

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK HATLI ÇOK ARAÇLI RAYLI SİSTEMLERDE
ENERJİ TASARRUFUNA YÖNELİK
SÜRÜŞ KONTROLÜ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Süleyman AÇIKBAŞ**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**ÇOK HATLI ÇOK ARAÇLI RAYLI SİSTEMLERDE
ENERJİ TASARRUFUNA YÖNELİK
SÜRÜŞ KONTROLÜ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Süleyman AÇIKBAŞ
(504032008)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Ocak 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adnan KAYPMAZ
II. Danışman : Doç. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Salman KURTULAN (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (Y.T.Ü.)
Y. Doç. Dr. Tarık DURU (Kocaeli Ü.)
Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK (Kocaeli Ü.)
HAZİRAN 2008**

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam sırasında bana göstermiş oldukları sabır, destek ve cesaretlendirmelerden ötürü eşim Chika Oshima ve çocuklarım Ayşe Haruka ile Fatih Shoichiro'ya teşekkürlerimi sunarım.

Beni doktora yapmaya teşvik eden ve çalışma sırasında da vermiş olduğu tam destekten dolayı Eş Danışmanım ve arkadaşım, Doç. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ ve değerli Danışmanım, Prof. Dr. Adnan KAYPMAZ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Göstermiş oldukları destek ve hoşgörü ile bu çalışmanın sonuçlandırılmasını sağlayan tüm İstanbul Ulaşım San ve Tic AŞ üst yönetimine ve çalışma arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı "Projem İstanbul" kapsamında destekleyen İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne de teşekkür ederim.

Haziran 2008

Süleyman AÇIKBAŞ
Elektrik Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Şehirçi Raylı Ulaşımda Elektrifikasyon Sistemleri.....	1
1.1.1 Enerji Besleme Gerilim Seviyeleri.....	2
1.1.2 Enerji İletim Sistemleri	4
1.2 Raylı Sistem Enerji Tüketimi.....	11
1.2.1 Yardımcı Servislerin Beslenmesi	11
1.2.2 Cer Gücü Beslemesi.....	12
1.3 Raylı Sistemlerde Enerji Tüketimini Azaltma Yöntemleri.....	12
1.3.1 Enerji Kayıplarının Azaltılması	12
1.3.2 Regeneratif Frenleme Enerjisinden Faydalanma Oranını Arttırma.....	13
1.3.3 Enerji Verimli Sürüş Yöntemleri	15
1.4 Tren Sürüş /Kontrol ve Enerji Yönetim Stratejileri	18
1.4.1 Sabit ve Hareketli Blok Sinyalizasyon Sistemleri	19
1.4.2 HB Kontrol ve Koruma Prensibi	19
1.4.3 HB'lu Sistemin Performans Faydaları	19
1.4.4 HB Sinyalizasyon Sisteminde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar.....	20
1.5 Tren Kontrolü ile Enerji Yönetimi	21
1.5.1 Düşük Gerilimden Kaçınma	21
1.5.2 Yığılma Durumunun Yönetimi.....	21
1.5.3 Koordineli Duruş ve Kalkış.....	22
1.6 Boşta Gitme Kontrolü ile Enerji Tasarrufu Çalışmaları	22
2 TREN PERFORMANS ve GÜÇ BESLEME SİSTEMİ BOYUTLANDIRMA ANALİZİ	27
2.1 Tren Performans Hesabı	27
2.2 Tren Hareket Hesapları	28
2.2.1 İvmelenme Durumu	28
2.2.2 Frenleme Durumu.....	29
2.3 Güç Hesabı.....	29
2.4 Raylı Sistem Simülasyon Programı: SimuX.....	31
2.4.1 Sistem Parametreleri	32
2.4.2 Mekanik Bileşen.....	35
2.4.3 Elektrik Bileşen	36
2.4.4 Sosyal Bileşen	37
2.4.5 Sonuçların Görüntülenmesi ve Örnek Çıktılar	38
3 ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN ÖNEMLİ PARAMETRELERİN ve BOŞTA GİTME ŞEKİLLERİNİN İNCELENMESİ	41
3.1 İstanbul Raylı Sistem Hatları ve Enerji Tüketimleri.....	41
3.1.1 Taksim-4 Levent Metro su	42
3.1.2 Aksaray-Havalimanı Metro su.....	43
3.1.3 Kabataş-Bağcılar Arasındaki Tramvay Hatları.....	43
3.1.4 Enerji Tüketimleri	43
3.2 Test Hattı: Aksaray – Havalimanı Metro Hattı	44
3.3 Enerji Tüketimine Etki Eden Ana Parametrelerin İncelenmesi	45
3.3.1 İşletme Sıklığının Etkisinin Araştırılması.....	45

3.3.2	Tren Ağırlığının Etkisi	48
3.3.3	Hızlanma İvmesinin (a) Etkisi	49
3.3.4	Frenleme İvmesinin Etkisinin Araştırılması	50
3.3.5	Tren İç İhtiyacının Etkisinin Araştırılması	52
3.4	Boşta Gitme İşletme Şartlarının İncelenmesi	53
3.4.1	Normal Duruma İlişkin Test	53
3.4.2	$V_{max} = 70$ km/h'a İndirilmiş Durum	55
3.4.3	Boşta Gitme Durumları	57
3.4.4	Sonuçların Karşılaştırması	62
4	İKİ İSTASYON ARASINDA TRENLERİN BOŞTA GİTME NOKTALARININ OPTİMİZASYONU.....	64
4.1	İki İstasyon Arasında Çalışan Tek Tren Durumunun Optimizasyonu	64
4.1.1	Test Hattı	64
4.1.2	Farklı Hat Eğimlerinde Boşta Gitme Noktasının Enerji Tüketimi (E) ve Yolculuk Süresi (T) Üzerine Etkisi.....	65
4.1.3	Farklı Hat Eğimlerinde Verilen Zaman Artışları için En Uygun Boşta Gitme Noktalarının Tespiti	69
4.2	İki İstasyon Arasında 45 s Aralıkla (TAS) Tren Koşturulması Durumu	77
4.2.1	Düz Hattı İki İstasyon Arasında 45 s Aralıklı Tren İşletimi Durumunun Optimizasyonu	79
4.2.2	%2 Eğimli Bir Hattı, İki İstasyon Arasında 45 s Aralıklarla Tren Koşturulması Durumu	87
4.3	Azaltılmış Maksimum Hız Yöntemi ve Karşılaştırması	90
4.4	İki İstasyonlu Durumların Değerlendirmesi	91
5	ÜÇ İSTASYONLU DURUMLARIN OPTİMİZASYONU	92
5.1	Test Hattı	92
5.2	Üç İstasyonlu Düz Hattı Ait Optimizasyon	92
5.2.1	Yapay Sinir Ağları ve Eğitimleri	94
5.2.2	GA ile Optimizasyon	97
5.3	Üç İstasyonlu, %+2 ve %-2 Eğimli Hat Durumuna Ait Analizler.....	100
5.3.1	YSA Eğitimi Aşaması	102
5.3.2	GA ile Optimizasyon	102
5.4	Üç İstasyonlu, %-2 ve %+2 Eğimli Hat Durumuna Ait Analizler.....	102
5.4.1	GA ile optimizasyon	103
5.5	Farklı Eğimlere Sahip Bir Hattı, 3 İstasyon Olması Durumu.....	104
5.5.1	GA ile Optimizasyon	106
5.6	YSA Kullanımının Avantajı.....	106
5.7	Sonuçlar ve Değerlendirme	108
6	ÇOK İSTASYONLU GERÇEK İŞLETME ŞARTLARINA SAHİP SİSTEMLERİN OPTİMİZASYONU.....	109
6.1	Beş İstasyon, İki Hat ve Çok Trenli Durumun Optimizasyonu	109
6.1.1	Yapılan Testler.....	111
6.1.2	Genetik Algoritma ile Optimizasyon	113
6.2	Dokuz İstasyonlu, İki Hatlı, Çok Trenli Durumun Optimizasyonu	115
6.2.1	Yapılan Testler.....	118
6.2.2	YSA Eğitimleri	119
6.2.3	GA Optimizasyonları	120
6.3	Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi ve Gerçek Sisteme Uygulaması	124
7	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	125
	KAYNAKLAR.....	128
	EK A YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA).....	131
	Yapay Sinir Ağlarına İlişkin Tanımlar ve Çalışma Prensipleri.....	131
	Niçin YSA?	134
	Backpropagation (Geri Yayılım Algoritması - GYA).....	135
	EK B MATLAB KODLARI	137

KISALTMALAR

İBB	:İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İUAŞ	:İstanbul Ulaşım San ve Tic AŞ
İETT	:İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri
TCDD	:Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	:Uluslararası Demiryolu Birliği
UITP	:Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği
NFPA	:Amerikan Ulusal Yangın Koruma Ajansı
S/I	:Bölge İzolatörü
LRT	:Hafif Raylı Sistem
APS	:Otomatik Güç Kaynağı
TM	:Trafo Merkezi
TAS	:Trenler Arası Süre
DAS	:Sürücü Bilgilendirme Sistemi
ATO	:Otomatik Tren İşletimi
ATC	:Otomatik Tren Kontrolü
ATP	:Otomatik Tren Koruma
SB	:Sabit Blok
HB	:Hareketli Blok
GA	:Genetik Algoritma
YSA	:Yapay Sinir Ağı
RPCD	:Ray Gerilimi Kontrol Cihazı
RMS	:Etkin Değer

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1: EN 50163'e göre Elektrikli Demiryollarında Gerilim Seviyeleri	3
Tablo 1.2: TAS = 300 s. için Enerji Tüketim Değerleri	13
Tablo 2.1: Tramvay Hattı Genel Parametreler	38
Tablo 2.2: Tramvay Hattı Trafo Merkezi Verileri	39
Tablo 2.3: Tramvay Hattı Trafo Merkezi Maksimum RMS Değerleri	39
Tablo 3.1: Hatların 2002-2006 Yıllarındaki Ortalama Aylık Enerji Tüketimleri	43
Tablo 3.2: Farklı TAS İçin Geri Kazanım Oranı ve Araç*km Enerji Tüketimi	46
Tablo 3.3: Enerji Reküperasyon Oranları	47
Tablo 3.4: Hattın TM Eklenmesi Durumunda Enerji Reküperasyon Oranları	48
Tablo 3.5: Farklı Hızlanma İvmeleri İçin Enerji Tüketimi ve Tur Süresi	49
Tablo 3.6: TAS 300 s'de Farklı a_b için Geri Kazanım Oranı ve Enerji Tüketimleri	51
Tablo 3.7: TAS 150 s'de Farklı a_b için Geri Kazanım Oranı ve Enerji Tüketimleri	52
Tablo 3.8: TAS 300 s'de Farklı Yardımcı Güç Kullanım Oranları İçin Geri Kazanım Oranı ve Enerji Tüketimleri	52
Tablo 3.9: TAS 150 s İçin Geri Kazanım Oranı ve kWh/Araç*km – Yardımcı Güç Kullanım Oranı Değerleri	53
Tablo 3.10: Normal Durumda Ana Parametreler	54
Tablo 3.11: Normal Durumda Her İki Yöndeki Tren İstatistikleri	54
Tablo 3.12: Azaltılmış Maksimum Hız Durumunda Ana Parametreler	55
Tablo 3.13: Azaltılmış Maksimum Hız Durumunda İki Yöndeki Tren İstatistikleri	56
Tablo 3.14: Boşta Gitme Durumu - 1 için Ana Parametreler	57
Tablo 3.15: Boşta Gitme Durumu - 1 için Tren İstatistikleri	57
Tablo 3.16: Boşta Gitme Durumu - 2 için Ana Parametreler	60
Tablo 3.17: Boşta Gitme Durumu - 2 için Tren İstatistikleri	60
Tablo 3.18: Boşta Gitme Durumu - 3 için Ana Parametreler	61
Tablo 3.19: Boşta Gitme Durumu - 3 için Tren İstatistikleri	61
Tablo 3.20: Test Sonuçlarının Karşılaştırma Tablosu	62
Tablo 4.1: İki Eğim Kombinasyonu için T_{min} 'e Göre Süre Artışına Ait Optimum Boşta Gitme Noktaları ve Elde Edilen Enerji Tasarruf Değerleri	77
Tablo 4.2: Farklı Parametreler İçin Optimizasyon Sonuçları	86
Tablo 4.3: T_{min} 'e Aynı Süre Artışına Yol Açan Boşta Gitme ve Azaltılmış Maksimum Hız Yöntemlerinde Elde Edilen Enerji Tasarruf Değerleri	91
Tablo 5.1: Üç İstasyonlu İşletmede: Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Bazı Test Sonuçları	92
Tablo 5.2: Farklı Setup Parametreleri İçin Gerçekleştirilmiş Farklı GA Sonuçları	100
Tablo 5.3: Optimum Noktalar İçin YSA'ların ve SimuX'un Cevapları	100
Tablo 5.4: Çıkış-İnişli Hattın Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Test Sonuçları	100
Tablo 5.5: Farklı Parametreler İçin Optimizasyon Sonuçları	102
Tablo 5.6: İnişli - Çıkışlı Hattın Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Test Sonuçları	103
Tablo 5.7: Eğim Değerleri	104
Tablo 5.8: Farklı Parametreler İçin Optimizasyon Sonuçları	106
Tablo 6.1: Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Optimizasyon Sonuçları	111
Tablo 6.2: Aksaray – Davutpaşa Hattındaki Eğim Değerleri	116
Tablo 6.3: Aksaray – Davutpaşa Hattındaki Hız Sınırlamaları	116
Tablo 6.4: Aksaray – Davutpaşa Bölgesindeki İstasyon Yerleri	116
Tablo 6.5: Örnek Bir 9 İstasyonlu Boşta Gitme Durumu Verisi	119
Tablo 6.6: Testlerdeki Bulunan Değerlerin Değişim Aralığı	119
Tablo 6.7: 9 İstasyonlu Hattın, 1800 s için En Uygun Boşta Gitme Durumu Verileri	121

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Aksaray – Havalimanı Metro Hattı Trafo Merkezi Tek Hat Diagramı	2
Şekil 1.2: Raylı Sistemlerde Enerji İletim Sistemleri	4
Şekil 1.3: 3. Ray Sistemi, http://www.railway-technical.com/etracp.html	5
Şekil 1.4: Rijit Katener Sistemi	6
Şekil 1.5: Bir Normal Katener Sisteminin Genel Görünüşü [8].	8
Şekil 1.6: Bordo Şehrinde Innorail Uygulaması [9].	10
Şekil 1.7: Innorail Sisteminin Besleme Şekli [9].	10
Şekil 1.8: Innorail Sistemine Ait Profil ve Hat Görünümü [9].	10
Şekil 1.9: Frenleme Enerjisinin Kullanımı ve Diğer Enerji Tüketimleri [13].	14
Şekil 1.10: Enerji Depolama Lokasyonları [15].	15
Şekil 1.11: Enerji Verimli Sürüş Stratejileri [17].	16
Şekil 1.12: Erken veya Gecikmeli Kalkışların Enerji Tüketimine Etkisi [18].	17
Şekil 1.13: Boşta Gitme Durumuna ait Hız – Yer Grafiği	23
Şekil 2.1: Cer Kuvveti (N) - Hız (km/h) karakteristiği	28
Şekil 2.2: DC Beslemeli Raylı Sistemin Cer Gücü Kaynağının Genel Gösterimi.....	30
Şekil 2.3: DC Beslemeli Raylı Sistemin Cer Gücü Kaynağının Elektriksel Eşdeğeri	30
Şekil 2.4: Ray Gerilimi Hesabı İçin Devre	31
Şekil 2.5: SimuX Ortamında Sistemin Temsili.	33
Şekil 2.6: Bir Araca ait Cer Kuvveti (kN) – Hız diagramı (km/h)	34
Şekil 2.7: Bir Araca ait Dinamik Fren Kuvveti (kN) – Hız diagramı (km/h)	35
Şekil 2.8: Bir Araca ait Verim (%) – Hız diagramı (km/h)	35
Şekil 2.9: Tren Hareketlerinin Simülasyonu	37
Şekil 2.10: Bir Çalışmadan Bir Trene Ait Hız – Yer Profili	40
Şekil 3.1: İstanbul'daki Raylı Sistemler (Ekim 2007)	42
Şekil 3.2: Raylı Sistem Hatlarının Aylık Enerji Tüketimleri (2006)	44
Şekil 3.3: LRT Hattının SimuX Gösterimi.....	45
Şekil 3.4: Farklı TAS'lar İçin Geri Kazanım Oranı ve kWh/Araç/km	46
Şekil 3.5: İlave TM'li Konfigürasyon.....	47
Şekil 3.6: Farklı Yolcu Sayıları İçin kWh/Araç/km) Ve Tren Ağırlığı	48
Şekil 3.7: Farklı Yolcu Sayıları İçin Wh/(kişi*km).....	49
Şekil 3.8: Farklı Hızlanma İvmeleri İçin kWh/Araç/km ve Tur Süresi Grafiği	50
Şekil 3.9: Araçlara Ait Elektrik ve Mekanik Özellikler.....	50
Şekil 3.10: Tur Süresi ve kWh/Araç/km - a_b Eğrileri	51
Şekil 3.11: TAS 300 s için Enerji Tüketimi – Yardımcı Güç Kullanım Oranı	53
Şekil 3.12: Aksaray–Havalimanı Yönünde Çalışan Bir Trene Ait Hız – Yer Grafiği.	54
Şekil 3.13: Şekil 3.12'de Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali.....	54
Şekil 3.14: Havalimanı–Aksaray Yönünde Çalışan Bir Trene Ait Hız – Yer Grafiği.	55
Şekil 3.15: Şekil 3.14'de Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali.....	55
Şekil 3.16: Azaltılmış Maksimum Hız için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği.	56
Şekil 3.17: Şekil 3.16'da Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali.....	56
Şekil 3.18: Azaltılmış Maksimum Hız için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği.	56
Şekil 3.19: Şekil 3.18'de Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali.....	57
Şekil 3.20: Boşta Gitme Durumu -1 için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği ...	58
Şekil 3.21: Şekil 3.20'deki Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali	58

