

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNA
YÖNELİK ÇALIŞMALAR**

MUHAMMED DALYAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE OTOMASYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. GALİP CANSEVER**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNA
YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Muhammed DALYAN tarafından hazırlanan tez çalışması 22.11.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Galip CANSEVER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Galip CANSEVER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamın her aşamasında yardımını, tavsiyelerini, değerli vaktini ve desteğini esirgmeden beni yönlendiren; bilgi ve birikimlerini bana aktaran danışman hocam Sayın Prof. Dr. Galip Cansever'e;

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümü hocalarıma;

Tez çalışmamı tamamlayabilmem için göstermiş oldukları müsamahadan dolayı ETO Enerji A.Ş. ve Alstom Transport'daki çalışma arkadaşlarıma;

Ayrıca tüm hayatım boyunca ilgi ve desteklerini benden esirgemeyen değerli aileme, tüm sevdiklerime ve özellikle de desteği, sabrı ve fedakârlığından dolayı sevgili eşim Esra DALYAN'a;

Teşekkür ederim.

Ağustos, 2011

Muhammed DALYAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Bulgular	1
BÖLÜM 2.....	2
RAYLI SİSTEMLER.....	2
2.1 Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi	2
2.1.1 Dünyada Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi.....	2
2.1.2 Türkiye’de Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi	3
2.1.2.1 Osmanlı Dönemi Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi	4
2.1.2.2 Cumhuriyet Dönemi Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi.....	4
2.2 Raylı Ulaşım Sistemleri ve Kullanılan Araç Tipleri	6
2.2.1 Hafif Raylı Sistemler	6
2.2.1.1 Tramvay.....	6
2.2.2 Ağır Raylı Sistemler	6
2.2.2.1 Metro	6
2.2.2.2 Banliyö.....	7
2.2.2.3 Yolcu Trenleri	7
2.2.2.4 Yük Trenleri	7

2.2.3	Monorail (Üst Yolu Elektrikli Taşıt)	7
2.2.4	Maglev (Magnetic Levitation System)	7
2.2.5	A.G.T (Otomatik Sürücüsüz Sistemler).....	8
2.3	Enerji İletim Sistemleri	8
2.3.1	Enerji Besleme Gerilim Seviyeleri	8
2.3.2	Enerji İletim Şekilleri	9
2.4	Emniyet ve Topraklama	10
2.4.1	Emniyet	10
2.4.2	Topraklama Sistemleri	10
2.5	Sinyalizasyon ve Otomatik Sürüş Sistemleri	10
BÖLÜM 3.....		12
RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ.....		12
3.1	Enerji Tasarrufu ve Önemi	12
3.2	Enerji Tüketimi-Zaman İlişkisi	12
3.3	Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliği Yöntemleri	13
3.3.1	Frenleme Kayıplarının Azaltılması.....	13
3.3.2	Hız Profilinin Optimizasyonu.....	13
3.3.3	Güzergâhtaki Çakışmaların Önlenmesi	14
3.3.4	Optimize Araç Hareket Tarifeleri	14
3.3.5	Enerjinin Depolanması	14
3.3.6	Güç Zincirinde Optimizasyon	15
3.3.7	Enerji Tasarrufunda İlave Yöntemler	15
BÖLÜM 4.....		17
OPTİMAL KONTROL.....		17
4.1	Dinamik Sistemler	17
4.2	Maliyet Fonksiyonunun Minimizasyonu	19
4.3	Lagrange Çarpımı	20
4.4	Nümerik (Sayısal) Optimizasyon	21
4.5	Dinamik Sistemlerin Optimizasyonu İçin Klasik Maliyet Fonksiyonları	22
4.5.1	Lagrange Problemi (1780).....	22
4.5.2	Mayer'in Problemi (1890).....	23
4.5.3	Bolza'nın Problemi (1900).....	23
4.5.4	Hamiltonian.....	24
4.6	Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler Yöntemi	25
BÖLÜM 5.....		29
ÖNERİLEN RAYLI SİSTEM SÜRÜŞ MODELİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU.....		29
5.1	Matlab ve Simulink	29
5.2	Araç Parametreleri ve Tren Hattının Güzergahı Detayı	29
5.3	Otomatik Sürüş Modelinin Oluşturulması	32
5.3.1	Motorların Modellenmesi.....	34
5.3.2	Eğim-Tork Ayarı Alt Sistemi.....	34

5.3.3	Eğim-Hız Kontrol Ayarı Alt Sistemi	34
5.3.4	Hız-Çekiş Gücü Ayarı Alt Sistemi	34
5.4	Manuel Sürüş Simülasyonu.....	39
5.5	Parametre Tahmin Aracı Kullanımı	41
5.6	120 km/s Hız Profili Simülasyonu.....	43
5.7	80 km/s Hız Profili Simülasyonu.....	46
5.8	Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	50
BÖLÜM 6.....		51
SONUÇ VE ÖNERİLER		51
KAYNAKLAR.....		53
ÖZGEÇMİŞ.....		54

SİMGE LİSTESİ

t	Zaman
x	Konum
v	Hız
V	Gerilim
I	Akım
λ	Lagrange Çarpımı
J	Maliyet Fonksiyonu
W	Watt
N	Newton
m	Kütle
g	Yerçekimi Sabiti
P(v)	Tren Çekiş Gücü
Q(v)	Sürüklenme Etkisi
B	Frenleme Kuvveti

KISALTMA LİSTESİ

yy.	Yüzyıl
km	Kilometre
DC	Direct Current
TTM	Tahrik Trafo Merkezi
GPS	Global Positioning System
GTO	Gate Turn-Off Thyristors
PWM	Pulse With Modulation

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Raylı sistemlerde enerji iletim şekilleri..... 9
Şekil 4.1	Sürekli zaman dinamik prosesi 17
Şekil 4.2	Gürültülü Gauss fonksiyonuna oturmuş doğrusal olmayan en küçük kareler 27
Şekil 5.1	Çekiş Gücü-Hız Performansı Eğrisi 30
Şekil 5.2	Tren Hattının Güzergahı 31
Şekil 5.3	Tren Dinamikleri 32
Şekil 5.4	Raylı Sistem Sürüş Modeli 33
Şekil 5.5	Eğim-Tork Ayarı Alt Sistemi 36
Şekil 5.6	Eğim-Hız Kontrol Ayarı Alt Sistemi..... 37
Şekil 5.7	Hız-Çekiş Gücü Ayarı Alt Sistemi 38
Şekil 5.8	Manuel Sürüş Akım-Gerilim-Zaman Grafiği..... 39
Şekil 5.9	Manuel Sürüş Hız-Zaman Grafiği 40
Şekil 5.11	Manuel Sürüş Güç-Zaman Grafiği..... 41
Şekil 5.12	Parametre Tahmin Aracı Arayüzü..... 42
Şekil 5.13	120 km/s Hız Profili Yaklaşımı..... 43
Şekil 5.14	120 km/s Hız Profili İçin Kontrol Parametre İterasyonları..... 44
Şekil 5.15	120 km/s Hız Profili İçin Akım-Gerilim-Zaman Grafiği..... 44
Şekil 5.16	120 km/s Hız Profili İçin Hız-Zaman Grafiği 45
Şekil 5.17	120 km/s Hız Profili İçin Konum-Zaman Grafiği..... 45
Şekil 5.18	120 km/s Hız Profili İçin Güç-Zaman Grafiği 46
Şekil 5.19	80 km/s Hız Profili Yaklaşımı..... 47
Şekil 5.20	80 km/s Hız Profili İçin Kontrol Parametre İterasyonları..... 47
Şekil 5.21	80 km/s Hız Profili İçin Akım-Gerilim-Zaman Grafiği 48
Şekil 5.22	80 km/s Hız Profili İçin Hız-Zaman Grafiği 48
Şekil 5.23	80 km/s Hız Profili İçin Konum-Zaman Grafiği..... 49
Şekil 5.24	80 km/s Hız Profili İçin Güç-Zaman Grafiği 49
Şekil 5.25	Farklı Hız Profilleri İçin Karşılaştırmalı Güç-Zaman Grafikleri..... 50

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	EN 50163’de tanımlanmış raylı sistemler enerji besleme gerilim seviyeleri.....8
Çizelge 3.1	Enerji tasarrufunda farklı metodların etkinliklerinin karşılaştırılması.....16
Çizelge 5.1	Araç Parametreleri.....30
Çizelge 5.2	Konum bilgisine karşılık gelen negatif tork ve hız kontrol değerleri.....35

RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNA YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Muhammed DALYAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Galip Cansever

Günümüzde özellikle fosil yakıtların da tükenmeye yüz tutması ile dünyada ve ülkemizde gelecek için enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gittikçe artacaktır. Fakat enerjiye olan ihtiyacın tek çözümü yeni enerji kaynakları değildir. Aynı zamanda mevcut tüketilen enerji miktarının düşürülmesi ile, yani tasarruf yöntemi ile de büyük bir oran da enerji elde edilebilir. Bu durum aynı zamanda giderlerin de düşmesine neden olacaktır.

Elektrikli raylı sistemlerde de harcanan enerjinin büyük bir kısmı, farklı yöntemlerle geri dönüştürülebilir. Gereksiz enerji harcamalarının önüne geçilebilir. Bu yöntemlerden bir tanesi de optimum enerji-zaman seviyesinin sağlanabileceği sürüş sistemleridir.

Bu çalışmada güzergahın eğim v.b. coğrafi koşullarından faydalanılarak enerji tüketiminin nasıl azaltılabileceği üzerinde durulmuştur. Belli bir hedefe varış süresi ile tüketilen enerji arasında optimumizasyona dayalı bir bağ kurulmaya çalışılmış ve simülasyon sonuçları ile bu bağ sağlanarak, enerji tüketiminde ciddi azalmalara gidilebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: raylı sistemler, demiryolu, enerji verimliliği, enerji tasarrufu, optimizasyon, optimal kontrol, minimizasyon.

**ENERGY OPTIMIZATION ORIENTED STUDIES
IN RAILWAY SYSTEMS**

Muhammed Dalyan

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Galip Cansever

Now a days especially after fossil fuels have started to become depleted our world and country's future need for energy resources slowly increases. However, the solution for the need of excess energy does not just base on the grounds of producing new energy. At the same time its about bringing the level of used energy down, by using saving disposition methods to redeem a big amounts of energy. This condition will lead to a decrease in expenses.

A big amount of the energy consumed in the electrical railway systems may also be renewed and restored. It can stand in the way of unnecessary expenditure. A part of one of these processes include optimum energy-time levels potential traction system. In this study, by benefitting from the route gradient geographical state, it has allowed us to focus on how to decrease energy consumption. Between the clear target of the arrival time and the energy consumed a connection has been established based on optimization and simulation results with this connection solidly established show a serious amount of decrease in energy consumption.

Key Words: railway systems, railway, energy efficiency, energy savings, optimization, optimal control, minimization.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

1.1 Literatür Özeti

Enerji verimliliği, enerji tasarrufu v.b. konularda daha öncesinde ve günümüzde oldukça fazla çalışma yapılmıştır ve yapılmaya da devam etmektedir. Raylı sistemlerde enerji optimizasyonu da, enerji verimliliğine raylı sistemlerin işletimi yönünden nasıl bir katkı sağlayabileceği konusunu işlemektedir.

1.2 Tezin Amacı

“Raylı Sistemlerde Enerji Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar” başlıklı bu tez çalışmasında hedeflenen olgu, enerji-zaman dengesini kurabilmektir. Daha az enerji ile daha kısa sürede daha fazla yol kat etme amacı güden bir bakış açısından yola çıkarak oluşturulan model ve simülasyon düzeneği ile bu amaç gerçekliğe bir adım daha yaklaşmıştır. Enerjinin tüketiminin azaltılması ile birçok giderde büyük oranda azalma meydana gelecektir.

1.3 Bulgular

Oluşturulan model ve simülasyon düzeneğinin verdiği sonuçlar göstermiştir ki, zamandan feragat edilebilen sürüş durumlarında oldukça yüksek oranda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Diğer bir yandan seyahat süresinin kısa olmasının istendiği durumlarda da optimum hız profilleri elde edilerek ve minimum oranda enerji tüketilerek beklenen sonuçların alınabildiği görülmüştür.

BÖLÜM 2

RAYLI SİSTEMLER

Raylı sistemler, ilk uygulamaya başlandığı tarihten itibaren, ülkemizde olduğu gibi tüm dünyada insan ve yük taşımacılığında en güvenilir, ekonomik, yenilikçi ve çevre dostu taşıma sistemlerinden biri haline gelmiştir. Gelişen teknolojilerin, metro ve tramvay sistemlerine de uygulanması sonucunda, demiryolu ulaşımı bugün olduğu gibi, geleceğimizin de en emniyetli, ekonomik ve hızlı ulaşım sistemleri olmaya devam edecektir.

2.1 Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

2.1.1 Dünyada Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Fransız ihtilali ile başlayan sanayi devrimi, fabrikalaşma ile üretimin artması, ham madde ihtiyaçları üretilen mamul ve yarı mamullerin pazarlanması ulaşımı zorunlu kılmıştır. Buhar makinesinin bulunması ulaşımı hem kolay hem ucuz hem de kolay kılmıştır. 1769 yılında Fransız Nicolas Cugnot, 1786 yılında ise İngiliz William Murdock buhar gücünü kara yolu ulaşımında denemiş, 1801 yılında ise Richard Trevichick buhar gücü ile çalışan lokomotifini demir yolu üzerinde denemiştir. Ancak kullanılan demirin rayların lokomotif ağırlığı altında kolayca kırılması ve lokomotif yapımında kullanılan malzemenin dayanıksız olması demir yollarının gelişimini engellemiştir.

Bu konuda asıl gelişme George Stephenson tarafından gerçekleştirilmiştir. Stephenson daha sağlam ray ve lokomotif yapmayı başarmış, bunu takiben Darlington maden ocağını Limanına bağlayan hattın yapımını gerçekleştirmiştir.

Bu başarı İngiltere’de büyük bir ilgi uyandırmış, bunun sonucunda 1829 yılında “ROKET” adı verilen Lokomotifin yapımından sonra Stephenson’a Liverpool - Manchester hattının yapımı teklif edilmiştir. Bu gelişmeler atlı araba sahiplerini, su yoluyla ulaşım yapanları ve hattın geçeceği arazi sahiplerini rahatsız etmiş, bu grupların tüm engellemelerine rağmen 15 Eylül 1830 yılında Liverpool - Manchester hattı işletmeye açılmıştır.

Daha sonraki yıllarda diğer Batı devletlerinde de demir yolu yapımına başlanıldığını görmekteyiz. Fransa’da ilk demir yolu hattı 1832 yılında St. Etienne-Lyon arasında, Almanya’da 1835 yılında Nürnberg-Furth arasında, Belçika’da 1835 yılında Brüksel-Malines arasında ilk demir yolları yapımları gerçekleştirilmiştir.1852 yılında İngiltere’de demir yolunun ulaşmadığı sadece 3 şehir kalmıştır.

Demir yolu aracılığı ile 19.yy.da dünya küçülmeye başlamış, ulaşılan her bir nokta sanayileşmenin gelişimini sağlayan bir unsur olmuştur.

Gelişmiş ülkeler bir yanda kendi ülkelerinde demir yolu yaparken, diğer bir yanda bugün üçüncü dünya ülkesi olarak adlandırılan (o zamanın sömürge yada yan sömürgesi olan) ülkelerde demir yolu yapımına başlamışlardır. Demir yolu inşasını yapan ülke, o ülkedeki en ücra noktaların dahi kendi sermayesine açılmasını sağlamıştır.

Değişik amaçlarla yapılmış olsa da demiryolları dünya üzerinde süratle yaygınlaşmıştır. Nitekim 1850 yılında 38,600 km olan Dünya demiryollarının uzunluğu, 1860 yılında 108,000 km’ye, 1870 yılında 209,000 Km’ye, 1880 yılında 372,500 km’ye, 1890 yılında 612,200 km’ye,1905 yılında 860,000 km’ye, 1913 yılında ise 1,110.000 km’ye ulaşmıştır.

2.1.2 Türkiye’de Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Ülkemizde ilk demir yolu 1856 yılında 130 km’lik İzmir - Aydın hattının inşasının İngiliz şirketi tarafından yapılmasıyla olmuştur. Osmanlı Devletinde demir yolu İngiliz, Fransız ve Almanlara demir yolu hatları km başına kar güvencesi ve 20 km’lik bir koridorda bulunan madenlerin işletilmesi hakkının verilmesi karşılığında yaptırılmış ve bu

devletlerin kendi siyasi ve ekonomik çıkarları doğrultusunda hat çalışmalarını belirlemişlerdir.

Cumhuriyetten sonra demir yolu yapımı İkinci Dünya Savaşı'na kadar büyük bir hızla sürdürüldü. Savaş nedeniyle 1940'dan sonra yavaşladı. 1923-1950 yılları arasında yapılan 3.578 km.lik demir yolunun 3.208 km'si, 1940 yılına kadar tamamlandı. 1927'de Kayseri, 1930'da Sivas, 1931'de Malatya, 1933'de Niğde, 1934 Elazığ, 1935 Diyarbakır, 1939'da Erzurum demir yolu ağına bağlanmıştır. Yabancı şirketlerin elindeki demir yolu hatları satın alınarak devletleştirilmiş, bir kısmı da anlaşmalarla devir alınmıştır.

Mevcut demir yolu hatlarının büyük bölümü ülkenin batı bölgesinde yoğunlaştığından, Orta ve Doğu bölgelerinin merkez ve sahil ile bağlantısını sağlamak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, demir yolu hatlarının üretim merkezlerine direkt olarak ulaşarak ana hatların elde edilmesi temin edilmiştir.

2.1.2.1 Osmanlı Dönemi Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

1856-1922 yılları arasında Osmanlı topraklarında şu hatlar yapılmıştır:

Rumeli Demiryolları 2383 km normal hat

Anadolu-Bağdat Demiryolları 2424km normal hat

İzmir-Kasaba ve uzantısı 695 km normal hat

İzmir-Aydın ve şubeleri 610km normal hat

Şam-Hama ve uzantısı 498 km dar ve normal hat

Yafa-Kudüs 86 km normal hat

Bursa-Mudanya 42 km dar hat

Ankara-Yahşihan 80 km dar hat olmak üzere toplam 8.619 km.

