

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RAYLI ULAŞIM ARACI İÇİN KONTROL VE
KUMDANDA SİSTEMİNİN TASARIMI**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSTAN MERKEZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kontrol ve Bilgisayar Müh. Ali Fuat ERGENÇ
(504991064)

103983

103983

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Temmuz 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Ağustos 2001

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Salman KURTULAN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Atilla BİR (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Nejat TUNCAY (İ.T.Ü.)

AĞUSTOS 2001

ÖNSÖZ

Ülkemizin günümüzdeki durumu göz önüne alındığında ulaşımın ağırlıklı olarak karayolu üzerine kurulduğu görülmektedir. Fosil yakıtların tükenmesi ve çevre için oldukça zararlı olması sebeplerinden dolayı raylı ulaşım sistemlerine hem ekonomik açıdan hemde ekolojik açıdan geçilmesi kaçınılmazdır. Raylı ulaşım sistemleri yük taşımacılığı bir yana şehir içinde hem estetik hem güvenlik hem de konfor açısından ulaşımında tercih edilen sistemlerdir.

Şehir içi ulaşımında bu kadar avatanjı bünyesinde bulunduran elektrikli raylı ulaşım aracının yaygınlaşmasının gerekliliği ülkemizde yakın bir geçmişte anlaşılmıştır. Ulaşım aracının imal edecek teknik bilgi ve teknoloji günümüze kadar etkin bir biçimde kullanılamamış ve araçlar ithal etme yolu ile temin edilmiştir. Bir ulaşım aracının en önemli kısmı olan kumanda ve kontrol sisteminin tasarımı tezime konu olmuştur.

Uzun zamandır yürütülen elektrikli raylı ulaşım aracı kumanda ve kontrol sistemi projesine beni dahil ederek ülkeme katkıda bulunmama fırsat verdiği ve elinden gelen her türlü teknik ve teorik desteği esirgemediği için danışman hocam Doç. Dr. Salman Kurtulan'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca her türlü kararında beni destekleyen, bilgi ve becerilerimi geliştirmem için hiçbir olanağı esirgemeyen ve mühendislik mesleğini bana sevdiren babama ve anneme şükranlarımı sunarım.

Temmuz 2001

Ali Fuat Ergenç

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ULAŞIM ARACININ ELEKTRİKSEL DONANIMI	3
2.1. Altsistemlerin Yapısı	4
2.1.1. Güç besleme sistemi	4
2.1.2. Motor sürücü alt sistemi	6
2.1.3. Kumanda kontrol ve iletişim alt sistemi	7
3. KUMANDA İŞARETLERİNİN BELİRLENMESİ	8
3.1. Güç Besleme Sistemine Ait Kumanda ve Durumlar	8
3.1.1. Ana besleme alt sistemine ait kumanda ve durumlar	8
3.1.2. Yardımcı besleme alt sistemine ait kumanda ve durumlar	11
3.1.3. Akü grubu alt sistemine ait kumanda ve durumlar	11
3.2. Kumanda, Kontrol ve İletişim Sistemine Ait Kumanda ve Durumlar	12
3.2.1. Referans ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar	12
3.2.2. Kumanda ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar	13
3.2.3. Kapı ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar	14
3.2.4. İletişim ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar	16
3.2.5. Ölçüm ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar	17
3.2.6. Hata lojiği alt sistemine ait kumanda ve durumlar	17
3.3. Sürücü Motor Sistemine Ait Kumanda ve Durumlar	17
3.3.1. Motor ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar	17
3.3.2. Fren alt sistemine ait kumanda ve durumlar	19
4. MATEMATİKSEL MODEL	20
4.1. Matematiksel Modelin Çıkarılması	20
4.2. Matematiksel Modelin Parametrelerinin Belirlenmesi	27
4.3. Matematiksel Modelin İrdelenmesi	28

5. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI	30
5.1. Davranış Ölçütlerinin Belirlenmesi	30
5.2. Dayanıklı Kontrol Kavramı	34
5.3. Kontrolör Seçimi ve Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi	36
6. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	49



KISALTMALAR

KABA AKT	: Kabin A aktif
KABBAKT	: Kabin B aktif
PANTYU	: Pantograf yukarı
PANTAŞ	: Pantograf aşağı
ADK	: Ana devre kesici
AŞG	: Aşırı gerilim
SHG	: Sıfır hat gerilimi
AŞMA	: Aşırı motor akımı
ŞSA	: Şarj sigortası atık
FYSA	: Faz ve yardımcı devre sigortaları atık
ADKON	: Ana devre kesici kapa
ŞK	: Şarj kontaktörü
AKŞK	: Aktive et şarj kontaktörü
ŞD	: Şarj direnci
RESADK	: Reset ana devre kesici
ŞKH	: Şarj kontaktörü hatası
İZON	: İzolatör anahtarı kapalı
SHG	: Sıfır hat gerilimi
BKK	: Batarya kontaktörü kapalı
ADKH	: Ana devre kesici hatası
AAADK	: Aşırı akım ana devre kesici
AHG	: Aşırı hat gerilimi
AGKH	: Aşırı gerilim kısıcısında hata
AGKAS	: Aşırı gerilim kısıcısında aşırı sıcaklık
MYAH	: Motor ve yardımcı besleme akımı hatası
YIH	: Yardımcı inverterde hata
YIAS	: Yardımcı inverterde aşırı sıcaklık
FRDRAS	: Frenleme direncinde aşırı sıcaklık
380KH	: 380V kontaktörü hatası
MAH	: Motorda aşırı akım hatası
MKH	: Motor kontaktörü hatası
EDABH	: Elektronik devreler ve aktüatör beslemelerinde hata
ABG	: Aşırı batarya gerilimi
DHGH	: Düşük hat gerilimi hatası
380VOK	: 380V hazır
YBKOND	: Yardımcı besleme kaynağı hazır değil
MMON	: Motor modül çalışıyor
AKSGK	: Aktive et soğutucu kontaktörü
SAA	: Soğutucuda aşırı akım
SGMON	: Soğutucu motorları çalışıyor
SGK	: Soğutucu kontaktörleri kapalı
SGON	: Soğutucu çalışıyor

AKOMP	: Aktive et kompresör
KOMAA	: Kompresörde aşırı akım
KOMPON	: Kompresör çalışıyor
BATKON	: Batarya kontaktörü kapa
BATTUT	: Batarya tut
BATKOFF	: Batarya kontaktörü aç
BATON	: Batarya çalışıyor
ACDSİ	: Acil durum sinyali
ANA	: Ana
ANAOK	: Ana hazır
GE	: Güç emri
FE	: Fren emri
ACDUF_D	: Acil durum freni çekilmiş değil
YACDUF	: Yolcu acil durum freni
GÜÇ	: Güç
GÜÇD	: Güç değil
İLERİ	: İleri
GERİ	: Geri
UY1OK	: Uydu 1 hazır
UY2OK	: Uydu 2 hazır
UY3OK	: Uydu 3 hazır
BIRUY	: Bir uydu var
İKİUY	: İki uydu var
UCUY	: Üç uydu var
AÇSOL	: Aç sol kapılar
AÇSAĞ	: Aç sağ kapılar
KAPIKA	: Kapı kapa
AÇSOL_A	: Aç sol kapılar A kabininden
AÇSOL_B	: Aç sol kapılar B kabininden
AÇSAĞ_A	: Aç sağ kapılar A kabininden
AÇSAĞ_B	: Aç sağ kapılar B kabininden
KAPIKA_A	: Kapa kapılar A kabininden
KAPIKA_B	: Kapa kapılar B kabininden
OKAÇ	: Kapı açılmaya hazır
KAKO	: Kapı kontaktörü
K1OK	: Kapı 1 tamam
K2OK	: Kapı 2 tamam
K3OK	: Kapı 3 tamam
K4OK	: Kapı 4 tamam
K5OK	: Kapı 5 tamam
K6OK	: Kapı 6 tamam
K7OK	: Kapı 7 tamam
K8OK	: Kapı 8 tamam
KKONAY	: Kapı kapalı onayı
ADKOFF	: Ana devre kesici aç
AYKA	: Aydınlatmaları kapa
AYAÇ	: Aydınlatmaları aç
HARES	: Hata reseti
FRSAL	: Frenleri sal
TRENSONU	: Tren sonu

KAKA_D	: Kapı kapalı değil
RAYFR	: Rayfreni
FRSALINDI_U1	: Fren salındı uydu 1
FRSALINDI_U2	: Fren salındı uydu 2
FRSALINDI_U3	: Fren salındı uydu 3
ACREF_1	: Acil durum referansı 1
ACREF_2	: Acil durum referansı 2
ACREF_3	: Acil durum referansı 3
TESTTX	: Test sinyali giden
TESTTX_1	: Test sinyali giden uydu 1
TESTTX_2	: Test sinyali giden uydu 2
TESTTX_3	: Test sinyali giden uydu 3
H1	: Dingil 1 hızı
H2	: Dingil 2 hızı
H3	: Dingil 3 hızı
H4	: Dingil 4 hızı
H5	: Dingil 5 hızı
H6	: Dingil 6 hızı
HÖ1H	: Hız ölçümü 1 hatalı
HÖ2H	: Hız ölçümü 2 hatalı
HÖ3H	: Hız ölçümü 3 hatalı
HÖ4H	: Hız ölçümü 4 hatalı
HÖ5H	: Hız ölçümü 5 hatalı
HÖ6H	: Hız ölçümü 6 hatalı
HIZH	: Hızlanma hızı
HIZY	: Yavaşlama hızı
GHAZIR	: Güçlenmeye hazır
HAZIR	: Hazır
KOŞ	: Koş
SAHATA	: Sürücü hatası
SSAL	: Sürücü salıverme
MOTKON	: Motor kontaktörü kapalı
YÖN	: Yön
SENKHIZ	: Senktron hız
AŞHIZ	: Aşırı hız
SAŞSICH	: Sürücüde aşırı sıcaklık
MAŞICH	: Motorda aşırı sıcaklık
MKİT	: Motor kilitlendi
MHIZ	: Motor hızı
MGER	: Motor gerilimi
MAK	: Motor akımı
DAGER	: Doğru akım bara gerilimi
YAZH	: Yazma hatası
OKUH	: Okuma hatası
ON_OFF	: Aç kapa
AYNOKGEÇ	: Ayar noktası geçerli
ACDUR	: Acil dur
SAL	: Sal
JOG	: Jog
RESET	: Reset

GUVPED	: Güvenlik pedalı
FRV1	: Fren valfi 1
FRV2	: Fren valfi 2
FRV3	: Fren valfi 3
DONDUR	: Dondur
F1SA	: Fren 1 salındı
F2SA	: Fren 2 salındı
F3SA	: Fren 3 salındı
FRSALINDI	: Frenler salındı



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Fren momentinin valflerin durumlarına göre değerleri	26



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Araç içi görev dağılımı	3
Şekil 2.2 : Ulaşım aracının güç besleme devrelerinin prensip şeması	5
Şekil 2.3 : Yardımcı güç devresi ve yardımcı araçlar	6
Şekil 4.1 : Kayma- sürtünme katsayısı grafiği	23
Şekil 4.2 : Aracın hızlanma matematiksel modeli.....	24
Şekil 4.3 : İndirgenmiş matematiksel model.....	25
Şekil 4.4 : Aracın yavaşlama matematiksel modeli.....	27
Şekil 5.1 : $\xi=0.707$ için sistem cevabı	31
Şekil 5.2 : Kutup atama bölgesi.....	33
Şekil 5.3 : PI-D Kontrolörünün prensip şeması.....	37
Şekil 5.4 : PI Kontrolör ile sistemin köklerinin yereğrisi.....	38
Şekil 5.5 : Basamak ve impuls cevapları.....	39
Şekil 5.6 : Kütlenin azalması durumunda jerk değişimi.....	39
Şekil 5.7 : PI-D Kontrolörlü blok diyagram	40
Şekil 5.8 : $\delta\Gamma$ Sınırları.....	41
Şekil 5.9 : Ortalama kütle ve yarıçap için sistem cevabı.....	43
Şekil 5.10 : Üst sınır değer için sistem cevabı	44
Şekil 5.11 : Alt sınır değer için sistem cevabı	45

SEMBOL LİSTESİ

$k_0, k_1, k_2,$	: Davis formülü katsayıları
$F_{HS}, F_D, F_G,$	: Direnç kuvvetleri
v	: Hız
D	: Tekerlek çapı
D'	: Aşınmamış tekerlek çapı
m	: Araç kütlesi
$c_1, c_2, c_3,$	: Mützner formülü katsayıları
g	: Yerçekim ivmesi
R	: Dönüş yarıçapı
θ	: Eğim açısı
$\ddot{u}$	: Redüktör dişli çevirme oranı
η	: Redüktör dişli verimi
μ	: Coulolmb sürtünme katsayısı
ω	: Radyal ve dairesel momentler
r	: Tekerlek yarıçapı
λ	: Kayma
p	: Dönel kütlelerin toplam atalete etki katsayısı
a	: İvme
τ	: Sürücü transfer fonksiyonu zaman sabiti
T	: Sürücü transfer fonksiyonu ölü zamanı
K	: Sürücü transfer fonksiyonu kazancı
m_m	: Motor momenti
u_m	: Sürücü kontrol işareti
s	: Laplace değişkeni
ξ	: Sönüm oranı
ω_n	: Doğal frekans
t_r	: Yükselme zamanı
t	: Zaman
Γ	: Gamma bölgesi
$\delta\Gamma$	: Gamma bölgesi sınırları
Δ	: Karakteristik polinom
σ	: Gerçek kısım
ω	: İmajinel kısım
q	: Değişken parametre vektörü
Q	: Değişken parametre uzayı
α	: Parametre değişkeni
β	: Parametre değişkeni
γ	: Parametre değişkeni
K_p	: Oransal katsayı
T_i	: İntegral zaman sabiti
T_d	: Türev zaman sabiti

RAYLI ULAŞIM ARACI İÇİN KONTROL VE KUMANDA SİSTEMİNİN TASARIMI

ÖZET

Elektrikli ulaşım araçları günümüzde enerji sorunu ve çevre kirliliği nedenleriyle en uygun ulaşım sistemi durumundadır. Başlangıçta sadece basit kumanda aygıtları ile çalıştırılan araçlar gelişen teknoloji yardımıyla ileri düzeyde kontrol ve kumanda sistemleri ile donatılmıştır. Çağdaş ulaşım araçları onlarca giriş ve çıkış noktası bulunan hareketli endüstriyel sistemler gibi düşünülebilir. Endüstriyel kontrol ve kumanda sistemleri tasarlama metodları ve gerçekleştirme yöntemleri ulaşım aracı için de kullanılabilir.

Bir ulaşım aracı kontrol ve kumanda sisteminin tasarımında en önemli aşama ihtiyaca uygun, esnek ve ucuz bir kontrolör seçmektir. Belirlenen ihtiyaçlar göz önüne alındığında en uygun çözümün PLK olacağı görülmektedir. PLK nin görevi sürücü kişi tarafından verilecek kumandaları ve kontrol isteklerini değerlendirmek, ve aracın istenilen davranışı sağlaması için gerekli lojik fonksiyonları gerçeklemek ve kontrol işaretlerini üretmek ve vagonlar arası iletişimi sağlamaktır.

Kumanda sisteminin tasarımı için aracın tüm kumanda büyüklükleri çıkartılmıştır ve lojik fonksiyonlar halinde elde edilmiştir. Bu aynı zamanda PLK seçimi için bir etken olmuştur.

Kontrol sisteminin tasarımı için aracın hareket kontrolündeki istenilen davranış kriterleri ortaya konmuştur. Ergonomik standartlar göz önünde bulundurularak sınırlar belirlenmiş ve sistem davranışının kütle ve tekerlek yarıçapı değişiminden dolayı oluşan model değişikliklerinin sebep olduğu davranış bozukluklarından en az derecede etkilenmesi için parametrik dayanlı kontrol yöntemleri ile kontrolör parametreleri belirlenmiştir.

İletişim sisteminin tasarımında vagonlar arası aktarılması gereken veriler belirlenmiş ve hızlı, güvenilir bir iletişim kurulması için donanım seçilerek gerekli algoritma kurulmuştur.

LIGHT RAIL VEHICLE (LRV) CONTROL SYSTEM DESIGN

SUMMARY

Electrical transporting vehicles most appropriate transporting system because of energy sources lackness and ecological pollution. At the beginning vehicles were controlled by simple control apparatus, by the development in technology control systems were improved. Contemporary LRV's can be assumed industrial systems, which have tens of inputs and outputs. Design and realizing tools for industrial control systems can be used for LRV's.

Most important phase at control system design is choosing most efficient, flexible and cheap controller. When we consider demands, it is evident that most proper controller is programmable logic controller (PLC). Tasks of PLC are getting commands and references of driver person and realizing logical functions and control signals for motion and communicate with other wagon's PLCs

The first step to design and realize logical functions is to define logical states, input and outputs. Realizing logical functions was very important reason to choose PLC for controller.

Before control system design systems response criterion was defined. Because of ergonomical standarts some boundaries are determined. Aim of design was figured as to hold response in these boundaries despite changing of mass and diamater of wheels of vehicle. Solution is found by usind robust control system design with parametric approach.

In designing of communication system the datas, which had to be, carried wagon to other are determined and selected appropriate hardware and structured required algorithm.

1. GİRİŞ

XIX. yüzyılın ortalarından ortalarından itibaren şehir ulaşımının yükünü kaldırmaya başlayan raylı ulaşım araçları, bir çok metropolde yerlerini XX. yüzyılın ikinci çeyreğinde içten yanmalı motorlarında gelişimi ile yaygınlık kazanan ve yatırım maliyetleri daha düşük olan otobüslere bırakmışlardır. Yüzyılın ikinci yarısında belirlemeye başlayan yakıt maliyetleri, çevre kirliliği, trafik sıkışmaları gibi etkenlerden dolayı raylı ulaşım araçlarını büyük şehirlerde ulaşım sorununa çözüm için etkili bir yol olarak tekrar görülmeye başlandı. Teknolojik gelişmeye paralel olarak kısa mesafede hızlanma ve etkin frenleme sistemleri ile donatılmış raylı ulaşım araçları çağdaş şehirlerin vazgeçilmez öğeleridir. Dünyanın birçok şehrinde raylı ulaşım değişik tipte araçlarla yerel çözümler getirildiği gibi genel kullanım şekli ile hafif metro tarzındadır.