Şekil 3.22: Boşta Gitme Durumu -1 için Hızlanan Bir Trenin Hız Profili.....	59
Şekil 3.23: Boşta Gitme Durumu -1 için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği ...	59
Şekil 3.24: Şekil 3.23'ün Yakınlaştırılmış Hali.....	59
Şekil 3.25: Boşta Gitme Durumu - 2 için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği ..	60
Şekil 3.26: Şekil 3.25'in Yakınlaştırılmış Hali.....	60
Şekil 3.27: Boşta Gitme Durumu - 2 için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği ..	60
Şekil 3.28: Şekil 3.27'nin Yakınlaştırılmış Hali.....	61
Şekil 3.29: Boşta Gitme Durumu - 3 için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği ..	61
Şekil 3.30: Şekil 3.29'un Yakınlaştırılmış Hali.....	61
Şekil 3.31: Boşta Gitme Durumu - 3 için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği ..	62
Şekil 3.32: Şekil 3.31'in Yakınlaştırılmış Hali.....	62
Şekil 4.1: Test Hattının SimuX Gösterimi	65
Şekil 4.2: Test Hattının Eğim Profilleri	65
Şekil 4.3: Değişik Eğim Durumlarında Farklı Boşta Gitme Noktaları için T Eğrileri ..	66
Şekil 4.4: Değişik Eğim Durumlarında Farklı Boşta Gitme Noktaları için E Eğrileri ..	67
Şekil 4.5: Farklı Eğim Değişimlerine Göre Elde Edilen T_{min} Yüzeyi	67
Şekil 4.6: Farklı Eğimlerde T_{min} Süreleri için Elde Edilen E_{max} Yüzeyi	68
Şekil 4.7: Değişik Eğimler için Elde Edilen Hız – Zaman Eğrileri.....	68
Şekil 4.8: T_{min} 'de %1'lik Artış için Optimum Boşta Gitme Noktalarına ait Yüzey.....	71
Şekil 4.9: T_{min} 'de %1'lik Artışa Karşılık Elde Edilen Enerji Tasarrufu (%) Yüzeyi	71
Şekil 4.10: Değişik Hat Profilleri.....	72
Şekil 4.11: Şekil 4.10'deki Hat Profillerinde %1'lik T Artışı Veren Boşta Gitme Noktaları için Hız – Zaman Eğrileri	72
Şekil 4.12: Şekil 4.10'deki Hat Profillerinde %1'lik T Artışı Veren Boşta Gitme Noktaları için Hız -Yer Profilleri	73
Şekil 4.13: T_{min} 'de %3'lük Artış için Optimum Boşta Gitme Noktalarına ait Yüzey ..	74
Şekil 4.14: T_{min} 'de %3'lük Artışa Karşılık Elde Edilen Enerji Tasarrufu (%) Yüzeyi ..	74
Şekil 4.15: T_{min} 'de %5'lik Artış için Optimum Boşta Gitme Noktalarına ait Yüzey ...	75
Şekil 4.16: T_{min} 'de %5'lik Artışa Karşılık Elde Edilen Enerji Tasarrufu (%) Yüzeyi ..	75
Şekil 4.17: Eğim Bulunmayan Hattta Farklı Süre Artışlarında Optimum Hız-Yer Eğrileri.....	76
Şekil 4.18: Eğimli (0-500 m'de %-3, 500-1000 m'de %0.6) Hattta Farklı Süre Artışlarında Optimum Hız-Yer Eğrileri.....	76
Şekil 4.19: Farklı Eğimli Hatlarda 45 s TAS İçin Farklı Boşta Gitme Noktalarında E'nin Değişimi	78
Şekil 4.20: Farklı Eğimli Hatlarda 45 s TAS İçin Farklı Boşta Gitme Noktalarında T'nin Değişimi	79
Şekil 4.21: Enerji Tüketimi (E) için 15 Nöronlu Bir Ağ.....	80
Şekil 4.22: 15 Nöronlu Bir Ağ İle Enerji Tüketimini (E) Öğrenme Performansı.....	81
Şekil 4.23: Yolculuk Süresi (T) için 30 Nöronlu Bir Ağ.....	81
Şekil 4.24: 30 Nöronlu Bir Ağ İle Yolculuk Süresini (T) Öğrenme Performansı	81
Şekil 4.25: YSA'nın ve SimuX'un Boşta Gitme Başlangıçları İçin Ürettikleri E Eğrileri	82
Şekil 4.26: YSA'nın ve SimuX'un Boşta Gitme Başlangıçları İçin Ürettikleri T Eğrileri	82
Şekil 4.27: Düz Hattta 45s TAS Durumuna Ait Optimizasyon Sonuçları	84
Şekil 4.28: Boşta Gitmeye Başlama Noktalarına Bağlı Uygunluk Fonksiyonu Eğrisi	85
Şekil 4.29: E İçin Eğitilen YSA'ların ve SimuX'un Verdiği Sonuçlar.....	87
Şekil 4.30: T İçin Eğitilen 35 Nöronlu YSA'nın Verdiği Sonuçlar	88
Şekil 4.31: %2 Eğimli Hattta, 45 s TAS İşletimde, Trenlerin 617.68 m'de Boşta Gitmeye Başlaması Durumunda Oluşan Hız-Yer Grafiği.....	89
Şekil 4.32: Farklı İşletme Yöntemleri için Hız – Yer Eğrileri.....	90
Şekil 5.1: Üç İstasyonlu Test Hattının Gösterimi	92
Şekil 5.2: X_1 ve X_2 Değerleri İçin T Değerleri.....	93

Şekil 5.3: X_1 ve X_2 Değerleri İçin E Değerleri.....	94
Şekil 5.4: E Tahmini için 2-15-1 YSA.....	94
Şekil 5.5: Eğitim Setine Ait YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataları.....	95
Şekil 5.6: Eğitim Setine Ait YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataların Dağılımı ..	95
Şekil 5.7: Test Setine Ait YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataları.....	96
Şekil 5.8: Test Seti İçin YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataların Dağılımı	96
Şekil 5.9: Eğitim Setine Ait YSA Çıktılarının T Değerlerindeki Hataları.....	97
Şekil 5.10: Eğitim Seti İçin YSA Çıktılarının T Değerlerindeki Hataların Dağılımı ...	97
Şekil 5.11: Üç İstasyonlu Düz Hatta İlişkin Optimizasyon Sonuçları	98
Şekil 5.12: 582 m ve 1434 m'de Boşta Gitme Durumunda Tren Hız-Yer Grafiği.....	99
Şekil 5.13: Üç İstasyonlu, % +2 ve % -2 Eğimli Hat Profili	100
Şekil 5.14: 416 m ve 1697 m'lerde Boşta Gitme Olması Durumunda Hız-Yer Grafiği	101
Şekil 5.15: 762 m ve 1352 m'lerde Boşta Gitme Olması Durumunda Hız-Yer Grafiği	101
Şekil 5.16: Üç İstasyonlu, % -2 ve % +2 Eğimli Hat Profili	102
Şekil 5.17: Optimum Noktalarda Boşta Gitme İçin Hız-Yer Grafiği.....	103
Şekil 5.18: Farklı Eğimlere Sahip Hattın Görünümü	104
Şekil 5.19: Farklı Eğimli Hatta X_1 ve X_2 Değerleri İçin T Değerleri	105
Şekil 5.20: Farklı Eğimli Hatta X_1 ve X_2 Değerleri İçin E Değerleri	105
Şekil 5.21: Farklı Eğimli Hatta, 3 İstasyon Durumu İçin, Trene Ait Hız-Yer Grafiği.....	106
Şekil 5.22: En İyi Bireye Ait Uygunluk Değerinin Nesil Sayısına Bağlı Değişimi ($T_{Hedef}=171$ s, Nesildeki Birey Sayısı= 20)	107
Şekil 6.1: Aksaray-Sağmalcılar Hattının Basit Şeması	109
Şekil 6.2: Aksaray – Sağmalcılar Hattına Ait Eğim Değerleri ve Profili.....	109
Şekil 6.3: Aksaray-Sağmalcılar Trenlerine Ait Hız-Yer Grafikleri.....	110
Şekil 6.4: Sağmalcılar-Aksaray Trenlerine Ait Hız-Yer Grafikleri.....	111
Şekil 6.5: Aksaray – Sağmalcılar Trenine Ait Optimum Hız Profili.....	114
Şekil 6.6: Sağmacılar – Aksaray Trenine Ait Optimum Hız Profili	114
Şekil 6.7: Aksaray – Davutpaşa Hat Bölgesi	115
Şekil 6.8: Aksaray – Davutpaşa Hattı Eğim Profili	115
Şekil 6.9: Davutpaşa – Aksaray Trenine Ait Hız – Yer Profili	117
Şekil 6.10: Aksaray – Davutpaşa Trenine Ait Hız – Yer Profili	118
Şekil 6.11: E İçin Eğitilen YSA.....	119
Şekil 6.12: T İçin Eğitilen YSA	119
Şekil 6.13: Matlab GATool Aracının Genel Görünüşü	120
Şekil 6.14: 1800 s için Davutpaşa – Aksaray Trenine Ait Optimum Hız Profili	122
Şekil 6.15: 1800 s için Aksaray - Davutpaşa Trenine Ait Optimum Hız Profili	122
Şekil A.1: Bir Yapay Sinir Nöronunu Oluşturan Temel Bileşenler	132
Şekil A.2: 2 Giriş ve 2 Çıkışlı Yapay Sinir Ağı	132
Şekil A.3: En Çok Kullanılan Transfer Fonksiyonları.....	133
Şekil A.4: Geri Yayılmalı Yapay Sinir Ağı'nın Genel Yapısı	135

SEMBOL LİSTESİ

U_N	:Nominal hat gerilimi
U_{min1}	:En küçük süreksiz hat gerilimi
U_{max1}	:En büyük sürekli hat gerilimi
V_C	:Boşta Gitmeye Başlama Hızı
V_{RM}	:Tekrar İvme Verme Hızı
S_{CS}	:Boşta Gitmeye Başlama Noktası
m	:Araç Kütlesi
a	:İvme Değeri
F	:Araç Tarafından Üretilen Cer Kuvveti
F_{net}	:İvmelenme İçin Mevcut Olan Kuvvet
F_R	:Araç Karşı Kuvvetleri
F_C	:Kurp Karşı Kuvveti
F_G	:Eğim Karşı Kuvveti
V	:Tren Hızı
V_T	:Hedef Hız
S	:Tren Yeri
S_{fren}	:Fren Mesafesi
Δt	:Hesap Adımı
$P_{mekanik}$	:Mekanik Güç
$P_{elektrik}$	:Elektriksel Güç
η	:Araç Verimi
R_{TM}	:Trafo Merkezi Direnci
$R_{(+)\text{fider}}$	:(+) Fider Kabloları Direnci
$R_{(-)\text{fider}}$	:(-) Fider Kabloları Direnci
$R_{kat+ray}$	:Katener Telleri ve Ray Birleşik Direnci
I_{Tren}	:Tren Akımı
E_{max}	:Tam Gaz Sürüşteki Enerji Tüketimi
T_{min}	:Tam Gaz Sürüşteki Yolculuk Süresi
f	:Uygunluk Fonksiyonu Değeri
E	:Önerilen Şartlar İçin YSA tarafından tahmin edilen Enerji Tüketimi
T	:Önerilen Şartlar İçin YSA tarafından tahmin edilen Yolculuk Süresi
w_E	:Uygunluk Fonksiyonunda Enerjiye Ait Ağırlık

w_T : Uygunluk Fonksiyonunda Zamana Ait Ağırlık
 E_{Hedef} : Uygunluk Fonksiyonunda Hedeflenen Enerji
 T_{Hedef} : Uygunluk Fonksiyonunda Hedeflenen Yolculuk Süresi
 X : Aranılan En Uygun Boşta Gitme Nokta(ları)
 $xmin$: En Egun Boşta Gitme Noktalarının Arandığı Minimum Sınırlar
 $xmax$: En Egun Boşta Gitme Noktalarının Arandığı Maksimum Sınırlar
 $fT (\Delta T)$: Tam Gaz Duruma Göre Yüzdesel Süre Artışı
 $fE (\Delta E)$: Tam Gaz Duruma Göre Yüzdesel Enerji Tasarrufu

ÇOK HATLI ÇOK ARAÇLI RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TASARRUFUNA YÖNELİK SÜRÜŞ KONTROLÜ

ÖZET

Ülkemizde, büyük şehirlerde dayanılmaz hale gelen trafik sorunları, fosil artığı yakıtlardan kaynaklanan çevre sorunları ve ekonomik sorunlar, önümüzdeki senelerde metro, hafif raylı sistem ve tramvay gibi raylı ulaşım sistemlerinin giderek artan bir yoğunlukla toplu taşımacılıkta kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapılan planlara göre, önümüzdeki yirmi senelik süre içinde büyük şehirlerimizin önemli bir kısmı, yaygın raylı sistem ağları ile donatılmış olacaktır. İlk yatırım maliyetleri son derece yüksek olan raylı ulaşım sistemlerinin, işletme esnasındaki en önemli gider kalemlerinden birisi de enerji tüketim maliyetidir.

Taşıma sistemleri içinde, çevre dostu olarak tanımlanan raylı sistemler, enerji kullanımı yönünden de oldukça verimli olarak kabul edilmektedir. Gelişen teknolojilerle, devamlı olarak bu sistemlerin enerji tüketimleri azaltılmıştır. Bu değerleri daha da aşağıya çekebilmek için detaylı, yeni yöntemler üzerinde çalışılmaktadır.

Tezde, ilk olarak raylı sistemlerdeki enerji besleme sistemleri, seçim kriterleri ve enerji tüketimine etki eden genel hususlar verilecek, ardından “Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü” başlığı ile belirlenmiş olan tez konusu kapsamında yapılmış olan bilimsel çalışmalar ve gerçek hayattaki uygulamalar özetlenecektir.

Bir raylı taşıma sisteminde enerji tüketimi bir çok farklı parametreye bağlıdır. Tezin ilk bölümlerinde, uygulamada kullanılan değişik tasarruflu işletme yöntemleri üzerine yapılmış simülasyonlara ait sonuçlar verilmiştir. Ele alınan yöntemler; tren işletme sıklığının artırılması, frenleme ivme oranının azaltılması, tren yardımcı güç kullanım oranının azaltılması, trenlerin maksimum hızlarının azaltılması ve son olarak boşta gitme algoritmasının uygulanmasıdır. Bu yöntemlerin, enerji tüketimi, enerjinin geri kazanım oranı, yolculuk süresi üzerine etkileri araştırılmıştır.

Bir raylı sistemde tren rotası boyunca hız profilini en uygun hale getirmek, enerji tüketimini azaltmada en etkili yöntemlerden biridir. Tezde trenler için boşta gitme noktalarının optimize edilebilmesi için yeni geliştirilmiş bir yöntem sunulmaktadır.