2.1.2.2 Cumhuriyet Dönemi Raylı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Yabancı şirketler tarafından inşa edilen demir yolu hattının 4000 km'lik bölümü, Cumhuriyetin ilanı ile belirlenen milli sınırlar içinde kalmıştır. Osmanlı'dan Türkiye Cumhuriyeti'ne, yabancı şirketlere ait 2.282 km'lik normal genişlikte hat ve 70 km

uzunluğında dar hat ile devletin yönetiminde olan 1.378 km'lik normal genişlikte hat kalmıştır.

Demir yolu yapımı İkinci Dünya Savaşı'na kadar sürdürüldü. Savaş nedeniyle 1940'dan sonra yavaşladı. 1923- 1950 yılları arasında yapılan 3.578 km.lik demir yolunun 3.208 km.si, 1940 yılına kadar tamamlandı.

Kara yolu, 1950 yılına kadar uygulanan ulaşım politikalarında demir yolunu besleyecek, bütünleyecek bir sistem olarak görülmüştür. Ancak karayollarının demiryollarını bütünleyecek, destekleyecek biçimde geliştirilmesi gereken bir dönemde demiryolları adeta yok sayılarak kara yolu yapımına başlanmıştır.

1960 sonrası planlı kalkınma dönemlerinde, demiryolları için öngörülen hedeflere ulaşamamıştır. Bu planlarda, ulaştırma alt sistemleri arasında koordinasyon sağlanması hedeflense de, plan öncesi dönemin özellikleri devam ettirilerek ulaştırma alt sistemleri arasında koordinasyon sağlanamamış ve karayollarına yapılan yatırımlar bütün plan dönemlerinde ağırlığını korumuştur. Bütün planlarda, sanayinin artan taşıma taleplerinin yerinde ve zamanında karşılanabilmesi için demiryollarında yatırımlara, yeniden düzenlemelere ve modernizasyon çalışmalarına ağırlık verilmesi öngörülmüş olmasına rağmen hayata geçirilememiştir. Bu politikaların sonucu olarak, 1950-1980 yılları arasında yılda sadece ortalama 30 km. yeni hat yapılabildiği görülmüştür. Şu anda yatırımlar artmış, hızlı tren uygulaması, büyük şehirlerde metro ve hafif raylı sistemler kullanılmaya başlamıştır.

Sonuç olarak, 1950'li yıllardan sonra uygulanan kara yolu ağırlıklı ulaşım politikaları sonucunda, 1950-1997 yılları arasında kara yolu uzunluğu % 80 artarken, demir yolu uzunluğu sadece % 11 artmıştır. Ulaştırma sektörleri içindeki yatırım payları ise; 1960'lı yıllarda kara yolu % 50, demir yolu % 30 pay alırken, 1985'den bu yana demir yolunun payı %10'un altında kalmıştır. Bu ulaşım politikalarının doğal sonucu olarak ülkemiz ulaşım sistemi adeta tek bir sisteme dayandırılmıştır. Ülkemiz yolcu taşıma paylarına bakıldığında, kara yolu yolcu taşıma payı % 96, demir yolu yolcu taşıma payı ise yalnızca % 2'dir.

Demiryollarının, mevcut altyapı ve işletme koşullarının iyileştirilmemesi ve yeni koridorlar açılmaması nedeniyle yolcu taşımacılığındaki payı son 50 yılda % 38

oranında gerilemiştir. Diğer taraftan, 2002 yılında yaklaşık 14 Milyon Ton yük taşımacılığı gerçekleştirilmiş bulunmaktadır. Ülkemiz ulaşım sistemi içerisinde kara yolu demir yolu yük taşıma paylarına bakıldığında, kara yolu yük taşıma oranı % 94, demir yolu yük taşıma payı ise % 4'dür. Demiryollarının yük taşımacılığındaki payı son 50 yılda % 60 oranında gerilemiştir.

2.2 Raylı Ulaşım Sistemleri ve Kullanılan Araç Tipleri

2.2.1 Hafif Raylı Sistemler

Esas olarak klasik tramvayın modernleştirilmiş ve evrimleşmiş halidir. Hafif raylı taşımacılık; tek araba veya kısa dizi halinde işletilebilen yer seviyesinde veya yükseltilmiş yollarda kendine ait özel bir yolu ve çoğunlukla caddeleri kullanan bir kent içi elektrikli ulaşım sistemidir. Gelişen ve hızla genişleyen büyük kentlerin toplu yolcu taşıma ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilen ve günümüz büyük kentlerinde yaşamı ve ulaşımı kolaylaştıran elektrik enerjisiyle çalışan çeken ve çekilen araçlardan oluşan bir sistemdir. Temel özelliği çalıştığı yolun tamamıyla diğer kullanıcılardan ayrılmış olmasıdır.

2.2.1.1 Tramvay

Genelde kara yolu ile aynı güzergahı paylaşan, üzerinde bulunan elektrik tellerinden enerjisini alan belirli istasyonlarda yolcu alıp indiren tek araç olarak dizayn edilen çeken araçlardır.

2.2.2 Ağır Raylı Sistemler

Kent içi ulaşımda ağır raylı sisteme örnek olarak metro ve banliyö trenleri gösterilebilir. Temel özelliği çalıştığı yolun tamamıyla diğer kullanıcılardan ayrılmış olmasıdır.

2.2.2.1 Metro

En büyük trafik potansiyelini gerçekleştirecek taşıt türüdür. Yer altında veya bazen yer üstünde hareket eder, yol kesişmesi yoktur. Kendi içinde kapalı bir sistemdir ve burada yalnızca metro taşıtları çalışır.

2.2.2.2 Banliyö

Kendine ait demir yolunda hareket eden bir sistemdir. Yoğun kent dışı yöre trafiğine hizmet götürür. Genelde elektrikli (Diesel Multiple Unit de olabilir) demiryollarında hareket eden bir sistemdir.

2.2.2.3 Yolcu Trenleri

Sadece yolcu taşımak için çeşitli şekillerde dizayn edilen çekilen araçların bir grup oluşturduğu bir veya birkaç lokomotifin çektiği trenlerdir.

2.2.2.4 Yük Trenleri

Sadece yük taşımak için çeşitli şekillerde dizayn edilen çekilen araçların bir grup oluşturduğu bir veya birkaç lokomotifin çektiği trenlerdir.

2.2.3 Monorail (Üst Yolu Elektrikli Taşıt)

Monorail, üst yollu yakın mesafe elektrikli, toplu taşıma sistemidir. Ray yolu, kapalı bir kutu şeklinde(Suspended, alttan asılı) veya aracın kapattığı ata biner gibi üzerine oturduğu (Straddle, üstten giden) olmak üzere iki türlü olup yüksek seviyeli çelik veya beton kolonlara asılı şekilde monte edilmiştir. Hızı 80 km/h dolayında sınırlanan bu sistem tek kabinle çalıştırılabildiği gibi dizi oluşturularak da çalıştırılabilir. Tek ray üzerinde hizmet veren, yolcu (hatta yük) taşımacılığında kullanılan,çoğunlukla yükseltilmiş yollarda seyretmekle birlikte yüzeyde veya metro tünellerinde çalışabilen “ray üstü” ya da “ray altı” işletilebilen araçlardır.

2.2.4 Maglev (Mannetic Levitation System)

Bu sistemler 300 km/h hızın üzerinde çalışacak şekilde geliştirilmesine rağmen, hızları daha alt bir değerde sınırlandırılarak kent içi ulaşımında da kullanılmaya başlanmıştır. Konvansiyonel sistemlerden daha sessiz, daha hızlı ve konforlu oluşu sistemin avantajı olup, tüm maglev trenleri magnetik olarak kaldırma mekanizmasına sahiptir.

2.2.5 A.G.T (Otomatik Sürücüsüz Sistemler)

Sürülmesi ve kontrollü bilgisayar aracılığı ile yapılan, sabit bir kılavuz yol üzerinde değişik aralıklarla işletilebilen, küçük araçlardır. Lastik tekerlekleri ve elektrik enerjisi alması nedeniyle en sessiz ulaşım biçimlerinden biridir. Emisyonu olmadığı için çevreci, makinisti olmadığı için çok az ilave maliyetle çok sık servis yapabilen AGT'nin, yüksek yatırım maliyetine oranla düşük yolcu kapasitesi olması dezavantajdır. [1]

2.3 Enerji İletim Sistemleri

Modern toplu taşımacılık olarak bilinen elektrikli raylı ulaşım sistemlerinin tasarımındaki önemli kriterlerden birisi cer gücü besleme sistemi ve bu gücün iletim şeklinin seçimidir. Genelde havai hat (katener) veya üçüncü ray sistemleri ile sağlanan cer gücü besleme sistemlerinde farklı gerilim seviyeleri ve sistemleri kullanılmaktadır.

2.3.1 Enerji Besleme Gerilim Seviyeleri

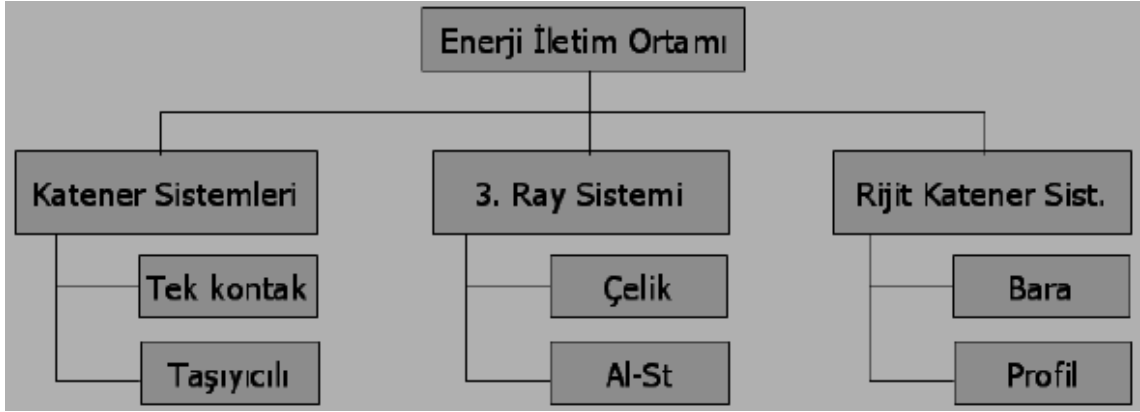
Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinde ilk zamanlar 600 VDC sistemi kullanılmıştır. Daha sonraları maliyetleri ve enerji kayıplarını azaltmak için farklı sistemler üzerinde çalışılmıştır. Çizelge 2.1 EN 50163 Avrupa Standardında tanımlanmış olan raylı sistemlerde kullanılan gerilim seviyelerini vermektedir.

Çizelge 2.1 EN 50163'de tanımlanmış raylı sistemler enerji besleme gerilim seviyeleri

Voltage Level	U_n (V)	U_{min1} (V)	U_{max1} (V)
600 VDC	600	400	720
750 VDC	750	500	900
1500 VDC	1500	1000	1800
3000 VDC	3000	2000	3600
15 kV AC, 16 ² / ₃ Hz	15000	12000	17250
25 kV AC, 50 Hz	25000	19000	27500

2.3.2 Enerji İletim Şekilleri

Şehir içi elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde güzergah boyunca tesis edilmiş olan trafo merkezlerinden (Cer gücü sistemi) gelen DC gerilim bir enerji iletim sistemi vasıtasıyla araçlara iletilmektedir. Enerji iletim sistemi olarak Şekil 2.1’de verilmiş olan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar sistemin genel özelliklerine göre farklılık arz edebilmektedir.



Şekil 2.1 Raylı sistemlerde enerji iletim şekilleri

Normal katener sistemi zig-zaglı giden kontak teli ve akım ihtiyacına göre seçilen bir veya iki adet taşıyıcı katener telinden oluşur. Hat seviyesinde olan 3. Ray sistemleri ise genel olarak metro hatlarında kullanılmaktadır. Üçüncü ray sisteminde araçlar enerjiyi ray pabucu denilen ekipman ile almaktadır. Rijit katener sistemleri de günümüzde tünellerde üçüncü raya alternatif olarak geliştirilen, hafif, üçüncü raya göre daha esnek, bakımı kolay ve yüksek iletkenliğe sahip iletim sistemleridir. Bunların dışında, tarihi şehir merkezlerindeki tramvay hattında görüntü kirliliğini ortadan kaldırmak için geliştirilen bir enerji besleme sistemi olan APS (Otomatik Güç Kaynağı) sistemi 1890'lı yıllarda Amerika, İngiltere ve Fransa'da denenmiştir. Ancak, montajı ve bakımı oldukça zahmetli ve masraflı olduğu ve de bazı durumlarda enerjinin kesilmeyerek hayvanata zarar vermesi sebebi ile terk edilmiştir. [2]

2.4 Emniyet ve Topraklama

2.4.1 Emniyet

Emniyet; sistemlerin sahip olması gereken bir nitelik, özelliktir ve sistemin çevre ve insan sağlığına yönelik bir tehlike unsuru oluşturmamasıdır.

Demiryolu teknolojilerinin gelişiminin başlangıç hedefi kazaları önlemektir. Bu amaca bağlı olarak sinyalizasyon sistemleri geliştirilmiştir. Araçların frenleme eğrilerine bağlı olarak emniyet blokları oluşturularak güvenli bir işletmenin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Demiryolu sistemlerinde emniyet yolcu ve işletme açısından son derece önemlidir. Bu durum ülkemizde ve yurtdışında yaşanan demiryolu kazaları ile açıkça gözükmemektedir.

2.4.2 Topraklama Sistemleri

Raylı ulaşım sistemlerinde sistemin topraklı olup olmamasından kastedilen husus, ray ile toprak arasındaki bağlantı şeklidir. Eğer ray ile toprak arasında hiçbir bağlantı yoksa sistem topraklanmamıştır. Toprak arada hiçbir direnç olmaksızın direkt olarak topraklama barasına bağlı ise sistem topraklanmıştır. Topraklanmamış sistemlerde rayların topraktan yalıtımına dikkat edilmelidir. Bu sistemlerde asıl amaç aracın çekmiş olduğu akımın direkt olarak ray üzerinden dönmesini sağlayıp diğer metalik yapılar üzerinden akımların akmasını engellemektir. Topraklanmamış sistemlerde ray gerilimi tehlikeli seviyelere çıkabilmektedir. Bu nedenle özellikle insanların tehlikeye maruz kalacağı noktalarda ek önlemler alınmalıdır. Böyle bir durumda istasyonlara ve TTM' lere konulacak ray gerilimi kontrol aygıtları, ray gerilimini izleyerek, önceden ayarlanmış bir gerilim seviyesini aştığı zaman rayı direkt topraklayarak tehlikeli durumu ortadan kaldırmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan topraklama sistemi topraklanmamış sistemlerdir. [3]

2.5 Sinyalizasyon ve Otomatik Sürüş Sistemleri

Tramvay, Hafif Metro ve Metro sistemlerinde hızlı, dakik ve emniyetli ulaşım önemlidir. Bu emniyet ve dakiklik sinyalizasyon sistemleri ile sağlanır. Günümüzde birçok

sistemden bahsedilirken temelde hafif metro ve metrolarda üç tür sinyalizasyon sistemi kurulmaktadır:

1. Sabit (Fixed) blok manuel sürüş
2. Sabit (Fixed) blok otomatik sürüş
3. Hareketli (Moving) blok otomatik sürüş

Sabit bloklu manuel sürüş sinyalizasyon sisteminde sinyal sistemi sinyal lambaları vasıtası ile makinisti yönlendirir. Bu sürüş sistemlerinde trenler arasını tam olarak ayarlamak mümkün olmadığından sefer aralıklarını tutturmak pek mümkün olmamaktadır.

Otomatik tren işletme sistemine sahip sabit blok otomatik sürüş sinyalizasyon sisteminde trenler kumanda merkezi tarafından bilgisayar vasıtasıyla otomatik olarak sürülmektedir. Zaman çizelgesine göre tren hareket saatleri işletme programına kaydedilir. Trenin hangi hızda nasıl gideceği bazen blokların başında veya devamlı trenle haberleşme yoluyla alınmaktadır. Merkezi interlocking trenlerin konumunu algılar ve durması gerektiği noktayı ve nasıl güvenli olarak duracağını trene bildirir. Trende aldığı bilgiye göre duracağı yeri, uygulaması gereken fren gücünü hesaplar ve ona göre bir fren gücü uygular.

Hareketli (Moving) blok otomatik sürüş sistemlerinde kumanda merkezi her trenle hat boyunca döşenmiş sızıntılı kablo veya kablosuz ağ yoluyla haberleşir. Kablosuz ağ yoluyla trenle haberleşilen sistemlerde Sinyalizasyonun güvenlik seviyesinin yüksek olması gerektiğinden haberleşme sistemi yedeklidir yani çift kanal haberleşme kullanılır ve sahadan gelen bilgiler tren üzerinde karşılaştırılır. Trenlerin hangi hattın hangi noktasında olduğu (dopler radar, GPS, aracın km sayacı vs yardımı ile bu konum belirlenir) tren tarafından kumanda merkezine gönderilir. Her trenin, önündeki trene ne kadar yaklaşacağı trenin hızına, fren gücüne ve yol durumuna göre her zaman yeniden hesaplanır ve trene gönderilir ve buna göre trenin hızı yeniden ayarlanır. Her trenin bulunduğu bölge ayrı ayrı kilitlenir ve her trenin hızı ayrı ayrı hesaplanır. [4]

RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

3.1 Enerji Tasarrufu ve Önemi

Enerji tasarrufu, ulaşımımızda, üretimimizde, konforumuzda ve iş gücümüzde herhangi bir azalma olmadan enerjiyi verimli kullanmak, israf etmemektir. Aynı işi daha az enerji kullanarak yapmaktır.