Hafif metro araçları, klasik metro araçları ve tramvaylar arasında araçlardır, tramvayların aksine metro araçları kadar hızlıdır ve tramvaylar gibi genel olarak yer üstünde, tercihli yollarda giderler. Bu sebeplerden dolayı klasik metro ve tramvaylara göre daha iyi cer ve fren sistemlerine sahip olmalıdırlar. Yolculukları esnasında güvenilir olmaları bu sistemlerin iyi olması kadar tüm aracın kontrol ve kumanda sisteminin iyi düşünülmüş ve gerçekleştirilmiş olmasına da bağlıdır. İlk başlarda mekanik düzenlerle kontrol edilen araçlar, zamanla elektromekanik daha sonraları elektronik ve günümüz teknolojisinden faydalanarak sayısal tabanlı bilgisayarlar ile kontrol edilir hale gelmiştir. Bilgisayarlar ile kontrol edilmesinin avantajları esnek kumanda algoritmalarının kurulması, daha etkin kontrol yöntemlerinin uygulanması ve hızlı, güvenilir iletişim yetenekleri bulunması olarak özetlenebilir.

Bu tezde, bir raylı ulaşım aracında bulunması gereken kumanda ve kontrol büyüklüklerine değinilmiş, kumanda ve kontrol algoritmaları kurulmuş ve araç içi güvenli iletişim olanakları belirlenmiş gerçekleşmiştir. Tüm sayılan işlerin gerçekleşmesi sayısal tabanlı endüstriyel bir kontrolör olan PLK (Programlanabilir Lojik Kontrolör) ile olmuştur. Endüstriyel uygulamalarda başarı ile kullanılan PLK

gerek lojik fonksiyonların gerçeklenmesi gerek kayan tam ve kayan nokta aritmetiği ile sayısal hesaplara imkan vermesi gerekse yerleşmiş iletişim olanaklarının bulunması ile bir ulaşım aracı kontrol ve kumanda sisteminin gerçeklenmesinde en uygun yapıdır. Ulaşım araçları için özel tasarlanmış bilgisayarlar bulunmasına rağmen yeni bir araç için yeni bir tasarım oldukça pahalı ve probleme özel çözüm olduğundan dolayı tercih edilmemiştir.

Tezin ilerleyen kısımlarında kumanda ve kontrol işaretleri, iletişim gerekleri belirlenmiş ve problem ortaya konarak bir çözüm getirilmiştir. Kumanda işaretleri için lojik fonksiyonlar elde edilmiş, kontrol problemi için bir matematik model belirlenip dayanıklı kontrol kavramından faydalınarak yöntem önerilmiştir. İletişim için olanaklar araştırılıp güvenli ve ucuz bir çözüm getirilmiştir.

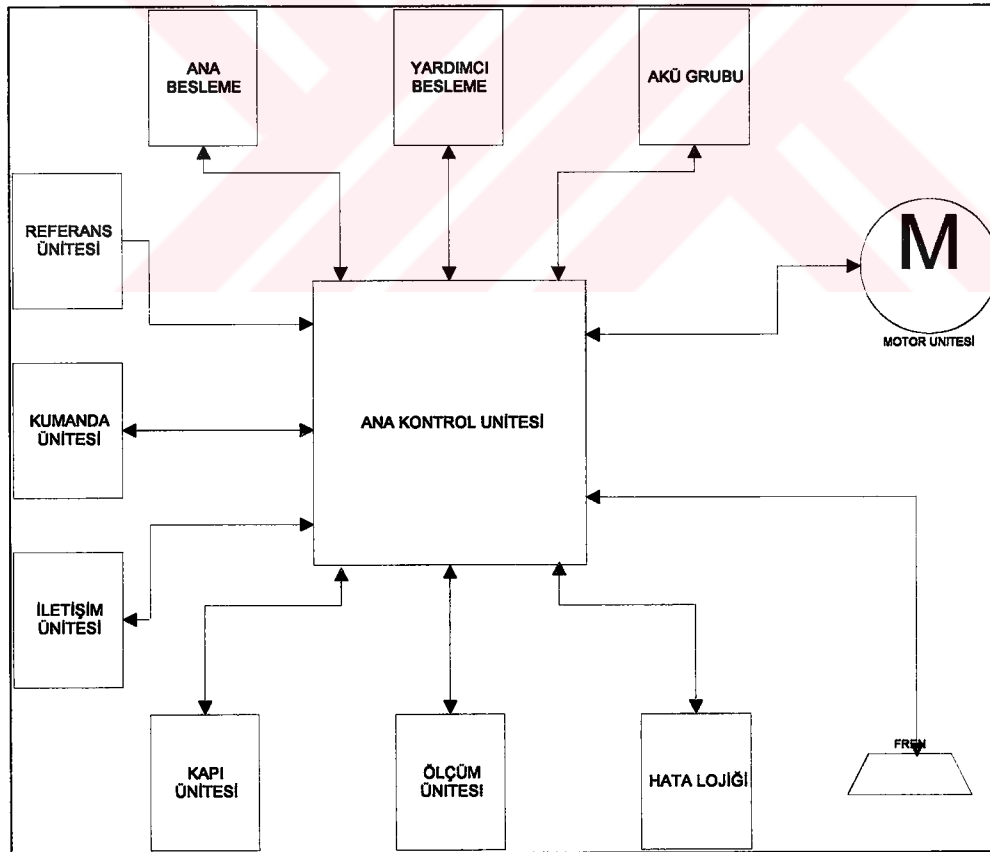


2. ULAŞIM ARACININ ELEKTRİKSEL DONANIMI

Bir elektrikli ulaşım aracının elektriksel sistemini üç ana başlık altında inceleyebiliriz.[9]

1. Güç besleme sistemi,
2. Kumanda, kontrol ve iletişim sistemleri,
3. Sürücü motor sistemi

Her bölüm tasarım ve gerçekleştirme aşamasında değişiklikler gösterir. Araç içi kumanda ve kontrol sistemini tasarlarken işlevsel bir görev dağılım şeması oluşturup, ayrı ayrı incelemek yerinde olacaktır. İşlevsel görev dağılım şeması şekil 2.1’dir.



Şekil 2.1. Araç içi görev dağılımı

Şekil 2.1’de gösterilen şemada, ana besleme, yardımcı besleme ve akü grubu güç besleme; sistemi, referans ünitesi, kumanda ünitesi, iletişim ünitesi, kapı ünitesi, ölçüm ünitesi ve hata lojiği; kumanda kontrol ve iletişim sistemleri; motor ve fren ünitesi de sürücü motor sistemi içinde değerlendirilebilir.

Güç besleme sistemi aracın ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini sabit tesislerden katener pantograf düzeneği yardımı ile alıp aracın kullanabileceği gerilim seviyelerine çeviren, pantografin aşağıda olması durumunda aküden gerekli araçların beslenmesini sağlayan devrelerden oluşur.

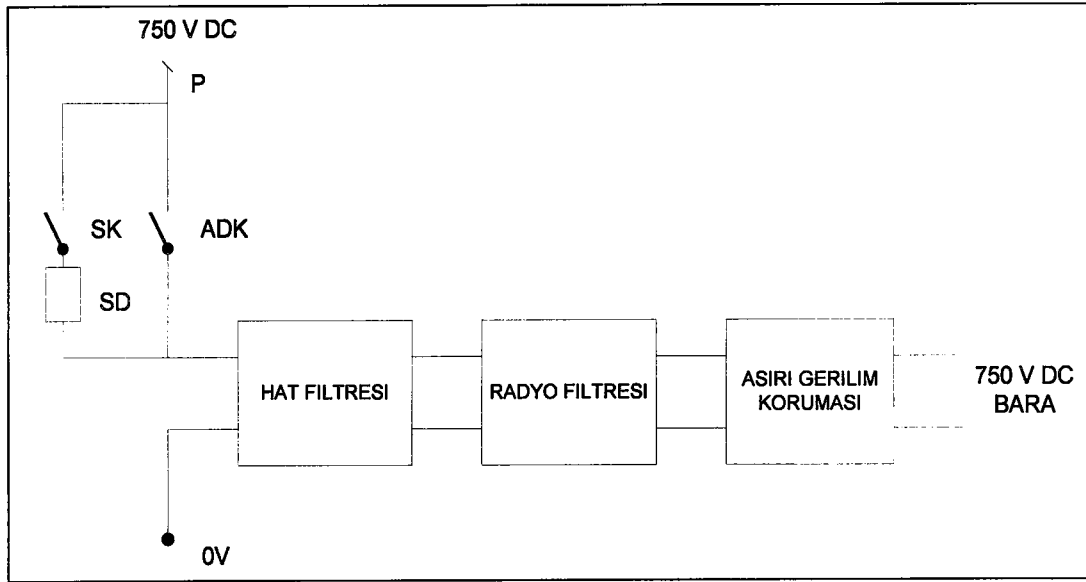
Sürücü motor sistemi besleme sisteminden alınan enerjiyi kontrol sisteminden gelen istekler doğrultusunda kontrollü olarak hareket enerjisine dönüştürmektedir. Aracın bu bölümü elektromekanik hızlandırma ve frenleme düzeneklerinden oluşur.

Kumanda kontrol ve iletişim sistemi sürücü kişi ya da merkezi bir bilgisayardan gelen istekleri aracın tüm iç ve dış noktalarından aldığı ölçümler ile birleştirip gerekli kumanda ve kontrol işaretlerini üreten, bu işaretleri vagonlar arasında ileten bölümdür. Bir ulaşım aracının en önemli ve özenle tasarlanması gereken bölümü burasıdır. Bulunan çözümler etkin, güvenli ve dayanıklı olmalıdır.

2.1 Altsistemlerin Yapısı

2.1.1 Güç besleme sistemi

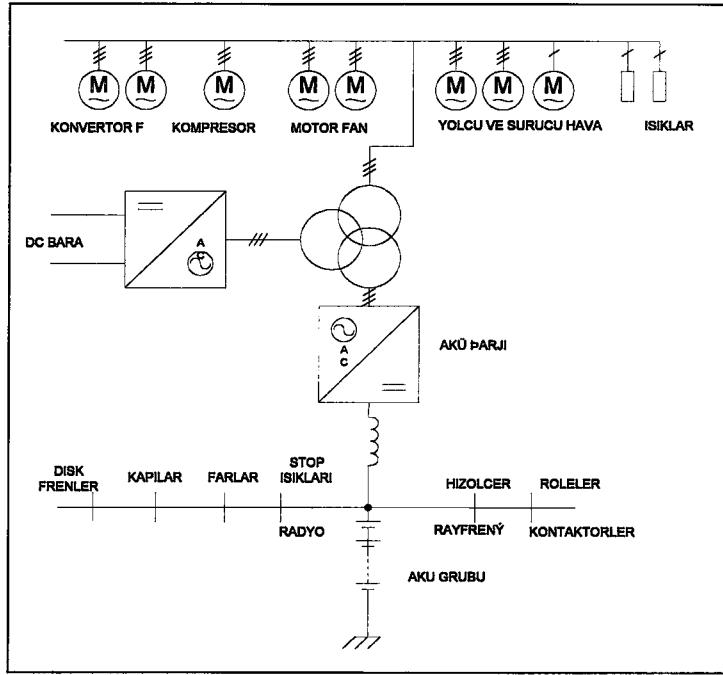
Elektrikli raylı ulaşım araçlarında yaygın olarak 750V-1500V doğru akımlı katener gerilimi kullanılır. Güç besleme sistemi 750 V ya da 1500V DA besleme gerilimini sürücü motor sisteminin kullanacağı, yardımcı araçların çalışacağı, ve genel kumanda ve kontrol sistemlerinin çalışması için gerekli gerilim seviyelerine dönüştürür. Şekil 2.2’de katener ile araç arasında bulunması gereken birimler görülmektedir.



Şekil 2.2 Ulaşım aracının güç besleme devresinin prensip şeması

Devrelerde bloklar içindeki elemanlar aracın boyutuna göre değişmektedir. Şekil 2.2' de görülen ana devre kesici (ADK) sistemle enerji hattının bağlanmasını sağlayan kontaktördür. Şarj kontaktörü (ŞK) şarj direnci (ŞD) üzerinden hat kondansatörünü doldurmaktadır. Hat kondansatörü ve hat endüktansından oluşan hat filtresi aracın devrelerini AC bileşenlerden ve aşırı akım yükselmelerinden korumak için konulmuştur. Filtredeki LC değeri buna uygun seçilmelidir. Radyo filtresi yüksek frekanslı işaretleri süzerek araç beslemesini arındırmaktadır, aşırı gerilim koruması da enerji geri kazanımından veya genel hat geriliminin artması sonucu bara gerilimindeki artışı bastıracak şekilde çalışmaktadır.

Şekil 2.2 deki ana enerji kaynağından daha sonra yardımcı kaynaklar beslenmektedir. Genel çerçeve içinde bu yardımcı kaynakların hangi araçları beslediği şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yardımcı güç devresi ve yardımcı araçlar

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere hattan alınan DA gerilim çeşitli fan ve aydınlatma araçlarını çalıştırmak için evirilmekte, evirilen gerilim bir transformatör yardımı ile iki ayrı alternatif gerilim besleme değerine dönüştürülür. Bunlardan biri kompresörü, sürücü motor fanlarını, konvertör fanlarını, kompartman ve sürücü vantilatörlerini ve kabin aydınlatmaları için kullanılırken diğeri doğrultucu ile tekrar DA gerilime çevrilip vagon içindeki çeşitli elemanları sürmek ve akü grubunu şarj etmek için kullanılır.

Aracın besleme devrelerinin güvenli çalışması için bu devrelerden çeşitli ölçümler alınır. Bir kumanda ve kontrol işleminde geri besleme çok önemli olup değişik amaçlar için kullanılır. Kumanda işleminde geri besleme olarak alınan işaretler kumanda ettiğimiz elemanların ve araçların durumlarını belirlemek için kullanılırken, kontrol işleminde geri besleme bilinen kontrol işlevindeki hata işaretini üretmek için kullanılır.

2.1.2. Motor sürücü alt sistemi

Motor sürücü sistemi aracın istenen hızlanma ve yavaşlama ivme değerlerine göre kontrol sistemi tarafından üretilen moment değerinin üretilmesi ve tekerlere aktarılması işlevini sağlar. Bu birim yavaşlama sırasında enerji geri kazanımı için

gerekli devreleri ve mekanik frenleme düzenekleri ile tümleşik olarak işlev görür. Günümüzde sürücü motor olarak doğru akım motoru ve asenkron motor yaygın olarak kullanılır. Her iki motor türünde de moment kontrolüne olanak sağlayan sürücü devreleri bulunmalıdır. Motor sürücü biriminin giriş işareti moment referansı işaretidir.

2.1.3. Kumanda kontrol ve iletişim alt sistemi

Araç için gerekli tüm kumanda, kontrol işaretlerinin üretildiği ve taşıtlar arası iletişiminin sağlandığı birimdir. Modern araçlarda sayısal işlemci tabanlı özel aygıtlarla gerçekleştirilmektedir. Sürücü kişinin kumanda istekleri doğrultusunda güç besleme devresi, kapı hareket devresi, motor sürücü sistemi için kontrol ve kumanda işaretleri üretilir. İşlev olarak çeşitli birimlerden oluşur. Bunlardan Referans birimi gerekli hareket isteklerini alan ve kontrol sistemine aktaran kısımdır. Kapı hareket birimi seyir güvenliğinde önemli bir yer tutan kumanda işaretlerini üretir. Bu birim kumanda sisteminden gelen emirler doğrultusunda kapıları açıp kapayan, kapıların durumları hakkında hata lojiği birimine bilgi veren kısımdır. Ölçüm ünitesi tüm sistemlerden analog veya dijital ölçümler alan ve bunları kontrol kumanda ve hata lojiği ünitelerine aktaran kısımdır. Hata lojiği aracın herhangi bir yerinde hata oluşması halinde neler yapılacağına karar veren ve hataları kumanda birimine aktaran kısımdır. İletişim kısmı sürücü kişinin tüm kumandalarının ve referanslarının diğer vagonlara aktarılmasını, diğer vagonların durumlarını ana vagona aktarılmasını sağlamaktadır. İletişimin kopması durumunda sistem önceden belirlenmiş bir davranış içine girmelidir. Bu davranış iletişim koptuktan sonra belirli bir zaman sonunda belirli bir ivme ile yavaşlama ve güvenli bir şekilde durmak ve duruma göre kapıları açmak olmalıdır.

3. KUMANDA İŞARETLERİNİN BELİRLENMESİ

Ulaşım aracının kumanda sisteminin tasarımında ilk aşama kumanda işaretlerinin belirlenmesidir. Kumanda işaretlerini belirlerken dikkat edilecek noktalar aracın mekanik ve elektrik donanımının gerektirdiği koşullardır. Bu yüzden mekanik ve elektriksel donanım tasarlanmış ve istenen kumanda davranışları belirlenmiş olmalıdır. Bir ulaşım aracında olması gereken kumandalar alt sistemleri ayrı ayrı ele alınarak çıkartılmalıdır.[9] [10] [11]

3.1 Güç Besleme Sistemine Ait Kumanda ve Durumlar

Güç besleme sistemi araç harekete hazırlanırken ilk devreye alınacak sistemdir, bu yüzden sürücü kişinin ilk kumandaları da bu sistem üzerinde olacaktır. Güç sistemindeki kumanda işlemleri özenle yapılmalıdır, herhangi bir hata durumunda can güvenliği tehlikeye girdiği gibi büyük maddi hasarlara yol açılabilir.

Güç besleme sistemi donanımsal olarak üçe ayrıldığından durum ve kumanda büyüklükleri bakımından da üç sınıfta incelemek faydalı olacaktır ancak her üç alt bölümde birbiriyle içiçe geçmiş durumlar ve kumandalar içermektedir.