Tezde önerilen yaklaşım; GA (Genetik Algoritma), YSA (Yapay Sinir Ağları), ve çok hatlı ve çok trenli sistem simulasyon yazılımının birlikte kullanımıyla gerçekleştirilmiş olan gerçekçi sistem modellemesini içermektedir. Simülasyon yazılımı, araçların regeneratif frenleme yapabilme ve düşük gerilimdeki performansını da modellemektedir.

Simülasyon yazılımı, YSA için eğitim ve test verilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu veriler, YSA’ların eğitiminde ve bu eğitilmiş YSA’lar ise değişik boşta gitme konumları için yolculuk süresi ve enerji tüketimini tahmin etmede kullanılmıştır. Optimizasyon kısmında hedef yolculuk süresi, hedef enerji tüketimi ve ağırlık faktörleri içeren bir uygunluk fonksiyonu sunulmuş ve YSA’lar bu uygunluk fonksiyonunu hesaplayan optimizasyon prosedürünün hızını arttırmada kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonunu minimize eden en optimum boşta gitme noktalarının belirlenmesinde GA araştırma yöntemi kullanılmıştır.

Gerek GA'nın, gerekse kullanılan uygunluk fonksiyonunun değişik parametreleri için optimizasyon çalışmalarının tekrar edilmesi işlemi mevcut literatürde bulunan yöntemlerle çok fazla zaman almaktadır. Tezde önerilen yöntemde eğitilmiş olan YSA'ların kullanılması ile parametre değişiklikleri için tekrarlanan optimizasyon çalışmalarında simülatörün kullanılmasına gerek kalmamakta, dolayısı ile yeni parametreler için optimizasyon sonuçları çok hızlı elde edilebilmektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, literatürde sunulmuş olan 2 istasyonlu bir hat için farklı güzergah konfigürasyonlarına ait testler gerçekleştirilmiş ve bu testlerden elde edilen verilerle YSA'lar eğitilmiştir. Daha sonra bu eğitilmiş olan ağlar oluşturulmuş olan bir uygunluk fonksiyonu çerçevesinde boşta gitme noktası Genetik Algoritma (GA) ile optimize edilmiştir.

Daha sonra çalışmalar sistematik olarak daha büyük ve gerçekçi sistemlere doğru genişletilmiştir. Önerilen yöntemle Aksaray – Havalimanı metro hattının yaklaşık yarı uzunluğu olan 9 istasyonlu kısmında trenlerin boşta gitme noktaları başarılı bir şekilde optimize edilebilmiştir.

Önerilen yöntem klasik GA+Simülatör yaklaşımına göre çok büyük oranda esneklik ve hız kazandırmaktadır. GA'nın simülatör yerine eğitilmiş YSA'ları çağırarak çalıştırılması farklı optimizasyon parametreleri ve hedef yolculuk süreleri için en uygun çözümün kolaylıkla bulunmasını sağlamaktadır.

ENERGY EFFICIENT DRIVING CONTROL IN MULTI TRAINS MULTI LINES RAIL SYSTEMS

SUMMARY

Mass rail transit systems will be spreading in all the metropolitan cities of Turkey in the coming years, due to ever increasing traffic congestions, environmental awareness, and economic reasons. One of the main operational expenditures of the mass rail transit systems is electricity energy cost.

Energy consumption of a rail transit system depends on many parameters. One of the most effective methods of reducing energy consumption in a rail transit system is optimizing the speed profile of the trains along the route. In this thesis, a new, efficient method is presented for optimization of the coasting points for trains along a route, in a global manner.

First parts of the thesis summarizes general characteristics of the power supply systems of a DC fed mass rail transit system. After giving previous studies on the energy efficiency in mass rail transit systems, a brief information on the simulation studies of a mass transit system is given. Then, İstanbul mass rail transit lines and their energy consumption levels are given. Different approaches in reducing energy consumption for realistic lines are also given in these chapters. These approaches include increasing the operational headway, increasing the maximum acceleration rate, reducing the train hotel power consumption, reducing the maximum speed limit along the route, and finally application of the coasting strategies.

Main body of the thesis deals with the proposed approach which includes realistic system modeling using multi-train, multi-line simulation software, and application of the artificial neural networks (ANN) and the genetic algorithms (GA). The simulation software used can model regenerative braking, and train performance at low voltages. The simulation software is used for creating training and test data for the ANN. These data are used for training of the ANN. The trained ANN are then used for estimating energy consumption and travel time for new sets of coasting points. Finally, the outputs of the ANN are optimized to find optimal train coasting points. The GA is used for direct search of the optimal solution. For this purpose, a fitness function with a target travel time, a target energy consumption and weighting factors is proposed. An interesting observation is that the use of the ANN increases the speed of optimization. Although, It takes very long times for finding optimal coasting points for different GA and fitness function parameters with conventional methods, such as using the GA directly with a simulator, sometimes for hours, it only takes minutes with the proposed approach.

At the first stage of the research, a classical 2 stations case which is available on the previous literature, examined for many different line alignments. At the last stage of the research, the proposed method is used for optimizing coasting points for minimum energy consumption for a given travel time of first 10 km section of İstanbul Aksaray-Airport metro line, where trains operate every 150 seconds on both directions. The section covers 9 passenger stations, which means 8 coasting points for each line. It has been demonstrated that an 16 input ANN can be trained with acceptable error margins for such a system.

1 GİRİŞ

Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC – www.uic.asso.fr) enerji tasarruf yöntemlerini araştırıp, değerlendirecek bir proje yürütmüş ve bu konuda Mart 2003 tarihinde bir rapor yayınlayarak, şu ana kadar uygulamaya geçirilmiş olan ve potansiyel fayda içeren çeşitli teknoloji ve yaklaşımları belirlemiştir [1].

Benzer şekilde, Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP – www.uitp.com) de üyeleri aracılığı ile şehiriçi raylı toplu ulaşım sistemlerinde enerji tüketimini azaltıcı tedbirler üzerine sürekli çalışmakta ve bu konuda özel toplantılar düzenlemektedir [2]. Konu, toplu ulaşım sistemlerinin sürdürülebilir gelişmeye katkısı yönünden de büyük önem arz etmektedir.

Gerek ana hat gerekse şehiriçi olsun tüm raylı sistemlerin çalışma ve besleme şartları genel olarak birbirine benzemektedir. Dolayısı ile bir sistemde yapılan uygulama diğlerinde de genel olarak ufak çaplı uyarlamalarla kullanılabilirler. Tez çalışmasında konu şehiriçi raylı toplu taşıma sistemleri açısından ele alınmaktadır.

1.1 Şehiriçi Raylı Ulaşımında Elektrifikasyon Sistemleri

1990'lardan itibaren tüm Dünyada ve Ülkemizde kullanımı giderek artış gösteren raylı toplu taşıma sistemlerinde kullanılan enerji iletim sistemleri ve gerilim seviyeleri çeşitlilik sergilemektedir.

İlk zamanlarda yere gömülü olarak denenen sistemler, montajı ve bakımının oldukça zahmetli ve masraflı olması, ve yük hayvanlarının elektriğe çarpılması sebebi ile kullanımdan kalkmış ve havai hattan besleme sistemine geçilmiştir. Yer altına gömülü sisteminin terk edilme sebeplerinden biri de sistemin kaçak akım artışına neden olması ve bu durumun özellikle yağışlı havalarda daha da kötüleşmesi idi. Günümüz teknolojisi ile bu sistemin daha güvenli bir benzeri APS ismi ile Fransa'da tekrar hayata geçirilmiştir.

Raylı sistemlerde kullanılan havai hat besleme sistemine bir telin/kablonun iki askı noktası arasında aldığı doğal zincir eğrisine verilen isme uygun olarak Katener sistemleri adı verilmiştir.

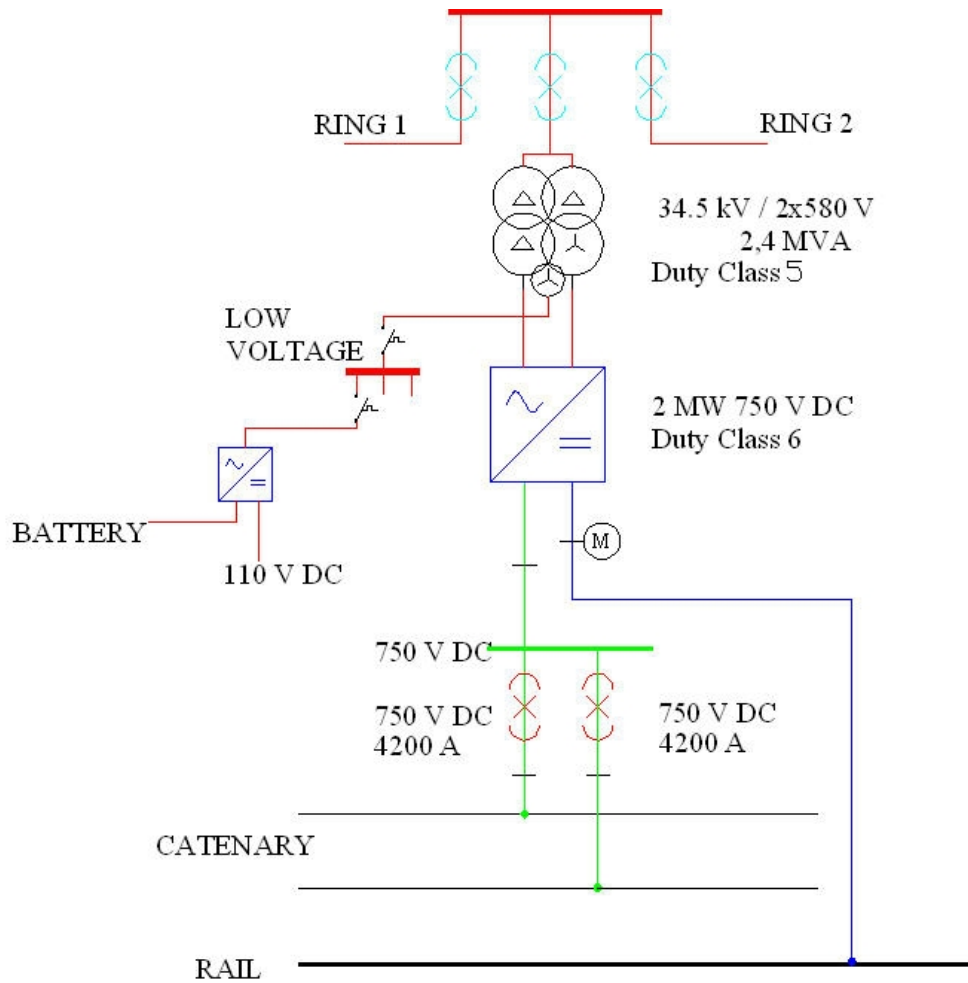
Sonraki yıllarda taşıyıcı hat raylarının yan tarafına yerleştirilen çelik raylardan enerji temini sağlanmıştır. Bu sistem 3. ray olarak anılmaktadır. Eski metro sistemlerin bir

çoğunda tercih edilmiş olan bu besleme sistemi ile tünel kesitleri normal katenerli sistemlere göre küçültülebilmektedir.

Tünellerde büyük kesitli Al veya Cu profilin veya çubuğun tavana asılması ile geliştirilen rijit katener sistemlerinin kullanımı ise giderek yaygınlaşmaktadır. Sağladığı avantajlar bu sistemin, özellikle hattın tamamının tünel içinde olduğu durumlarda 3. ray sistemine göre daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır.

1.1.1 Enerji Besleme Gerilim Seviyeleri

Aksaray – Havalimanı metro hattının Scada sisteminin bir trafo merkezine ait tek hat diagramı Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1: Aksaray – Havalimanı Metro Hattı Trafo Merkezi Tek Hat Diagramı

Şekil 1.1’den de görüleceği üzere bir DC beslemeli raylı sistemde OG seviyesindeki enerji girişi doğrultuculu trafo düzenekleri ile kullanılmakta olan gerilim seviyesine dönüştürülmektedir.

Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinde ilk zamanlar 600 VDC sistemi kullanılmıştır. Daha sonraları maliyetleri ve enerji kayıplarını azaltmak için farklı sistemler üzerinde çalışılmıştır. Avrupa Standartlarında [3] tanımlanmış olan elektrikli demiryolları besleme gerilim seviyeleri ve bunların işletmesel limitleri Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1: EN 50163'e göre Elektrikli Demiryollarında Gerilim Seviyeleri

Gerilim Seviyesi	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, 16.66 Hz	15000	12000	17250
25 kV AC, 50 Hz	25000	19000	27500

U_N = Nominal gerilim

U_{min1} = En küçük süreksiz gerilim

U_{max1} = En büyük sürekli gerilim

AC sistemler, genellikle, şehirlerarası ana hat işletmelerinde kullanılırken, hemen hemen dünyadaki bütün raylı toplu taşıma sistemleri DC sistemlerle beslenir. Toplu taşıma sistemlerinde kullanılan gerilim düzeyi 1500 VDC' ye kadar çıkmaktadır. Bazı ülkelerde, 1500 ve 3000 VDC sistemler de ana hat uygulamalarında kullanılabilmektedir. Gerçekte, 1990'ların sonlarına kadar tüm dünya çapındaki ana hat şebekesinin neredeyse yarısı DC besleme sistemleriyle beslenmekte idi. Fakat bu durum AC besleme sisteminin üstün gelen özellikleri sayesinde AC besleme sisteminin lehinde değişmiştir.

Şehir içi raylı ulaşım sistemlerinde son zamanlara kadar 750 VDC sistemi yoğun olarak kullanılmış ise de günümüzde artan yolculuk kapasiteleri dolayısı ile tren konfigürasyonlarında motorlu araçların sayısının artırılması, dolayısıyla güç talebinin artması nedeniyle yeni yapılan hatların birçoğunda 1500 VDC gerilim seviyesi seçilmektedir. Ülkemizde, Bursaray işletmesi bu gerilim seviyesini kullanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde İstanbul'da ihaleye çıkmakta olan yeni metro hatları da 1500 VDC olarak tasarlanmaktadır. Dünyada bazı hatlarda ise 600 VDC sistemi 1500 VDC ye dönüştürülmüştür. Bu gerilim seviyesinin avantajları sonraki bölümlerde verilecektir.

Özellikle yeni yapılacak hatlarda besleme gerilimi olarak 1500 VDC seçilmesi hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerinin azaltılması açısından önemlidir. Yapılmış olan bir çalışmada [4] aynı şartlar altında 1500 VDC besleme sisteminin cer gücü enerji maliyetinde 750 VDC sisteme göre % 10 azalma sağlayacağı belirlenmiştir.

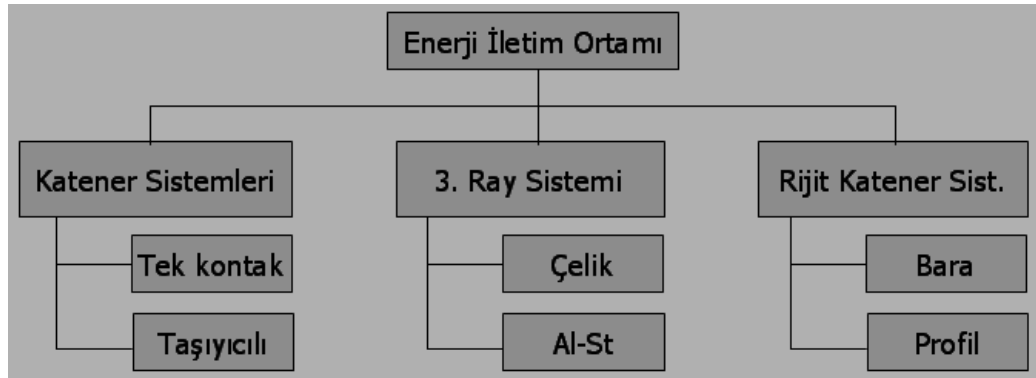
E.J. Goh ve arkadaşları tarafından kaleme alınmış olan makalede [5] Singapur'da 2003 yılında açılmış olan tam otomatik sürücüsüz ağır metro sisteminin yukarıda bahsedilen avantajlarından ötürü 1500 VDC sistemini kullandığı anlatılmaktadır.

İstanbul Ulaşım AŞ tarafından hazırlattırılmış olan detaylı bir inceleme raporunda [6] İstanbul'un Anadolu Yakasındaki hatlardan birinin verileri kullanılmış ve 2025 yılı işletme planına göre 1500 VDC sisteminin seçilmesi durumunda tasarruf sağlanacak enerji miktarının yıllık 12.5 milyon kWh olacağı görülmüştür.