Enerjinin fazla kullanılması sonucunda doğal kaynaklar hızla tükenmekte, çevre kirliliği oluşmakta ve enerji için ödenen tutarlar artmaktadır. Dünya'da enerji tüketiminin bu şekilde devam etmesi durumunda 2020 yılında fosil yakıt kaynaklarının yarısının tüketilmiş olacağı tahmin edilmektedir. Fosil kaynaklar, sadece yakıt olarak değil aynı zamanda başta ilaç olmak üzere kimya sektöründe pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yönü ile de korunması en azından tüketiminin azaltılması önemlidir.

Kalkınmakta olan ve nüfusu artan bir ülke olması nedeniyle Türkiye'nin enerji tüketimi hızla artmaktadır. Bu da doğal kaynakların bilinçsizce ve büyük bir hızla tüketilmeye başlamasına neden olmuştur. Bu bilinçsizce tüketim, enerji kaynaklarının verimli kullanımını gündeme getirdiği gibi, tüketim sonucunda oluşan her türlü katı sıvı ve gaz atıkların da arıtılmadan doğaya atılmasının meydana getirdiği önemli çevre kirliliğinin önlenmesi arayışını da beraberinde getirmiştir. [5]

3.2 Enerji Tüketimi-Zaman İlişkisi

Enerji tüketimi ve zaman kavramları kimi zaman birbirlerine eş değer olabilmektedir. Raylı sistemlerde de bu durum geçerlidir. Coğrafi ve diğer benzer koşullardan yararlanılarak kontrol edilen sistemlerde zaman kavramı ikinci plana atıldığında

enerjiden tasarruf sağlanabilmekte, enerji tasarrufu ikinci plana atıldığında ise belirli bir hedef noktaya ulaşabilmek için gereken zaman kısaltılabilmektedir. Bu çalışmamızda da görülebileceği üzere bu tip durumlarda yolun eğimi avantaj olarak kullanılabilir.

3.3 Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliği Yöntemleri

Avrupa’da yapılan çalışmalara göre yolcu trafiğinin 2015 yılında %40, kargo trafiğinin ise %70 oranında artacağı tahmin edilmektedir. Raylı sistemlerde ise bu oran yolcu bazında %10, kargo bazında ise %15’tir. Bu da daha fazla enerji tüketimi anlamına gelmektedir.

Demiryollarında düşük maliyetlerle sağlanabilecek olan yüksek enerji verimliliği, raylı sistemler için başlı başına bir avantajdır.

Bu bölümde elektrikli raylı sistemlerde enerji verimliliğini daha etkin hale getirebilecek teknolojiler üzerinde durulacaktır. Sadece sürüş sistemindeki temel güç devresinde harcanan enerji değil, aynı zamanda yardımcı optimizasyon çözümleri, araç ağırlığının azaltılması, aerodinamik yapının etkisi ve etkin demiryolu otomasyonu konuları üzerinde de bahsedilecektir.

3.3.1 Frenleme Kayıplarının Azaltılması

Demiryollarında enerji verimliliğini arttırmanın en etkili yöntemlerinden birisi frenleme enerjisinin optimizasyonudur. Yumuşak bir sürüş stili benimsendiğinde enerji tüketimi sert duruşlu sürüşlere oranla %12'lere kadar azaltılabilmektedir. Bu çalışmamızda boşta gitme süresinin artması durumunda enerji tüketimindeki azalma Bölüm 5’teki model simülasyon sonucunda açıkça görülebilecektir.

3.3.2 Hız Profilinin Optimizasyonu

Özellikle şehir içi ve bölgesel raylı ulaşım sistemlerinde istasyon aralıkları daha az ve istasyon sayısı daha sıktır. Dolayısı ile sık duruş-kalkışlarda tüketilen frenleme enerjisi enerji hattındaki diğer araçlara yönlendirilmediği takdirde fazla tüketime yol açmaktadır. Çünkü frenleme enerjisi, araç üzerindeki rezistanslarda ısıya dönüşmektedir. İstasyona ulaşmak için gereken süreyi aşmadan hesaplanacak iyi bir hız

profili sayesinde bu kayıplar azaltılabilmektedir. Örneğin bazen ulaşım süresindeki %10'luk bir limit aşımı, %25 oranında enerji tasarrufuna denk gelebilmektedir.

Yine Bölüm 5'te aynı yol için farklı hız profilleri izlediğimizde enerji tüketimindeki değişimleri karşılaştırabileceğiz.

3.3.3 Güzergâhtaki Çakışmaların Önlenmesi

Her ne kadar yukarıdaki kısımda bahsedilen optimize hız profilleri uygulanmaya çalışılsa da, diğer raylı sistem araçlarının ya da otomobil yolları (özellikle kırmızı ışıklar) ile meydana gelen çakışmalar, beklenmedik frenlemelere ve dolayısı ile beklenmedik enerji kayıplarına sebebiyet vermektedir. Modern trafik kontrol merkezleri ile gerekirse trafik yönlerini değiştirerek bu çakışmaları önlemek mümkün olmaktadır.

3.3.4 Optimize Araç Hareket Tarifeleri

Hız profilinin optimizasyonu ve güzergâh çakışmalarının önlenmesi sadece uzun yolculuklar için değil, kısa şehir içi yolculuklar için de uygulanabilir. Fakat kısa süreli şehir içi yolculuklar için tren hareket tarifelerinin adaptif olarak, trenlerin hattaki anlık durumlarına göre belirlenmesi, gecikmeleri, beklemeleri ve dolayısıyla kayıpları engellemiş olacaktır.

3.3.5 Enerjinin Depolanması

Özellikle DC gerilimli şehir içi hatlarında bir aracın frenleme enerjisini diğer bir aracın kalkış enerjisine aktarmadaki koordinasyonun sağlanmasının pek mümkün olmadığı bilinmektedir. Ölçme ve hesaplamalar göstermektedir ki bu koordinasyon sağlansa bile hatta aktarılan frenleme enerjisinin en fazla %40'ı, yalnızca kendisine en uzak 1 km mesafedeki aracın sürüş enerjisi için kullanılabilir. Aksi durumda frenleme enerjileri araç üzerindeki frenlem dirençlerinde harcanmaktadır. Dolayısı ile hat üzerinde belli noktalara tesis edilebilen DC enerji depolama üniteleri ile elektrik enerjisi hatta kullanılmak üzere depolanabilmektedir.

3.3.6 Güç Zincirinde Optimizasyon

Güç kontrolünde kullanılan tristörlü konvertörler yerine GTO teknolojisinin kullanılması kayıplarda %40 varan azalmalar sağlamıştır. Günümüzde ise bu teknolojiyi IGBT konvertörler takip etmektedir ve daha iyi kontrol algoritmaları ile daha kolay konvertör modül paralellenmesi olanağı sunmaktadır. IGBT teknolojisi ile kayıpların azaltılmasının dışında aynı zamanda en uygun darbe genişlik modülasyonu (PWM) sağlanmakta ve hattaki harmonik bozulmalar da en aza indirgenmektedir.

Fakat güç sistemindeki asıl kayıp konvertör sisteminden ziyade transformatörlerde yaşanmaktadır. Konvansiyonel transformatörler yerine süper-iletken transformatörlerin kullanılması, yüksek güç akışı göz önünde bulundurulduğunda oldukça etkin bir çözümdür.

Yine aynı şekilde motorlardaki kayıplar da önemli bir faktördür. Son teknoloji sabit mıknatıslı senkron motorlardaki gelişmelerle kayıplar %50'ye varan oranlarda azalmakta, daha düşük ses seviyesi ve daha düşük ağırlık elde edilmektedir. Çünkü bu tip motorlar akslara direk olarak bağlanmakta ve dişli kutusuna ihtiyaç duyulmamaktadır.

3.3.7 Enerji Tasarrufunda İlave Yöntemler

Yukarıdaki sıraladığımız yöntemlerin yanı sıra enerji tasarrufu için bazı ilave yöntemler de sıralayabiliriz. Özellikle sıcaklık kontrollü araç ön ısıtma sistemleri, yolcu sayısı ve sıcaklık değişimlerine karşı kendini kontrol edebilen adaptif havalandırma sistemleri, otomatik tren işletme operasyonları, araç ağırlığının azaltılması ve aerodinamik yapının iyileştirilmesi bunların başında gelmektedir. [6]

Çizelge 3.1 Enerji tasarrufunda farklı metodların etkinliklerinin karşılaştırılması

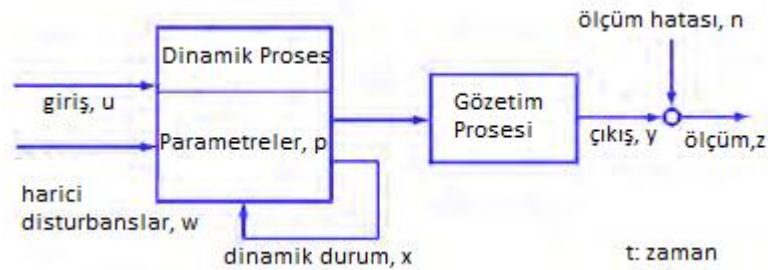
Metod	Şehir İçi	Bölgesel	Uzun Mesafe	Kargo
Hız Profilinin Optimizasyonu	x	x	x	x
Güzergâh Çakışmaları	-	x	x	x
Tarife Ayarlaması	x	x	-	-
Enerji Depolama	x	x	-	-
Sürüş Konvertörü	x	x	x	x
Transformatör	-	x	x	-
Direkt Motor	x	x	x	-
Kontrollü Ön Isıtma	x	x	-	-
Kontrollü Havalandırma	x	x	x	-
Otomatik İşletme	x	x	-	-
Esnek Tren Boyutu	x	x	-	-
Ağırlık	x	x	-	-
Aerodinamik	-	-	x	-

OPTİMAL KONTROL

Optimizasyon kelime manası olarak en iyileştirme anlamına gelmektedir. Bu çalışmada enerji-zaman arasındaki değişimi istenilen en iyi seviyede tutabilmek için, Bölüm 5’te önerilen modelin maliyet fonksiyonu simülasyon sonrasında minimize edilmeye çalışılmıştır. Matlab Simulink içerisinde bulunan Kontrol ve Parametre Tahmin Aracı vasıtası ile otomatik olarak gerçekleştirilen bu işlemlerin alt yapısı ve iç yüzü bu bölümde sunulmaya çalışılmıştır. Bölüm 4.6’da Kontrol ve Parametre Tahmin Aracı’nda optimizasyon yöntemi olarak kullanılan “Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler Yöntemi” (Non-linear Least Squares Method) detaylı olarak izah edilmiştir.

4.1 Dinamik Sistemler

Şekil 4.1 Sürekli zaman dinamik süreci



Yukarıda blok diagramı verilen vektör tabanlı sürekli zaman dinamik prosesin denklemini aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{w}(t), \mathbf{p}(t), t]$$

Çıkış dönüşümü:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)]$$

Ölçüm (Hata dahil) :

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{y}(t) + \mathbf{n}(t)$$

Dinamik sistem model tipleri 4 ifade edilebilir.

Non-linear Zamanla Değişen (NTV):

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{w}(t), \mathbf{p}(t), t]$$

Non-linear Zamanla Değişmeyen (NTI):

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{w}(t)]$$

Lineer Zamanla Değişen (LTV):

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}(t)\mathbf{w}(t)$$

Lineer Zamanla Değişmeyen (LTI):

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}\mathbf{w}(t)$$

Tanım 4.1 Kontrol edilebilirlik, durumun kontrol vasıtası ile keyfi bir başlangıç şartından sifıra sonlu bir zamanda götürülebilmesidir.

Tanım 4.2 Gözlemlenebilirlik, başlangıç durumunun sonlu bir zaman aralığında ölçümlerle elde edilebilmesidir.

Optimizasyonun amacı, bir hedef için (minimum zaman, minimum enerji sarfiyatı, minimum gider v.b.) zaman veya enerjiyi minimize etmektir.

Optimuma ulaşmak için minimize edilmesi gereken maliyet fonksiyonunda (J), aranan özellikler ise skaler olması, açıkça tanımlanmış minimum ve maksimuma sahip olması ve tercihen pozitif-belirli olmasıdır.

Dinamik optimizasyonda optimal durum ve kontrol zamana göre deđiřir.

$$J^* = J[x^*(t), u^*(t)]$$

Tek kontrol parametrelili maliyet fonksiyonunda iki tip gideri (maliyeti) dengeleme imkanı vardır. Bunlar, hızla orantılı enerji tüketimi ve hızla ters orantılı zaman tüketimidir. Söz konusu kontrol parametresi ise hızdır.

4.2 Maliyet Fonksiyonunun Minimizasyonu

Maliyetin (J) minimum değeri sabittir, bilinmiyor olabilir. İlgili kontrol parametresi (u*) da sabittir fakat muhtemelen bilinmiyor olabilir. Maliyet fonksiyonunun tercihen tek minimumu vardır, bölgesel olarak düzgündür, minimum haricinde monoton şekillere sahiptir.

Tanım 4.3 Norm, bir vektörün uzunluğu veya geniđliđinin ölçüsüdür. Skalerdir.

Taxicab ya da Manhattan normu:

$$L^1 \text{ norm} = \|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$$

Öklid ya da Kuadratik norm:

$$L^2 \text{ norm} = \|\mathbf{x}\|_2 = (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{1/2} = (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)^{1/2}$$

p normu:

$$L^p \text{ norm} = \|\mathbf{x}\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p}$$

Sonsuz normu:

$$L^p \text{ norm} = \|\mathbf{x}\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \xrightarrow{p \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^\infty \right)^{1/\infty} = x_{i_{\max}} = L^\infty \text{ norm}$$

$$L^\infty \text{ norm} = \|\mathbf{x}\|_\infty = \max \{|x_1|, |x_2|, \dots, |x_n|\}$$

\mathbf{x} 'in ağırlıklı Öklid (Kuadratik) normu: ($\mathbf{y}=\mathbf{D}\mathbf{x}$)

$$\begin{aligned} \|\mathbf{y}\|_2 &= (\mathbf{y}^T \mathbf{y})^{1/2} = (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_m^2)^{1/2} \\ &= (\mathbf{x}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{x})^{1/2} = \|\mathbf{D}\mathbf{x}\|_2 \end{aligned}$$

$\dim(\mathbf{y}) = m \times 1$
 $\dim(\mathbf{x}) = n \times 1$
 $\dim(\mathbf{D}) = m \times n$

Minimizasyon problemi, J sürekli skaler maliyet fonksiyonunu minimize eden sürekli kontrol parametresi \mathbf{u} 'nun değerini bulmaktır.

Minimize edilmiş maliyet fonksiyonunda ise (J^*) gradient minimumda sıfırdır. Aşağıdaki denklemlerden de görüleceği üzere minimumda ilk değişim sıfırdır, ikinci değişim ise pozitiftir.

$$\begin{aligned} J(\mathbf{u}^* + \Delta \mathbf{u}) &\approx J(\mathbf{u}^*) + \Delta J(\mathbf{u}^*) + \frac{\Delta^2 J(\mathbf{u}^*)}{2} + \dots \\ \Delta J(\mathbf{u}^*) &= \left[\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}^*} \right] \Delta \mathbf{u} = 0 \\ \Delta^2 J(\mathbf{u}^*) &= \frac{1}{2} \Delta \mathbf{u}^T \left[\frac{\partial^2 J}{\partial \mathbf{u}^2} \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}^*} \right] \Delta \mathbf{u} \geq 0 \end{aligned}$$

4.3 Lagrange Çarpımı

Maliyet fonksiyonuna Lagrange ağırlıklı bir sabit eklendiğinde denklem şu şekli alır. J_A minimum olduğunda c sıfıra eşittir.

$$\begin{aligned} J_A(\mathbf{u}') &= J(\mathbf{u}') + \lambda^T \mathbf{c}(\mathbf{u}') \\ J_A(\mathbf{x}, \mathbf{u}) &= J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \lambda^T \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{aligned}$$

x,u ve lambdaya bağılı olarak gradient (eğim) optimum noktada sıfırdır.

$$\frac{\partial J_A}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} + \boldsymbol{\lambda}^T \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial J_A}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} + \boldsymbol{\lambda}^T \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial J_A}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{c} = \mathbf{0}$$

4.4 Nümerik (Sayısal) Optimizasyon

Eğer J maliyet fonksiyonu, minimumu analitik çözümle bulmak için oldukça karmaşıksa, ya da birden fazla miniması varsa, lokal veya global çözümlerin bulunması için nümerik (sayısal) optimizasyon kullanılır.

Nümerik minimizasyonda iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan biri gradientsiz arama olarak da adlandırılan, J'ye değer verip en küçük değeri arama odaklı yaklaşımdır.

Başlangıç tahmininin $J_o = J(\mathbf{u}_o)$ olarak alındığı varsayalım.

$J_1 = J_o + \Delta J_1(\mathbf{u}_o + \Delta \mathbf{u}_1)$ böylece $J_1 < J_o$ 'dır.

$J_2 = J_1 + \Delta J_2(\mathbf{u}_1 + \Delta \mathbf{u}_2)$ böylece $J_2 < J_1$ 'dır.

Bir diğer yaklaşım da gradiente (eğime) değer verip sıfırı aramaktır. Çünkü sıfır olduğunda maliyet fonksiyonu minimumdur. Bu yaklaşım gradient tabanlı arama olarak da adlandırılır.

Başlangıç tahmininin,

$\left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} \right)_o = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_o}$ olarak alındığı varsayalım.

$$\left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}}\right)_n = \left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}}\right)_{n-1} + \Delta \left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}}\right)_n = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_n}$$

Böylece,

$$\left|\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}}\right|_n < \left|\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}}\right|_{n-1} \text{ 'dir.}$$

Gradientsiz aramada J skalerdir ve hiçbir arama yönü sağlamaz. Arama global bir minimum sağlayabilir.

Gradient tabanlı aramada ise gradient (eğim) bir vektördür ve uygun arama yönü gösterir. Arama yerel bir minimum tanımlar.

4.5 Dinamik Sistemlerin Optimizasyonu İçin Klasik Maliyet Fonksiyonları

4.5.1 Lagrange Problemi (1780)

$\mathbf{x}(t_o)$ verilmiştir.

