPTİMAL KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Ilona USUMAN

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Ortak Danışmanı : Dr.Öğr.Üyesi Zekiye ERDEM

Temmuz 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN
AYRIK-ZAMAN OPTİMAL KONTROLÜ**

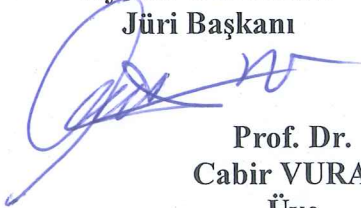
DOKTORA TEZİ

Ilona USUMAN

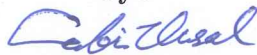
Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 23 / 07 /2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Ayhan ÖZDEMİR
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Cabir VURAL
Üye



Prof. Dr.
Mehmet BAYRAK
Üye



Doç. Dr.
Ahmet ÖZMEN
Üye

Doç. Dr.
Fahri VATANSEVER
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ilona USUMAN

23.07.2018

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, yaptığım çalışmalar sırasında bana sabırla ve hoşgörü ile davranan, değerli zamanını sorunlarımın çözümüne ayıran danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR'e ve Dr.Öğr. Üyesi. Zekiye ERDEM'e şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Başta tez izlemeleri olmak üzere çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet BAYRAK'a ve Doç. Dr. Ahmet ÖZMEN'e şükranlarımı ve saygılarımı sunarım. Doktora ders döneminde emekleri geçen başta bölüm başkanı değerli hocam Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU olmak üzere tüm hocalarıma şükranlarımı ve saygılarımı sunarım. Tez yazım sürecinde bana yardım esirgemeyen değerli Arş. Gör. İbrahim MUCUK'a, Selim İLHAN'a ve Abdullah Salih'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana destek olan eşime Rudiyanto teşekkür ederim. Manevi olarak desteklerini esirgemeyen dayım Drs. H. Wenny Bukamo, kardeşlerime Dudy Usuman'a, Dedy Usuman'a, Sukmawati'ye, Dhini Aprilia'ya, Winanti'ye ve üzerimde emeği olan herkese ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Araştırma Amaçları	6
1.2. Tezin Literatüre Katkısı	6
1.3. Çalışmada Kullanılan Yöntemler	7
1.4. Tezde İzlenen Yol	7

BÖLÜM 2.

ELETRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN (ETS) GENEL TANIMLARI VE SINIFLANDIRMASI	9
2.1. ETS'nin Genel Tanımları ve Kısa Tarih	9
2.2. ETS Sınıflandırılması	10
2.2.1. ETS fonksiyonlarının sınıflandırılması	11
2.2.1.1. İç mekan ETS modelleri	11
2.2.1.2. İç /dış mekan ETS modelleri	11
2.2.1.3. Dış mekan ETS modelleri	12
2.2.1.4. İç mekanda merdiven tırmanma ETS modelleri	12

2.2.2. ETS sürücü tekerleklerinin temel konumlarına göre sınıflandırılmaları	12
2.2.2.1. Arka tekerlekleri sürücü ETS modelleri	12
2.2.2.2. Ön tekerlekler sürücü ETS modelleri	13
2.2.2.3. Orta tekerlek sürücü ETS modelleri	13
2.2.3. ETS'nin sürücü mekanizmasına dayalı sınıflandırılmaları	13
2.2.3.1. Dolaylı sürücü ETS modelleri	14
2.2.3.2. Direkt sürücü ETS sistemleri	14

BÖLÜM 3.

ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN (ETS) DONANIMI VE SİSTEM ALT BİLEŞENLERİ	15
3.1. ETS Çerçevesi	15
3.2. ETS Tekerlekleri	16
3.3. ETS Ayak Dayama	16
3.4. ETS Kol Dayama	16
3.5. ETS Sırt Dayama	17
3.6. ETS Koltuk	17
3.7. ETS Frenleri	17
3.8. Döner Tekerlek (Castor)	17
3.9. ETS Minder	18
3.10. Aç/Kapat Buton veya Anahtar	18
3.11. ETS Kumanda Kolu	18
3.12. Bataryalar	18

BÖLÜM 4.

ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN (ETS) MODELLENMESİ	19
4.1. Transfer Fonksiyonu Modeli	20
4.2. Durum Uzay Modeli	20
4.3. ETS Kinematik Modeli	21
4.4. ETS Jacobian Matrisi	28
4.5. ETS Dinamik Modeli	31

4.5.1. ETS translasyonel hareketinin kinetik enerjisi	32
4.5.2 ETS dönme hareketinin kinetik enerjisi	32
4.5.3. ETS'nin sağ ve sol tekerlek kinetik enerjisi	33

BÖLÜM 5.

ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYEDE UYGULANAN KONTROL YÖNTEMLERİ	47
5.1. ETS İçin Oransal, İntegral, Türevsel (PID) Kontrol	47
5.2. ETS Bulanık Denetim	49
5.3. ETS Adaptif Kontrol	50
5.4. ETS Gürbüz Kontrol	51

BÖLÜM 6.

ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYEDE ÖNERİLEN MODELLEME VE KONTROL YÖNTEMİ	53
6.1. Optimizasyon Kavramı	53
6.1.1. Statik optimizasyon	54
6.1.2. Dinamik optimizasyon	54
6.2. Optimal Kontrol Yöntemi	54
6.2.1. ETS sisteminin matematiksel modeli	55
6.2.2 Maliyet fonksiyon	57
6.2.3 Optimal kontrol kısıtlamalar	59
6.3. Optimal Kontrol Problemi	60
6.4. Ayrık Zaman Optimal Kontrolü	61
6.5. ETS Durum Gözleyici	62
6.6. ETS'nin Model Öngörülü Kontrol (MÖK)	65
6.6.1. MÖK kavramları	66
6.6.1.1. MÖK elemanları	66
6.6.1.2. MÖK 'nin temelleri	66
6.6.2. Ayrık zaman MÖK	67
6.6.2.1. Çıkış ve durum değişkenleri öngörü	69

6.6.2.2. Receding horizon prensibi (kayan ufuk prensibi)	73
6.6.3. MIMO sistem için ayrık zamanlı MÖK tasarımı	75
6.6.3.1. Kısıtlamalı MIMO sistem için ayrık zaman MÖK tasarımı	77
6.6.3.2. Hildreth'in kuadratik programlama	79
6.7. ETS Bozucu Gözleyisi	80

BÖLÜM 7.

ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYE (ETS) BENZETİM ÇALIŞMALARI	90
7.1. Durum Uzay Modeli ve Gözleyici	90
7.1.1. Durum uzay model doğrulama	90
7.1.2. Gözleyici tasarımı ve benzetim	93
7.2. ETS MÖK Benzetim Çalışmaları	94
7.2.1. MÖK benzetim çalışması	96
7.2.1.1. Kısıtsız MÖK benzetim	97
7.2.1.2. Kısıtlı MÖK benzetim	99
7.2.2. Bozucu Gözleyicili MÖK benzetim	102
7.2.2.1. Bozucu gözleyici ve kısıtsız BGD MÖK benzetim	104
7.2.2.2. Bozucu gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim	106
7.2.3. Eğitim için ETS benzetim	109
7.2.3.1. Eğitim için kısıtsız MÖK benzetim	110
7.2.3.2. Eğitim için kısıtlı MÖK benzetim	111
7.2.3.3. Eğitim için Bozucu Gözleyici ve kısıtsız BGD MÖK benzetim	112
7.2.3.4. Eğitim için Bozucu Gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim	113
7.2.4. Engel için ETS benzetim	114
7.2.4.1. Engel için kısıtsız MÖK benzetim	114
7.2.4.2. Engel için kısıtlı MÖK benzetim	115

7.2.4.3. Engel için Bozucu Gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim	116
7.2.4.4. Engel için Bozucu Gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim	117
7.2.5. Kısıtsız MÖK ve kısıtsız BGDMÖK benzetin sonuçlarının karşılaştırması	118
7.3. ETS Kontrol Sisteminin Donanım Benzetim	119
BÖLÜM 8.	
SONUÇ	122
KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	134

KISALTMALAR LİSTESİ

BG	: Bozucu Gözleyici
ETS	: Elektrikli Tekerlekli Sandalye
MÖK	: Model Öngörü Kontrolü
BGDMÖK	: Bozucu Gözleyici Destekli Model Öngörü Kontrolü
DSP	: Digital Signal Processing
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
MIMO	: Çoklu giriş çoklu çıkış

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Klasik ETS	11
Şekil 2.2. Arkadan çekişli ETS	14
Şekil 2.3. Ön tekerlekten çekiş ETS	14
Şekil 2.4. Orta tekerlek sürücü ETS	15
Şekil 3.1. ETS özellikleri	16
Şekil 4.1. Dünya koordinat sisteminde ETS pozisyonu	23
Şekil 4.2. ETS Şematik Yan Görünümü	24
Şekil 4.3. Hız'a bileşenlerinin vektörel olarak elde edilişi	24
Şekil 4.4. ETS Yörüngesi	25
Şekil 4.5. (a) ETS modelini oluşturan transfer fonksiyon blokları (b) ETS giriş- çıkış blok diyagramı	41
Şekil 5.1. PID Denetleyici Sistemi	47
Şekil 5.2. Bulanık Denetleyici Sistemi	48
Şekil 5.3. Adaptif sistemin diyagram bloğu	50
Şekil 6.1. Modern Kontrol konfigürasyon	54
Şekil 6.2. Optimizasyon Problemi Temsili.....	60
Şekil 6.3. Luenberger Observer Şeması	64
Şekil 6.4. MÖK Temel Yapısı	67
Şekil 6.5. Ayrık-zaman öngörü kontrol sistemi	75
Şekil 6.6. Sağ tekerleğin transfer fonksiyonu blok diyagramı $D=0$ ve $u_r=0$	75
Şekil 6.7. Sağ tekerleğin transfer fonksiyonu blok diyagramı $D=0$	75
Şekil 6.8. ETS Sağ Tekerlek Blok Şeması	75
Şekil 6.9. Bozucu Gözlemci Blok Şeması	75
Şekil 7.1. Durum Uzayı Doğrulama için Benzetim Çalışmaları	84
Şekil 7.2. Gerçek açısız hız ve durum uzay modeli açısız hızının sonucu	85
Şekil 7.3. Gözleyici Benzetim Blok Diyagram	85

Şekil 7.4. Sağ ve Sol Gerçek ve Kestirilen DC Motor Akım ve Hız	95
Şekil 7.5. ETS'nin MÖK Blok Diyagramı	97
Şekil 7.6. Bozucu gözlemcisi olmayan MÖK	98
Şekil 7.7. Kısıtsız MÖK için sağ teker bozucu giriş	98
Şekil 7.8. Kısıtsız MÖK için sol teker bozucu giriş	99
Şekil. 7.9. Kısıtsız MÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş .	100
Şekil 7.10. Kısıtlı MÖK için sağ teker bozucu giriş	101
Şekil 7.11. Kısıtsız MÖK için sol teker bozucu giriş	102
Şekil 7.12. Kısıtlı MÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş ...	103
Şekil 7.13. ETS'nin BGDMÖK Blok Diyagramı	104
Şekil 7.14. Bozucu gözlemcili MÖK	104
Şekil 7.15. Kısıtsız BGDMÖK için sağ teker bozucu giriş	105
Şekil 7.16. Kısıtsız BGDMÖK için sol teker bozucu giriş	106
Şekil 7.17. Kısıtsız BGDMÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş	107
Şekil 7.18. Kısıtlı BGDMÖK için sağ teker bozucu giriş	108
Şekil 7.19. Kısıtlı BGDMÖK için sol teker bozucu giriş	109
Şekil 7.20. Kısıtlı BGDMÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş	110
Şekil 7.21. Eğim için kısıtsız MÖK benzetim	111
Şekil 7.22. Eğim için kısıtlı MÖK benzetim	112
Şekil 7.23. Eğim için bozucu gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim	113
Şekil 7.24. Eğim için bozucu gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim	114
Şekil 7.25. Engel için kısıtsız MÖK benzetim	115
Şekil 7.26. Engel için kısıtlı MÖK benzetim	116
Şekil 7.27. Engel için Bozucu Gözleyici ve Kısıtsız BGDMÖK benzetim	117
Şekil 7.28 Engel için Bozucu Gözleyicili ve Kısıtlı MÖK benzetim	118
Şekil 7.29 Kısıtsız MÖK ve Kısıtsız BGDMÖK Benzetin Sonuçlarının Karşılaştırması	119
Şekil 7.30. Simulink Donanım Modeli	120
Şekil 7.31. Transfer fonksiyonu, durum uzay ve ETS donanım	121

Şekil. 7.32. ETS Donanım sistem bileşenleri ve SIMULINK modeli	122
Şekil. 7.33. Joystick ve MATLAB/SIMULINK model	122

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. ETS yörüngesinde kullanılan değişkenler	26
Tablo 4.2. Dinamik modelde kullanılan ETS değişkenleri	31
Tablo 4.3. ETS'nin modellenmesinde kullanılan değişkenler	39
Tablo 7.1. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler	83
Tablo 7.2. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler	91

ÖZET

Anahtar kelimeler: Elektrikli Tekerlekli Sandalye (ETS), Açısal Hız, Bozucu, Gözlemci, Model Öngörülü Kontrol (MÖK), Bozucu Gözleyici Destekli Model Öngörülü Kontrol (BGDMÖK)

Elektrikli tekerlekli sandalye (ETS) engelli kişilerce kullanılan hareketlilik yardımcısı cihazlardır. Bağımsız hareket etmesi gereken veya el ile tekerlekli sandalye kullanamayan insanlar için ETS yararlıdır ve gereklidir. Tekerlekli sandalyede hız kontrol edilecek en önemli unsurdur. ETS sürüşü sırasında ortaya çıkan belirsiz çevre etkileri veya bozucuları ETS hız kontrolünün temel problemidir. Bu tez çalışmasında, çok giriş çok çıkışlı ve kublajlı olan ETS'nin sağ tekerlek ve sol tekerlek açısal hızlarını bir birinden bağımsız olarak kontrol etmek ve bozucu etkisini ortadan kaldırmak için kontrol yöntemleri önerilmiş ve tasarımları yapılmıştır.

ETS'nin enerji denklemleri yazılır ve bu denklemlerden ayrık-zaman durum denklemleri doğrudan elde edilerek ETS modellenir. Durum uzay modeli kullanılarak Luenberger gözleyici sağ tekerlek ve sol tekerlek DC motor akımlarını ve hızlarını kestirmek için tasarlanır.

ETS'nin hız kontrolünü yapmak üzere ayrık-zaman optimal Model Öngörülü Kontrol (MÖK) ve bozucu etkisini ortadan kaldırmak için Bozucu Gözleyici Destekli Model Öngörülü Kontrol (BGDMÖK) önerileri yapılır ve ETS nin ayrık-zaman durum uzay modeli kullanılarak tasarım yapılır.

ETS'nin elde edilen ayrık zaman durum uzay model doğrulaması, ETS'nin sağ ve sol teker hızlarının bozucu etkiler altında bağımsız kontrolü için önerilen MÖK ve BGDMÖK yöntemlerinin performans değerlendirmeleri ve karşılaştırmaları benzetim çalışmaları ile verilmektedir.

DISCRETE TIME OPTIMAL CONTROL OF ELECTRIC POWERED WHEELCHAIR (EPW)

SUMMARY

Keywords: Electric Powered Wheelchair (EPW), angular velocity, disturbance, observer, Model Predictive Control (MPC), Disturbance Observer Support to Model Predictive Control (DOSMPC)

Electric powered wheelchair (EPW) is the mobility assistive device used by disabled persons. EPW is useful and necessary for people who are not able to use a manual wheelchair or for people who must move independently. The velocity of wheelchair is the important aspect to be controlled. The uncertain environmental effects or disturbances occurring during the EPW driving is the major problem of EPW velocity control. In this thesis, control methods have been proposed and implemented to eliminate the disturbance effect and to independently control the right and left wheel angular velocities of EPW that is a coupled and multi-input multi-output system.

The energy equations are written and EPW is modeled by obtaining the discrete time state equations from the energy equations directly. By using state space model, the Luenberger observer is designed to estimate DC motor currents and velocities of right and left wheels.

Discrete time optimal Model Predictive Control (MPC) for velocity control of EPW and Disturbance Observer Supported Model Predictive Control (DOSMPC) for eliminating disturbance effect are proposed and state space model of EPW is used in design.

The discrete time state space model verification of the EPW is done by providing simulation results giving performance evaluation and comparison of MPC and DOSMPC methods proposed for independent velocity control of right and left wheels of EPW in the presence disturbance effects.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyada fiziksel engelli insanların ihtiyaç duyduğu en önemli araçlardan biri tekerlekli sandalyedir. Tekerlekli sandalye, kişisel hareketliliği arttırmak için en yaygın kullanılan yardımcı araçlardan biridir. Ayrıca engelli insanlara kendi toplumlarında üretken bir üye olmaları, insan haklarından yararlanmaları ve onur içinde yaşamaları için yardımcı olur [1]. İlk tekerlekli sandalye işlevsel olarak engelli insanların ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilmiştir. Tekerlekli sandalyenin manuel ve elektrikli tekerlekli sandalye (ETS) olmak üzere iki türü vardır. Son zamanlarda, ETS kullanıcıların hareketliliği ve rahatlığını sağlamak için geliştirildi. Tekerlekli sandalye kullanamayan veya bağımsız hareket etmesi gereken insanlar ve aynı zamanda uzak mesafe hareket etmesi gereken engelliler ve zorlu çevre şartları için ETS faydalı ve gereklidir. Güç destekli tekerlekli sandalye olarak adlandırılan ETS kullanıcının fiziksel yükünü azaltabilir ve aynı zamanda rehabilitasyon yardımcı cihazı olarak kullanılabilir [2]. ETS genel olarak joystick ile kontrol edilir. Joystick ETS nin yön ve hızını kontrol etmek için kullanıcı tarafından komut girişi için kullanılır. ETS de navigasyon kontrolünde ileri, geri, sola ve sağa harekette DC motoru surmek için joystick kullanarak basit kontrol algoritması [3]'de uygulanır. ETS ile ilgili araştırmalarda bir çok ETS kontrol metotları çalışılmaktadır. Bununla birlikte, araştırmacılar için ETS kontrolünün geliştirilmesinde ETS'nin takibinde hız denetimi zorluğu mevcuttur. Navigasyon ve hız için çevre ve ağır kullanıcı büyük etkiye sahiptir. Buna rağmen ETS joystick ile kullanıcı tarafından kontrol edilir ancak çevre belirsizlikleri öngörülmelidir. ETS'yi sürerken oluşan belirsiz çevre etkileri ve boczuyu ETS hız kontrolünde ana problemdir. ETS sisteminde dahili ve harici olmak üzere iki boczuyu kaynak mevcuttur. Dahili boczuyu ETS sisteminden gelmektedir ve sürtünme, eğim vs. ise harici boczuyu oluşturmaktadır.

ETS'nin modellenmesi ve kontrolü için araştışıcılar tarafından farklı yaklaşınlar geliştirilmektedir. Engelli insanlar için ETS önemlidir. Bu nüfusun uyumunda araştışıcılar ETS sistemi geliştirmek için bazı teknolojileri kullanmışlardır. [4]'de sunulan kinematik modele ilişkin matematiksel model ETS için DC motorun en popöler güç modülünü içerir. Park ve ark. [5] model takip kontrol ile güvenli sürüş algoritması geliştirdiler, bir teker engel tarafından sabitlenirse bile her bir tekerin model hızını ve yönünü takip edebilmesi için kontrolör kompanse edilmiş moment uygular.

ETS sisteminde kontrolör geliştirmek için dinamik model iyi anlaşılmalıdır. ETS navigasyonunda iyi performans sağlamak için araç dinamiğine dayalı kontrol blok çok önemlidir [6]. Onyango ve ark. [7-8] yokuş için yerçekimsel bozucular, sürtünme kuvvetleri ve kayma etkisi ile ilgili ETS'nin dinamik modelini geliştirdiler. Shung ve ark. [9], tekerlekli sandalye hareketinin dinamik modelini yokuş sürüşü için tasarladı ve [10]'da dış mekan sürüşlerinde kullanıcının kontrol taleplerini azaltmak için ETS'de hız geri besleme kontrolü geliştirdiler. Bilhasa iç mekan kullanımında merdiven tırmanışı için ETS denetleyicisi geliştirilmiştir [11]. RazakShehab [12], ETS'ye merdiven çıkma yeteneği için hidrolik krikolar tasarladı. [13-14]'te yer çekimini kompanze eden güç destekli tekerlekli sandalye (KGDTS) ile tepeye tırmanmak ve düz bir yüzeydeki gibi hareket için başka metod kullandılar. Güç destekli tekerlekli sandalye tasarımı ve modellenmesinde Lyapunov kararlılık teoremi kullanılarak tork gözleyici tasarlanır [15]. Tsai ve Hsueh [16], kuvvet / tork gözlemcisine dayanan, güç destekli tekerlekli sandalyeler için hareket koordinat dönüşümü ile kuvvet ark.gılayıcısız bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Sanal gerçeklik modelleme dilini (SGMD) kullanarak herhangi bir 3D SGMD ortamına entegre edilebilen 3D ETS'nin tasarımı [17] verilmiştir. Chénier ve ark. [18], arka tekerleklerin kinematikiğine dayanan her bir ön tekerin yönlendirmesini kestiren açık çevrim gözleyici ETS'de uyguladılar. Itaba ve ark. [19], ETS için dahili sensörler ve aktüatörlerin arıza teşhisi için bir yöntem oluşturdu. Poorten ve ark. [20] ETS navigasyonu için doğru çevresel destek etki geri bildirimini önermektedirler. Çevresel bozucuları tespit etmek için insan yeteneğinin ve tekerlekli sandalye tipi bir mobil robotun en iyi kombinasyonu [21-22] geliştirildi. Ayrıca, bozuk yol için konforlu sürüş kontrolü, Tanohata ve Seki tarafından bulanık algoritma kullanılarak geliştirildi [23].

ETS için boylamasına kayma azaltma yaklaşımı olarak, Chuy ve ark. [24] hız düşürmeye dayalı kayma azaltma kontrolü ve uygulanan torku tekerleklere indirgemeyi önermiştir. Güç destekli tekerlekli sandalye kontrolünde uzunlamasına, yanal ve yunuslama yön gibi tekerlekli sandalyenin üç boyutta entegrasyon hareket kontrolü üzerine [25]'de odaklanılmıştır Nguyen ve ark. [26], çok değişkenli kontrol problemini iki bağımsız skaler kontrol problemine indirgemek için üçgen diyagonal baskınlık (ÜDB) ayırma tekniğini uygulamışlardır. Brandao ve ark. robotik tekerlekli sandalyelerde dinamik ve statik engellerden kaçınmak için geliştirdikleri stratejide [27] yarı yapılandırılmış bir ortamda engellerin konumunu ve hızını tahmin etmek için araçta bir lazer tarayıcı kullanmışlardır. Erişilebilirlik sınırlı hareket kabiliyeti olan insanlar için çok önemli bir özelliktir, bu nedenle Ali ve ark. tekerlekli sandalyedeki bir kişi erişilebilirliği için uygulanabilir yörüngenin varlığını [28]'deki çalışma ile verirler. [29]'da manevra yaparken tekerlekli sandalyenin kinetic enerjisini (KE) kısımlara ayırmak için sistematik bir yöntem sunulur. Tekerlekli sandalyedeki ön tekerlekler, ETS hareket kontrolünde önemli bir etki ederler, bu nedenle Ding ve ark. ön tekerlek yönelimlerinin etkilerini ve ters yönlü sürüşlerde ETS'nin sürüş hızının kararlılık analizini [30]'da yaparlar.

Tekerlekli sandalyenin hızı kontrol edilmesi gereken önemli bir husustur. Normal sürüş sırasında tekerlekli sandalye sürücüsü, tekerlekli sandalyenin hızını ve yönünü bir joystick kullanarak veya tekerlekli sandalyenin yönünü ve hızını kontrol eden benzeri bir cihaz kullanarak komut girişi uygular [31]. ETS hızı için Model öngörücü kontrol (MÖK) yaklaşımına dayanan yeni bir kontrolör modeli önerilmiştir [32]. Bozucu ETS kontrol cihazının performansına etki eder, bu nedenle sürtünme kuvvetlerini gidermek için bozucu gözleyicisi (BG) uygulanır. ETS kontrol sistemindeki bozucunun etkisini kestirmek ve azaltmak için ileribesleme terimiyle BG [33, 34]'de geliştirilmiştir. Sürme ve yörünge izleme sistemi için tekerlekli sandalyenin hızının belirlenmesinde uyarlamalı optimum kontrol kullanan gelişmiş dijital kontrol teknikleri [35]'de tasarlanmıştır. Güçlü nöro kayan kip çok değişkenli kontrol stratejisi [36]'da Nguyen ve ark. tarafından ETS sisteminde uygulanmıştır. Shim ve ark. [37] master-slave kontrol mimarisi olarak adlandırılan, master'ın slave'yi sürüş için yönettiği ve slave'inde motoru sürdüğü, yeni bir mimari kurdu. ETS'nin

yokuş aşağı yolda optimum hızda sürülmesi için, [38, 39]'da yeni bir rejeneratif fren kontrol sistemi geliştirilmiştir. Tekerlekli sandalyeyi kontrol etmek için tırmanma faktörü düşünülmelidir. Seki ve ark. [40], sürüş modu anahtarlama dayalı elektrikle çalışan tekerlekli sandalyeler için yeni bir adım tırmanma kontrolü yöntemi geliştirdi. [41]'de ETS merdiven tırmanma kontrol sisteminde merdiven tırmanma kabiliyetinin bir motor tork talebi olduğu göz önüne alınmaktadır.

Tekerlekli sandalye kullanıcıları için en büyük zorluk olan eğimli ortamda sürüş problemini çözmek için Nomura ve Murakami [42] güç yardım kontrolü için eşdeğer sarsıntı bozucu kullandılar. Bozucu tork kestirim temelli ETS'nin düz yol sürüş kontrol sisteminde minimum sarsıntı kontrolü [43] ve bulanık algoritmaya dayanarak uygulanması [44] gerçekleştirilmiştir. Katsura ve Ohnishi [45], bilinmeyen ortamdan istenen bilgilerine dayanarak açık alanda tekerlekli sandalye hareket kontrolüne yeni bir bakış açısını geliştirdiler. Güç destekli tekerlekli sandalyeye kuvvet sensörsüz kontrolcüyü entegre eden senkronize hareket kontrol şeması [46] 'da geliştirilmiş olup, burada çift sürücülü bir ETS senkronize hareket hatasını analiz etmek için kullanılmıştır ayrıca pürüzlü yüzeylerde istenilen hareket yolunu elde etmek için tork gözlemcisi uygulanarak kuvvve ark.gılayıcısız kontrol sistemi geliştirilmiştir. [47]'de ETS'yi itme jantını ittirmek için sadece hız bazlı yeni bir sistem kullanan çalışmada tork gücünü ölçmek için bir pahalı bir sensör kullanılmıştır. Suzuki ve ark. [48]'de yörünge takip kontrol metodu için LQ'nun kısıtlanmış özellikleri ile IMC tasarımı birleştirilmiştir. Bu kontrol metodu tek taraftan sürülen tekerlekli sandalye için kullanılmıştır [49]. Tork sensörlerinden ayrı olarak çalışma [50]'de elektromiyogram sensörü sürücünün niyetini tahmin etmek için kullanılmıştır. Demeester ve ark. [51]'de tekerlekli sandalyenin kontrolü için kullanıcı merkezli bir mimarinin tanınabilirliğinin planlanması için olasılık yapısı kullanmıştır. [52]'de ETS'nin atalet momentini ölçmek için deneysel bir yöntem anlatılmıştır.

ETS'nin navigasyon kontrolü için manevra kolunu kullanmak yerine çeşitli yollar mevcuttur. Bu otonom sistemlerden birkaç tanesi çalışma [53, 54]'de paylaşılmıştır. Brown ve ark. [55] optimal kontrol teorisi ile örüntü tanıma tekniklerini birleştirerek elektrikli tekerli sandalyenin kontrolünü oransal, integral ve türevsel (PID) kontrol

metodu kullanarak yapmıştır. PID kontrolörlerin hız ve yörünge takip performansları çalışma [56], [57], [58], [59]'da sunulmuştur. ETS kontrolü için kullanılan diğer kontrol metotlarından biri olan bulanık mantık kontrolü çalışma [23], [60], [61], [62], [44], [63]'de ve adaptif kontrol yöntemleri [64], [65], [66]'de ve gürbüz kontrol yöntemleri ise çalışma [67, 68]'de sunulmuştur. PID kontrolü, bulanık mantık kontrolü ve adaptif kontrol ile ilgili bütün ayrıntılar bölüm 5'te verilmiştir. M.Ackermann ve ark. [69]'da yürütme dinamikleri baz alınarak optimal formülasyon modeli, kütle ve yokuş tırmanma açısının farklı kombinasyonlarının üretilmesi baz alınarak ETS'nin hareketi üzerine yapılan kestirim simülasyonları sunulmuştur.

Kontrol edilecek olan bir sistem öncelikle modellenmelidir. Elektrikli tekerlekli sandalyelerin kontrolünde öncelikle güvenilir bir yazılım modeli kullanılarak doğrulanması hızlı kontrol prototipleme için çok önemlidir [70]. Atesoglu [71] çalışmasında ETS için ayrık zaman optimal kontrolünü otonom tekerlekli sandalyenin navigasyon kontrolü, non-lineer dinamik model ve ayrık zaman PI tasarımı gürültü girdili ayrıştırma (Disturbance Input Decoupler-DID) ile gerçekleştirilmiştir. ETS'nin dinamiklerinin MIMO tanımı birbiri ile bağlantılı olan sağ ve sol tekerleklerin lineer ve açısız hızlarının gözlenmesi ile gerçekleşir [72].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ETS için sistemi tanımlayan diferansiyel denklemler kullanılarak doğrudan durum uzay modelinin elde edildiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada dinamik denklemlerden doğrudan durum uzay model edilmiştir. Böylece sayısal modern kontrol yöntemlerini uygulanabilme ve geliştirme imkanı elde edilmiştir. ETS'nin ayrık zaman optimal kontrolü, bozucu etkilerinin azaltılması için ve DC motor'un akım kestirimi gibi bazı kontrol metotları geliştirilmiştir. Bu çalışmada DC motorun akımlarının kestirebilmesi için gözleyici tasarlanacaktır. Model öngörülü kontrol (MÖK) metodu tekerlekli sandalyenin hız kontrolü için kullanılacaktır ve ETS'nin sürüldüğü çevresel etkenlerden kaynaklı bozucunun giderilmesi için ise Bozucu Gözleyici Destekli Model Öngörülü Kontrol (BGDMÖK) tasarımı yapılacaktır.

ETS'nin modellenmesi, kontrolör tasarımı, açısal hız kontrolü ve bozucu gözleyici ve kontrolcü tasarımı/geliştirilmesi teorik çalışmalardan sonra uygulamaları için benzetim yaklaşımı kullanılacaktır. Başlangıç probleminden başlanarak ve sonuçların elde edilmesine kadar tüm sistem MATLAB programı kullanılarak tasarlanmış ve benzetim çalışmaları yapılmıştır.

1.1. Araştırma Amaçları

Bu çalışma aşağıda sırasıyla belirtilen amaçların gerçekleştirilmesini içermektedir:

1. ETS'nin kontrolü için ayrık zaman durum uzay modelinin doğrudan elde edilmesi.
2. DC motor akımlarının doğru kestirilebilmesi için bir gözleyici tasarımı.
3. Optimal Model Öngörülü Kontrol geliştirilmesi.
4. ETS'nin hız kontrolünün gürbüzlüğünün sağlanabilmesi için bozucu etkilerinin bozucu gözleyici ve destek kontrolcünün tasarlanması ile (BGDMÖK) yok edilmesi.

1.2. Tezin Literatüre Katkısı

Bu tez çalışmasının ETS kontrol sistemi alanında literatüre katkısı, aşağıda verildiği gibi ETS modelleme ve kontrolünde yeni yaklaşımlar uygulanması şeklinde olmuştur.

1. Modellemede, ETS enerji denklemleri yazılarak, ETS ayrık zaman durum uzay modeli doğrudan elde edilmiştir.
2. Önerilen kontrol yöntemleri de:
 - a. Klasik Model Öngörülü Kontrol (MÖK) kuralının ETS için kullanılması.
 - b. Bozucu Gözlemci Destekli Model Öngörülü Kontrol (BGDMÖK) kuralının ETS için geliştirilmesi ve uygulanması şeklindedir.

1.3. Çalışmada Kullanılan Yöntemler

Bu tezde kullanılan yöntemler; literatür çalışması, fiziksel ve kontrol modelinin tasarımı ve geliştirilmesi ile simülasyon sonuçları gibi aşağıda alt basamakları ile verilen adımlardan oluşur:

1. Araştırılan alandaki literatürü gözden geçirme
 - a. Elektrikli Tekerlekli Sandalye (ETS).
 - b. ETS modellemesi.
 - c. Kontrol teknikleri.
2. ETS'nin fiziksel ve kontrol modelinin tasarımı ve geliştirilmesi
 - a. Matematiksel formülasyonların geliştirilmesi.
 - b. Sağ ve sol tekerleğe ait DC motorların akımlarını elde etmek için durum gözlemcisi tasarımı.
 - c. Sağ ve sol tekerleğe ait açısal hızları belirlemek için MÖK tasarımı.
 - b. MÖK'e destek olması için bozucu gözlemcisi tasarımı.
3. Benzetim yazılımının geliştirilmesi ve sonuçlar
 - a. Denetleyicilerle birlikte sistemin simülasyon modelinin oluşturulması.
 - b. Modelin doğrulanması ve test edilmesi.
 - c. Sonuçların elde edilmesi ve değerlendirilmesi.

1.4. Tezde İzlenen Yol

Tezde izlenen yola genel bir bakış aşağıda verilmiştir.

- a. Birinci bölümde tezin kısa bir tanıtımı sunulmakta, araştırma hedefleri belirtilmekte ve ETS kontrol sistemine yönelik, literatüre yapılan katkı, kullanılan metodoloji ve izlenen yol verilmektedir.
- b. İkinci bölümde ETS genel tanımı ve sınıflandırması verilirken, bazı ETS türleri de açıklanmıştır.

- c. Üçüncü bölümde ETS'de kullanılan donanım ve sistem bileşenlerini gösterilmektedir. ETS optimal kontrol sistemi geliştirilmesi için, ETS'de kullanılan bu donanım ve sistem bileşenlerini iyi bilmek önemlidir.
- d. Dördüncü bölümde genel olarak ETS'nin modellenmesi incelenir. Modelleme; kontrol sisteminin simülasyon ve gerçek sistemde uygulanmasından önce, uygun biçimde oluşturulması için önemli bir tasarım unsurudur.
- e. Beşinci bölümde PID kontrol, adaptif kontrol ve bulanık kontrol gibi ETS'de genellikle uygulanan ve kullanılan kontrol yöntemlerine değinilmektedir.
- f. Altıncı bölümde ETS için önerilen modelleme ve kontrol yöntemleri sunulmaktadır. Burada ETS'nin kinematik ve dinamik modeli geliştirilmiştir. Gözlemci Modeli ve MÖK yöntemi bu bölümde açıklanmıştır.
- g. Yedinci bölümde; optimal kontrol kullanarak kısıtlamalı ve kısıtlamasız olarak geliştirilen MÖK ve BGDMÖK için ETS kontrol sistemi simülasyon sonuçları sunulmuştur.
- h. Sekizinci bölümde; çalışmada ele alınan ETS'nin modellenmesi, ayrık zaman optimal kontrolü, DC motor akımlarının gözlemci ile tahmini, MÖK ve BGDMÖK konuları için değerlendirmeler ve varılan sonuçlar sunulmaktadır.

BÖLÜM 2. ELETRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN (ETS) GENEL TANIMLARI VE SINIFLANDIRMASI

2.1. ETS'nin Genel Tanımları ve Kısa Tarih

Hareketlilik insanın önemli bir ihtiyacıdır. İnsanın hareketliliği bağımsızlığın hedefi olarak temsil edilir. ETS engelli insanlar için daha fazla hareketlilik sağlar. Elektrikli tekerlekli sandalye (ETS), elektriksel güç kaynağı, motorlar ve piller tarafından tahrik edilen yardımcı bir cihazdır [73]. ETS bir joystick iterek hareket ettirilir, joystick bir ETS'yi kontrol etmek için kullanılan temel ve yaygın cihazdır. Tekerlekli sandalye ihtiyaç insanlar toplumun yaşlanması ve sakatlıklardan dolayı arttığı için ETS teknolojisi, araştırılması gereken en uygun teknolojiler haline gelmiştir. Genellikle ETS itiş için kullanılan arkada iki büyük tekerlek ve sandalyenin dönmesi için ön tarafta kullanılan iki küçük tekerlek olmak üzere dört tekerleklerden oluşur [74]. ETS tarihinin ilk kez başlangıç birinci dünya savaşı sırasında bir motorun manuel tekerlekli sandalyeye eklenmesi ile başlamıştır [73, 75].

ETS ilk olarak 1940 sonlarında ve 1950'de ciddi bozucuları olan kişiler için kullanıldı [75]. U. S tarafından ETS ilk patent 1940'larda onaylandı. Engelli insanlar o zamanda fakirdi, bu nedenle elektrikli tekerlekli sandalyeler için çok az talep vardı. [76]. II. Dünya Savaşı sırasında uygulanan tıbbi ilerlemeler, engelli insanların hayatta kalabilmesini kolaylaştırmıştır. Ayrıca, ETS'nin kullanılabilirliği geliştiği için ETS'ye olan talep II. Dünya Savaşından sonra artmıştır.

II. Dünya Savaşı'ndan sonra, 1960 ve 1970'de, ETS'lerin sayısı artmıştır, ancak ETS'ler hala güvenilmez ve verimsizdir. 1990 yılında üreticiler ETS'ler için farklı tasarımlar yapmaya başladı. En önemli değişiklik koltuğu çerçeveden ayırmaktı [76]. Dahası, tekerlekli sandalye tasarımında tekerlekli sandalye teknolojisinin daha hafif, daha

yüksek performans ve daha güvenilir olmasını sağlaması gerekir. Ayrıca, kullanıcının ETS'yi sürmesini kolaylaştıracak ETS kontrol teknikleri de sağlanmalıdır.



Şekil 2.1. Klasik ETS

ETS teknolojisi arttıkça, ETS'de mekanik ilerleme de arttı. ETS'de dolaylı sürücü ve doğrudan sürücü sistemleri olmak üzere iki tip sürücü mekanizması vardır. Geleneksel ETS'lerde kasnaklar ve sürücü kayışları gibi dolaylı tahrik sistemleri kullanılmaktadır. Doğrudan sürücü sistemleri elektrikli tekerlekli sandalyelerde kullanılan şanzıman gibidir [73]. Tekerlekli sandalye tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar, kullanıcı için daha aktif bir yaşam sürdürebilmeli ve kullanıcıların sağlık ve güvenliklerini etkilemeden mümkün olduğunca çok aktiviteye katılmasını sağlamalıdır [1]. Günümüzde ETS teknolojileri, özellikle tekerlekli sandalye çekiş kontrolü, tekerlekli sandalye denge kontrolü, merdiven-tırmanma sistemleri ve tekerlekli sandalye navigasyonu için kontrol tekniklerinin her alanında gelişmiştir.

2.2. ETS Sınıflandırılması

ETS teknolojilerinin ilerlemesi, ETS'nin kullanıcılar tarafından daha kolay kullanılmasını sağlar. ETS, manuel tekerlekli sandalye kullanamayan insanlar için

kullanılmaktadır. ETS, özellikle bireyin bağımsızlığı için insanların yaşam kalitesini iyileştirmek için yararlıdır.

2.2.1. ETS fonksiyonlarının sınıflandırılması

ETS, sınıflara veya kategorilere ayrılabilir. Gruplamalar, tekerlekli sandalyenin işlevi ve kullanım amacına dayanmaktadır.

2.2.1.1. İç mekan ETS modelleri

İç Mekan tekerlekli sandalye, sınırlı bir alanda manevra kabiliyetine sahip ETS türüdür. [76]. İç mekan ETS modelleri kompakt tasarım ve dar alanlarda hareket kabiliyetine sahiptir. Ancak bu ETS'lerin pil kapasiteleri ve motorlarının güçleri diğer ETS'lere göre daha düşüktür. Bu tekerlekli sandalyeler kapalı mekanlarda kullanılır ve tekerlekli sandalyenin önünde küçük tekerlekler bulunur. Küçük tekerlekler iç mekanda manevra kabiliyetini arttırmak için tasarlanmıştır [77]. Bu tekerlekli sandalye fonksiyon olarak sadece iç mekanlarda kullanılabilir.

2.2.1.2. İç /dış mekan ETS modelleri

İç / dış mekan ETS, evde, okulda, ofiste ve toplumda hareket etmesi gereken kişiler tarafından kullanılan tekerlekli sandalye türüdür. Bu ETS'lerin iç ve dış mekan olmak üzere ikili kullanımı vardır [78]. Bu tekerlekli sandalyeler iki işlev için kullanılabilir, ancak güvenlik ve ETS'nin kullanılabilirliği için bu tekerlekli sandalyeleri açık havada kırsal alanlarda çim veya toprak üzerinde kullanmamalıdır. Bu tip ETS'lerin iç mekan kullanımında ETS büyük dönüş yarıçapına ve manevra alanı gereksinimlerine sahip büyük bir odada kullanılmalıdır [77].