1.1.2 Enerji İletim Sistemleri

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.

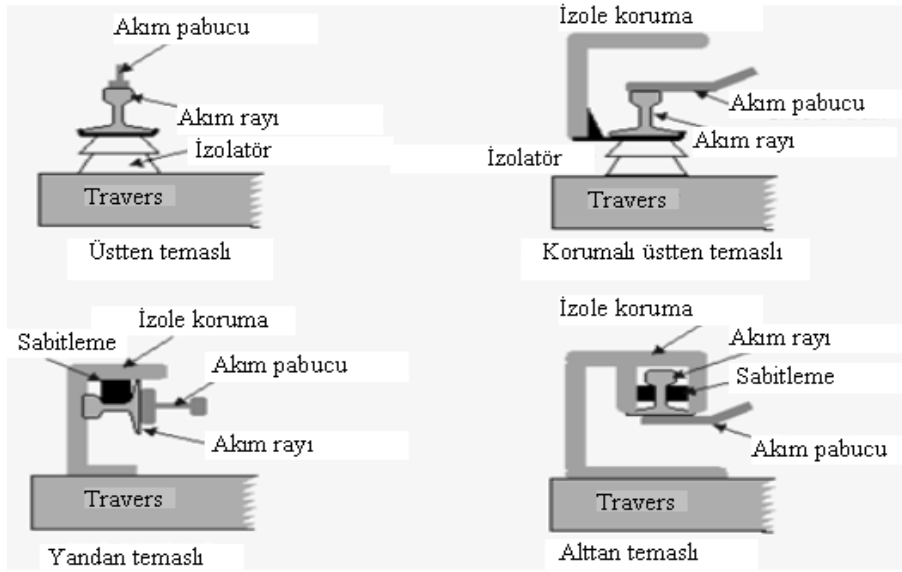
Şehir içi raylı toplu ulaşım hatlarında enerji iletim sistemi olarak Şekil 1.2'de verilmiş olan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar sistemin genel özelliklerine göre farklılık arz edebilmektedir: 3. ray, normal katener, rijit katener ve son yıllarda geliştirilmiş olan APS sistemleri. Bu sistemlerin özellikleri, avantajları ve dezavantajları aşağıda kısaca özetlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 1.2: Raylı Sistemlerde Enerji İletim Sistemleri

Üçüncü Ray Sistemi

Hat seviyesinde olan 3. ray sistemleri genel olarak metro hatlarında kullanılagelmiştir. Üçüncü ray sisteminde araçlar enerjiyi ray pabucu denilen ekipman ile almaktadır. Bu sistem, Şekil 1.3'de gösterildiği gibi pabucun temas şekline göre değişik konfigürasyonlarda olabilmektedir; alttan, üstten veya yandan temaslı sistemler.



Şekil 1.3: 3. Ray Sistemi, <http://www.railway-technical.com/etracp.html>

Yumuşak çelikten imal edilen 3. raylar ebatlarına bağlı olarak 20°C sıcaklıkta 13-22.5 mΩ/km gibi bir iç dirence sahiptir. Giderek kullanımı artmakta olan Al kompozit (Al-MgSi) üçüncü raylar ise çok daha düşük dirence sahiptir: 7 - 15 mΩ/km. Bu özelliği Al kompozit 3. rayın avantajıdır. 3. ray sisteminin bir diğer avantajı ise katener sistemlerine göre daha az bakım gerektirmesidir. Ayrıca, karayolundan izole hemzemin hatlarda kullanılması durumunda getireceği bir avantaj ise görüntü kirliliği oluşturmamasıdır.

Çalışanların ve yolcuların can güvenliğine getirdiği riskler 3. ray sisteminin en büyük dezavantajıdır. Bu sebeple, tüm hat boyunca ve özellikle yolcu istasyonlarında özel önlemler alınmasını gerektirir. Pham ve arkadaşları [7] çalışmalarında yolcu istasyonlarında “Acil Durum Enerji Kesme” sisteminin kurulmasının NFPA 130 (“Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems”), standardının 2000 versiyonunun gerekliliklerinden biri olduğunu vurgulamışlardır. Katenerli sistemlerde bu gibi sistemlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu gibi ekstra önlemler ve daha sık mesnet (3-4 metrede bir) konulması 3. ray sistemlerinin ilk inşaa maliyetlerini katener sistemlerine göre yukarıya çekmektedir.

3. ray sistemlerinin bir diğer dezavantajı ise işletme saatleri içinde hatta çalışma yapılmasını riskli hale sokmasıdır. Son olarak, günümüzde emniyet kuralları çerçevesinde 1200 VDC değerinin üzerindeki gerilim değerlerinde ve 100 km/h hızın üstünde işletme yapılan hatlarda 3. ray sistemi kullanılamamaktadır.

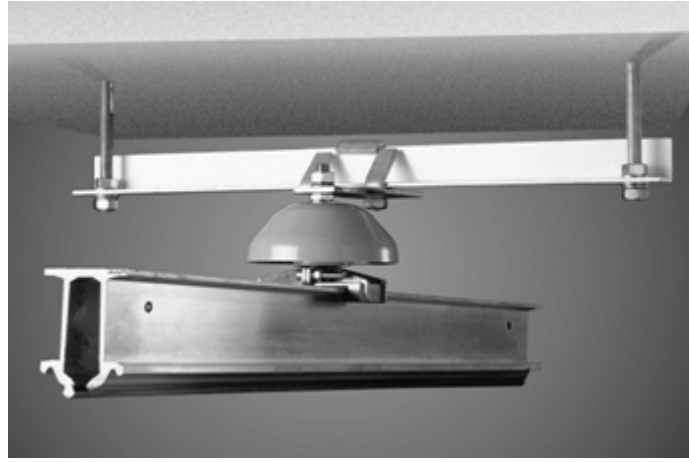
Üçüncü rayın bir türevi olan 3. ve 4. raylı sistemler bazı eski hatlarda kullanılmaktadır. 4. ray (-) dönüş akımını trafo merkezine iletmek için kullanılmaktadır. Bu sistem, özellikle, kaçak akımları tamamen izole eden bir

sistemdir. Ancak, monoray sistemler gibi lastik tekerlekli uygulamalar haricinde yeni inşaa edilen hatlarda artık kullanılmamaktadır

Rijit Katener Sistemi

Günümüzde tünellerde üçüncü raya alternatif olarak geliştirilen, hafif, üçüncü raya göre daha esnek, bakımı kolay ve yüksek iletkenliğe sahip rijit katener sistemleri kullanılmaktadır.

Bu sistemlerin normal katener sistemleri ile beraber aynı hat içinde kolaylıkla kullanılabilmeleri en büyük avantajlarından biridir. Piyasada değişik profilleri mevcut olmakla birlikte genel olarak Şekil 1.4’de verilmiş olan Al kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden müteşekkildir.



Şekil 1.4: Rijit Katener Sistemi

Sistem 20 yıldan daha fazla bir süredir kullanılmaktadır. Özellikle, Asya ülkelerinde oldukça yaygın olan sistemin kullanımı, Avrupa kıtasında da, özellikle İspanya’ da giderek artmaktadır. Sistemin avantajları aşağıda özetlenmiştir:

- Rijit katener sisteminin montajı için gerekli olan boşluğun az olması ile tasarım aşamasında daha küçük boyutta tünel planlanması sağlanır. Daha büyük gabarili araçlar için modifiye edilmesi planlanan mevcut tünel hatlarında da hattın alçaltılmasına gerek kalmaz. Böylece, inşaat maliyetlerinde önemli azalmalar elde edilir.
- Geleneksel katener sistemleri ile uyumludur.
- Kontak (Seyir) teli gergisizdir ve pantograf geçişi anında kontak telinde yükselme olmaz. Kontak telinde germe kuvveti bulunmadığı için Rijit katener sistemi halka açık ve istasyon alanlarındaki yüksek seviyeli emniyet standartlarına uyumludur.

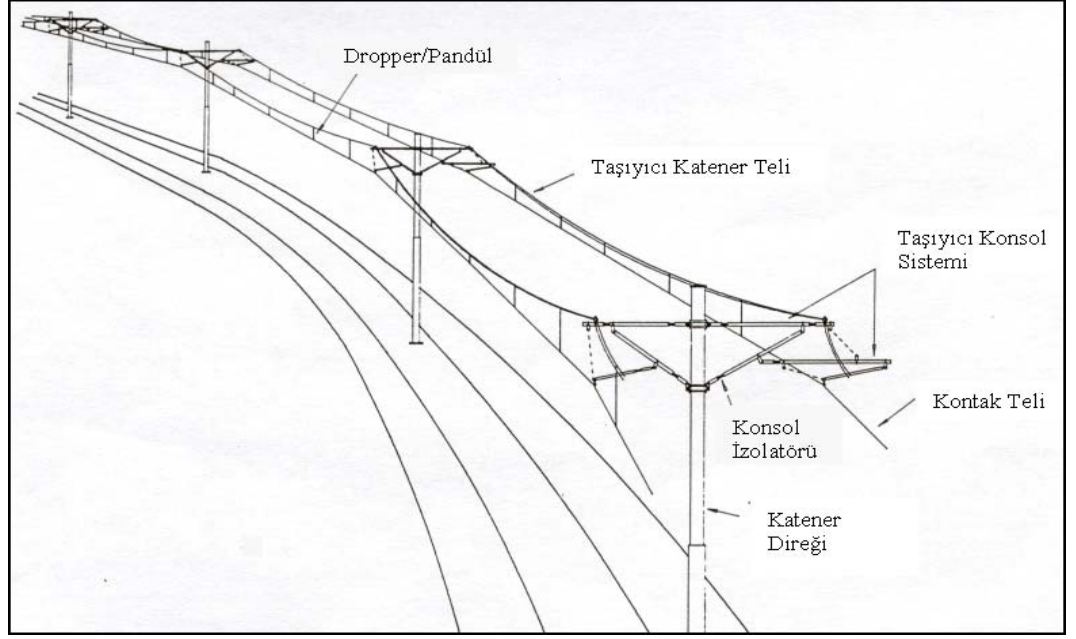
- Saatte 250 km hıza kadar kullanılabilir.
- Yüksek kısa devre dayanımı. Bir kısa devre sonucu kontak teli kısmen yanmış olsa dahi normal şekilde işletmeye devam etme seyir telinin gergisiz olması sebebi ile tehlike oluşturmaz.
- Rijit katener sistemi yüksek bakır eşdeğeri kesiti ile 40°C'de 3000 A'den büyük akımları sürekli taşıyabilir.
- Makas ve çapraz geçiş bölgeleri gibi kompleks hat bölgelerinde basit tasarıma sahiptir.
- Önceden bükülmüş iletken profiller/çubuklar ile 40 metrelik minimum kurp yarıçapları gerçekleştirilebilir.
- Rijit katener sisteminde kontak teli nominal kesit alanının %50'si aşınıncaya kadar kullanılabilir. Bu limit değer geleneksel katener sisteminde %33'dür.
- Kolay montaj ve düzenleme. Basit bir montaj aleti ile kolay ve sürekli kontak teli montajı sağlanmıştır.
- Tecrübeler tasarımın sağlamlığı sebebi ile sistemin neredeyse bakımsız olduğunu göstermiştir.
- Rijit katener sistemi araç bakım yollarında, konteynır terminallerinde, yükleme/boşaltma yollarında, açılabilir köprü geçişlerinde vb. yerlerde de kaldırılabilir katener sistemi olarak hizmet verebilir.

Normal Katener Sistemi

Normal katener sistemi, Şekil 1.5'den de görüleceği üzere zig-zaklı giden kontak teli ve akım ihtiyacına göre seçilen bir veya iki adet taşıyıcı katener telinden müteşekkildir. Bu iletkenlerin akım ihtiyacını karşılamadığı durumlarda ilave fider iletkeni çekilmektedir.

1500 V ve üzeri gerilimlerde katener sisteminin kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla ana hat demiryolu işletmeciliğindeki elektrikli hatlar katener sistemleri ile donatılmıştır.

Kullanılacak katener sisteminin konfigürasyonunu belirleyen başlıca faktörler; o hatta kullanılacak olan maksimum tren hızı, tren sıklığı, tren konfigürasyonu ve trafoların yerleşimidir.



Şekil 1.5: Bir Normal Katener Sisteminin Genel Görünüşü [8].

Taşıyıcı katener tellerinin akım taşıma dışındaki görevi kontak telini taşımaktır. Kontak teli dropper veya pandül denilen esnek, örgülü bakır iletken teller ile taşıyıcı katener tellerine asılmaktadır. İyi bir akım alma işlemi için kontak teli mümkün olduğunca homojen bir esneklik sağlamalıdır. Bu sebeple kontak teli belli bir ön-fleşle montaj edilir.

Pantografin kontak teline teması mümkün olduğunca esnek ve hat boyunca kesintisiz olmalıdır. Kontak teli pantografin itmesiyle esnekliği oranında yükselir. İki askı noktası arasındaki yükselme miktarı askı noktalarındakine göre daha fazladır. Bu durum doğrudan işletme hızını etkileyen faktördür. 120 km/h' ın üzerindeki işletme hızları için askı noktalarında daha hassas esnekliğe sahip bir tasarım gerekir.

Taşıyıcı katener telleri örgülü bakırdan, kontak teli ise katı, oluklu ve sert çekilmiş bakırdan üretilmektedir. Tellerin anma kesiti çoğunlukla 107, 120 mm² veya 150 mm² dir. Termal ve gergi kapasitesini artırma amacı ile Ag veya Mn katkılı kontak telleri de kullanılmaktadır.

Normal şartlarda, kontak teli 30 ile 40 yıl sorunsuz olarak çalışabilir. Çevresel koşullar, iklim şartları ve işletme şartları nedeniyle pantograf teması ile kontak telinde aşınma oluşur. UIC standartlarında kontak telinin nominal kesitinin %20'si aşındığı zaman değiştirilmesini tavsiye edilir. Ancak, çoğu işletmede bu işlem %40 oranında aşınma miktarına ulaşıldığı zaman gerçekleştirilir.

İşletme hızının düşük olduğu nostaljik veya cadde tramvaylarında, depo ve garaj sahalarında sabit gergili basit katener sistemi kullanılır. Bu sistemde, katener etapları doğrudan askı noktalarında sonlandırılır.

100 km/h' e kadar olan maksimum hızların yapıldığı tramvay, hafif metro (LRT) ve metro ana hat güzergahlarında otomatik gergili basit katener sistemi kullanılır. Her bir etap iki ucundan denge-ağırlık gergi düzeneği ile gerdirilir. Otomatik gergi sistemi iletken gerginliğinin hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmesini önler. Katener telleri ve kontak telleri birlikte gerdirilebileceği gibi ayrı ayrı da gerdirilebilirler. Sistem yüksekliğinin (askı noktalarında katener ve kontak telleri arasındaki mesafe) 1.4m ve daha fazla olduğu bazı sistemlerde de katener telleri sabit tutulurken kontak teli gerdirilebilir.

Katener iletkenleri direk ve konsol düzenekleri ile taşınır. Sistem yüksekliği bir metre olan katener sisteminde, taşıyıcı mesafesi (iki direk arasındaki mesafe) düz yolda maksimum 60 metredir. Kurplarda, bu mesafe, kurp yarıçapına bağlı olarak düşer.

Havai hat katener tesisleri belli bölümlerde besleme bölgelerine ayrılmalıdır. Enerji bakımından bir birinden ayrılmış katener bölgelerine seksiyonman bölge denir.

Enerjinin hat üzerinde bölgelere ayrılacağı noktalara bölge izolatörleri (Section Insulator, S/I) konulur. Bölge izolatörleri (S/I), paralel olarak çalışan, izolatörler ile izole edilmiş fosfor - bronz kızaklardan oluşur ve her iki yönde kesintisiz akım sağlarlar. Ekipman bölgesine denk gelen seksiyonman bölgeler hava aralıklı olarak da tesis edilebilir. Enerji bakımından birbirinden ayrılmış katener bölgeleri, gerektiğinde bir ayırıcı vasıtasıyla by – pass edilerek birleştirilebilirler.