$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)]$ 'a bağlı olarak problem şu şekilde tanımlanmıştır.

$$\min_{\mathbf{u}(t)} J = \int_{t_o}^{t_f} L[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] dt$$

Lagrangian integral maliyet örneği olarak, durum ve kontrol arasında kuadratik alış-veriş (takas):

$$L[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] = [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)]$$

= 1 ise minimum zaman problemi,

= $\dot{m}(t)$ ise minimum enerji tüketimi problemi,

= $|\mathbf{u}(t)|$ ise minimum kontrol kullanımı problemdir.

4.5.2 Mayer'in Problemi (1890)

$\mathbf{x}(t_o)$ verilmiştir.

$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)]$ 'a bağlı olarak problem şu şekilde tanımlanmıştır.

$$\min_{\mathbf{u}(t)} J = \phi[\mathbf{x}(t_f)]$$

Son maliyet örneği olarak,

$$\begin{aligned}\phi[\mathbf{x}(t_f)] &= \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t) \Big|_{t=t_f} \\ &= \left| (t_{final} - t_{initial}) \right| \text{ ise minimum zaman problemi,} \\ &= \left| (m_{initial} - m_{final}) \right| \text{ ise minimum enerji tüketimi problemi,} \\ &= \left| (T_{initial} - T_{final}) \right|^2 \text{ ise istenen son sıcaklıtan yapılan sapmadır.}\end{aligned}$$

4.5.3 Bolza'nın Problemi (1900)

Lagrange ve Mayer'in problemlerini birleştirilmesi ile oluşmuştur. $\mathbf{u}(t)$ 'nin seçimi ile ve dinamik sınırlamalara bağlı kalarak son maliyet ve integral maliyet toplamının minimize edilmesidir. Minimumun varsayılması optimumdur.

$\mathbf{x}(t_o)$ verilmiştir ve bitiş zamanı t_f 'dir.

$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)]$ 'a bağlı olarak problem şu şekilde tanımlanmıştır.

$$\min_{\mathbf{u}(t)} J = \phi[\mathbf{x}(t_f)] + \int_{t_o}^{t_f} L[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] dt$$

Genişletilmiş maliyet fonksiyonunu oluşturmak için bir lagrange çarpımı kullanılarak dinamik sınırlama, integrali alınacak fonksiyonun yanına eklenir.

$$J_A = \phi[\mathbf{x}(t_f)] + \int_{t_0}^{t_f} \left\{ L[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] + \lambda^T(t) [\mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] - \dot{\mathbf{x}}(t)] \right\} dt$$

4.5.4 Hamiltonian

Hamiltonian'ın tanımlanması ile integrali alınacak fonksiyonun yeniden ifadesi şu şekildedir:

$$H[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \lambda(t)] = L[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] + \lambda^T(t) \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)]$$

Bu nedenle,

$$\left\{ L[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] + \lambda^T(t) [\mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] - \dot{\mathbf{x}}(t)] \right\} = \left\{ H[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \lambda(t)] - \lambda^T(t) \dot{\mathbf{x}}(t) \right\}$$

Lagrangian ve Hamiltonian birbirleri ile yakından ilişkilidir. Fakat Hamiltonian, adjoint vektörün (lambda) ve sistem dinamiklerinin bir vektörüdür. Lagrangian ise değildir.

Hamiltonian'daki değişimler sadece maliyete yansıtılmakla kalmayıp sistem dinamiklerinin sınırlama etkisine de yansır.

Maliyet fonksiyonunda Hamiltonian yerine konulduğunda,

$$J = \phi[\mathbf{x}(t_f)] + \int_{t_0}^{t_f} \left\{ H[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \lambda(t)] - \lambda^T(t) \dot{\mathbf{x}}(t) \right\} dt$$

Optimal maliyet (J^*) durumun, kontrolün ve lagrange çarpımının optimal geçmişleri (\mathbf{x}^* , \mathbf{u}^* ve λ^*) tarafından üretilir.

$$\min_{\mathbf{u}(t)} J = J^* = \phi[\mathbf{x}^*(t_f)] + \int_{t_0}^{t_f} \left\{ H[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t), \lambda^*(t)] - \lambda^{*T}(t) \dot{\mathbf{x}}^*(t) \right\} dt$$

Son olarak maliyet fonksiyonunun kısmi integralinin alınması ile şu şekilde yeniden yazılabilir: [7]

$$\int u dv = uv - \int v du$$

$$\int_{t_0}^{t_f} \lambda^T(t) \dot{\mathbf{x}}(t) dt = \lambda^T(t) \mathbf{x}(t) \Big|_{t_0}^{t_f} - \int_{t_0}^{t_f} \dot{\lambda}^T(t) \mathbf{x}(t) dt$$

$$u = \lambda^T(t)$$

$$dv = \dot{\mathbf{x}}(t) dt = d\mathbf{x}$$

$$J = \phi[\mathbf{x}(t_f)] + [\lambda^T(t_0) \mathbf{x}(t_0) - \lambda^T(t_f) \mathbf{x}(t_f)]$$

$$+ \int_{t_0}^{t_f} \{H[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \lambda(t)] + \dot{\lambda}^T(t) \mathbf{x}(t)\} dt$$

4.6 Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler Yöntemi

5. Bölüm'deki simülasyonda kullanılan Kontrol ve Parametre Tahmin Aracı, doğrusal olmayan en küçük kareler (non-linear least squares) yöntemi ile bir yaklaşım işlemi uygulamaktadır. Maliyet fonksiyonu, ampirik sinyaller ve model sinyalleri arasındaki en küçük kare hatasını hesaplamaktadır.

$f(x)$ fonksiyonunun x 'e göre değiştiği verilmiştir ve m 'e kadar sıralanmıştır $y_1 = f(x_1), \dots, y_m = f(x_m)$, bu fonksiyon n parametrelere değişen bilinen analitik formdadır $f(x; \lambda_1, \dots, \lambda_n)$ ve m sayıda eşitliktedir.

$$y_1 = f(x_1; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

$$y_m = f(x_m; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n).$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$ değerlerinden sistem denklemlerini sağlayanların belirlenmesi için yukarı denklemlerin çözülmesi istenir. λ_i için bir başlangıç tahmini alınır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$d\beta_i = y_i - f(x_i; \lambda_1, \dots, \lambda_n).$$

$i=1, \dots, m$ ve $\lambda \equiv (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ iken $d\lambda_i$ 'yi $d\beta_i$ 'dan 0'a düşüren değişimler için doğrusallaştırılmış bir tahmin belirlenir.

$$d\beta_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial \lambda_j} d\lambda_j \Big|_{x_i, \lambda}$$

Bu, bileşen formunda aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$d\beta_i = A_{ij} d\lambda_j,$$

Burada A $m \times n$ boyutlarında matristir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \lambda_1} \Big|_{x_1, \lambda} & \dots & \frac{\partial f}{\partial \lambda_n} \Big|_{x_1, \lambda} \\ \frac{\partial f}{\partial \lambda_1} \Big|_{x_2, \lambda} & \dots & \frac{\partial f}{\partial \lambda_n} \Big|_{x_2, \lambda} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial \lambda_1} \Big|_{x_m, \lambda} & \dots & \frac{\partial f}{\partial \lambda_n} \Big|_{x_m, \lambda} \end{bmatrix}.$$

Daha kısa bir matris formunda,

$$d\beta = A d\lambda,$$

Burada $d\beta$ bir m -vektör ve $d\lambda$ ise n -vektördür.

A'nın transpozunu her iki tarafa da uygulandığında,

$$A^T d\beta = (A^T A) d\lambda.$$

aşağıdakileri tanımlamak,

$$\mathbf{a} \equiv A^T A$$

$$\mathbf{b} \equiv A^T d\beta$$

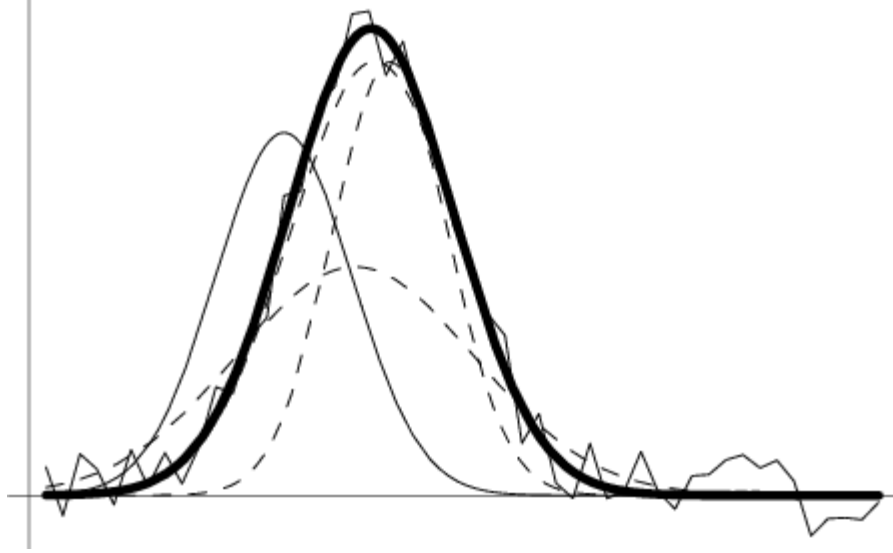
A ve $d\beta$ 'nin bilinen miktarınca aşağıdaki matris eşitliğini verir.

$$\mathbf{a} d\lambda = \mathbf{b},$$

Bu da Gauss eliminasyonu gibi standart matris teknikleri kullanılarak $d\lambda$ için çözülebilir.

Bu sonuç daha sonra λ 'ya aktarılır ve yeni $d\beta$ hesaplanır. $d\lambda$ 'nin elemanları daha önceden tanımlanmış limite göre daha küçüğe gidecek şekilde bu prosedür iteratif

olarak uygulanırsa, bir çözüm belirlenebilir. Şu unutulmamalıdır ki, prosedür bazı fonksiyonlar için çok iyi bir yaklaşma gösteremeyebilir ve aynı zamanda bu yaklaşım işlemi sıklıkla başlangıç değerini en iyi uygun değerlere götürür. Kare fazlalıkların toplamı son iterasyonun ardından $R^2 = d \beta \cdot d \beta$ şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.2 Gürültülü Gauss fonksiyonuna oturmuş doğrusal olmayan en küçük kareler

$$f(x; A, x_0, \sigma) = A e^{-(x-x_0)^2/(2\sigma^2)}$$

Yukarıda ince eğri başlangıç tahminini, kesikli eğriler iterasyonları ve kalın eğri ise çözümün yaklaşıma çalıştığı eğriyi gösterir. Burada asıl parametreler $(A, x_0, \sigma) = (1, 20, 5)$, başlangıç tahmini $(0.8, 15, 4)$, yaklaştırılmış değerler $(1.03105, 20.1369, 4.86022)$, ve $R^2 = 0.148461$ şeklindedir. A matrisini oluşturmak için kullanılan kısmi türevler şunlardır:

$$\frac{\partial f}{\partial A} = e^{-(x-x_0)^2/(2\sigma^2)}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_0} = \frac{A(x-x_0)}{\sigma^2} e^{-(x-x_0)^2/(2\sigma^2)}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{A(x-x_0)^2}{\sigma^3} e^{-(x-x_0)^2/(2\sigma^2)}$$

Bu teknik tabii ki Gaussian'ları çökmek ve eğimler ilave etmek v.b. işlemler için genelleştirilebilir. Buna rağmen serbest parametrelerin artması ile yaklaşımın niteliği daha da kötüye gitmektedir.

Benzer bir teknik belirli denklem setlerinin çözümünde de kullanılabilir. Örneğin bu problem gürültülü rotasyon matrisine karşılık gelen en iyi uygun Euler açılarının bulunması çözümünde ortaya çıkabilir. Bu durumda 3 adet bilinmeyen açı ve fakat 9 adet ilişkili matris elemanı vardır. Gidilecek yol, $i=1, \dots, n$ için $f_i(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ şeklinde n farklı fonksiyon yazıp, şu anki değerlerine y_i deyip aşağıdaki gibi tanımlamaktır.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_1} \right|_{\lambda_i} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_2} \right|_{\lambda_i} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_n} \right|_{\lambda_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_1} \right|_{\lambda_i} & \left. \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_2} \right|_{\lambda_i} & \dots & \left. \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_n} \right|_{\lambda_i} \end{bmatrix},$$

ve

$$d\boldsymbol{\beta} = \mathbf{y} - f_i(\lambda_1, \dots, \lambda_n),$$

Burada λ_i , i 'nci iterasyondan sonra belirlenmiş nümerik değerlerdir. Soru tekrar aşağıdaki gibi kurulur

$$\mathbf{A} d\boldsymbol{\lambda} = d\boldsymbol{\beta},$$

ve daha önce olduğu gibi devam ettirilir. [8]

ÖNERİLEN RAYLI SİSTEM SÜRÜŞ MODELİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Daha önceki bölümlerde bahsedilen, raylı sistemlerde zaman-enerji dengelemesini optimum düzeye ya da istenilene en yakın düzeye çekmek amacı ile tasarlanmış model ve simülasyon bu bölümde tanıtılacaktır. Matlab ve Simulink yardımı ile oluşturulan bu sistem, mümkün olduğunca gerçek test sonuçlarına yakın cevaplar verecek nitelikte hazırlanmıştır.

5.1 Matlab ve Simulink

MATLAB, bilimsel ve mühendislik alanlarındaki sayısal hesaplamalar için kullanılan bir etkileşimli programdır. Akademik alanda ve endüstride, dinamik sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu (benzetim) için dünya genelinde yaygın olan bir yazılım paketidir. MATLAB kelimesi İngilizce “MATrix LABoratory” kelimelerinin bileşiminden oluşmuştur.

Simulink ise MATLAB programının grafiksel tasarım, simulasyon ve dinamik sistemlerin analizini yapan bir uzantısıdır. Sürekli zamanda, ayık zamanda veya her ikisinin kombinasyonunda modellenmiş doğrusal ve doğrusal olmayan sistemleri destekler. [9]

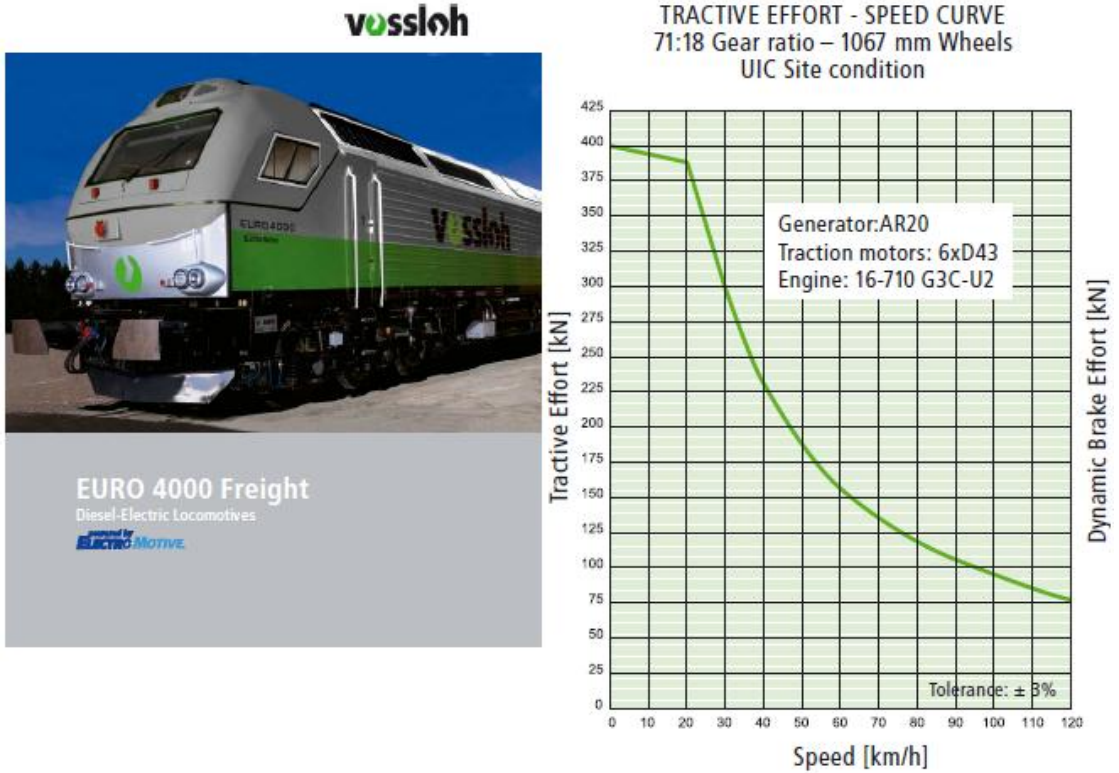
5.2 Araç Parametreleri ve Tren Hattının Güzergahı Detayı

Modelin oluşturulmasında gerçek tren/lokomotif parametreleri kullanılmıştır. Bu modelin simulink programında kurulabilmesi için Vossloh firmasının Euro 4000 Freight dizel-elektrik lokomotifinin spesifikasyonlarından yararlanılmıştır.