2.2.1.3. Dış mekan ETS modelleri

Dış mekan ETS, uzun mesafelere hızlı bir şekilde hareket etmek isteyenler için, sert yüzeyler üzerinde, geniş bir aralık boyunca hareket eden insanlar için uygundur [76],[78]. Bu tekerlekli sandalye tipi, merdiven tırmanışı için kullanışlı olan, öndeki geniş tekerlek çapına sahiptir [77].

2.2.1.4. İç mekanda merdiven tırmanma ETS modelleri

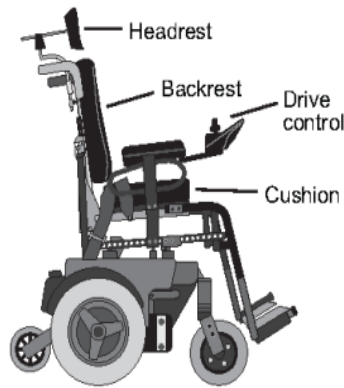
Bu merdiven tırmanıcısı ETS, özel evlerde ve apartmanlarda ve kamu binalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu ETS modellerinde ayrıca ETS riskinin düşmesini önlemek için iyi fren sistemi vardır.

2.2.2. ETS sürücü tekerleklerinin temel konumlarına göre sınıflandırılmaları

ETS sürücü tekerleklerinin konumu, ETS manevraları için önemli etkiler sağlamaktadır. Bu nedenle ETS'ler, sistemin ağırlık merkezine göre tahrik tekerlekleri konumuna göre sınıflandırılmıştır.

2.2.2.1. Arka tekerlekleri sürücü ETS modelleri

ETS, dış mekan amaçlıdır. Sürücü tekerlekleri, kullanıcının ağırlık merkezinin arkasındadır ve küçük tekerlekler ön taraftadır. Bu ETS, daha büyük dönüş yarıçapı nedeniyle dar yerlerde manevra yapmakta zorluk çekmektedir [79].



Şekil 2.2. Arkadan çekişli ETS [79].

2.2.2.2. Ön tekerlekler sürücü ETS modelleri

ETS iç mekan amaçlıdır. Sürücü tekerlekleri, kullanıcının ağırlık merkezinin ön taraftadır ve küçük tekerlekler arkasındadır. Bu ETS dar bir dönüş yarıçapı sağlar [79].



Şekil 2.3. Ön tekerlekten çekiş ETS [79].

2.2.2.3. Orta tekerlek sürücü ETS modelleri

Bu ETS iç mekan için uygundur, ancak dış mekan kullanımları için uygun değildir, çünkü daha küçük bir dönüş yarıçapına sahiptir. Sürücü tekerlekleri, kullanıcının ağırlık merkezinin direkt altındadır [79].



Şekil 2.4 Orta tekerlek sürücü ETS [79].

2.2.3. ETS'nin sürücü mekanizmasına dayalı sınıflandırılmaları

ETS, sürücü mekanizmasına dayalı olarak sınıflandırılabilir. Bu mekanizmalar manuel tekerlekli sandalyede ve güç tekerlekli sandalyede uygulanmaktadır.

2.2.3.1. Dolaylı sürücü ETS modelleri

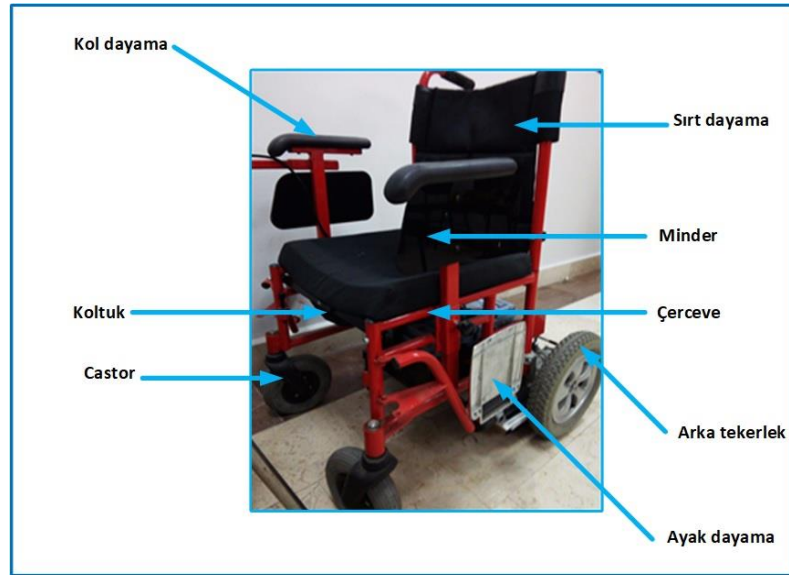
Geleneksel ETS, kasnaklar ve sürücü kayışları gibi dolaylı sürücü sistemleri kullanılmaktadır [73]. ETS için, dolaylı sürücü kullanılmayacaktır çünkü ETS'de sürücü sistem direkt sürücü kullanacaktır.

2.2.3.2. Direkt sürücü ETS sistemleri

Şanzımanlar gibi direkt sürücü sistemleri elektrikli tekerlekli sandalyelerde kullanılır. Çağdaş elektrikli tekerlekli sandalyelerin çoğu doğrudan sürücü sistemine sahip bir güç tabanlı kullanır. Tipik olarak, elektrikli tekerlekli sandalyeye güç sağlamak için seri olarak 12 voltluk iki akü (toplam 24 volt) gerekmektedir [73].

BÖLÜM 3. ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN (ETS) DONANIMI VE SİSTEM ALT BİLEŞENLERİ

ETS, koltuğun arkasındaki iki büyük tekerlek ile ön taraftaki iki küçük tekerlekten (castor tekerlekleri), iyi bir fren sisteminden, ayak, kol ve sırt dayamalarından ve bir minderden oluşur. Devrilmeyi önlemek için de genellikle küçük ek özellikler bulunur. ETS kontrol sistemi ise; kişisel bilgisayar, sayaç, analog-dijital dönüştürücü (ADC) ve dijital-analog dönüştürücüden (DAC) oluşur.



Şekil 3.1. ETS özellikleri.

3.1. ETS Çerçevesi

Katlanabilir ve sabit olmak üzere tekerlekli sandalyenin iki temel çerçeve türü vardır. Yaygın olarak, üç çeşit çerçeve şekli vardır. Bunlar kutu çerçevesi, konsol çerçevesi ve T çerçevesidir. Kutu çerçevesinde çerçeveyi oluşturan boruların birleşim şekli dikdörtgen şeklindedir. Konsol çerçevesinde, ön ve arka tekerlekler, sandalyeye

yandan bakıldığında sadece bir boruyla bağlanmış gibi görünür. T çerçevesinde ise, tekerlekli sandalyenin önde sadece bir tekerleği vardır [76].

3.2. ETS Tekerlekleri

Tekerlekler ETS performansı için önemli bir etki yaratır. Dar alanlarda hareket etmek küçük tekerlekli sandalyeler için daha kolaydır. Büyük tekerlekleri olanlar ise engebeli zeminde daha iyi ilerlemektedir. Lastikler hava ile şişirilmiş veya içi dolu sert malzemedden üretilmiş olabilirler. Bu iki tip lastik arasında görebileceğimiz delinmeye karşı dayanıklı kauçuk lastikler düşünülebilir. Hava ile şişirilmiş derin tırtıklı lastikler eğimli, çamurlu ve engebeli zeminlerde yol tutuşu yönünden daha iyidir [80]. Tüm bu lastik tipleri, farklı tür yüzeylerde manevra yapmak için farklı özelliklere sahiptir. İç mekan, dış mekan ve karşılaşılabilecek yüzey engelleri dikkate alınarak bir seçim yapılmalıdır. Arka tekerlek çekiş sistemi ise; DC motor, şanzıman, zincir ve bir muhafazadan meydana gelir.

3.3. ETS Ayak Dayama

ETS ayak dayama kısımları sabit, katlanabilir veya ayrılabilir olabilir. Bazı ayaklıklar ayaklar için daha iyi bir destek alanı sunar ve aynı zamanda kullanıcıya ayaklarını hareket ettirmek serbestlik de tanır. Ayak dayamasının iyi bir pozisyonda olması, kullanıcının bacak uzunluğu ile uyumluluğu sağlar. Yaygın olarak ayaklıklar, yerden 25 ve 50 milimetre yüksekliğe yerleştirilirler. Genellikle ayaklıklar, sandalyenin kapı, duvar veya başka bir koltuk gibi bir engelle temas eden ilk kısımları olduğundan oldukça dayanıklı olmalıdırlar [76], [80].

3.4. ETS Kol Dayama

Tekerlekli sandalyenin kol dayaması, sürücünün bir tarafa ya da diğerine yaslandığında dirsekleri için destek sağlar. Kol dayama kolun tamamını destekleyecek biçimde yastıklı uzun ince veya masa şeklinde belli bir çalışma alanı sunan kısa geniş

biçimde olabilir. Ayrıca kol dayamasının yüksekliği ayarlanabilen türde olması daha iyi bir konfor sağlayacaktır. [76], [80].

3.5. ETS Sırt Dayama

ETS sırt dayaması, kullanıcının belini ve sırtını olabildiğince sabitleyecek şekilde yüksek olmalıdır. Sırt dayaması çeşitleri; katlanabilir sırtlıklar taşıma veya depolama boyunca tekerlekli sandalyenin genel boyutunu azaltabilir. Katlanmayan sırtlıklar, daha sıkı ve destekleyici olup güvenli bağlantı sağlarlar. Yarım ya da tamamen arkaya yatabilen sırtlıklar, bir yardımcı tarafından manuel olarak veya bazı tekerlekli sandalyelerde kullanıcı tarafından elektriksel olarak ayarlanabilir [76].

3.6. ETS Koltuk

Koltuk ETS'nin önemli bir parçasıdır. Koltuk, kullanıcının duruşu ve rahatlığı için doğrudan etkiye sahiptir. Bu sebeple kullanıcının doğru koltuk ölçüsünü ve stilini seçmesi önemlidir [80].

3.7. ETS Frenleri

Frenler ETS'nin önemli ve bazen hayati de olan diğer bir unsurudur. Tüm ETS'lerde mutlaka fren vardır. Genellikle kullanıcı kumanda kolunu bıraktığı zaman bu frenler otomatik olarak açılır [80]. Sandalyeye inip binerken kayma veya düşme olmaması için frenler sandalyeyi sabitleme işlevi görür.

3.8. Döner Tekerlek (Castor)

Döner/Castor Tekerlekler, ön tarafta bir veya iki tane bulunur. Bu tekerlekler daha küçük olurlarsa; genellikle daha büyük ayak açıklığına müsaade ederler. Bu da tekerleklerin dönerken kullanıcıların topuklarına çarpmasını önlemeye yardımcı olur [76]. ETS manevra kabiliyeti açısından caster tekerlek önemlidir.

3.9. ETS Minder

Minder ETS kullanıcısı için rahatlık sağlayacaktır. Minderler ve sırt dayaması genellikle konturlu köpük, hava dolu keseler, hava ve köpük kombinasyonları ve jeller gibi çeşitli malzemelerden yapılır [79]. Stil ve malzeme seçimi, bireysel ihtiyaç ve kullanım biçimine bağlı olacaktır.

3.10. Aç/Kapat Buton veya Anahtar

Tekerlekli sandalyenin hatayla kumanda koluyla hareket etmesini önlemek için, kullanıcı tekerlekli sandalyeye binip inerken kazaya yol açmamak için genellikle kumanda kolu çevresine yerleştirilmiş olan aç/kapat anahtarı ile kontroller kapatılmalıdır [80].

3.11. ETS Kumanda Kolu

ETS'lerin çoğu, hızı ve yönü kontrol etmek için minimum el hareketi gerektiren oransal bir kumanda koluna (joystick) sahiptir. Kumanda kolu (joystick) ETS sistemleri için en yaygın kullanılan kullanıcı arayüzü erişim cihazıdır. Kumanda kolunu daha fazla itmek ETS hızını artıracaktır. Kolu geri çekmek tekerlekli sandalyeyi geri yönde hareket ettirecektir. Yön ise; kumanda kolunun sola veya sağa doğru hareket ettirilmesi ile kontrol edilir [76], [80].

3.12. Bataryalar

ETS performansında en önemli sınırlayıcı faktörlerden biri olan batarya; enerji depolama sistemi olarak kullanılır. ETS tipik olarak 24 volt d.a. batarya sistemi ile donatılır [76]. Batarya kapasitesinde elde edilebilecek artış, ETS kullanıcılarının daha uzak mesafelere seyahat etmesine izin verecektir. Benzer şekilde batarya ömrü iyileştirilebiliyorsa, kullanıcılar ETS'den daha uzun süreli güvenilir bir performans alacaktır.

BÖLÜM 4. ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYENİN (ETS) MODELLENMESİ

Bu bölümde ETS matematiksel modelini oluşturmakla ilgilenilecektir. ETS modelinin oluşturulması, ilgili sistemin nasıl kontrol edileceğinin belirlenmesinde önemli bir unsurdur. Modelleme; fiziksel özellikleri anlamada yardımcı olur ve ilgili kontrol algoritmalarını geliştirmenin temelidir [81]. Burada tüm fiziksel etkiler dahil edilerek ETS'nin ayrıntılı modelleri tartışılmıştır. ETS'nin modellenmesinden sonra, bulunan sonuç simülasyon için kullanılacaktır. Fiziksel bir model, sistemi iyi bir dinamik karakteristikte açıklayabilmelidir. Dinamik karakterli bir sistemin matematiksel tanımı, matematiksel model olarak adlandırılır. Dinamik kontrol sistemlerinde, bozucular, gürültüler, doğrusal olmayan elemanlar, zaman gecikmesi, dinamikler ve dinamiklerin parametrelerinin belirsizlikleri, giriş ve durum değişkenlerine ait kısıtlamalar vb. gibi istenmeyen bazı unsurlar olabilir. Sistemin karakteristiğine bağlı olarak istenmeyen bu unsurların tümü veya bir kısmı her sistemde vardır. Model, gürültülü stokastik bir sistem veya bozucuları olan deterministik bir sistem olarak ifade edilebilir. Model doğrusal veya doğrusal olmayan bir sistemi temsil edebilir [82]. Matematiksel modeller birçok farklı biçimde sunulabilir. Belli bir sistemde veya belli bir koşulda bir matematik model diğer modelden daha uygun olabilir. Örneğin, durum uzay gösteriminde modelleme kullanmak optimal kontrolde daha avantajlıdır. Öte yandan, tek girişli, tek çıkışlı, doğrusal zamanda değişmeyen sistemlerin geçici hal cevabı ya da frekans cevabı analizlerini yapmak, transfer fonksiyonu gösterimini kullanarak diğer gösterimlerden daha kolay olabilir. Çeşitli analitik yöntemler ve bilgisayar araçları, bir sistemin matematiksel modeli elde edildikten sonra analiz ve sentez amacıyla kullanılabilir [83]. Matematiksel model; elektriksel sistemler için Kirchoff yasası, mekanik sistemler için Newton yasaları vb. gibi fiziksel yasalara dayanır. Bir sistemin matematiksel modeli, o sistemin dinamiklerini gösteren denklemler bütünüdür.

4.1. Transfer Fonksiyonu Modeli

Transfer fonksiyonu, basit sistem analizine müsaade eden; doğrusal tek-giriş tek-çıkış, sürekli, zamanla değişmeyen, sabit parametrelere sahip sistemleri temsil etmede karmaşık frekans domeninde tanımlı deterministik bir modelleme yaklaşımıdır. Transfer fonksiyonu Denklem (4.1) 'de gösterilen matematiksel denklem olarak ifade edilir.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (4.1)$$

Transfer fonksiyonu, sisteme ait sabit kabul edilen parametrelerden elde edilen iki polinomun bölümü şeklinde; sistemin çıkışı ile girişi arasındaki ilişkiye dayalı ifade edilir. Giriş fonksiyonuna bağlı değildir. Giriş çıkış ilişkisini ifade eder.

4.2. Durum Uzay Modeli

Durum uzay zaman domeni çok giriş-çok çıkışlı, doğrusal olmayan, zamanla değişen gibi özelliklere sahip kompleks modern sistemlerin yüksek doğrulukta kararlı, optimal, gürbüz kontrolü gibi senaryoları gerçekleştirmek için elverişlidir. Modern kontrol teorisi; durum uzay yöntemleri ile çok giriş-çok çıkışlı sistemlerin kontrol edilmesini ele alır. Durum uzayı; x_1, x_2, \dots, x_n durum değişkenleri olmak üzere x_1, x_2, \dots, x_n koordinat eksenlerinden oluşan n boyutlu uzaydır [83]. Durum değişkenleri, sistemin dinamik karakterini tam anlamıyla belirten en az sayıdaki değişkenler kümesidir. Herhangi bir durum, durum uzayındaki bir nokta ile temsil edilebilir. Durum-uzay analizi, dinamik sistemlerin modellenmesinde rol oynayan giriş değişkenleri, çıkış değişkenleri ve durum değişkenleri gibi üç tip değişkenle ilgilidir. Doğrusal sistem, Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)'de ifade edilen durum değişkenleri ile karakterize edilir.

Denklem (4.2) doğrusal, zamanla değişmeyen bir sistemin durum denklemdir. Denklem (4.3) ise aynı sistem için çıkış denklemdir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.2)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4.3)$$

Burada $y(t)$, $x(t)$, $u(t)$ boyutları A, B, C ve D matrislerine uygun olacak biçimde sırasıyla durum değişkeni vektörü, çıkış vektörü ve kontrol işareti vektörleridir. A $n \times n$ boyutludur ve durum matrisi olarak adlandırılır. B $n \times r$ boyutludur ve giriş matrisi olarak adlandırılır. C $m \times n$ boyutludur ve çıkış matrisi olarak adlandırılır. D ise $m \times r$ boyutlu olup doğrudan iletim matrisi olarak adlandırılır [84].

Doğrusal olmayan bir sistem ise Denklem (4.4) ve Denklem (4.5) 'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (4.4)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (4.5)$$

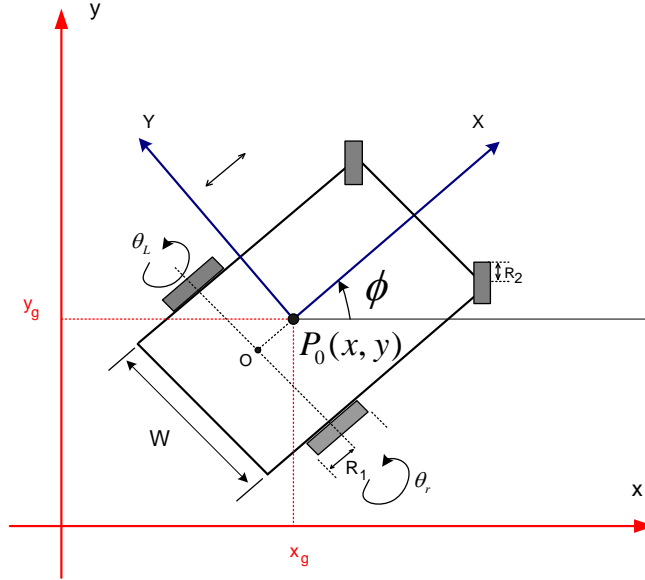
4.3. ETS Kinematik Modeli

Kinematik hareket bilimi olarak da ifade edilebilen; onlara neden olan kuvvetlere bakmaksızın hareketleri ele alan bilim dalıdır [85]. ETS kinematik modeli ise ETS sistemini tanımlayan diferansiyel ve cebirsel denklemlerin yazılması ile elde edilir.

Kontrol sistemi geliştirmek için, kontrol yöntemleri gerçek sisteme uygulanmadan önce gerçek sistemdeki davranışı tahmin etmek için matematiksel model oluşturulmuştur, böyle de yapılmalıdır.

Sahip olduğumuz ETS sisteminin iki motorlu arka tekerleği ve iki pasif sarhoş ön tekerleği vardır. Arka tekerleklerin her biri bağımsız olarak DC motorlarla tahrik edilir. Tekerlekli sandalyenin açısal hızı vektörel olarak, sağ ve sol tekerleklerin açısal hızları arasındaki farkın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Tekerlekli sandalyenin kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farkı kullanarak, Lagrange formalizmi, elektrikli

tekerlekli sandalyenin hareketini zamana bağlı tanımlayan genel diferansiyel denklemler kümesini türetmekte kullanılır [86].

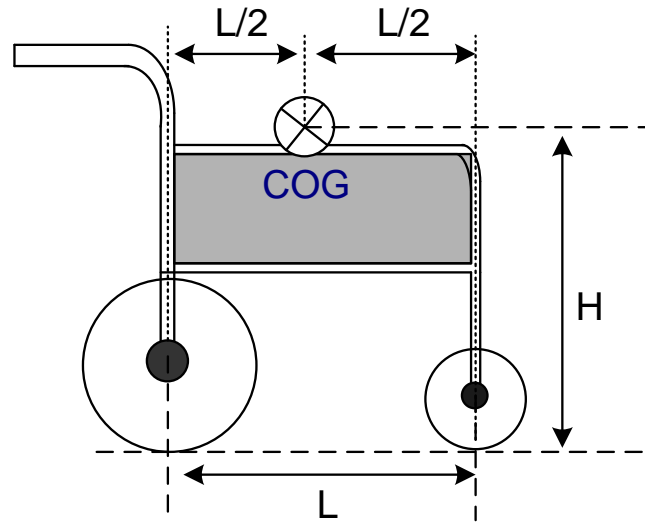


Şekil 4.1. Dünya koordinat sisteminde ETS pozisyonu

ETS modeli Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. “O” iki tekerleğe de $W/2$ mesafede bulunan aks ortası olarak da adlandırılabilir dönüş noktasıdır. ETS'nin bu noktadaki çizgisel hızı v ve açısız hızı w olarak alınabilir. P_0 noktası ETS'nin ağırlık merkezidir ve global koordinattaki yeri tekerleklerin birbirinden bağımsız dönüşlerine bağlı oluşan hareket ile belirlenir. Modelde θ_r ve θ_L sırasıyla sağ ve sol tekerleklerin açısız hızlarıdır. ϕ hareket doğrultusunu ifade eder. R_1 arka tekerlek yarıçapıdır ve “X” vektörü yön ve konuma ait değişkenleri içerir. “W”, ETS'nin sağ ve sol tekerlekleri arasındaki genişliktir. ETS'nin durum değişkenleri aşağıda vektör matris formunda verilmiştir.

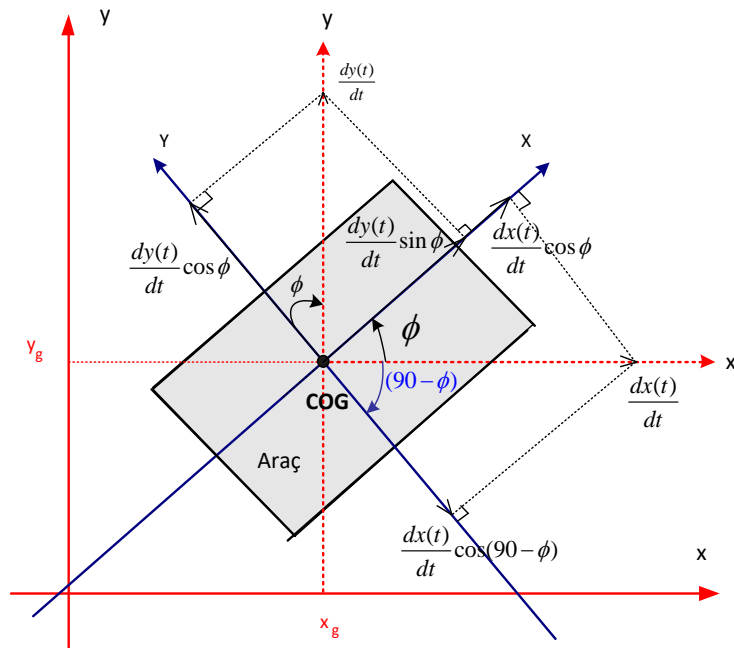
$$X = [x \ y \ \phi]^T, \quad \theta = [\theta_r \ \theta_L]^T$$

Ayrıca Şekil 4.1.'de iki koordinat sistemi olduğu görülmektedir. Bunlar dünyada ETS'nin konumunu veren global x, y eksenleri ile orijini ETS ağırlık merkezinde bulunan yerel x_0, y_0 eksenleridir.



Şekil 4.2. ETS Şematik Yan Görünümü

Şekil 4.2.'de ETS şematik olarak yan görünümü verilmiştir. “L” ön ve arka tekerlekler arasındaki uzunluktur. “H” zemin ve koltuk arasındaki ETS yüksekliğidir.



Şekil 4.3. Hız bileşenlerinin vektörel olarak elde edişi

Şekil 4.3.'te kırmızı renk ile gösterilen dünya X-Y koordinat eksenleri iken mavi ile gösterilenlerden x eksenini ETS iskeletinin hareket doğrultusunu gösterecek şekilde ETS

yerel koordinat sistemini oluşturur. Dünya koordinat sistemindeki hız bileşenlerinin ETS yerel koordinat sistemine vektörel bileşen olarak taşınması bahsi geçen şekilde verilmiştir. Kinematik analiz ETS hareketinden kaynaklı atalet etkisine bakılmaksızın tekerlekli sandalyenin hareketi ile ilgilidir. Bağımsız iki teker ile sürülen ETS kendi aksı doğrultusunda hareket edemez. Bu koşul altında çıkarılan hız bileşeni ifadeleri aşağıda denklem (4.6) ve denklem (4.7)'de verilmiştir.

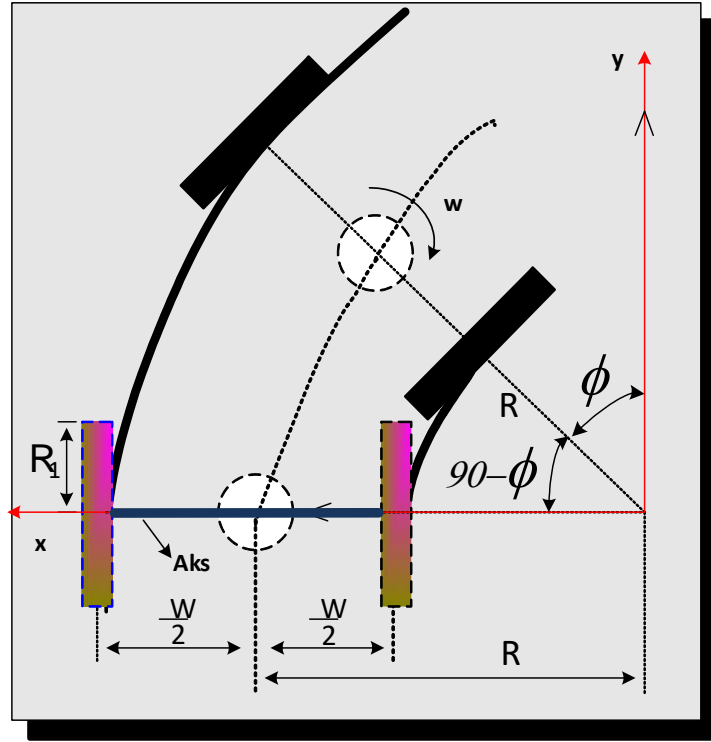
Şekil 4.3.'den ağırlık merkezi orijinli y eksenindeki hız ifadesi:

$$\frac{dx(t)}{dt} \sin \phi - \frac{dy(t)}{dt} \cos \phi = 0 \quad (4.6)$$

Şekil 4.3.'den ağırlık merkezi orijinli x eksenindeki hız ifadesi:

$$v = \frac{dx(t)}{dt} \cos \phi + \frac{dy(t)}{dt} \sin \phi \quad (4.7)$$

ETS kontrol sistemlerinin tasarımında ve matematiksel modellerinin oluşturulmasında, tekerlekli sandalyenin takip edilmesi gereken yörüngedeki konumunu bilmek önemlidir. ETS'nin yörüngesi yerel koordinat sisteminden dünya koordinat sistemine dönüştürülmelidir, çünkü yerel koordinat sisteminin orijini sabit değildir ve ETS hareketi sırasında değişecektir.



Şekil 4.4. ETS Yörüngesi

Örnek bir hareket için sağ arka tekerlek yörüngesi ile sol arka tekerlek yörüngesindeki farklılık Şekil 4.4'te gösterilmiştir. ETS belli bir dönüş yörüngesinde hareket ettiğinde, sağ tekerlek ve sol tekerlek için farklı hızlar verilecektir.

Tablo 4.1. ETS yörüngesinde kullanılan değişkenler

No	Sembol	Açıklama
1.	X_R	Sağ tekerin aldığı yol
2.	X_L	Sol tekerin aldığı yol
3.	W	Araç genişliği
4.	R_1	Teker yarıçap
5.	ω	Aracın ağırlık merkezi etrafında dönüş açısal hızı

Bu harekette aks ortasına göre; sağ teker $\frac{W}{2}(90-\phi)$ daha az yol alır iken, sol teker

$\frac{W}{2}(90+\phi)$ daha fazla yol alır. Alınan bu yola karşı gelen hız ifadesi, $v_w = -\frac{W}{2} \frac{d\phi}{dt}$ 'dir.

Aşağıda sağ ve sol teker hız ifadeleri yazılırken bu ifade göz önünde bulundurulacaktır.

Sağ ve sol tekerleğin hızlarını belirlemek için; sağ tekerlek hızı: v_R için denklem (4.8)'de ve sol tekerlek hızı: v_L için denklem (4.9)'da görülebileceği gibi, her bir tekerleğin hız ifadeleri tanımlanır. Bu ifadeler ETS modellemesinin ilk adımıdır.

$$v_R = v_{xCOG} - \left(-\frac{W}{2} \frac{d\phi}{dt} \right) = R_1 \frac{d\theta_r(t)}{dt} \quad (4.8)$$

$$v_L = v_{xCOG} + \left(-\frac{W}{2} \frac{d\phi}{dt} \right) = R_1 \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.9)$$

Denklem (4.7), denklem (4.8) ve denklem (4.9) kullanılarak sağ tekerlek hızı için denklem (4.10) ve sol tekerlek hızı için denklem (4.11) yazılır ve aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\frac{dx(t)}{dt} \cos \phi + \frac{dy(t)}{dt} \sin \phi + \frac{W}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} = R_1 \frac{d\theta_r(t)}{dt} \quad (4.10)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} \cos \phi + \frac{dy(t)}{dt} \sin \phi - \frac{W}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} = R_1 \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.11)$$

ETS'nin yerel Y eksenine düşen hız bileşeni ifadesi daha önce de elde edildiği gibi denklem (4.12)'de verilmiştir.

$$\frac{dx(t)}{dt} \sin \phi - \frac{dy(t)}{dt} \cos \phi = 0 \quad (4.12)$$

Denklem (4.12) kullanılarak denklem (4.13) ve denklem (4.14) elde edilir.

$$\frac{dy(t)}{dt} \cos \phi = \frac{dx(t)}{dt} \sin \phi \quad (4.13)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \quad (4.14)$$

Elde edilen denklem (4.14), denklem (4.10) ve denklem (4.11)'de yerine konularak denklem (4.15) ve denklem (4.16) yazılabilir.

$$\frac{dx(t)}{dt} \cos \phi + \frac{dx(t)}{dt} \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \sin \phi + \frac{W}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} = R_1 \frac{d\theta_r(t)}{dt} \quad (4.15)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} \cos \phi + \frac{dx(t)}{dt} \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \sin \phi - \frac{W}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} = R_1 \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.16)$$

Denklem (4.15) ve denklem (4.16) taraf tarafa toplanıp, düzenlenerek denklem (4.17) elde edilir. Bu denklem de düzenlenerek sonuç olarak ağırlık merkezinde, Dünya/global koordinat sistemindeki X eksenini doğrultusunda ETS hızını veren ifade denklem (4.18)'deki şekliyle elde edilmiştir.

$$2 \frac{dx(t)}{dt} \cos^2 \phi + 2 \frac{dx(t)}{dt} \sin^2 \phi = R_1 \cos \phi \frac{d\theta_r(t)}{dt} + R_1 \cos \phi \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.17)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{R_1}{2} \cos \phi \frac{d\theta_r(t)}{dt} + \frac{R_1}{2} \cos \phi \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.18)$$

Benzer adımları takip ederek global koordinat sistemi Y eksenini doğrultusundaki ETS hızını bulmak için; öncelikle denklem (4.14) kullanılarak denklem (4.19) elde edilir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{dy(t)}{dt} \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \quad (4.19)$$

Daha sonra denklem (4.19), denklem (4.10) ve denklem (4.11)'de yerine konulur. Böylece Denklem (4.20) ve denklem (4.21) elde edilir.

$$\frac{dy(t)}{dt} \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \cos \phi + \frac{dy(t)}{dt} \sin \phi + \frac{W}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} = R_1 \frac{d\theta_r(t)}{dt} \quad (4.20)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \cos \phi + \frac{dy(t)}{dt} \sin \phi - \frac{W}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} = R_1 \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.21)$$

Denklem (4.20) ve denklem (4.21) birleştirilerek denklem (4.22) elde edilir. Bu denklem de düzenlenerek sonuç olarak ağırlık merkezinde, Dünya/global koordinat sistemindeki Y eksenine doğrultusunda ETS hızını veren ifade denklem (4.23)'teki şekliyle elde edilmiştir.

$$2 \frac{dy(t)}{dt} \cos^2 \phi + 2 \frac{dy(t)}{dt} \sin^2 \phi = R_1 \sin \phi \frac{d\theta_r(t)}{dt} + R_1 \sin \phi \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.22)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{R_1}{2} \sin \phi \frac{d\theta_r(t)}{dt} + \frac{R_1}{2} \sin \phi \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.23)$$

ETS'nin yön değiştirirken global koordinat sistemindeki X eksenine ile yaptığı açı yönündeki yani ağırlık merkezi çevresindeki açısal hızı için, denklem (4.10) ve denklem (4.11) kullanılarak, denklem (4.24)'de gösterilen sonuç elde edilir.

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{R_1}{W} \frac{d\theta_r(t)}{dt} - \frac{R_1}{W} \frac{d\theta_L(t)}{dt} \quad (4.24)$$

4.4. ETS Jacobian Matrisi

Alman bir matematikçi olan Carl Gustav Jacob Jacobian (1804-1851), hareket denklemlerinin incelenmesinde verimli bir şekilde kullanılabilecek bir matris biçimini ortaya koydu. Jacobian kelimesi, Jacobian matrisini veya determinantını ifade etmek için kullanılır [87]. Denklem (4.18), denklem (4.23) ve denklem (4.24) kullanılarak ETS'nin kinematikliği aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{dx(t)}{dt} \\ \frac{dy(t)}{dt} \\ \frac{d\phi(t)}{dt} \end{bmatrix}}_{\dot{X}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{R_1}{2} \cos \phi & \frac{R_1}{2} \cos \phi \\ \frac{R_1}{2} \sin \phi & \frac{R_1}{2} \sin \phi \\ \frac{R_1}{W} & -\frac{R_1}{W} \end{bmatrix}}_{Jaco=TransformationMatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{d\theta_r(t)}{dt} \\ \frac{d\theta_L(t)}{dt} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}}_{\dot{\theta}} \quad (4.25)$$

Jacobian, denklem (4.25)'de kullanılan dönüşüm matrisidir. Denklem (4.10) ve denklem (4.11) kullanılarak oluşturulabilecek diğer bir Jacobian matrisi denklem (4.26) verilmiştir. Denklem (4.25)'in kısaca yazılmış hali denklem (4.27)'de gösterilmektedir.

$$R_1 \begin{bmatrix} \frac{d\theta_r(t)}{dt} \\ \frac{d\theta_L(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & \frac{W}{2} \\ \cos \phi & \sin \phi & -\frac{W}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx(t)}{dt} \\ \frac{dy(t)}{dt} \\ \frac{d\phi(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\dot{X} = Jaco \dot{\theta} \quad (4.27)$$

Denklem (4.27)'de iki tarafın türevi alınırsa denklem (4.28) elde edilir.

$$\frac{d^2 X(t)}{dt^2} = Jaco \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{dJaco}{dt} \frac{d\theta}{dt} \quad (4.28)$$

Burada $\frac{dJaco}{dt} \frac{d\theta}{dt}$ ifadesinin etkisi, $Jaco \frac{d^2 \theta}{dt^2}$ ifadesinin etkisinin yanında ihmal edilebilir şekilde azdır. Bu yüzden sadeleştirilmiş şekilde denklem (4.29) ve denklem (4.30) elde edilmiştir.

$$\frac{d^2 X(t)}{dt^2} = J_{aco} \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (4.29)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \phi(t)}{dt^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_1}{2} \cos \phi & \frac{R_1}{2} \cos \phi \\ \frac{R_1}{2} \sin \phi & \frac{R_1}{2} \sin \phi \\ \frac{R_1}{W} & -\frac{R_1}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2 \theta_r(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \theta_L(t)}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Denklem (4.31), *Jaco* Jacobian matrisinden, $Jaco^+$ Pseudeinverse matrisine geçilerek elde edilir. Bu matris de denklem (4.29)'da düzenleme yapılarak kullanılırsa denklem (4.32) elde edilir.

$$J_{aco}^+ = \frac{1}{R_1} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & \frac{W}{2} \\ \cos \phi & \sin \phi & -\frac{W}{2} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 \theta_r(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \theta_L(t)}{dt^2} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_1} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & \frac{W}{2} \\ \cos \phi & \sin \phi & -\frac{W}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \phi(t)}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Dünya koordinat sistemi $x(t)$, $y(t)$ ve $\phi(t)$ 'den oluşur. Denklem (4.32) nedeniyle sağ tekerlek dönüş açısı $\theta_r(t)$ ve sol tekerlek dönme açısı $\theta_L(t)$ dikkate alınır.

$$\begin{bmatrix} w_r(t) \\ w_L(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{R_1} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & \frac{W}{2} \\ \cos \phi & \sin \phi & -\frac{W}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x(t) \\ V_y(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$\begin{bmatrix} w_r(t) \\ w_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & \frac{W}{2R_1} \\ \frac{1}{R_1} & -\frac{W}{2R_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Denklem (4.32) kullanılarak denklem (4.33) ve denklem (4.34) elde edilmiştir. Bu denklemlerden, kumanda kolu (joystick) ile referans hızın $V_t(t)$ ve $w(t)$ cinsinden verilebileceği görülebilir.

4.5. ETS Dinamik Modeli

Kontrol sistemleri, sistemin ve kontrolör transfer fonksiyonlarının yapısına ve katsayılarına bağlı olan dinamik bir model ile karakterize edilir [88]. Dinamik analiz, tekerlekli sandalye fiziksel yapısında yer alan eylemsizlik etkileri ve tork aktüatörleri (motorlar) tarafından üretilen hareket ile ilgilidir. Dinamik model, ETS'ye etki eden reaksiyon kuvvetlerini açıklar. Bu bölümde, ETS'ye uygulanan Lagrange formülasyonu kullanarak ETS'nin genel dinamik modeli elde edilecektir.

Tablo 4.2. Dinamik modelde kullanılan ETS değişkenleri

Sembol	Açıklama
v	Çizgisel hız
W	Açısal hız
w_r	Sağ tekerlek açısal hız
w_L	Sol tekerlek açısal hızı
w_c	Po etrafında açısal hız
r	Tekerlek yarıçapı
K	Toplam kinetik enerji
J	Po boyunca tekerlekli sandalye ataleti

Tekerlekli sandalye, yedi rijit cismin bir montajı olarak görülebilir: çerçeve, sol ve sağ tahrik tekerlekleri, sol ve sağ kastor teker çatalları ve sol ve sağ kastor tekerlekler. Hareket halindeki bir tekerlekli sandalyenin toplam enerjisi, tüm bu bileşenlerin

kinetik ve potansiyel enerjisinin toplamından oluşur [29]. ETS'nin dinamik modelini tanımlamak için, ETS'nin doğrusal ve dönme hızının toplam enerjisi hesaplanmalıdır.