3.1.1 Ana besleme alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Ana besleme sisteminde ilk kumanda verilecek araç pantograftır. Batarya kontaktörü kapatılıp pantografi yukarı kaldıracak enerji sağlanır. Pantograf makinistin yetki anahtarını (KABAAKT=1, KABBAKT=1) takıp pantograf yukarı butonuna (PANTYU) basması ile kaldırılmaktadır. Aynı şekilde anahtar takılı iken pantograf aşağı butonunda (PANTAŞ) basılması ile pantograf aşağı inmektedir. Ancak aşağı inme kumandası verildiğinde ADK'nın açık olması oluşabilecek arkları önlemekte gereklidir.[9]

Ana izolatör anahtarı güç devrelerini toprak seviyesine bağlamak için kullanılmaktadır. Güç devreleri üzerinde çalışırken herhangi bir kazaya fırsat vermemek için kullanılır. Bu anahtarın manuel kapatılması gerekmektedir.

Anahtar kapandığında yardımcı kontak 'anahtar kapandı' lojik işaretini üretmektedir, 750 V devreleri pantograftan ayrılır, hat kapasiteleri şarj dirençleri üzerinden toprağa bağlanarak boşalmaları sağlanır. Bu anahtar kapandığında ADK kapalı ise açılmalı değilse kapanması engellenmelidir.

Filtre devrelerinin içinde hat akımı ve gerilimi ölçme işlemleride yapılmaktadır. Öte yandan gerilim yükseldiğinde sistemi korumak için aşırı gerilim koruması devreye girmelidir. Koruma devreye girdiğinde bir işaret (ASG) üretmelidir. Bu işaret ile ADK ve tüm yardımcı güç kaynakları açılmalıdır. Tam tersi durumda hat gerilimin sıfır (SHG) olması halinde de bir işaret üretilmelidir. Diğer bir uyarı işareti üretilmesi gereken durumda hat akımının tahrik motorları akımlarının belirli bir eşik değeri üstünde aşmış (ASMA) olmasıdır. Bu durumda ADK açılmalıdır ve bir hata işareti üretilip değerlendirilmelidir.

Devrelerdeki sigortalar denetlenmelidir, eğer atmışlarsa hangi sigortanın atmış olmasına göre farklı hatalar üretilerek (ŞSA, FYSA) hata giderme için kolaylık sağlanmalıdır, ancak herhangi birisindeki bir hata ADKyi açmalı ve sistemin güvenliğini sağlamalıdır.

Pantograf kaldırıldıktan sonra makinistin bir sonraki kumandası ADKyi kapatmaktır. Ancak ADKyi kapatmak bir olaylar zincirinin sonunda gerçekleşmelidir. Şarj devresi pantograf kaldırıldıktan sonra araca besleme gerilimi uygulanması için aktive edilen ilk devredir. Devrede bulunan hat filtresi içinde birbirine aralarında seri ve paralel bağlı kondansatörler grubu vardır, şarj devresinin görevi bu grubun t_0 başlangıç anında uygulanacak bir yüksek gerilimle zarar görmesini engellemektir. Bu amaçla ADK kapa butonuna (ADKON) basıldıktan sonra ana devre kesici kapanmadan önce ilk olarak şarj kontaktörü (ŞK) kapanır (AKŞK) ve şarj direnci (ŞD) üzerinden kondansatörler doldurulur. Burada dikkat edilecek nokta RC zaman sabitini doğru belirleyip en uygun değerine göre bir şarj direnci seçmektir. ADK nın kapanması makinist ADK kapa butonuna basmasından sonra RC ya bağlı bir süre içinde gerçekleşmesi gerekmektedir. Eğer bu süre sonunda kapanma olayı gerçekleşmemişse, kapama isteği resetlenmelidir (RESADK) ve bir hata işareti üretilmelidir. ŞK de belirli bir süreden fazla kapalı kalmamalıdır ve açma isteği geldiğinde de belirli bir süre içinde açılmalıdır, aksi halde bir hata işareti (ŞKH) üretilmelidir. ADK nın açılması yada kapanmaması gereken durumlar vardır, eğer bunları toparlayacak olursak

- İzolatör anahtarı kapalı (İZON=0) iken ADK kapanmamalıdır. Elektriksel olarak korunmalıdır.
- Hat gerilimi sıfırken (SHG=1) kapanmamalıdır.
- Batarya kontaktörü kapalı değilse (BKK= 0) kapanmamalıdır.
- ŞK da hata oluşmamış (ŞKH=0) olmalıdır.
- ADK da hata oluşmamış (ADKH=0) olmalıdır.
- ADK da aşırı akım varsa (AAADK=0) açılmalıdır.
- Güç devrelerinde sigorta arızası (FYSA=0) olması durumunda ADK açılmalıdır ancak bu koşul hat gerilimi sıfır değilken değerlendirilebilir.
- Aşırı gerilim (AHG=0) varsa açılmalıdır.
- Aşırı gerilim kıyıcısında hata (AGKH=0) varsa açılmalıdır.
- Aşırı gerilim kıyıcısında aşırı sıcaklık (AGKAS=0) varsa açılmalıdır.
- Eğer hat akımı motor ve yardımcı beslemelerden fazla (MYAH=0) ise açılmalıdır.
- Yardımcı inverterde hata (YIH=0) varsa açılmalıdır.
- Yardımcı inverterde aşırı sıcaklık (YIAS=0)varsa açılmalıdır.
- Frenleme direncinde aşırı sıcaklık (FRDRAS=0) varsa açılmalıdır.
- 380V kondaktörü hata (380KH=0)vermişse açılmalıdır.
- Motorlarda aşırı akım (MAH=0) varsa açılmalıdır.
- Motor kontaktörleri (MKH=0) hata veriyorsa açılmalıdır.
- Elektronik devreler ve aktüatör beslemeleri (EDABH=0) hata veriyorsa açılmalıdır
- Batarya geriliminin aşırı olması (ABG=0) durumunda açılmalıdır.
- Hat gerilimi belirli bir seviyenin altına inmesi durumunda hata oluşmalı (DHGH=0) veADK açılmalıdır.

3.1.2 Yardımcı besleme alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Yardımcı besleme alt sistemi ana besleme alt sisteminden aldığı enerjiyi iki farklı seviyeye dönüştürüp farklı yardımcı araçların enerjilenmesini sağladığından bu alt sistem üzerindeki kumanda ve durumlar diğer iki alt sistemle yakından ilgilidir. Yardımcı beslemede oluşacak hatalar ana beslemeyi devreden çıkarmalıdır[9]. Yardımcı besleme kompresörleri , soğutucuları beslemesinden dolayı aracın hızlanma ve yavaşlama bilgisi bu sistem için kumanda bilgisidir. Yardımcı besleme sisteminde 380V hazır (380VOK) işareti gelmesi ile yardımcı araçlar için enerji kaynağı vardır işareti (YBKOND=0) üretilir. Kaynak dengeye ulaşması için bir süre (0.1 sn) kadar beklenir ve belli koşullar altında yardımcı araçlar enerjilendirilir. Motor soğutucuları, hızlanma isteği varsa ve motor kontaktörleri kapalıysa (MMON=1) veya motor akımları sıfırdan farklı ise belirli bir süre sonra devreye girerler (AKSGK=1). Devrede kalma koşulları soğutucu akımlarının aşırı olmaması (SAA=0) , motor modüllerinin aktif (MMON=1) olmasıdır. Koşullar sağlanmış (AKSGK=1), soğutucu motor akımı mevcut (SGMON=1), soğutucu motor kontaktörü kapalı (SGK=1) ise soğutucu aktif işareti doğrudur (SGON=1). Yardımcı araçlardan biri olan kompresör, yardımcı besleme kaynağı çalıştıktan bir süre sonra aktif (AKOMP=1) olmalıdır. Aktif olması için diğer bir koşulda kompresörde aşırı akım olmamasıdır (KOMAA=0). Kompresör belirli bir basınç elde edildiğinde durmalı ve çalıştığı durum için bir durum sinyali (KOMPON) oluşturulmalıdır.

3.1.3 Akü grubu alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Akü grubu alt sistemi, aracın pantograf yukarı kaldırılmadan ve ana besleme sistemi devreye girmeden enerjisini sağlayan, ana ve yardımcı beslemeler devreye girdikten sonrada akülerin şarj olmasını sağlayan devrelerden oluşmaktadır. Akü alt sistemi sürücü kişinin yetki anahtarını takması ve batarya(akü) kontaktörünü kapa (BATKON=1) butonuna basması ile devreye girmelidir. Aküler devreye girince pantografi yukarı kaldırma için gerekli enerji sağlanmış olur. Batarya kontaktörü devreye girdiğinde hat gerilimi belirli bir süreden fazla sıfır (SHG=0) değilse ve ana devre kesici lojiğinden batarya tut (BATTUT=1) komutu geliyorsa ve yetki anahtarı takılı ise ve batarya açma butonuna basılmamışsa (BATKOFF=1) ve ana devre kesici kapalı (ADKON) ise, kontaktör devrede kalmalıdır. Kontaktör devrede işareti oluşturulmalı (BATON=1) ve diğer alt sistem lojiklerine aktarılmalıdır.

3.2 Kumanda, Kontrol ve İletişim Sistemine Ait Kumanda ve Durumlar

Kumanda sistemi sürücü kişi ile diğer altsistem kumandaları arası gerekli kumandaları işleyen ve altsistemler arası mantıksal bağlantıları sağlayan sistemdir. Kontrol sistemi aracın hareket dinamiğini kontrol eden ve konforlu seyahat için davranış kriterlerini sağlayan sistemdir. İletişim sistemi ise vagonlar arası iletilmesi gereken referans büyüklüklerini, kumanda ve durum büyüklüklerini ulaştıran sistemdir.

3.2.1 Referans ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Bu alt sistem kontrol sistemine referansları aktarma işlemlerini yapan sistemdir.[9] Ulaşım aracında hareket için verilen ivme referansı dört noktanın birinden alınmaktadır. Hangi referansın geçerli olacağı kumanda altsisteminden gelen kumandalar ile belirlenmektedir. Sürücü kişinin referans vereceği üç nokta; el kontrol manivelası, şönt referans girişi ve acil durum girişidir. Bunun dışında ivme referansı, otomatik sürüş referansından, aşırı hız referansından veya ana vagonun iletişim sistemi referansından alınabilir. El kontrol manivelasından referans alınması için aracın ana vagon olması yani sürücü kişinin yetki anahtarını takmış olması gerekmektedir ($KABAAKT=1$). Maniveladan gelen referansın ivme referansı olabilmesi için maniveladan gelen değerin güvenlik açısından otomatik sürüş referansından ve aşırı hız referansından küçük olması gerekmektedir. Sürücü kişi B kabinine geçip yetki anahtarını taktığında ($KABBAKT=1$) şönt referans girişinden gelen değer ivme referansına aktarılır. İletişim kanalı ile gelen referansın ivme referansı olması için aracın uydu ($ANA=0$) olması, acil durum sürüş isteğinin olmaması ($ACDSİ=0$) ve ana araç tamam işaretinin ($ANAOK=1$) olması gerekmektedir. Acil durum sürüş isteği olduğunda kabinlerden herhangi biri aktif olmaması ve ana araç tamam işareti lojik 0 olması durumunda acil durum sürüş referansı ivme referansına aktarılmaktadır.

Hızlanma ve yavaşlama referanslarının sürücü motor sistemine aktarılmasında aracın hızlanma, yavaşlama, salıverme durumlarından hangisinde olduğunu işaret edecek bir lojik kullanılmaktadır. Sürücü kişinin verdiği referans pozitif ise araçta hızlanma durumu, sıfıra salıverme durumunu, negatif ise yavaşlama durumu geçerlidir. Bu üç durum için üretilecek moment işaretini belirlemek üzere iki komut

işareti ve iki durum işareti üretilmelidir. Komutlardan birisi güçemri (GE) diğeri frenemri (FE) dir, salıverme de ikisinde lojik-0 dır.

Güçemirinin verilebilmesi için ivmelenme referansının pozitif, acil durum fren kolunun ana ve uydu vagonların herhangi birisinde çekilmemiş (ACDUF_D=1, YACDUF=0) olması gerekmektedir. Güçemri verilirken ivme referansı denge konumu civarında salınarak güçemrinin lojik ifadesini kararsızlaştırmaması için bir histerezis bloğundan geçirilerek emrin lojik ifadesi elde edilmelidir. Güçemri verildikten belirli bir süre sonra güç (GÜÇ) ve güçdeğil (GÜÇD) durum işaretleri üretilerek sistemin hızlanma durumunda olduğu işaret edilmelidir.

Frenemri, güç emri gibi ancak ivmelenme referansının negatif bölgesinde bir histerezis bloğundan geçirilmesi ile elde edilir, ancak frenemri verildikten sonra ayrıca bir durum işareti kullanılmasına gerek yoktur.

Hızlanma durumunda motor modülü güçemri ve güç işaretleri ile aktifleştirilir, hızlanma sağlanacak şekilde ivme referansı aktarılır ve moment üretme lojigi üretilir.

Yavaşlama durumunda ivme referansı iki farklı şekilde kullanılır. Ulaşım aracı yavaşlama durumuna geçtiğinde yani frenemri geldiğinde hızlanmanın aksine motor momentinin yanında pnömatik fren momentide üretilmektedir. Çift kaynaklı frenleme için elektriksel ve mekanik olmak üzere iki ivmelenme referansı üretilmesi gereklidir. Frenleme referansından mekanik fren referansının üretilmesi sürücü kişinin istediği yavaşlama ivmesinin motor ünitesinden rejenerasyonla alınabilecek olandan daha fazla olma lojik bilgisine göre gerçekleştirilmektedir. Daha ayrıntılı bir lojik ifadesi fren alt sistemlerinde anlatılmıştır.

3.2.2 Kumanda ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Kumanda ünitesi aracın tüm kumanda sisteminin hazır hale getirilmesi için verilecek kumanda işaretlerinin belirli bir hiyerarşide olmasını sağlayan alt sistemdir. Kumanda işaretlerinden ilk verilmesi gereken yetki anahtarının takılması olduğu belirtilmişti. Bu anahtarın A (KABAAKT) veya B (KABBAKT) kabininden takılmasına göre aracın hareket yönü belirlenmektedir. Araçta esas sürüş kabini A olduğundan anahtar bu kabinde takıldığında ileri (İLERİ), B kabininde takıldığında geri (GERİ) işaretleri üretilmelidir. Bunun dışında acil sürüş isteği geldiğinde de araç geri hareket etmelidir. Ulaşım aracında hiyerarşi sağlanması için bir vagon ana vagon olarak ilan edilmesi gerekmektedir, bu sürücü kişinin bulunduğu ve yetki

anahtarını taktığı vagon olacaktır. Yetki anahtarının takılması ve hareket yönünün belirlenmesi ile ana vagon ilan edilir (ANA), diğer vagonlar sürücü kişi kumandalarını iletişim alt sistemi sayesinde bu vagondan alırlar ve ana vagonun verdiği referanslar ile hareket ederler. Ana vagon kendisine bağlı uydu vagon sayısını bilmelidir ve bu sayıyı kullanarak hata lojiginde değerlendirilmek üzere işaretler üretmelidir. Genel olarak en fazla dört vagonlu yapılar kurulmaktadır, bir ana vagon olduğundan en fazla üç tane uydu olacaktır. Uydu vagonların varlığı uydu tamam (UY1OK, UY2OK,UY3OK) işaretleri ile belirtilmeli, ve her uydudan alınacak işaretler ile uydu sayısı belirlen lojik işaretler (BIRUY, IKIUY, UCUY) üretilmelidir.

3.2.3 Kapı ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Seyahat güvenliği açısından kapılar ulaşım aracında önemli bir yeri teşkil etmektedir.[9] Kapılar açma ve kapama olarak iki komut alırlar ancak sağ ve sol açma komutları ayrı olmasından dolayı toplam komut sayısı (AÇSOL, AÇSAĞ, KAPIKA) üçe çıkar. Güvenlik açısından kapı komutları yetki anahtarının takılı olduğu kabinden verildiği zaman geçerli olmalıdır bu yüzden iki kabinden verilme durumuna göre komut sayısı ikiye katlanır (AÇSOL_A, AÇSOL_B, AÇSAĞ_A, AÇSAĞ_B, KAPIKA_A, KAPIKA_B). Kapılara gidicek olan komutlar kabin aktif sinyalleri ile lojik ve işlemine tutulmaktadır. Kapılar araç hareket halinde iken aç komutu gelse bile açılmamalıdır, bunun için ölçülen hız değerinin belirli bir ofset değeri üzerinde olması durumunda açılmasını engelleyecek bir işaret üretilmelidir (OKAÇ). Kapıların kapanma emri verildiğinde kapıları kapatacak pnömatik sisteme yolveren valfi enerjilendiren kontaktör çekilmektedir. Kontaktör çekildiğinde yardımcı kontakten alınan (KARE) kapı açma kontaktörü-on işareti ile kapı kapama emri verildiği işaret edilmiş olur, bu işaret sağ veya sol kapıları aç emri ile lojik ve işlemine tabi tutularak çıkan lojik sonuç ile kapı kapatma emri resetlenmelidir. Böylece kapı kapanıyorken sürücü kişinin bir tehlike görmesi anında kapıları açması mümkün olmaktadır.

Kapıların kapanma emri verildikten sonra pnömatik eyleyiciler ile kapılar kapanır ve emniyete alınır. Bu durum harekete geçilebilmesi için bir koşul olduğundan işaret üretilmelidir. Kapıların kapalı olduğuna dair işaret tüm kapılardan alınacak ve ters lojik çalışacak bir işaret olmalıdır ki işareti üretecek olan anahtar ve kablolarda

olacak sorunlarda sisteme aktarılabilsin. Sekiz adet kapıdan gelecek tamam işaretleri ile (K1OK, K2OK, K3OK, K4OK, K5OK, K6OK, K7OK, K8OK) ile tüm kapıların kapandığını seri bir devreden alan kapalı kapı onay (KKONAY) işareti ile kapıların kapalı ve emniyette bilgisi alınmış olur. Kapalı kapı onay işareti hareket için gerekli işaretlerin arasında yer almalıdır. Kapıların ayrı ayrı tamam olma işaretleri hata lojiğine girmelidir.