APS (Otomatik Güç Kaynağı) Sistemi

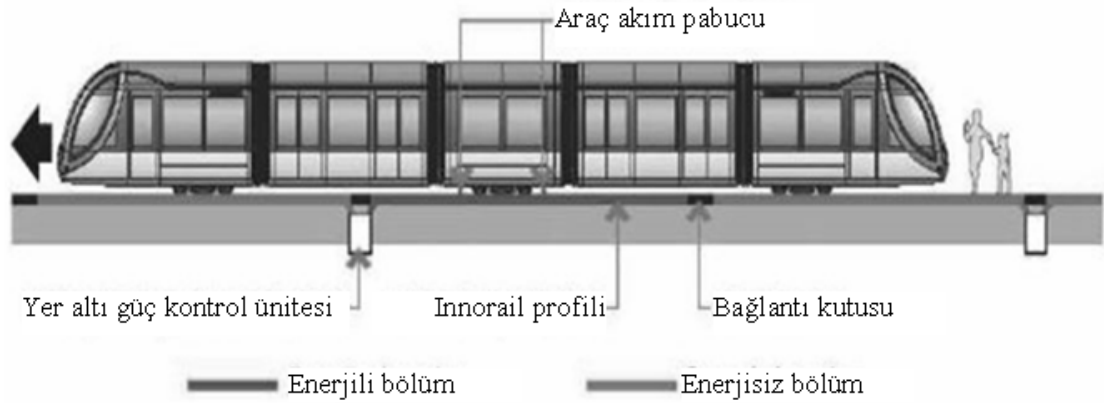
Tarihi şehir merkezlerindeki tramvay hatlarında görüntü kirliliğini ortadan kaldırmak için geliştirilen bir enerji besleme sistemidir. Innorail olarak da bilinen sisteme benzer enerji iletim ortamları 1890'lı yıllarda Amerika, İngiltere ve Fransa'da denenmiştir [9]. Ancak, montajı ve bakımı oldukça zahmetli ve masraflı olduğu ve de bazı durumlarda enerjinin kesilmeyerek canlılara zarar vermesi sebebi ile terk edilmiştir.

1990'ların sonunda sistem üzerinde yeniden çalışılarak yeni teknolojiler ile daha emniyetli hale sokulmuştur (Şekil 1.6). Fransa'nın Bordeaux kentinde toplam uzunluğu 25 km olan bir tramvay hattının 11.5 km'lik kısmında bu sistem Aralık 2003'de hizmete alınmış bulunmaktadır. Hat, 19 km daha uzatılmakta olup bu uzatmanın 5 km'sinin de Innorail Sistemi ile yapılması planlanmaktadır.

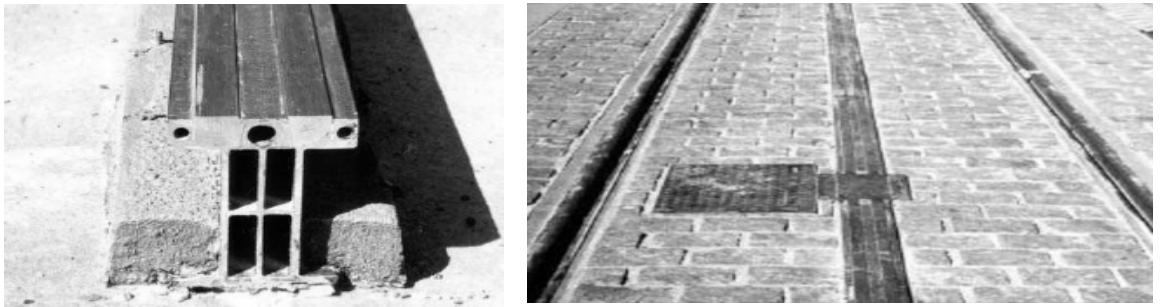


Şekil 1.6: Bordo Şehrinde Innorail Uygulaması [9].

Sistem, sadece üzerinde araç bulunan bölgeyi enerjilendirmektedir. Diğer bölgeler enerjisiz olarak kalmaktadır. İki ray arasında zemine monte edilen Innorail sisteminde 11 metre profilin 8 metresi iletken 3 metresi yalıtkan olup 2 profil bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 1.7 - Şekil 1.8).



Şekil 1.7: Innorail Sisteminin Besleme Şekli [9].



Şekil 1.8: Innorail Sistemine Ait Profil ve Hat Görünümü [9].

Sistemin çıkış noktası en büyük avantajıdır: Sıfır görüntü kirliliği oluşturmaktadır. Ancak, sistemin ilk montaj maliyetinin oldukça yüksek olması ve tek bir üretici tarafından sağlanması dezavantajdır. Ayrıca, mevcut hatlarda kullanılmak istenmesi durumunda araçlarda yapılacak ilave değişiklikler (akım alma pabucu, acil durum batarya üniteleri vs.) maliyeti arttırmaktadır.

1.2 Raylı Sistem Enerji Tüketimi

Bir raylı sistemin enerji tüketimi iki ana sınıfa ayrılabilir; yolcuları taşıyan trenlerin tahriki (cer gücü) ve yolcuların bekleme yaptığı istasyonlar ve buralara erişim sağlayan alanların enerji ihtiyacını sağlayan yardımcı sistemlerin beslenmesi. Sistemin kendi iç ihtiyaçları ve ofis/idari binaların ve bakım tesislerinin tüketimi de bu sınıfa dahildir.

Bu iki sınıfın enerji tüketim oranları sisteme göre değişkenlik arz eder. Tüm hattı ve istasyonları ile yeraltında olan metro sistemlerinde tüketilen enerjinin yaklaşık yarısı yardımcı güçlere gitmekte iken cadde tramvay sistemlerinde yardımcı güç tüketimi çok daha düşük değerlerdedir.

1.2.1 Yardımcı Servislerin Beslenmesi

Yukarıda değinildiği üzere, bu husus, özellikle metro sistemlerinde dikkatlice gözden geçirilmelidir. Sistemin yeraltında olması düşünülerek, emniyetten taviz verilmeden yapılabilecek olan bazı tasarruf sağlayıcı yöntemler aşağıda verilmiştir.

- İstasyon tasarımlarında mümkün mertebe güneş ışığından faydalanma.
- Aydınlatma sistemlerinin optimum şekilde sağlanması ve yüksek verimliliğe sahip elektronik balastlı lambaların kullanılması.
- Yürüyen merdivenlerde frekans sürücüleri uygulamaları.
- Yürüyen merdiven ve bantların yolcuya duyarlı hale getirilerek ihtiyaç olmayan zamanlarda çalışmasının önlenmesi.
- Ofis ve idari binaların ısı izolasyonunun sağlanması.
- Planlı bakım faaliyetleri.
- Etkin bir çevre kontrol sistemi.

1.2.2 Cer Gücü Beslemesi

Cer enerji tüketimini belirleyen başlıca faktörler şunlardır:

- Hattın geometrisi; eğimler, istasyonların sıklığı ve yerleri, kurplar, hız sınırlamaları vb. güzergaha bağlı kriterler.
- Araç özellikleri; kontrol lojiği, ağırlığı, yapısı, motor sistemi, araç içi yardımcı güç sistemleri vb. kriterler.
- Cer gücü besleme ve dağıtım sistemi; trafo merkezleri (TM) sayısı ve yerleri, katener/3. ray özellikleri, besleme düzeni, TM ekipman tipi vb. kriterler.
- İşletme mantığı; trenler arası süre (TAS), tren kompozisyonu, istasyon bekleme süreleri vb. kriterler.

Bu faktörlerden bazılarında yapılabilecek değişiklikler ile mevcut hatlardaki toplam enerji tüketimi azaltılabilecektir. Bu hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- Enerji kayıplarının azaltılması.
- Regeneratif enerjiden faydalanma oranını arttırmak.
- Enerji öncelikli (Energy-wise) sürüş yöntemlerinin araştırılarak uygulanması.

1.3 Raylı Sistemlerde Enerji Tüketimini Azaltma Yöntemleri

1.3.1 Enerji Kayıplarının Azaltılması

Raylı sistemlerde trafo merkezi ve iletim sistemlerinde kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıpları azaltmak için:

- Enerji besleme gerilim seviyesi olarak 750 VDC sistem yerine 1500 VDC sistem seçilebilir.
- Enerji iletim sistemi olan katener ve/veya 3. Ray sistemleri paralellenebilir.

Besleme Gerilim Seviyesi Olarak 1500 VDC Seçilmesi

İstanbul'un Anadolu yakasında yapılması planlanan Üsküdar - Ümraniye metro hattının cer gücü besleme sisteminin ön boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve bu hat'a ilişkin veriler ile yapılan çalışmada [4], besleme sisteminin 750 VDC yerine 1500 VDC seçilmesi durumunda elde edilecek tasarrufun %10 mertebelerinde olacağı belirlenmiştir.

Benzer şekilde, Kadıköy – Kartal metro hattına ilişkin veriler ile yapılan çalışmada da 2025 yılı işletme şartlarında yıllık tasarrufun 12.5 Milyon kWh olarak gerçekleşeceği bulunmuştur.

Katener Sistemlerinin Paralellenmesi

DC gerilim ile beslenen çift hatlı sistemlerde her iki yola ait katener sistemleri yalıtkan kablolar ile paralellenebilmektedir. Bu özelliikle, tramvay hattı gibi ağır katener sistemlerinin kullanılmasının çevresel dokuya uygun olmadığı durumlarda uygulanmaktadır. Görüntüsel avantajının yanı sıra paralelleme aynı zamanda enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Paralelleme kablolarının sıklığının enerji tüketimi üzerine etkisi araştırılmış ve sonuçları [10]'da sunulmuştur. Çalışmada, TM'ler arasında yapılacak 1 veya 2 adet paralelleme ile %2.5 civarında, paralelleme noktalarının artırılması ile %5'e kadar enerji tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir.

Paralellemenin başlıca avantajları:

- Enerji kayıplarını azaltır.
- Akım bölüşümünü arttırarak sistemin rahatlamasını sağlar.

Yapılmış olan çalışmadan [10] alınmış özet değerleri veren Tablo 1.2'den de görülmektedir ki sadece trafo merkezleri arasında, hat başında ve hat sonunda jumper yapılması (2000 m testi) durumunda dahi, toplam enerji tüketimi % 2.5 civarında azalmaktadır. Yoğun tren işletmeciliğinin yapıldığı sistemlerde yapılacak sık paralelleme ile enerji tüketimi % 5 seviyelerinde azaltılabilmektedir.

Tablo 1.2: TAS = 300 s. için Enerji Tüketim Değerleri

AÇIKLAMA	Jumperlar arası mesafe (m)					
	Normal	2000	1000	500	250	100
Toplam tüketilen enerji (kWh)	1916.7	1864.1	1862.8	1846.5	1838.8	1833.0
Jumpersız duruma göre tasarruf (%)		2.74	2.81	3.66	4.06	4.37
Araç*km başına enerji tüketimi (kWh)	3.46	3.37	3.37	3.34	3.32	3.31
Jumpersız duruma göre azalma (%)		2.60	2.60	3.47	4.05	4.34

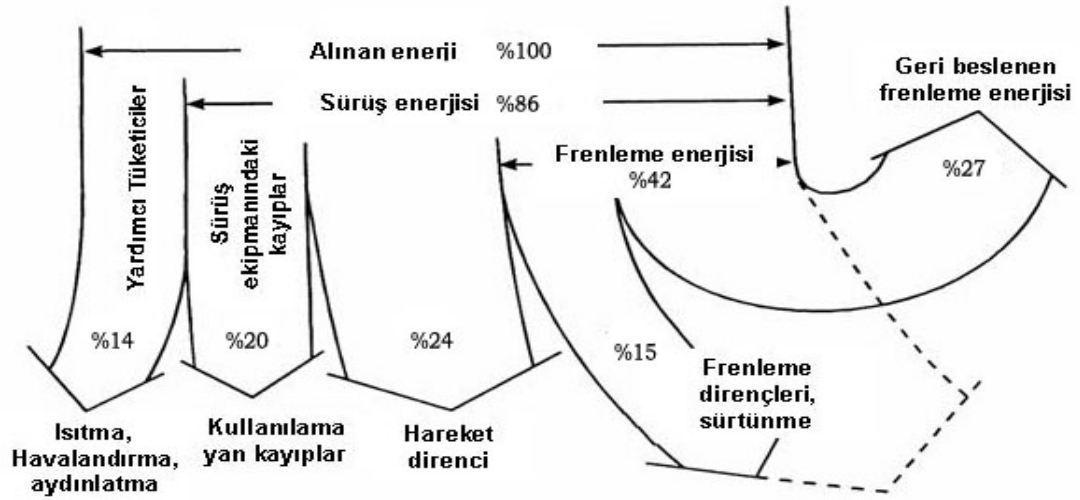
Benzer şekilde, hafif metro hatlarında, paralellemelerin trafo merkezleri arasında ve hat başlarında istenildiği zaman kaldırılacak şekilde motorlu ayırıcılar ile gerçekleştirilmesinin % 2 civarında bir tasarruf sağlayacağı gösterilmiştir.

1.3.2 Regeneratif Frenleme Enerjisinden Faydalanma Oranını Arttırma

Trafo merkezlerindeki ekipmanlar genel olarak kontrolsüz doğrultucu olup tek yönlü iletme izin verirler (Şekil 1.1). Bunun anlamı, trenlerin frenleme anında elektrik enerjisine dönüşen kinetik enerjilerinin ana şebekeye geri verilememesi demektir.

Bu açığa çıkan frenleme enerjisi hatta bulunan diğer trenler tarafından kullanılır veya frenleme dirençlerinde yakılarak harcanır.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, teorik olarak, hatta kullanılan toplam enerjinin tren işletme sıklığına bağlı olarak yaklaşık %40'ı frenleme enerjisinin geri kazanımından sağlanabilir. Trenlerin 3 dakika ve altında işletildiği hatlarda, frenleme esnasında üretilen enerjinin büyük kısmının diğer trenler tarafından kullanılmakta olduğu bildirilmektedir [11]. Sık tren işletilmeyen hatlarda, enerjinin büyük kısmı dirençlerde yakılmaktadır. Bu bağlamda enerji depolama teknolojileri aracılığı ile işletme maliyetlerine ilişkin önemli ölçüde enerji tasarrufu gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir [12]. Şekil 1.9'da bir tren için enerji dağılım diagramı verilmiştir.



Şekil 1.9: Frenleme Enerjisinin Kullanımı ve Diğer Enerji Tüketimleri [13].

Enerji depolamaya ilişkin ilk uygulama Londra metrosunda gerçekleştirilmiştir ve günümüzde de New York Far Rockaway hattında kinetik enerji depolama teknolojisi kullanılmaktadır. Tamamen statik süperkapasitör tabanlı enerji depolama sistemi olarak ise Almanya, Köln şehrinde bu teknoloji uygulanmıştır [14].

DC Sistemlerde Frenleme Enerjisinin Geri Kazanılması

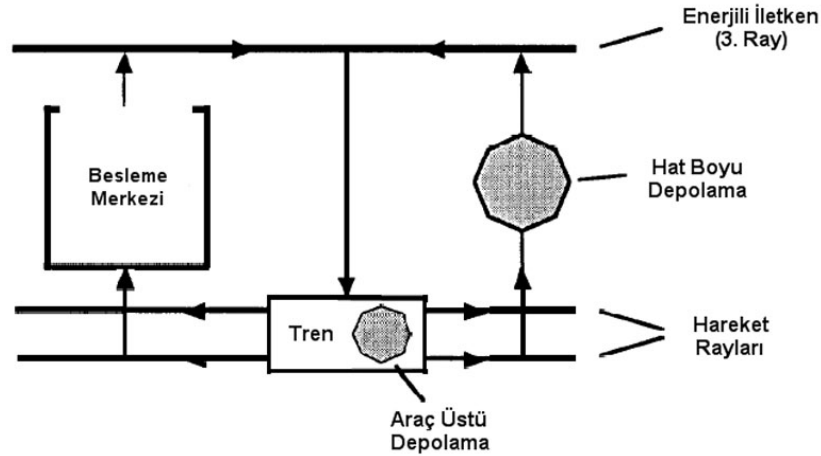
DC besleme sistemlerinde enerjinin geri kazanılması sadece uygun şartlar altında gerçekleştirilebilir. Tren bir hareket ve bir yükseklik kazandığı durumda, kinetik ve potansiyel enerji olarak enerji kazanır. Bu enerjinin büyük çoğunluğu, motorların frenleme durumunda generatör olarak çalışması nedeniyle elektrik enerjisine tekrar çevrilebilir. Üretilen elektrik enerjisi, katener sistemine geri besleme ile tekrar verilir. Bu olay regeneratif frenleme olarak bilinir ve raylı sistemlerde kullanılır [1].