4.5.1. ETS Translasyonel Hareketinin Kinetik Enerjisi

Sürüş sırasında ETS'nin eylemsizliği ETS'ye dinamik bir etki bırakacağı için, ETS manevraları sırasında kinetik enerjiyi (KE) ölçmek ETS dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır [29]. Hareket eden bir nesnenin kinetik enerjisi, translasyonel (linear) ve rotasyonel kinetik enerji arasındaki her iki deplasman dikkate alınarak yazılır. ETS translasyon hareketinin kinetik enerjisini ölçmek için, ağırlık merkezinde varsayılan hayali tekerlek yarıçapı r ve tekerlekte oluşacak hayali açışal hıza ($w_r + w_L$) karşılık gelen çizgisel hız v belirlenmelidir. Bunlara ait ifadeler denklem (4.35) ve denklem (4.36) 'da belirtilmiştir.

$$r = \frac{R_1}{2} \quad (4.35)$$

$$v = \frac{R_1}{2} (w_r + w_L) \quad (4.36)$$

Denklem (4.36)'daki doğrusal hız ifadesi kullanılarak, denklem (4.37)'de gösterilen ETS translasyonel hareketinin kinetik enerjisi formülü elde edilir.

$$K_{translational} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{R_1}{2} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_L) \right)^2 \quad (4.37)$$

4.5.2. ETS Dönme Hareketinin Kinetik Enerjisi

EPW rotasyonel hareketinin kinetik enerjisini ölçmek için sağ ve sol tekerleklerin doğrusal hızları dikkate alınır. Sağ tekerlek doğrusal hızı denklem (4.38)'de; sol tekerlek doğrusal hızı denklem (4.39)'da verilmiştir.

$$v_r = R_1 w_r \quad (4.38)$$

$$v_L = R_1 w_L \quad (4.39)$$

Ağırlık merkezi etrafındaki dönme hareketine bağlı çizgisel hız; sağ ve sol tekerleğin dönme hızlarının farkından elde edilecektir. Elde edilen bu çizgisel hızdan da ağırlık merkezi etrafındaki açısal hız bulunacaktır. İlgili ifadeler denklem (4.40) ve denklem (4.41)'de verilmiştir.

$$v_c = v_r - v_L \quad (4.40)$$

$$v_c = W w_c \quad (4.41)$$

Denklem (4.38), denklem (4.39), denklem (4.40) ve denklem (4.41) birlikte kullanılarak; ETS dönme hareketinin kinetik enerjisi denklem (4.42)'de gösterildiği gibi tanımlanır.

$$K_{rotational} = \frac{1}{2} J w_c^2 = \frac{1}{2} J \left(\frac{R_1}{W} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) \right)^2 \quad (4.42)$$

4.5.3. ETS'nin Sağ ve Sol Tekerlek Kinetik Enerjisi

Her bir tekerlek kendi mili etrafında dönmesinden kaynaklı bir kinetik enerjiye sahiptir. J_w her bir tekerleğin ataletidir. K_r ETS sağ tekerleğin kinetik enerjisi iken K_L , ETS sol tekerleğin kinetik enerjisidir. İlgili kinetik enerji ifadeleri denklem (4.43) ve denklemde (4.44)'de gösterilmiştir.

$$K_r = \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_r^2 \quad (4.43)$$

$$K_L = \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_L^2 \quad (4.44)$$

ETS hem sol hem de tekerlek üzerinden tahrik edilir. Toplam kinetik enerjinin elde edilmesi için her iki tekerleğe ait ifadelerin birleştirilmiş hali denklem (4.45)'de verilmiştir.

$$K_r + K_L = \frac{1}{2} J_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_L^2) \quad (4.45)$$

Tüm kinetik enerjilerin toplamı olan ifade denklem (4.46)'da verilmiştir. Burada birinci terim daha önce denklem (4.37)'de verilen toplam translasyon hareketi kinetik enerjisidir. İkinci terim, daha önce Denklemden (4.42)'de verilen ETS dönme kinetik enerjisidir. Üçüncü terim ise denklem (4.45)'de verilen tekerleklerin toplam dönme kinetik enerjisidir.

$$K = K_{linear} + K_{rotational} + K_r + K_L$$

$$K = \underbrace{\frac{1}{2} m \left(\frac{R_1}{2} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_L) \right)^2}_{Translational} + \underbrace{\frac{1}{2} J \left(\frac{R_1}{W} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) \right)^2}_{Rotation} + \underbrace{\frac{1}{2} J_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_L^2)}_{Rotation} \quad (4.46)$$

Kinetik enerji ile potansiyel enerji arasındaki farkı kullanan Lagrange formülasyonu, Lagrangian tarafından ifade edilmiştir [89]. Torklar (T_r, T_L), ETS'nin sol ve sağ tekerlek motorları tarafından üretilen momentleri göstermektedir. Bu momentler aşağıda verildiği gibi Lagrange denklemleri ile yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} = T_i \quad (4.47)$$

$$T = M \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M \frac{dw}{dt} \quad (4.48)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_r \\ T_L \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Sağ tekerleğin torku T_r ve sol tekerleğin torku T_L ve M eşdeğer atalet matrisidir. Denklem (4.47)'deki Lagrange denklemi kullanılarak, denklem (4.50)'den denklem (4.55)'e kadar sağ tekerlek torku hesabı verilmiştir.

$$T_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_r} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_r} \quad (4.50)$$

$$T_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_r} \right) \quad (4.51)$$

$$T_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_r} \left\{ \frac{1}{2} m \left(\frac{R_1}{2} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_L) \right)^2 + \frac{1}{2} J \left(\frac{R_1}{W} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) \right)^2 + \frac{1}{2} J_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_L^2) \right\} \right) \quad (4.52)$$

$$T_r = \frac{d}{dt} \left(m \frac{R_1^2}{4} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_L) + J \frac{R_1^2}{W^2} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) + J_w \dot{\theta}_r \right) \quad (4.53)$$

$$T_r = \frac{mR_1^2}{4} \left(\frac{d^2\theta_r}{dt^2} + \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \right) + \frac{JR_1^2}{W^2} \left(\frac{d^2\theta_r}{dt^2} - \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \right) + J_w \frac{d^2\theta_r}{dt^2} \quad (4.54)$$

$$T_r = \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{d^2\theta_r}{dt^2} + \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \quad (4.55)$$

Benzer şekilde denklem (4.56)'dan denklem (4.61)'e kadar olan kısımda sol tekerlek torku hesabına yer verilmiştir.

$$T_L = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_L} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_L} \quad (4.56)$$

$$T_L = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_L} \right) \quad (4.57)$$

$$T_L = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_L} \left\{ \frac{1}{2} m \left(\frac{R_1}{2} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_L) \right)^2 + \frac{1}{2} J \left(\frac{R_1}{W} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) \right)^2 + \frac{1}{2} J_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_L^2) \right\} \right) \quad (4.58)$$

$$T_L = \frac{d}{dt} \left(m \frac{R_1^2}{4} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_L) - J \frac{R_1^2}{W^2} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) + J_w \dot{\theta}_L \right) \quad (4.59)$$

$$T_L = \frac{mR_1^2}{4} \left(\frac{d^2\theta_r}{dt^2} + \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \right) - \frac{JR_1^2}{W^2} \left(\frac{d^2\theta_r}{dt^2} - \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \right) + J_w \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \quad (4.60)$$

$$T_L = \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{d^2\theta_L}{dt^2} + \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{d^2\theta_r}{dt^2} \quad (4.61)$$

Lagrange denklemi kullanılarak elde edilen eşdeğer atalet matrisi, denklem (4.62) ve denklem (4.63)'de görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} T_r \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{mR_1^2}{4} + \frac{JR_1^2}{W^2} + J_w & \frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \\ \frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} & \frac{mR_1^2}{4} + \frac{JR_1^2}{W^2} + J_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\theta_r^2}{dt^2} \\ \frac{d\theta_L^2}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

$$\begin{bmatrix} T_r \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} & \frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \\ \frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} & \frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dw_r}{dt} \\ \frac{dw_L}{dt} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

Burada “ m ” ETS'nin kütlesi, “ J ” ETS'nin ağırlık merkezi etrafındaki dönme hareketiyle ilişkili atalet momenti, “ J_w ” ise her bir tekerleğe ait atalet momentidir. Bu katsayılar ile tanımlanan atalet matrisi ile verilen model ETS sisteminin mekanik kısmı ile ilgilidir.

ETS'nin modellenmesinde elektriksel kısımlar olan elektrik motorlarının modellenmesi ile devam edilecektir. DC motor, elektrik enerjisini mekanik enerjiye

dönüştüren bir tork dönüştürücüsüdür. Motor şaftında geliştirilen tork, alan akısı ve armatür akımı ile doğru orantılıdır [90]. Sol tekerlekteki DC motor ile sağ tekerlekteki DC motorun aynı dinamik yapıda olduğu göz önüne alınarak, ($i = r, L$) olmak üzere ETS sisteminde kullanılan DC motor denklemleri aşağıda açıklanmıştır.

DC motor girişi ile armatür devresi arasındaki ilişki denklem (4.64)'de verilmiştir.

$$U_{ai}(t) = R_{ai}i_{ai}(t) + L_{ai} \frac{di_{ai}(t)}{dt} + E_{bi}(t) \quad (4.64)$$

Ters elektromotor kuvvete (emf) ait ifade denklem (4.65)'de verildiği gibidir.

$$E_{bi}(t) = K_{bi}w_{mi}(t) \quad (4.65)$$

$w_{mi}(t)$, DC motorun açısal hızıdır. Motora ait momentler ve açısal hızlara ait ilişkiler denklem (4.66), denklem (4.67) ve denklem (4.68) 'de verildiği gibi tanımlanmıştır.

$$T_{ei}(t) = T_{mi}(t) \quad (4.66)$$

$$T_{mi}(t) = NT_i(t) \quad (4.67)$$

$$w_i(t) = Nw_{mi}(t) \quad (4.68)$$

w_i , ETS'nin tekerlek açısal hızıdır. Tekerlekli sandalye mekanik kısmı ile DC motor sistemi arasındaki bağlantı ilişkisi bir "N" dişli oranı ile sağlanmıştır. Sağ (r) ve sol (L) taraflar için DC motor tarafından üretilen elektriksel moment denklem (4.69)'da verilmiştir.

$$T_{ei}(t) = K_{ti}i_{ai}(t) \quad (4.69)$$

Sağ DC motorun mekanik moment ifadesi denklem (4.70)'den denklem (4.73)'e kadar ifade edilmiştir.

$$T_{mr}(t) = J_{mr} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + B_{mr} w_{mr}(t) + N(T_r(t) + T_{Loadr}(t)) \quad (4.70)$$

$$T_{mr}(t) = J_{mr} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + B_{mr} w_{mr}(t) + N \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{dw_r(t)}{dt} + N \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{dw_L(t)}{dt} + NT_{Loadr}(t) \quad (4.71)$$

$$T_{mr}(t) = J_{mr} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + B_{mr} w_{mr}(t) + N \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) N \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + N \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) N \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + NT_{Loadr}(t) \quad (4.72)$$

$$T_{mr}(t) = \left(J_{mr} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \right) \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + B_{mr} w_{mr}(t) + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + NT_{Loadr}(t) \quad (4.73)$$

Sol DC motorun mekanik moment ifadesi denklem (4.74)'den denklem (4.77)'ye kadar ifade edilmiştir.

$$T_{mL}(t) = J_{mL} \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + B_{mL} w_{mL}(t) + N(T_L(t) + T_{LoadL}(t)) \quad (4.74)$$

$$T_{mL}(t) = J_{mL} \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + B_{mL} w_{mL}(t) + N \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{dw_L(t)}{dt} + N \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{dw_r(t)}{dt} + NT_{LoadL}(t) \quad (4.75)$$

$$T_{mL}(t) = J_{mL} \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + B_{mL} w_{mL}(t) + N \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) N \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + N \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) N \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + NT_{LoadL}(t) \quad (4.76)$$

$$T_{mL}(t) = \left(J_{mL} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \right) \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + B_{mL} w_{mL}(t) + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + NT_{LoadL}(t) \quad (4.77)$$

DC motorun iç çalışmasının incelenmesi, ETS'nin dinamik modelinin doğru elde edilmesi için gereklidir. Bu da DC motorların nasıl çalıştırıldığı ile ilgili araştırmalarda tanımlanmıştır [70]. Bu çalışmadaki ETS'nin modelleme ve kontrolünde kullanılan birtakım parametreler ve açıklamaları Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. ETS'nin modellenmesinde kullanılan değişkenler

Sembol	Açıklama
m	Kişi ve tekerlekli sandalye gövdesi için toplam kütle
R_1	Arka tekerleklerin yarıçapı
J_w	Arka tekerleğe ait atalet momenti
J	Toplam kütle için eylemsizlik momenti
W	Arka tekerlekler arasındaki mesafe
ω_{mi}	DC motor mili (rotor) üzerindeki açısal hız $i = r, L$
T_i	Tekerleğe ait moment $i = r, L$
T_{ei}	DC motorun elektriksel momenti $i = r, L$
T_{mi}	DC motorun mekanik momenti $i = r, L$
B_m	DC motor miline ait sürtünme katsayısı
L_{ai}	DC motor armatür endüktansı $i = r, L$

Tablo 4.3. (Devamı)

Sembol	Açıklama
R_{ai}	DC motor armatür direnci $i = r, L$
i_{ai}	DC motor armatür akımı $i = r, L$
N	Dişli oranı
T	Örnekleme zamanı

DC motorlar tarafından üretilen elektrik momentleri, motor millerine yüklenen mekanik momentler olan T_r ve T_L 'den daha büyük olmalıdır. Fakat sürekli hal durumu için elektrik momentleri mekanik momentlere eşitlenebilir. ETS'nin sürekli zaman durum uzay modelini elde etmek için, denklem (4.66) ve denklem (4.69) kullanılarak; sağ taraf için denklem (4.75)'den denklem (4.78) ve denklem (4.79) elde edilir. Benzer şekilde sol taraf için de denklem (4.77)'den denklem (4.80) ve denklem (4.81) elde edilir.

$$K_{tr}i_{ar}(t) - B_{mr}w_{mr} = \left(J_{mr} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \right) \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + NT_{Loadr}(t) \quad (4.78)$$

$$K_{tr}i_{ar} - B_{mr}w_{mr}(t) - NT_{Loadr}(t) = \left(J_{mr} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \right) \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \quad (4.79)$$

$$K_{tl}i_{aL}(t) - B_{mL}w_{mL} = \left(J_{mL} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \right) \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \frac{dw_{mr}(t)}{dt} + NT_{LoadL}(t) \quad (4.80)$$

$$K_{tL}i_{aL} - B_{mL}w_{mL}(t) - NT_{LoadL}(t) = \left(J_{mL} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \right) \frac{dw_{mL}(t)}{dt} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{w^2} \right) \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \quad (4.81)$$

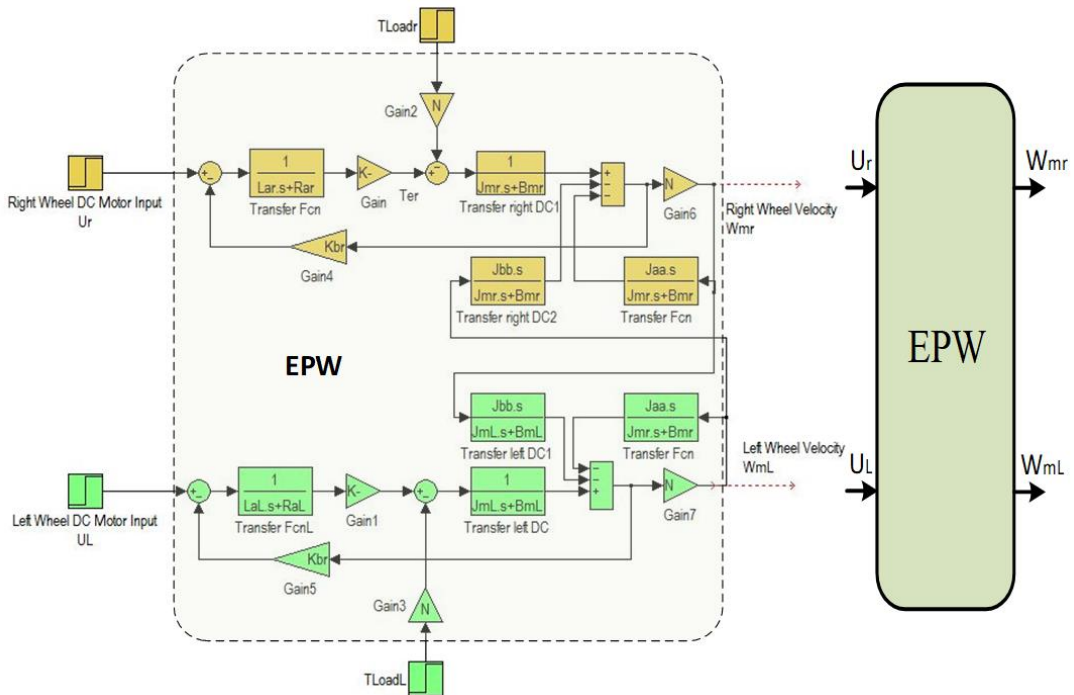
Sağ tekerleğe ait DC motorun akım ifadesi denklem (4.82)'deki gibi düzenlenebilir.

$$\frac{di_{ar}(t)}{dt} = -\frac{R_{ar}}{L_{ar}}i_{ar}(t) - \frac{K_{br}}{L_{ar}}w_{mr}(t) + \frac{1}{L_{ar}}U_{ar}(t) \quad (4.82)$$

Sol tekerleğe ait DC motor akım ifadesi denklem (4.83)'deki gibi düzenlenebilir.

$$\frac{di_{aL}(t)}{dt} = -\frac{R_{aL}}{L_{aL}}i_{aL}(t) - \frac{K_{bL}}{L_{aL}}w_{mL}(t) + \frac{1}{L_{aL}}U_{aL}(t) \quad (4.83)$$

Denklem (4.79), denklem (4.81), denklem (4.82) ve denklem (4.83) kullanılarak sistem fonksiyonel blok diyagramları elde edilmiş ve Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. (a) ETS modelini oluşturan transfer fonksiyon blokları (b) ETS giriş-çıkış blok diyagramı

Şekil 4.5.'deki J_{aa} ve J_{bb} terimleri denklem (4.84) ve denklem (4.85) 'de verildiği gibi tanımlanmıştır.

$$J_{aa} = N \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \quad (4.84)$$

$$J_{bb} = N \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \quad (4.85)$$

Ulaşılmaya çalışılan durum uzay modeli ifadesi kapalı formda denklem (4.86)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Wd(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4.86)$$

ETS'nin sürekli zaman durumu uzay modelinin açısal hızlara yönelik olan kısmı doğrudan denklem (4.79), (4.81), (4.82) ve denklem (4.83)'den, denklem (4.87)'deki gibi yazılıp; sırasıyla denklem (4.88) ve (4.89) biçimlerinde düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} \left(J_{mr} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \right) & N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \\ N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) & \left(J_{mL} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \right) \end{array} \right] \begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}}{dt} \\ \frac{dw_{mL}}{dt} \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} K_{tr}^{iar}(t) - B_{mr} w_{mr}(t) \\ K_{tL}^{iAL}(t) - B_{mL} w_{mL}(t) \end{bmatrix} - N \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{LoadL}(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.87)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \left(J_{mr} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \right) & N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \\ N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} - \frac{JR_1^2}{W^2} \right) & \left(J_{mL} + N^2 \left(\frac{mR_1^2}{4} + J_w + \frac{JR_1^2}{W^2} \right) \right) \end{bmatrix}^{-1}}_{At} \quad (4.88)$$

$$\begin{bmatrix} K_{tr}i_{ar}(t) - B_{mr}w_{mr}(t) \\ K_{tL}i_{aL}(t) - B_{mL}w_{mL}(t) \end{bmatrix} - N \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{LoadL}(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{rr} & J_{rL} \\ J_{Lr} & J_{LL} \end{bmatrix}}_{At^{-1}} \left\{ \begin{bmatrix} K_{tr}i_{ar}(t) - B_{mr}w_{mr}(t) \\ K_{tL}i_{aL}(t) - B_{mL}w_{mL}(t) \end{bmatrix} - N \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{LoadL}(t) \end{bmatrix} \right\} \quad (4.89)$$

Denklem (4.64) sağ ve sol taraf için yazılıp denklem (4.65) yardımıyla düzenlenirse, denklem (4.91) ve denklem (4.93) elde edilir.

$$U_{ar}(t) = R_{ar}i_{ar}(t) + L_{ar} \frac{di_{ar}(t)}{dt} + E_{br}(t) \quad (4.90)$$

$$U_{ar} = R_{ar}i_{ar}(t) + L_{ar} \frac{di_{ar}(t)}{dt} + K_{br}w_{mr}(t) \quad (4.91)$$

$$U_{aL}(t) = R_{aL}i_{aL}(t) + L_{aL} \frac{di_{aL}(t)}{dt} + E_{bL}(t) \quad (4.92)$$

$$U_{aL} = R_{aL}i_{aL}(t) + L_{aL} \frac{di_{aL}(t)}{dt} + K_{bL}w_{mL}(t) \quad (4.93)$$

Sağ ve sol tekerleklerdeki DC motor akımlarına ait diferansiyel denklemler, yukarıda verilen ifadeler düzenlenerek; denklem (4.94) ve denklem (4.95)'de verilmiştir.

$$\frac{di_{ar}(t)}{dt} = -\frac{R_{ar}}{L_{ar}}i_{ar}(t) - \frac{K_{br}}{L_{ar}}w_{mr}(t) + \frac{1}{L_{ar}}U_{ar}(t) \quad (4.94)$$

$$\frac{di_{aL}(t)}{dt} = -\frac{R_{aL}}{L_{ar}}i_{aL}(t) - \frac{K_{bL}}{L_{aL}}w_{mL}(t) + \frac{1}{L_{aL}}U_{aL}(t) \quad (4.95)$$

Denklem (4.94) ve denklem (4.95)'de verilen diferansiyel denklemler vektör-matris formda yazılarak denklem (4.96) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ar}(t)}{dt} \\ \frac{di_{aL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{br}}{L_{ar}} & -\frac{R_{ar}}{L_{ar}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{bL}}{L_{aL}} & -\frac{R_{aL}}{L_{aL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ar}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{aL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ar}(t) \\ U_{aL}(t) \end{bmatrix} \quad (4.96)$$

Durum uzay modelinde durum değişkenleri; sağ ve sol DC motorların açısal hızları ile akımları olacak biçimde denklem (4.89) ve denklem (4.96) birleştirilerek nihai durum uzay modeli elde edilecektir. Bunun için öncelikle denklem (4.89) uygun biçimde yazılıp düzenlenerek denklem (4.99)'a ulaşılmıştır.

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{rr} & J_{rl} \\ J_{Lr} & J_{LL} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} -B_{mr} & K_{tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -B_{mL} & K_{tL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} - N \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{LoadL}(t) \end{bmatrix} \right\} \quad (4.97)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{rr} & J_{rl} \\ J_{Lr} & J_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{mr} & K_{tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -B_{mL} & K_{tL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} - N \begin{bmatrix} J_{rr} & J_{rl} \\ J_{Lr} & J_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{LoadL}(t) \end{bmatrix} \quad (4.98)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_{rr}B_{mr} & J_{rr}K_{tr} & -J_{rL}B_{mL} & J_{rL}K_{tL} \\ -J_{Lr}B_{mr} & J_{Lr}K_{tr} & -J_{LL}B_{mL} & J_{LL}K_{tL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} \quad (4.99)$$

$$\begin{bmatrix} NJ_{rr} & NJ_{rL} \\ NJ_{Lr} & NJ_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{LoadL}(t) \end{bmatrix}$$

Sonrasında denklem (4.96) ve denklem (4.99) birleştirilerek vektör-matris formundaki nihai durum uzay modeli daha önce denklem (4.86)'da verilen biçimde denklem (4.100) ve denklem (4.101)'de görüleceği üzere elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{di_{ar}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \\ \frac{di_{aL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -J_{rr}B_{mr} & K_{tr}J_{rr} & -J_{rL}B_{mL} & K_{tL}J_{rL} \\ -\frac{K_{br}}{L_{ar}} & -\frac{R_{ar}}{L_{ar}} & 0 & 0 \\ -J_{Lr}B_{mr} & K_{tr}J_{Lr} & -J_{LL}B_{mL} & K_{tL}J_{LL} \\ 0 & 0 & -\frac{K_{bL}}{L_{aL}} & -\frac{R_{aL}}{L_{aL}} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} + \quad (4.100)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ L_{ar} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ & L_{aL} \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} U_{ar}(t) \\ U_{aL}(t) \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} NJ_{rr} & NJ_{rL} \\ 0 & 0 \\ NJ_{Lr} & NJ_{LL} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_W \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{loadL}(t) \end{bmatrix}$$

Sistemin çıkış matrisi “C”, sağ ve sol tekerleğin açısal hızlarının çıkışta görüleceği şekilde seçilmiş ve çıkış ifadesi vektör-matris formda denklem (4.101)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} \quad (4.101)$$

Denklem (4.100) ve denklem (4.101) ikisi birlikte ETS dinamik denklemlerinden elde edilen sürekli zaman durum uzay modelidir. Bu model ETS için kontrol sistemi

geliştirmede kullanılacak olan matematik modeldir. Ancak, bu durum uzay modelini gerçek zaman uygulamada kullanmak için sürekli zamandan ayırık zamana dönüşüm yapılmalıdır.

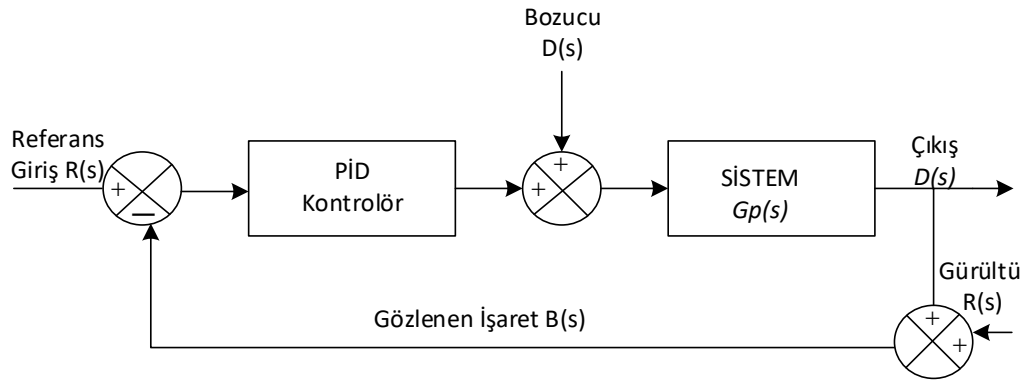
BÖLÜM 5. ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYEDE UYGULANAN KONTROL YÖNTEMLERİ

Yaşlı ve fiziksel engelli kişilere yardımcı olmak için tıp alanında birçok teknoloji geliştirilmiştir. Tekerlekli sandalye alanında da büyük ilerlemeler meydana gelmiştir. ETS kullanıcılarının güvenliğini ve rahatını sağlamak için çeşitli kontrol yöntemleri ile farklı ETS'ler dizayn edilmiştir.

5.1. ETS İçin Oransal, İntegral, Türevsel (PID) Kontrol

Orantılı, integral, türev veya daha yaygın ifadesi ile PID kontrolörleri, kontrolün kullanıldığı tüm alanlarda bulunmaktadır ve PID kontrolörleri ETS'lerde de kullanılmaktadır. PID, kullanımdaki basitlik ve sadelik nedeniyle popüler olarak kullanılmaktadır.

Bir oransal-integral-türev kontrolörü (PID kontrolörü) negatif geri beslemeli kapalı çevrim kontrolördür. Oransal (P), İntegral (I) ve Türev (D) olmak üzere ayarlanacak üç parametre vardır. P'nin mevcut hatayı, I geçmiş hataların toplamını ve D güncel hataların geleceğe yönelik bir tahmini ayarlamaktadır. PID kontrolörler, istenen durum ve gerçek durum arasındaki hatayı en aza indigeme yöntemlerinden biridir. Oransal (P) modda, kontrol cihazının çıkışı hatanın oransal kazanç (K_p) ile basitçe çarpılması ile elde edilir. Proses hatasının türevi, hatanın zaman içindeki eğimini belirleyerek ve bu değişim oranını K_d türevi kazanç ile çarparak hesaplanır. PID kontrolör katsayılarını ayarlamak için Manuel Ayar, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon gibi birkaç vardır.



Şekil 5.1. PID Denetleyici Sistemi [59]

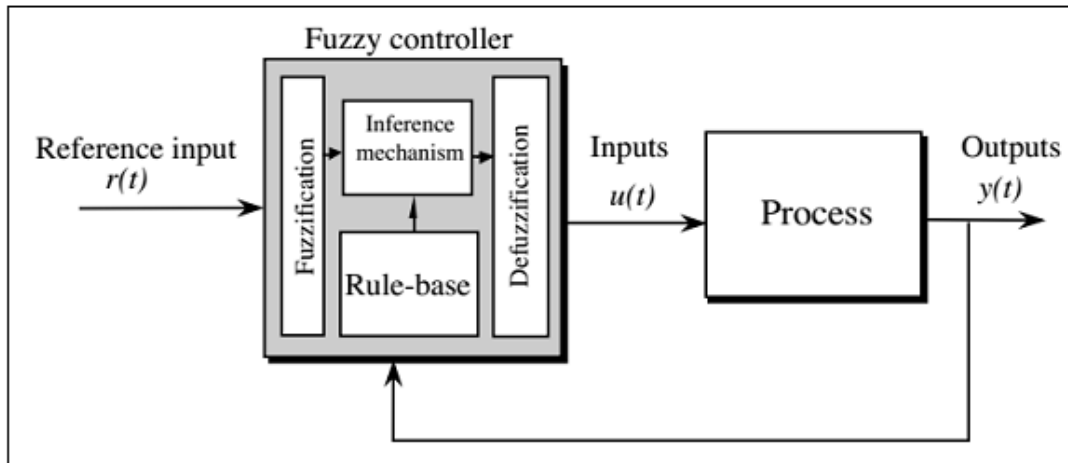
ETS’de her iki tekerleğin hızlarının geri bildirim olarak enkoderler kullanılarak istenen hızı takip etmek için sol ve sağ tekerleklerin hızlarını kontrol etmek amacıyla PID algoritması uygulanmaktadır. PID kontrolör kullanarak hız hataları zaman sonsuza kadar gittiğinde sifira yaklaştırılır. Kontrol girişleri belirli bir değer aralığında sınırlanmaktadır, bu durum giriş işaretlerinin lineersizliklerinden dolayı gereklidir. PID algoritmasının modifikasyon sonucu, hızların performansını artırır. [59]. Hız hatası, yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve kayma katsayısı hesaplanmış ve hız adım-cevap girdisi için karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada üç farklı kontrol yönteminin sürüş hızı değişiminin karşılaştırılması ve tekerlek kayması ETS üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. ETS'nin dört farklı yüzeyde, üç farklı hızda kontrolü model tabanlı oransal-integral-türev (PID) ve açık döngü kontrolörü ile sağlanmıştır [91]. Genetik algoritma (GA) kullanarak ve PI, PID ve durum geri besleme kontrolörü kullanılarak bir sabit mıknatıslı DC motorun (PMDC) hız kontrolünü karşılaştırarak, [57] 'de Sankardoss ve Geethanjali, ETS’de kullanılan sabit mıknatıslı bir DC motorun parametrelerini tahmin etmiştir.

[92]’da nonlinear SMC ve klasik oransal-integral-türev (PID) gibi iki farklı kontrol yaklaşımı ile izleme performansını artırmak için iki DC motor tarafından çalıştırılan elektrikle çalışan tekerlekli sandalyenin (ETS) gerçek zamanlı yörünge izleme kontrolü gerçekleştirilmiştir. [93]’de Teki Tian ve Xu, elektrikli tekerlekli sandalyenin kontrolü için bulanık kontrol ve geleneksel PID kontrolü arasındaki kombinasyondan kendi kendine ayarlanan bulanık PID hız kontrol stratejisini geliştirdi.

Ghani ve arkadaşları, hem ön hem de arka tekerleklere ve ayrıca tırmanma sırasında tekerlekli sandalyeye uygun tork sağlamak için PID kontrolü kullanılır. Ghani ve arkadaşları basit, kompakt ve sabit bir merdiven çıkaran tekerlekli sandalyeye sahip olmayı hedefler. Tekerlekli sandalye koltuğunun daima dik pozisyonda kalmasını ve tırmanırken hem ön hem de arka tekerlek motorlarını kontrol etmesini sağlamaktır yapılan çalışmanın zorluğudur [94].

5.2. ETS Bulanık Denetim

ETS'de uygulanan kontrol yöntemlerinden biride bulanık kontrolördür. Bulanık kontrol yönteminde kontrol stratejisi, 'if-then' kurallardan oluşmaktadır. Bulanık denetleyici birçok girişi ve çok sayıda çıkışı barındırır. Burada, değişkenler bir ve sonra AND ve OR bağlarıyla kural olarak birleştirilebilir.



Şekil 5.2. Bulanık Denetleyici Sistemi [95].

Bulanık kontrol, tüm değişkenlerde var olan belirsizliği tanımlamak için bulanık kümelerin oluşturulmasına ve bu değişkenlerin bulanık mantık olarak adlandırılmasının bir yöntemine dayanır. Bulanık kontrol, gürbüz kontrollör olarak uygulanabilir çünkü bulanık kontrol, sistemin belirsizliklerine dayanıklı bir kontrol yöntemidir [96]. Tanohata ve Seki [62], ETS'nin yokuş yukarı ve düzensiz yollarda rahat bir şekilde sürülmesi için kullanılan bulanık algoritmaya dayalı destekli tork üretim yöntemini kullanmaktadır. Yokuş yukarı ve düzensiz yollarda ETS'nin hızını

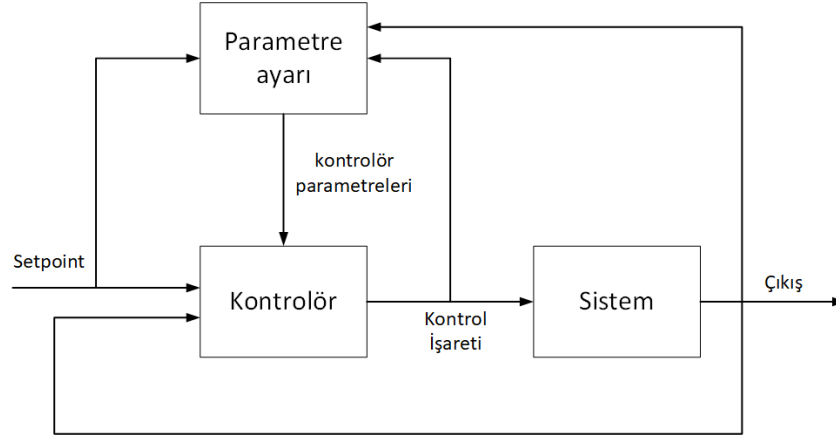
kontrol etmek için benzer bir yöntem, [60] 'da, operatörün yokuş yukarı yollarda ve büyük karışıklık yollarında operatörün güç yükü olmadan yardımcı sürüşü gerçekleştirmek için bulanık algoritma tabanlı uyarlamalı kontrol şeması kullanarak Seki ve Kiso tarafından geliştirilmiştir.

Düzgün duruş hızına, tekerlekli sandalyenin duruş açısına, insan girdisi tork oranına ve sağ ve sol tekerleklerin toplam insan torkuna dayalı, bulanık ve güvenilir sürüşü gerçekleştirmek için ETS'nin performansını iyileştiren bulanık algoritma ve dairesel yollar [63] 'de verilmiştir.

Ghani ve ark. [97] tırmanma sürecinin sınırlı alanında merdivenleri göz önüne alarak istikrarlı ve dengeyi korumak için bir kompakt merdiven çıkıntısının kontrol stratejisinin performanslarını geliştirmek, test etmek ve ilişkilendirmek için kullanılan PD-Fuzzy'yi tasarlamıştır.

5.3. ETS Adaptif Kontrol

Ayarlanabilir parametrelere sahip bir kontrolör adaptif kontrolör olarak adlandırılmaktadır [98]. Sistem dinamik modelinin parametreleri bilinmediği için, Adaptif kontrol, istenen kontrol sistemi seviyesine ulaşmak için gerçek zamanlı olarak kontrolörlerin otomatik olarak ayarlanması için sistematik bir yaklaşım teknikleri sunmaktadır [99]. Uyarlamalı bir kontrol sistemi, sistemdeki her önemli durum değişkeni için gözlemcileri kurar. Sistem, her bir gözlemciyi, sistemin zamanla değişen parametrelerini hesaba katmak üzere ayarlayabilir. Uyarlamalı bir sistemde, kontrol sisteminin her zaman ikili bir rolü vardır. Çıkış, istenen girişe daha yaklaştırılırken, sistem aynı zamanda sistem parametrelerindeki değişiklikleri öğrenmeye devam eder. Bu yöntem bazen sistem parametreleri için yakınsama problemlerinden muzdariptir.



Şekil 5.3. Adaptif sistemin diyagram bloğu [96].

Lyapunov ve giriş / çıkış kararlılığı teorileri, robotik tekerlekli sandalye için yeni bir izleme ve konumlandırma uyarlama kontrolü tasarlamak için kütle merkezinin bir yanal sapmasını göz önüne alarak bir ETS'nin dinamik bir modelini geliştirmek için kullanılmıştır [100]. [64] Lyapunov stabilitesini kullanarak adaptif kontrol denklemini kontrol etmek için benzer bir yaklaşım kullanılır, bu sistemde sol ve sağ tekerleklerin hızını kontrol etmek için referans modele kıyasla enkoder ile ölçülen tekerlek dönme hızı istenen hız komutlarını takip eder.

5.4. ETS Gürbüz Kontrol

Belirsizlik ile ilgili problemlerle ilgilenen kontrol sistemlerinden biri dayanıklı kontroldür. Dayanıklı kontrol metodu kullanılarak, değişen sistem parametrelerine sahip bir kontrol sisteminin performans değişiklikleri ölçülebilir. Dayanıklı kontrol, bilinmeyen bozuculara maruz kalan bilinmeyen dinamikleri olan belirsiz sistemlerin kontrolünü ifade eder [101]. Sistem modelindeki belirsizlik, sistemi etkileyen bozucular ve sensör girişlerinde okunan gürültü sistemin belirsizliğini oluşturmaktadır. Bu belirsizliklerin her biri bir katkı veya çoğaltıcı bir bileşene sahip olabilir. Popüler yaklaşımlardan biri H_∞ / H_2 yaklaşımıdır. H_∞ yöntemleri, kontrol sistemi problemi matematiksel bir optimizasyon problemi olarak ifade edilirse kullanılabilir ve bu optimizasyonu çözen denetçiyi bulabilir. Dayanıklı kontrol, modelleme ve model belirsizlikleriyle ilgilidir. Dayanıklı kontrol tasarımı, modelleme hatalarına iyi bir toleransa sahip bir kontrol tasarlamaya çalışır. Her modelde hatalar ya da belirsizlikler

vardır, hiçbir model tamamen doğru değil. Bir kontrol belirsizliklerin altında çalışacaksa, kontrol gürbüzdür [102].

İki tekerlekli akıllı tekerlekli sandalyelerin H_∞ kontrol yöntemi kullanan gürbüz kontrolör, belirsizlik problemini çözmek için medellenemeyen sistem dinamiğinin, sensör gürültüsünün ve modifiye olmayan araç dinamiğinin varyansına karşı güçlü bir yinelemeli lineer matris eşitsizliği algoritmasına dayalı olarak tasarlanmıştır [67].

BÖLÜM 6. ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYEDE ÖNERİLEN MODELLEME VE KONTROL YÖNTEMİ

Bölüm 5.'te ETS için bazı modelleme ve kontrol yöntemlerini kullanan çalışmalar sunulmuştur. Çalışmalar genel olarak ETS'nin kontrol sisteminde en iyi performansı bulma amacına sahiptir. İyi bir performans, yani kontrol stabilitesi, hız kontrolü, navigasyon sistemi ve ETS kullanıcı konforu yapılan çalışmalarla arttırıldı. Bununla birlikte, ETS'nin artan ihtiyaçları, önceki araştırmaların bir kısmının hala karmaşıklığa sahip olması ve kontrol sistemlerinin çoğu için optimal olamaması nedeniyle ETS ile ilgili araştırmalar sürekli olarak devam etmektedir. Geliştirilen kontrol yöntemlerinden bazıları kabul edilebilirdir, ancak çok girişli ve çok çıkışlı sistemler için optimal değildir. Çok girişli ve çok çıkışlı modern kontrol sistemleri daha karmaşık hale gelir, bu da modern bir kontrol sisteminin tanımının çok sayıda denklem kullanılmasına neden olur. Sadece tek girişli, tek çıkışlı sistemlerle uğraşan klasik kontrol teorisi, çoklu girişli çoklu çıkış sistemleri için kullanışsız hale gelir [83]. ETS kontrol sisteminin optimizasyonunu sunmak için ayırık zamanlı optimal kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu ETS kontrol sistemi çoklu giriş ve çoklu çıkış (MIMO) sistem modelini kullanmaktadır. Bu sistemde TITO olarak da adlandırılan MIMO modeli, ETS'de iki giriş ve iki çıkışa sahiptir. Bu bölümde ETS'de uygulanan optimal kontrol sistemi yöntemi anlatılmaktadır. Optimal kontrol hakkında tanımlamalar [84], [103] 'de bulunabilir.

6.1. Optimizasyon Kavramı

Optimal kontrol hakkında çalışmak için dikkat edilmesi gereken önemli nokta optimizasyon kavramıdır. Optimum kontrol sistem konsepti, fiziksel kısıtların sınırları içinde belirlenen bir maliyet fonksiyonunu minimize eden kontrol işaretini üretecek sistem tasarım kavramıdır. Optimizasyon, statik optimizasyon ve dinamik optimizasyon olarak sınıflandırılabilir [84]. ETS kontrol sisteminin optimizasyonu,

ETS sisteminin iç ve dış bozucularını hesaba katarak ETS sürüşünde iyi bir hız elde etmeyi amaçlamaktadır.