Çizelge 5.1 Araç Parametreleri

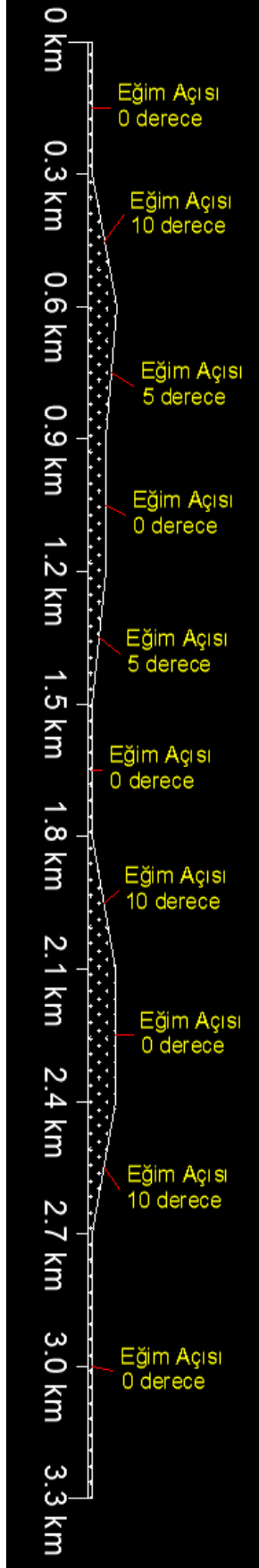
Vossloh Euro 4000 Freight	
Ağırlık	123 Ton
Maksimum Hız	120 km/s
Başlangıç Çekiş Gücü	400 kN
Motor Gerilimi	1000 V
Tekerlek Çapı	1067 mm

Performance Curves

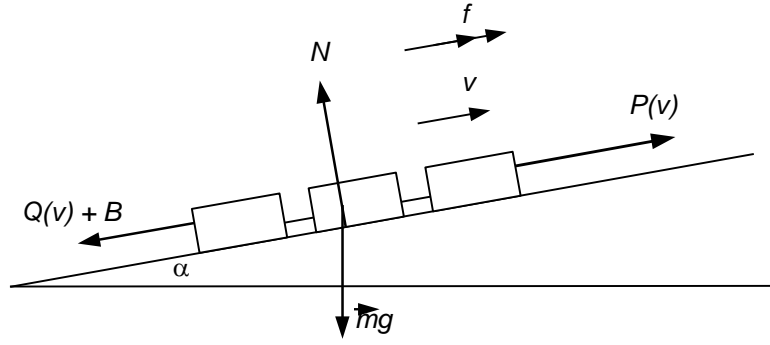


Şekil 5.1 Çekiş Gücü-Hız Performansı Eğrisi

Trenin yol alacağı güzergah Şekil 5.2’de verilmiştir. 3.3 km uzunluğundaki bu yol boyunca farklı noktalarda 5 ve 10 derecelik eğimler mevcuttur. Bu eğimler göz önünde bulundurularak araca ek olarak etki edecek negatif ve pozitif yöndeki kuvvetlerin hesabı aşağıdaki gibidir. Bu hesaplamalardan ortaya çıkan sonuçlar, sonraki bölümlerde detaylı olarak görebileceğimiz, “Tork-Hız Ayarı Alt Sistemi” bloğunda kullanılacaktır.



Şekil 5.2 Tren Hattının Güzergahı



Şekil 5.3 Tren Dinamikleri

Burada,

$P(v)$ lokomotifin çekiş gücü;

$Q(v)$ sürüklenme;

B frenleme kuvveti;

mg trenin ağırlığı;

N yolun tepkisi.

Newton'ın 2. hareket kanunundan,

$$mf = P(v) - Q(v) - B - mg \sin \alpha \quad \text{olduğu görülür.}$$

Alfa eğim açısı 5 derece iken ağırlığı nedeni ile trene etki eden kuvvet,

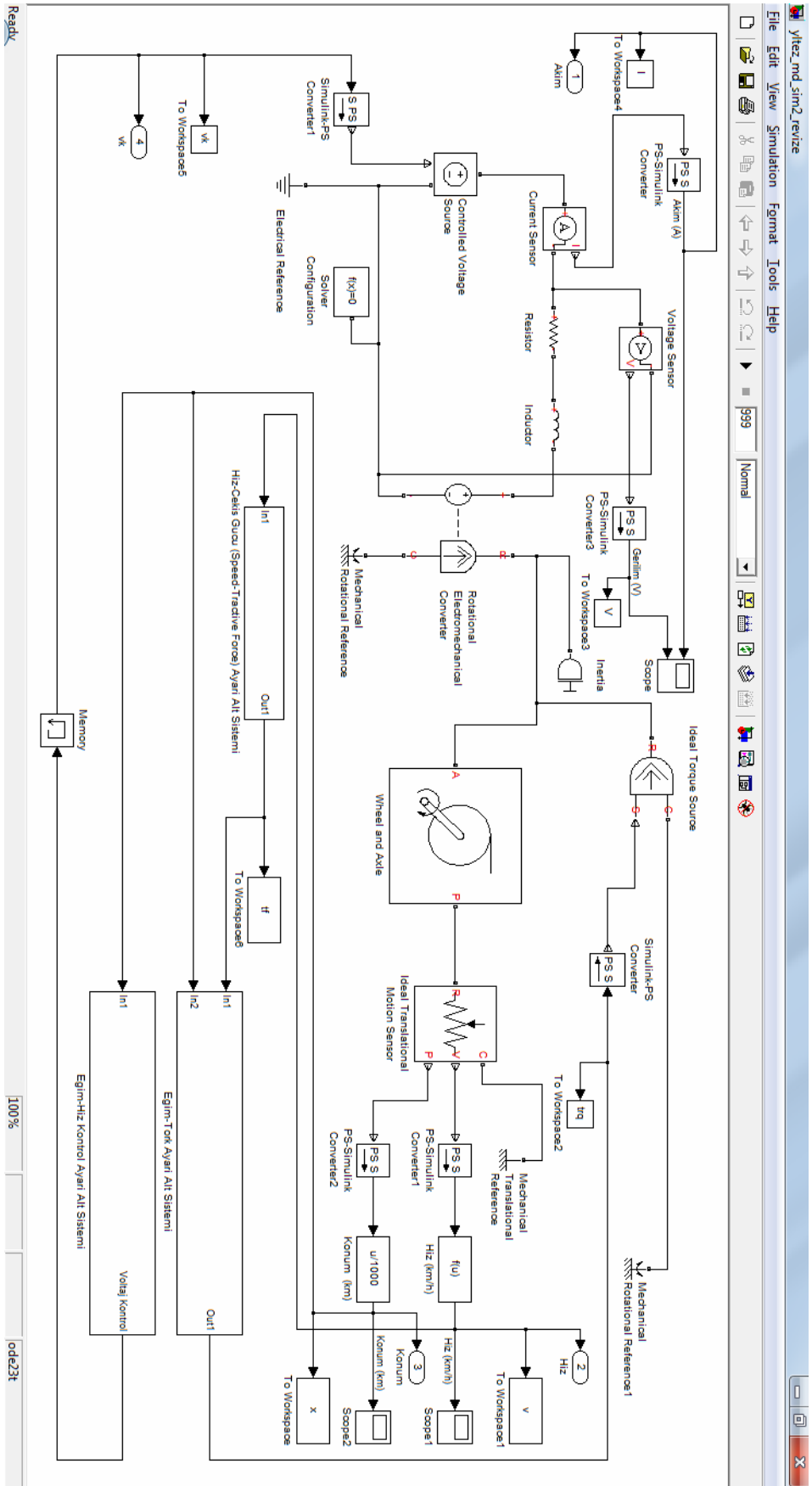
$$m \times g \times \sin(\text{alfa}) = (123\text{ton}) \times (9.8 \text{ m/s}^2) \times (\sin 5) = \sim 105 \text{ kN 'dur.}$$

Alfa eğim açısı 10 derece iken ağırlığı nedeni ile trene etki eden kuvvet,

$$m \times g \times \sin(\text{alfa}) = (123\text{ton}) \times (9.8 \text{ m/s}^2) \times (\sin 10) = \sim 210 \text{ kN 'dur.}$$

5.3 Otomatik Sürüş Modelinin Oluşturulması

Şekil 5.1'de görüleceği üzere raylı sistem otomatik sürüş modeli oldukça farklı elemanların ve alt sistemlerin bir araya gelmesi ile bir bütün oluşturmaktadır. Sistemi oluşturan elemanlar devam eden konularda kısaca tanımlanmıştır.



Şekil 5.4 Raylı Sistem Sürüş Modeli

5.3.1 Motorların Modellenmesi

Şekil 5.4'ün sol kısmında açıkça görülebileceği üzere motor modeli bir adet direnç, bir adet endüktans ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren bir bloktan oluşmuştur. Motor üzerindeki akım ve gerilim değerlerinin ölçülebilmesi için ise ampermetre ve voltmetre blokları yerleştirilmiştir. Motor DC olarak kontrol edilebilen bir gerilim kaynağı ile beslenmektedir.

5.3.2 Eğim-Tork Ayarı Alt Sistemi

Aracın güzergâh boyunca eğim v.b. nedenlerle etkisi altında kalacağı negatif ve pozitif tork değerinin oluşturulması amacı ile öncelikle rotor için bir atalet bloğu, yine aynı şekilde bir de ideal tork kaynağı kullanılmıştır. Ağırlık nedeni trene etki eden kuvveti, yani konumun değişimine bağlı olarak eğim açısına değişkenlik gösteren bu değerleri "Eğim-Tork Ayarı Alt Sistemi" yapısından almaktadır. Şekil 5.5'de detaylı olarak görülebilen bu sistem sayesinde konumdan alınan bilgi ile trene negatif ve pozitif yönde etki edecek olan tork değeri belirlenebilmektedir.

5.3.3 Eğim-Hız Kontrol Ayarı Alt Sistemi

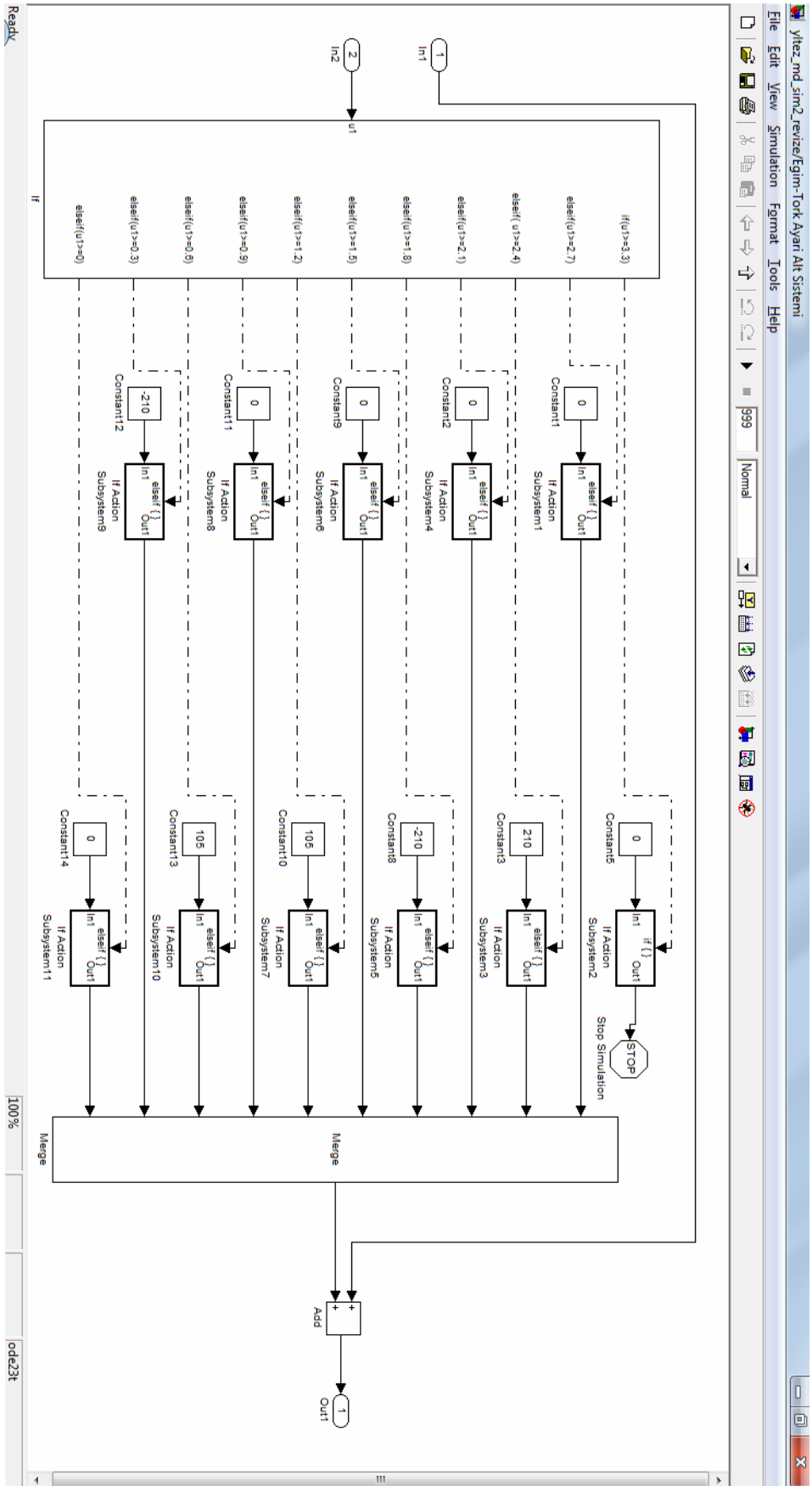
Bu bilgiler motora direkt olarak bağlanan tekerlek ve aks takımı bloğunun çıkışlarının basit matematiksel işlemler süzgecinden geçirilmesinin ardından elde edilebilmektedir. Ayrıca konum bilgisi "Eğim-Hız Kontrol Ayarı Alt Sistemi" (Şekil 5.6) yapısına gönderilerek burada güzergâhın eğimine göre motora uygulanacak gerilim kontrolü hesaplanmaktadır. Ayrıca alınan konum bilgisine göre değişen, trene etki eden kuvvet ve hız kontrol bilgileri de Çizelge 5.2'den takip edilebilmektedir.

5.3.4 Hız-Çekiş Gücü Ayarı Alt Sistemi

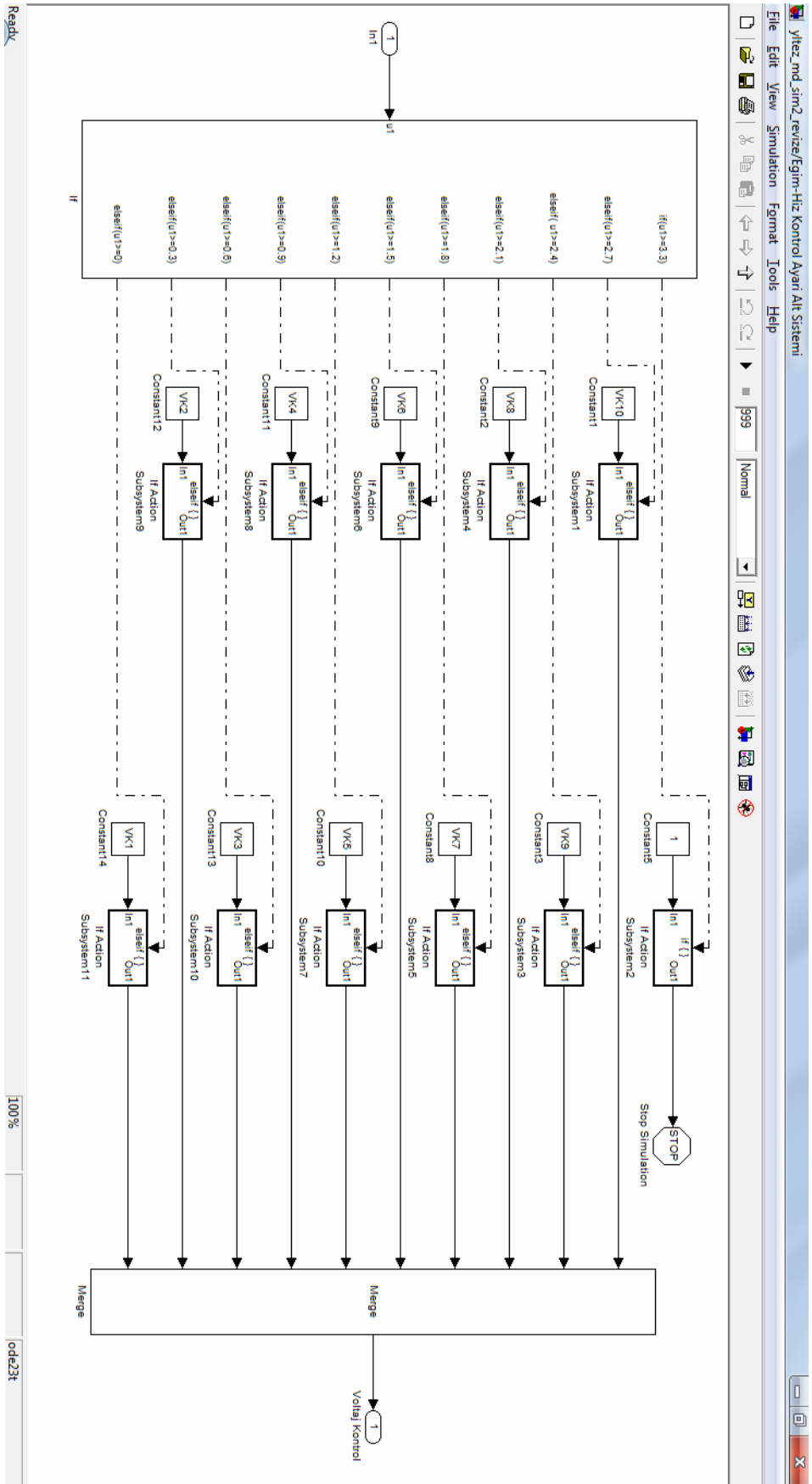
Hız-Çekiş Gücü Ayarı Alt Sistemi (Şekil 5.7) trenin kalkış anından itibaren hızlanması ile birlikte etki eden yol/ray direncinin değişiminin benzetimi ile oluşturulmuştur. Trene ait çekiş gücü-hız performans eğrisi daha önce Şekil 5.1'de verilmişti.