Dinamik frenleme ile kazanılmış olan enerji değişik amaçlar için kullanılabilir:

- Trenin kendisinin kullanması (yardımcı servisler ve konfor amaçlı). Araç içi talepler genellikle sağlanan enerjiyi tüketebilmek için çok düşüktür.
- Yeteri kadar yakında bulunan diğer araçların kalkış anında kullanması amacıyla, enerji katener hattına geri beslenir.
- Eğer trafo merkezleri tristörlü evirici üniteler ile donatılmışsa, bunlar enerjiyi elektrik şebekesine geri verebilirler.

Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemleri, güç talebi düşükken depolama ile güç talebi fazla iken de deşarj olma yolu ile kullanıcıya bir esneklik sağlamaktadır. Enerji depolama elemanları Şekil 1.10'da da gösterildiği üzere araç üstü veya hat boyunda istasyon olarak uygun bir yere monte edilebilir.



Şekil 1.10: Enerji Depolama Lokasyonları [15].

Enerji depolama sistemleri enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve enerji verimliliği açısından sınıflandırılabilir. Ayrıca, diğer bazı faktörlerde bunların kullanışlı olup olmasını etkiler. Bu faktörler; çalışma dayanımı, maliyet, inşa boyutu, ağırlık, yük çevrimi kapasitesi ve güvenlidir [15]-[16].

1.3.3 Enerji Verimli Sürüş Yöntemleri

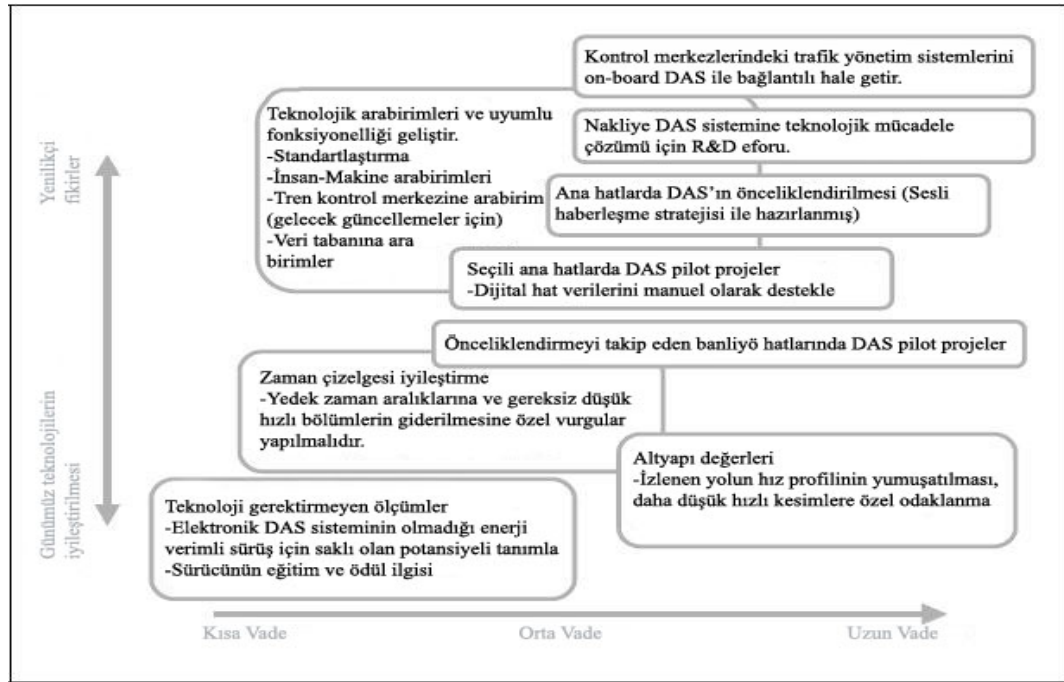
Son 15-20 yılda yazılmış ve yayınlanmış bir çok makalede bu konu farklı yollardan incelenmektedir. Coasting (ivmesiz, boşta gitme) kontrolünden başlayan yöntemler, otomatik tren işletimi olan sistemlerde senkronize tren işletimine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

Belirli bir donanım ve sefer güzergâhına sahip bir tren için enerji tüketim miktarı oldukça değişken değerler gösterebilmektedir. Aracın duruş sayısı ve bunu takip

eden ivmelenme hareketleri ve bunlarla birlikte aracın maksimum hızı trenin enerji talebinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Teorik bir bakış noktası ile enerji tüketimi açısından en verimli seyir, düşük hızda ve aradaki duruşların olmadığı bir seyirdir.

Zaman çizelgeleri genellikle hesaplanmış en düşük sefer süresine eklenmiş olan, tahmin edilemeyen gecikmelerin kapatılmasına imkân tanımak için belirli bir miktar “yedek zaman aralığını” kapsar. Yedek zaman aralıkları dakiklik bakımından da bir anahtar etkindir ve araştırmalar yolcuların çok büyük bir oranının dakikliğe seyahat süresi içindeki ufak bir indirgemeden daha fazla önem verdiğini göstermektedir.

Günümüzde, herhangi bir sürücünün yapabileceğinden daha fazla kesinlikte en iyi sürüş stratejisini hesaplayan ve sürekli olarak güncelleyen sürüş öneri sistemleri vardır. Güçlü benzetim programlarının gelişimi ile mobil haberleşme ağları ve ileri telematik çözümler, tren işletmesi ve tren kontrolünün bütün sistemi etkileyen iyileştirmeleri için çok büyük bir çözüm potansiyeli sunmaktadır. Şekil 1.11’de özet stratejiler uygulama süresine bağlı olarak gösterilmiştir [17].

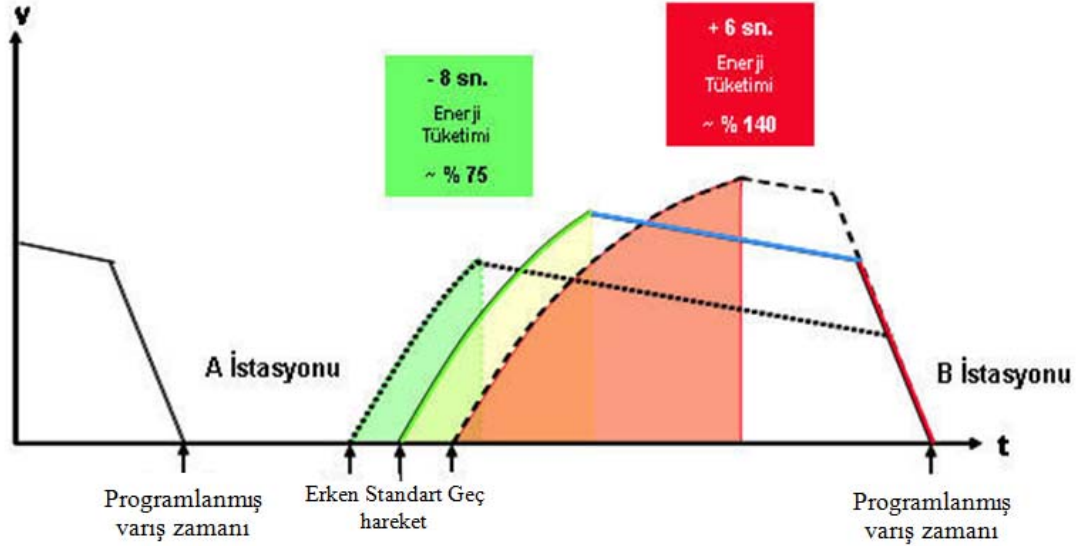


Şekil 1.11: Enerji Verimli Sürüş Stratejileri [17].

Bu yöntemlerde, zaman öncelikli sürüş yerine enerji tüketimini minimize edecek şekilde sürüş/kontrol teknikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. En basit şekli ile, tren maksimum hızda belli bir sürede gittikten sonra boşta çalışma rejimine alınmakta ve araç karşı kuvvetlerin etkisinde yavaşlamaya bırakılmaktadır. Maksimum hız limitlerinin, inşaat limitlerinin altına çekilmesi de önerilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemlerle elde edilecek enerji tasarrufunun en fazla %15 civarında olacağı belirtilmektedir.

Optimum Enerji Tasarrufu Hız Profili

Raylı sistem araçlarında sürüş teknikleri enerji tüketiminde önemli bir etkindir. Şekil 1.12'de istasyonda bekleme süresinden faydalanarak maksimum hızın indirgenmesinin enerji tüketimi üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 1.12: Erken veya Gecikmeli Kalkışların Enerji Tüketimine Etkisi [18].

Optimum enerji tasarrufu için hız profili aşağıdaki gibi olmalıdır.

- Yüksek başlangıç ivmesi,
- İstasyonlar arası mesafeyi, yolcu yoğunluğuna, zaman çizelgesine ve hat geometrisini göze alarak en uygun düşük boşa alma hızı,
- Uzun boşa gitme süresi,
- Yüksek frenleme ivmesi,
- Düşük bekleme süresi,

Eğer bu prensipler uygulanabilirse, sürücülerin sürüş durumlarına göre %20–30 oranında enerji tasarrufu sağlanabilir [13].

Manuel Sürüş Prosedürleri

Manüel sürüş yapılan işletmelerde eğitim yolu ile başlangıçta mümkün olduğunca yüksek ivme ile kalkış, zaman çizelgesine göre mümkün olduğunca uzun süre boşa gitme şeklinde, enerji tasarruflu sürüş teknikleri, makinistlere öğretilir.

Diğer bir yöntem ise hat boyunca, aracı boşa alma noktalarına uyarı tabelaları koymaktır. Bu durumda, makinist tabelaları izleyerek iki istasyon arasında değişik sürüş durumlarına göre treni sürmeye çalışır.

Daha karışık, fakat daha etkili olan bir teknik de değişken hız kontrolü kullanmaktır. Değişken bir hız kesme, istasyon sonlarında makinistin görebileceği bir noktaya merkezle haberleşip makiniste gideceği hızı gösteren bir dijital gösterge yerleştirilir. Makinist de kendine bildirilen hıza göre sürüşünü yapar. Değerlendirme çerçevesinde bütün sürücülere talimatları vermek ve buna göre eğitmek ile %10'luk bir enerji tüketimi kazancı olacağı öngörülmektedir [13].

Otomatik Sürüş Prosedürleri

Günümüzde birçok yeni hatta, trenler, sistem tarafından enerji verimli sürüş prensipleri göz önüne alınarak otomatik olarak sürülmektedir. Otomatik sürüşün avantajı, manüel sürüşte oluşan makinist ve işletme hatalarının izole edilmesidir. Tren üzerindeki frenleme ve tahrik kontrol ünitesi vasıtası ile trenin hızı, frenleme ve hızlanma ivmesi, boşta gitme süresi ve konforlu sürüş kontrol edilir.

Otomatik sürüşün diğer bir avantajı da trenlerin koordinatlarının ayarlanabilmesinden dolayı bir trenin frenleme yaparken diğer bir trenin aynı anda ivmelenmesi, ve üretilen enerjinin harcanması da sağlanabilir.

Sürüş tekniklerine ve otomatik sistemin özelliğine göre enerji tasarruflu sürüş durumunda %30'un üzerinde enerji tasarrufu sağlanabilir [13].

Taksim – 4 Levent arasında işletilmekte olan İstanbul Metrosu, normal işletme şartları altında otomatik olarak sistem tarafından sürülmektedir. ATO (Automatic Train Operation, Otomatik Tren İşletimi) sistemi ATC (Automatic Train Control, Otomatik Tren Kontrolü)'den gelen talimatlar doğrultusunda iki istasyon arasındaki en uygun maksimum hızı beş değişik opsiyon içinden seçerek kullanmakta ve bunun enerji tasarrufu sağladığı bildirilmektedir, ancak modern sistemlerde, maksimum hızı artırarak ve coasting (boşta gitme) moduna geçilmesinin daha fazla enerji tasarrufu sağlanabileceği bildirilmektedir.

1.4 Tren Sürüş /Kontrol ve Enerji Yönetim Stratejileri

Şehir içi raylı sistemler, sinyalizasyon sistemlerine göre işletilir ve kontrol edilirler. Genel olarak sinyalizasyon sistemleri ise sabit bloklu (SB) veya hareketli bloklu (HB) şekilde tasarlanırlar. Trenler, bu blokların meşguliyet (doluluk) durumuna göre hareket ederler.

1.4.1 Sabit ve Hareketli Blok Sinyalizasyon Sistemleri

Son zamanlarda, sinyalizasyonda haberleşme tabanlı sistemler yaygınlaşmaktadır. Haberleşme tabanlı sinyalizasyon sistemlerinin en önemli özelliklerinden birisi HB prensibine dayalı otomatik tren kontrolü (ATC) kullanılmasıdır. Bu özellik, SB'lu sistemlere göre hattın kapasitesini ve işletme esnekliğini arttırmaktadır.

HB'lu sistemde, SB'lu sisteme göre en büyük fark, hatboyu ve araç üstü ekipmanlar arasındaki emniyet ve kumanda bilgilerinin aktarımının telsiz tabanlı haberleşme ile gerçekleştirilmesidir. Konvansiyonel olan HB sistemlerde bu işlem hat boyunca bulunan endüktif kablo halkaları ile yapılmaktadır. Bu işlem 3. ray uygulaması olan yerlerde güçlük oluşturmakta ve bakım işlemlerini zorlaştırmaktadır.

HB'lu ATC'nin işletmesel avantajları her trenin kendi emniyet mesafesini dinamik olarak belirleyebilmesidir. Bu hesaplamayı mevcut hızını, yerini ve frenleme kapasitesini her an bilerek gerçekleştirir. Merkezi sistem her trene önündeki trenin bilgisini iletir. Böylece trenler kendi performanslarını bu bilgiye göre ayarlarlar. Bu sebeple, her zaman trenler arasında “değiştirilebilir hareketli bölüm” olarak tanımlanabilecek bir değişken blok bölümü korunmuş olur.

Gill tarafından kaleme alınmış olan bir makale [19], HB tren kontrolünün karakteristiklerini ve sınırlarını tanımlamayı, SB'a göre farklarını göstermeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, özellikle, Londra Metrosu, Jubilee hattı uzatmasında kullanılan sistem incelenmektedir.

1.4.2 HB Kontrol ve Koruma Prensibi

HB sistemlerde, trenler arasındaki mesafeyi onların emniyetli duruş mesafesi belirler. Burada farklı kabuller vardır. Geleneksel demiryollarında HB kavramı “tuğla duvar” kavramına dayanır: Öndeki trenin o andaki yerinde sabit durduğu, hareket edemeyeceği kabulü yapılır.

1.4.3 HB'lu Sistemin Performans Faydaları

SB sistemlerde, hat kapasitesi ilave blokların eklenmesi ile artırılabilir. Ancak, ilave edilen blokların faydası, ilave edilen blok sayısı ile azalır. Ekipman cevap süreleri gibi hususlar, kapasite artışını belli bir noktadan olumsuz etkiler.

SB sistemlerde, en büyük hat kapasitesi maksimum tasarım hızında elde edilir. Daha düşük hızlarda işletme sunulan kapasiteyi azaltır. HB sistemde ise tüm hızlar tasarım hızıdır. İşletmede tren çalıştırma sıklığını belirleyen en büyük etken, hat sonu geri dönüşleri ve yolcuların boşaltılıp bindirildiği platform sayısıdır.

Faklı araçların çalıştırılması durumunda, SB sistem en kötü frenleme karakteristiğine sahip trenlere göre tasarlanmalıdır. HB sistemlerde bu bir sorun teşkil etmez.

SB sistemlerde hız sınırlama bilgileri kesintili olarak (ray devrelerinin bulunduğu yerlerde) verilirken, HB sistemlerde, bu bilgi sürekli olarak güncellenmektedir. Bu sebeble, yolculuk süresi kısaltmakta ve daha az trenle daha sık sefer yapılabilir.

Boşta gitme (coasting) kontrolü: Metro trenleri genellikle maksimum hız ile gitme (tam gaz modu) durumuna göre yolculuk süresini %10 uzatacak kadar boşta gitme şartında giderler. Burada amaç, enerji tasarrufu ve olabilecek bir aksaklıkta kullanılacak zaman elde etmektir. SB sistemde, bu durum hattın maksimum kapasitesini düşürken HB sistemde tersi bir etki yapar: Boşta giden trenler, daha kısa emniyet mesafelerine ihtiyaç duyarlar. Dolayısı ile HB sistemde doruk saatlerde dahi boşta gitme uygulanabilir.

1.4.4 HB Sinyalizasyon Sisteminde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

HB sinyalizasyon sisteminde trenler arasında, frenleme mesafesine ilave olarak emniyet mesafesi kadar daha bir mesafe vardır. Trenler ve sinyalizasyon sistemine ait hat boyu ekipman arasında çift yönlü haberleşme vardır ve trenlerin yerleri hassas olarak bilinebilir. Haberleşme tam olarak sürekli olmasa da, tarama frekansının yüksekliği ile neredeyse sürekli şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Haberleşme, iletken halkalar ile gerçekleştirilir ve halkaların uzunluğu, tren yerinin belirlenme hassasiyetini belirler.