6.1.1. Statik optimizasyon

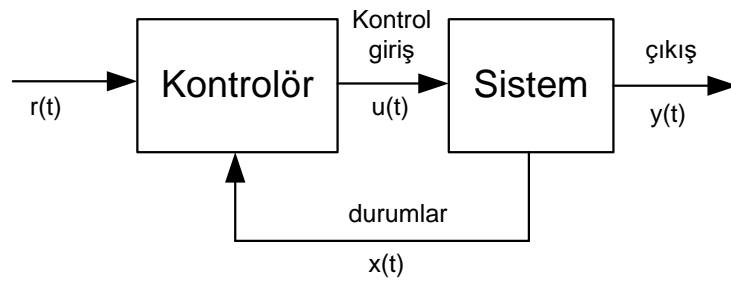
Sistemi tanımlamak için durum uzay modeli kullanılmaktadır. Bu optimizasyonda ardışıl hesap, Lagrange çarpanları, doğrusal ve doğrusal olmayan programlama teknikleri kullanılmıştır. Statik optimizasyon ile, zamana göre değişmeyen, kararlı durum koşullarındaki bir sistemi kontrol edilir [84]. Klasik hesap ve diğer programlama tekniklerinden kısıtlı minimum için gerek koşulların genelleştirilmesi optimal kontrol probleminde optimal çözüme ulaşmak için gereklidir [103]. Statik optimizasyon, kısıtlanmamış ve kısıtlı statik optimizasyondan oluşur.

6.1.2. Dinamik optimizasyon

Dinamik optimizasyon, statik optimizasyonun zıttına, optimal kontrol sistemi değişkenlerinin zamana göre değiştiği dinamik koşul altında kullanılmaktadır. Sistem diferansiyel veya fark denklemleriyle tanımlanır [84]. Arama teknikleri, dinamik programlama, varyasyon hesabı ve Pontryagin prensibi, dinamik optimizasyonda kullanılan tekniklerdir.

6.2. Optimal Kontrol Yöntemi

Dijital bilgisayar kullanılabilirliğinin artması ve yüksek performans ile sistem tasarlama isteği sonucunda, son on yıl içerisinde optimal kontrol sorunları büyük ilgi çekmiştir. Optimal kontrol amacı, bir sistemi bazı fiziksel kısıtlamaları karşılayacak ve aynı zamanda seçilen bir performans kriterlerini en üst düzeye çıkaracak veya en aza indirecek kontrol sinyalinin belirlenmesidir [84]. Optimal bir kontrol, performans kriterini en aza indiren veya en üst düzeye çıkararak tanımlanabilir [104].



Şekil 6.1. Modern Kontrol konfigürasyon [84]

Şekil.6.1.'deki modern kontrol şema bloğu, en uygun çözümü elde etmek için sistemin bazı kısıtlamaları, durumlarla süreceğini ve aynı zamanda seçilen bir performans endeksini J 'nin ilk durumdan son haline getirilmesini veya minimize edilmesini açıklar [84].

Optimal kontrol probleminin çözülmesi için aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır.

1. Kontrol edilecek sistemin matematiksel modeli.
2. Performans endeksi belirtimi.
3. Fiziksel kısıtlamalar ifadesi.

6.2.1. ETS sisteminin matematiksel modeli

Optimizasyon için lineer/non-lineer diferansiyel denklemler ile fiziksel sistem modellenir. Modellemenin amacı, tüm giriş değerleri için fiziksel sistem yanıtının doğru olarak tahmin edilmesidir [104]. Sistemin durum değişkenleri denklem (6.1) ile gösterilmektedir.

$$x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \quad (6.1)$$

Denklem (6.2) ile kontrol sisteminin giriş işaretleri gösterilmektedir.

$$u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t) \quad (6.2)$$

Sistem n tane birinci dereceden diferansiyel denklem ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1(t)}{dt} &= a_1(x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t)) \\
\frac{dx_2(t)}{dt} &= a_2(x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t)) \\
&\vdots \\
&\vdots \\
\frac{dx_n(t)}{dt} &= a_n(x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t))
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Denklem (6.4) ile sistemin durum vektörü verilmiştir.

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

Denklem (6.5) ile sistemin kontrol vektörü verilmiştir.

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_n(t) \end{bmatrix} \tag{6.5}$$

Denklem (6.6) ile sistemin durum denklemi ifade edilmektedir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \tag{6.6}$$

Denklem (6.7) ile sistemin çıkış denklemi ifade edilmektedir.

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{6.7}$$

ETS sistemi, iki elektrikle çalışan arka tekerlek ve iki pasif ön tekerlekten oluşmaktadır. Arka tekerleklerin her biri bağımsız olarak benzer bir DC motor ile tahrik edilir. ETS'nin durum uzay modellemesi, Bölüm 4.'te denklem (4.65) ile verilen dinamik modelden elde edilmiştir. "A" ile ifade edilen ETS'nin durum vektörü denklem (6.8) ile verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} -J_{rr}B_{mr} & K_{tr}J_{rr} & -J_{rL}B_{mL} & K_{tL}J_{rL} \\ -\frac{K_{br}}{L_{ar}} & -\frac{R_{ar}}{L_{ar}} & 0 & 0 \\ -J_{Lr}B_{mL} & K_{tr}J_{Lr} & -J_{LL}B_{mL} & K_{tL}J_{LL} \\ 0 & 0 & -\frac{K_{bL}}{L_{aL}} & -\frac{R_{aL}}{L_{aL}} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

"B" ile ifade edilen giriş matrisi denklem (6.9) ile gösterilmiştir.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{ar}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{aL}} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

"C" ile ifade edilen çıkış matrisi denklem (6.10) ile gösterilmiştir.

$$C = \underbrace{\begin{bmatrix} N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 \end{bmatrix}}_C \quad (6.10)$$

6.2.2. Maliyet fonksiyon

Performans endeksi, gerçekte istenen performansa yaklaşan sistemin ne kadar iyi performans gösterdiğini gösteren bir fonksiyondur. Performans endeksi çok önemlidir çünkü optimal kontrolün karakteristiğini belirler. Kontrol, performans kriterlerinin formuna bağlı olarak doğrusal, doğrusal olmayan, durağan veya zamanla değişen şekilde sağlanabilir.

Dört tane performans indeksi kontrol sistemi aşağıda açıklanmıştır [84], [85].

1. Zaman Optimal Kontrol Sistemi için Performans Endeksi.

Kontrol edilen sistemde, her hangi ilk $x(t_0)$ ' dan belirlenen son değer $x(t_f)$ en az zamanda transfer edilmesidir.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 = t^* \quad (6.11)$$

2. Genel Optimal Kontrol Sistemi için performans indeksi veya denklem (6.12) ile verilen Kuadratik Performans İndeksine dayalı Optimal Kontrol Sistemi.

$$J = x'(t_f)Fx(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [x'(t)Qx(t)Ru(t)]dt \quad (6.12)$$

$$J = S\left(x(t_f), t_f\right) + \int_{t_0}^{t_f} V(x(t), u(t), t)dt \quad (6.13)$$

R'nin kesin pozitif tanımlı bir matris olduğu durumda, Q ve F pozitif yarı pozitif tanımlı matrislerdir. Q ve R matrisleri zamanla değişebilir matrislerdir. Denklemdeki (6.12) performans indeksinin özel formu kuadratik olarak adlandırılmaktadır.

3. Terminal Kontrol Sistemi için Performans Endeksi.

Terminal kontrol sistemi için performans indeksi İstenen hedef pozisyon ile gerçek hedef pozisyon arasındaki hatanın en aza indirgenmesine dayanmaktadır.

$$J = x'(t_f)Fx(t_f) \quad (6.14)$$

F , yarı pozitif tanımlı bir matristir. Bu performans endeksi de terminal maliyeti fonksiyonunu olarak da adlandırılmaktadır.

4. Fuel (yakıt)-Optimal kontrol için Performans Endeksi

Toplam yakıt sarfiyatını en aza indirmek için performans endeksi aşağıda gösterildiği denklem (6.15) ve (6.16) ile formüle edilmiştir.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^m u_i^2(t) r_i dt \quad (6.15)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u'(t) R u(t) dt \quad (6.16)$$

R matrisi kesin pozitif tanımlıdır. (') işareti transpoz olarak ifade edilir.

6.2.3. Optimal kontrol kısıtlamalar

Fiziksel duruma bağlı olarak kontrol $\mathbf{u}(t)$ ve durum $\mathbf{x}(t)$ vektörleri ya kısıtlamasız (unconstrained) veya kısıtlamalı'dır (Constrained). Elektrik devrelerinde akımlar ve gerilimler, motor hızı, roket itici güç gibi fiziksel durumlardan dolayı kısıtlamalar.

$$U_- \leq u(t) \leq U_+ \quad \text{ve} \quad X_- \leq x(t) \leq X_+ \quad (6.17)$$

$+$ ve $-$, elde edilebilen değişkenlerin maksimum ve minimum değerlerini gösterir. Sistemin fiziksel kısıtlamaları, sistem çalışırken geçerli olan sınırları göstermektedir. Bu kısıtlamalar, bir sistemi geliştirmek için kullanılan parametreler olarak ifade edilir.

6.3. Optimal Kontrol Problemi

Optimal kontrol probleminin çözümü için optimal kontrol probleminin formülasyonu düşünülmelidir. Optimal kontrol problemi, kabul edilebilir bir optimal kontrol işareti u^* bulmaktır [103]. Kabul edilebilir kontrol $[t_0, t_f]$ zaman aralığındaki kısıtları yerine getiren bir kontrol sürecidir [104]. Optimal kontrol için dinamik sistem denklem (6.18) ile verilen diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (6.18)$$

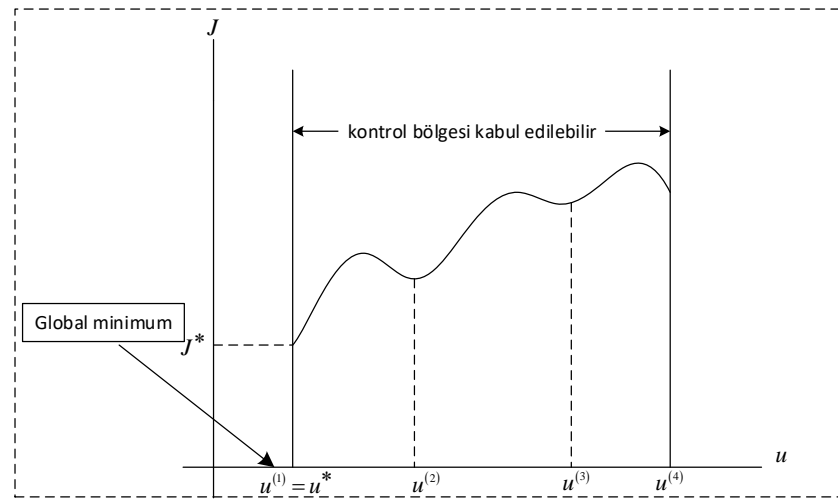
Denklem (6.19), kabul edilebilir bir yörünge x^* takip etmek için minimum maliyet fonksiyonunu gösterir.

$$J = S(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} V(x(t), u(t), t) dt \quad (6.19)$$

Son zaman t_f optimal kontrol problem tipine bağlı olarak sabit veya serbest olabilir. S ve V fonksiyonları, sürekli farklılaşabilir [103]. Burada, kabul edilebilir bir yörünge, t_0 ve t_f arasındaki zaman aralığı boyunca durum değişkeninin kısıtlamalarını yerine getiren bir durum yörüngesidir. Bununla birlikte, performans endeksine dahil edilemeyen maliyet, boyut, güvenilirlik gibi bazı kontrolör konfigürasyonlarının seçilmesi problemin üstesinden gelebilmek için düşünülebilir. Üçüncüsü denklem (6.20) ile ifade edildiği gibi optimal kontrolün minimum noktasını bulmaktır.

$$\begin{aligned} J^* &= S(x^*(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} V(x^*(t), u^*(t), t) dt \\ &\leq S(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} V(x(t), u(t), t) dt \end{aligned} \quad (6.20)$$

Ancak, denklem (6.20) 'da gösterildiği gibi, optimal kontrol ve yörünge eşitsizliği, performansın performans indeksinden daha küçük olmasına neden olur. Burada amaç global minimum J 'yi bulmak ve lokal minimumu bulmamaktır[104], böylece global minimum değeri lokal minimum belirler ve bu da en düşük performans endeksi değeri haline gelir.



Şekil 6.2. Optimizasyon Problemi Temsili [104].

Şekil 6.2.'den. J 'nin $u^{(1)}$, $u^{(2)}$, $u^{(3)}$ ve $u^{(4)}$ ile gösterilen lokal minimuma sahip olduğu görülebilir. Global minimum J için $u^{(1)}$ ile gösterilir. Bu, küresel minimum değerinin J performans endeksinin değerleri arasındaki en küçük değer olduğu anlamına gelir.

6.4. Ayrık Zaman Optimal Kontrol

Önceki çalışmada ETS sürekli zaman durum uzay modeli elde edilmiştir. ETS'nin kontrol edilebilmesi için ayrık zaman durum denklemleri elde edilir. Denklem (6.21) [84] 'de doğrusal, zamanla değişmeyen, ayrık zaman kontrol sisteminin durum uzay denklemleri vektör matris formunda verilmiştir.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (6.21)$$

$k = k_0, k_1, \dots, k_{f-1}, x(k)$, n dereceli durum vektörüdür. $u(k)$, r dereceli kontrol vektörüdür ve $A(k)$ ve $B(k)$, $n \times n$ ve $n \times r$ boyutlarında matrislerdir. Denklem (6.22) sistemin başlangıç koşulunu gösterir.

$$x(k = k_0) = x(k_0) \quad (6.22)$$

Denklem (6.23) ile terminal maliyet fonksiyonuna sahip genel performans endeksi (PI) verilmiştir.

$$\begin{aligned} J &= J(x(k_0), u(k_0), k_0) \\ &= \frac{1}{2} x'(k_f) F(k_f) x(k_f) + \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{k_f-1} [x'(k) Q(k) x(k) + u'(k) R(k) u(k)] \end{aligned} \quad (6.23)$$

Burada $F(k_f)$ ve $Q(k)$ $n \times n$ boyutlu, simetrik, yarı pozitif tanımlı matrislerdir ve $R(k)$ $r \times r$ boyutlu, simetrik, kesin pozitif tanımlı matristir.

6.5. ETS Durum Gözleyici

Genellikle pratikte, optimal kontrol sistemi ile karşılaşılan zorluk, sistemde doğrudan ölçülemeyen bazı durum değişkenlerinin bulunmasıdır. Dolayısıyla, bu durumda, ulaşılamayan durum değişkenlerini tahmin etmek için bir gözlemciye ihtiyaç vardır. Bir gözlemcinin tasarımı, öngörücü kontrolör tasarımından ayrı bir görevdir. Bir gözlemcinin rolü, tahmin edilen ve gerçek durum değişkenleri arasında küçük hatalar ile durum değişkenlerini tahmin etmektir [104]. Sistem çıkışı ve kontrol girişi kullanılarak, durum değişkenleri durum gözlemcisi tarafından tahmin edilmektedir [83] ve ayrıca gözlemci sistemin matematiksel modeline bağlı olarak tasarlanmaktadır. Gözlemcinin matematiksel modeli, sistemin modeliyle aynıdır. Genellikle bir sistemin ayrık zaman durum uzay modeli Denklem (6.24) ve Denklem (6.25)'deki gibi gösterilmektedir.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (6.24)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (6.25)$$

Keyfi sonlu sayıda ornekleme periodunda durum değişkenleri elde edilebiliyor ise sistem gözlenebilir denir [105]. Denklemden (6.26)'da gözlemlenebilirlik matrisi formülü verilmiştir.

$$o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Sistem, $rank(o) = n$ olması durumunda gözlemlenebilir olduğu söylenir. ETS sisteminde kullanılan durum gözlemcisi algoritması veya durum kestiricisi için Luenberger gözlemcisi kullanılmıştır. Burada, Luenberger gözlemcisi ayrı bir zamanda tasarlanmıştır, bu amaçla ilk önce, sürekli durum uzay modeli ayrı zamana durum uzay dönüştürülmelidir.

Bir durum gözlemcisi, sistemin durum değişkenlerinin değerlerini tahmin etmeye yarayan bir sistemdir. Gözlemciyi tasarımıda göz önünde bulundurulması gereken ana hedef, gözlemlenen değerlerin gerçek değerlerle aynı olmasını sağlamaktır. Gözlemci tasarımıda Luenberger gözlemcisi, Kalman gözlemcisi, bilinmeyen giriş gözlemcisi ve kayan mod gözlemcisi gibi bazı durum gözlemci tasarım algoritmaları vardır [106]. Durum gözlemcisi tasarım algoritmalarından, Luenberger durum gözlemcisi ele alınacaktır. Luenberger algoritması ilk olarak 1963 yılında David G. Luenberger tarafından kullanılmıştır. Bu gözlemci algoritma doğrusal dinamik sistemin yeniden elde edilmesi için kullanılmıştır [107, 108] 'da Luenberger, sistem girişlerinin ve çıkışlarının kullanımı ile lineer bir sistemin durum değişkenlerinin yeniden oluşturulabildiği bir algoritma önerilmiştir. Luenberger gözlemci algoritmasını kullanmanın avantajı gözlemci tasarımının basit olmasıdır..

Bu çalışmada kullanılan gözlemci modeli, ETS sağ ve sol DC motor akımlarının (i_{ar}, i_{aL}) sağ ve sol tekerleklerinin hızı (w_{mr}, w_{mL}) olmak üzere dört durum değişkeninden oluşmaktadır. Denklem (6.27) ile Luenberger gözlemci denklemi verilmiştir.

$$\hat{x}(k+1) = \underbrace{A\hat{x}(k) + Bu(k)}_{Estimator} + L\underbrace{[y(k) - C\hat{x}(k)]}_{Regulator} \quad (6.27)$$

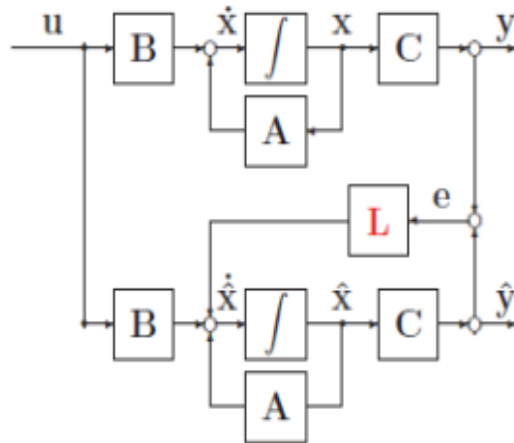
Luenberger gözlemcisi tarafından gözlemlenen durum değişkenleri, fiziksel sistem tarafından sağlanan denklemlerin değişkenlerinden ayırt etmek için denklem (6.23) gösterildiği gibi “^” yani $\hat{x}(k)$ ile gösterilir. Denklem (6.29) ile verilen gözlemci hata dinamiği asimptotik olarak kararlı olduğundan.

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (6.28)$$

hatası $k \rightarrow \infty$ için sifira yaklaşır. Luenberger gözlemcisinin hata dinamiği modeli denklem (6.29) ile gösterilmiştir.

$$e(k+1) = (A - LC)e(k) \quad (6.29)$$

Bu ayrık-zaman sistem için, Luenberger gözlemcisi $A - LC$ matrisinin tüm öz değerlerinin birim çember içerisinde olması durumunda asimptotik olarak kararlıdır.



Şekil 6.3. Luenberger Observer Şeması [109].

L matrisi Ackerman formülü kullanılarak hesaplanır ve gözlemcinin $A - LC$ kutupları sistemin zaman sabitlerinden beş kat daha hızlı olacak şekilde seçilir. Denklem (6.31), L 'yi bulmak için Ackerman formülünü gösterir. İstenilen karakteristik polinom denklem (6.30) ile gösterilmiştir.

$$P = z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + \hat{a}_n = 0 \quad (6.30)$$

$$L = P(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

6.6. ETS'nin Model Öngörülü Kontrol (MÖK)

ETS sisteminde kullanılan optimal kontrol stratejisi model öngörülü kontroldür. MÖK'ün tarihi, 1970'lerin sonlarında Richalet, Cutler ve Ramakter'in yayımları ile başlamıştır. MÖK, sayısal optimizasyona dayalı olarak çalışır. MÖK kontrol sinyalini maliyet fonksiyonunu minimize ederek elde eder [109]. ETS'nin sistem modelini kullanarak ve bir maliyet fonksiyonu ile düzenli aralıklarla optimize edilerek, gelecekteki kontrol girişleri ve ETS sisteminin gelecekteki çıkışları tahmin

edilmektedir. Kontrol sistemi tasarımı model olarak durum uzay modeli kullanılmaktadır.

6.6.1. MÖK kavramları

Öngörülü kontrol sistemleri, maliyet fonksiyonu en aza indirerek sistem kontrolünün sağlanması için kullanılacağı sistemin modeline dayanan model tabanlı kontrolör kategorisine dahil edilir.

6.6.1.1. MÖK elemanları

MÖK elemanları farklı uygulamalar için farklı seçeneklerde seçilebilir. Bu seçeneklerin her biri farklı algoritmaları kullanır.

1. MÖK'ün üç aşaması aşağıda verilmektedir [109].
 - a. Tahmin Modeli.
 - b. Maliyet fonksiyonu.
 - c. Kontrol Kanununun belirlenmesi.
2. En çok kullanılan sistem modelleme yöntemleri aşağıda verilmektedir [109].
 - a. Dürtü cevabı.
 - b. Adım cevabı.
 - c. Transfer İşlevi.
 - d. Durum uzay.

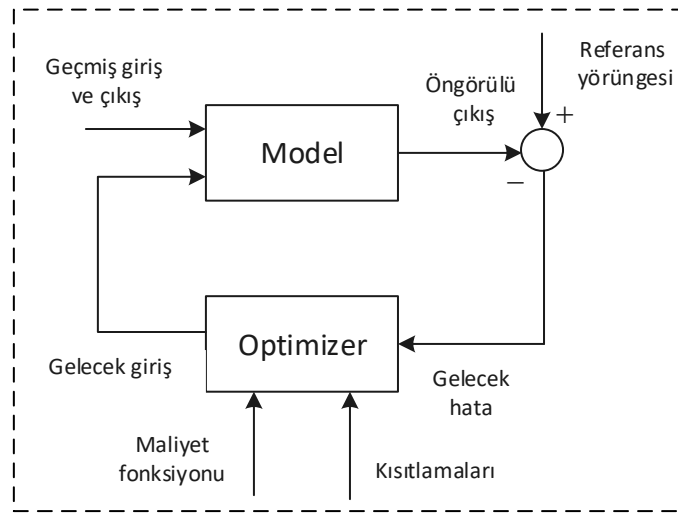
6.6.1.2. MÖK'nin temelleri

Öngörülü kontrol yöntemlerinin farklı isimlere sahip birçok varyasyonu vardır, ancak tüm öngörülü kontrolörlerin temelleri aynıdır. Bu kontrolörler arasındaki fark sistemi tanımlamak için kullanılan modelleme yöntemi, bozucunun modeli ve kullanılan maliyet fonksiyonudur. Temel olarak MÖK üç fikirden oluşmaktadır [109].

- a. Model kullanarak gelecek zaman ufku anında sistem çıkışını tahmin etmektir.

- b. Maliyet fonksiyonu en aza indirmek için bir kontrol kuralının belirlenmesi.
- c. Receding yöntem, kontrol ufku periodunda hesap edilen kontrol işaretlerinden ilk kontrol işaretinin sistem uygulanmasıdır.

MÖK ailesine ait tüm kontrol yöntemleri, Şekil 6.4.'te gösterildiği gibi temel yapı kullanmaktadır.



Şekil 6.4. MÖK Temel Yapısı [109].

Geçmiş ve mevcut değerlere ve önerilen optimal gelecek kontrol eylemlerine dayanarak, gelecekteki sistem çıkışlarını tahmin etmek için bir model kullanılır. Bu eylemler, gelecekteki takiplerin hatalarını içeren maliyet fonksiyonunu dikkate alarak optimizasyon algoritması tarafından hesaplanır[109].

6.6.2. Ayırık zaman MÖK

Ayrık-zamanlı MÖK'nin tasarımında temel teknik, kısıtlı sistemin gelecekteki kontrol yörüngesini optimize etmeye dayanmaktadır [110]. Bu kontrolör ayırık zaman ve doğrusal durum uzay modeli kullanmaktadır. Wang [110] tarafından ayırık zamanlı MÖK formülasyonu aşağıdaki gibi yazılmıştır. Tek girişli ve tek çıkışlı bir sistem için ayırık zaman durumu uzay modeli.

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (6.32)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k) \quad (6.33)$$

Olarak verilsin, $x_m(k)$ vektörü n_1 boyutludur . Ancak bu modeli tasarım amacımıza uygun olması için integratör gömülü olarak değiştirmemiz gerekmektedir. Giriş $u(k)$ 'nin çıkış doğrudan etkilemediği kabul edilecektir $D_m = 0$ (Receding horizon control prensibine göre) [110].

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (6.34)$$

$$x_m(k) = A_m x_m(k-1) + B_m u(k-1)$$

$$x_m(k+1) - x_m(k) = A_m [x_m(k) - x_m(k-1)] + B_m [u(k) - u(k-1)]$$

Denklem (6.35) ve denklem (6.36) ile yazılan durum değişkenlerinin farkı alınmaktadır.

$$\Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k) \quad (6.35)$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \quad (6.36)$$

Kontrol değişkeninin farkı denklem (6.37) ile verilmektedir.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (6.37)$$

$x_m(k)$ ve $u(k)$ değişkenlerinin için artırımları ile gösterilir. Bu dönüşümler yardımı ile fark durum uzay modeli

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (6.38)$$

olarak yazılır. Bir sonraki adım ise, $\Delta x_m(k)$ ile çıkış $y(k)$ arasında bağlantı kurmaktır. Bunu yapabilmek için denklem (6.39)'de yeni durum değişkenleri

$$x(k) = \begin{bmatrix} \Delta x_m(k)^T & y(k)^T \end{bmatrix}^T \quad (6.39)$$

olarak seçilir. Üst simge T matris transpozunu belirtir. Çıkışa ait fark denklemi için

$$\begin{aligned}
 y(k+1) &= C_m x_m(k+1) \\
 y(k) &= C_m x_m(k) \\
 y(k+1) - y(k) &= C_m \underbrace{[x_m(k+1) - x_m(k)]}_{\Delta x_m(k+1)} \\
 y(k+1) - y(k) &= C_m \Delta x_m(k+1) \\
 y(k+1) &= C_m \{A_m + B_m \Delta u(k)\} + y(k)
 \end{aligned} \tag{6.40}$$

Denklem (6.38) ve denklem (6.40) durum denklemleri vektor matris formunda yazılır.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \\ C_m A_m & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \tag{6.41}$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} c \\ o_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \tag{6.42}$$

$o_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$. Üçlü (A, B, C), öngörülü kontrolde kullanılacak olan integral gömülü artırılmış durum uzay model elde edilmiştir.

6.6.2.1. Çıkış ve durum değişkenleri öngörü

Örnekleme anı k_i ve $k_i > 0$ ve durum değişkenleri $x(k_i)$ ölçme süresince mevcut olduğu kabul edilecektir. $x(k_i)$ şimdiki mevcut sistem bilgisini sağlayacaktır. Gelecek kontrol yörüngesi

$$u(k_i), \quad u(k_i + 1), \quad u(k_i + 2), \quad \dots \dots \quad u(k_i + N_p - N_c - 1) \tag{6.43}$$

ile gösterilir. Gelecek kontrol yörüngesini yakalamak için kullanılan parametre sayısı N_c kontrol ufku (control horizon) olarak adlandırılır. Öngörü ufku (prediction horizon) olarak adlandırılan N_p örnek sayısı için verilen $x(k_i)$ bilgisi ile gelecek durum

değişkenleri öngörülür. N_p aynı zamanda optimizasyon pencere uzunluğudur. Gelecek durum değişkenleri

$$x(k_i + 1|k_i) \quad x(k_i + 2|k_i) \quad \dots \quad x(k_i + m|k_i) \quad \dots \dots \quad x(k_i + N_p|k_i) \quad (6.44)$$

ile gösterilir

$$x(k_i + 1|k_i) = Ax(k_i) + B\Delta u(k_i)$$

$$x(k_i + 2|k_i) = A x(k_i + 1|k_i) + B\Delta u(k_i + 1)$$

$$= A [Ax(k_i) + B\Delta u(k_i)] + B\Delta u(k_i + 1)$$

$$x(k_i + 2|k_i) = A^2 x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1)$$

$$x(k_i + 3|k_i) = A x(k_i + 2|k_i) + B\Delta u(k_i + 2)$$

$$= A [A^2 x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1)] + B\Delta u(k_i + 2)$$

$$x(k_i + 3|k_i) = A^3 x(k_i) + A^2 B\Delta u(k_i) + AB\Delta u(k_i + 1) + B\Delta u(k_i + 2)$$

.....

$$x(k_i + N_p|k_i) = A^{N_p} x(k_i) + A^{N_p-1} B\Delta u(k_i) + A^{N_p-2} B\Delta u(k_i + 1) + \dots + A^{N_p-N_c} B\Delta u(k_i + N_c - 1) \quad (6.45)$$

Öngörülen durum değişkenlerinden öngörülen çıkış değişkenleri,

$y(k + 1) = Cx(k + 1)$ ifadesinden sırası ile aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$x(k_i + 1|k_i) = Ax(k_i) + B\Delta u(k_i)$ idi,

$$y(k_i + 1|k_i) = CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i)$$

$$y(k_i + 2|k_i) = CAx(k_i + 1) + CB\Delta u(k_i + 1)$$

$$= CA[Ax(k_i) + B\Delta u(k_i)] + CB\Delta u(k_i + 1)$$

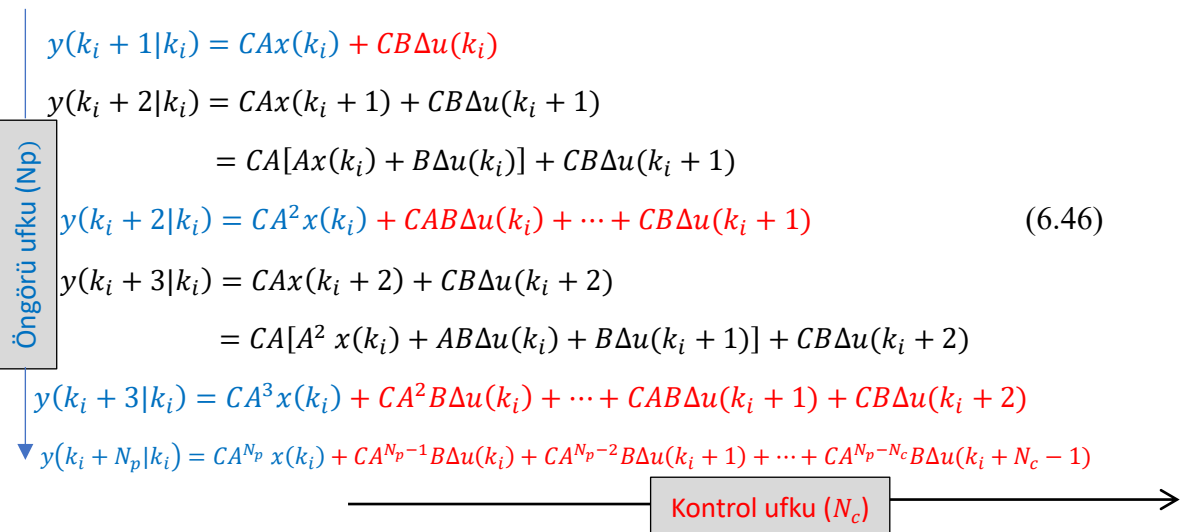
$$y(k_i + 2|k_i) = CA^2 x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + \dots + CB\Delta u(k_i + 1) \quad (6.46)$$

$$y(k_i + 3|k_i) = CAx(k_i + 2) + CB\Delta u(k_i + 2)$$

$$= CA[A^2 x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1)] + CB\Delta u(k_i + 2)$$

$$y(k_i + 3|k_i) = CA^3 x(k_i) + CA^2 B\Delta u(k_i) + \dots + CAB\Delta u(k_i + 1) + CB\Delta u(k_i + 2)$$

$$y(k_i + N_p|k_i) = CA^{N_p} x(k_i) + CA^{N_p-1} B\Delta u(k_i) + CA^{N_p-2} B\Delta u(k_i + 1) + \dots + CA^{N_p-N_c} B\Delta u(k_i + N_c - 1)$$



$$y = [y(k_i + 1|k_i) \quad y(k_i + 2|k_i) \quad y(k_i + 3|k_i) \quad \dots \quad y(k_i + N_p|k_i)]^T \quad (6.47)$$

$$\Delta U = [u(k_i) \quad u(k_i + 1) \quad u(k_i + 2) \quad \dots \quad u(k_i + N_p - N_c - 1)]^T \quad (6.48)$$

Çıkış denklemi için kompakt matris formu denklem (6.49)'de verildiği gibidir

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (6.49)$$

F ve Φ hesabı için kontrol edilen sistem katsayı matrislerine bağlı ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \dots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (6.50)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (6.51)$$

Set-nokta bilgilerini ihtiva eden vektör alt satırda gösterilmiştir.

$$R_s^T = \overbrace{[1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]}^{N_p} r(k_i) \quad (6.52)$$

Kontrol amacını gösteren maliyet fonksiyonu (cost function) denklem (6.53) ile verilmiştir.

$$J = \underbrace{(R_s - Y)^T (R_s - Y)}_{1.terim} + \underbrace{\Delta U^T \bar{R} \Delta U}_{2.terim} \quad (6.53)$$

İfadesinde 1. terim öngörü çıkış ile set değeri arasındaki hatayı minimize etmeyi amaçlarken 2. terim ise ΔU büyüklüğünün mümkün olan en küçük değer yapılmasını amaçlar.

$$\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c} \quad r_w \geq 0 \quad (6.54)$$

J 'yi minimize eden optimal ΔU bulmak için $Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U$ olduğu göz önünde bulundurulur

$$\begin{aligned} J &= (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U = (R_s - Fx(k_i) - \Phi \Delta U)^T (R_s - Fx(k_i) - \Phi \Delta U) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \\ J &= (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - (R_s - Fx(k_i))^T (\Phi \Delta U) - (\Phi \Delta U)^T (R_s - Fx(k_i)) + \\ &\quad (\Phi \Delta U)^T (\Phi \Delta U) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \end{aligned} \quad (6.55)$$

$(R_s - Fx(k_i))^T (\Phi \Delta U) = [(\Phi \Delta U)^T (R_s - Fx(k_i))]^T$ simetrik olduğu göz önüne alınır ise

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \Phi^T + (\Phi \Delta U)^T (\Phi \Delta U) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (6.56)$$

$$(AB)^T = B^T A^T \quad (6.57)$$

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (6.58)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = -2\Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + 2(\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (6.59)$$

J 'nin Minimum olması için gerekli koşul

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0 \quad (6.60)$$

dır. $-2\Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + 2(\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U = 0$ ise

$$(\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U = \Phi^T (R_s - Fx(k_i))$$

Denklem (6.61)'de kontrol işaretinin optimal olması için çözüm verilmektedir

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (6.61)$$

Optimal olarak ΔU elde edilir. $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1}$ matrisinin tersinin var olduğu kabul edilmektedir.

6.6.2.2. Receding horizon prensibi (kayan ufuk prensibi)

Elde edilmiş olan $\Delta U = [\Delta U(0), \Delta U(1), \dots, \Delta U(N_u - 1)]$ optimal kontrol dizisinden ilk olan $\Delta U(0)$ optimal kontrol işareti sisteme uygulanır [110]. Uygulanır iken

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \quad (6.62)$$

göz önüne alınarak

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k - 1) \quad (6.63)$$

Optimal kontrol işareti hesaplanır ve sonra uygulanır. Verilen Kontrol bir k_i anı için optimal parametre vektörü ΔU .

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (6.64)$$

ifadesi kullanılarak elde edilir. Öngörü kontrol çerçevesinde $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T R_s$ set-nokta (değer) değişimine. $-(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F$ durum geri-besleme kontrole karşılık gelmektedir.

Her ikiside sistem parametlerine bağlıdır. Kayan ufuk (Receding horizon) 'de k_i anı için ΔU optimal vektörün ilk elemanı alındığından dolayı, artımsal (incremental) kontrol için.

$$\Delta u(k_i) = \overbrace{[1 \ 0 \ \dots \ 0]}^{N_c} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (6.65)$$

$$\Delta u(k_i) = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i) \quad (6.66)$$

$$K_y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T R_s \quad (6.67)$$

$$K_x = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F \quad (6.68)$$

Artırılmış tasarım modeli (Augmented design model)

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (6.69)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C \\ 0_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (6.70)$$

$0_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$ yardımı ile genel olarak $x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k)$ ifadesinde, $\Delta u(k) = K_y r(k) - K_{mpc} x(k)$ yerine koyulur ise $x(k+1) = Ax(k) + B[K_y r(k) - K_x x(k)]$ düzenlenir ise kapalı-çevrim denklemi.

$$x(k+1) = (A - BK_x)x(k) + BK_y r(k) \quad (6.71)$$

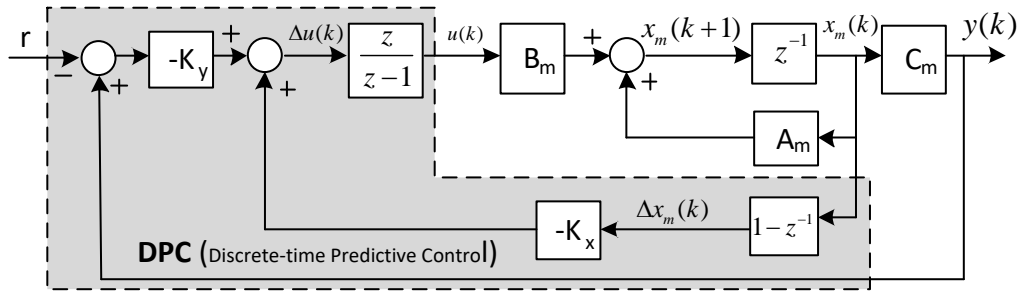
olarak elde edilir. Kapalı-çevrim özdeğerleri, $\det[\lambda I - (A - BK_x)] = 0$ karakteristik denklemi çözülerek elde edilir. Durum değişkenlerinin

$$x(k_1) = [\Delta x_m(k)^T \quad y(k)^T]^T \quad (6.72)$$

olduğu göz önünde bulundurulur ise $K_y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T R_s$ set-nokta (değer) değişimine karşı gelen kazanç aynı zamanda

$$K_{mpc} = [K_x \quad K_y] \quad (6.73)$$

kazancının son elemanı K_y 'dir. K_x kazanç matrisi ise $\Delta x_m(k)$ vektörü ile ilişkili geri besleme kazancıdır. K_y ise y (çıkış) ile ilgili geri besleme kazancıdır. Aşağıda kontrol blok diyagram olarak verilmiştir.



Şekil 6.5. Ayrık-zaman öngörü kontrol sistemi

6.6.3. MIMO sistem için ayrık zamanlı MÖK tasarımı

Bir matematik model kullanarak, Model predictive control (MÖK) kontrolörü elektrikli tekerlekli tekerlekli sandalye için (ETS) tasarlanmıştır. Durum uzay modeli, kontrol sistemi tasarımında model olarak kullanılmıştır [110]. Durum-uzay modeli, gelecekteki durumu tahmin etmek için kullanılan mevcut zamandaki gibi durum değişkeniyle temsil edilir.

Bu ETS, iki giriş ve iki çıkıştan oluşan MIMO sistemdir. Girişler sağ tekerlek DC motor girişi (U_r) ve sol tekerlek DC motor girişidir (U_L). Çıkışlar sağ tekerlek açısall hızı (w_{mr}) ve sol tekerlek açısall hızıdır (w_{mL}). Denklemden elde edilen ETS modeli için ayrık zaman durum uzayı denklem (6.74) ve denklem (6.75) ile gösterilmektedir.

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) + B_d \omega(k) \quad (6.74)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k) \quad (6.75)$$

x_m , durum değişkenlerinin vektörü u , giriş değişkeni ve y , sistemin çıkışıdır. Giriş $u(k)$ 'nin aynı zamanda çıkışa etki edemeyeceği varsayılarak, bu sayede ufukta kontrolün ilkesi olarak $D_m = 0$ olur. Beyaz gürültü olarak kabul edilen ve $\omega(k)$ olarak ifade edilen bozucu girişi sıfıra eşittir. Durum değişkeninin farkı denklem (6.76) ve denklem (6.77) ile verilir.