3.2.4 İletişim ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar

İletişim ünitesi ulaşım aracının vagonlarının bir arada uygun ve güvenli hareketi için gerekli büyüklükleri taşımaktadır. Bu büyüklükler referanslar, emirler, durumlar olarak üç sınıfta toplanabilir.[9] İletilecek referanslar ana vagondaki sürücü tarafında belirlenecek ivme referansı, ana vagon üzerindeki kontrolör tarafından hesaplanacak hızlanma ivme hatası ve yavaşlama ivme hatası olmaktadır. Emirler ana vagona verilecek ve tüm vagonların uyması gereken lojik değerlerdir. Güç besleme sistemine ait kumandalar içinden pantograf yukarı (PANTYU) pantograf aşağı (PANTAŞ) , batarya kontaktörünü kapa (BATKON) batarya kontaktörünü aç (BATKOFF) , ana devre kesiciyi kapa (ADKON), ana devre kesiciyi aç (ADKOFF) aydınlatmaları kapa (AYKA) aydınlatmaları aç (AYAÇ) bulunmalıdır. Sürücü kişi sistemlerde bir hata olması durumunda sistemi yeniden başlatmak için hata reseti (HARES) komutu verecektir, bu komut iletişim sistemi üzerinden tüm vagonlara aktarılmalıdır. Ana aracın belirlediği gidiş yönü (İLERİ, GERİ) sinyali de tüm vagonlara iletilmelidir. Kapıların kapatılması ve açılması emirlerinde (AÇSOL, AÇSAĞ, KAPIKA) iletişim sisteminde gönderilmesi gereklidir. Diğer bir iletişim sistemi emride frenlerin salınması olmalıdır. Sürücü kişi harekete geçmeden frenleri sal (FRSAL) komutunu verir ve tüm vagonlar frenlerini salarlar.

İletişim sistemindeki diğer işaretler durum işaretleridir. Durum işaretleri gerek komutların yerine getirilip getirilmediğini gösterebilir gerekse tüm aracın herhangi bir yerinde verilebilen bir emir olabilir. Durum sinyalleri trensonu (TRENSONU), kapı kapalı değil (KAKA_D) , rayfreni (RAYFR), uydu fren salındı (FRSALINDI_U1, FRSALINDI_U2, FRSALINDI_U3), acil durum sürüş isteği (ACDSİ), acil sürüş referansları (ACREF_1, ACREF_2, ACREF_3) olmalıdır. Bunların dışında vagonların içindeki yolcu imdat kollarının çekilmesi (YOLIF) durumunda tüm vagonlarda frenler çekilmelidir. Ana vagon arkasındaki uyduları

anlamak için bir test sinyali (TESTTX) yollar geri dönen sinyal (TESTTX_1 TESTTX_2, TESTTX_3) kadar uydu olduğu anlaşılır.

3.2.5 Ölçüm ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Aracın hareketini kontrol etmek, elektriksel sistemlerin güvenliğini ve istenen bir biçimde çalışmasını sağlamak için çeşitli noktalardan ölçümler alınmalıdır.

Hareket kontrolü yapmak için aracın hızını ölçmek gereklidir, araçta ivme kontrolü yapıldığından hızın türevi alınacaktır ancak ölçüm yapılırken dikkat edilecek noktalar vardır. Hız ölçümleri yapılırken tüm dingillerden ölçüm alınmaktadır. Bunun sebebi kayma ve kızaklama durumlarında bazı ölçümlerin hatalı olmasındandır. Ölçümlerden hangisinin yada hangilerinin doğru olduğunu bir lojik fonksiyon ile kesinleştirmemiz ve buna ait durumlar oluşturmamız gereklidir. Ölçümde hatalı veri alma sebebi ilki hızlanma durumunda güç verilen dingillerin kaymasının tahrik edilmeyen dingillerin kaymasından daha az olmasıdır. Bu durumda hızlanma sırasında tüm dingillerden gelen hız (H1, H2, H3, H4, H5, H6) bilgilerinden en küçüğünü almak en doğru sonucu verecektir. İkinci durum yavaşlama sırasında hem motor hemde mekanik frenler ile kuvvet uygulanan tekerleklerin kızaklaması söz konusu olacaktır, bu durumda kızaklama yapmayan tekerleklerin hızları daha hızlı olacak ve doğru hız bilgisi onlardan alınabilecektir. Hız ölçüm hatasına sebep olacak diğer bir durumda hız ölçücülerde oluşacak donanımsal bir hata olabilir. Hata algılanıp ölçümde o dingilden gelen bilginin geçersiz olması durumu (HÖ1H, HÖ2H, HÖ3H, HÖ4H, HÖ5H, HÖ6H) aktive edilmelidir. Lojik fonksiyonun içinde dingilden gelen hız hatalı durumu var ise o dingile ait hızı olarak yan milin hızı atanabilir, böylece hiç bir milin hızı hız hesaplama alt fonksiyonunda gerçek değerinden çok farklı olmayacaktır. Hızlanma hızı (HIZH) araç ilk harekete geçtiğinde ve tahrik edilmeyen tekerleklerde hız ölçüm hatası varsa tahrik edilen tekerleklerin hızının minimumu olmalıdır. Belirli bir hız eşiğinden sonra ve tahrik edilmeyen tekerleklerde hız ölçüm hatası yoksa hızlanma hızı tahrik edilmeyen tekerlek hızlarının maksimumu olmalıdır. Hız ölçümlerinin bir eşik değerden sonra tahrik edilmeyen tekerleklerden alınmasının gerekliliği ilk harekete geçerken tahrik edilen tekerleklerin kayması durumunda tahrik edilmeyen tekerleklerden alınacak düşük hız bilgisinin tahrik tekerleklerine daha yüksek moment iletilmesinden dolayı kayma miktarının artmasına sebep olacaktır.

Yavaşlama hızını (HIZY) hesaplamak daha kolaydır. Yavaşlama hızı kızıklamamış tekerlekten alınan hız bilgisinden türetileceği açıktır, tüm hızların maksimumu bize yavaşlama hızını verecektir.

Ulaşım aracında hareket için hızlanma hızı ve yavaşlama hızı olarak iki hız tanımlamış olduk. Bu tanımlamaya gerek olmasının sebebi bölüm 5 de de anlatılacağı üzere iki durum arasında kontrolör yapılarının değişmesi ve hız bilgilerinin her iki durum için farklı algoritmalar ile elde edilmesidir.

Aracın elektriksel güvenliği için yapılacak ölçümler sistem içinde çeşitli noktalardan alınacak akım ve gerilim ölçümleri olacaktır. Güç besleme sisteminde bahsedilen hat gerilimi, hat akımlarının, akü geriliminin, hat filtresi kondansatörlerinin gerilimleri, motor akımları, yardımcı inverter gerilimleri, yardımcı devrelerin gerilimleri ve akımları ölçülmesi gereken elektriksel büyüklükler arasındadır. Bu ölçümler daha sonra ilgili bloklara aktararak kumandaların üretilmesi için gereken şartları yaratacaktır. Bunun dışında sürücü sisteminde ölçüm yapılacak bir çok büyüklük vardır, bu büyüklüklere sürücü motor sisteminde değinilecektir.

3.2.6 Hata lojiği alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Hata lojiği araçta alınan ölçümler ve sistemlerden gelen hata işaretleri çerçevesinde hata durumlarını üreten, bunları kayıt altına alan ve ne gibi davranışlar içine girilmesi gerektiğine karar veren kısımdır. Tüm sistem ve alt sistemlerle bağlantılıdır. Genel bir bakış açısı ile bakılırsa olabilecek tüm hata durumlarına göre belirlenecek fonksiyonlarla alt sistemlere hata kumandaları veren, sürücü kişiyi uyaran ve gerekli durumda araç seyr güvenliğine müdahale eden bloklardan oluşmaktadır.

3.3 Sürücü Motor Sistemine Ait Kumanda ve Durumlar

Sürücü motor sistemi araç hareketini sağlayan kısımdır. Tüm üst sistemlerin çalışır olması durumunda sürücü kişinin kumandaları ve referanslarını takip eder. Hızlanma ve yavaşlama durumunda farklı eyleyiciler kullandığından dolayı iki alt sistem olarak incelenmelidir.

3.3.1 Motor ünitesi alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Motor ünitesi alt sistemi tasarımcının isteğine göre asenkron motor ve sürücü veya doğru akım motoru ve sürücü kombinasyonları ile oluşturulabilir. Her iki tercih

belirgin avantajlara sahiptir. Doğru akım motoru kontrol kolaylığı ve hafifliği ile dikkat çekerken, asenkron motor işletme bakımı ihtiyacı bulunmaması ile tercih edilebilir. Her iki tercihde de ortak olan tüm alt sistem düşünüldüğünde alınacak durum bilgileri ve sisteme verilecek kumandalardır. Sürücülerden alınması gereken verileri, [11] güçlenmeye hazır (GHAZIR), hazır (HAZIR), koş (KOŞ), sürücü hata (SHATA), sürücü salıverme (SSAL), motor kontaktör on (MOTKON), yön (YÖN), senkron hız (SENKHIZ), aşırı hız (AŞHIZ), sürücü aşırı sıcaklık (SAŞSIC), motor aşırı sıcaklık (MAŞSIC), motor kitlendi (MKİT) gibi mantıksal durum işaretleri, motor hızı (MHIZ), motor gerilimi (MGER), motor akımı (MAK), DA bara gerilimi (DAGER) gibi ölçüm değerleri, yazma hatası (YAZH), okuma hatası (OKUH) gibi iletişim büyüklükleri olarak özetleyebiliriz .

Kumandalar ise kumanda sisteminden ve sürücü kişiden gelmektedir. Her sürücüde on-off girişi (ON_OFF) kumanda sisteminin harekete hazır olma işareti ürettiğinde aktive edilmesi gereken bir giriştir. Harekete hazır olma tüm sistemlerin çalışır durumda olması, kapıların kapalı olması, araç yönünün tayin edilmiş olması gibi koşulların tümünün sağlanması anlamına gelir. Harekete geçilirken moment referansının geçerli olması için ayar noktası geçerli (AYNOKGEÇ) kumandasının verilmiş olması gereklidir. Bu kumanda moment referansın sıfırdan farklı olması durumunda, kapıların kapalı ve iletişimin sisteminden problem olmaması durumunda verilmelidir. Sürücülerde bulunan diğer bir girişte acıldur (ACDUR) girişidir. Bu kumanda acil durumda motorun durmasını sağlayacak büyüklüktür. Bu kumandayı alan sürücü motoru frenleme moduna sürükler, diğer bir giriş olan salıverme (SAL) ise motoru kendi haline bırakır. Bu durumda araç kendi ataleti ile hareket eder. Sürücüye aktarılabilecek kumandalardan jog (JOG) genelde tüm sürücülerde bulunan önceden ayarlanmış referans değerine göre motoru çalıştıran bir büyüklüktür, aracın kısa hareketlerinde, araçların birbirine bağlanması sırasında kullanılabilecek olan bir özelliktir. Hata durumlarında sürücü kişinin kumandası ile hata lojiginde üretilecek olan hata resetle (RESET) kumandası sürücü için bir başka kumanda olmalıdır. Sürücünün ayar noktasına moment referansı olarak kontrol sisteminden çıkacak olan kontrol işareti aktarılmalıdır.

3.3.2 Fren alt sistemine ait kumanda ve durumlar

Fren alt sistemi yavaşlama sırasında motordan sağlanan frenleme kuvveti yetmediği zaman devreye giren pnömatik frenlerden, acil durumlarda ve park durumunda frenlemeyi sağlayan ray frenlerinden oluşur. Fren alt sistemindeki ray freni üç yerden kumanda almaktadır. Ray freni güvenlik amacı ile kullanıldığında acil durum kumandaları, yolcu imdat freni kolundan (YACDUF), sürücünün kullandığı güvenlik pedalından (GÜVPED) veya sürücü kişi tarafından basılan rayfreni (RAYFR) tuşundan alınmaktadır. Rayfreni çekildiğinde rayfreni çekili işareti üretilmeli ve hangi girişten dolayı çekildiğine göre çeşitli kumandalar oluşturulmalıdır.

Pnömatik frenler mekanik fren kontrolörünün ürettiği moment referansına göre çalışmaktadır. Pnömatik frenler bunun dışında acil durumda devreye girerek frenleme etkinliğini arttırmaktadır. Pnömatik frenler pnömatik valflerin ikili konumları ile sürüldüklerinden dolayı mekanik fren referansı farklı ve artan seviyelerde eşik fonksiyonlarından geçirildikten sonra gerekli valfler (FRV1, FRV2, FRV3) sürülmektedir. Mekanik fren referansı oluşturulurken elektriksel fren referansı dondurulmalı ve elektriksel kısımdan sağlanamayan moment üretilmelidir. Bu olay bir durum işaretçisi (DONDUR) ile kumanda ve kontrol sisteminde değerlendirilmelidir.

Frenlerin harekete geçilmesinden önce salınması gereklidir. Bunun için fren sal (FRSAL) kumandası verilmektedir. Bu kumanda iletişim sistemi ile tüm araca iletilirken FRSAL kumandası tüm valfleri açarak pnömatik frenlerin salınmasını sağlar ve her fren salındığına dair bir işaret üretir (F1SA, F2SA, F3SA). Tüm frenler salındığında frenler salındı (FRSALINDI) işareti üretilir. Bu işaretler kumanda sisteminde değerlendirilir ve harekete geçilebilir.

4. MATEMATİKSEL MODEL

4.1. Matematiksel Modelin Çıkarılması

Ulaşım aracının kontrolünün sağlanması için matematiksel modelini elde etmemiz gereklidir. Matematiksel modeli elde ederken izlenecek yöntem deneysel verilerle elde edilen direnç kuvvetleri, motor-dişli-tekerlek ve tekerlek ray sürtünme denklemleri ve Newton hareket kanunları ile analitik olarak formüle etmektir. Raylı ulaşım araçlarında direnç kuvveti olarak üç kuvvet ele alınabilir, bu üç kuvvetten ilki Davis formülü [4], diye anılan hava, viskoz, sürtünme direnci F_{HS} ,

$$F_{HS} = k_0 + k_1.v + k_2.v^2 \quad (4.1)$$

$k_0 : a.m+b.n$ $a[.] : 6.3765 \cdot 10^{-3}$, $b[.] : 129.492$

$k_1 : c.m$ $c[.] : 328.79 \cdot 10^{-6}$

$k_2 : d.A$ $d[.] : 0.5756$

$m[kg]$: araç kütlesi

$n[adet]$: dingil sayısı

$A[m^2]$: projeksiyon alanı

$v[m/s]$: hız

ikincisi Mützner denklemi [4], diye anılan dönemeç direnci F_D

$$F_D = mg \cdot \frac{c_1 - c_2.R}{R - c_3} \quad (4.2)$$

$c_1:800$

$c_2:0.4$

$c_3:40$

g : yerçekim ivmesi

$R[m]$: dönüş yarıçapı $50 < R < 2000$

ve eğimden kaynaklanan [4] F_G

$$F_G = mg \cdot \sin(\theta) \cong mg \cdot \tan(\theta) \quad (4.3)$$

$\theta[rad]$: eğim açısı

direnç kuvvetidir.

Aracın hareketini sağlayan motorda endüklenen momentin kuvvet haline dönüşmesi redüktör çevirimi ile tekerlerlere aktarılması ve tekerlekler ile ray arasındaki Coulomb yasasına göre belirlenen kuvvet çerçevesinde olmaktadır.

$$F_m = m_m \cdot \frac{2 \cdot \ddot{u} \cdot \eta}{D} \quad (4.4)$$

$m_m[Nm]$: motorda endüklenen moment

$\ddot{u}$: dişli çevirme oranı

η : dişli verimi

$D[m]$: teker çapı

Coulomb yasası ile belirlenmiş sürtünme kuvvetleri ve endüklenmiş kuvvetler arasındaki ilişkiye göre ivmelenme karakteristiği değişmektedir.

$$F_m \leq \mu \cdot mg \quad (4.5)$$

$\mu[.]$: sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayısı sabit bir sayı olmamakla beraber bir çok hareket dinamiği etkeninin etkisinde kalmaktadır. Matematiksel model elde edilirken bu dinamik etkiler modele eklenmelidir. Katsayı üzerindeki dinamik etkiler modele katılabilir.

Öte yandan katsayı üzerindeki çevresel faktörler bozucu etkiler olarak modellenenebilir. Coulomb'un 1781 yılında ortaya koyduğu [6] [7] [8] sürtünme kanundaki dinamik etkenlere bakalım.

- Maksimum sürtünme normal kuvvetin değerine bağlıdır. Normal kuvvet bir araç için yerçekimi kuvvetinin yer düzelemine olan bileşenidir. eğimli yollarda araç için maksimum ivmelenme kuvveti (4.5) de belirlenen kuvvetin eğim açısının kosinüsü ile çarpılmasından elde edilebilir.
- Statik sürtünme katsayısı kinetik sürtünme katsayısından daha büyüktür. Kanundaki bu madde zaman içinde değişime uğramış ve matematiksel süreklilik kazanmıştır. Düşük hızlarda kinetik sürtünme katsayısı artar ve neredeyse statikteki eşit olur ve hızlandıkça katsayı önemli derecede düşer ve kanunun ilk orataya konulduğu zamanlarda elde edilen kinetik sürtünme katsayısına eşit olur. Tekerlek ray düzenlerinde bulunan dönel sürtünme hem hareketi engeller hemde hareket için gereklidir. Sürtünmenin direnç etkisi (4.1) denkleminde göz önüne alınmıştır, öte yandan hareketi sağlayan etkisi için aracın hızı ile çekiş sürtünme katsayısının azaldığını formüle eden Curtius-Kniffler bağıntısı [5] kullanılabilir.