Çizelge 5.2 Konum bilgisine karşılık gelen negatif tork ve hız kontrol değerleri

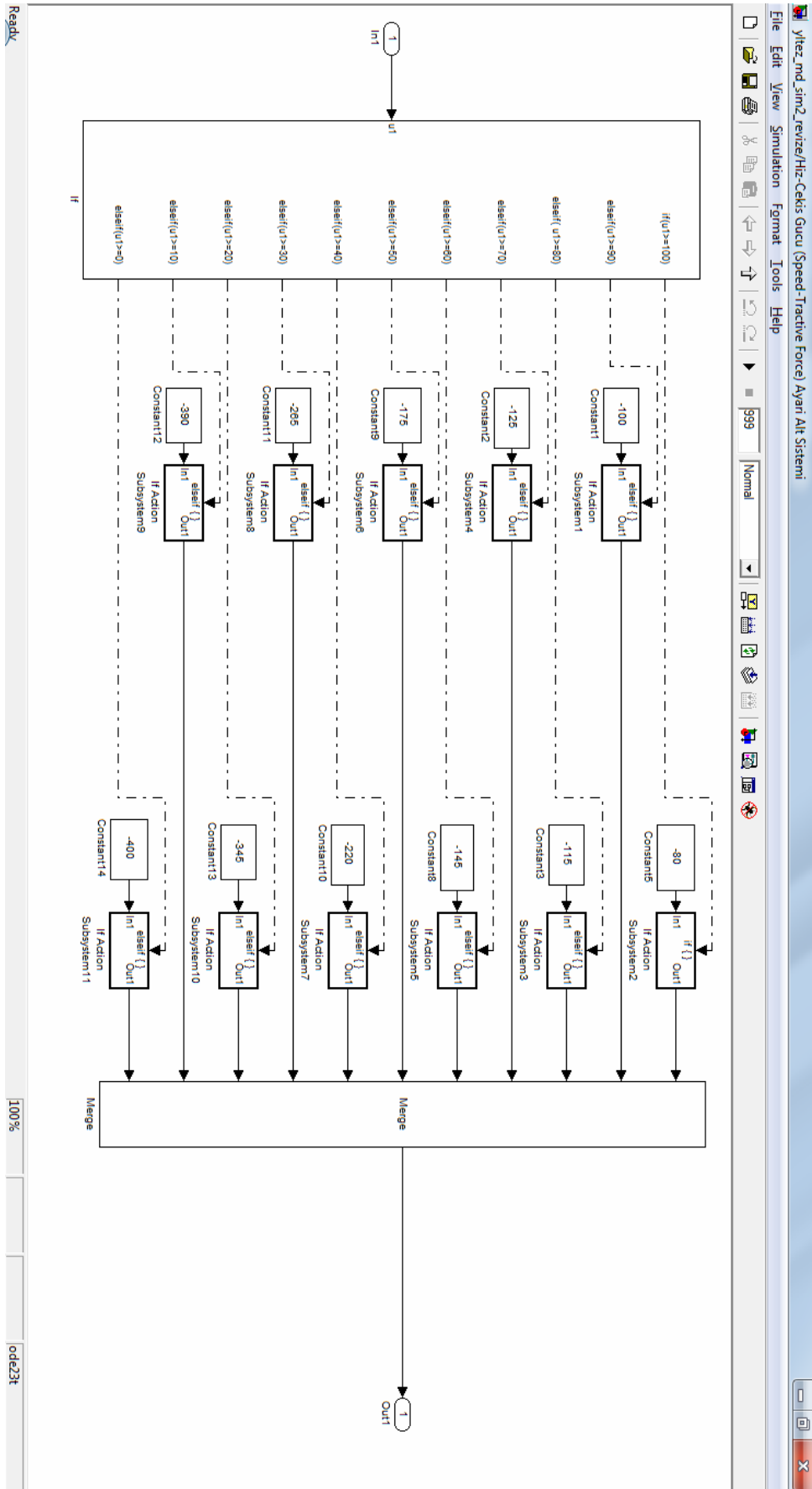
Konum Bilgisi (m)	Eğime Bağlı Olarak Trene Etki Eden Kuvvet (kN)	Manuel Hız Kontrol Değerleri VK1...10 (Volt)
0.3>x>=0	0 kN	1000 V
0.6>x>=0.3	-210 kN	1000 V
0.9>x>=0.6	105 kN	0 V
1.2>x>=0.9	0 kN	0 V
1.5>x>=1.2	105 kN	0 V
1.8>x>=1.5	0 kN	0 V
2.1>x>=1.8	-210 kN	0 V
2.4>x>=2.1	0 kN	5 V
2.7>x>=2.4	210 kN	1 V
3.3>x>=2.7	0 kN	5 V



Şekil 5.5 Eğitim-Tork Ayarı Alt Sistemi



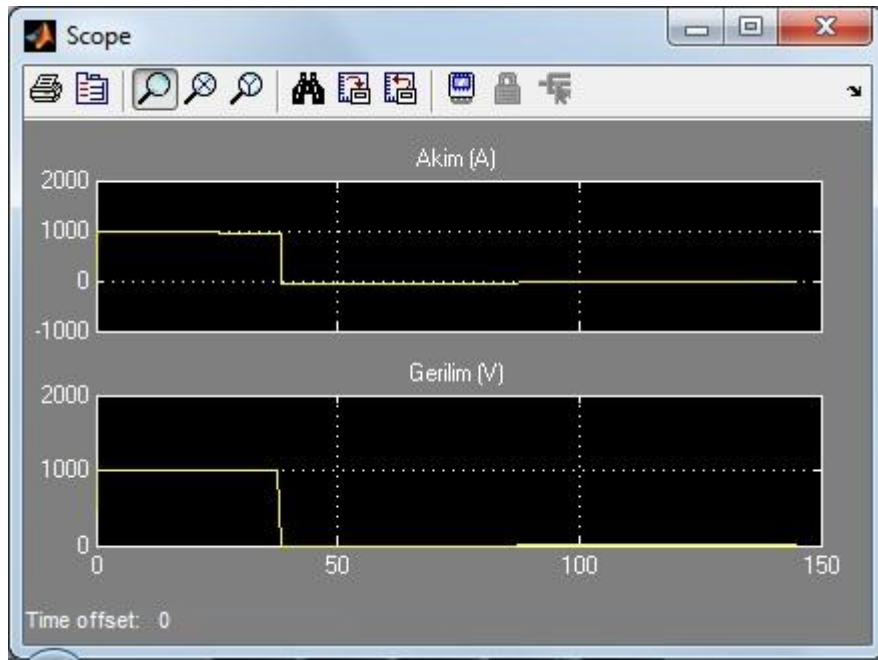
Şekil 5.6 Eğim-Hız Kontrol Ayarı Alt Sistemi



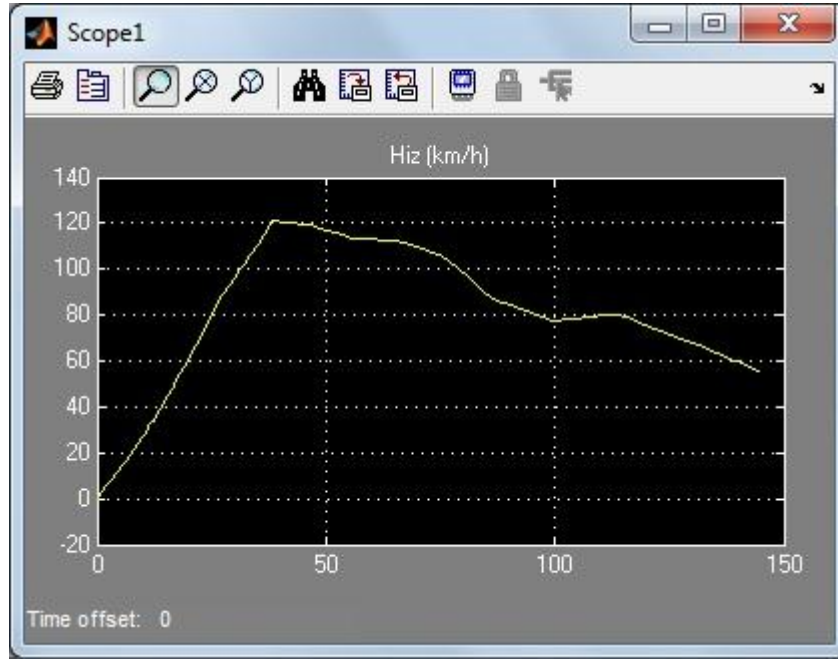
Şekil 5.7 Hız-Çekiş Gücü Ayarı Alt Sistemi

5.4 Manuel Sürüş Simülasyonu

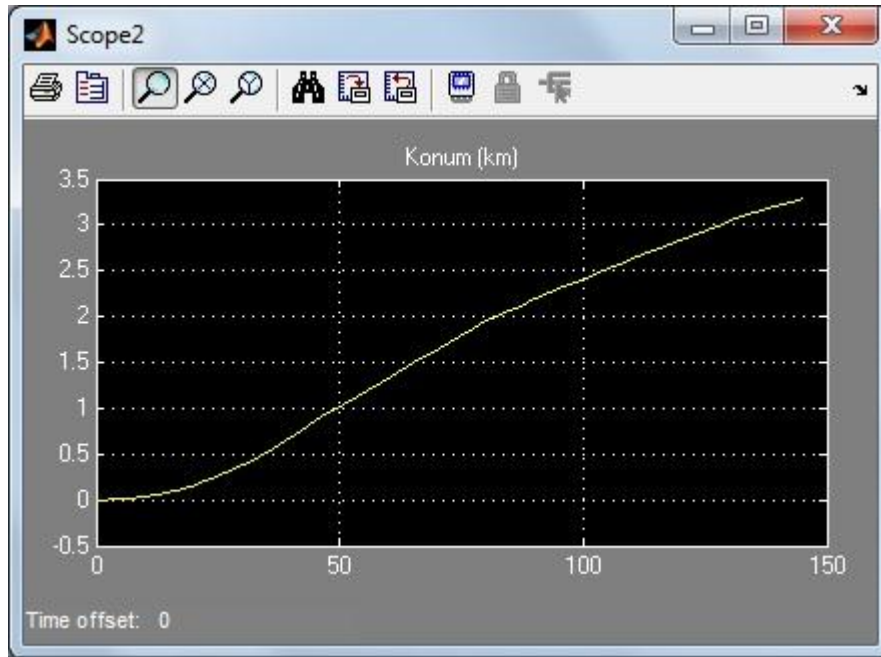
İlk simülasyon sonuçları, önceden belirlenen ve manuel olarak Eğim-Hız Kontrol Ayarı Alt Sistemine girilen sürüş parametreleri ile elde edilmiştir. Daha önce Çizelge 5.2’de verilen bu hız kontrol değerleri şu şekilde seçilmiştir; örneğin araç yokuş yukarı çıkarken hız kontrol değeri yüksek, aşağı inerken ise hız kontrol değeri düşük bir değer olarak atanmıştır. Bu ilk simülasyonun ardından elde edilen Akım-Gerilim, Hız, Konum ve Güç grafikleri sırası ile Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11’deki gibidir.



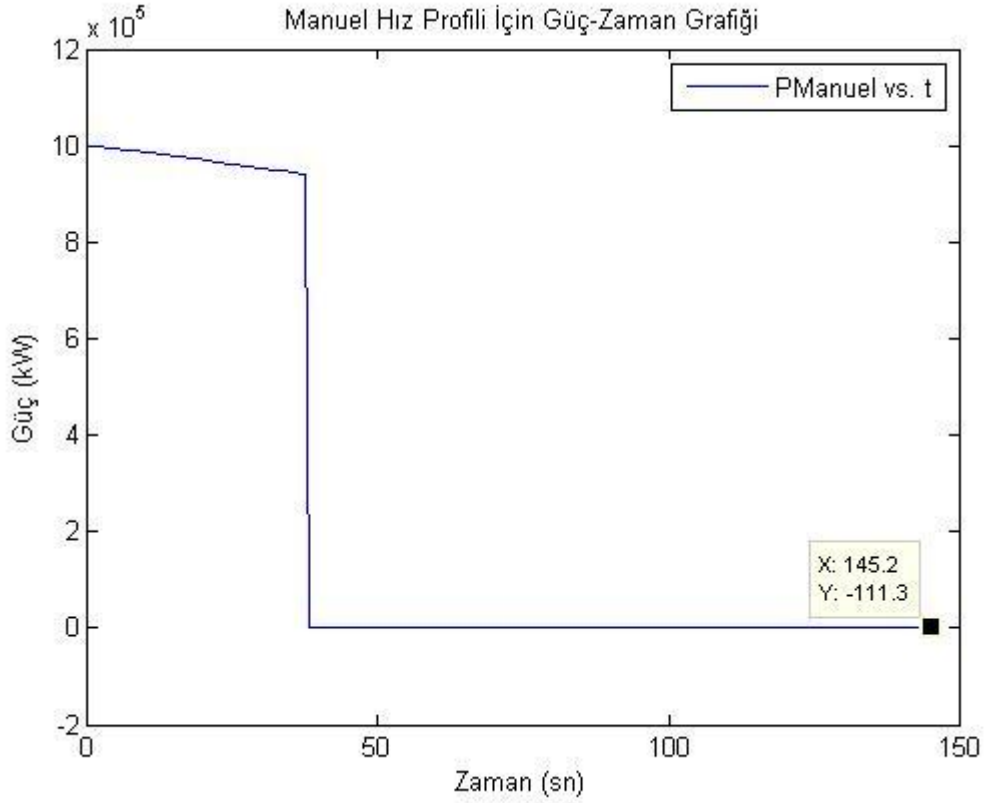
Şekil 5.8 Manuel Sürüş Akım-Gerilim-Zaman Grafiği



Şekil 5.9 Manuel Sürüş Hız-Zaman Grafiği



Şekil 5.10 Manuel Sürüş Konum-Zaman Grafiği



Şekil 5.11 Manuel Sürüş Güç-Zaman Grafiği

Bu sürüş simülasyonunda harcanan güç ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$P_{Manuel} = (I.signals.values) \cdot (V.signals.values);$

$PowerManuel = \text{mean}(P_{Manuel}) / 1000$

$\text{disp}('kW');$

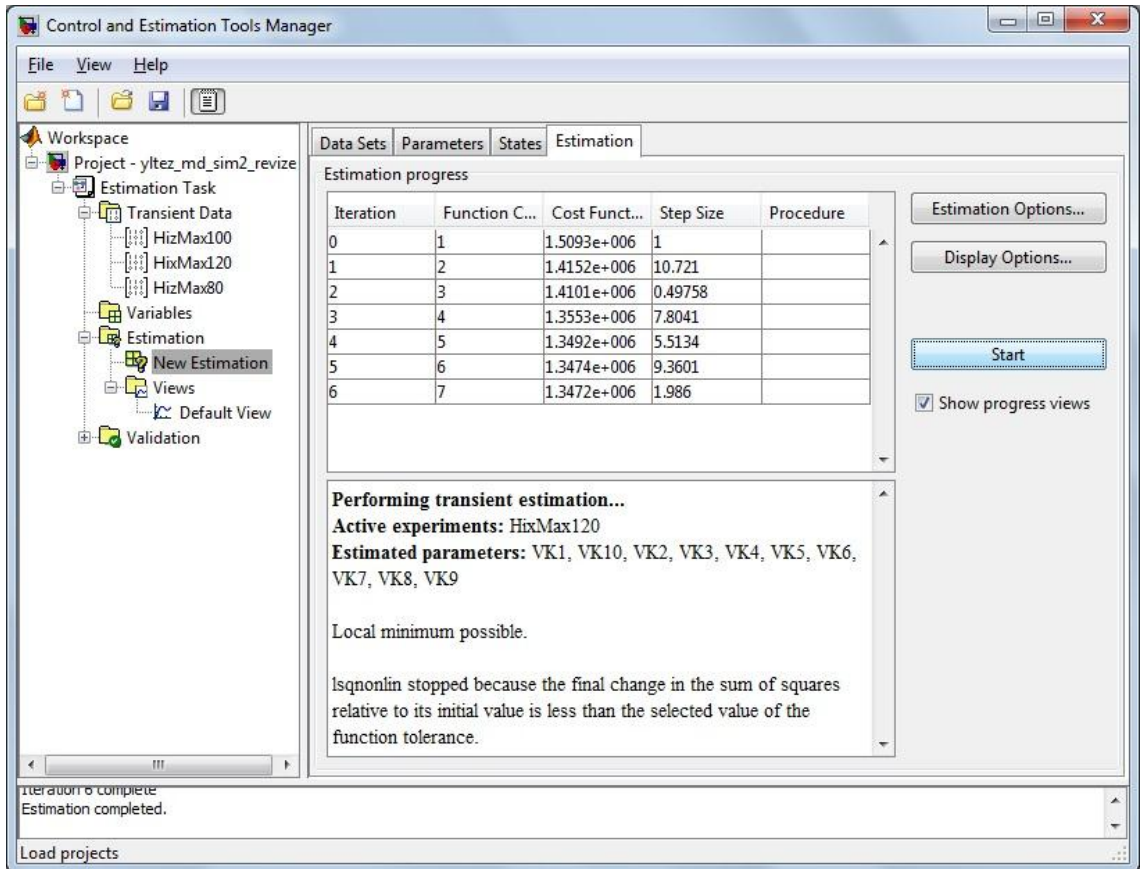
PowerManuel = 360.4555 kW

5.5 Parametre Tahmin Aracı Kullanımı

Simulink içerisindeki bu araç temelinde MATLAB Optimizasyon Aracı'ndan aldığı bazı algoritmalar ile çalışmaktadır. Araç, daha önceden alınmış başlangıç değerlerini simülasyon sonucundaki değerlerle karşılaştırıp, sonucu istenen test değerlerine yaklaştırarak kestirim yapma amacını gütmektedir. Bu tahmin işlemini Bölüm 4'te açıklanmış olan "Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler" optimizasyon yöntemini kullanarak gerçekleştirmektedir.

Örneğin ilk simülasyonda araç 3.3 km'lik güzergâhı yaklaşık 145 saniyede tamamlamıştı. Bu sürenin kısaltılması için araç hızını sürekli 120 km/s olarak gösteren bir referans test değeri Parametre Tahmin Aracına yüklendiğinde, simülasyondaki inişli çıkışlı hız değerleri istenilen hız değerine sabitlenmeye çalışılacak ve buna uygun otomatik hız kontrol parametre değerleri üretilecektir. Bu değerler manuel olarak "Eğim-Hız Kontrol Alt Sistemi" yapısına işlendiğinde araç daha yüksek hızda giderek yolu daha kısa sürede almış olacaktır. Dahası, sürüş otomatik olarak kontrol edileceğinden ve optimum hız kontrol değerleri seçileceğinden daha az enerji harcanmış olacaktır.