Yukarıda anlatılan çalışma prensibi gereği bir sorun oluşması durumunda trenler, emniyet mesafesini gözeterek birbiri ardına dizilirler. Sorun giderilince tüm trenler aynı anda kalkışa geçmeye çalışırlar. Bu gibi trenlerin yığılması durumunda oluşacak olumsuz etkiler düşünülerek TM sayısı artırılır. İlk maliyet artar ve TM'ler normal şartlar altında düşük kapasite ile çalıştırılırlar. Wong ve Ho bir uzman sistem yardımı ile kalkış gecikmesi ve ivme azaltımı olarak verilen iki uygulamayı incelemişlerdir. Yapılan denemelerde ikinci yöntemin (ivme azaltımı) daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Trenlere kuyruktaki yerlerine göre, değişik (giderek azalan) ivme değerlerinin verilmesi gerekmektedir. Her iki yöntemin birlikte kullanılması ise enerji tasarrufu için en uygundur [20].

1.5 Tren Kontrolü ile Enerji Yönetimi

Gordon ve Lehrer, koordine tren kontrolü ve enerji yönetimini amaçlayan bir sinyalizasyon değişikliği çalışması yapmışlar ve kontrol algoritmaları olarak,

- tepe güç isteminin azaltımı,
- boşta gitme kontrolü,
- bir arıza durumundan hızla ve sorunsuz bir şekilde tekrar harekete geçme,
- enerji tasarrufu gözetilerek tren hareketlerinin koordine edilmesi,

üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada 5 ana strateji belirlenerek, teker teker ele alınmıştır. Bu stratejiler güç kalitesi ve servis kalitesi ile alakalı olanlar biçiminde iki gruba ayrılmıştır. Bunlar,

- Güç ile ilgili olanlar: Cer gücü sisteminin ilk maliyetinin (düşük gerilim oluşturan durumlardan kaçınma) ve enerji tüketiminin azaltımı,
- Servisle alakalı olanlar: İşletme dakikliğinin artırılması (gecikmelerin azaltımı), Yolculuk konforunun artırılması ve yolculuk süresinin azaltımı,

olarak verilebilir.

Servisle ilgili durumlar genelde güç tüketimi (enerji tüketimi) gibi hususları da içermektedir [21].

1.5.1 Düşük Gerilimden Kaçınma

Bu algoritmanın amacı birden çok trenin hareketini kontrol ederek, aşırı gerilim azalmasının önüne geçmektir. BART (Bay Area Rapid Transit) sisteminin cer gücü sistemi bir TM'nin tamamen devre dışı kalması durumunda bile doruk saat işletmesine devam edebilmektedir. Trenlerin düşük gerilim durumunda güç talebini azaltımı ile milyonlarca dolarlık yatırımdan kurtulunabilir. Bu uygulama günümüz modern araçlarındaki kontrol sistemleri ile gerçekleştirilmektedir.

1.5.2 Yığılma Durumunun Yönetimi

İki tren birbirine çok yakın olarak durduklarında ve daha sonra ikisi de aynı anda kalktıkları zaman arkadaki tren emniyet mesafesini koruma amacı ile sık sık fren-ivme yapma durumunda kalmaktadır. Bu gereksiz fren-ivme çevriminin ortadan kaldırılması ile yolculuk konforu arttırılmakta ve enerji tüketimi azaltılabilmektedir. Aynı anda ivme vermeme şeklindeki bir kontrol ile bu durum rahatlatılabilir.

1.5.3 Koordineli Duruş ve Kalkış

Duruş ve kalkış zamanlarının koordinasyonu ile enerji tüketimi aşağıya çekilebilir. Bu iki şekilde gerçekleştirilebilir:

- Trenlerin yolcu istasyonlarından kalkış ve duruş zamanlarının denk getirilmesi
- Yokuş tırmanan ve inen trenlerin koordinasyonu

İlk yöntemde istasyonda bekleyen tren bir süre daha bekletilerek geç kalkması sağlanır, yada istasyona yaklaşmakta olan tren daha erken frenlemeye geçirilerek frenleme enerjisinin kalkmakta olan tren tarafından kullanılması temin edilir. Benzer şekilde yokuş inen ve çıkan trenler koordine edilebilir [21].

1.6 Boşta Gitme Kontrolü ile Enerji Tasarrufu Çalışmaları

Tam gaz işletmede süre en kısa, ancak enerji tüketimi en fazladır. Trenler, her bölgede kendisine tanınmış olan en yüksek hızda seyahat ederler. Doruk saatlerde ve tarifieden sapılma durumunda zaman önemlidir. Dolayısı ile doruk saatlerde trenler tam gaz işletme yöntemi ile sürülürler.

Boşta gitmeden kasıt trenin belli bir hızın üstüne çıktığında motorların boşa alınarak trenin kazandığı kinetik enerji ile hareketine devam etmesidir. Doruk saatler haricindeki zamanlarda yolculuk süresinin bir miktar uzamasına karşın enerjide sağladığı tasarruf sebebi ile boşta gitme gerçekleştirilebilir. Boşta gitme yönteminin uygulandığı bir çok metro hattında nominal işletme durumunda boşta gitme belli ve sabit noktalarda başlamaktadır.

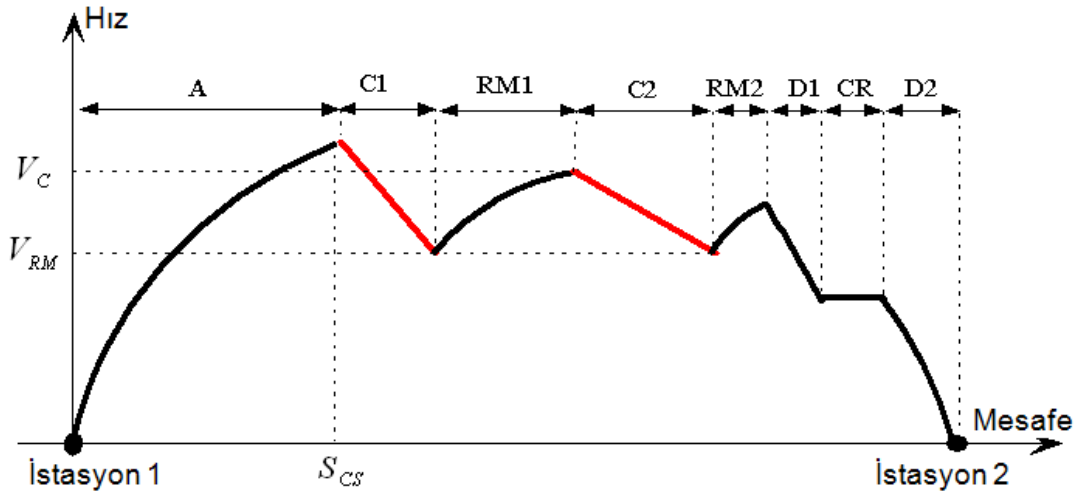
Kullanılan başka bir enerji tüketimini azaltıcı yöntem ise azaltılmış maksimum hız yöntemidir. Bu yöntemde doruk saatler haricinde trenlerin maksimum hızları belli değerlerde düşürülerek ivmelenme süreleri kısaltılmakta ve sabit hızda seyir süreleri uzatılmakta, dolayısı ile daha düşük enerji tüketimi gerçekleştirilmektedir.

Tren servis düzenleme yöntemi olarak istasyonlarda bekleme süresinin ayarlanması en yaygın olanıdır. İstasyonlardaki bekleme süresi ayarlaması, tren işletme düzenlemesi için uygulanabilir. Ancak, bu yöntemin işletme kalitesine olan olumsuz etkisi sebebi ile belli sınırlar aşılamaz. Yolcular, istasyonlarda beklemektense tren içinde, daha uzun yolculuk yapmayı yeğlemektedirler.

Trenler arası süre (TAS) (Headway Time - HT) düzenlemesi boşta gitme kontrolü ile de sağlanabilir. Bu yolla, enerji tasarrufu sağlandığı gibi, frenleme ekipmanlarının bakım maliyetlerinin de düşmesi sağlanır.

Chang ve Sim, ATO sistemine entegre bir boşta gitme kontrolü ile tren hareketlerinin optimizasyonunu genetik algoritma kullanarak yapmayı öneren bir makale hazırlamışlardır [22]. Makalede, bulanık mantık (Predictive Fuzzy Control - PFC)'a dayanan önceki çalışmaların yeterli derecede test edilmediği ve vaka anlatımlarının mevcut olmadığını bildirmekte olup kendi yöntemlerinin ise PFC'ye göre daha hızlı ve kararlı olduğunu belirtmektedirler.

Şekil 1.13' de boşta gitme yöntemine ait bir Hız – Mesafe grafiği verilmiştir. Tren A bölgesinde hız kazanmak için ivmelenir. Genel olarak boşta gitmeye başlamak için belli hıza (V_C) erişme şartı bulunmaktadır. Bu hıza erişilince tren boşta gitmeye başlayabilir (C1 ve C2 bölgeleri). Ancak, bazen trenin istenilenden uzun zaman kaybını önlemek için belli bir mesafeye erişmeden (S_{CS}) boşta gitmeye başlamasına izin verilmez. Tren boşta giderken belli bir hızın (V_{RM}) altına düşülmesi durumunda tekrar ivme verilmesi istenir (RM1 ve RM2 bölgeleri). D1 bölgesinde tren hız sınırı için frenlemekte, CR bölgesinde tanımlanmış olan hız sınırında sabit gitmekte ve son olarak D2 bölgesinde de istasyonda durmak için frenlemektedir.



Şekil 1.13: Boşta Gitme Durumuna ait Hız – Yer Grafiği

Bir trenin iki istasyon arasındaki yolculuğunda ivmelenme, izin verilen maksimum hızda sabit gitme, boşta gitme ve frenleme durumları bulunur. Kısa istasyon açıklıklarında sabit hızda gitme modu bulunmayabilir. Tren ivmelendikten sonra hemen boşta gitmeye geçebilir. Boşta gitme başlangıç noktası hız profilini etkiler. Bunun sonucunda da farklı boşta gitmeye başlama noktaları için farklı yolculuk süreleri ve enerji tüketimleri oluşur.

Teorik olarak istasyonlar arası her nokta boşta gitme başlangıç noktası için bir çözümdür. Mesafe sonlu parçalara ayrılrsa bile çözüm kümesi araştırma yöntemleri için oldukça büyük olacaktır. Çözüm uzayının bir kısmı baştan problem dışı

bırakılarak daha uygun hale getirilebilir. Örneğin çok düşük hızlarda boşta gitmeye başlama ileride tekrar motor modunu gerektirir. Bu, enerji kaybını arttıracak ve ekipman ömrünü azaltacak için pek istenmez. Dolayısı ile daha önceden saptanan bir V_C den daha düşük hızda boşta gitmenin başlaması yasaklanır.

Aynı şekilde frenleme bölgesine giren yerlerde de boşta gitme başlangıç noktası (S_{CS}) olamaz, yoksa tren istasyonu kaçırmaya veya acil fren moduna geçebilir. Yolculuk konforunu düşüren bu uygulama yapılamaz.

Yolculuk süreleri her zamna belli miktarlarda ilave süreler içermektedirler. Bu ilave süreler, doruk saatlerde yolculardan kaynaklı küçük gecikmeleri kapatmakta kullanılmakta iken, doruk saatler haricinde boşta gitme veya azaltılmış maksimum hız yöntemi kullanılarak enerji tüketimini azaltıcı amaçlı kullanılmaktadırlar.

İlave sürenin birden çok istasyon durumunda, uygun şekilde dağıtılması ile enerji tüketimi daha da azaltılabilir. Daha sonraki bölümlerde detaylandırılacağı üzere (+) eğim içeren bölgelerde gerçekleştirilen boşta gitme yöntemi büyük süre artışına yol açarken sağladığı enerji tasarrufu çok az kalmaktadır. (-) eğim olması durumunda ise tam tersi bir sonuç elde edilmektedir; kısa süre artışlarına karşın büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Boşta gitme noktalarının tek tek istasyonlar arası gerçekleştirilmesi yerine tüm hat boyunca birden fazla istasyon aralığında, mümkünse tüm hat için, gerçekleştirilmesi ile tanımlanmış olan ilave sürenin en uygun dağılımı, dolayısı her iki yöndeki hatlardaki tüm istasyonlar arası için en uygun boşta gitme noktaları bulunabilir.

Elde edilen sonuçların gerçek sistemlerdeki değerlerle uyumlu olabilmesi için tek araç durumu değil de çoklu araç durumunun incelenmesi gereklidir. Böylece, trenlerin frenlerken ürettikleri regeneratif frenleme enerjileri de dikkate alınabilecektir.

Yukarıda anlatılan; çok hatlı çok araçlı sistem durumu için tanımlanmış bir hedef süre civarında, enerji tüketimini en çok azaltacak en uygun boşta gitme noktalarının bulunmasını analitik yöntemlerle gerçekleştirmek nerede ise imkansızdır. Bunun sebepleri aşağıdaki bölümde önceki literatür çalışmaları ile anlatılmaktadır.

Sezgisel Yöntemin (Genetik Algoritma) Kullanım Nedenleri

İstasyonlar arası boşta gitme noktasının tespiti birbirine bağlı, lineer olmayan bir çok değişken sebebi ile kolay değildir. Tren hareketi bir çok parametreye bağlı olup, bunların tamamını dikkate alan bir optimizasyon tekniği, tamamen imkansız olmasa da, hiç pratik değildir. Bunların yanısıra, insan faktörü, ekipman tepki süreleri gibi

hususlar problemi daha da karmaşık yaparlar. Bu sebeplerle, gerçek zamanlı işletme şartlarında boşta gitme noktalarının tespiti için sezgisel (heuristic) yöntemlerin kullanılması zorunluluk olarak görülmektedir.

Wong ve Ho 3 adet klasik ve 1 adet sezgisel yöntem ile boşta gitmeye başlama noktalarının araştırmasını yapmışlardır. Çalışmada, direkt ve endirekt olmak üzere iki ana yaklaşım kullanılmıştır. Direkt (nümerik veya klasik) yaklaşımlarda boşta gitme noktalarına ilişkin çözüm adım adım elde edilmektedir. Dichotomous, Altın Bölüm, Fibonacci araştırmaları ve Simplex yöntemi direkt araştırmanın örnekleridir.

Endirekt (analitik) araştırma yönteminde gerekli boşta gitme noktası test veya tahmin yürütülmeden hesaplama yolu ile elde edilmeye çalışılır. Optimizasyonda kullanılan uygunluk fonksiyonunun değişik parametrelere göre kısmi türevleri ile, optimum boşta gitme noktası tespit edilmeye çalışılır. Eğim (Gradient) yöntemi buna örnek verilebilir. Benzetilmiş kristalleştirme (Simulated annealing), GA, tabu araştırma, benzetilmiş evrim (simulated evolution) en tanınmış sezgisel yöntemler arasında sayılabilir. Bu yöntemlerde, bazı tanımlı kurallar ve klavuzlar kullanılarak, deneme yanılma ve hatanın azaltılması prensibine dayanılarak çözüm bulunmasına çalışılır.

Klasik ve sezgisel yöntemler arasındaki ana fark birincisinde matematiksel modelin bulunmasının zorunluluğudur. Klasik yöntemler her zaman en iyi çözümleri üretirken sezgisel yöntemler tanımlanmış olan kısıtlamalar altında iyi (en iyi olmak zorunda değil) çözümleri bulur. Her iki yöntemin ortak noktası her ikisinin de iteratif yapıda olmasıdır.

Yazarların klasik ve sezgisel yöntemlerle yapmış olduğu çalışmalarda hat geometrisinin inişli çıkışlı olmasının işleri zorlaştırdığı görülmüştür. Özellikle yokuş yukarı gidiş olan yerler, inişlere göre daha zorlu bir problem oluşturmaktadır. Tek boşta gitme noktası olması durumunda süre ve enerji tüketimi arasındaki dengenin optimizasyonu daha kolay sağlanabilirken, güzergahta hız sınırı ve çok iniş çıkış olması optimizasyonu doğal olarak güçleştirmektedir.