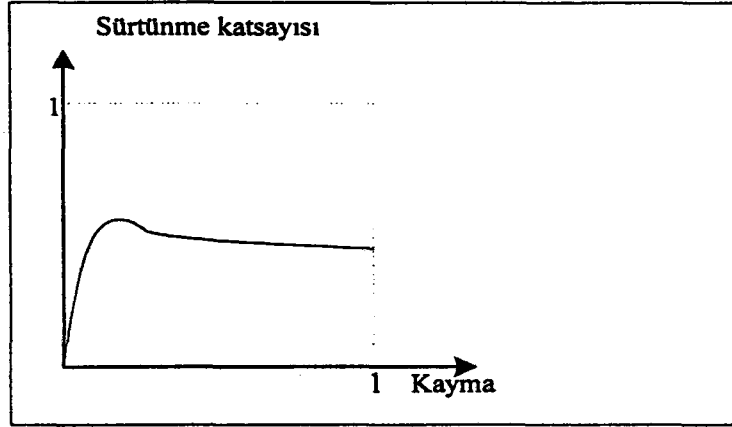
$$\mu[N/kN] = \frac{7500}{44 + v} + 161 \quad (4.6)$$

Bağıntı (4.6) çekiş sürtünme katsayısının hıza bağlı olarak değişimini göstermektedir.

- Sürtünme katsayısı tekerlek ile ray arasındaki kaymaya bağlıdır. Bu amaçla ilk önce kaymayı tanımlayalım. Kayma tekerlek çizgisel hızı ile tekerleği yere göre hızının farkının tekerlek çizgisel hızına oranıdır. Kaymanın 0 olması kaymanın olmadığı, 1 olması tekerlek hızının 0 olması ve aracın hareket etmediği anlamına gelir. [14]

$$\lambda = \frac{\omega.r - v}{\omega.r} \quad (4.7)$$

Sürtünme katsayısı kayma değerine göre deneysel olarak elde edilebilir. Yapılan çalışmalar genelde otomobil tekerleri ile asfalt arasındaki sürtünme katsayısını belirlemek yönündedir. Sürtünme katsayısının değişimine bakacak olursak kaymaya bağlı olarak sürtünme katsayısı ilk önce artmakta sonra kayma arttıkça azalıp kayma 1 olduğunda sabit bir değer almaktadır.



Şekil 4.1 Kayma- sürtünme katsayısı grafiği

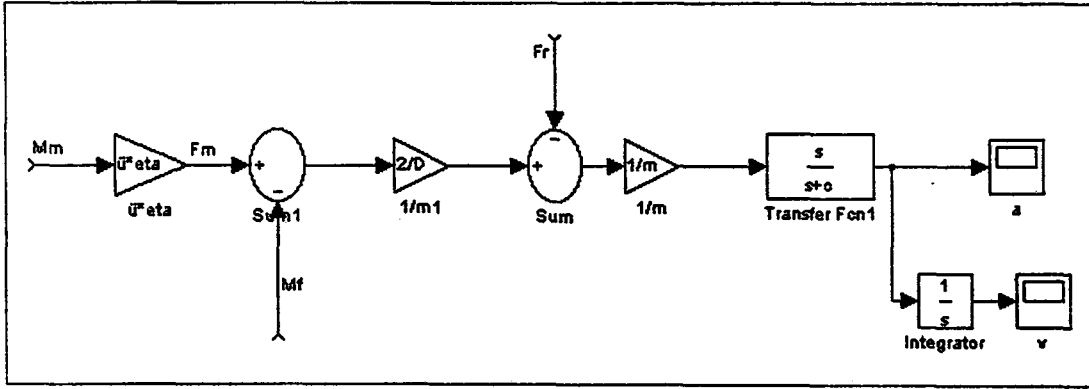
Sürtünme katsayısı hızın artması ile değiştiği gibi kayma ile de şekil 4.1 deki gibi değişmektedir. Bu yüzden aracın çalışma noktasında hem hıza hem kaymaya bağlı şekilde değişen katsayı yüzünden uygulanabilecek çekiş kuvveti sınırlıdır. Çekiş kuvveti kayma sürtünme katsayısının maksimum noktada olacağı şekilde uygulanırsa araç maksimum ivme ile hızlandırılabilir.

Endüklenen kuvvetin yeteri kadar olması durumunda aracın ivmelenme karakteristiği Newton'un ikinci kanunu [7] [4] (hareket kanunu) ile elde edilebilir.

$$F = (1 + p).m.\frac{dv}{dt} \quad (4.8)$$

p: dönel kütlelerin eylemsizlik üzerine etkisi

F kuvveti ivmelendirici fark kuvvetidir. Hızlanmada motorlarda endüklenen kuvvet F_m ile tüm dirençlerin toplamından oluşmuş F_r farkından oluşan, yavaşlamada ise motorlarda endüklenen F_m , mekanik frenlerde endüklenen F_f ve direnç kuvveti F_r nin toplamından oluşan fark kuvveti m kütlelerinin ve dönel kütlelerin ivmelenmesini sağlamaktadır. Kuvvetleri model içinde ayrıntılı ile belirtecek olursak



Şekil 4.3 İndirgenmiş matematiksel model

Matematiksel modelde girişler motor momenti ve fren momenti, çıkışını da ivme olarak alınmıştır. Ancak gerçek sistemde motor momenti kontrol işareti arasındaki transfer fonksiyonu 1 den farklıdır. Moment referansı ve motor momenti arasında denklem (4.10) ile belirtilebilen bir transfer fonksiyonu vardır.

$$\frac{m_m}{u_m} = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot e^{-sT} \quad (4.10)$$

Bu transfer fonksiyonu sürücü+motor düzeneğinin girişine referans verildikten sonra ölü zamanlı birinci dereceden davranışını ifade eder. Tüm sistem düşünüldüğünde mekanik zaman sabiti yanında sürücünün ölü zamanı T ihmal edilebilecek bir düzeydedir. Transfer fonksiyonundaki K sürücü+motor düzeninin kuvvetlendirme katsayısı olmakla beraber birimide Nm/volt olmaktadır. K motor gücüne ve sürücü parametrelerine bağlıdır. τ zaman sabiti moment referansı sürücüye verildikten sonra motorun istenilen momentin 0.632 sini üretmeye başladığı noktadan hesaplanabilir.

Ulaşım aracının mekanik matematiksel modeli ile sürücü+motor düzeninin elektrik-mekanik matematiksel modelini birleştirdiğimizde (4.11) daki transfer fonksiyonunu elde edilir.

$$\frac{a(s)}{u(s)} = \frac{2.K.\ddot{u}.\eta.s}{m.D.(\tau s^2 + (\tau.c + 1)s + c)} \quad (4.11)$$

Hızlanma durumunda araç sadece motorlar ile tahrik edildiğinden matematiksel model nispeten kolaydır. Yavaşlamada ise rejenerasyon yapılırken motor ve yetmediği durumlarda mekanik frenler ile frenleme yapılır. Rejenerasyondan üretilebilecek moment aracın hızına bağlıdır, yüksek hızlarda rejenerasyon momenti yüksek iken hız azaldığında rejenerasyonla moment üretilmeyecek hale gelir. Bunun sebebi DA bara geriliminin düşük hızlarda ters akım akıtmaya izin vermemesidir. Yavaşlama sırasında sürücü kişinin verdiği referans tek başına motorlar tarafından takip edilemez, mekanik frenlerle takviye yapmak gerekir. Mekanik frenler pnömatik valflerle sürüldüğünden doğrusal olmayan bir yapıdadır. Valflerin sürülmesine göre mekanik frenlerin maksimum fren momentinin oranı kademeli olarak değişmektedir. Tablo 4.1 de fren valf girişinin lojik değeri ile fren momentinin % değeri verilmiştir.

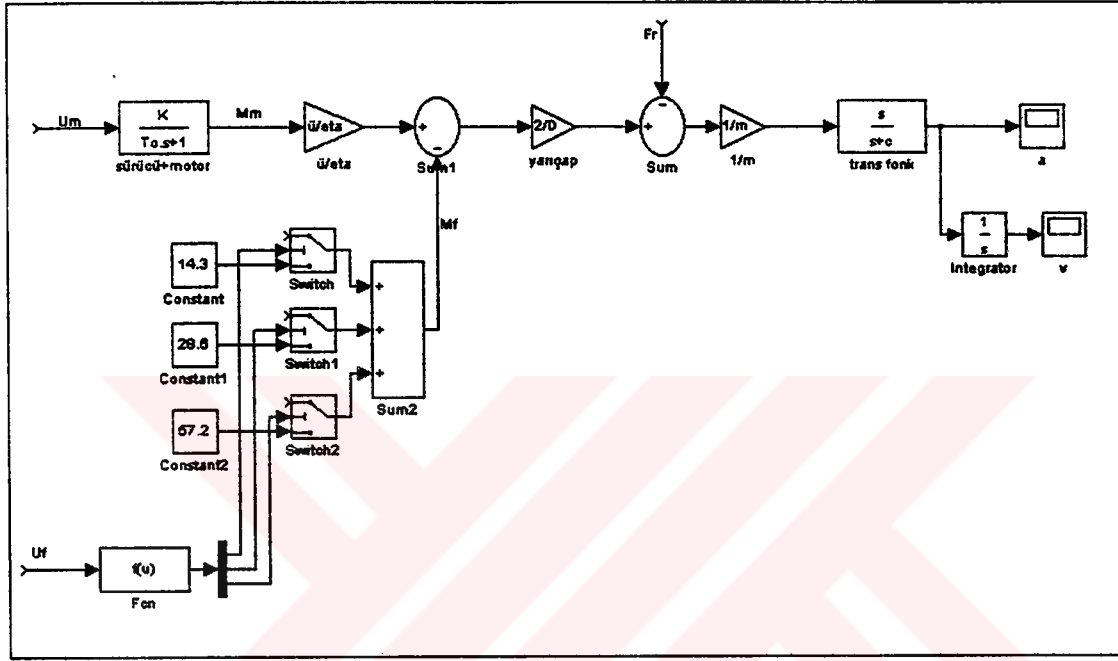
Tablo 4.1 Fren momentinin valflerin durumlarına göre değerleri

Kademe	Fren momentini %	valf	1	2	3
1	0		1	1	1
2	14.3		1	1	0
3	28.6		1	0	1
4	42.9		1	0	0
5	57.2		0	1	1
6	71.5		0	1	0
7	85.8		0	0	1
8	100		0	0	0

Tablodan görüldüğü gibi valflerin lojik değerleri ters olarak verilmektedir. Bunun sebebi işareti taşıyacak kabloları arıza olması durumunda yada elektrik kesilmesi durumunda frenlerin devreye girerek aracın yavaşlamasını sağlamasıdır. Her valfin

frenleme yüzdesi farklıdır ve toplam fren momenti valflerin kombinasyonları ile sağlanır. Bu kombinasyonları sağlayacak bir kodlayıcı gereklidir. Kodlayıcı gerekli mekanik fren momenti referansını lojik değerlere dönüştürmelidir.

Yavaşlama sırasında ulaşım aracının dinamiği değiştiğinden matematiksel modelide değişmektedir. Bu yüzden matematiksel modele frenleme kısmınında eklenerek genel bir model oluşturulması gereklidir.



Şekil 4.4 Aracın yavaşlama matematiksel modeli

Modeldeki $f(u)$ fonksiyonu mekanik fren kontrol işaretini alıp ikili düzende çıkışlar vererek mekanik fren momentini sağlayacak valflere yolveren kısımdır. Basitçe onluk düzenden ikili düzene çevirici olarak çalışmaktadır.

4.2 Matematiksel Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Matematiksel model parametrik olarak elde edildikten sonra kontrolör tasarlamak için model parametrelerinin belirlenmesi gereklidir.

Aracın mekanik dinamiğine ait parametreler bozucu kuvvet formüllerinden, redüktör çevirme oranından, redüktör veriminden, araç kütlesinden, ve araç tekerlek yarıçapından oluşmaktadır. Ele alınan indirgenmiş modelde bulunan $c = 0.0003288$,

$\ddot{u} = 6.92$, $\eta = 0.95$ alınırken, $m \in [29000 : 42000]$, $D \in [0.60 : 0.68]$ arasında değişmektedir.

Elektriksel kısma ait parametreler hesaplanırken maksimum eğimde maksimum kütle ile gereken momenti sağlayacak bir kazanç hesaplanır. Ulaşım aracının maksimum kütlesi 42 ton ve maksimum eğim 6% alınarak hesaplanan K kazancı 3450 bulunmuştur. Ancak gerçek sistemde bu kazanç 10 volt standartına karşılık gelmesi gerektiğinden $K = 345$ alınmıştır. Deneysel olarak elde edilen $\tau=0.1$ dır. Geri besleme işaretide endüstriyel standartlara uyması açısından 10 ile çarpılmıştır. Parametreler yerlerine konulunca sistem transfer fonksiyonu denklem (4.12) gibi olmaktadır.

$$\frac{a(s)}{u(s)} = \frac{2.345.6.92.0.95.s}{m.D.(0.1s^2 + s + 0.0003288)} \quad (4.12)$$

4.3 Matematiksel Modelin İrdelenmesi

Matematiksel model (4.11) daki haliyle ele alınması gereken noktalar bulundurmaktadır. Gerçek sistemi ele alırken değişken parametreleri belirlemek gereklidir. Transfer fonksiyonunda görülen m kütle değeri, D teker çapı ve η verim faktörünün değerleri değişmektedir.

Ulaşım aracının günün belirli saatlerinde yoğun olarak kullanıldığını düşünürsek yolcu kapasitesine göre kütle değişimi hesaplandığında 100% e varan değişimler göze çarpmaktadır. Bu parametre değişimi aracın kontrolünde kararsızlıklara, performans düşmesine ve konfor kaybına sebep olmaktadır. Bu sonuçlar boş araçta titreşim, dolu araçta cevap gecikmesi olarak belirlemektedir.

Aracın işletimi sırasında zaman geçtikçe tekerleklerde aşınmalar meydana gelmektedir. Tekerlek yarıçapının değişmesi hem momentin kuvvete dönüşmesinde artışa sebep olurken, aracın hızının az olmasına ve ivme kontrolü yapılırken geri beslemede aracın hızının fazla ölçülmesinden dolayı yanlış ivme hatası hesaplanmasına sebep olmaktadır. Bu transfer fonksiyonunda ileri yol kazancı

yükselirken geri besleme kazancının da yükselmesi anlamına gelmektedirki, kontrol sisteminin kararsızlığına sebep olabilir.

Transfer fonksiyonunda ileri yol kazancı içerisinde görülen η verim faktörü hızlanma sırasında doğru orantılı, yavaşlama sırasında ise $1/\eta$ olarak ters orantılı çarpan halindedir. Bu motor momentinin redüktör üzerinde hızlanırken kayıpla çekici kuvvet haline geldiğini, yavaşlamada ise redüktör veriminin hep güç akış yönün doğrultusunda olmasından dolayı frenleme kuvvetinin kayıpla motora aktarılması anlamına gelmektedir. Anlaşılacağı üzere verimin iki modda farklı etki göstermesinden dolayı hızlanma kontrolü ve yavaşlama kontrolü yapılırken farklı matematiksel modellerle karşılaşılmaktadır.

Hızlanma ve yavaşlama durumlarında diğer dikkat edilmesi gereken durumda hızlanma durumunda gereken momenti sadece motor karşılamakta iken, yavaşlama sırasında moment hem motor hemde mekanik frenler tarafından üretilmektedir. Sürücü kişi tarafından yavaşlama isteği geldiğinde eğer fren referansı motor tarafından karşılanamayacak durumda ise mekanik frenler devreye girer, bu aşamada istenen ivme eğer mekanik fren referansının kademesine karşılık gelen değerde, değilse tam olarak üretilmemektedir. Bu yüzden frenleme durumunda ivme hatası sürekli olmaktadır. Bu hatanın negatif tutulmasında güvenlik açısından fayda vardır. Hatanın negatif tutulması yavaşlama sırasında yavaşlama kontrolörünün pozitif işaretlerle pozitif moment istekleri ürettiği olmasındandır. Bu durum gelen negatif ivme referansından motordan alınabilecek olan kadarının elde edilmesi ve kalan negatif ivme referansının evirilip mekanik fren ivme isteği üretilir ve bu yüzden fren momentinin fazla verilmesi durumunda ivme hatası negatif olmaktadır.

5. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Matematiksel model elde edildikten sonraki aşama matematiksel modeli elde edilmiş sistemi kontrol etmek üzere bir kontrol sistemin tasarımıdır. Kontrolör seçimi yapılırken sistemin kararlılık analizinin kolay yapılabildiği, alışlagelmiş bir kontrolör seçmekte fayda vardır.

5.1. Davranış Ölçütlerinin Belirlenmesi

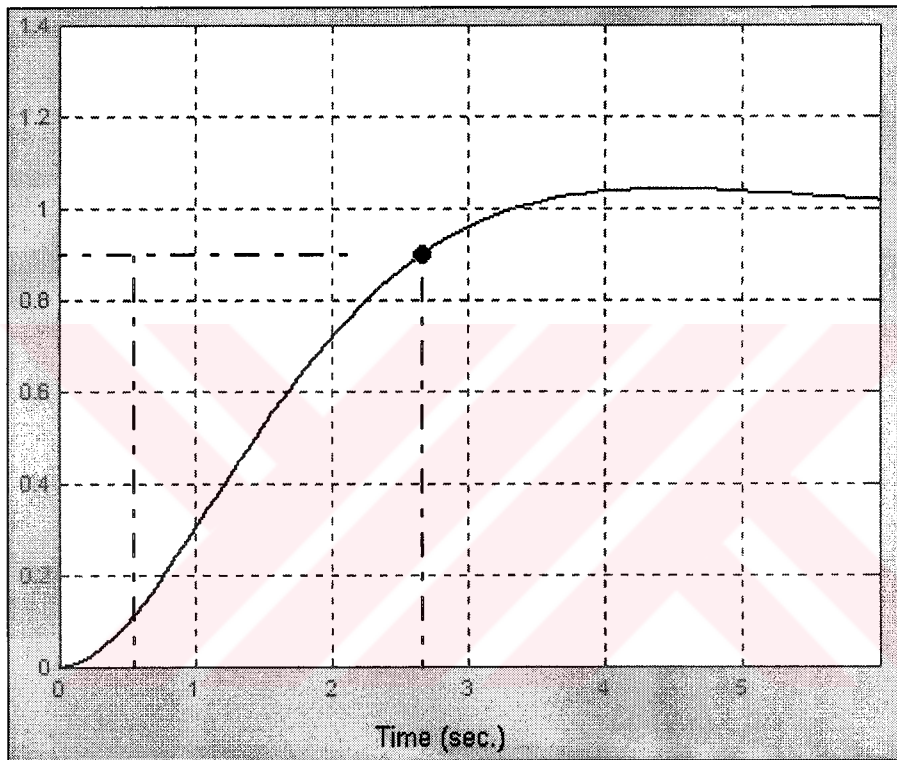
Kontrolör seçmek için öncelikle aracın kontrol edilmesi gereken davranışlarına belirli ölçütler getirilmelidir. Genel insan davranışı ve araç kinematiği yüzünden ulaşım araçlarında ivme kontrolü yapılmaktadır. İçten yanmalı motorlu araçlarda gaz pedalına basılarak araca hızlanma ivme referansı, fren pedalına basılarak yavaşlama ivme referansı verilir. Aracın hızının seviyesi aracı kullanan hisleri ve hız göstergesindeki miktara bakarak ayarlamaktadır. Ulaşım araçlarında ise iki ayrı pedal yerine bir manivela ile ivme referansı verilir ve araç bu ivme referansını kontrol sisteminin denetimi altında takip eder. Takip etme yeteneği aracın sürücü kısmının gücüne ve kontrolörün dinamiğine bağlıdır.