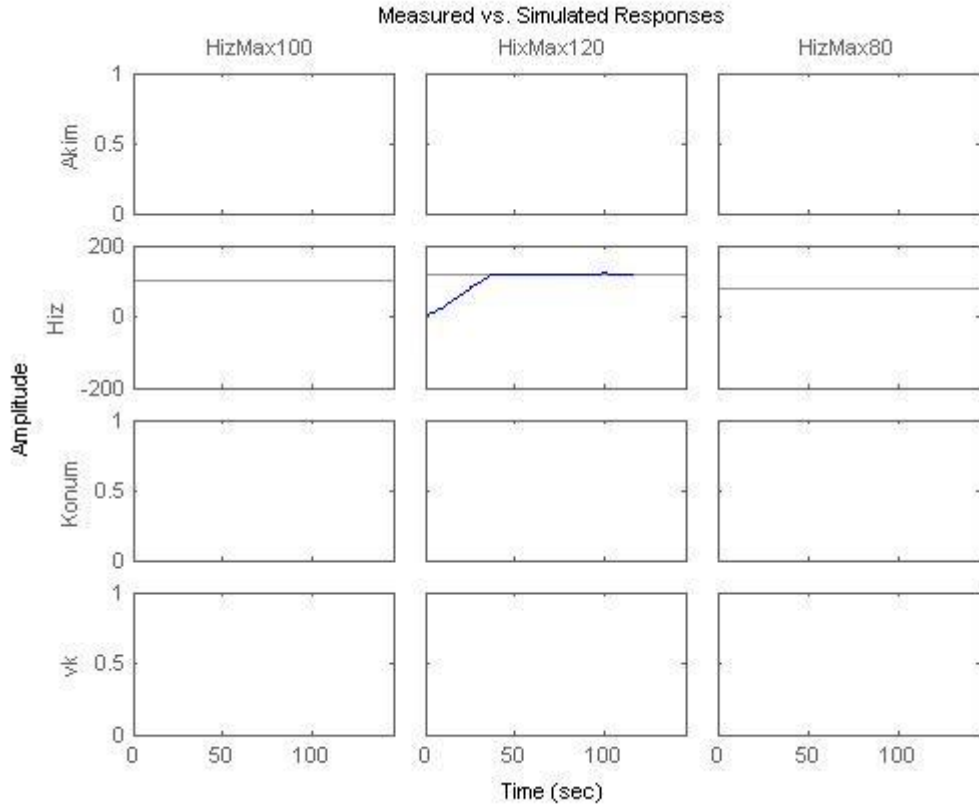
Yine aynı şekilde araç hızının sürekli olarak 80 km/s seviyesinde tutulmaya çalışılacağını varsayalım. Bu durumda da yolculuk süresi bir miktar daha uzamış olacaktır fakat bununla orantılı olarak belli bir miktar enerji tasarrufu da sağlanmış olacaktır. Sonraki bölümlerde bu iki farklı hız profili ile otomatik sürüş simülasyonları gerçekleştirilecektir.



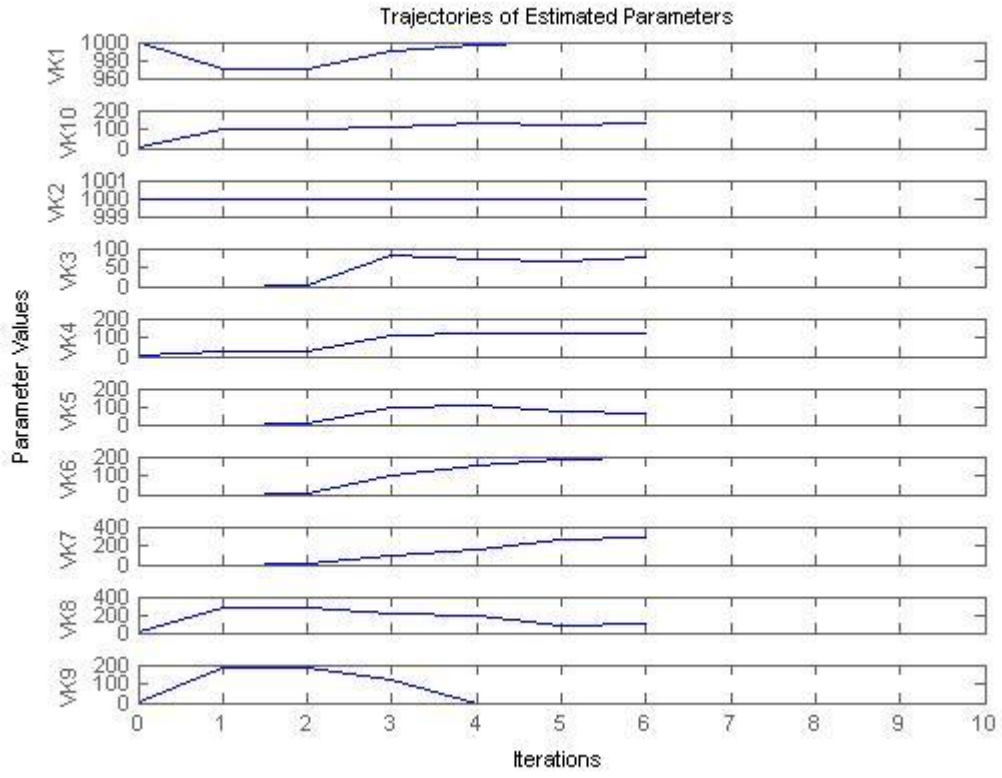
Şekil 5.12 Parametre Tahmin Aracı Arayüzü

5.6 120 km/s Hız Profili Simülasyonu

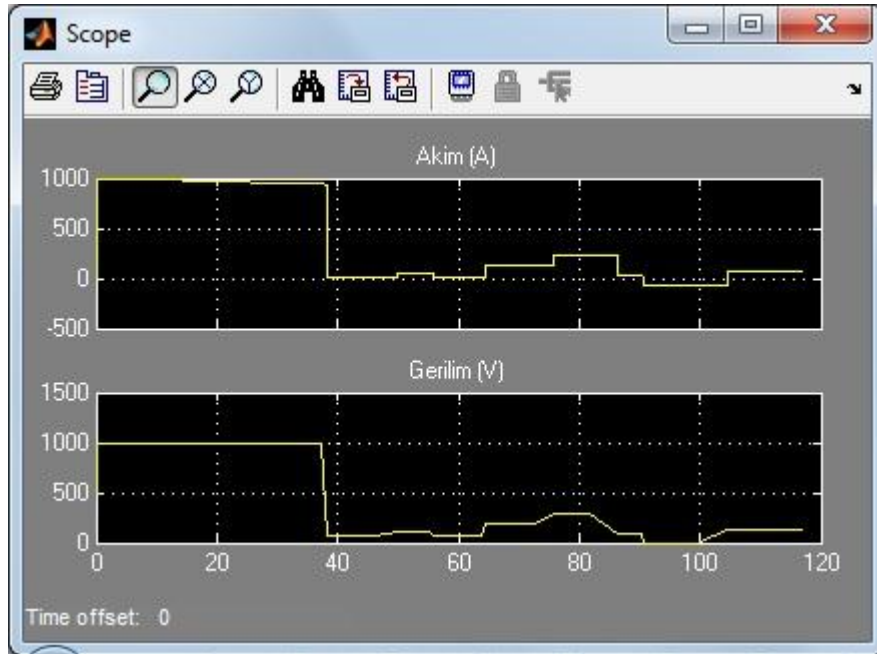
İkinci simülasyonda, mümkün olduğu kadarıyla ve güzergah koşulları elverdiği sürece aracın hızının çıkabileceği maksimum hız olan 120 km/s seviyelerinde seyretmesi amaçlanmıştır. Elde edilen parametre sonuçları ve grafikler aşağıda sırası ile gösterilmiştir.



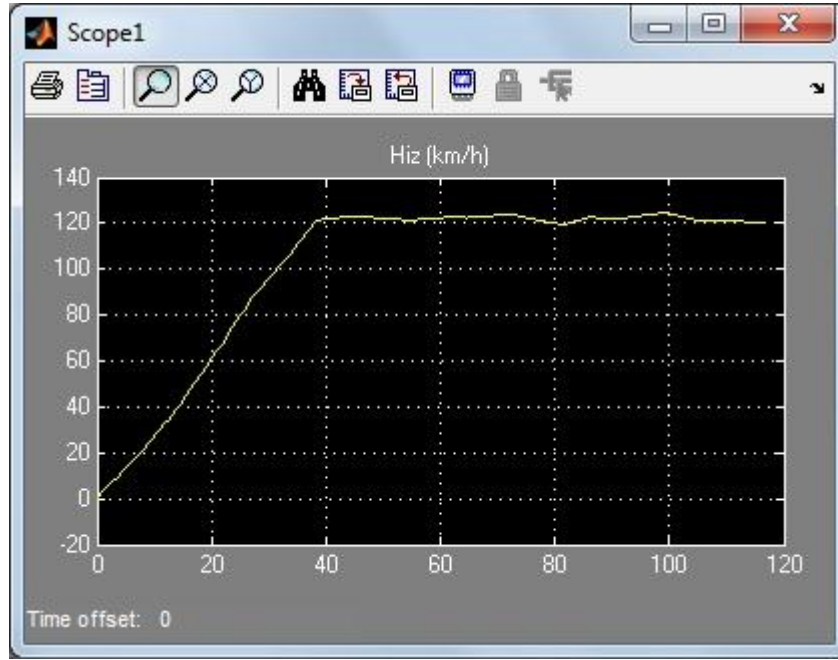
Şekil 5.13 120 km/s Hız Profili Yaklaşımı



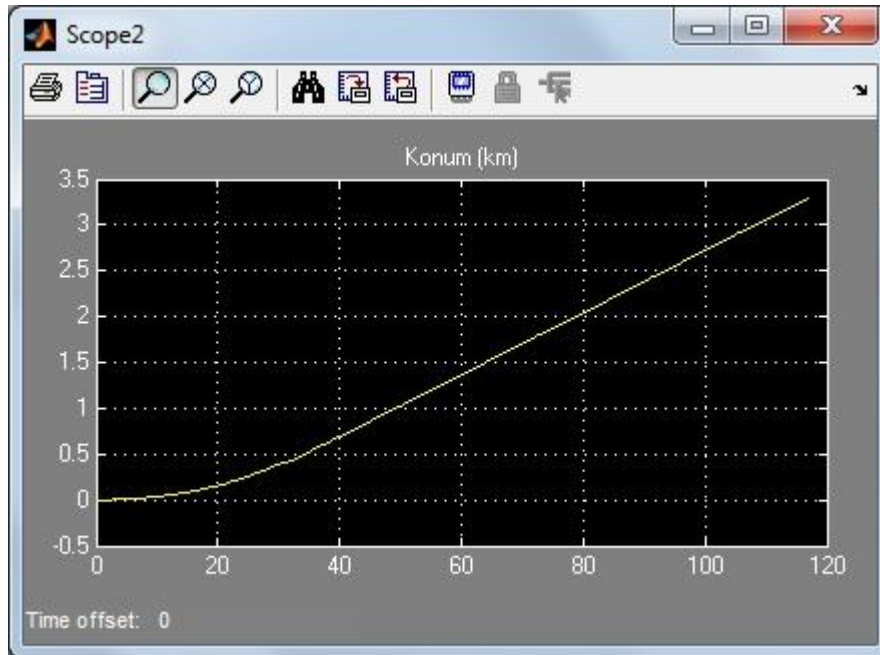
Şekil 5.14 120 km/s Hız Profili İçin Kontrol Parametre İterasyonları



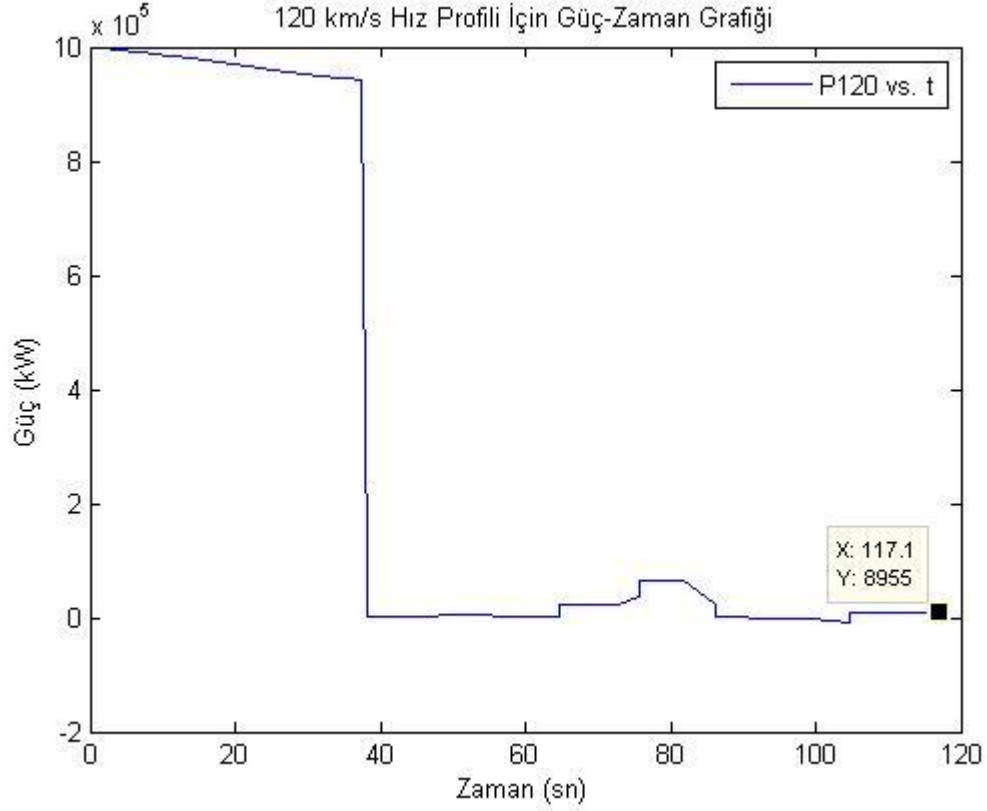
Şekil 5.15 120 km/s Hız Profili İçin Akım-Gerilim-Zaman Grafiği



Şekil 5.16 120 km/s Hız Profili İçin Hız-Zaman Grafiği



Şekil 5.17 120 km/s Hız Profili İçin Konum-Zaman Grafiği



Şekil 5.18 120 km/s Hız Profili İçin Güç-Zaman Grafiği

Bu sürüş simülasyonunda harcanan güç ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$P_{120} = (I.signals.values) \cdot (V.signals.values);$

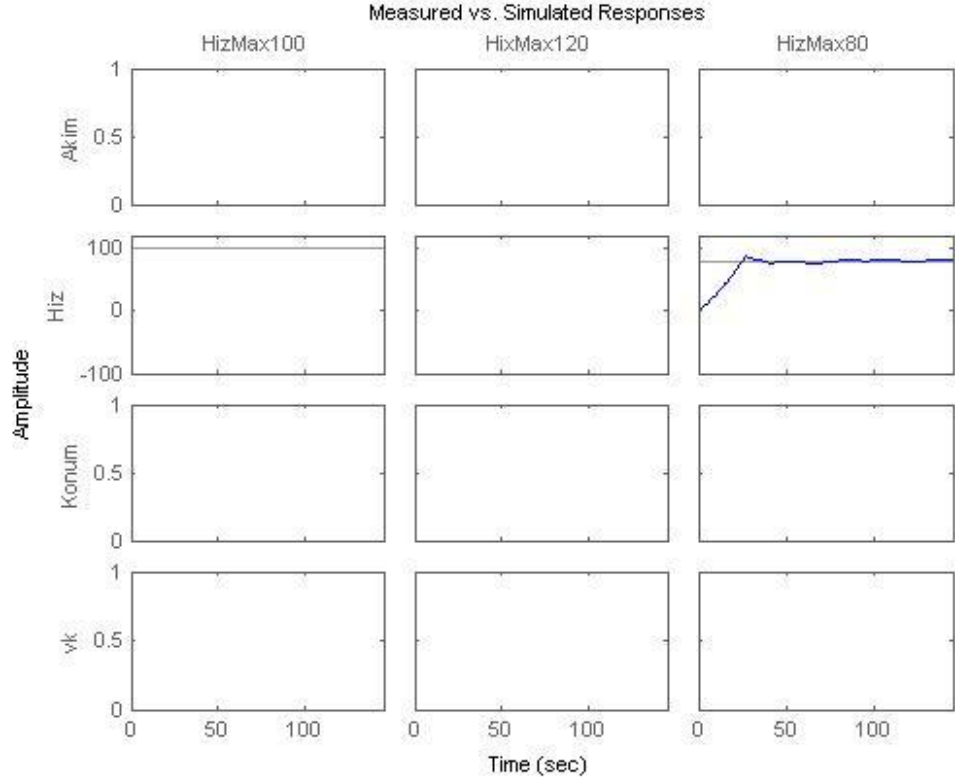
$Power_{120} = \text{mean}(P_{120}) / 1000$