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) + B_d \in(k) \quad (6.76)$$

$$\Delta y(k+1) = A_m \Delta x_m(k+1) = C_m A_m \Delta x_m + C_m B_m \Delta u(k) + C_m B_d \in(k) \quad (6.77)$$

Denklem (6.78) 'de verilen yeni bir durum değişken vektörü $x(k)$ seçilerek, model tahmin kontrolünün tasarımında artırılmış model kullanılabilir [110].

$$x(k) = \begin{bmatrix} \Delta x_m(k)^T & y(k)^T \end{bmatrix}^T \quad (6.78)$$

Denklem (6.79) ve denklem (6.80), sistemin artırılmış modelini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (6.79)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (6.80)$$

A_m , B_m ve C_m matrisleri $n_1 \times n_1$, $n_1 \times m$ ve $q \times n_1$ boyutlarına sahiptir. Çok girişli, çok çıkışlı bir sistemdeki durum, kontrol ve çıktı vektörlerinin boyutlarına göre, denklem (6.81) ve denklem (6.82) [110] 'da yazılan Y ve ΔU vektörlerinin boyutları ayarlanmaktadır.

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(k_i)^T & \Delta u(k_i+1)^T & \dots & \Delta u(k_i+N_c-1)^T \end{bmatrix}^T \quad (6.81)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(k_i+1|k_i)^T & y(k_i+2|k_i)^T & y(k_i+3|k_i)^T & \dots & y(k_i+N_p|k_i)^T \end{bmatrix}^T \quad (6.82)$$

Denklemde (6.83), sıfır gürültü efekti ile hesaplanan durum değişkeninin ve çıkış değişkeninin tahmini sunulmuştur [110].

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (6.83)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (6.84)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & 0 \\ CAB & CB & 0 & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (6.85)$$

Kontrol Ufku \rightarrow

\downarrow Öngörü Ufku

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s r(k_i) - \Phi^T F x(k_i)) \quad (6.86)$$

Matris $\Phi^T \Phi$ 'nin boyut $mN_c \times mN_c$, $\Phi^T F$ 'nin boyut $mN_c \times n$ 'dir. $\Phi^T R_s$ matrisi $\Phi^T F$ matrisinin son q sütununa eşittir. Denklem (6.86) 'da verilen Ağırlık matrisi \bar{R} blok matrisidir..

6.6.3.1. Kısıtlamalı MIMO sistem için ayırık zaman MÖK tasarımı

ETS'nin model öngörülü kontrolü (MÖK), sağ kontrol sinyali ve sol kontrol sinyali gibi iki giriş ve sağ açısız hız ve sol açısız hız gibi iki çıkıştan oluşan MIMO ön kontrol sistemi kullanılarak tasarlanmıştır. Giriş ve çıkış kontrol sinyalinin fark kısıtlamaları denklem (6.87) ve denklem (6.88) 'de verilmiştir [110].

$$[\Delta u_1^{\max} \Delta u_2^{\max} \dots \Delta u_3^{\max}] \quad (6.87)$$

ve alt sınır için ise aşağıda verildiği gibi yazılır.

$$[\Delta u_1^{\min} \Delta u_2^{\min} \dots \Delta u_3^{\min}] \quad (6.88)$$

Öngörülü kontrol problemi, kayan öngörü problem çerçevesinde formülize edildiği ve çözüldüğü için, kısıtlamalar her bir yürüyen ufuk için göz önüne alınır. Buda bize

her optimizasyon pencere başlangıcında kısıtlamaları değiştirebilmemize imkan sağlar, ve ayrıca kısıtlı problemin sayısal olarak çözümünde bir araç sunar. Bu fikre dayalı olarak kısıtlamalar kontrol işaret değişim hızı k_i anında $\Delta u(k)$ ile tanımlanır ise, k_i anındaki kısıtlamalar [110].

$$\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k_i) \leq \Delta u^{\max} \quad (6.89)$$

parametre ΔU ile eşitsizlikler olarak ifade edildiğinden, sonraki adım ise bu kısıtlamaların öngörülü kontrol tasarımında kullanılan orijinal maliyet fonksiyonu ile birleştirilmesidir. Optimal çözümün elde edilmesinde Quadratik proglamlama kullanıldığından, kısıtlamaların üst sınır ve alt sınır şeklinde iki kısma ayrılmaları gereklidir. (6.90) [110].

$$\Delta U^{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U^{\max} \quad (6.90)$$

ΔU^{\max} ve ΔU^{\min} N_c uzunluğunda sırası ile Δu^{\max} , $u\Delta^{\min}$ elemanlı kolon matrisleridir. Çıkış kısıtlamaları ΔU cinsinde ifade edilir.

$$Y^{\min} \leq F x(k_i) + \Phi \Delta U \leq Y^{\max} \quad (6.91)$$

Sonuç olarak, katı kısıtlamaların (Hard constraints) bulunduğu model öngörülü kontrolün amacı maliyet fonksiyonu Denklem (6.92)'deki gibi verilmiştir.

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (6.92)$$

yi aşağıda verilen eşitsizlik kısıtlamalarına bağlı olarak

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \quad (6.93)$$

Denklem (6.94) 'de kompakt formu olarak ifade etmektedir

$$M\Delta U \leq \gamma \quad (6.94)$$

Burada M , sınırların sayısına eşit satır sayılı ve ΔU boyutuna eşit sütun sayısına sahip bir sınırlandırma matrisidir.

6.6.3.2. Hildreth'in kuadratik programlama

Hildreth'in Kuadratik programlama, MÖK'de uygulanan optimizasyon yöntemidir. Hildreth'in Kuadratik programlama yöntemi, denklemde (6.95) gösterildiği gibi kısıtlalı optimizasyon problemini çözmek için kullanılır. Denklem (6.96)'da kısıtlamalar gösterilmektedir. Hildreth Quadratic programlamada, maliyet fonksiyonunu en aza indirmek λ_i 'yi ayarlanmaktadır. Burada maliyet fonksiyonu ikinci derece olarak kabul edilmektedir. Bir tam döngü için Hildreth Kuadratik programlama formülasyonu, λ^m 'dan λ^{m+1} 'ye (6.97) ve denklem (6.98) [110] 'e göre yazılmıştır.

$$J = \frac{1}{2} \eta^T H \eta + \eta^T f \quad (6.95)$$

$$A \text{cons} \eta \leq b \quad (6.96)$$

Denklem (6.97) ve denklem (6.98) 'de MÖK'de uygulanan optimizasyon için Hildreth Kuadratik programlamanın amaç fonksiyonu gösterilmektedir.

$$\lambda_i^{m+1} = \max(0, w_i^{m+1}) \quad (6.97)$$

$$w_i^{m+1} = -\frac{1}{h_{ii}} \left[ki + \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij} \lambda_j^{m+1} + \sum_{j=i+1}^n h_{ij} \lambda_j^m \right] \quad (6.98)$$

Skaler h_{ij} $H = ME^{-1}M^T$ 'nin ij th elemanıdır ve ki , $K = \gamma + ME^{-1}F$ vektörünün i sırasındaki elemanıdır.

6.7. ETS Bozucu Gözleyisi

Bozucular, kontrol sisteminin performansı için büyük etkiler yaratmaktadır, dolayısıyla sistemin bozuculara etkisinin giderilmesi, kontrolör tasarımıdaki temel amaçlardan biridir. Bozucu gözleyicileri (DO), etkili bir bozucu tahmin tekniği sağlar [111]. Bozucu gözleyicisi problemi çözmek için ETS sisteminde bozucu gözleyicileri kullanılmaktadır. Bozucu gözlemcisinin modelini elde etmek için denklem (6.99) ile gösterilen ETS genel transfer fonksiyonu kullanılır. Denklem (6.99)'de transfer fonksiyonu sağ tekerlek transfer fonksiyonudur. Sol tekerlek modelinin sağ tekerlekle aynı olduğu varsayılmıştır.

$$\begin{aligned}
 \frac{I(s)}{u(s)} &= \frac{\frac{K_{tr}}{L_{ar}s + R_{ar}}}{1 + \left(\frac{K_{tr}}{L_{ar}s + R_{ar}} \right) \left(\frac{J_{mr}s + B_{mr}}{(J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr}} \right) \left(\frac{K_{br}}{J_{mr}s + B_{mr}} \right)} \\
 &= \frac{\frac{K_{tr}}{L_{ar}s + R_{ar}}}{\frac{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr})}} \\
 &= \frac{K_{tr}((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr})}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})} \\
 &= \frac{(K_{tr}J_{mr}^2 + K_{tr}NJ_{aa}J_{mr})s^2 + (K_{tr}B_{mr}J_{mr} + K_{tr}J_{mr}B_{mr} + K_{tr}NJ_{aa}B_{mr})s + K_{tr}B_{mr}^2}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})} \\
 &= \frac{(K_{tr}J_{mr}^2 + K_{tr}NJ_{aa}J_{mr})s^2 + (K_{tr}B_{mr}J_{mr} + K_{tr}J_{mr}B_{mr} + K_{tr}NJ_{aa}B_{mr})s + K_{tr}B_{mr}^2}{(L_{ar}s + R_{ar})\{(J_{mr} + NJ_{aa}J_{mr})s^2 + (B_{mr}J_{mr} + J_{mr}B_{mr} + NJ_{aa}B_{mr})s + B_{mr}^2\} + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{I(s)}{u(s)} &= \frac{as^2 + bs + c}{ds^3 + es^2 + fs + g} \\
a &= K_{tr}J_{mr}^2 + K_{tr}NJ_{aa}J_{mr} \\
b &= K_{tr}B_{mr}J_{mr} + K_{tr}J_{mr}B_{mr} + K_{tr}NJ_{aa}B_{mr} \\
c &= K_{tr}B_{mr}^2 \\
d &= L_{ar}J_{mr}^2 + L_{ar}NJ_{aa}J_{mr} \\
e &= L_{ar}B_{mr}J_{mr} + L_{ar}J_{mr}B_{mr} + L_{ar}NJ_{aa}B_{mr} + R_{ar}J_{mr}^2 + R_{ar}NJ_{aa}J_{mr} \\
f &= L_{ar}B_{mr}^2 + R_{ar}B_{mr}J_{mr} + R_{ar}J_{mr}B_{mr} + R_{ar}NJ_{aa}B_{mr} + K_{br}K_{tr}J_{mr} \\
g &= R_{ar}B_{mr}^2 + K_{br}K_{tr}B_{mr}
\end{aligned} \tag{6.99}$$

Transfer fonksiyonu denklem (6.100)'de gösterildiği gibide yazılabilir

$$\begin{aligned}
\frac{I(s)}{u(s)} &= \frac{1}{\frac{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr})}} \\
&= \frac{(J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr}}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})} \\
&= \frac{(J_{mr}^2 + N J_{aa} J_{mr})s^2 + (B_{mr}J_{mr} + J_{mr}B_{mr} + N J_{aa}B_{mr})s + B_{mr}^2}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})} \\
&= \frac{(K_{tr}J_{mr}^2 + K_{tr}N J_{aa}J_{mr})s^2 + (K_{tr}B_{mr}J_{mr} + K_{tr}J_{mr}B_{mr} + K_{tr}N J_{aa}B_{mr})s + K_{tr}B_{mr}^2}{(L_{ar}s + R_{ar})\{(J_{mr}^2 + N J_{aa}J_{mr})s^2 + (B_{mr}J_{mr} + J_{mr}B_{mr} + N J_{aa}B_{mr})s + B_{mr}^2\} + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr})}
\end{aligned}$$

$$\frac{I(s)}{u(s)} = \frac{as^2 + bs + c}{ds^3 + es^2 + fs + g}$$

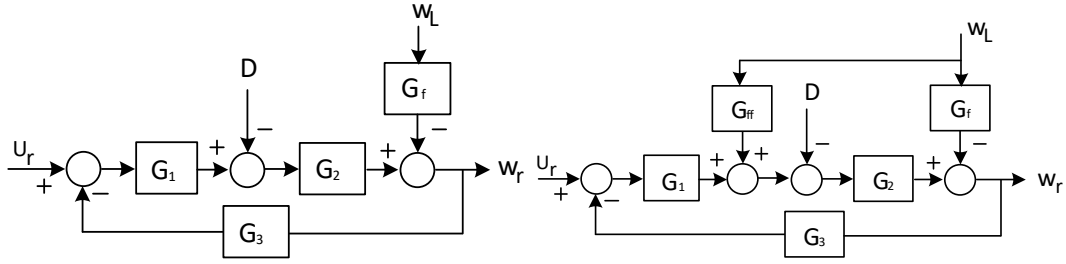
$$\begin{aligned}
a &= J_{mr}^2 + N J_{aa} J_{mr} \\
b &= B_{mr}J_{mr} + J_{mr}B_{mr} + N J_{aa}B_{mr} \\
c &= B_{mr}^2 \\
d &= L_{ar}J_{mr}^2 + L_{ar}N J_{aa} J_{mr}
\end{aligned} \tag{6.100}$$

$$e = L_{ar} B_{mr} J_{mr} + L_{ar} J_{mr} B_{mr} + L_{ar} N J_{aa} B_{mr} + R_{ar} J_{mr}^2 + R_{ar} N J_{aa} J_{mr}$$

$$f = L_{ar} B_{mr}^2 + R_{ar} B_{mr} J_{mr} + R_{ar} J_{mr} B_{mr} + R_{ar} N J_{aa} B_{mr} + K_{br} K_{tr} J_{mr}$$

$$g = R_{ar} B_{mr}^2 + K_{br} K_{tr} B_{mr}$$

Aşağıdaki genel formül takip edilerek bozucu gözlemcisi tasarlanmıştır.

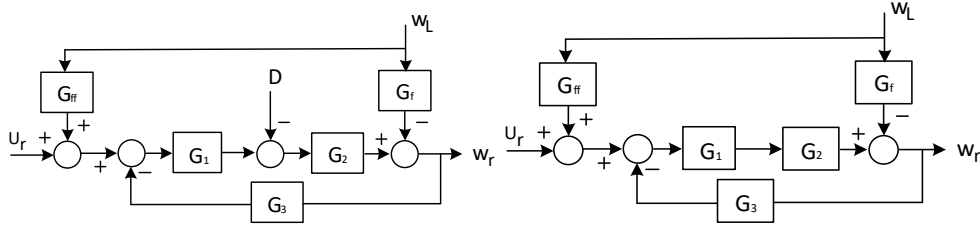


Şekil 6.6. Sağ tekerleğin transfer fonksiyonu blok diyagramı $D = 0$ ve $u_r = 0$

$$w_r = -w_L G_f + G_2 (w_L G_{ff} - G_1 G_3 w_r) \quad (6.101)$$

$$= -w_L G_f + w_L G_2 G_{ff} - G_1 G_2 G_3 w_r$$

$$\frac{w_r}{w_L} = \frac{-G_f + G_2 G_{ff}}{1 + G_1 G_2 G_3} \quad (6.102)$$



Şekil 6.7. Sağ tekerleğin transfer fonksiyonu blok diyagramı $D = 0$

$$w_r = -w_L G_f + G_1 G_2 (w_L G_{ff} - G_3 w_r) \quad (6.103)$$

$$= -G_f w_L + G_1 G_2 G_{ff} w_L - G_1 G_2 G_3 w_r$$

$$w_r (1 + G_1 G_2 G_3) = (G_1 G_2 G_{ff} - G_f) w_L$$

$$\frac{w_r}{w_L} = \frac{G_1 G_2 G_{ff} - G_f}{1 + G_1 G_2 G_3} \quad (6.104)$$

$$-G_f + G_1 G_2 G_{ff} = 0 \quad (6.105)$$

$$G_{ff} = \frac{G_f}{G_1 G_2} \quad (6.106)$$

$$G_f = \frac{J_{bb}S}{J_{mr}S + B_{mr}} \quad (6.107)$$

$$G_2 = \frac{1}{J_{mr}S + B_{mr}} \quad (6.108)$$

$$G_1 = \frac{K_{tr}}{L_{ar}S + R_{ar}} \quad (6.109)$$

$$G_3 = \frac{J_{mr}S + B_{mr}}{(J_{mr} + NJ_{aa})S + B_{mr}} \quad (6.110)$$

Şekil 6.7. ile gösterilen blok diyagramın transfer fonksiyonu denklem (6.111) ile gösterilmektedir.

$$G_{ff} = \frac{G_f}{G_1 G_2} = \frac{\frac{J_{bb}S}{J_{mr}S + B_{mr}}}{\frac{K_{tr}}{L_{ar}S + R_{ar}} \frac{1}{J_{mr}S + B_{mr}}}$$

$$G_{ff} = \frac{J_{bb}S}{J_{mr}S + B_{mr}} \frac{(L_{ar}S + R_{ar})(J_{mr}S + B_{mr})}{K_{tr}}$$

$$G_{ff} = \frac{J_{bb}S (L_{ar}S + R_{ar})}{K_{tr}}$$

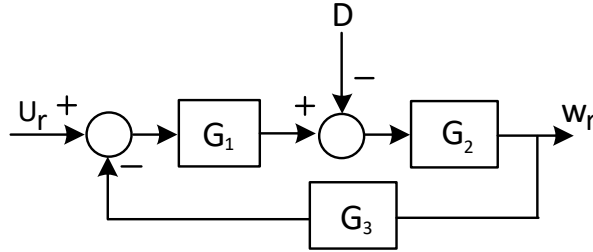
$$G_{ff} = \frac{J_{bb}L_{ar}S^2 + J_{bb}R_{ar}S}{K_{tr}}$$

$$G_{ff} = \frac{J_{bb}L_{ar}}{K_{tr}} \left\{ S^2 + \left(\frac{R_{ar}}{L_{ar}} \right) S \right\} \quad (6.111)$$

G_{ff} nin fiziksel gerçekleştirilmesi için, paydaya birim kazançlı 2. dereceden bir polinom eklenmelidir.

$$G_{ff} = \frac{\frac{J_{bb}L_{ar}}{K_{tr}} \left\{ S^2 + \left(\frac{R_{ar}}{L_{ar}} \right) S \right\} w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (6.112)$$

Gözlenecek bozucu \hat{D} ile ifade edilmektedir. Kontrol işareti u_i ile ve açısal hız w_i ile gösterilir, burada $i = r, L$ (burada i sağa yada sola ifade eder). Bir sonraki adım, gözleyici modelini Şekil 6.8. ve Şekil 6.9.'yu dikkate alarak elde etmektir.



Şekil 6.8. ETS Sağ Tekerlek Blok Şeması

Bozucu D , bazı adımları izleyerek bozucu gözleyici tarafından tahmin edilebilir. Sağ tekerleğin sol tekerlekle aynı olduğu farz edilmektedir. Şekil 6.8.'de sistem çıkışı denklem (6.113) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 w_r &= ((u_r - G_3 w_r) G_1 - D) G_2 \\
 &= (u_r - G_3 w_r) G_1 G_2 - D G_2 \\
 &= u_r G_1 G_2 - w_r G_1 G_2 G_3 - D G_2 \\
 w_r (1 + G_1 G_2 G_3) &= u_r G_1 G_2 - D G_2 \\
 w_r &= u_r \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 G_3} - D \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 G_3} \\
 (6.113)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_r (1 + G_1 G_2 G_3) &= u_r G_1 G_2 - D G_2 \\
 D G_2 &= u_r G_1 G_2 - w_r (1 + G_1 G_2 G_3) \\
 D &= u_r \frac{G_1 G_2}{G_2} - \frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} w_r
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{D} &= u_r G_1 - \frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} w_r \\
 (6.114)
 \end{aligned}$$

Açısal hız (w_r, w_L) ve kontrol işareti (u_r, u_L) bilindiğinden, \hat{D} 'i tahmin etmek için denklem (6.115) kullanılır.

$$\hat{D} = u_r G_1 - \frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} w_r \quad (6.115)$$

$$G_1 = \frac{K_{tr}}{L_{ar}s + R_{ar}} \quad (6.116)$$

$$\begin{aligned} G_2 &= \frac{1}{J_{mr}s + B_{mr}} \frac{NJ_{mr}s + NB_{mr}}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}} \\ &= \frac{N}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}} \end{aligned} \quad (6.117)$$

$$\begin{aligned} G_3 &= \frac{K_{br}J_{mr}s + K_{br}B_{mr}}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}} \frac{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}}{NJ_{mr}s + NB_{mr}} \\ &= \frac{K_{br}J_{mr}s + K_{br}B_{mr}}{NJ_{mr}s + NB_{mr}} \end{aligned} \quad (6.118)$$

Denklemlerin (6.116), (6.117) ve denklemin (6.118) $\frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2}$ 'de yerine koyulması

ile denklem (6.119) gösterilen sonuç elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} &= \frac{1 + \frac{K_{tr}}{L_{ar}s + R_{ar}} \frac{N}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}} \frac{K_{br}(J_{mr}s + K_{br}B_{mr})}{NJ_{mr}s + NB_{mr}}}{\frac{N}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}}} \\ &= \frac{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr})(NJ_{mr}s + NB_{mr}) + NK_{br}K_{tr}(J_{mr}s + B_{mr})}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr})(NJ_{mr}s + NB_{mr})} \\ &= \frac{N}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr})(NJ_{mr}s + NB_{mr}) + NK_{br}K_{tr}(J_{mr}s + B_{mr})}{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr})(NJ_{mr}s + NB_{mr})} \\
&= \frac{N}{(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr}} \\
&= \frac{(L_{ar}s + R_{ar})((J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr})(NJ_{mr}s + NB_{mr}) + NK_{br}K_{tr}(J_{mr}s + B_{mr})}{N(L_{ar}s + R_{ar})(NJ_{mr}s + NB_{mr})} \quad (6.119)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (L_{ar}s + R_{ar})(J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr}) \\
& N(L_{ar}s + R_{ar})(NJ_{mr}s + NB_{mr}) = N^2L_{ar}J_{mr}s^2 + N^2L_{ar}B_{mr}s + N^2R_{ar}J_{mr}s + N^2R_{ar}B_{mr} \\
& = N^2L_{ar}J_{mr}s^2 + (N^2L_{ar}B_{mr} + N^2R_{ar}J_{mr})s + N^2R_{ar}B_{mr}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1 + G_1G_2G_3}{G_2} &= \frac{ds^3 + es^2 + fs + g}{N(L_{ar}s + R_{ar})(NJ_{mr}s + NB_{mr})} \\
\frac{1+G_1G_2G_3}{G_2} &= \frac{ds^3+es^2+fs+g}{N^2L_{ar}J_{mr}s^2+(N^2L_{ar}B_{mr}+N^2R_{ar}J_{mr})s+N^2R_{ar}B_{mr}} \quad (6.120)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& N(L_{ar}s + R_{ar})(J_{mr} + NJ_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + NK_{br}K_{tr}(J_{mr}s + B_{mr}) \\
& (L_{ar}s + R_{ar})(J_{mr} + N * J_{aa})s + B_{mr})(J_{mr}s + B_{mr}) + K_{tr}K_{br}(J_{mr}s + B_{mr}) \\
& (L_{ar}J_{mr}^2 + L_{ar} N J_{aa} J_{mr})s^3 + (L_{ar} B_{mr}J_{mr} + L_{ar} J_{mr}B_{mr} + L_{ar} N J_{aa}B_{mr})s^2 + L_{ar} B_{mr}^2s \\
& (R_{ar}J_{mr}^2 + R_{ar} N J_{aa} J_{mr})s^2 + (R_{ar} B_{mr}J_{mr} + R_{ar} J_{mr}B_{mr} + R_{ar} N J_{aa}B_{mr})s + R_{ar} B_{mr}^2 \\
& K_{br}K_{tr}J_{mr}s + K_{br}K_{tr}B_{mr} \\
& ds^3 + es^2 + fs + g \\
& (L_{ar}J_{mr}^2 + L_{ar} N J_{aa} J_{mr})s^3 + (L_{ar} B_{mr}J_{mr} + L_{ar} J_{mr}B_{mr} + L_{ar} N J_{aa}B_{mr})s^2 + L_{ar} B_{mr}^2s \\
& (R_{ar}J_{mr}^2 + R_{ar} N J_{aa} J_{mr})s^2 + (R_{ar} B_{mr}J_{mr} + R_{ar} J_{mr}B_{mr} + R_{ar} N J_{aa}B_{mr})s + R_{ar} B_{mr}^2 \\
& K_{br}K_{tr}J_{mr}s + K_{br}K_{tr}B_{mr} \\
& d1s^3 + e1s^2 + f1s + g1
\end{aligned}$$

Pay

$$d1 = N(L_{ar}J_{mr}^2 + L_{ar} N J_{aa} J_{mr})$$

$$e1 = N(L_{ar} B_{mr}J_{mr} + L_{ar} J_{mr}B_{mr} + L_{ar} N J_{aa}B_{mr} + R_{ar}J_{mr}^2 + R_{ar} N J_{aa} J_{mr})$$

$$f1 = N(L_{ar} B_{mr}^2 + R_{ar} B_{mr}J_{mr} + R_{ar} J_{mr}B_{mr} + R_{ar} N J_{aa}B_{mr} + K_{br}K_{tr}J_{mr})$$

$$g1 = N(R_{ar} B_{mr}^2 + K_{br}K_{tr}B_{mr})$$

Payda

$$N^2 L_{ar} J_{mr} s^2 + (N^2 L_{ar} B_{mr} + N^2 R_{ar} J_{mr}) s + N^2 R_{ar} B_{mr}$$

$$h = N^2 L_{ar} J_{mr}$$

$$k = (N^2 L_{ar} B_{mr} + N^2 R_{ar} J_{mr})$$

$$m = N^2 R_{ar} B_{mr}$$

$$\frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} = \frac{d s^3 + e s^2 + f s + g}{h s^2 + k s + m} \quad (6.121)$$

denklemden (6.121) basitleştirilerek denklemi (6.122) yazılabilir.

$$\frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} = \frac{d s^3 + e s^2 + f s + g}{h s^2 + k s + m} \quad (6.122)$$

$$d = (L_{ar} J_{mr}^2 + L_{ar} N J_{aa} J_{mr}) s^3$$

$$e = (L_{ar} B_{mr} J_{mr} + L_{ar} J_{mr} B_{mr} + L_{ar} N J_{aa} B_{mr} + R_{ar} J_{mr}^2 + R_{ar} N J_{aa} J_{mr}) s^2$$

$$f = (L_{ar} B_{mr}^2 + R_{ar} B_{mr} J_{mr} + R_{ar} J_{mr} B_{mr} + R_{ar} N J_{aa} B_{mr} + K_{br} K_{tr} J_{mr}) s$$

$$g = (R_{ar} B_{mr}^2 + K_{br} K_{tr} B_{mr})$$

$$h = N^2 L_{ar} J_{mr} s^2$$

$$k = (N^2 L_{ar} B_{mr} + N^2 R_{ar} J_{mr})$$

$$m = N^2 R_{ar} B_{mr}$$

Daha sonra denklem (6.121) kullanılarak, bozucu D denklemi (6.123), (6.124) ve denklem (6.125) ile yazılabilir.

$$\hat{D} = u_r G_1 - \frac{1 + G_1 G_2 G_3}{G_2} w_r \quad (6.123)$$

$$\hat{D} = u_r \frac{K_{tr}}{L_{ar} s + R_{ar}} - \frac{d s^3 + e s^2 + f s + g}{h s^2 + k s + m} w_r \quad (6.124)$$

$$\hat{D} = \left(\frac{K_{tr}}{L_{ar}s + R_{ar}} \right) u_r - \left(\frac{ds^3 + es^2 + fs + g}{hs^2 + ks + m} \right) w_r \quad (6.125)$$

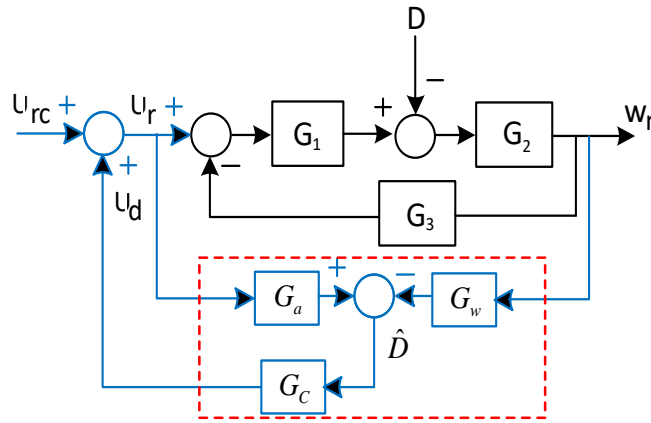
Denklem (6.125) verilen transfer fonksiyonu nedensel değildir. Gerçekleştirilebilir hale gelmek için DO_{filter} filtresi eklenmelidir ve ekleme yapılmış eşitlik denklem (6.126) ile verilmiştir.

$$\hat{D} = \left(\frac{K_{tr}}{\underbrace{L_{ar}s + R_{ar}}_{G_a}} \right) u_r - \left(\frac{(ds^3 + es^2 + fs + g) * OFilter}{\underbrace{(hs^2 + ks + m)(s + OFilter)}_{G_w}} \right) w_r \quad (6.126)$$

$$(hs^2 + ks + m)(s + FilTer) = hs^3 + (k + FilTer * h)s^2 + (m + FilTer * k)s + FilTer * m$$

$$\hat{D} = G_a u_r - G_w w_r \quad (6.127)$$

Şekil 6.8.'deki blok diyagrama, bozulma gözlemcisi eklenerek Şekil 6.9.'da gösterilmiştir..



Şekil 6.9. Bozucu Gözlemci Blok Şeması

O_{filter} , tek tasarım parametresidir. O_{filter} , cevap üzerindeki filtre etkisinin \hat{D} minimum olacak şekilde seçilebilir. \hat{D} kullanılarak bozucu etkisini gidermek için G_c kontrolör Şekil 6.6.'da gösterildiği gibi eklenmelidir. Bozucu \hat{D} tahmin edilerek akım, bozucu etkiyi ortadan kaldıracak şekilde denklem (6.128)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\hat{D} = K_{tr} i(t) \quad (6.128)$$

Akım eşitliği model kullanılarak elde edilmiştir.

$$i(t) = \frac{u_d + u_{rc} - K_{br} w_r}{L_{ar} s + R_{ar}} \quad (6.129)$$

Gözleyicili DC makine tarafından üretilen elektrik momenti denklem (6.130) ile verilmektedir.

$$T_{et} = K_{tr} i(t) = T_e + \hat{D} \quad (6.130)$$

$$T_e + \hat{D} = K_{tr} \frac{u_d + u_{rc} - K_{br} w_r}{L_{ar} s + R_{ar}}$$

$$T_e + \hat{D} = K_{tr} \frac{u_{rc} - K_{br} w_r}{L_{ar} s + R_{ar}} + K_{tr} \frac{u_d}{L_{ar} s + R_{ar}} \quad (6.131)$$

$$\hat{D} = K_{tr} \frac{u_d}{L_{ar} s + R_{ar}} \quad (6.132)$$

Denklemin (6.133) yeniden düzenlenmesi, ETS'nin hızındaki bozulma etkisini ortadan kaldırmak için akımı üretmek üzere bilinmeyen kontrol sinyali u_d elde edilir.

$$u_d = \frac{\hat{D}}{K_{tr}} (L_{ar} s + R_{ar}) \quad (6.133)$$

Denklem (6.133) verilen transfer fonksiyonu nedensel değildir. Gerçekleştirilebilir hale gelmek için CO_{filter} filtresi eklenmelidir ve ekleme yapılmış eşitlik denklem (6.134) ile verilmiştir.

$$u_d = \hat{D} \frac{C_{Filter} L_{ar} s + R_{ar}}{\underbrace{K_{tr} s + C_{Filter}}_{G_c}} \quad (6.134)$$

CO_{filter} tasarımcı tarafından küçük zaman sabiti ile seçilir.

BÖLÜM 7. ELEKTRİKLİ TEKERLEKLİ SANDALYE (ETS) BENZETİM ÇALIŞMALARI

ETS sistem denetiminde kullanan kontrol yöntemleri uygulamalarına ait benzetim çalışmaları üç bölümde sunulacaktır. Birinci bölüm, ETS'nin ayrık zamanda durum-uzay modeli doğrulaması, durum değişken kestirimi için Luenberger gözleyici tasarımı ve benzetim sonuçlarından oluşmaktadır. İkinci bölüm, ETS'nin kısıtlı ve kısıtsız koşullarda MÖK ve BGDMÖK kontrol yöntemlerine göre performansını inceleyen iki alt bölümden halindedir. Üçüncü bölümde ise, ETS'ye ait Matlab simulink donanım modelinin matematik model doğrulama benzetim çalışması yapılmaktadır. Tüm benzetim çalışmaları MATLAB / Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

7.1. Durum Uzay Modeli ve Gözleyici

ETS'nin sürekli zaman durum uzay modeli kullanarak seçilen örnekleme zamanına göre ayrık zaman durum denklemi elde edilir. Bu denklemler kullanarak Luenberger gözleyici tasarlanır. Durum uzay model doğrulaması transfer fonksiyon bloklarından oluşan model ile kıyaslanarak doğrulanır.

7.1.1. Durum uzay model doğrulama

Denklem (7.1) ve (7.2), ETS'nin sürekli zaman durumu uzay matematik modelidir. Bu durum uzay modeli daha önce denklem (4.100) ve denklem (4.101) olarak tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} \frac{dw_{mr}(t)}{dt} \\ \frac{di_{ar}(t)}{dt} \\ \frac{dw_{mL}(t)}{dt} \\ \frac{di_{aL}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -J_{rr}B_{mr} & K_{tr}J_{rr} & -J_{rL}B_{mL} & K_{tL}J_{rL} \\ -\frac{K_{br}}{L_{ar}} & -\frac{R_{ar}}{L_{ar}} & 0 & 0 \\ -J_{Lr}B_{mL} & K_{tr}J_{Lr} & -J_{LL}B_{mL} & K_{tL}J_{LL} \\ 0 & 0 & -\frac{K_{bL}}{L_{aL}} & -\frac{R_{aL}}{L_{aL}} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{ar}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{aL}} \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_{ar}(t) \\ u_{aL}(t) \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} -NJ_{rr} & NJ_{rL} \\ 0 & 0 \\ NJ_{Lr} & NJ_{LL} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_W \begin{bmatrix} T_{Loadr}(t) \\ T_{loadL}(t) \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Çıkış matrisi “C” denklem (7.2).’de verilmiştir

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} w_{mr}(t) \\ i_{ar}(t) \\ w_{mL}(t) \\ i_{aL}(t) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Seçilen T örnekleme zamanı ve

$$G = e^{At} \Big|_{t=T} \quad (7.3)$$

$$H = \left(\int_{\tau=0}^T e^{A\tau} d\tau \right) B \quad (7.4)$$

ifadeleri kullanılarak ayrık zaman durum denklemleri

$$x[k+1] = Gx[k] + Hu[k] \quad (7.5)$$

$$y[k] = C_d x[k] \quad (7.6)$$

formunda elde edilir.

Doğrulama çalışmalarında kullanılan parametreler Tablo 7.1.’de verilmiştir.

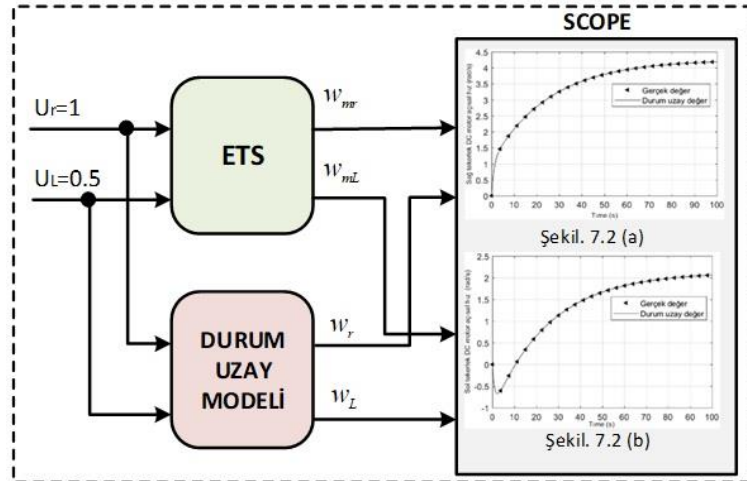
Tablo 7.1. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler

Sembol	Değer	Birim	Açıklama
m	90	[kg]	Tekerlekli sandalye gövdesinin toplam kütlesi ve kişi
R_1	0.305	[m]	Arka tekerleklerin yarıçapı
J_w	0.017	[Kg.m ²]	Arka tekerleklerin atalet momenti
J	0.23	[Kg.m ²]	Tekerlekli sandalye arka tekerlek ataleti
L	0.53	[m]	Arka tekerlekler ve ön tekerlek arasındaki uzaklık
L_a	0.0016	[H]	DC motor endüktansı
R_a	0.34	[Ω]	DC motor direnci rezistans
Kt	0.17	[N m/A]	DC motorun tork sabiti
Kb	0.17	[V.s/rad]	DC motorun zıt elektromotor kuvvet sabiti
N	0.724		Dışlı oranı
Bm	0	[N.m.s]	Motor viskoz sürtünme sabiti
Jm	0.0011	[Kg.m ²]	Rotor ataleti
T	0.00094	ms	Örnekleme zamanı

Tablo 7.1.'deki parametreler kullanılarak G ve H matrisleri hesaplanmıştır ve aşağıda verilmiştir.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0.0008 & 0 & -0.0008 \\ -0.0906 & 0.8187 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0008 & 1 & 0.0008 \\ 0 & 0 & -0.0906 & 0.8187 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0.0003 & -0.0002 \\ 0.533 & 0 \\ -0.0002 & 0.0003 \\ 0 & 0.533 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Şekil 4.5.'te verilen ETS'nin transfer fonksiyon blok modeli ile ayrık zaman durum uzay modelinin karşılaştırması ve doğrulaması için benzetim blok seması Şekil 7.1.'de verilmiştir.



Şekil 7.1. Durum Uzayı Doğrulama için Benzetim Çalışmaları

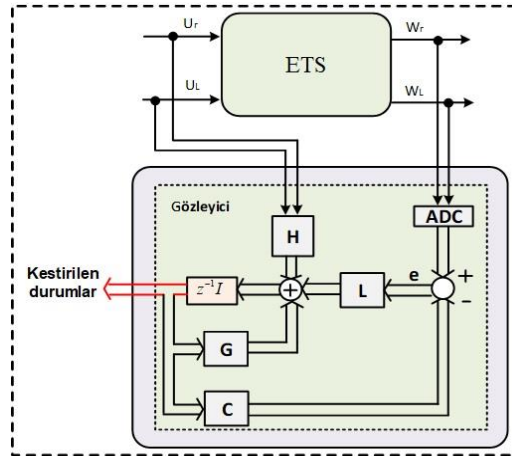
Bu çalışmanın sonuçları Şekil 7.2 (a) – 7.2 (b) verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere her iki matematik model aynı referans girişler için cevap çıkış eğirileri bire bir örtüşmektedir. Bu sonuçlar ile, bundan sonraki tüm modellerle dayalı kontrol yöntemlerinde kullanacak olan ayrık zaman durum uzay modelinin doğrulaması yapılmıştır.

7.1.2. Gözleyici tasarımı ve benzetim

Bu benzetim çalışmasında doğrulanan ayrık zaman durum uzay modeli kullanarak ölçülen çıkış büyüklüklerinden ETS'nin iç durum değişkenleri DC motor akımı (i_{ar}, i_{aL}) ve DC motor açısal hız (w_{mr}, w_{mL}) kestirilecektir. Bu çalışmada tasarlanmış Luenberger gözleyici çıktıları ile simulink ETS model çıktıları karşılaştırılarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Tasarlanan gözleyici katsayıları aşağıda verilmiştir.

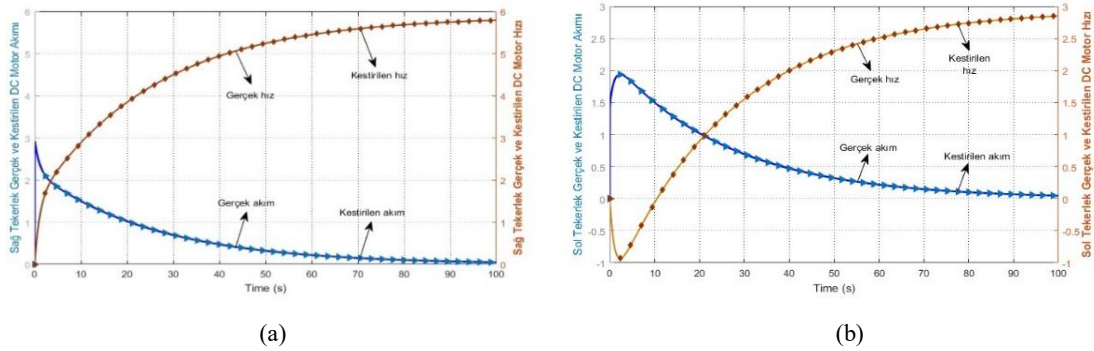
$$L = \begin{bmatrix} 0.002 & 0 \\ 0.427 & 4.08 \\ 0 & 0.002 \\ 4.08 & 4.427 \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

ETS için Luenberger gözleyici blok şeması Şekil 7.3.'te verilmiştir



Şekil 7.3. Gözleyici Benzetim Blok Diyagram

Luenberger gözleyici çıktıları ile simulink ETS model çıktıları aynı grafik üzerinde karşılaştırma amaçlı aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.4. Sağ ve Sol Gerçek ve Kestirilen DC Motor Akım ve Hız (a) $U_r = 1$ Sağ Tekerlek (b) $U_L = 0.5$ Sol Tekerlek

Sonuçlardan görüleceği üzere ETS'nin iç durum değişkenleri model doğrulanması yapılan ayrık zaman durum denklemleri ile tasarlanan gözleyici kullanarak doğru bir şekilde kestirildiği gösterilmiştir.