Önceki bölümde bahsedilen Coulomb sürtünmesi hızlandırma kuvvetini sınırlayan etkidir. Raylı ulaşım araçlarında maksimum ivme değeri sürtünme katsayısının $[0.1 \ 0.2]$ aralığında değişmesinden dolayı en kötü durum için 1 m/s^2 olarak belirlenmiştir. Manivelanın en ileri ve en geri kısımları bu ivme sınır değerlerine karşılık referanslar üretmelidir.

Matematiksel model çıkarılırken bulunan transfer fonksiyonu ikinci derecedendir. İkinci dereceden bir transfer fonksiyonu birim basamak girişe karşılık, karakteristik polinomun köklerinin yerlerine göre aşımli veya kritik sönümlü özellik gösterebilir. İdeal davranış az aşımli hızlı bir sistem cevabıdır. Az aşımli bir sistem davranışının s domenini tanımlı $\xi=0.707$ olması durumunda en ideal olduğu [3] ispatlanmıştır. Bu

yüzden tasarımda aşımın %4.3 ü geçmemesi için $\xi=0.707$ i yada daha büyük olmalıdır.

Ergonomik standartlar içerisinde insan fizyolojisini rahatsız etmemesi için aracın ivmesinin değişiminin (jerk) sınırlı olması, en fazla 2 m/s^3 değerini alması gerekmektedir. İkinci derecen bir sistemin $\xi=0.707$ olması durumundaki birim basamak cevabı şekil 5.1 de görüldüğü gibidir. Cevabın zamanla değişiminin geometrik şekli kabaca doyuma ulaşan rampa işaret gibi alınabilir.



Şekil 5.1 $\xi=0.707$ için sistem cevabı

Jerki ile sistem cevabının yükselme zamanı arasında bir bağlantı kurulabilir. Yükselme zamanı ikinci dereceden bir sistem için (5.1) bağıntısı [3] ile verilebilir.

$$t_r = \frac{1 - 0.4167\xi + 2.917\xi^2}{\omega_n} \quad (5.1)$$

Şekil 5.1 de $\omega_n = 1$ için sistem cevabının yükselme zamanı gösterilmiştir. Jerkin belirtilen değerden küçük kalması yükselme zamanının 0.5 sn den uzun olması ile sağlanabileceği düşünülmektedir. Bağıntı (5.1) kullanarak gerekli eşitsizlik

$\omega_n < 4.327$ olarak bulunur. Bu eşitsizliğin geçerliliğini belirlemek için jerk analitik ifadesinin maksimum değerinin 2 den küçük olma koşuluna bakmamız gerekmektedir. İkinci dereceden bir sistemin birim basamak cevabının t domeni ifadesi (5.2) de verilmiştir.

$$a(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t + \cos^{-1} \xi) \quad (5.2)$$

Jerk (5.2) bağıntısının birinci türevine eşittir. Jerkin maksimum değerini bulmak için (5.2) nin ikini türevini alıp sıfıra eşitlemek bulunan değeri jerk ifadesinde yerine koyup denemek gereklidir. Bu amaçla

$$a''(t) = \frac{\omega_n e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t - \cos^{-1} \xi) = 0 \quad (5.3)$$

denklemini kurular. Denklemden

$$t = \frac{\cos^{-1} \xi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (5.4)$$

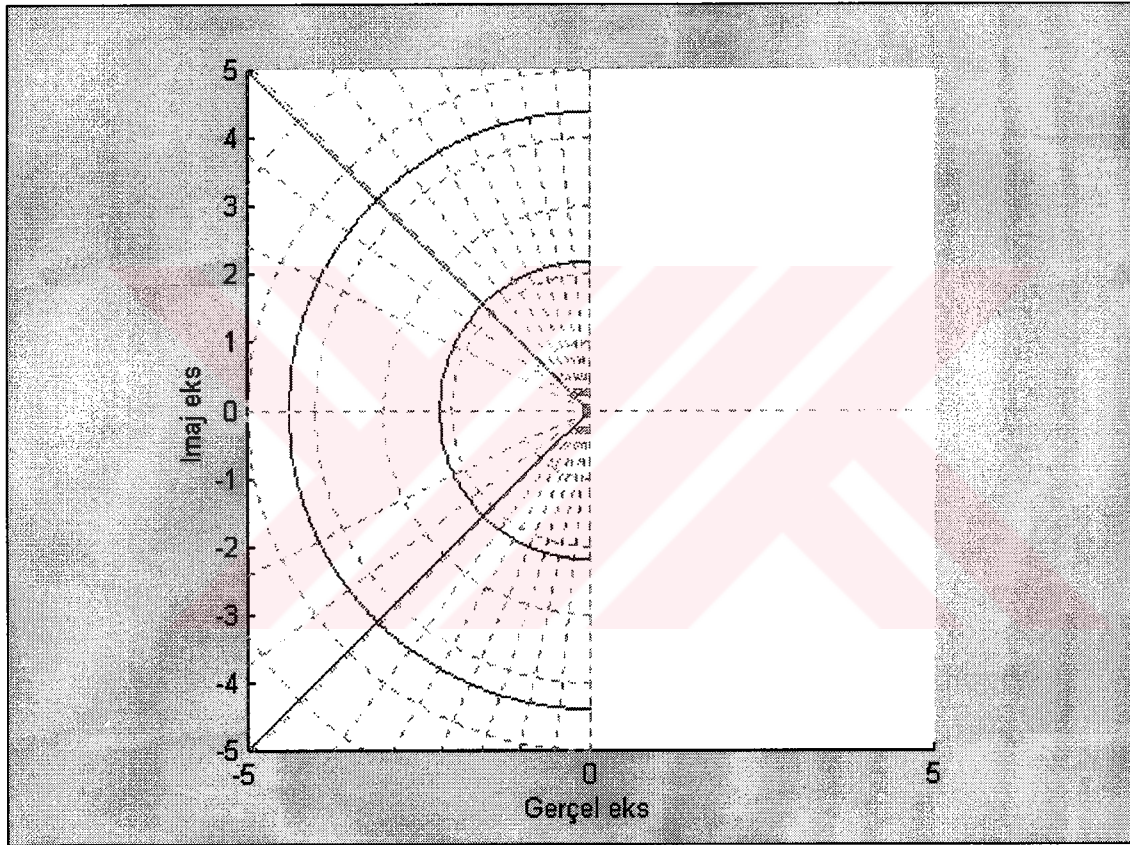
eşitliği çıkar. Jerk ifadesinde (5.4) ü yerine koyarsak ve maksimum değerin 2 m/s^3 den küçük olması için eşitsizliği kurarsak

$$a'(t) = \frac{\omega_n e^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cos^{-1} \xi}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\cos^{-1} \xi) < 2 \quad (5.5)$$

elde edilir. Daha önceden ξ nın 0.707 ye eşit yada daha büyük olması koşulunu getirmiştik, bu yüzden en kötü durumu $\xi=0.707$ olarak alabiliriz. Bu değer yerine konduğunda (5.5) ifadesinden $\omega_n < 4.385$ çıkmaktadır. Sonuç (5.1) ifadesinden bulunandan çok farklı değildir, bu yüzden yükselme zamanı denklemini maksimum jerk ölçüsünü belirlemek için uygundur.

Jerk belirli bir değerden küçük de olmamalıdır. Küçük olması durumunda ivme yavaş artacak ve hızlanma gecikecektir, oysaki elektrikli ulaşım araçlarında en ekonomik hız yörüngesi maksimum ivme ile hızlanma ve maksimum ivme ile yavaşlama şeklinde olmaktadır. Minimum jerki 1m/s^3 seçmek uygundur, bu durumda $\omega_n > 2.19$ eşitsizliğine varılır. Doğal frekansın alttan ve üstten sınırlanması ile kontrol sisteminin istenen davranışı belirlenmiş olmaktadır.

Kontrolör tasarlarken amacımız kontrol kutuplarını belirlenmiş sınırlar içinde tutmamız gerekmektedir. Belirlediğimiz sınırları s düzleminde gösterelim.



Şekil 5.2 Kutup atama bölgesi

Kutupları atama bölgesi kesilmiş ananas parçası gibi görüldüğünden bu bölgeye ananas bölgeside denir. Dördüncü bölümde de değinildiği gibi matematik modelimizde değişken parametreler bulunmaktadır. Davranış ölçütlerini tespit ederken aslında bu değişken parametrelere rağmen kutupların hangi bölgede kalması gerektiğinin de ortaya koymuş olduk. Yapacağımız kontrolör tasarımında kutupların

belirlediğimiz bölgede kalması için gereken kontrolör seçimi ve parametre hesabı için gereken şartları ortaya koymalıyız.

5.2. Dayanıklı Kontrol Kavramı

Bir kontrol sisteminden istenen gerekli davranış ölçütlerini yerine getirmekle beraber bu ölçütlerden sistemin parametreleri değiştiğinde bile uzaklaşmamasıdır. Dayanıklı kontrol kavramı ilk çıkış noktası davranış ölçütlerinden uzaklaşmaması için gereken şartları ortaya koymaktan öte önemli bir problem olan sistem kararlılığını parametre değişimlerinden bağımsız kılmaktır. Gelişen teori ile kavram genişletilerek istenen davranış ölçütlerinden uzaklaşmaması şartları belirlendi. Bunun anlamı istenen kontrol kutbu bölgeleri etrafında bir Γ bölgesi seçip sonlu parametre değişimlerinde kutupların bu bölgede kalmasını sağlamaktır.[1] [13]

Γ bölgesi tanımlanmasından sonra köklerin, parametre değişimlerinde bu bölgeden çıkıp çıkmadığını incelememiz gerekmektedir. Bunu yapmanın bir yolu parametre uzayında olabilecek tüm değişimlerde köklerin yerlerini incelemektir. Tüm parametre uzayını taramak oldukça zahmetli bir iş olacağı kesindir. Bunun yerine Hurwitz kriterlerini kullanmak yerinde olacaktır. Ancak Hurwitz kriterleri sistemin mutlak kararlılığıyla ilgilidir, Γ kararlılık için kriterleri genişletmek gerekir. Hurwitz kriteri $j\omega$ ekseninde kompleks eşlenik köklerin olma durumunda kararsızlık koşulunu inceler, kriteri genişletmek istediğimizde bir analogi kuralım $j\omega$ eksenini $\delta\Gamma$ gibi tanımlayalım. Bu tanımlama ile Γ bölgesi olarak tüm sol yarı düzlem kabul edilmiştir. Γ bölgesini davranış kriterlerine göre belirleyip $\delta\Gamma$ yı tanımlarsak Hurwitz kriterini genelleştirip Γ kararlılık için kullanılabilir hale getirmiş oluruz. Bu durumda Hurwitz kriterindeki $j\omega$ eksenindeki kompleks eşlenik kökleri tanımladığımız $\delta\Gamma$ sınırının üzerinde olduğunu kabul ederiz. Frazer-Duncan'ın sınır geçiş teoremi genelleştirilmesi durumunda $\delta\Gamma$ sınırlarının geçilmesi koşulu Γ kararlılık için bize gerek ve yeter koşullar elde edilmiş olur. Buna göre $\Delta(s,Q)$ parametre ailesinin Γ kararlı olması için gerek ve yeter koşul aşağıdaki gibidir.

1. $\Delta(s) \in \Delta(s,Q)$ olacak şekilde Γ kararlı bir polinom mevcut olmalı,
2. $\sigma(\alpha)+j\omega(\alpha) \notin \text{kök}[\Delta(s,Q)]$, $\forall \alpha \in [\alpha^-, \alpha^+]$ olmalıdır.

Bu teorem daha önce belirttiğimiz gibi parametre değişimlerinde köklerin $\delta\Gamma$ sınırlarını aşmaması anlamına gelmektedir. Köklerin sınırları aşması matematiksel gösterim ile ifade etmek yerinde olacaktır. Ackermann ve Kaesbauer 'in ortaya koyduğu Sınır Gösterim Teoremi polinom ailesinin Γ kararlılığı için gereken koşulları belirlemek için kullanılabilir. Bu teoreme göre $\Delta(s,Q) = [1 \ s \ \dots \ s^n] \ a(q)$ şeklinde bir polinom ailesi ele alındığında [1] [13]

$$Q_{lm}(\alpha) := \{q \mid \Delta(\sigma(\alpha)+j\omega(\alpha), q) = 0, \alpha \in [\alpha^-, \alpha^+]\} \quad (5.6)$$

kümesi tanımlansın. Bu küme q parametre vektörü için $s = \sigma(\alpha) \pm j\omega(\alpha)$ da kökleri bulunan polinomların ilişkisini vermektedir. Bir $\alpha \in [\alpha^-, \alpha^+]$ için $q \in Q_{lm}(\alpha)$ olması

$$\begin{bmatrix} d_0(\alpha) & d_1(\alpha) & \dots & d_n(\alpha) \\ 0 & d_0(\alpha) & \dots & d_{n-1}(\alpha) \end{bmatrix} \cdot a(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

koşuluna bağlıdır.

Burada $\alpha \in [\alpha^-, \alpha^+]$ olmak üzere

$$d_0(\alpha) = 1$$

$$d_1(\alpha) = 2\sigma(\alpha)$$

$$d_{i+1}(\alpha) = 2\sigma(\alpha)d_i(\alpha) - [\sigma^2(\alpha) + \omega^2(\alpha)] \cdot d_{i-1}(\alpha), \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (5.8)$$

dir.

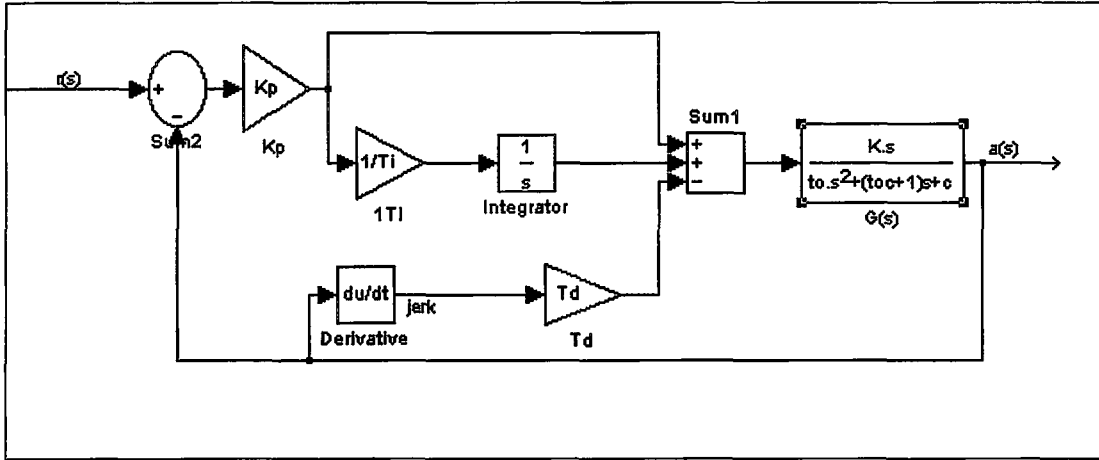
Bu teorem ile parametre uzayında Γ kararlılık için parametrelerin hangi aralıkta değişebileceğine dair bir bölge tayin eder. Sistemin Γ kararlılığı test edilebileceği gibi, Γ kararlı olmayan bir sistem için bir kontrolör parametresi için uygun aralık bulunabilir.

Çalışmamızda aracın bölüm 5.1 de belirlenen davranış ölçütleri dahilinde hareket etmesi, parametre değişikliklerinden etkilenmemesi için bir kontrolör seçilip parametrelerinin Γ kararlılığına göre belirlenmesi üzerinde durulmuştur.