`disp('kW');`

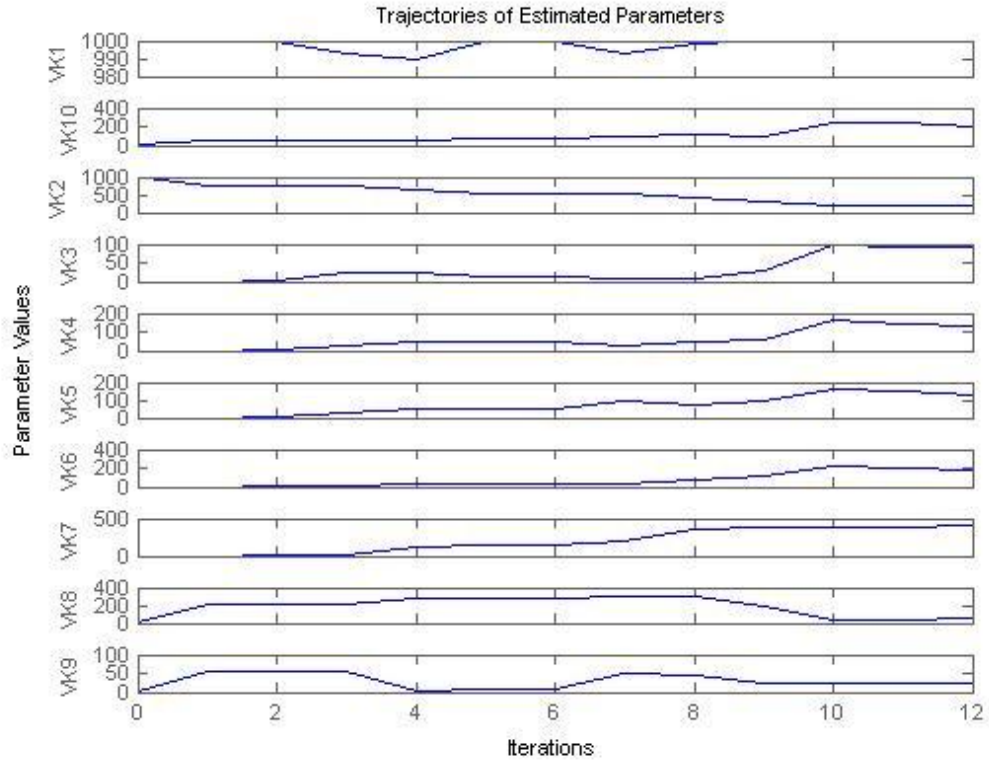
$Power_{120} = 272.4361 \text{ kW}$

5.7 80 km/s Hız Profili Simülasyonu

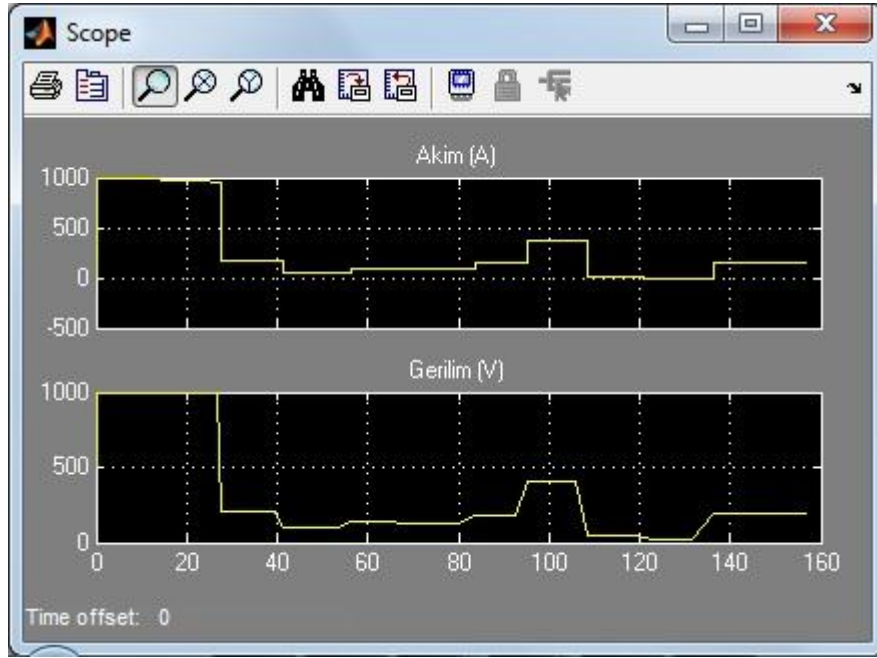
Üçüncü ve son simülasyonda, mümkün olduğu kadarıyla ve güzergah koşulları elverdiği sürece aracın hızının, daha az enerji tüketebileceği 80 km/s seviyelerinde seyretmesi amaçlanmıştır. Elde edilen parametre sonuçları ve grafikler aşağıda sırası ile gösterilmiştir.



Şekil 5.19 80 km/s Hız Profili Yaklaşımı



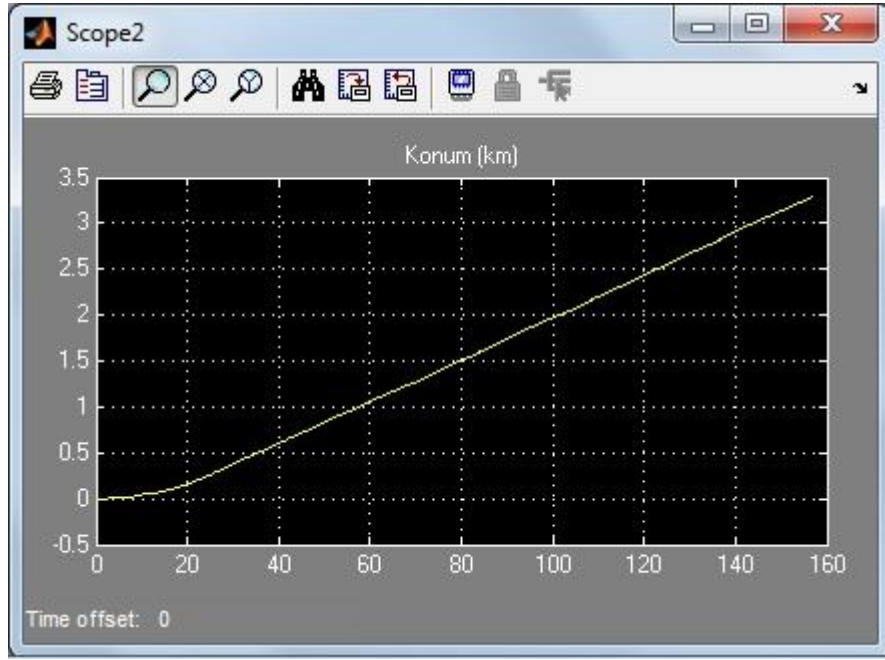
Şekil 5.20 80 km/s Hız Profili için Kontrol Parametre İterasyonları



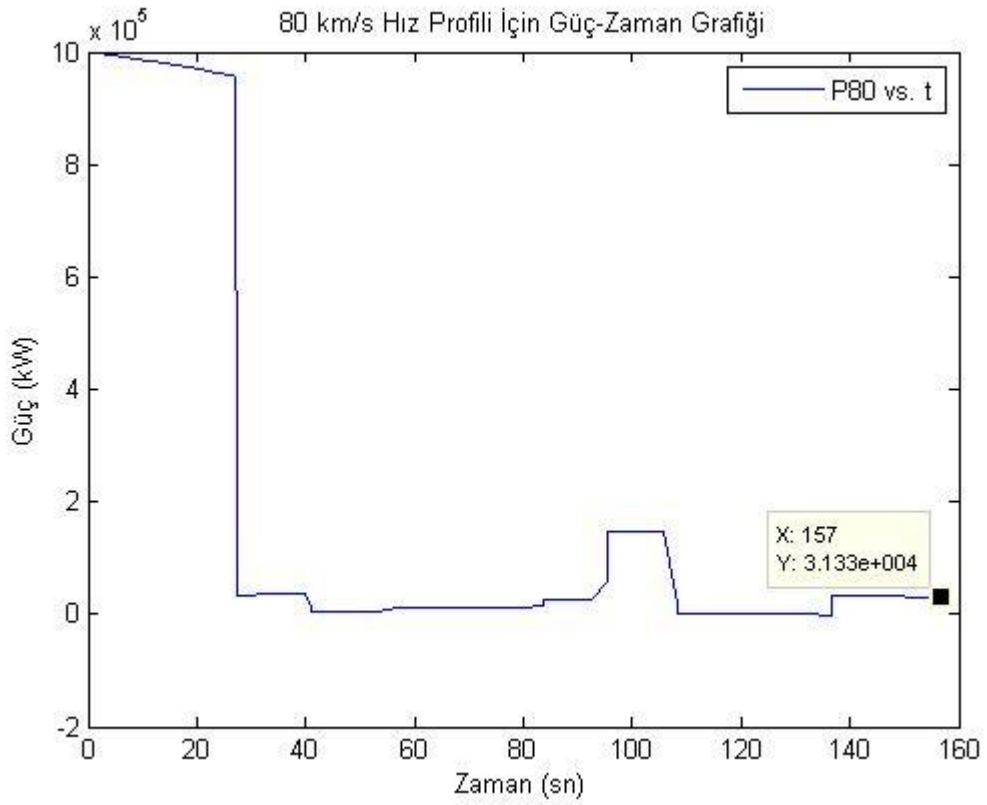
Şekil 5.21 80 km/s Hız Profili İçin Akım-Gerilim-Zaman Grafiği



Şekil 5.22 80 km/s Hız Profili İçin Hız-Zaman Grafiği



Şekil 5.23 80 km/s Hız Profili İçin Konum-Zaman Grafiği



Şekil 5.24 80 km/s Hız Profili İçin Güç-Zaman Grafiği

Bu sürüş simülasyonunda harcanan güç ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$P80=(I.signals.values).*(V.signals.values);$$

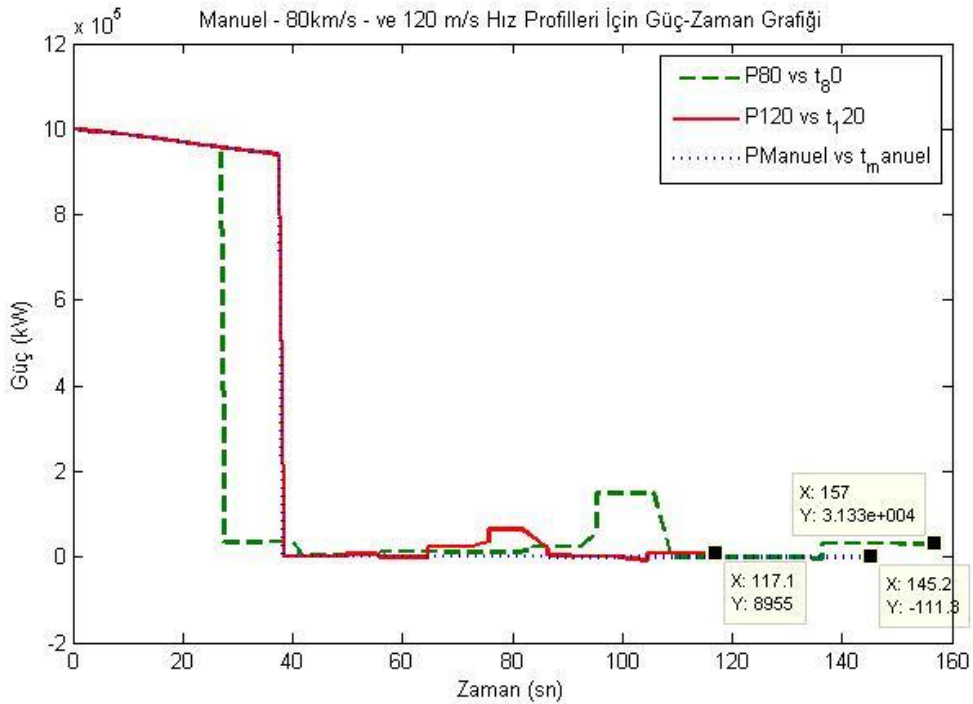
$$Power80=mean(P80)/1000$$

disp('kW');

$$Power80 = 240.3651 \text{ kW}$$

5.8 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Optimize edilmiş simülasyon sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, ikinci simülasyonda hedefe varış süresi, manuel değerlerle yapılan simülasyona göre yaklaşık 28 saniye kadar azalmıştır. Bunun yanı sıra güzergaha bağlı olarak optimum bir sürüş tercih edildiğinden dolayı, tüketilen enerji miktarı da 88 kW daha azdır. Üçüncü simülasyonda ise zamandan feragat edilerek daha düşük enerji tüketimi ile yolculuğun tamamlandığı görülmüştür. Yolculuk süresi 120 km/s'lik hız profili simülasyonuna göre yaklaşık olarak 40 saniye uzamıştır fakat 32 kW civarında enerji tasarrufu sağlanmıştır. Aşağıdaki grafik ve çizelgede her üç simülasyon için de karşılaştırmalı olarak tüketilen güç ve yolculuk süresi ilişkileri görülebilmektedir.



Şekil 5.25 Farklı Hız Profilleri İçin Karşılaştırmalı Güç-Zaman Grafikleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının girişinde öncelikle raylı sistemler hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Sonrasında gerek dünyada gerekse ülkemizde raylı sistemlerin tarihsel sürecine değinilmiştir. Araç ve hat çeşitleri üzerinde kısaca durulmuştur. Trenlerin farklı enerji iletim sistemleri ile ve farklı besleme yöntemleri ile işletildiğinden bahsedilmiştir. Raylı sistemlerde emniyet ve topraklamanın önemi vurgulanmıştır. Bölümün sonunda ise sinyalizasyon ve otomatik sürüşün getirdiği avantajlara değinilmiştir.

Bir sonraki bölüm genel itibari ile enerji verimliliği konusunu işlemekteydi. Dünyamızın ve ülkemizin enerjiye olan ihtiyacı yadsınamaz seviyededir. Raylı sistemlerde frenleme kayıplarının azaltılması, hız profilinin optimizasyonu, güzergâhlardaki çakışmaların önlenmesi, optimize tren hareket tarifelerinin uygulanması, frenleme enerjisinin ısıya dönüştürülmesi yerine depolanması, güç sistemi elemanlarının optimizasyonu ve diğer ilave yöntemlerle boşa harcanan enerjinin önemli bir kısmı kullanılabilir hale gelebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen yöntemler arasında üzerinde en çok durulan konu otomatik ve optimum sürüş sistemleri oldu. Nitekim enerji tüketimindeki minimizasyon da ancak optimal kontrol kuramları ile etkin bir şekilde sağlanabilir. Dolayısı ile basit hareket denklemleri baz alınarak bu konular üzerinde de durulmuştur.

Son ve en önemli aşama olarak kendi içerisinde algoritma barındıran bir otomatik sürüş modeli ve simülasyonu önerilmiştir. Hat güzergâhı 10 parçaya ayrılmıştır ve her parça için trene etki eden kuvvetlere ve trenin kendi iç performans parametrelerine göre ayrı ayrı hız kontrol değerleri atanmıştır.

Simülasyon sonuçları göstermiştir ki, ulaşım süresini uzun bir zamana yaymak ve trenin boşa gitme sürelerini uzatmak tüketilen güç açısından ciddi oranda bir tasarruf sağlamıştır. Diğer bir yandan da mümkün olabilen en yüksek hız seviyesinde seyrederek otomatik ve optimum hız kontrol değerleri ile yolculuk yapılmak istendiğinde, manuel simülasyona oranla zamandan yaklaşık olarak %19, tüketilen güçte ise yaklaşık olarak %25 oranında bir tasarruf sağlanmıştır.

Enerji-zaman optimizasyonunun sağlanmaya çalışıldığı üçüncü simülasyon da göstermiştir ki, şayet yolculuk süresinden bir miktar feragat edilebilirse harcanan enerji miktarı ciddi oranda azaltılabilir.

Yine aynı şekilde bu durumun tersinin de geçerli olduğu, simülasyon sonuçlarından çıkarılabilir. Şöyle ki, eğer hedefe varış süresi kısaltılmak isteniyorsa, optimum düzeyde bir hız profili izlenerek daha kısa sürede ve mümkün olduğu kadarıyla en az enerji tüketimi ile yolculuğu tamamlamak mümkündür.

Önerilen model ve parametre tahmin yöntemi ülkemizde öncelikle ve ivedilikle uzun mesafeli raylı sistem hatlarında ve araçlarında denenmeli ve elde edilen sonuçlar daha önce uygulanan yöntemlerle karşılaştırılmalıdır.

Bu ve benzeri çalışmalar devam ettirildikçe ve diğer enerji tasarruf yöntemleri de uygulanmaya başlandıkça, dünyamızın ve ülkemizin boşa harcanan, işe dönüşmeyen enerjisine dur denilebilir ve enerji tasarrufu adı altında yeni ve soyut bir enerji kaynağı oluşturulması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Milli Eğitim Bakanlığı MEGEP, (2006), “Raylı Sistem Teknolojisi”, ANKARA
- [2] Açıkbaz S. ve Alkaşı S., “Şehirçi Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji İletimi ve Katener Sistemleri”, İstanbul
- [3] Çolak K., Açıkbaz S., Söylemez M.T., “Şehirçi Raylı Ulaşım Sistemlerinde Ray Gerilimi ve Sızıntı Akımı Problemleri”, İstanbul
- [4] Söyler H., Açıkbaz S., “Raylı Toplu Taşımda Sinyalizasyon Sistemleri”, İstanbul
- [5] Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, “Enerji Tasarrufu Nedir?”, http://www.eie.gov.tr/turkce/en_tasarrufu/konut_ulas/bina_ulas.html, 26 Ağustos 2011
- [6] Gunselmann W., (2005), “Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems”, Germany
- [7] Stengel R., (2011), “Optimal Control And Estimation”, New Jersey (USA)
- [8] Wolfram Mathworld, “Nonlinear Least Squares Fitting”, <http://mathworld.wolfram.com/NonlinearLeastSquaresFitting.html>, 26 Ağustos 2011
- [9] Doğan B., “MATLAB ve Simulink Kullanımına Giriş”, http://posta.marmara.edu.tr/~baris/dosyalar/MATLAB_Simulink.pdf, 26 Ağustos 2011

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed DALYAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.10.1985 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce, Fransızca
E-posta : muhammeddalyan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Pertevniyal Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-...	Piomak Otomasyon	Kontrol Sistemleri Proje Mühendisi
2010-2011	Alstom Transport (Akersan)	Elektrik Test Mühendisi
2007-2010	ETO Enerji A.Ş.	Elektrik Proje Mühendisi (Teknik Ofis Sorumlusu)

YAYINLARI

Proje

1. Enerji, Havalandırma, Aydınlatma ve Endüstriyel SCADA Otomasyonu (Lisans Bitirme Tezi)
2. Konveyör Bant Üzerindeki Cisimlerin Boylarına Göre Ayrımı