7.2. ETS MÖK Benzetim Çalışmaları

Bu benzetim çalışması için kullanılan parametreler Tablo 7.2.'de verilmiştir. Bu parametreler ayrıca bozucu gözleyici destekli model öngörülü kontrol (BGDMÖK) ve donanım model doğrulaması için kullanılacaktır. BGDMÖK, ETS sürüşü sırasında meydana gelen belirsiz çevresel etkiyi ortadan kaldırmak için kullanılır.

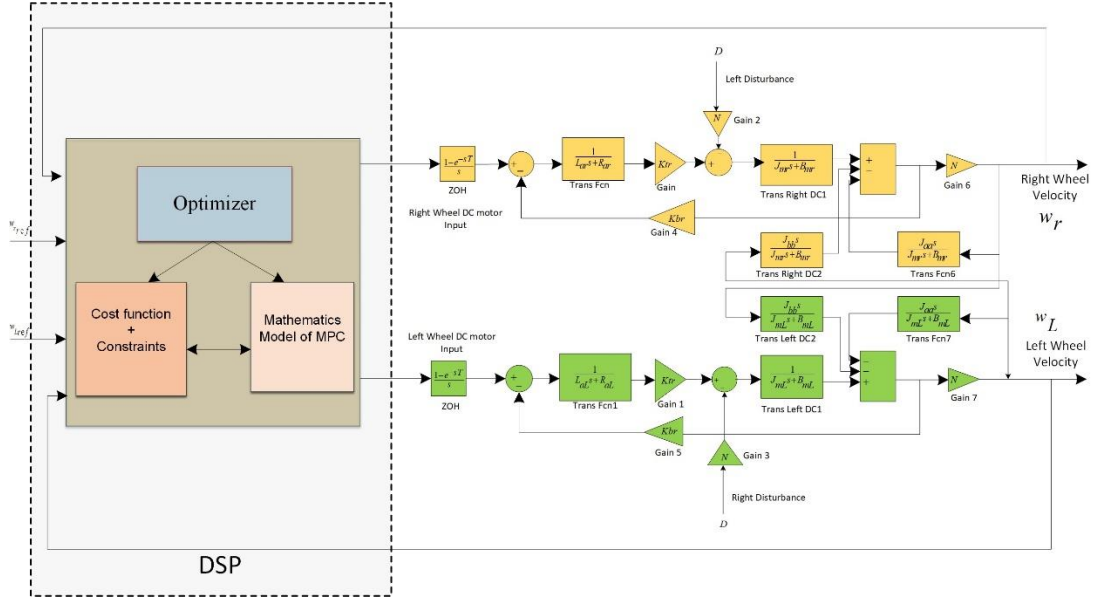
Genellikle ETS çalışırken aşağıdaki gibi çeşitli çevresel bozucular oluşur:

- Sürtünme; Bir yüzey veya nesnenin diğeri üzerinde hareket ederken karşılaştığı direnç.
- Eğim; bir yüzeyin veya çizginin yatay veya dikey bir çizgiden eğimli olması; yukarı ya da aşağı eğimli.
- Engel; ilerlemeyi engelleyen veya engelleyen bir nesne, eylem veya durum.
- Çarpışma; iki veya daha fazla cismin nispeten kısa bir süre boyunca birbirlerine kuvvet uyguladığı bir olay ya da bir diğesine karşı şiddetli bir şekilde çarpışan bir hareket eden nesnenin veya bir kişinin bir örneği.

Tablo 7.2. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler

Sembol	Değer	Birim	Açıklama
m	84,16	[kg]	Tekerlekli sandalye gövdesinin toplam kütlesi ve kişi
R_1	0,305	[m]	Arka tekerleklerin yarıçapı
J_w	0,0096	[Kg.m ²]	Arka tekerleklerin atalet momenti
B_w	3	[kg.m ² /s]	Her bir tekerleğin sürtünme katsayısı
W	0,4	[m]	Tekerlekli sandalye arka tekerlekleri arasındaki uzunluk
J	13,46	[kg.m ²]	Tekerlekli sandalye arka tekerlek ataleti
L_a	0,00101	[H]	DC motor endüktansı
R_a	0,25	[Ω]	DC motor direnci rezistans
K_t	0,53	[N m/A]	DC motorun tork sabiti
K_b	0,53	[V.s/rad]	DC motorun zıt elektromotor kuvvet sabiti
N	0,2		Dışlı oranı
B_m	0,02	[N.m.s]	Motor viskoz sürtünme sabiti
J_m	0,0011	[Kg.m ²]	Rotor ataleti
T	0,000202	ms	Örnekleme zamanı

MÖK benzetim çalışmasında sırasıyla kontrol ufku $N_c = 3$ ve öngörü ufku $N_p = 5$ uzunluğunda alınmıştır. ETS 'nin MÖK benzetim çalışması için kullanan tüm sisteme ait Matlab simulink model şekil 7.5.'te verilmiştir.

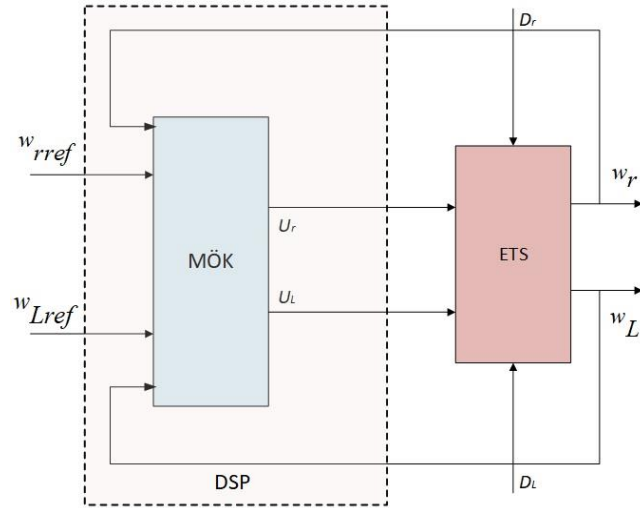


Şekil. 7.5. ETS'nin MÖK blok diyagramı

ETS'nin DSP olarak gösterilen MÖK kontrol bloğundaki önemli kısımlar optimizör, MÖK matematik modeli, maliyet fonksiyonu ve kısıtlardan oluşmaktadır. MIMO sistem ETS'nin transfer fonksiyon modeli sağ ve sol teker için farklı renklerde bozucu girişleri ile gösterilmiştir. Şekil 7.5.'te gösterildiği gibi, MÖK tarafından üretilen ayrık zaman sayısal kontrol işaretini sürekli zaman güç işaretine dönüştürmek için kullanılan PWM modülü ve güç dönüştürücü modeli sıfırıncı mertebeden tutucu (zero order hold, ZOH) olarak verilmiştir.

7.2.1. MÖK benzetim çalışması

İlk benzetim çalışması, bozucu gözleyici (BG) destekli olmayan MÖK'dür. Şekil 7.6.'da MÖK ve ETS'nin basitleştirilmiş blok diyagramı gösterilmektedir. Referans açısal hızlar MÖK kontrol bloğuna girdi olarak gelirler ve MÖK çıkışlarını ise ETS'ye giriş olarak kullanılan kontrol sinyalleridir. ETS'nin sağ ve sol teker çevresel bozucu etkileri için modele uygun olarak D_r ve D_l girişleri kullanılmaktadır.

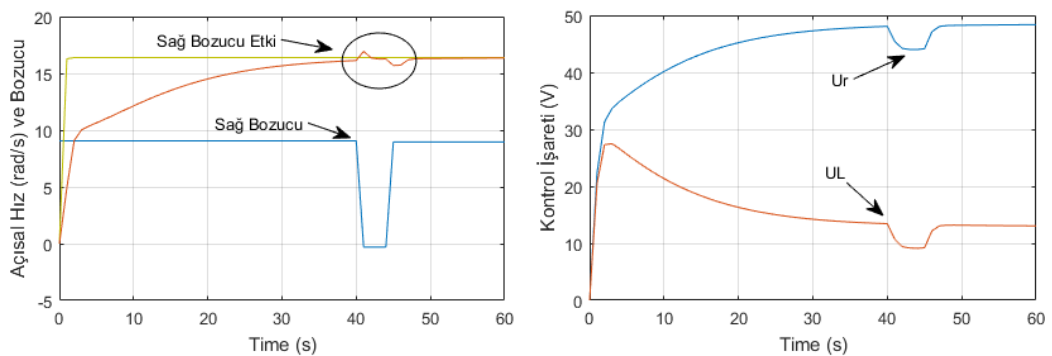


Şekil 7.6. Bozucu gözlemcisi olmayan MÖK

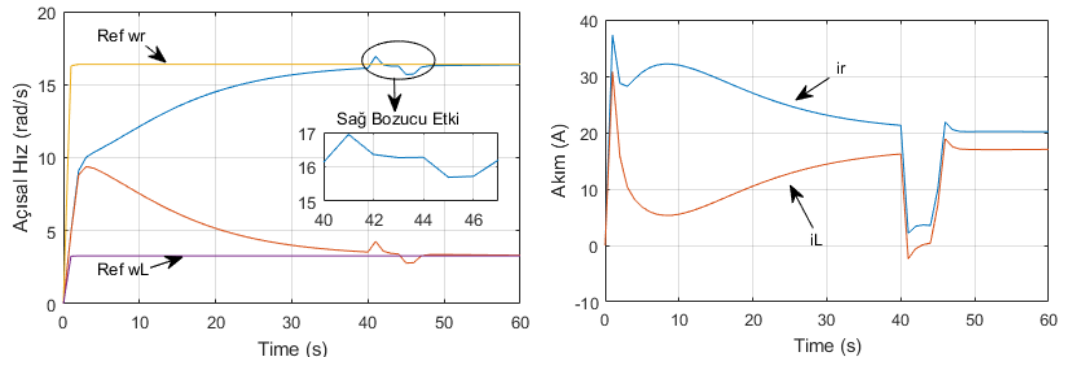
7.2.1.1. Kısıtsız MÖK benzetim

Bu benzetim çalışmasında kullanıcının joystick aracılığı ile ETS'nin doğrusal hızını $VL = 3$ m/sn ve referans açısını $Wteta = 10$ rad. olarak verdiği kabul edilmiştir. Bu değerler kullanılarak sağ tekerlek referans açısal hızı $= 0.8$ rad /s, sol tekerlek referans açısal hızı $= 0.5$ rad/s olarak kinematik hesap bloğu ile elde edilir.

Bu bölümdeki benzetim çalışmaları, kısıt olmaksızın ve bozucu gözlemci desteksiz MÖK için yapılmıştır. Şekil 7.7.'de verilmiş olan benzetim çalışmasında ETS'de sadece sağ tekerleğe bozucu giriş uygulanmıştır.



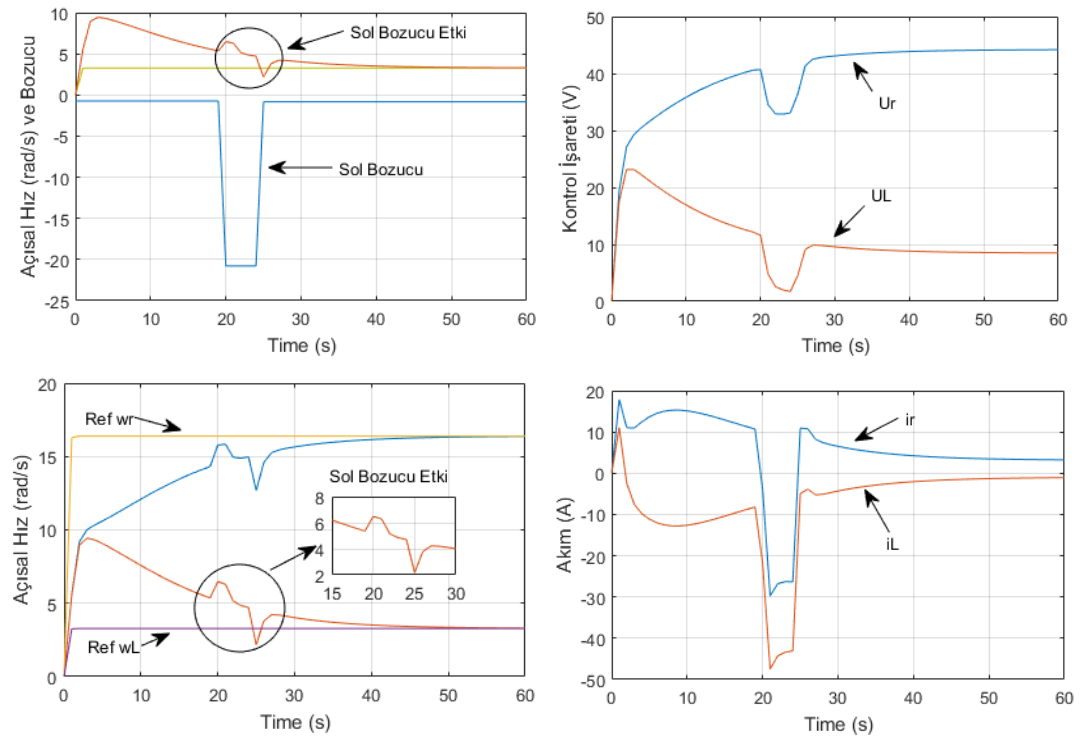
Şekil 7.7. Kısıtsız MÖK için sağ teker bozucu giriş.



Şekil 7.7. (Devami)

Sağ tekerde bozucu giriş 40. saniyeden 47. saniyeye kadar sürmüştür. ETS kublajlı MIMO sistem olduğundan, benzetim sonucunda Şekil 7.7. sağ teker açışal hızının bozulmasının yanında sol teker açışal hızında bozulduğunu göstermektedir.

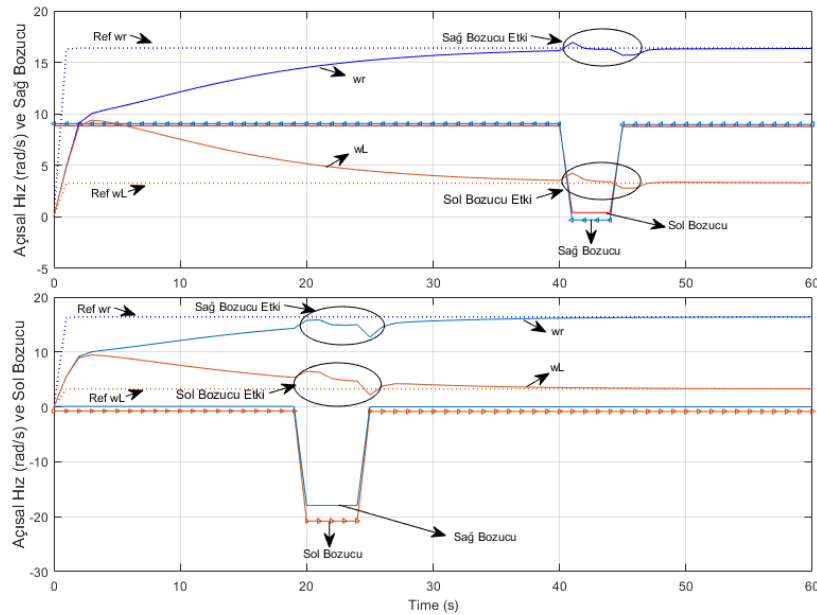
İkinci benzetim çalışması Şekil 7.8.'de verilmiştir. ETS sürüşünün 18. saniyesi ile 30. saniyesi arasında sadece sol tekerde bozucu etki uygulanmıştır.



Şekil 7.8. Kısıtsız MÖK için sol teker bozucu giriş.

Bezer şekilde yine ETS'nin kublajlı MIMO sistem olmasından dolayı, benzetim sonucunda Şekil 7.8. sol teker açısai hızının bozulmasının yanında sağ teker açısai hızında bozulduğu görülmektedir.

Şekil 7.7. ve Şekil 7.8.'de bozucu etkilere karşı ayrı ayrı verilmiş olan ETS cevapları karşılaştırılma amacı ile aynı şekil üzerinde Şekil 7.9.'da verilmiştir.



Şekil 7.9. Kısıtsız MÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş.

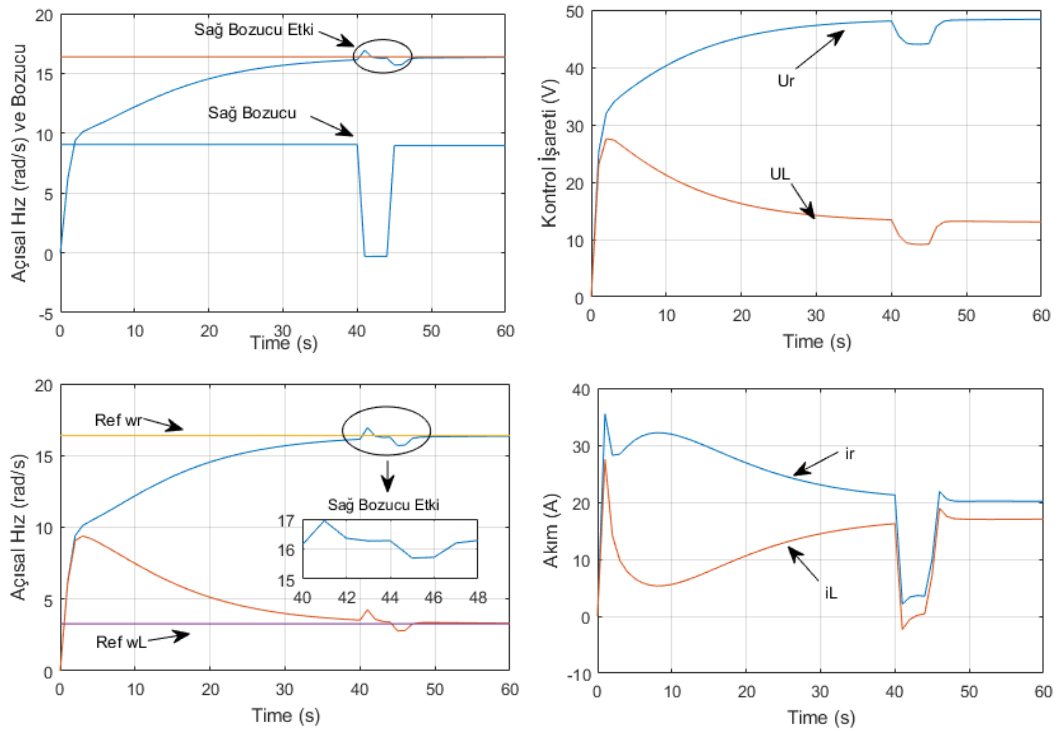
Şekil 7.9.'da karşılaştırılmalı olarak verilmiş olan benzetim sonuçları, her bir tekerleğe ayrı ayrı farklı zamanlarda uygulanan bozucu etkilerin hem uygulanan teker hemde kublajdan dolayı diğer teker açısai hızında oluşan olumsuz etkiyi MÖK kontrolörün giderdiği ve kullanıcının joystick ile vermiş olduğu referans açısai hızları ETS'nin takip ettiği görülmektedir.

7.2.1.2. Kısıtlı MÖK benzetim

Benzetim çalışmasında yine kullanıcının joystick aracılığı ile ETS'nin doğrusal hızını $V_L = 3 \text{ m/sn}$ ve referans açısını ise $W_{teta} = 10 \text{ rad.}$ olarak verdiği kabul edilmiştir. Bu değerler kullanılarak sağ tekerlek referans açısai hızı $= 0.8 \text{ rad/s}$, sol tekerlek referans açısai hızı $= 0.5 \text{ rad/s}$ olarak kinematik hesap bloğu ile elde edilir.

Bu bölümdeki benzetim çalışmaları, kısıtlı ve bozucu gözlemci desteksiz MÖK için yapılmıştır. Fiziksel kısıtlar için kontrol işareti $-20 \text{ V} \leq u \leq 20 \text{ V}$ ve her bir tekerleğin açısal hızı $-75 \text{ rad/s} \leq \dot{\theta} \leq 75 \text{ rad/s}$ arasında gerçeğe uygun olarak alınmıştır.

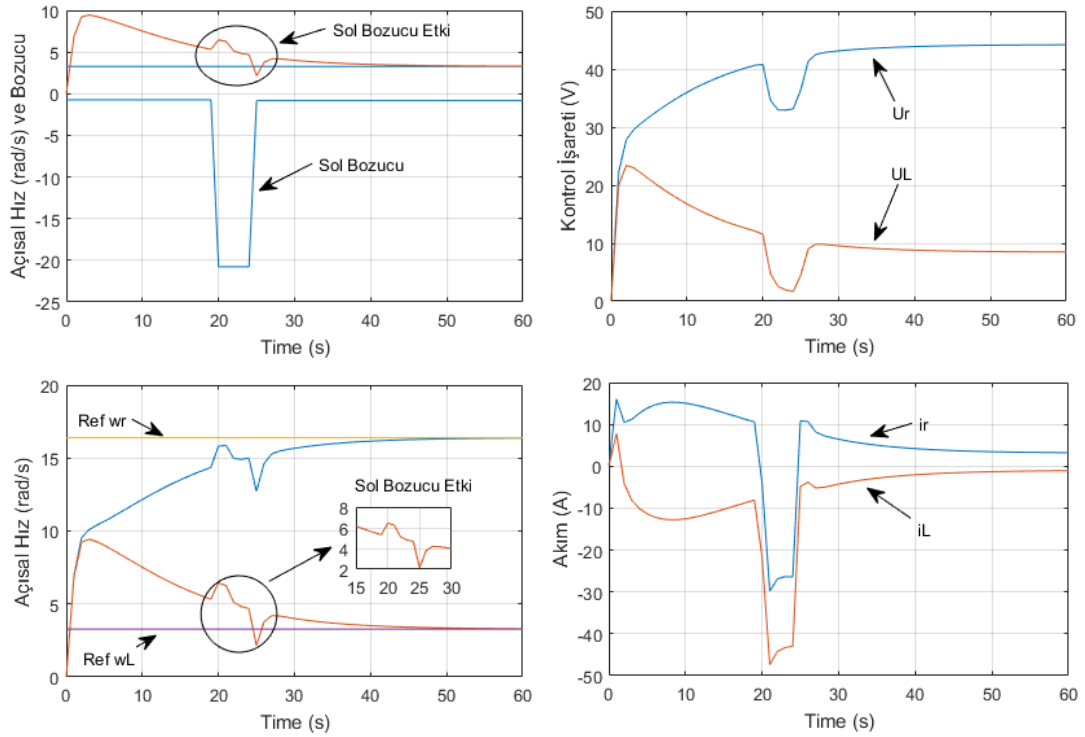
Şekil 7.10.'da verilmiş olan benzetim çalışmasında ETS'de sadece sağ tekerleğe bozucu giriş uygulanmıştır.



Şekil 7.10. Kısıtlı MÖK için sağ teker bozucu giriş.

Sağ tekerde bozucu giriş 40. saniyeden 48. saniyeye kadar sürmüştür. ETS kublajlı MIMO sistem olduğundan, benzetim sonucunda Şekil 7.10. sağ teker açısal hızının bozulmasının yanında sol teker açısal hızında bozulduğunu göstermektedir.

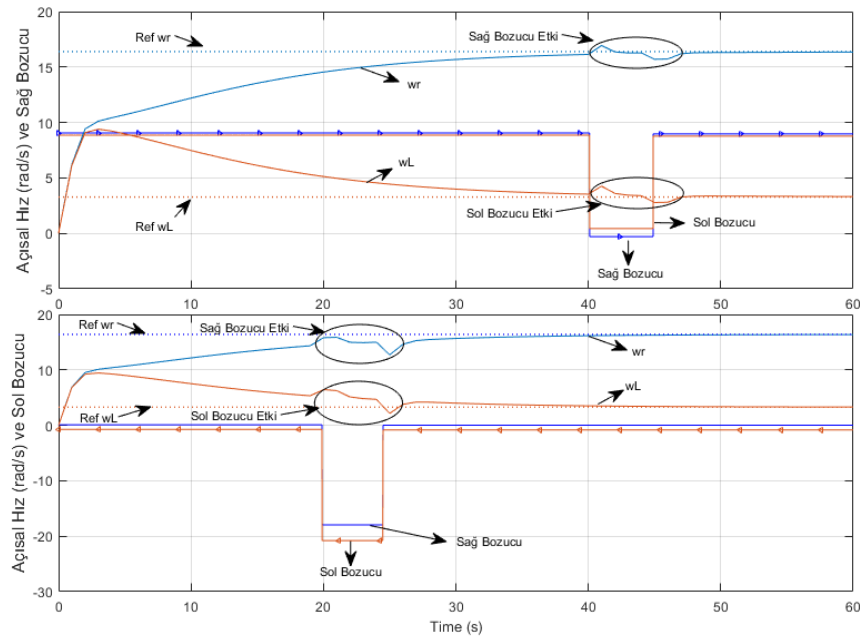
İkinci benzetim çalışması Şekil 7.11.'de verilmiştir. ETS sürüşünün 18. saniyesi ile 30. saniyesi arasında sadece sol tekerde bozucu etki uygulanmıştır.



Şekil 7.11. Kısıtsız MÖK için sol teker bozucu giriş.

Bezer şekilde yine ETS'nin kublajlı MIMO sistem olmasından dolayı, benzetim sonucunda Şekil 7.11. sol teker açısal hızının bozulmasının yanında sağ teker açısal hızında bozulduğu görülmektedir.

Şekil 7.10. ve Şekil 7.11.'de bozucu etkilere karşı ayrı ayrı verilmiş olan ETS cevapları karşılaştırılma amacı ile aynı şekil üzerinde Şekil 7.12.'de verilmiştir.



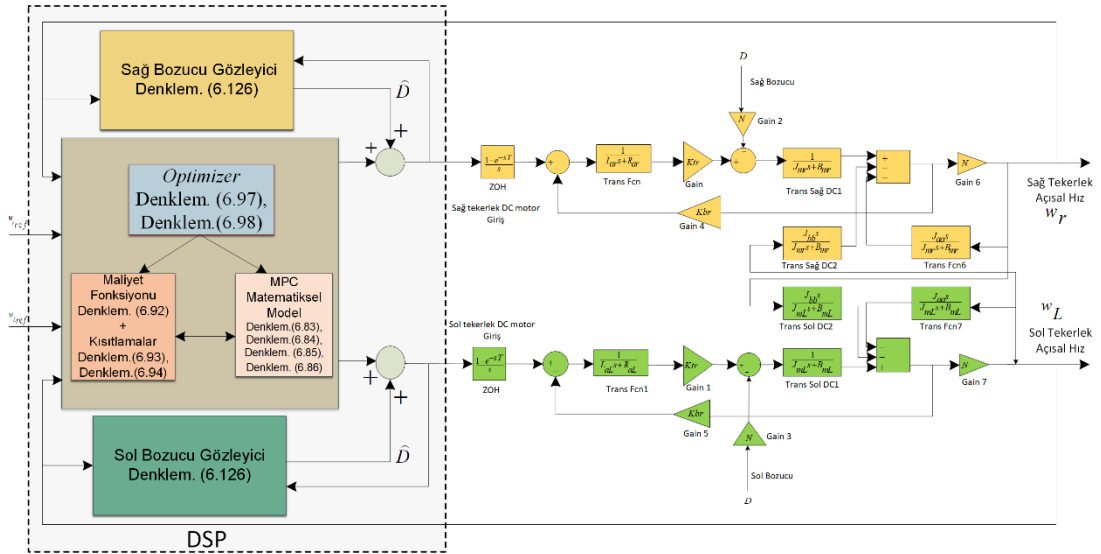
Şekil 7.12. Kısıtlı MÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş

Şekil 7.12.'de karşılaştırılmalı olarak verilmiş olan benzetim sonuçları, her bir tekerleğe ayrı ayrı farklı zamanlarda uygulanan bozucu etkilerin hem uygulanan teker hemde kublajdan dolayı diğer teker açısız hızında oluşan olumsuz etkiyi kısıtlı MÖK kontrolörün giderdiği ve kullanıcının joystick ile vermiş olduğu referans açısız hızları ETS'nin takip ettiği görülmektedir.

7.2.2. Bozucu Gözleyicili MÖK benzetim

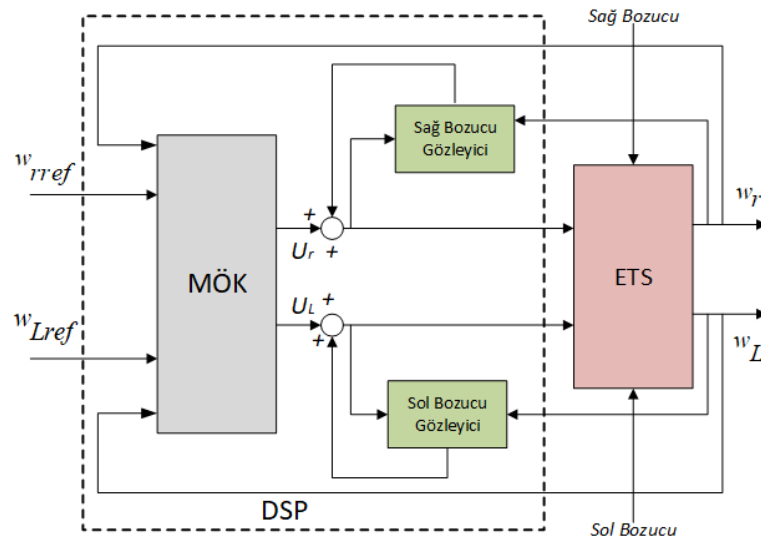
ETS kontrol sisteminde, kısaca BGDMÖK olarak adlandırılan, klasik MÖK kontrolörün ürettiği kontrol işaretine destek amaçlı tasarlanan bozucu gözleyici kontrolörün bozucu girişlere karşı ETS performansına olan etkileri incelenecektir. Bozucu gözlemcinin amacı, ETS sürüşü sırasında meydana gelen belirsiz çevresel etkiyi algılamak, etkisini gidermeye katkıda bulunmak ve MÖK'ün performansını arttırmaktır.

BGDMÖK benzetim çalışmasında sırasıyla kontrol ufku $N_c = 3$ ve öngörü ufku $N_p = 5$ uzunluğunda alınmıştır. ETS'nin BGDMÖK benzetim çalışması için kullanan tüm sisteme ait Matlab simulink model Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7.13. ETS'nin BGDMÖK blok diyagramı

ETS'nin DSP olarak gösterilen BGDMÖK kontrol bloğundaki önemli kısımlar optimizör, MÖK matematik modeli, maliyet fonksiyonu, kısıtlar, sağ ve sol bozucular için gözleyicilerden oluşmaktadır. MIMO sistem ETS'nin transfer fonksiyon modeli sağ ve sol teker için farklı renklerde bozucu girişleri ile gösterilmiştir. Şekil 7.13.'te gösterildiği gibi, BGDMÖK tarafından üretilen ayrı zaman sayısal kontrol işaretini sürekli zaman güç işaretine dönüştürmek için kullanılan PWM modülü ve güç dönüştürücü modeli sıfırıncı mertebeden tutucu (zero order hold, ZOH) olarak verilmiştir.



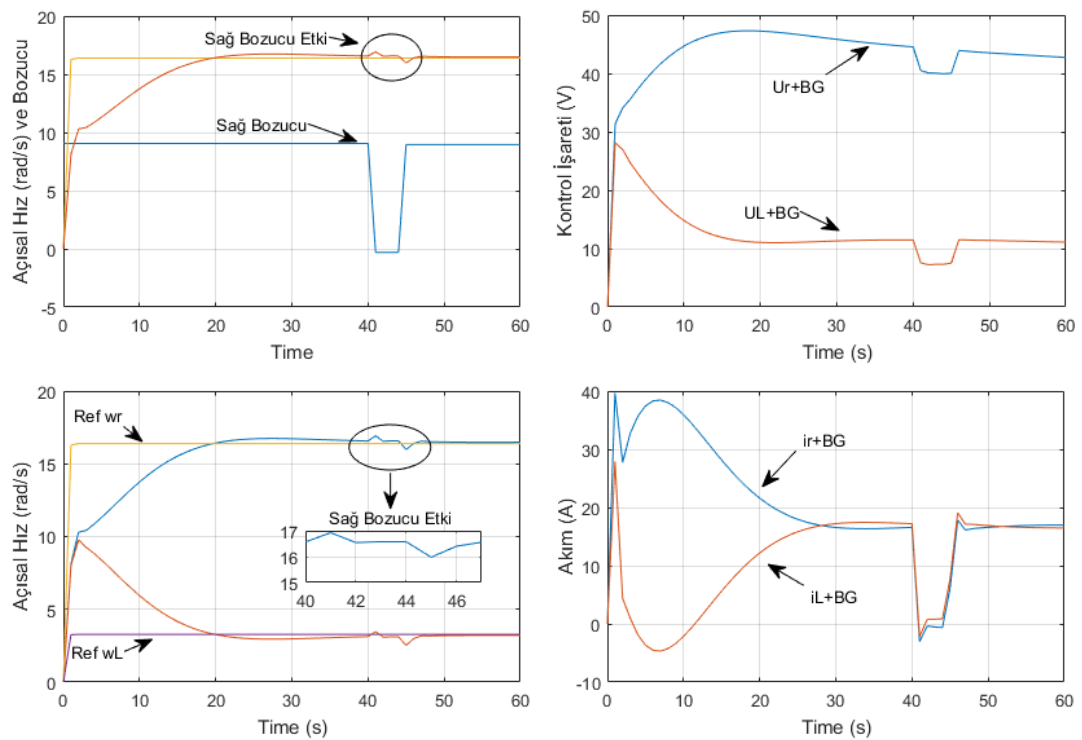
Şekil 7.14. Bozucu gözlemcili MÖK

Şekil 7.14.'te BGDMÖK ve ETS'nin basitleştirilmiş blok diyagramı gösterilmektedir. Referans açısal hızlar BGDMÖK kontrol bloğuna girdi olarak gelirler ve BGDMÖK çıkışları ise ETS'ye giriş olarak kullanılan kontrol sinyalleridir. ETS'nin sağ ve sol teker çevresel bozucu etkileri için modele uygun olarak D_r ve D_L girişleri kullanılmaktadır.

7.2.2.1. Bozucu Gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim

Benzetim çalışmasında kullanıcının joystick aracılığı ile ETS'nin doğrusal hızını $VL = 3$ m/sn ve referans açısını $Wteta = 10$ rad. olarak verdiği kabul edilmiştir. Bu değerler kullanılarak sağ tekerlek referans açısal hızı = 0.8 rad/s, sol tekerlek referans açısal hızı = 0.5 rad/s olarak kinematik hesap bloğu ile elde edilir.

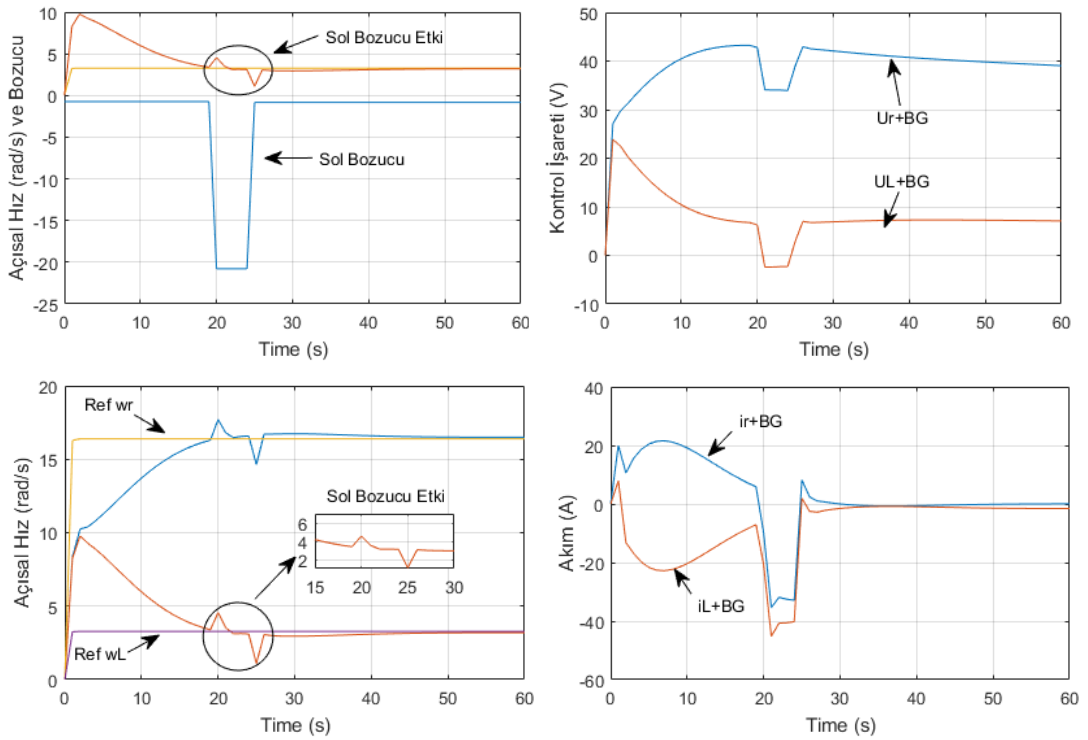
Bu bölümdeki benzetim çalışmaları, kısıt olmaksızın ve Bozucu Gözlemci Destekli MÖK için yapılmıştır. Şekil 7.15.'te verilmiş olan benzetim çalışmasında ETS'de sadece sağ tekerleğe bozucu giriş uygulanmıştır.



Şekil 7.15. Kısıtsız BGDMÖK için sağ teker bozucu giriş.

Sağ tekerde bozucu giriş 40. saniyeden 47. saniyeye kadar sürmüştür. ETS kublajlı MIMO sistem olduğundan, benzetim sonucunda Şekil 7.15. sağ teker açısız hızının bozulmasının yanında sol teker açısız hızında bozulduğunu göstermektedir.

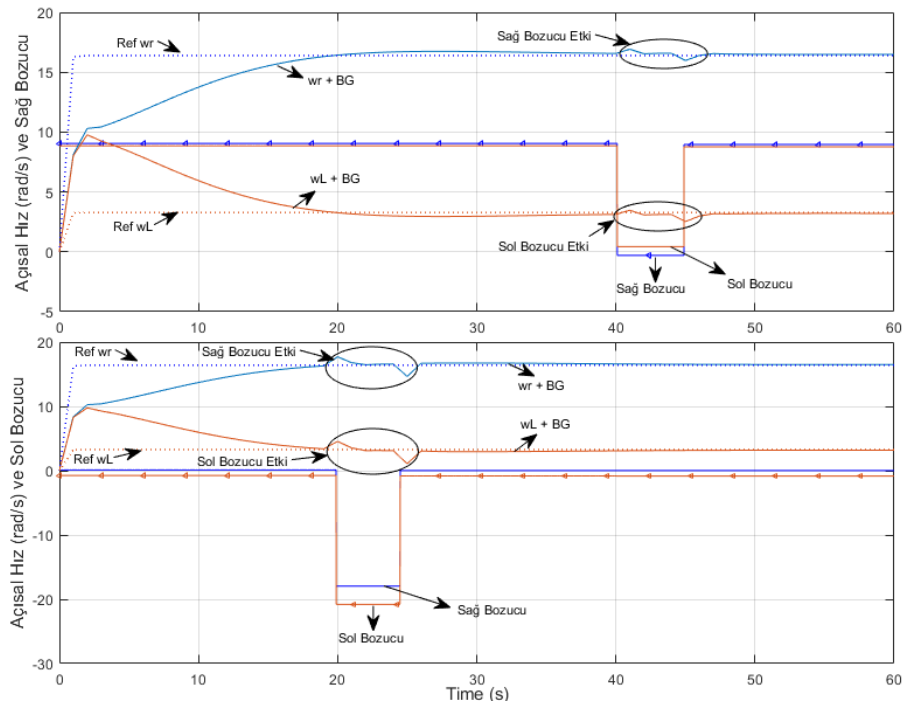
İkinci benzetim çalışması Şekil 7.16.'da verilmiştir. ETS sürüşünün 18. saniyesi ile 30. saniyesi arasında sadece sol tekerde bozucu etki uygulanmıştır.



Şekil 7.16. Kısıtsız BGDMÖK için sol teker bozucu giriş.

Bezer şekilde yine ETS'nin kublajlı MIMO sistem olmasından dolayı, benzetim sonucunda Şekil 7.16. sol teker açısız hızının bozulmasının yanında sağ teker açısız hızında bozulduğu görülmektedir.

Şekil 7.15. ve Şekil 7.16.'da bozucu etkilere karşı ayrı ayrı verilmiş olan ETS cevapları karşılaştırılma amacı ile aynı şekil üzerinde Şekil 7.17.'de verilmiştir.