5.3. Kontrolör Seçimi ve Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Aracın elde edilen matematik modele göre uygulanması kolay, performansı kanıtlanmış ve alışlagelmiş bir kontrolör seçmek gereklidir. Senelerdir endüstride başarılı ile kullanılan PID kontrolörler ulaşım araçları için daha öncede kullanılmış ve başarı elde edilmiştir.[3]

Bölüm 4 de elde edilen matematik modele bakılacak olursa aracın kütlesinin binen yolcu ile orantılı olarak değiştiği, tekerlek yarıçapının da işletim süresi içinde azaldığı göz önüne alınmaktadır. Kontrolör tasarlarken önümüze çıkan sorun PID kontrolörün ne amaçlarla kullanılacağıdır. Daha önce belirlediğimiz davranış kriterleri içinde dikkat edilmesi gereken jerk sınırlaması ve ivme cevabının aşımıdır. Sistemden beklenecek diğer bir kriterde cevapta sürekli hal hatasının bulunmamasıdır. Jerk sınırlaması ivmenin türevinin sınırlanması olduğundan kontrolörün sistem cevabının türevinde düzeltecek şekilde olması kaçınılmazdır. Bu sonuç kontrolör içinde türev teriminin varlığı kaçınılmazdır. Dikkat edilecek bir nokta referans noktası gürültülerinin ve darbelerinin sistem cevabına etkimesi engellenmelidir. Referans girişinden sonra bir alçak geçiren filtre koymak bir çözüm getirebilir ancak bu referansı yavaşlatarak performansın düşmesine neden olacaktır. Jerk sistemin cevabı ile ilişkili olduğundan aşırı jerki bastırabilmek için kullanılan türev teriminin sadece geri beslemeden kontrol işareti üretecek şekilde tasarlaması belirtilen soruna bir çözüm olacaktır. Böylece yüksek geçiren filtre etkisi gösteren türev terimi sadece jerki bastırarak ve referans üzerindeki ani değişimleri kuvvetlendirmeyecektir. Sürekli hal hatasının olmaması için yapılması gereken kontrolörün içerisinde integral teriminin bulunmasıdır. Kontrolörümüz türev teriminin geri besleme üzerinde olmasından dolayı modifiye edilmiş PID olarak anılmaktadır. Literatürde PI-D [2] olarak anılan kontrolörün prensip şeması şekil 5.3 dedir.

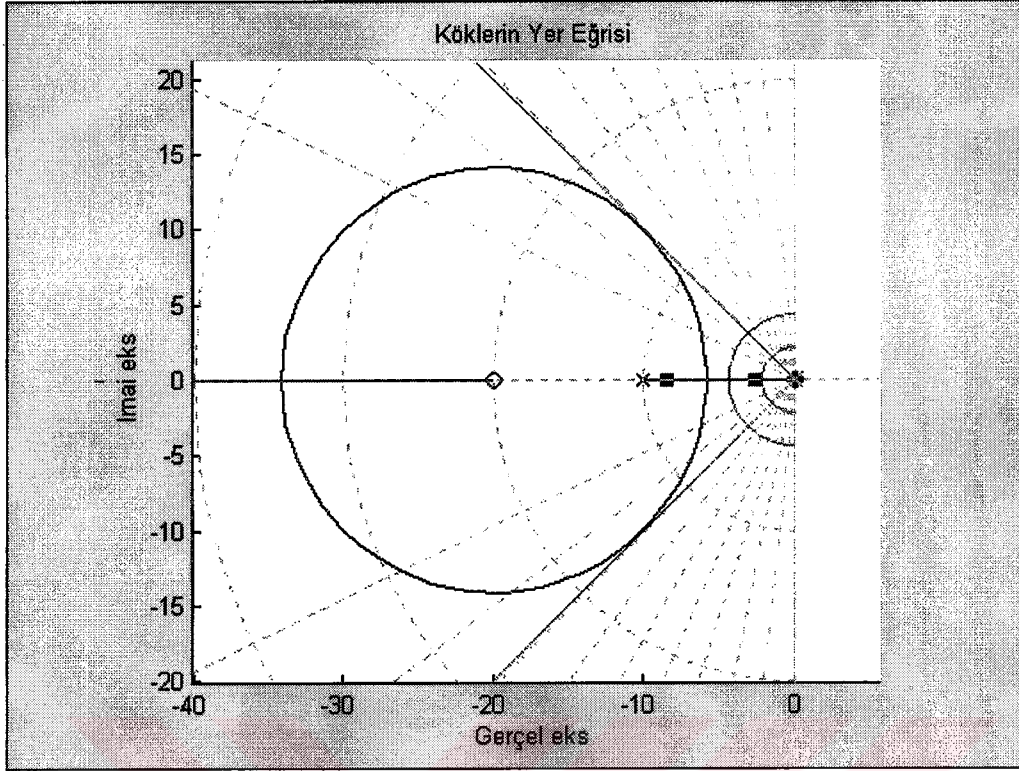


Şekil 5.3 PI-D Kontrolörünün Prensip Şeması

Kontrolörün tasarım sırasında ayarlanacak üç parametresi vardır. İleri yoldaki K_p ve T_i parametreleri sistem hızını etkilediği gibi sürekli hal davranışını da etkiler.[12] T_i nin çok küçük olması sistem kararlılığı üzerinde olumsuz etkisi vardır. Bu etki sistemin bozuculara karşı ve hata işaretinin değişiminde çok hızlı şekilde kontrol işaretini değiştirmesinden kaynaklanır. K_p nin büyük olmasında hata işareti ile kontrol işareti arasındaki oranı büyük tutmak anlamına gelmekte ve kararlılığa etkisi olumsuzdur.

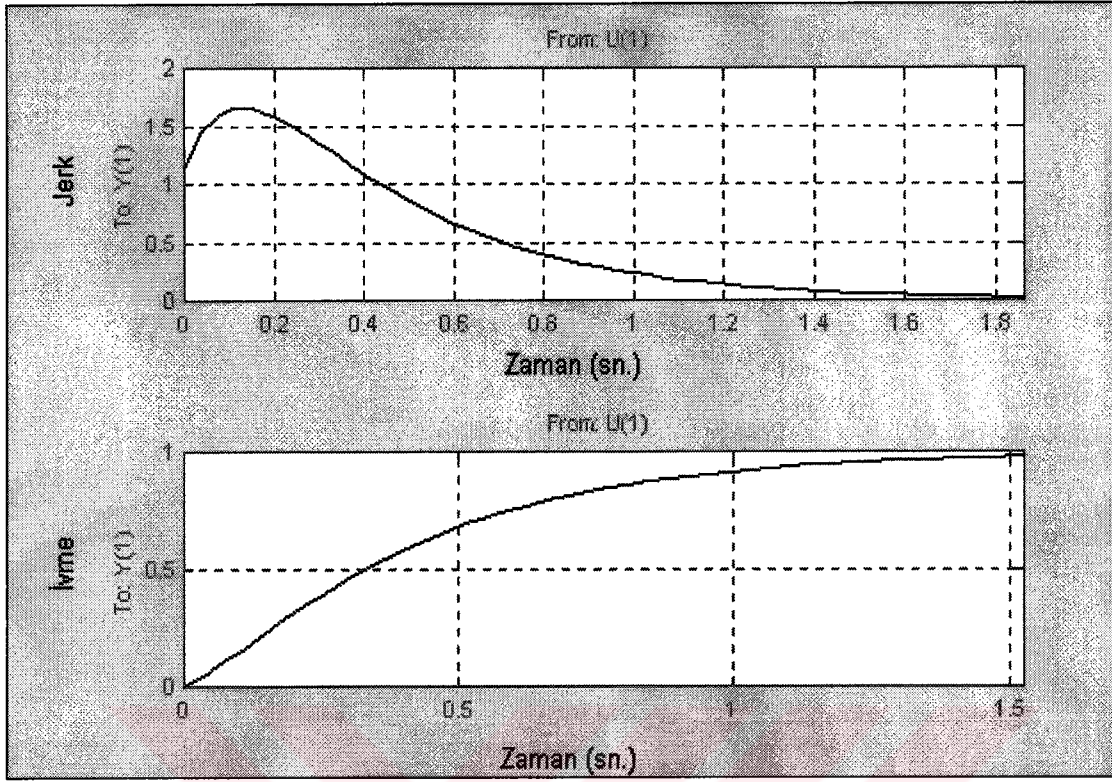
K_p ve T_i parametrelerinin atanması için sadece PI kontrolörü var gibi varsayıp ortalama bir kütle ve tekerlek yarıçapına göre ayarlama yapılabilir. Sonra parametre değişiminden dolayı olan etkilerin sistemin Γ kararlılığına etkisi incelenip T_d terimine duyulan ihtiyaç belirlenebilir.

Kontrolör PI kısmı parametre hesabı için ortalama $m=32$ ton ve ortalama tekerlek çapı $D = 0.62$ m olarak alındığında, sistem karakteristik polinomunun köklerinin bölüm 4 de elde edilmiş davranış ölçütlerine ait kök bölgesinde olması için integral zaman sabiti $T_i = 0.05$ ve kazanç katsayısı K_p değişken alabiliriz. Katsayıların bu şekilde belirlenmesi durumunda köklerin yer eğrisinin şekli şekil 5.4 ki gibi olmaktadır.



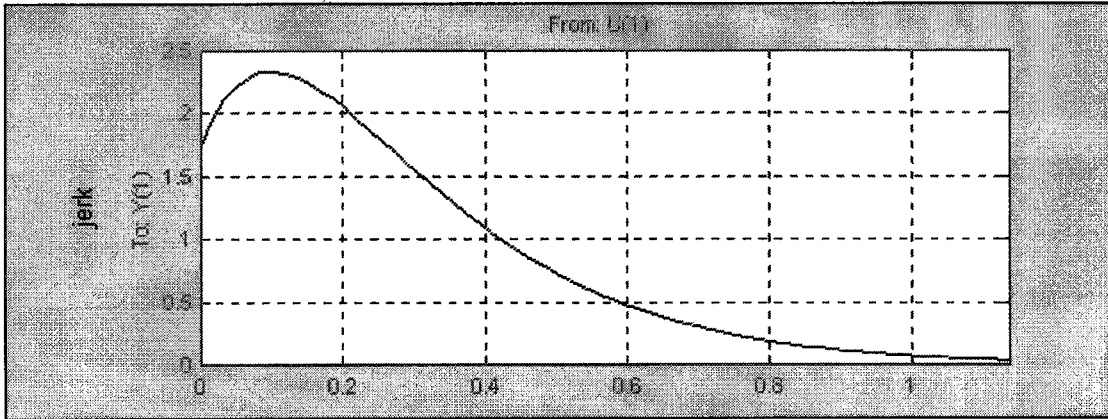
Şekil 5.4 PI Kontrolör ile sistemin köklerinin yer eğrisi

Kapalı çevrim köklerinin yerleri şekil 5.4 deki gibi değişmektedir. Karelerle gösterilen kapalı çevrim köklerinin baskın olanının Γ bölgesi içinde kalması için $K_p = 0.05$ alınabilir. Basamak girişe karşı sistem cevabı ivmeyi ve impuls girişe karşı sistem cevabı jerki göstermektedir. Kökler şekil 5.2 deki bölgede kaldığında sistem cevabının değişimleri şekil 5.5 teki gibi olmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere bu katsayılar ile atanan kapalı çevrim kutupları sayesinde ortalama kütle ve yarıçapa sahip aracın ivmesi aşırı olarak son değerine otururken jerkinde 2 m/s^2 nin altında kalması sağlanmıştır. Ortalama değerler için hesaplanan kutup yerleri parametrelerin değişmesi ile değişmektedir. Aracın boş olması durumunda ileri yol kazancı açık çevrim transfer fonksiyonundan görüleceği gibi artmaktadır. Artan kazanç değeri kutupların istenen bölgeden çıkmasına ve aşırı bir cevaba neden olacağı gözükmemektedir.



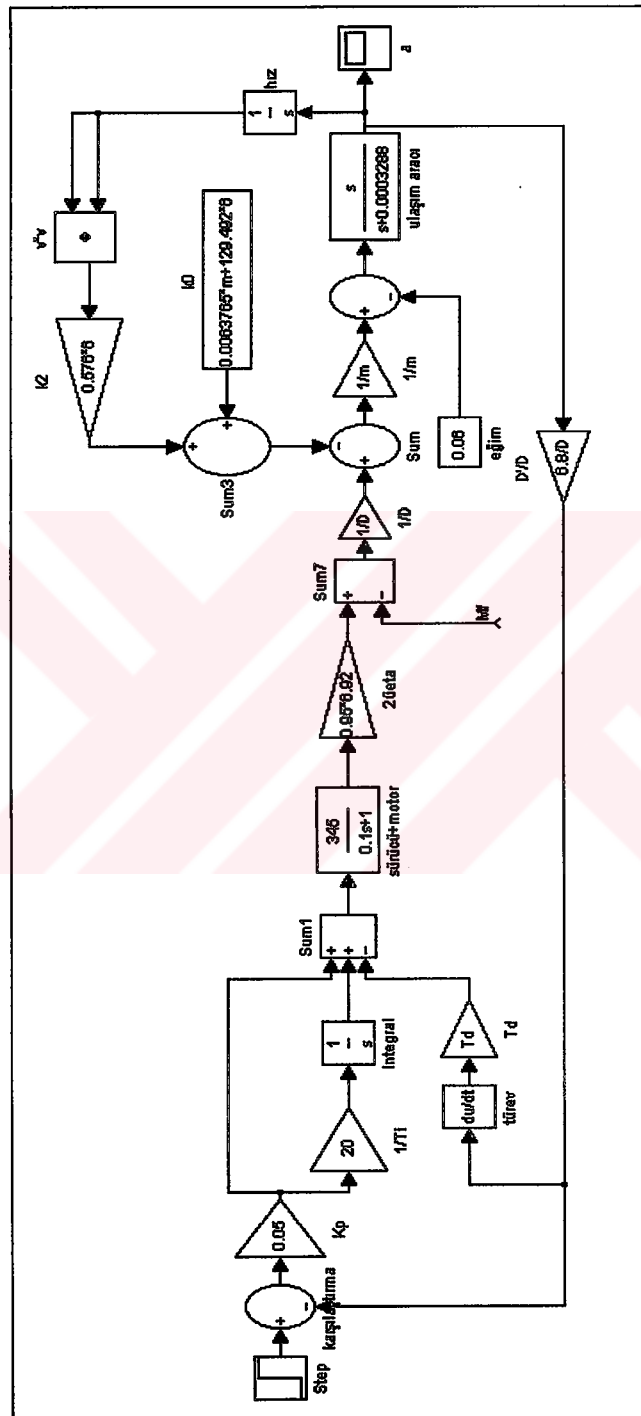
Şekil 5.5 Basamak ve impuls cevapları

Araç kütlesinin az olması durumunda jerk artar ve ergonomi sınırını geçer. Aşınma ile teker yarıçapının azalması durumunda çekiş kuvvetinin artması nedeni ile jerkin daha da artacağı aşıkardır. Kütlenin azalması durumunda jerkin değişimi şekil 5.6 da verilmiştir.



Şekil 5.6 Kütlenin azalması durumunda jerk değişimi

Türev teriminin geri beslemeye eklenmesi ile yeni kontrol blok diyagramımız şekil 5.7 deki gibi olmaktadır.



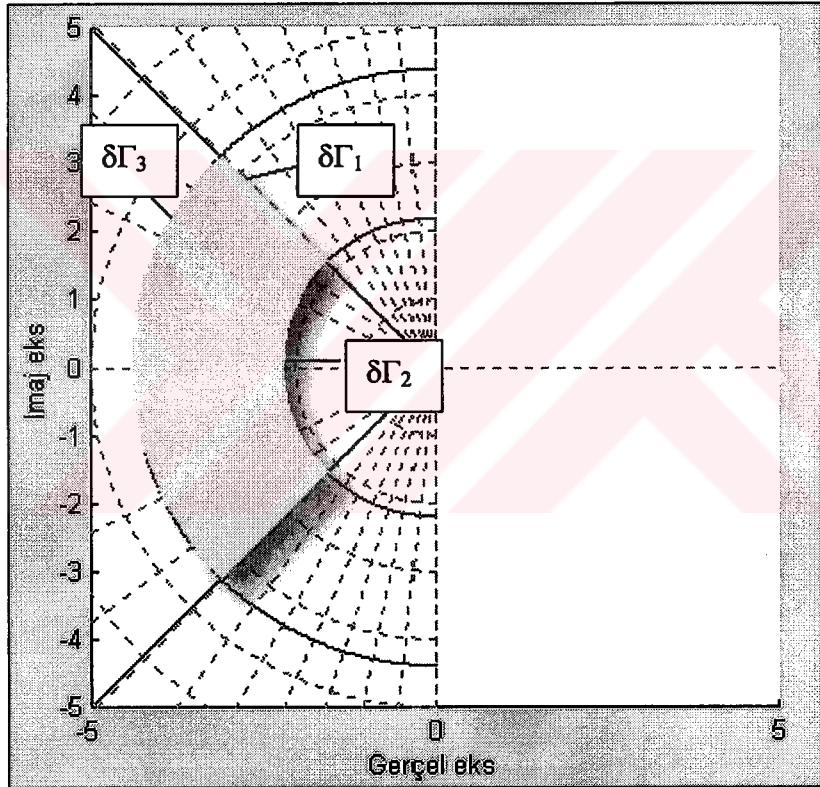
40

Geri besleme üzerine türev terimi eklenerek jerkin istenen sınır değerler içinde tutulması amaçlanmıştır ve T_d türev zaman sabiti ölçüde uygun bir şekilde belirlenmelidir.

Türev terimi eklendikten sonra sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu

$$\frac{a(s)}{r(s)} = \frac{K_p K D (s T_i + 1)}{(\tau T_i m D^2 + K T_d T_i + 10 D') s^2 + (T_i m D^2 (\tau c + 1) + 10 D' K K_p T_i) s + (T_i m D^2 c + 10 D' K_p K)} \quad (5.9)$$

olmaktadır. Karakteristik polinoma bakacak olursak değişken mD^2 parametresi yanında bizim ayarlama yapacağımız T_d türev zaman sabiti sayesinde kutupları istenen bölge içinde tutabiliriz.



Şekil 5.8 $\delta\Gamma$ Sınırları

Γ kararlılık kavramı amacımıza uygun çözümü bize vermektedir. Kutupların içinde bulunmasını istediğimiz Γ bölgemizin $\delta\Gamma$ sınırlarını belirleyelim. Bu sınırlar bölüm 4 de tarif edilen davranış kriterlerine göre belirlenmiştir. Buna göre $\delta\Gamma = \sigma(\alpha) + j\omega(\alpha)$ olarak tanımlandığına göre

$$\delta\Gamma_1=\alpha+j\alpha \quad \alpha \in [-3.1, -1.548]$$

$$\delta\Gamma_2=\beta+j\sqrt{19.23-\beta^2} \quad \beta \in [-4.385, -3.1] \quad (5.10)$$

$$\delta\Gamma_3=\gamma+j\sqrt{4.79-\gamma^2} \quad \gamma \in [-1.548, 2.19]$$

olarak bulunur.