Şekil 7.17. Kısıtsız BGDMÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş

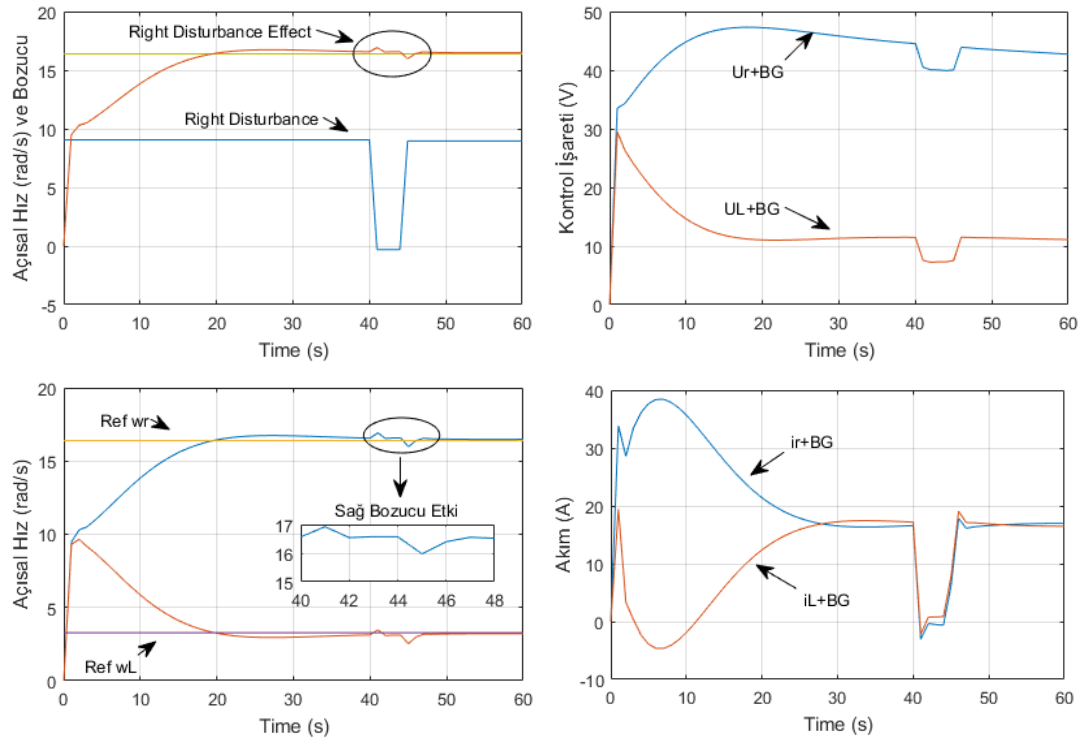
Şekil 7.17.'de karşılaştırılmalı olarak verilmiş olan benzetim sonuçları, her bir tekerleğe ayrı ayrı farklı zamanlarda uygulanan bozucu etkilerin hem uygulanan teker hemde kublajdan dolayı diğer teker açısız hızında oluşan olumsuz etkiyi BGDMÖK kontrolörün giderdiği ve kullanıcının joystick ile vermiş olduğu referans açısız hızları ETS'nin takip ettiği görülmektedir. MÖK ve BGDMÖK benzetim sonuçlarının karşılaştırılmalı olarak değerlendirmeleri 7.2.5.'te verilmiştir.

7.2.2.2. Bozucu Gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim

Benzetim çalışmasında yine kullanıcının joystick aracılığı ile ETS'nin doğrusal hızını $V_L = 3$ m/sn ve referans açısını ise $W_{teta} = 10$ rad. olarak verdiği kabul edilmiştir. Bu değerler kullanılarak sağ tekerlek referans açısız hızı = 0.8 rad/s, sol tekerlek referans açısız hızı = 0.5 rad/s olarak kinematik hesap bloğu ile elde edilir.

Bu bölümdeki benzetim çalışmaları, kısıtlı ve bozucu gözlemci destekli MÖK için yapılmıştır. Fiziksel kısıtlar için kontrol işaretleri $-20 \text{ V} \leq u \leq 20 \text{ V}$ ve her bir tekerleğin açısız hızı $-75 \text{ rad/s} \leq y \leq 75 \text{ rad/s}$ arasında gerçeğe uygun olarak alınmıştır.

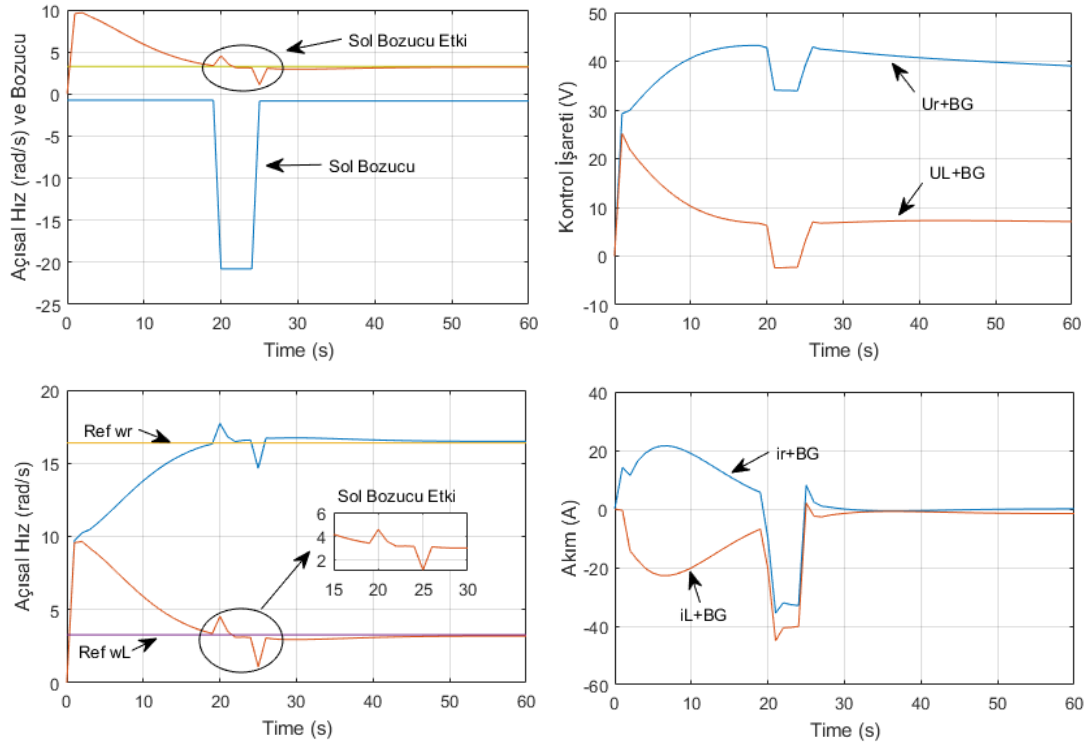
Şekil 7.18.'de verilmiş olan benzetim çalışmasında ETS'de sadece sağ tekerleğe bozucu giriş uygulanmıştır.



Şekil 7.18. Kısıtlı BGDMÖK için sağ teker bozucu giriş.

Sağ tekerde bozucu giriş 40. saniyeden 48. saniyeye kadar sürmüştür. ETS kublajlı MIMO sistem olduğundan, benzetim sonucunda Şekil 7.18. sağ teker açısız hızının bozulmasının yanında sol teker açısız hızında bozulduğunu göstermektedir.

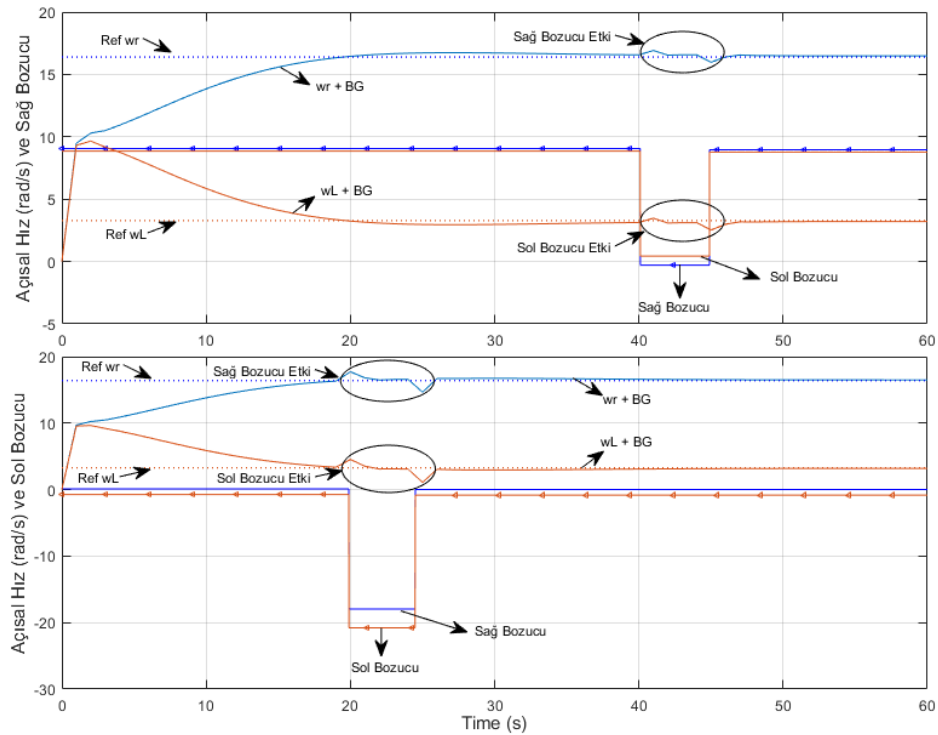
İkinci benzetim çalışması Şekil 7.19.'da verilmiştir. ETS sürüşünün 18. saniyesi ile 30. saniyesi arasında sadece sol tekerde bozucu etki uygulanmıştır.



Şekil 7.19. Kısıtlı BGDMÖK için sol teker bozucu giriş.

Bezer şekilde yine ETS'nin kublajlı MIMO sistem olmasından dolayı, benzetim sonucunda Şekil 7.19. sol teker açısal hızının bozulmasının yanında sağ teker açısal hızında bozulduğu görülmektedir.

Şekil 7.18. ve Şekil 7.19.'da bozucu etkilere karşı ayrı ayrı verilmiş olan ETS cevapları karşılaştırılma amacı ile aynı şekil üzerinde Şekil 7.20.'de verilmiştir.



Şekil 7.20. Kısıtlı BGDMÖK karşılaştırılması için sağ ve sol tekerlek bozucu giriş

Şekil 7.20.'de karşılaştırılmalı olarak verilmiş olan benzetim sonuçları, her bir tekerleğe ayrı ayrı farklı zamanlarda uygulanan bozucu etkilerin hem uygulanan teker hemde kublajdan dolayı diğer teker açısız hızında oluşan olumsuz etkiyi kısıtlı BGDMÖK kontrolörün giderdiği ve kullanıcının joystick ile vermiş olduğu referans açısız hızları ETS'nin takip ettiği görülmektedir.

7.2.3. Eğim için ETS benzetim

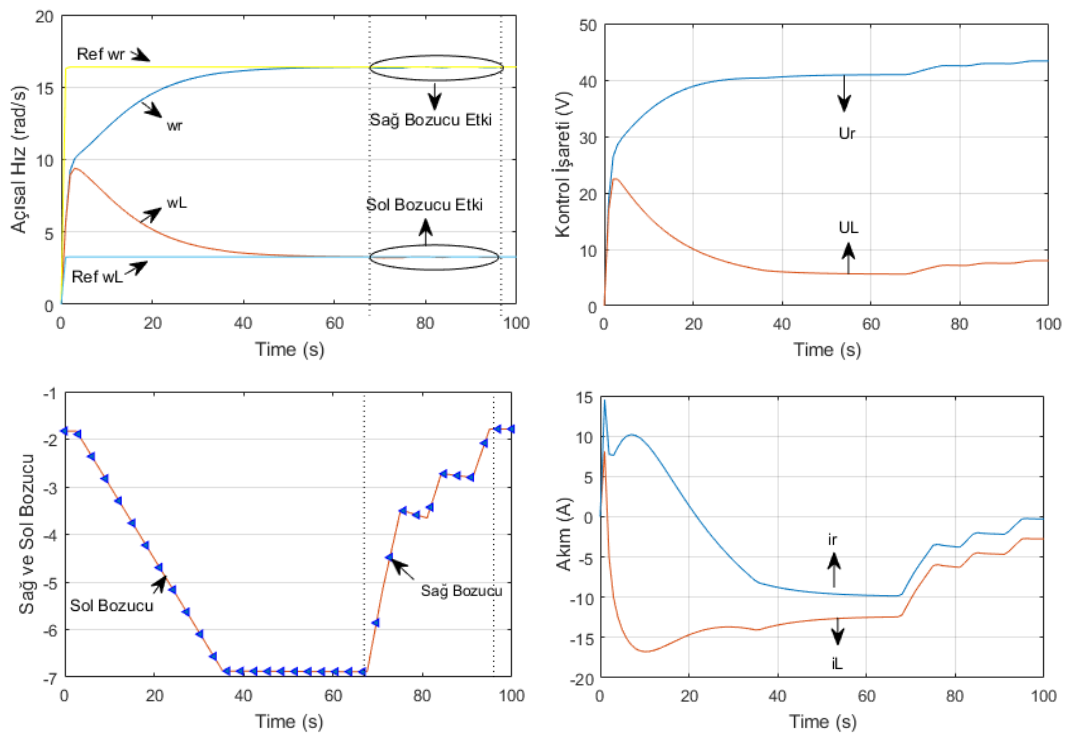
Bu bölümde, bozucu giriş olarak sıkça karşılaşılabilecek olan eğimin çeşitli yöntemler ile kontrol edilen ETS'nin performansına etkisi incelenecektir.

Eğim; bir yüzeyin veya çizginin yatay veya dikey bir çizgiden eğimli olması; yukarı ya da aşağı eğimli. Amerikan Tekerlekli Sandalyeler organizasyonuna göre, modüler rampa için bazı güvenli eğim kullanılabilir; emniyetli eğim; 1:12 eğim (5 derece), bu eğim ticari veya halka açık erişim için ADA tarafından tavsiye edilir. 5 derece açı manuel tekerlekli sandalye, elektrikli tekerlekli sandalye ve scooter kullanıcıları için en iyi çözümdür. Bu eğim tekerlekli sandalye kullanıcıları için ideal eğimdir. İkinci

eğim 2:12 eğim (9.5 Derece), aslında bu eğim ADA standartlarına göre ticari kullanım için tavsiye edilmez, ancak bu eğim konut uygulamalarında kullanılabilir. Üçüncü eğim 3:12 eğimdir (14.5 Derece), bu açı stabilite ve kullanım, orta teker sürüş elektrikli tekerlekli sandalyeler ve çoğu 3 ve 4 tekerlekli scooterlar içindir [112].

7.2.3.1. Eğim için kısıtsız MÖK benzetim

Bozucu gözleyicisiz ve kısıtsız sadece MÖK denetleyicisi kullanılarak eğimli sürüş için ETS performans benzetim çalışması.



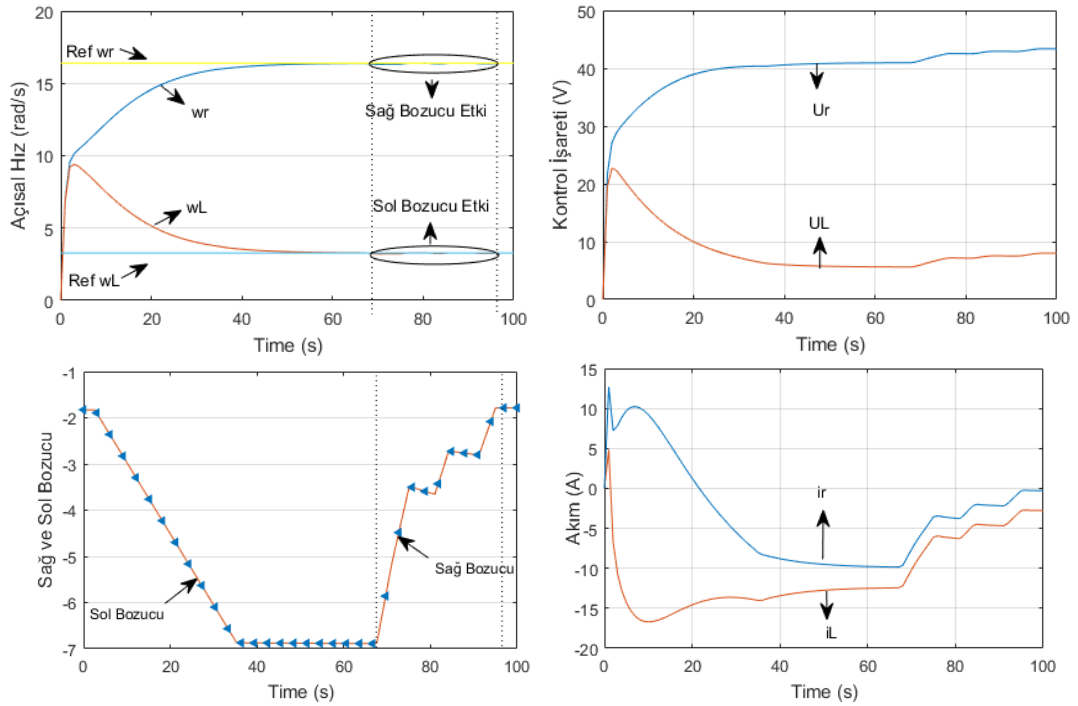
Şekil 7.21. Eğim için kısıtsız MÖK benzetim

Şekil 7.21. eğimli sürüş için ETS kontrol sisteminin kısıtsız MÖK için performansını göstermektedir. Şekil 7.21.'de sağ ve sol bozucu grafiğinde, ETS'nin 2. sn'den 38. sn'ye kadar sabit negatif bir eğimde hareket ettiğini gösterir. Düz yüzeyde bozucu etkisi yoktur. Ancak ETS, pozitif eğimli pürüzlü yüzeyde 70. sn'den 100. sn'ye kadar geçen zaman aralığında açısal hızda bozulma etkisi vardır. Şekil 7.21.'de açısal hız grafiğinden, görüleceği üzere eğim için kısıtsız MÖK bozucu etkilerini gidermekte

ve ETS'nin kullanıcının uyguladığı referans girişi takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.3.2. Eğim için kısıtlı MÖK benzetim

Bozucu gözleyicisiz ve kısıtlı MÖK denetleyicisi kullanılarak eğimli sürüş için ETS performans benzetim çalışması.

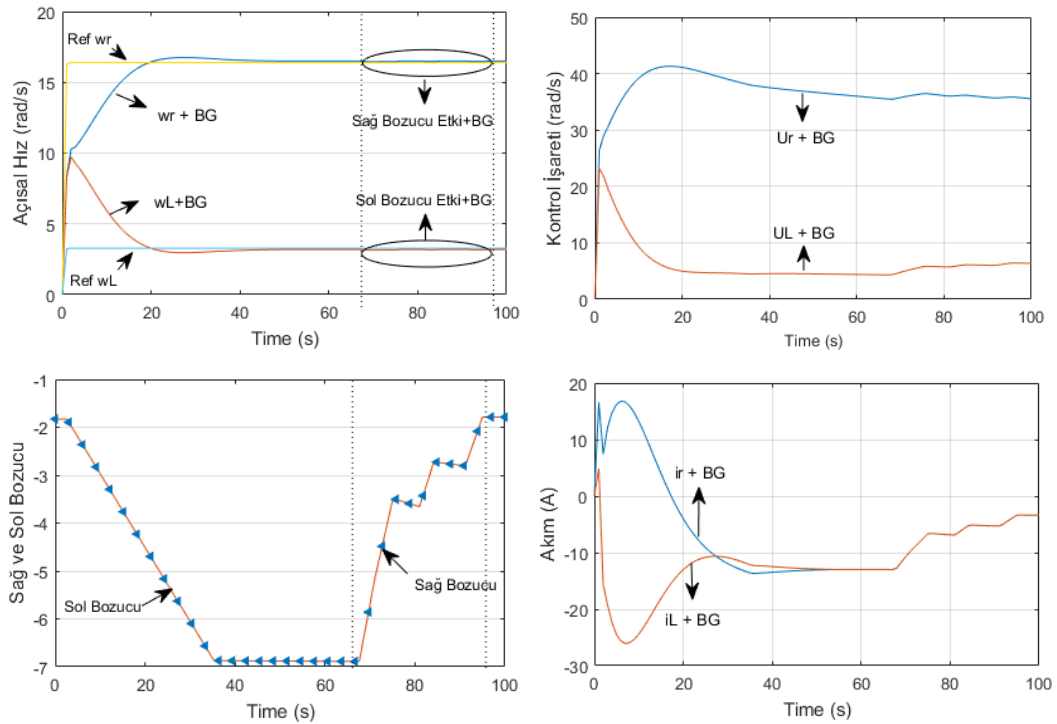


Şekil 7.22. Eğim için kısıtlı MÖK benzetim

Şekil 7.22. eğimli sürüş için ETS kontrol sisteminin kısıtlı MÖK için performansını göstermektedir. Şekil 7.22.'de sağ ve sol bozucu grafiğinde, ETS'nin 2. sn'den 38. sn'ye kadar sabit negatif bir eğimde hareket ettiğini gösterir. Düz yüzeyde bozucu etkisi yoktur. Ancak ETS, pozitif eğimli pürüzlü yüzeyde 70. sn'den 100. sn'ye kadar geçen zaman aralığında açılma hızında bozulma etkisi vardır. Şekil 7.22.'de açılma hız grafiğinden, görüleceği üzere eğim için kısıtlı MÖK bozucu etkilerini gidermekte ve ETS'nin kullanıcının uyguladığı referans girişi takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.3.3. Eğim için Bozucu Gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim

Üçüncü, Bozucu Gözleyici Destekli kısıtsız MÖK denetleyicisi kullanılarak eğimli sürüş için ETS performans benzetim çalışması.

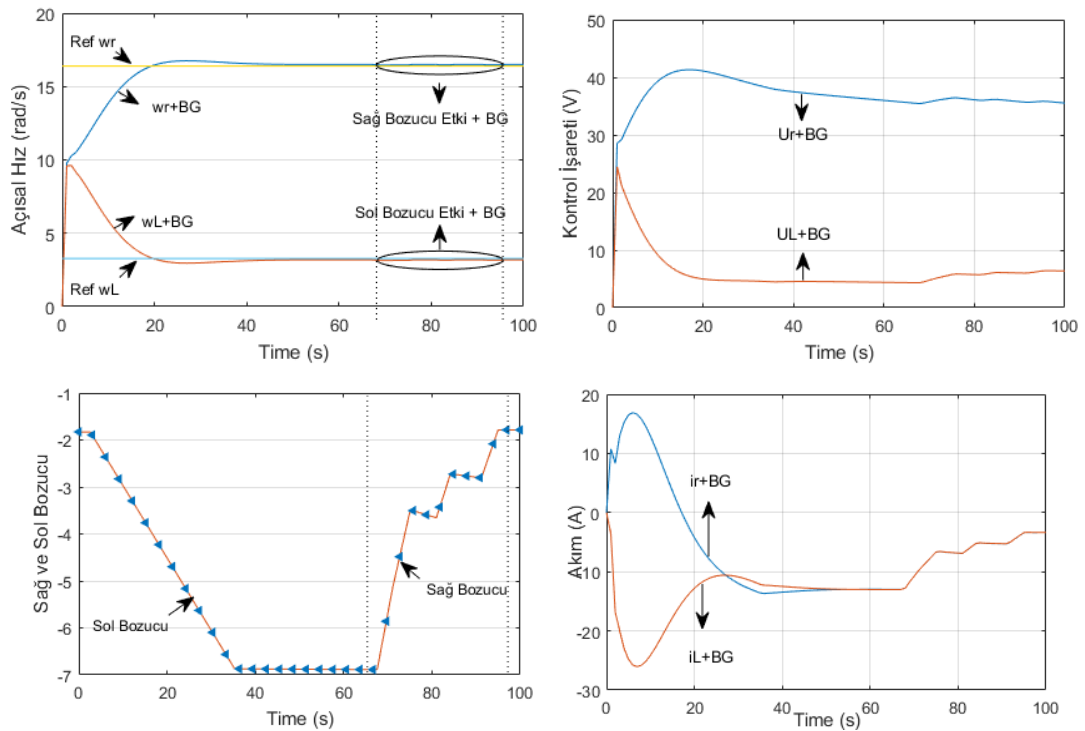


Şekil 7.23. Eğim için bozucu gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim

Şekil 7.23. eğimli sürüş için ETS kontrol sisteminin Bozucu Gözleyici Destekli kısıtsız MÖK için performansını göstermektedir. Şekil 7.23.'de sağ ve sol bozucu grafiğinde , ETS'nin 2. sn'den 38. sn'eye kadar sabit negatif bir eğimde hareket ettiğini gösterir. Düz yüzey de bozucu etkisi yoktur. Ancak ETS, pozitif eğimli pürüzlü yüzeyde 70. sn'den 100. sn'eye kadar geçen zaman aralığında açılma hızda bozulma etkisi vardır. Şekil 7.23.'de açılma hız grafiğinden, görüleceği üzere eğim için Bozucu Gözleyici Destekli kısıtsız MÖK bozucu etkilerini gidermekte daha etkin olduğu ve ETS'nin kullanıcının uyguladığı referans girişi daha yakın takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.3.4. Eğim için Bozucu Gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim

Eğim için Bozucu Gözleyicili Destekli kısıtlı MÖK denetleyicisi kullanılarak eğimli sürüş için ETS performansının son benzetim çalışması.



Şekil 7.24. Eğim için bozucu gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim

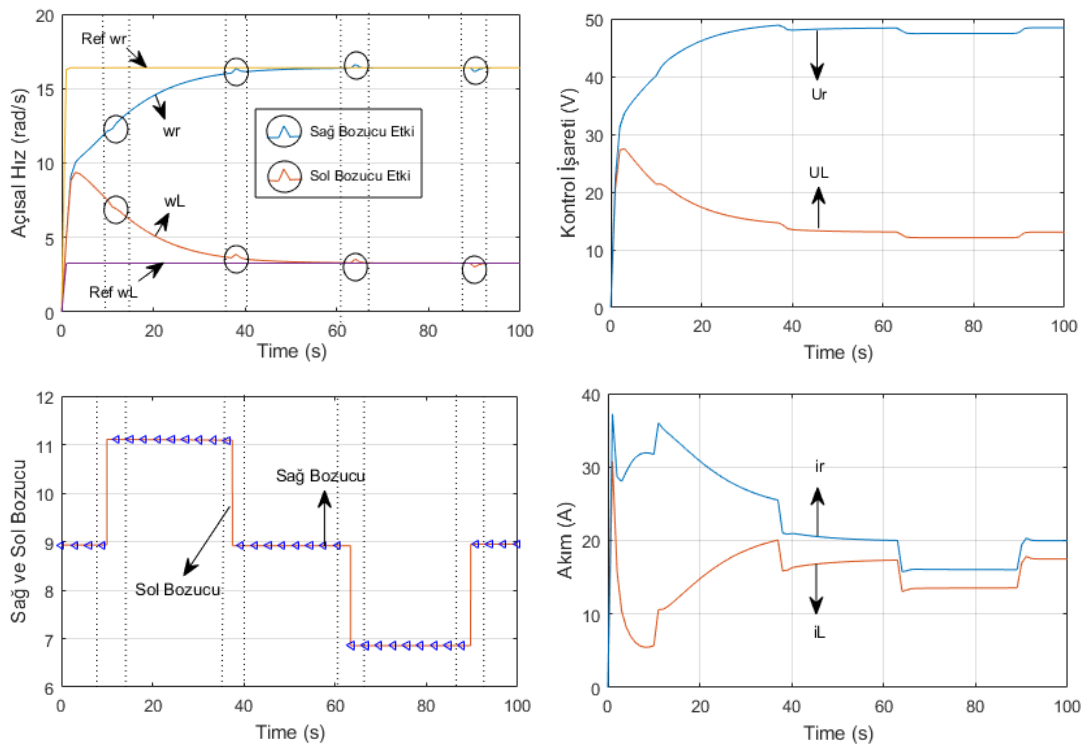
Şekil 7.24. eğimli sürüş için ETS kontrol sisteminin Bozucu Gözleyicili Destekli kısıtlı MÖK için performansını göstermektedir. Şekil 7.24.'de sağ ve sol bozucu grafiğinde , ETS'nin 2. sn'den 38. sn'yeye kadar sabit negatif bir eğimde hareket ettiğini gösterir. Düz yüzey de bozucu etkisi yoktur. Ancak ETS, pozitif eğimli pürüzlü yüzeyde 70. sn'den 100. sn'yeye kadar geçen zaman aralığında açısal hızda bozulma etkisi vardır. Şekil 7.24.'de açısal hız grafiğinden, görüleceği üzere eğim için Bozucu Gözleyicili Destekli kısıtlı MÖK bozucu etkilerini gidermekte daha etkin olduğu ve ETS'nin kullanıcının uyguladığı referans girişi daha yakın takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.4. Engel için ETS Benzetim

Bu bölümdeki benzetim çalışmalarında, ETS sürüş esnasında engel ile karşılaşıldığında MÖK kontrolörünün ve BGDMMÖK'ün performansları incelenir. ETS kontrol sistemi, engel ile karşılaşıldığında bozucunun giderilmesini ve kullanıcının verdiği referans işaretin takip edilmesini sağlar. Burada engel, ETS kontrol sistemi için bozucu giriş olarak ele alınır.

7.2.4.1. Engel için kısıtsız MÖK benzetim

Bozucu gözleyicisiz ve kısıtsız MÖK denetleyicisi kullanarak engel karşısında ETS sürüş performansına ait benzetim çalışması.



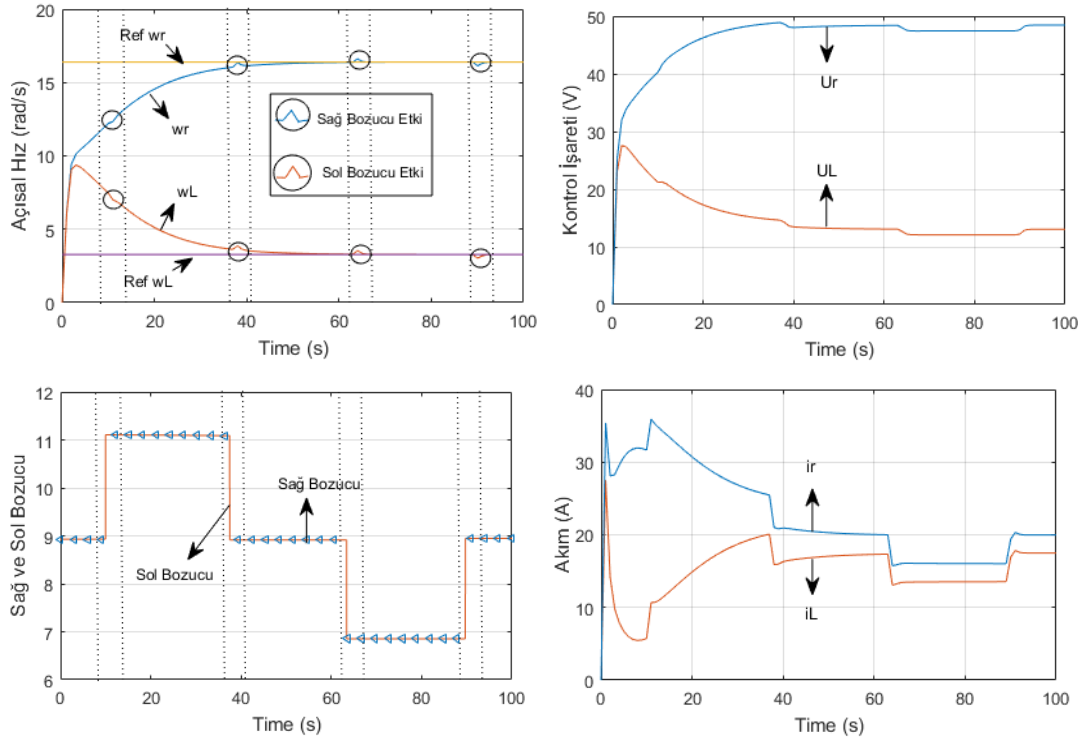
Şekil 7.25. Engel için kısıtsız MÖK benzetim

Şekil 7.25.'te ETS sürüş esnasında "sağ ve sol bozucu" isimli şekilde verilen bozucu giriş olarak engel ile karşılaşıldığında ETS kontrol sisteminin kısıtsız MÖK denetleyici performansını "açıl hız" isimli şekil göstermektedir. Bu şekilde bozucu

giriş engelinin yükselen ve düşen kenarlarından dolayı ETS çıkış açısız hızının üzerindeki etkileri, BGKMÖK denetleyicisinin bu etkileri yok etme performansı ve ETS sisteminde kısıtsız MÖK denetleyicinin kullanıcının uyguladığı referans girişleri takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.4.2. Engel için kısıtlı MÖK benzetim

İkinci, bozucu gözleyicisiz ve kısıtlı MÖK denetleyicisi kullanarak engel karşısında ETS sürüş performans benzetim çalışması.

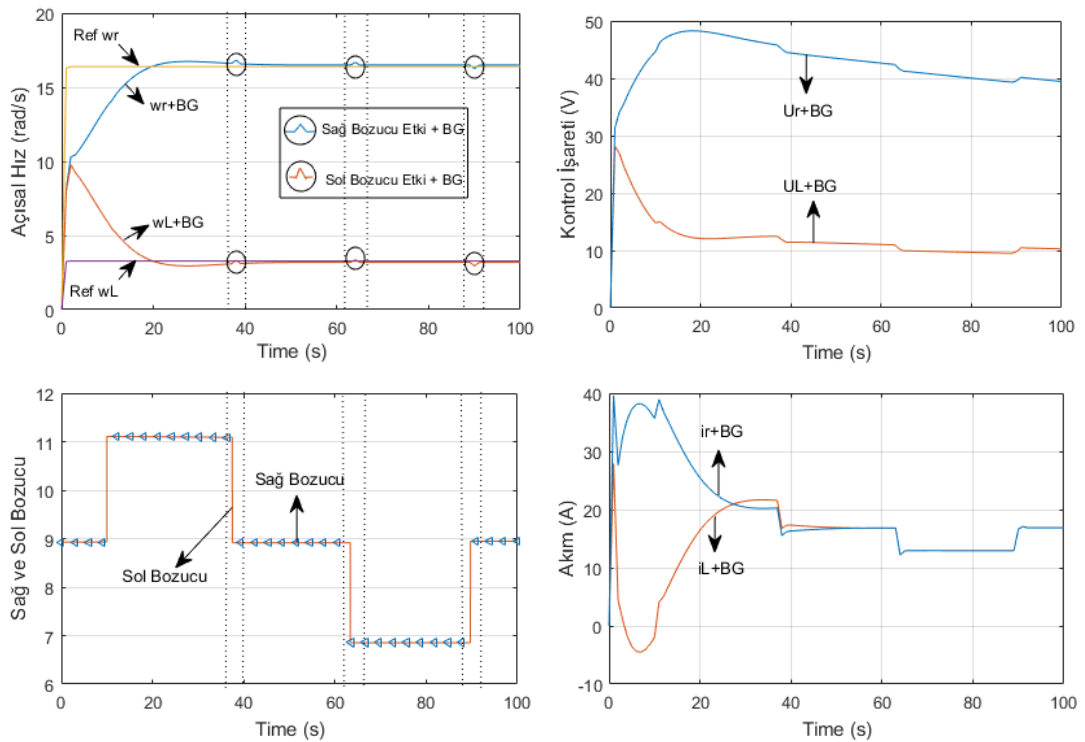


Şekil 7.26. Engel için kısıtlı MÖK benzetim

Şekil 7.26.'da ETS sürüş esnasında “sağ ve sol bozucu” isimli şekilde verilen bozucu giriş olarak engel ile karşılaşıldığında ETS kontrol sisteminde kısıtlı MÖK denetleyici performansını “açısız hız” isimli şekil göstermektedir. Bu şekilde bozucu giriş engelinin yükselen ve düşen kenarlarından dolayı ETS çıkış açısız hızının üzerindeki etkileri, kısıtlı MÖK denetleyicisinin bu etkileri yok etme performansı ve ETS sisteminde kısıtlı MÖK denetleyicisinin kullanıcının uyguladığı referans girişleri takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.4.3. Engel için Bozucu Gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim

Üçüncü, bozucu gözleyicili ve kısıtsız MÖK denetleyicisi kullanarak engel karşısında ETS sürüş performans benzetim çalışması.

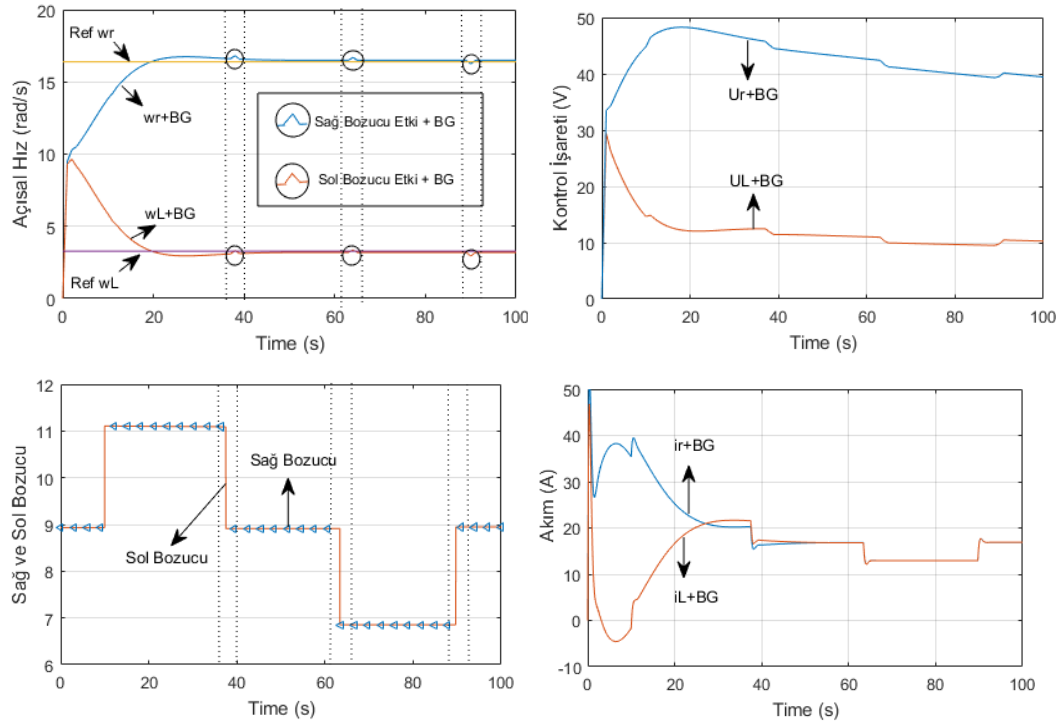


Şekil 7.27. Engel için Bozucu Gözleyici ve kısıtsız BGDMÖK benzetim

Şekil 7.27.’de ETS sürüş esnasında “sağ ve sol bozucu” isimli şekilde verilen bozucu giriş olarak engel ile karşılaşıldığında ETS kontrol sisteminde kısıtsız BGDMÖK denetleyici performansını “açısal hız” isimli şekil göstermektedir. Bu şekilde bozucu giriş engelinin yükselen ve düşen kenarlarından dolayı ETS çıkış açısal hızının üzerindeki etkileri, kısıtsız BGDMÖK denetleyicisinin bu etkileri yok etme performansı ve ETS sisteminde kısıtsız BGDMÖK denetleyicisinin kullanıcının uyguladığı referans girişleri takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.4.4. Engel için Bozucu Gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim

Dördüncü, bozucu gözleyicili ve kısıtlı MÖK denetleyicisi kullanarak engel karşısında ETS sürüş performans benzetim çalışması.



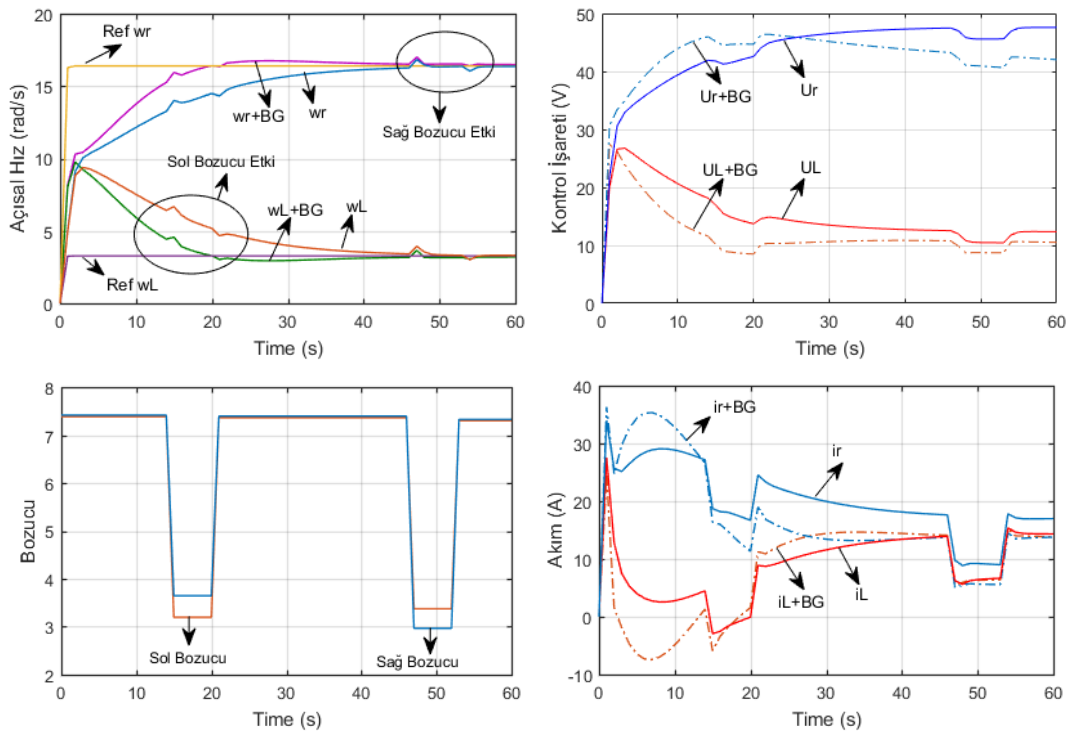
Şekil 7.28. Engel için Bozucu Gözleyicili ve kısıtlı MÖK benzetim

Şekil 7.28.'de ETS sürüş esnasında “sağ ve sol bozucu” isimli şekilde verilen bozucu giriş olarak engel ile karşılaşıldığında ETS kontrol sisteminde kısıtlı BGDMÖK denetleyici performansını “açısal hız” isimli şekil göstermektedir. Bu şekilde bozucu giriş engelinin yükselen ve düşen kenarlarından dolayı ETS çıkış açısal hızının üzerindeki etkileri, kısıtlı BGDMÖK denetleyicisinin bu etkileri yok etme performansı ve ETS sisteminde kısıtlı BGDMÖK denetleyicisinin kullanıcının uyguladığı referans girişleri takip etmesini sağladığı görülmektedir.