Her $\delta\Gamma$ bölgesi için (5.7) (5.8) denklemlerini kuralım

$\Delta(s,Q) = a_2(q).s^2 + a_1(q).s + a_0(q)$ olmak üzere parametre uzayında parametre değişim sınırları

$$\delta\Gamma_1 \text{ için } a_0 = \frac{a_1^2}{2a_2}$$

$$\delta\Gamma_2 \text{ için } a_0 = 4.79 a_2 \quad (5.11)$$

$$\delta\Gamma_3 \text{ için } a_0 = 19.23 a_2$$

çıkar.

Bu sınırlar parametre değişimlerinin eşitsizliklerle kabul edilebilirliğini tayin etmektedir. Polinom katsayılarını açık bir ifade ile yazdığımızda

$$0 < (2.5 \cdot 10^{-3})(mD^2)^2 - (14.65 + 1.7 \cdot 10^{-9} T_d) mD^2 + 5646.26 - 4757008 T_d$$

$$1542.24 - 0.09615 mD^2 < 29657.27 T_d \quad (5.12)$$

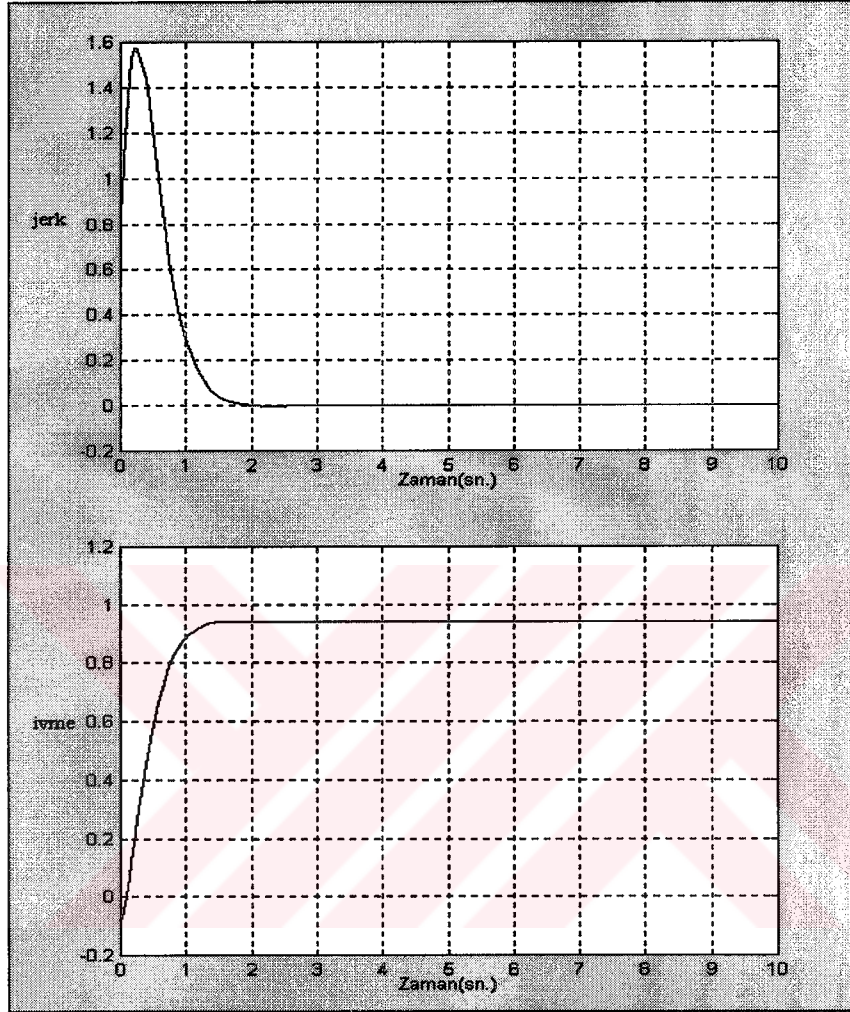
$$1542.24 - 0.02458 mD^2 > 7587.82 T_d$$

eşitsizlikleri ortaya çıkar.

Bu eşitsizliklerden mD^2 nin alt ve üst sınırlarına göre T_d nin değeri $0.018 < T_d < 0.026 < 0.14$ çıkmaktadır. Bu durumda T_d için 0.025 seçmek uygun bir parametre ataması olacaktır.

Parametre atamasından sonra simulasyonların sonucuna bakarak tasarımıımızı sııayabiliriz.

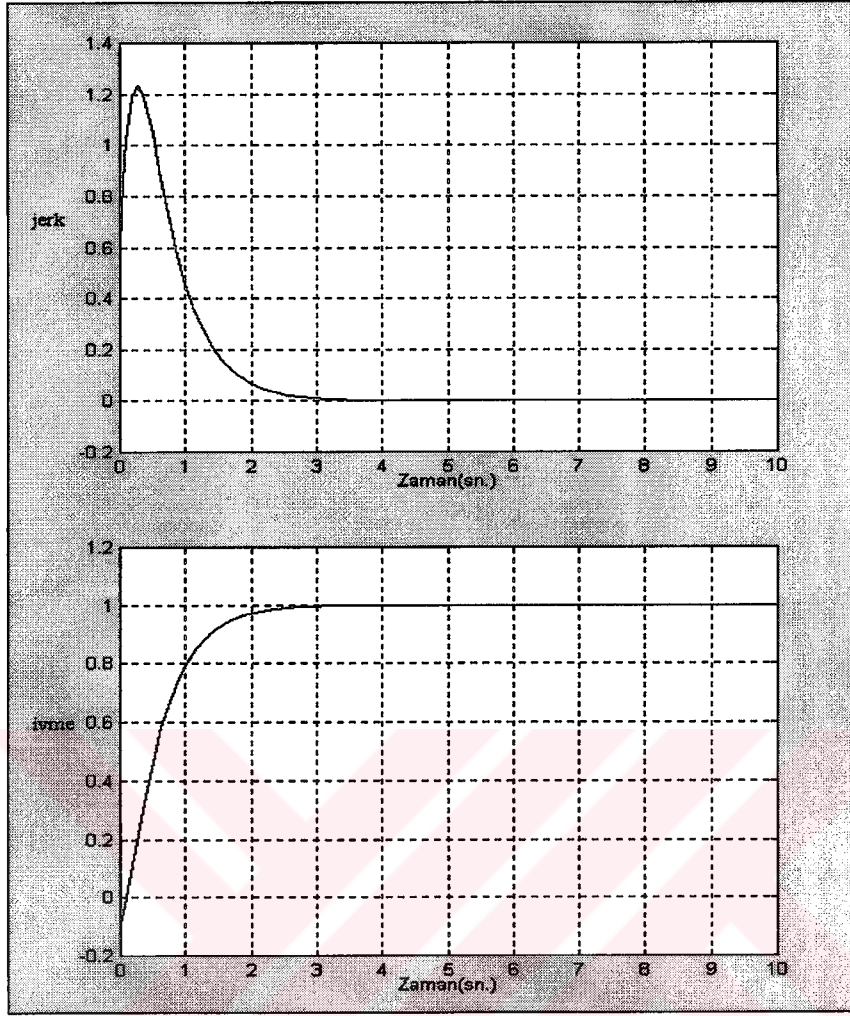
Ortalama k t le ve yarıçap için sistemin cevabı  ekil 5.9 daki gibidir.



Şekil 5.9 Ortalama k t le ve yarıçap için sistem cevabı

Sistem ivme cevabını inceleyecek olursak a ımsız şekilde sürekli haline oturmaktadır, ancak sürekli halde referansa ula mamaktadır. Geri besleme işaretinin tekerlek yarıçapına ba lı olmasından dolayı tekerlek yarı çapı k   ld  nde yanlış hız     m  alınmakta dolayısı ile yanlış ivme     m  yapılmaktadır.

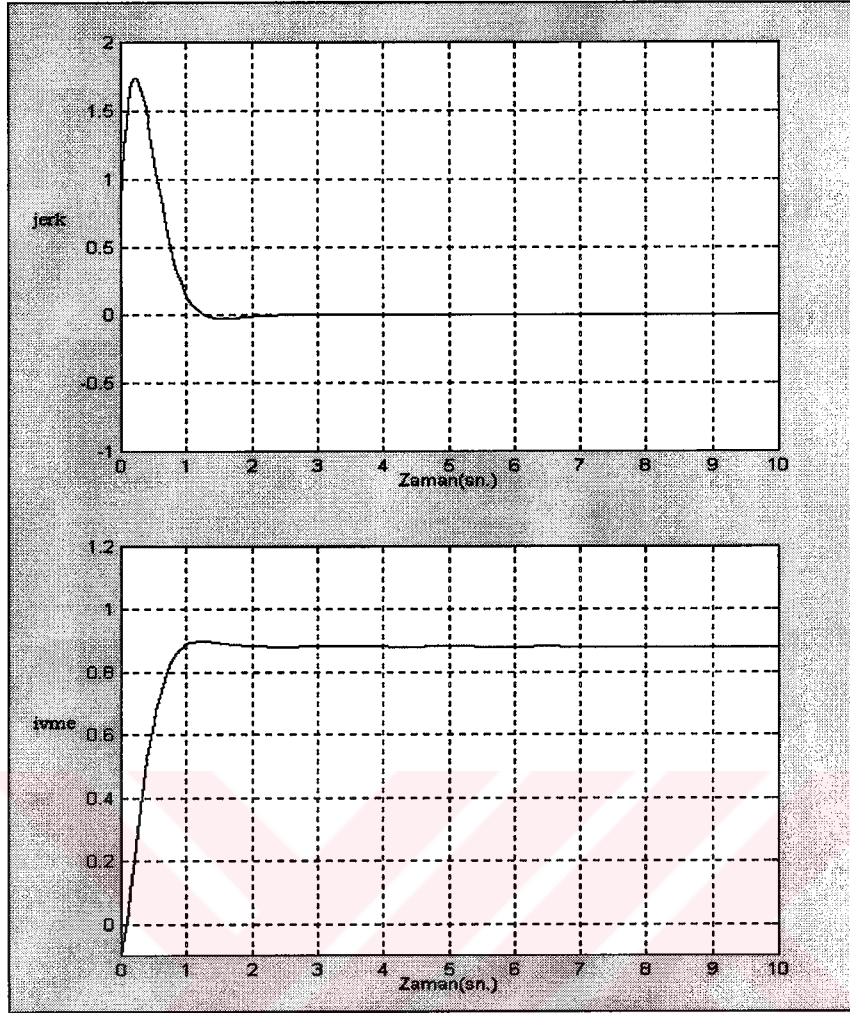
K t lenin artması durumunda jerkin azalacağı bellidir. Aracın tam dolu olması durumunda yani k t lesinin 42 ton olması ve tekerleklerin yeni yani $D = 0.68$ m olması durumu değişken parametrelerden birisinin sınır değeridir. Bu sınır değer için simulasyon sonucu  ekil 5.10 dadır.



Şekil 5.10 Üst sınır değer için sistem cevabı

Şekil 5.10 da görüldüğü gibi üst sınır değer için jerk alt sınırın üzerindedir, ivme ise aşırı bir şekilde sürekli rejime girer. Tekerlek aşınmamış boyutunda olduğundan sürekli halde referansa ulaşmaktadır.

Diğer bir sınır durum ve kontrolörümüzün dayanıklılığının esas test edilmesi gereken nokta aracın boş yani $m=29$ ton ve tekerleklerin değiştirilmesi gerekli olduğu seviyeye kadar aşınmış olma yani $D= 0.6$ m olması durumudur. Bu sınır durumu için sistem cevabının inceleyelim.



Şekil 5.11 Alt sınır değeri için sistem cevabı

Şekil 5.11 de görüldüğü gibi sistem ivme cevabında hafif bir aşım vardır, bu aşım %4.3 dür ve kutuplar belirlediğimiz Γ bölgesinin sınırları içinde kalmıştır. Jerk de 2 m/s^2 sinin altında kalarak tüm davranış ölçütleri parametre değişimlerine rağmen sağlanmıştır.

Simulasyon yaparken bozucularda göz önünde bulundurulmuştur, davranış ölçütlerinin bozuculara rağmen sağlanması tasarımın başarılı olduğunun kanıtıdır.

Tasarlanan kontrolör hızlanma modundaki sistem içindir. Yavaşlama modunda kontrolör katsayıları farklı olacaktır. Bunun sebebi daha önce de belirtildiği gibi redüktör üzerindeki verim η değişmektedir. Yavaşlama kontrolörünün kazanç katsayısı değişecektir. Öte yandan yavaşlama dinamiği sadece motor tarafından değil mekanik fren tarafından da etkilendiği için mekanik frenler içinde bir kontrolör

tasarlanmalıdır. Pratikteki yaygın uygulama bu kontrolörün PI kontrolör olması yönündedir.

Frenleme sırasında ilk aşamada elektriksel fren devreye girmelidir. Frenlemede iki kontrolörün paralel çalışması gerektiğinden mantıksal işaretlerle kontrolörler aktif edilmektedir. Yavaşlama referansı geldiğinde referans elektriksel olarak elde edilecek kadar küçükse fren sadece elektriksel olarak yapılır bu durumda mekanik fren kontrolörü devreye girmez. Ancak araç yavaşladıkça elektriksel fren etkinliğini kaybeder bu durumda mekanik fren devreye girmelidir.

Gelen referans elektriksel olarak takip edilemeyecek kadar büyük ise elektriksel olarak üretilebilecek momente karşılık elektriksel referans oluşturulur ve bu referans dondurulur ve ivme hatası mekanik fren kontrolörüne girer ve mekanik fren referansı üretilir.

Elektriksel frenleme etkinliği hız azaldıkça düştüğünden ivme hatası büyüyecektir buda mekanik fren referansının artmasını ve frenleme ivmesinin böylece aynı kalmasını sağlamaktadır. Bu yöntem ile iki kontrolör paralel olarak çalışabilmektedir.

6. SONUÇLAR

Çalışmamız bir raylı ulaşım aracının genel kumanda ve kontrol sisteminde olması gerek özellikler ve bölümler üzerine olmuştur. Kumanda büyüklükleri aracın tüm donanımına hakim olmayı ve sürücünün minimum sayıda komut ile aracın otomatik olarak yapılması üzerine geliştirilmiştir. Kumanda devreleri sözel olarak anlatılmıştır.

Ulaşım aracının kontrol sistemi tasarlanırken aracın hızlanma ve yavaşlama durumu matematik modelleri elde edilmiş ve kontrolörün kutuplarını atamak üzere dayanıklı kontrol kavram kullanılarak ve daha önce elde edilmiş yöntemleri kullanarak kontrolör kutupları atanmıştır.

Aracın kumanda ve kontrol sistemi tasarlanırken nasıl gerçekleşeceği önemli bir sorudur. Kumanda, kontrol ve iletişim olanakları incelendiğinde en uygun kontrolörün tüm ihtiyaçları karşılayan PLK olacağına karar verilmiştir. Endüstriyel otomasyon sistemlerinde başarı ile kullanılan kumanda işlemlerini kolayca gerçekleştirebildiği gibi çok hızlı kayan nokta işlemleri yapabildiğinden fark denklemleri elde edilen bir kontrolörde gerçekleştirebilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan saha veri yolu uygulamaları için geliştirilen PLK haberleşme modülleri ulaşım aracının vagonları arasında aktarılması gereken verileri iletecek etkin bir çözümdür. Tüm bu sebeplerden dolayı raylı ulaşım aracı için en uygun kontrolör PLK olacağı açıktır. Çalışma koşullarının mevsim değişikliklerinden ve dışarda çalışmadan dolayı PLK için uygunsuz olduğu düşünülse de yeni üretilen outdoor PLK lar bu soruna da çözüm bulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Ackermann, J.**, 1998. Third Printing. Robust Control Systems with Uncertain Physical Parameters, Springer- Verlag .
- [2] **Ogata, K.**, 1997. Third Edition Modern Control Systems, Prentice-Hall International, Inc.
- [3] **Kuo, B.(Çev. Atilla BİR)**, 1999. Otomatik Kontrol Sistemleri Literatür Yayıncılık, İstanbul
- [4] **Kurtulan, S.**, 1997. Elektrikli Sürücü Düzenleri, Alternatif Yayın, İstanbul
- [5] **Ural, A.**, 1991. Modern Elektrikli Ulaşım Sistemleri, Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi
- [6] **Beer, F., Johnston, R.**, Ondördüncü Baskı 1996. Statik, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [7] **Langhaar, H. L., Boresi, A. P.** 1959. Engineering Mechanics Dynamics, McGRAW- HILL, Inc.
- [8] **Higdon, A., Stiles, W.**, 1957. Engineering Mechanics Statics, Prentice-Hall International, Inc.
- [9] **ASEA Traction**, 1989 İstanbul LRV Instruction Manuel
- [10] **Siemens Energy and Automation Inc.** SIMATIC-S7 300-400 Programmable Controller Manual
- [11] **Siemens Energy and Automation Inc.** SIMOVERT MASTERDRIVE User Manuel
- [12] **Kurtulan S., Gökaşan M., Boğosyan S.**, 2000. Programlanabilir Lojik Kontrolör ile Bir Raylı Ulaşım Taşıtı Kontrol Sisteminin Gerçeklenmesi, Eleco 2000, 348
- [13] **Ackermann, J., Kaesbauer, D., Muench, R.**, 1991. Robust Gamma-stability Analysis in a Plant Parameter Space, Automatica, vol 27 No:1, 75-85.
- [14] **Gustafsson, F.**, 1997, Slip-based Tire-Road Friction Estimation, Automatica, vol 33 No:6, 1087-1099.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Ankara'da doğdum. 1983 yılında Kavaklıdere ilkokuluna, 1988 yılında Ankara Gazi Anadolu Lisesine başladım. 1995 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliğini kazandım. Üniversite öğrenimi sırasında Kontrol mühendisliği alanına yönelerek 1999 yılında bölümü 3. derece ile bitirdim ve aynı sene İ.T.Ü. Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği yüksek lisans programına girmeye hak kazandım. 1999 yılında Elektrik Elektronik Fakültesi Kontrol ve Kumanda Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak göreve başladım, halen bu görevi yürütmekteyim.