7.2.5. Kısıtsız MÖK ve kısıtsız BGDMÖK benzetin sonuçlarının karşılaştırması

Benzetim sonuç karşılaştırılması, kısıtsız MÖK ve kısıtsız BGDMÖK denetleyicileri içindir. 0-60 sn aralığında ETS'nin sol ve sağ tekerlerine uygulanan bozucu işaretler farklı genlikli olup şekillerde “bozucu” ismi ile verilmiştir.

Kısıtsız MÖK ve Kısıtsız BGDMÖK benzetim çalışması sonuçları arasındaki karşılaştırma Şekil 7.29.'da verilmiştir. Bu benzetim sonuçlarında, Kısıtsız BGDMÖK'ün Kısıtsız MÖK ile karşılaştırıldığında kısıtsız BGDMÖK'nin Kısıtsız MÖK'den daha hızlı olduğu görülebilir.



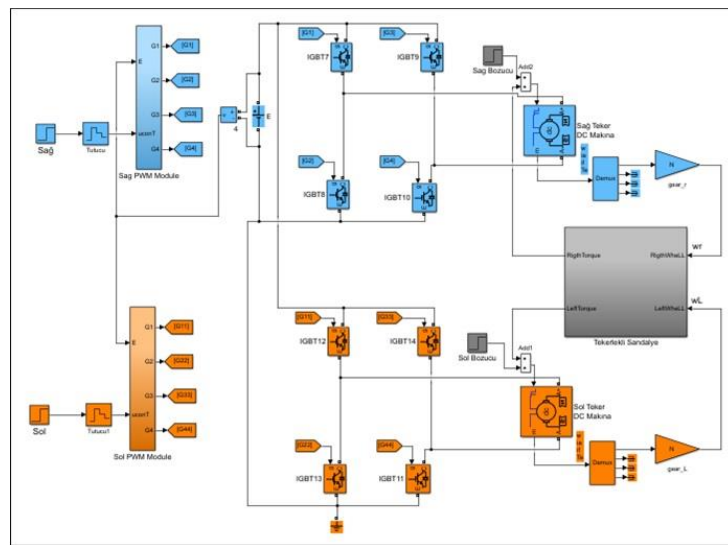
Şekil 7.29. Kısıtsız MÖK ve Kısıtsız BGDMÖK Benzetin Sonuçlarının Karşılaştırması

Kestirilen bozucu etkisinin giderilmesi için tasarlanan kontrolcünün ürettiği kontrol işareti kısıtsız MÖK'ün ürettiği kontrol işaretine destek amacı ile ilave edilerek ETS ye uygulandığından, bakınız Şekil 7.29., kısıtsız BGDMÖK cevap tepkisi kısıtsız MÖK cevap tepkisinden daha hızlıdır ve bozucu etkisinin giderilmesinde daha etkilidir.

7.3. ETS Kontrol Sisteminin Donanım Benzetim

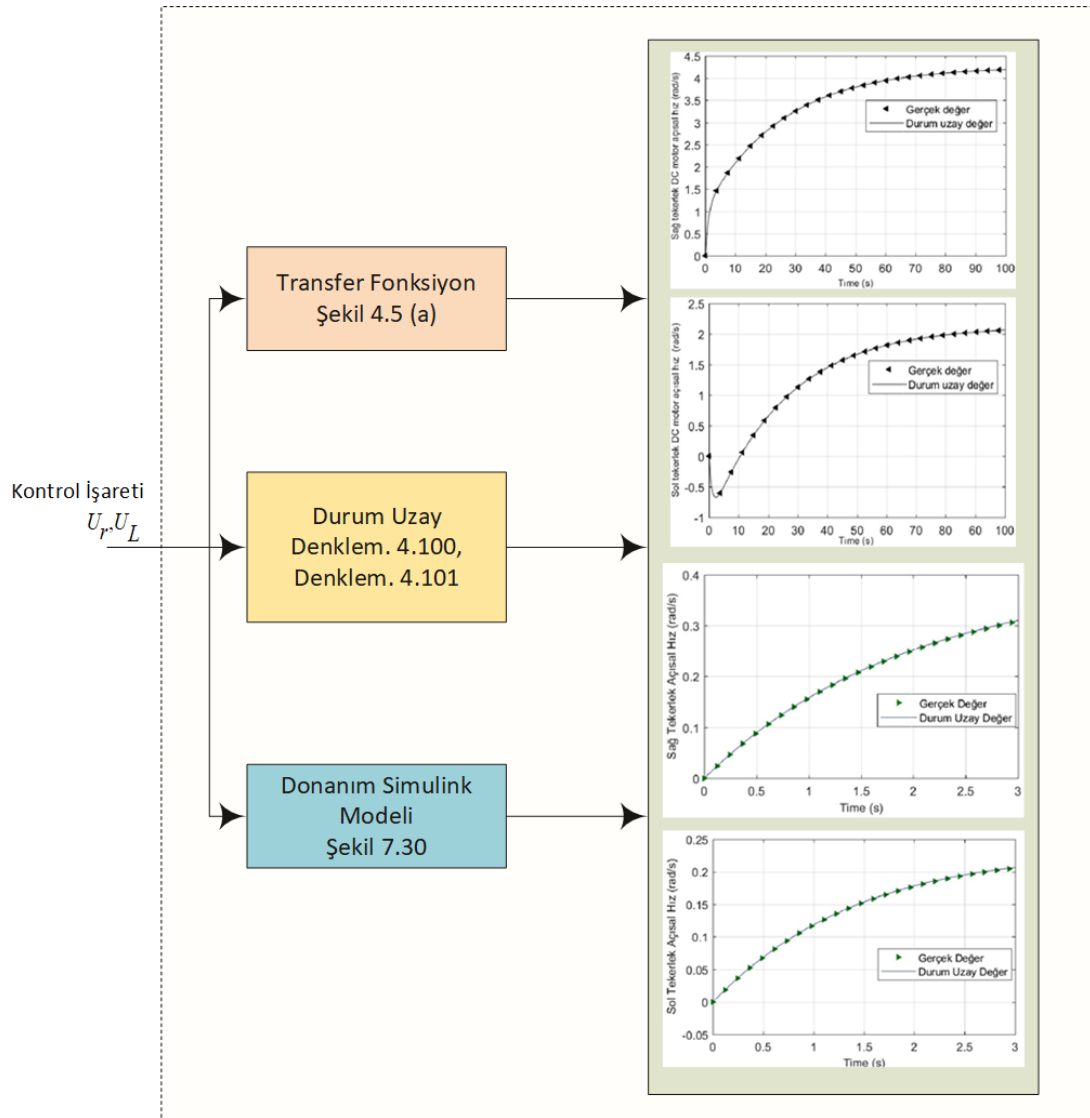
Bu tez çalışmasında, ETS kontrol sistemi MATLAB/SIMULINK benzetim ortamında dinamik denklemlere dayalı olarak transfer fonksiyon blokları olarak modellenmiş, önerilen kontrol yöntemlerine göre kontrolör tasarımları yapılmış ve bozucu etkiler altında performans sonuçları elde edilmiştir. ETS nin matematik modeli, sağ-sol teker DC motor, güç dönüştürücüleri H-köprüler ve DSP mimarisindeki PWM ünitelerinin model doğrulaması için yapılmış olan çalışma aşağıda verilmiştir.

Şekil 7.30.'da DSP mimarisindeki PWM üniteleri, güç dönüştürücüsü H-köprü dönüştürücüleri, sağ-sol teker sürme için DC motorlar ve ETS'nin transfer fonksiyon bloklarından oluşan matematik modelinden oluşan donanımsal Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 7.30. Simulink donanım modeli

Şekil 7.31.'da, Şekil 7.30.'de verilen Simulink donanım modeli ile Şekil 4.5.'de verilen transfer fonksiyonu ve 4.100 - 4.101 denklemleri ile verilen durum uzay model karşılaştırılması verilmiştir. Aynı kontrol işaret girişlerine karşı her bir sistem çıkışları kıyaslanarak değerlendirme yapılmıştır.

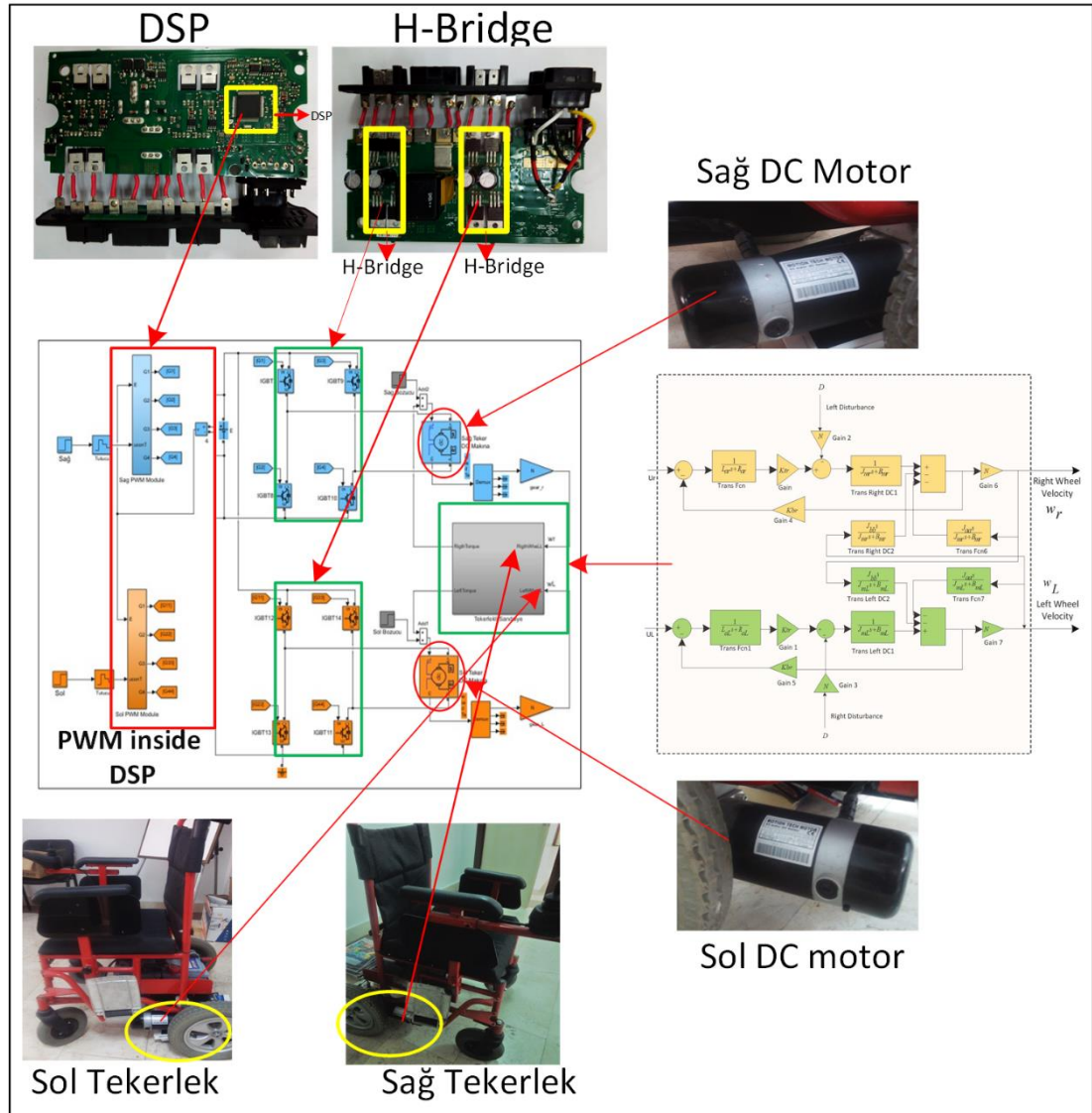


Şekil 7.31. Transfer fonksiyonu, durum uzay ve ETS donanım

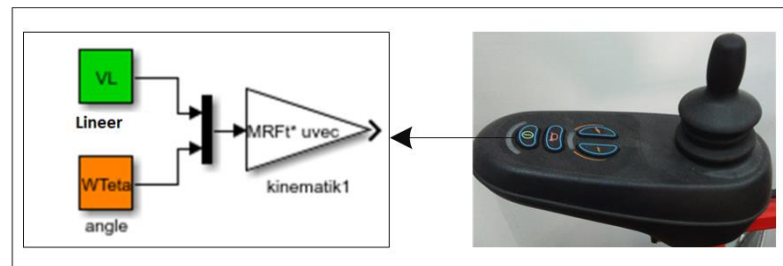
Benzetim sonuçlarından görüleceği üzere, donanım Simulink model durum uzay model ve transfer fonksiyon model ile bire bir örtüşmektedir. Sonuç olarak tez önerisi olan MÖK ve BGDMÖK kontrol yöntemleri model dayalı olduğundan model doğrulama sonuçları ETS için tasarlanmış olan kontrol yöntemlerinin gerçek zaman uygulamaya yakın sonuçlar verdiğini ve ufak değişiklikler/uyarlamalar ile deneysel uygulamaların yapılabilirliğini göstermektedir.

Simulink donanım model oluşturulmasında gerçek ETS'yi oluşturan donanımının her bir bileşenine karşılık gelen MATLAB/Simulink modelleri Şekil 7.32.'de verilmiştir. Şekil 7.32.'de tez çalışmasında önerilen sayısal kontrol yöntemlerinin koşturulacağı

DSP görülebilir. Şekil 7.33.'te ETS kullanıcılarının referans giriş işareti uygulayabilmesi için Joystick ve MATLAB/Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 7.32. ETS Donanım sistem bileşenleri ve SIMULINK modeli



Şekil 7.33. Joystick ve MATLAB/SIMULINK model

BÖLÜM 8. SONUÇ

Bu tez, çok giriş çok çıkışlı ve kublajlı ETS'nin sağ ve sol tekerlerinin bir birinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi için modellenmesi, kontrol yöntem önerileri, ETS için kontrolör tasarımları, doğrulama ve performans analiz ve karşılaştırmaları için MATLAB/SIMULINK tabanlı benzetim çalışmalarından oluşmaktadır.

ETS'nin dinamik ve kinematik denklemleri kullanılarak elde edilen toplam kinetik enerji denklemlerinden hareket ederek ETS'nin doğrudan tam durum uzay denklemleri literatüre katkı olarak elde edilmiş ve SCI-expanded kapsamı dergide yayınlanmıştır. Bu yayında, ön çalışma olarak, bu denklemler seçilen örnekleme zamanına göre ayrıklaştırılarak ayrık zaman durum uzay modeli elde edilmiş ve Luenberger gözleyicisi sağ ve sol tekerlek DC motor akımlarını ve hızlarını kestirmek için tasarlanmıştır.

Belirsiz çevre şartları veya bozucuların etkisi altında iken ETS'nin sağ ve sol teker hızlarının birbirinden bağımsız kontrol edilebilmesi için yine literatüre katkı olarak ayrık-zaman optimal Model Öngörülü Kontrol ve Bozucu Gözleyici Destekli Model Öngörülü Kontrol yöntem önerileri yapılmıştır. Önerilen yöntemler modele dayalıdır. Bu tez çalışmasının ilk aşamasında ETS'nin doğrudan tam durum uzay denklemleri elde edilerek önerilen kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesi için temel oluşturulmuştur.

Önerilen kontrol yöntemleri MÖK ve BGDMÖK 'ün ETS için tasarımında ise ayrık-zaman durum uzay denklemleri kullanılmıştır. Tasarlanan MÖK ve BGDMÖK kontrol yöntemlerinin çeşitli bozucu etkiler altındaki performans değerlendirmeleri için MATLAB/SIMULINK ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Benzetim çalışma uygulamalarında ise ETS için yazılan dinamik denklemlerden bu tez çalışmasında elde edilen tüm sisteme ait transfer fonksiyon blokları kullanılmıştır.

Ayrıca, ETS'nin transfer fonksiyon bloklarına dayalı matematik modeli, sağ-sol teker DC motor, güç dönüştürücüleri H-köprüler ve DSP mimarisindeki PWM ünitelerinden oluşan açık çevrim modeli ile açık çevrim durum uzay model karşılaştırmalı olarak doğrulamaları yapılmış ve bire bir örtüşükleri gösterilmiştir.

Sonuç olarak, tez önerisi olan MÖK ve BGD MÖK kontrol yöntemleri model dayalı olduğundan, doğrulama sonuçları ETS için tasarlanmış olan kontrol yöntemlerinin ufak değişiklikler/uyarlamalar ile deneysel olarak gerçek zamanda uygulanabileceği gösterilmiştir.

Bu tezin katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a. ETS için Dinamik ve Kinematik denklemler ile toplam Kinetik enerji denkleminin yazılması ve Lagrange ifadesi kullanarak doğrudan durum uzay modelinin elde edilmesi.
- b. ETS için Dinamik ve Kinematik denklemler ile tüm sisteme ait transfer fonksiyon bloklarının elde edilmesi.
- c. Transfer fonksiyon blok modelleri ile durum uzay model doğrulama çalışmalarının yapılması ve onaylanması.
- d. ETS'nin sağ ve sol tekerlek açısal hızlarını kontrol etmek için MÖK önerilmiş ve geliştirilmiştir.
- e. ETS sürüşü sırasında oluşan bozucu etkileri ortadan kaldırmak ve MÖK performansını iyileştirmek için yeni bir yaklaşım olarak BGD MÖK önerilmiş ve geliştirilmiştir. Tasarım prosedürünü basitleştirmek için, BGD MÖK denetleyicisi iki alt sistem olarak düşünülmüş ve bağımsız olarak tasarlanmıştır. İlk olarak,

optimal MÖK önceden tanımlanmış maliyet fonksiyonunu kısıtlı / kısıtsız olarak minimize etmek için tasarlanır ve sonra MÖK 'e destek amaçlı bozucu gözleyici ve kontrolcüsü tasarlanır.

- f. MÖK ve BGDMÖK kontrol yöntemlerinin bozucu rampa eğim için performans benzetim çalışmaları yapılmıştır. The Americans with Disabilities Act (ADA) tarafından önerilen ETS için ideal olarak rampa eğimi özellikleri 1:12'dir. Ancak bu tez çalışmasında kontrolör performanslarını gözlem amaçlı olarak rampa eğim özellikleri en kötü koşul olan 2:12 (9,5 derece açı) alınarak benzetim çalışmaları yapılmıştır.
- g. Bu çalışmada engel üzerinde ETS için benzetim çalışması yapılmıştır. ETS'nin engel üzerinden geçmesi gerektiği varsayılmıştır. Benzetim çalışmaları MÖK, BGDMÖK için sırasıyla yapılmıştır. Tüm sonuçlar, ETS engel ile karşılaştığında açısal hızdaki bozulma etkilerinin BGDMÖK tarafından ortadan kaldırıldığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] World Health Organization., Fact sheet on wheelchairs, http://www.searo.who.int/entity/disabilities_injury_rehabilitation/wheelchair_factsheet.pdf, 2010.
- [2] Kaida, Y., Murakami, T., Power-assist motion of an electric wheelchair for a caregiver. International Workshop on Advanced Motion Control., 350–355, 2006.
- [3] Rosman, R., Yaacob, A., Thamrin, N.M., Karim, J., Design and development of electrical powered wheelchair model for navigation control. IEEE Symp. Ind. Electron. Appl., 675–680, 2011.
- [4] Velázquez, R., Gutiérrez, C.A., Modeling and control techniques for electric powered wheelchairs: An overview. Proceedings of the IEEE Central America and Panama Convention., 6–11, 2014.
- [5] Park, J.W., Im, W.S., Kim, D.Y., Kim, J.M., Safe driving algorithm of the electric wheelchair with model following control. 16th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE-ECCE Eur., 1-10, 2014.
- [6] Celeste, W.C., Filho, T.F.B., Filho, M.S., Carelli, R., Dynamic model and control structure for an autonomous wheelchair. IEEE International Symposium on Industrial Electronics., 1359–1364, 2008.
- [7] Onyango, S.O., Hamam, Y., Djouani, K., Qi, G., Dynamic control of powered wheelchair with slip on an incline. 2nd International Conference on Adaptive Science and Technology., 278–283., 2009.
- [8] Onyango, S.O., Hamam, Y., Dabo, M., Djouani, K., Qi, G., Dynamic Control of an Electrical Wheelchair on an Incline. IEEE AFRICON., 1–6, 2009.
- [9] Shung, J.B., Stout, G., Tomizuka, M., Auslander, D.M., Dynamic Modeling of a Wheelchair on a Slope. J. Dyn. Sys., Meas. Control., 105(2), 101-106, 1983.
- [10] Shung, J.B., Tomizuka, M., Auslander, D.M., Stout, G., Feedback control and simulation of a wheelchair. J. Dyn. Syst. Meas. Control., 105(2), 96–100, 1983.
- [11] Ghani, N.M.A., Nasir, A.N.K., Hassan, M.A.H., Tokhi, M.O., PD-fuzzy Control of a Stair Climbing Wheelchair. AASRI Procedia., 18–25, 2013.

- [12] RazakShehab, A., Design and Implementation Electrical Wheel Chair for Disable able to Stairs Climbing by Using Hydraulic Jack. *IOSR J. Electr. Electron. Eng.*, 7(3), 82–92, 2013.
- [13] Hwang, S.W., Lee, C.H., Bang, Y.B., Power-Assisted Wheelchair with Gravity Compensation. *12th International Conference on Control, Automation and Systems.*, Jeju Island, 1874 - 1877, 2012.
- [14] Lee, K.M., Lee, C.H., Hwang, S., Choi, J., Bang, Y.B., Power-assisted wheelchair with gravity and friction compensation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63(4): 2203–2211, 2016.
- [15] Ou, C.C., Chen, C.J., Chen, T.C., Modelling and design a power assisted wheelchair used torque observer. *International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation (3CA)*, 63–66, 2010.
- [16] Tsai, M.C., Hsueh, P.W., Force sensorless control of power-assisted wheelchair based on motion coordinate transformation. *Mechatronics.*, 23(8), 1014–1024, 2013.
- [17] Fattouh, A., Dadam, Y., Pham, D. T., MATLAB-Based 3D Dynamic Model of a Powered Wheelchair. *Iproms.*, 1–6, 2007.
- [18] Chénier, F., Bigras, P., Aissaoui, R., An orientation estimator for the wheelchair's caster wheels. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 1(1): 1–10, 2010.
- [19] Itaba, F., Hashimoto, M., Takahashi, K., A Model-Based Fault Diagnosis of Powered Wheelchair. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.*, Sanya, 1255–1259, 2008.
- [20] Poorten, E.B.V., Demeester, E., Reekmans, E., Philips, J., Hüntemann, A., Schutter, J.D., Powered wheelchair navigation assistance through kinematically correct environmental haptic feedback. *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, 3706–3712, 2012.
- [21] Katsura, S., Ohnishi, K., A Wheelchair Type Mobile Robot Taking Environmental Disturbance into Account. *7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings*, 500–505, 2002.
- [22] Katsura, S., Ohnishi, K., Human Cooperative Wheelchair for Haptic Interaction Based on Dual Compliance Control. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 51(1): 221–228, 2004.
- [23] Tanohata, N., Seki, H., Comfortable driving control for electric power-assisted wheelchair on disturbance road using fuzzy algorithm. *3rd IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, BioRob.*, 130–135, 2010.

- [24] Chuy, O., Collins, E.G., Ordonez, C., Candiotti, J., Wang, H., Cooper, R., Slip mitigation control for an Electric Powered Wheelchair. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)., Hong Kong, 333–338, 2014.
- [25] Oh, S., Hata, N., Hori, Y. Integrated motion control of a wheelchair in the longitudinal, lateral, and pitch directions. IEEE Trans. Ind. Electron., 55(4): 1855–1862, 2008.
- [26] Nguyen, N.T., Nguyen, H.T., Su, S.W., Advanced robust tracking control of a powered wheelchair system. 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society., 4767–4770, 2007.
- [27] Brandao, A.S., Cruz, C.D.L., Bastos-Filho, T.F., Sarcinelli-Filho, M., A strategy to avoid dynamic and static obstacles for robotic wheelchairs. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., 3553–3558, 2010.
- [28] Ali, S.S., Pruski, A., Abdelhak, B., Feasible Trajectory for person on Wheelchair to Assess the Accessibility to the Mobility and to the Reachability. IEEE International Conference on Systems and Control., 570 - 576, 2013.
- [29] Medola, F.O., Dao, P.V., Caspall, J.J., Sprigle, S., Partitioning Kinetic Energy During Freewheeling Wheelchair Maneuvers. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering., 22(2): 326–333, 2014.
- [30] Ding, D., Cooper, R.A., Guo, S., Corfman, T. A., Analysis of driving backward in an electric-powered wheelchair. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 12(6): 934–943, 2004.
- [31] Ding, D., Cooper, R.A., Electric-powered wheelchairs. IEEE Control System Magazine, 25(2): 22–34, 2005.
- [32] Linder, A., Kennel, R., Direct Model Predictive Control-A new Direct Predictive Control Strategy for Electrical Drives. IEEE European Conference on Power Electronics and Applications., 2005.
- [33] Yan, L., Yu, Q., Jiao, Z., Guo, Q., Analysis of the Controller with Disturbance Observer on Two Direct Drive Motor System. IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)., 1991–1996, 2016.
- [34] Kjerstad, O.K., Skjetne, R., Jenssen, N.A., Disturbance rejection by acceleration feedforward: Application to dynamic positioning. 18th IFAC World Congress., Milano, 2523–2528, 2011.
- [35] Espinosa, F., Lopez, E., Mateos, R., Mazo, M., Garcia, R., Application of advanced digital control techniques to the drive and trajectory tracking system of a wheelchair for the disabled. 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 521-528, 1999.

- [36] Nguyen, N.T., Su, S.W., Nguyen, H.T., Robust neuro-sliding mode multivariable control strategy for powered wheelchairs. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 19(1): 105–111, 2011.
- [37] Shim, H.M., Hong, J.P., Chung, S.B., Hong, S.H., A powered wheelchair controller based on master-slave control architecture. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics.*, 1553–1556, 2001.
- [38] Seki, H., Ishihara, K., Tadakuma, S., Novel Regenerative Braking Control of Electric Power-Assisted Wheelchair for Safety Downhill Road Driving. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, 56(5): 1393 - 1400, 2009.
- [39] Takahashi, K., Seki, H., Tadakuma, S., Safety driving control for electric power assisted wheelchair based on regenerative brake. *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, 2492–2497, 2006.
- [40] Seki, H., Iijima, T., Minakata, H., Tadakuma, S., Novel step climbing control for power assisted wheelchair based on driving mode switching. *IECON-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics.*, 3827–3832, 2006.
- [41] Fang, L., Lu, T., Yuan, K., Shen, X., Li, Lifeng., Design and Development of an Electric-Powered Stair-climbing Wheelchair. *9th World Congress on Intelligent Control and Automation.*, 474-479, 2011.
- [42] Nomura, S., Murakami, T., Power assist control of electric wheelchair using equivalent jerk disturbance under slope environment. *Int. Work. Adv. Motion Control (AMC).*, 572–576, 2010.
- [43] Seki, H., Sugimoto, T., Tadakuma, S., Novel Driving Control of Power Assisted Wheelchair Based on Minimum Jerk Trajectory. *IEEJ Transactions on Electronics Information and Systems.*, 125(7):1133-1139, 2005.
- [44] Seki, H., Tadakuma, S., Straight and Circular Road Driving Control for Power Assisted Wheelchair Based on Fuzzy Algorithm. *IECON-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics.*, 3898 - 3903, 2006.
- [45] Katsura, S., Ohnishi, K., Advanced Motion Control for Wheelchair in Unknown Environment. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics.*, 4926–4931, 2006.
- [46] Hsueh, P.W., Tsai, M.C., Pan, H.T., Grandjean, A., Integrated synchronized motion control for a force sensorless power-assisted wheelchair. *IFAC Proc.*, 18(1): 5956–5961, 2011.
- [47] Petersson, D., Johansson, J., Holmberg, U., Åstrand, B., Torque sensor free power assisted wheelchair. *IEEE 10th Int. Conf. Rehabil. Robot. ICORR'07.*, 151–157, 2007.

- [48] Suzuki, R., Doi, M., Kobayashi, N., Furuya, S., IMC Design with Limiting Properties of LQR and Its Application to Trajectory Tracking Control. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applicationsno., 1:674 - 679, 1999.
- [49] Suzuki, R., Tani, M., Kobayashi, N., Design and development of single side driven wheelchairs by using internal model control. Proc. Int. Conf. Control Appl., 355–360, 2002.
- [50] Yuusuke, O., Sehoon, O., Hori, Y., A New Control Method for Power-assisted Wheelchair Based on the Surface Myoelectric Signal. IEEE Trans. Ind. Electron., 57(9):1–6, 2010.
- [51] Demeester, E., Nuttin, M., Vanhooydonck, D., Van Brussel, H., A model-based, probabilistic framework for plan recognition in shared wheelchair control: experiments and evaluation. Proc. 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 2:1456–1461, 2003.
- [52] Wang, H., Grindle, G.G., Connor, S., Cooper, R.A., An Experimental Method for Measuring the Moment of Inertia of an Electric Power Wheelchair. 29th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., 4798–4801, 2007.
- [53] Nguyen, S., Nguyen, H., Taylor, P., Hands-Free Control of Power Wheelchairs using Bayesian Neural Network Classification. In Proceedings of the IEEE, Conference on Cybernetics and Intelligent System., 1–3, 2004
- [54] Felzer, T., Nordmann, R., Alternative wheelchair control. Proc 1st Int. IEEE-BAIS Symp. Res. Assist. Technol., 7:67–74, 2007.
- [55] Brown, K., Inigo, R., Johnson, B., Design, Implementation, and Testing of an Adaptable Optimal Controller for an Electric Wheelchair. IEEE Transactions on Industry Applications., 26(6): 1144 - 1157, 1990.
- [56] Wada, M., Kameda, F., A joystick type car drive interface for wheelchair users. Proc. - IEEE Int. Work. Robot Hum. Interact. Commun., 78–83, 2009.
- [57] Sankardoss, V., Geethanjali, P., Parameter estimation and speed control of a PMDC motor used in wheelchair. Energy Procedia., 117: 345–352, 2017.
- [58] Farooq, A., Riaz, A., Alyeai, B.R., Qureshi, I.M., Velocity Control of a Wheelchair Using IMC-PID and IMC-PID Hybridized with Neural Network. IJAIASD., 4(2): 19–30, 2016.
- [59] Widyotriatmo, A., Rauzanfiqr, S.K., Suprijanto., A modified PID algorithm for dynamic control of an automatic wheelchair. IEEE Conf. Control. Syst. Ind. Informatics (ICCSII)., 64–68, 2012.

- [60] Seki, H., Kiso, A., Disturbance road adaptive driving control of power-assisted wheelchair using fuzzy inference. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS., 1594–1599, 2011.
- [61] Kuo, C.H., Siao, J.W., Development of an intelligent power assisted wheelchair using fuzzy control systems. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern., 2578–2583, 2008.
- [62] Seki, H., Tanohata, N., Fuzzy control for electric power-assisted wheelchair driving on disturbance roads. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev., 42(6):1624–1632, 2012.
- [63] Murakami, H., Seki, H., Minakata, H., Tadakuma, S., Operationality improvement control of electric power assisted wheelchair by fuzzy algorithm. Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., 1-6, 2009.
- [64] Clearesta, E., Wardhana, A.A., Widyotriatmo, A., Suprijanto., Adaptive Control for Velocity Control of an Electric Wheelchair. 3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA), 222–226, 2013.
- [65] Katsura, S., Ohnishi, K., A wheelchair type mobile robot taking environmental disturbance into account. 7th Int. Work. Adv. Motion Control. Proc. (Cat. No.02TH8623), 500–505, 2002.
- [66] Katsura, S., Ohnishi, K., Advanced motion control for wheelchair in unknown environment. Conf. Proc.-IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern., 4926–4931, 2007.
- [67] Cao, F., Wang, X., Shi, J., Robust H-infinity control of intelligent autonomous navigation wheelchair. Proc.-IEEE 9th Int. Conf. Mob. Ad-Hoc Sens. Networks, MSN 2013., 461–464, 2013.
- [68] Henke, B., Sagou, Y., Terashima, K., Sawodny, O., Concept , Modeling and Robust Control of a New Type of Wheelchair. IROS Workshop on Progress, Challenges and Future Perspectives in Navigation and Manipulation Assistance for Robotic Wheelchairs, 2012.
- [69] Ackermann, M., Leonardi, F., Costa, H.R., Fleury, A.T., Modeling and optimal control formulation for manual wheelchair locomotion: The influence of mass and slope on performance. Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics., 1079–1084, 2014.
- [70] Chen, X., Chase, J.G., Wolm, P., Anstis, I., Oldridge, J., Hanbury-Webber, W., Elliot, R., Pettigrew, W., System identification and modelling of front wheel drive electric wheelchairs. IFAC Proc., 17(1):3076-3081, 2008.

- [71] Atesoglu, Ö., Nearly Time-Optimal Point To Point Navigation Control Design for Power Wheelchair Dynamics. Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl., 953–959, 2006.
- [72] Saadatzi, M.N., Poshtan, J., Multivariable robust controller for linear and angular velocities of electrically-powered wheelchair using characteristic loci method. Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl., 1246–1250, 2010.
- [73] DiGiovine, C.P., Encyclopedia of Disability Wheelchair, Electric. 1631–1633, 2006.
- [74] Albrecht, G., Encyclopedia of Disability, 1630–1631, 2006.
- [75] Woods, B., Watson, N., Encyclopedia of Disability Wheelchair. History of wheelchair, 2006.
- [76] Cooper, R.A., Wheelchair Selection And Configuration. Pittsburgh, USA, 1998.
- [77] The National Institute for Rehabilitation Engineering., Mobility Training for User and Public Safety (with motorized wheelchairs and scooters), <http://www.schepens.harvard.edu/images/stories/nire/mobility-training.pdf>, 2004
- [78] Najafi, L., Long, D., Powered Wheelchairs. Clinical Engineering: A Handbook for Clinical and Biomedical Engineers, 351-358, 2013.
- [79] SCI model system., The Manual Wheelchair: What the SCI Consumer Needs to Know, <http://www.msctc.org/sci/model-system-centers>, Erişim Tarihi: 07.03.2018.
- [80] Disabled Living Foundation., Choosing a powered wheelchair, <http://www.dolphinlifts.co.uk/images/library/documents/choosing-a-powered-wheelchair-by-disabled-living-foundation.pdf>, 2006.
- [81] Li, Z., Yang, C., Fan, L., Advanced control of wheeled inverted pendulum systems Handbook. Springer-Verlag, London, 2013.
- [82] Kwon, W.H., Receding horizon control: model predictive control for state models-Advanced textbooks in control and signal processing. Springer-Verlag, London, 2005.
- [83] Ogata, K., Modern Control Engineering Fifth Edition, Pearson Education, Inc, New Jersey, 912, 2009.
- [84] Naidu, D.S., Handbook of Optimal Control Systems. CRC Press, 2003.
- [85] Craig, J.J., Introduction to Robotics. Mechanics and control Handbook Third Edition. Pearson Education International, 2005.

- [86] Özdemir, A., Erdem, Z., Usuman, I., State-Space Modeling of an EPW in Discrete Time and an Observer Design for State Variable Estimation. *Acta Physica Polonica A.*, 129(1): 228–232, 2016.
- [87] <https://www.encyclopedia.com/social-sciences/applied-and-social-sciences-magazines/jacobian-matrix.>, Erişim Tarihi: 10.03.2018.
- [88] Landau, I.D., Zito, G., *Handbook Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation.* Springer-Verlag, London, 2006.
- [89] Chernousko, F.L., Ananievski, I.M., Reshmin, S.A., *Handbook of Communications and Control Engineering.* Springer, London, pp: 1-396, 2008.
- [90] Golnaraghi, F., Kuo, B., *Handbook of Automatic Control System* ninth edition. John Wiley and Sons, 2009.
- [91] Wang, H., Salatin, B., Grindle, G.G., Ding, D., Cooper, R.A., Real-time model based electrical powered wheelchair control. *Med. Eng. Phys.*, 3(10): 1244–1254, 2009.
- [92] Ayten, K.K., Dumlu, A., Kaleli, A., Real-Time Trajectory Tracking Control for Electric-Powered Wheelchairs Using Model-Based Multivariable Sliding Mode Control. 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering., 1-6, 2017.
- [93] Tian, Z.H., Xu, W.H., Electric wheelchair controller based on parameter self-adjusting fuzzy PID. *Proc. 2009 Int. Conf. Comput. Intell. Nat. Comput. CINC.*, 358–361, 2009.
- [94] Ghani, N.M.A., Tokhi, M.O., Nasir, A.N.K., Ahmad, S., Control of a Stair Climbing Wheelchair. *Int. J. Robot. Autom.*, 18-25, 2012.
- [95] Passino, K.M., Yurkovich, S., *Fuzzy Control Handbook.* Addison Wesley Longman, pp:480, 1998.
- [96] Abramovitch, D., Some Crisp Thoughts on Fuzzy Logic. *American Control Conference.*, Maryland, 168–172, 1994.
- [97] Ghani, N.M.A., Nasir, A.N.K., Hassan, M.A.H., Tokhi, M.O., PD-fuzzy Control of a Stair Climbing Wheelchair. *AASRI Procedia*, 18–25, 2013.
- [98] Åström, K.J., Wittæenmark, B., *Adaptive Control Handbook.* pp:580, 1994.
- [99] Landau, I.D., Lozano, R., M'Saad, M., Karimi, A., *Adaptive Control Handbook.* Springer-Verlag, London, 2011.

- [100] Cruz, C.D.L., Bastos, T.F., Carelli, R., Adaptive motion control law of a robotic wheelchair. *Control Eng. Pract.*, 19(2): 113–125, 2011.
- [101] Chandrasekharan, P.C., *Robust Control of Linear Dynamical Systems*. Academic Press, 1996.
- [102] Lin, F., *Robust Control Design: An Optimal Control Approach*. John Wiley and Sons Ltd, pp:364, 2007.
- [103] Geering, H.P., *Optimal Control with Engineering Applications*. Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [104] Kirk, D.E., *Optimal Control Theory an Introduction*. Dover Publications, New York, 1998.
- [105] Moudgalya K.M, *Digital Control*. John Wiley and Sons, 2007.
- [106] Kumar, V.E., Jerome, J., Ayyappan, S., Comparison of four state observer design algorithms for MIMO system. *Arch. Control Sci.*, 23(2): 243–256, 2013.
- [107] O'Reilly, J., *Observers for Linear Systems*. Academic Press, London, 1983.
- [108] Luenberger, D.G., Observing the State of a Linear System. *IEEE Trans. Mil. Electron.*, 8(2):74–80, 1964.
- [109] Camacho, E.F., Bordons, C., Model predictive control for networked control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control.*, 19(9):1016–1035, 2009.
- [110] Wang, L., *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. Springer, 2009.
- [111] Li, S., Yang, J., Chen, W.H., Chen, X., *Disturbance Observer-Based Control Methods and Applications*. CRC Press, pp:1–314, 2014.
- [112] <http://www.americanwheelchairs.com/specrampmoddesign.shtml>,
Erişim Tarihi: 26.05.2018.

ÖZGEÇMİŞ

Ilona Usuman, 05.02.1977'da Endonezya Luwuk'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Luwuk'da tamamladı. 1994 yılında Luwuk İkinci Lisesi'nden mezun oldu. 1994 yılında başladığı Gadjah Mada Üniversitesi Elektronik Bölümü'nü 2000 yılında bitirdi. 2003 yılında Gadjah Mada Üniversitesi Bilgisayar Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Elektrik Elektronik Muhendisliği Bölümü'nde Doktora eğitimine başladı.