İki istasyon arasında, en uygun, tek noktada boşta gitme durumunun bulunması için klasik araştırma yöntemleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Eğim yöntemi en hızlı sonuç üretmekle birlikte, fazla iniş – çıkış olan güzergahlarda iyi sonuç verememektedir. Altın Bölüm ve Fibonacci yöntemleri eğim yöntemi kadar hızlı olmasalar da pratik uygulamalar için daha uygun bulunmuşlardır. İkiye bölmeye dayalı bu iki yöntem metro gibi nispeten kısa istasyon mesafelerinde en hızlı sonucu vermektedirler.

Yolcu istasyonları arasındaki mesafenin kısa olması durumunda, birden fazla noktada boşta gitme durumuna ait araştırmalar tek bir yerde boşta gitmenin en uygun olacağını göstermiştir [23].

Wong ve Ho en uygun boşta gitme noktalarının belirlenmesine yönelik yaptıkları çalışmalarında genetik algoritma konusunu detaylı olarak ele almıştır. Yazarların yazdığı makalelerde [20], [23]-[25], GA uygulamalarının 6 aşamalı olduğu belirtilmiştir: Tekrar üretme, çaprazlama, mutasyon, gen tekrarı, gen silme ve kromozom içinde genlerin tekrar dizilmesi. Bir GA'nın işleyiş şekli aşağıda anlatılmaya çalışılmıştır.

- Olası çözümlerin kod sistemi – kromozom yapısı oluşturulur,
- Çözümler için başlangıç popülasyonu ve sınır koşulları atanır,
- Çözümün uygunluğunu değerlendirecek bir uygunluk fonksiyonu ile önerilen çözümün iyiliği test edilir,
- Yeni çözümleri üretecek çözüm seçme metodları ile mevcutlar bireylerden yeni çözümler (nesil) üretecek operandlar kullanılarak nesil bir nesil oluşturulur.

Birbirini izleyen nesillerde çözümlerin uygunluğunun artmasını sağlamak için iki temel adım mevcuttur: İlk adım nesil içindeki hangi bireylerin yeni nesili üretme için uygun olduğuna karar verme ve ikinci adım ise daha iyi nesil için en kötü uygunluk değerine sahip bireylerin yok olmasına izin vermedir. Mutasyon, çaprazlama ve diğer evrimsel gelişim yöntemleri ile doğal seleksiyon sağlanarak daha iyi uygunluğa sahip bireylerin üretimi mümkün olabilmektedir [26] - [27].

GA ile yapılan optimizasyonlarda kullanılan uygunluk fonksiyonu ve bu fonksiyona ilişkin parametrelerin değerleri sonuçları direkt olarak etkilemektedir. Genetik algoritmaları kullanarak optimum boşta gitme noktalarının tespitine ilişkin yayınlanmış olan en son makalelerden [28] birinde Bocharnikov ve arkadaşları optimizasyonu hızlanma ve frenleme ivmelerinin dengesini dikkate alan bir uygunluk fonksiyonu kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

GA'nın ve GA'da kullanılan uygunluk fonksiyonunun farklı parametreleri için optimizasyonların tekrar edilmesi gereklidir. Tezde önerilen yöntemde eğitilmiş YSA'ların simülatör yerine kullanılması sebebi ile bu işlem çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

2 TREN PERFORMANS ve GÜÇ BESLEME SİSTEMİ BOYUTLANDIRMA ANALİZİ

Yeni bir hat tasarlanırken sistemdeki trenlerin ortalama hızı, parkur süresi ve sistemden çekilecek güç gibi değerlerin bilinmesi gerekmektedir. Aynı şekilde mevcut bir hatta işletme şartlarında yapılması planlanan yeni araç alımı, işletme sıklığının artırılması, boşta gitme stratejisinin kullanılması gibi büyük değişiklikler; sistemin ticari hızını, parkur süresini, ve sistemden çekilecek güç gibi değerleri etkileyecektir. Bu parametrelerin elde edilmesinde veya tecrübe ile elde edilmiş sonuçların doğrulanması için bilgisayar programlarına yani simülatörlere, ihtiyaç vardır.

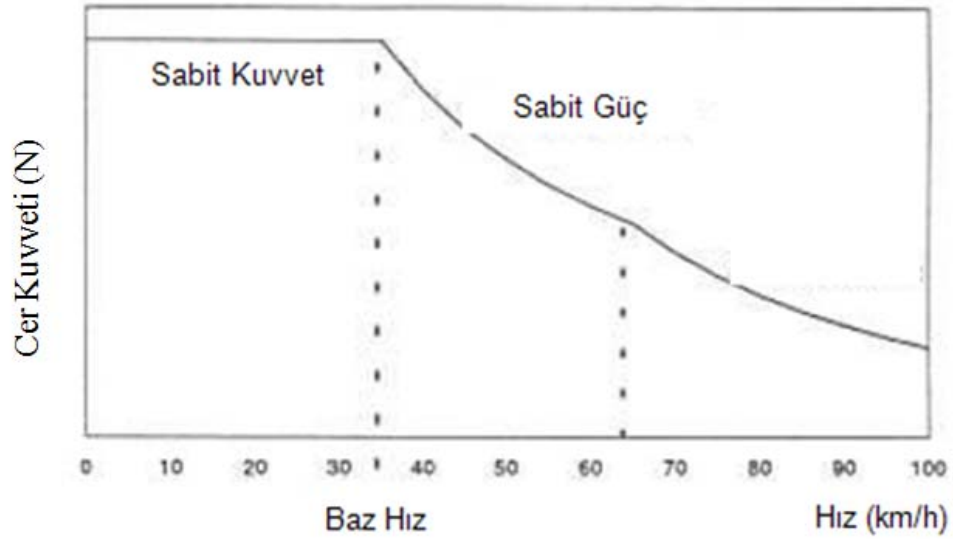
Bu tip simülatörler iki kısımdan oluşur: Tren hareket ve güç sistemi hesaplayıcıları. Genel olarak, tren hareket hesaplayıcısı ile, trenlerin, hız ve yerlerine bağlı o anda hangi çalışma modunda olması gerektiği saptanır. Bu yapılırken araç arakteristikleri, yolcu istasyonlarının kilometreleri ve güzergah parametreleri programda girdi olarak kullanılmaktadır.

Bu parametreler sonucu tren aşağıda verilmiş olan 4 hareket modundan birine göre hareket edecektir.

- İvmelenme: Tren motor karakteristiklerine göre hızlanabilir.
- Boşta gitme (Coasting): aracın o anki kinetik enerjisi ile yol alması durumudur.
- Sabit hızda hareket (Cruise): Bu durumda, sadece araç direnci diye adlandırılan karşı kuvvetleri yenmek için enerji harcanmaktadır.
- Frenleme: Sabit olduğu kabul edilir. Regeneratif (faydalı) frenleme hesaba katılması zor olmakla beraber gereklidir.

2.1 Tren Performans Hesabı

Elektrikli raylı sistem araçlarının Cer Kuvveti-Hız karakteristiği genel olarak Şekil 2.1’de verilen karakteristiğe sahiptir.



Şekil 2.1: Cer Kuvveti (N) - Hız (km/h) karakteristiği

Şekil 2.1'deki grafikten aracın, baz (temel) hız olarak tanımlanan bir hıza kadar, genellikle 8-10 m/s, sabit cer kuvveti ile hareket edeceği ve bu hızdan sonrada azalan bir kuvvet ile tahrik edileceği anlaşılmaktadır. Motorların üreteceği kuvvetten aracın karşı dirençleri düşülerek net cer kuvveti bulunur.

$$F_{\text{net}} = F - F_R - F_C \pm F_G = m a \quad (2.1)$$

Burada, sırasıyla F_R tren karşı kuvvetleri, F_C kurp direnci ve F_G eğimden gelen karşı kuvvetleri göstermektedir. Bunlar araçların ürettiği cer kuvvetinden çıkartılarak elde kalan net kuvvet bulunur. Bu formülden trenin elde edebileceği ivme değeri bulunur.

Elde edilen net cer kuvveti ve aracın ağırlığı o andaki ivmelenme değerini verir. Araçların maksimum ivmesi genellikle metro araçlarında 1.0 m/s^2 olmakla beraber cadde tramvay araçlarında 1.3 m/s^2 ye kadar çıkabilmektedir. Bu değer temel hıza kadar sabit kabul edilebilir. İvme değeri temel hızdan sonra azalır. İvmedeki anlık değişme jerk olarak adlandırılır ve maksimum 1.3 m/s^3 olabilir. Bu limit istasyonlar arasındaki mesafeye göre hızın sınırlandırılmasında önemli bir etkindir.

2.2 Tren Hareket Hesapları

2.2.1 İvmelenme Durumu

Mevcut hız ve ivme değerinden faydalanarak yeni hız ve yer bilgisi aşağıdaki formüllerle hesaplanır. Formüllerde jerk limitinin etkisi ihmal edilmiştir.

$$V_1 = V_0 + a \Delta t \quad (2.2)$$

$$S_1 = S_0 + V_0 \Delta t + 0.5 a \Delta t^2 \quad (2.3)$$

Burada V_0 ilk hız, V_1 hesaplanan yeni hız, a ivme değeri, S_0 ilk konum, S_1 hesaplanan yeni konum ve Δt hesap aralığıdır.

2.2.2 Frenleme Durumu

Tren frenleme esnasında aşağıdaki formüllere göre yavaşlayacak ve yol alacaktır.

$$V_1 = V_0 - a \Delta t \quad (2.4)$$

$$S_1 = S_0 + V_0 \Delta t - 0.5 a \Delta t^2 \quad (2.5)$$

Duruş için frenleme yapılıyorsa fren mesafesi;

$$S_{\text{fren}} = V^2/2a \quad (2.6a)$$

Hız azaltımı için fren yapılıyorsa fren mesafesi;

$$S_{\text{fren}} = (V^2 - V_T^2)/2a \quad (2.6b)$$

Burada, V frenlemenin başladığı mevcut hız, V_T ise hedeflenen hız değeridir.

2.3 Güç Hesabı

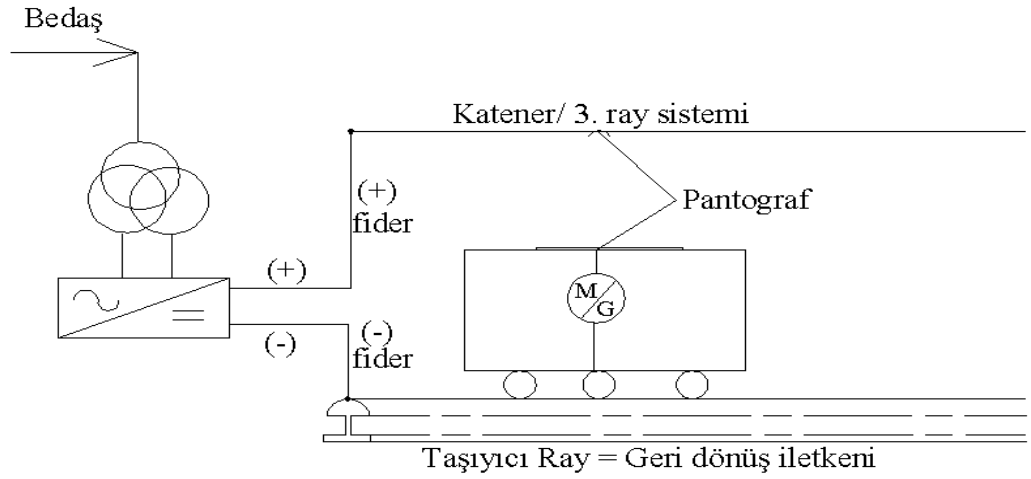
Tren performans hesapları Excel gibi hesap tabloları ile büyük yakınsamalar ile yapılabilir de, güç hesaplarının Excel'de istenilen hassasiyette gerçekleştirilmesi neredeyse imkansızdır. Aşağıda bir araca ilişkin temel güç denklemleri verilmiştir.

$$P_{\text{mekanik}} = F V = P_{\text{elektrik}} \eta \quad (2.7a)$$

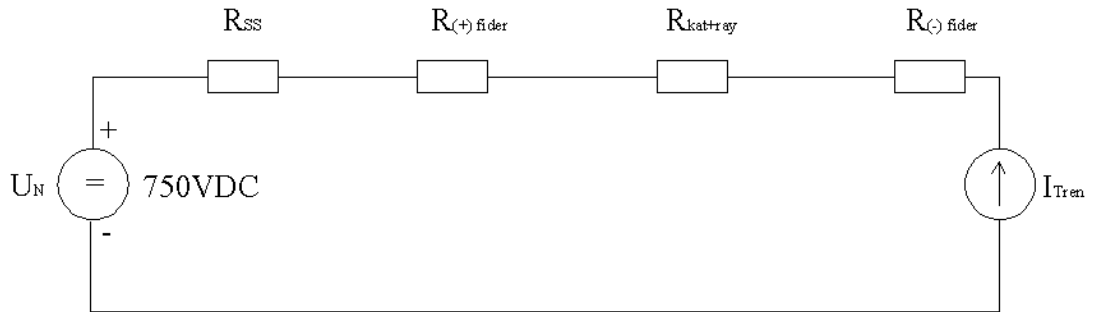
$$P_{\text{elektrik}} = F V / \eta \quad (2.7b)$$

Burada η araç verimi olup araç hızına bağlı olarak 0.85-0.90 arasında değerler almaktadır.

Bir DC beslemeli sistemin güç sisteminin en genel hali Şekil 2.2'de verilmiştir. Raylı sistemlerin cer gücü beslemesi bir trafo merkezinden tren katener/3. ray sistemi ile beslenir ve raylar geri dönüş iletkeni olarak kullanılır. En temel modelleme devrelerinde katener ve raylar birlikte temsil edilebilirler. Bu sistemin elektriksel eşdeğer gösterimi Şekil 2.3'de verilmiştir.



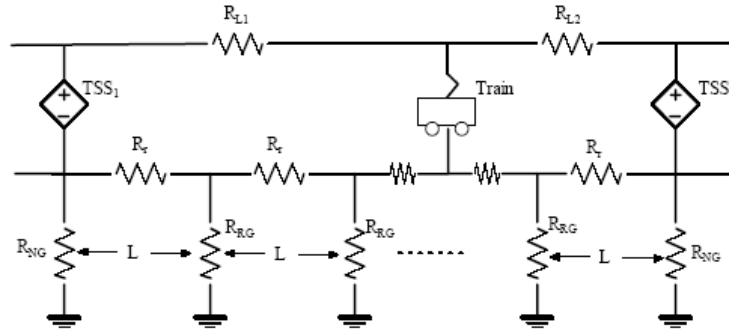
Şekil 2.2: DC Beslemeli Raylı Sistemin Cer Gücü Kaynağının Genel Gösterimi



Şekil 2.3: DC Beslemeli Raylı Sistemin Cer Gücü Kaynağının Elektriksel Eşdeğeri

Şekil 2.3'de verilmiş olan devrenin daha karmaşık topolojilerde düğüm gerilimlerini bulmak üzere dal gerilimleri yöntemi kullanılabilir [29].

Genelde taşıyıcı raylar geri dönüş iletkeni olarak kullanıldığı için rayların iç direncinden dolayı oluşacak olan ray gerilimi ve bunların sebep olduğu metal yapılara zarar verici kaçak akımların hesabı güç sisteminin tasarımında önem arz etmektedir. Ray geriliminin EN 50122 standardında çok kısa süreler için 170 V'a kadar yükselmesine izin verilebileceği belirtilmekle beraber, DC beslemeli sistemlerde 120 V sınırının 5 dakikadan uzun süreli olarak aşılması gerekmektedir. Bu durum farklı yöntemlerle kontrol altında tutulur. Şekil 2.4'de ray gerilimi hesapları için kullanılacak bir devre gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4: Ray Gerilimi Hesabı İçin Devre

Şekil 2.4’de verilen devrede kullanılacak ray hücrelerine bağlı olarak yüzlerce veya binlerce düğüm bulunabilir. Bu boyuttaki matrislerin hesabı için optimize edilmiş bir yazılım gereklidir. Aksi durumda, günümüz bilgisayarları bile çözümde zorlanacaklardır. Bir sonraki bölümde bu iş için daha önceden geliştirilmiş bir yazılım olan SimuX ve işleyiş tarzı verilecektir.

2.4 Raylı Sistem Simülasyon Programı: SimuX

Yukarıdaki bölümde tek tren durumu için verilmiş olan temel yaklaşım çok hatlı, çok trenli gerçekçi sistem modellemelerinde oldukça karmaşık hal almakta, elle çözümü imkansızlaşmaktadır. Günümüzde, doğru analizler ve işletme prosesleri ve bunları etkileyen değişik faktörlerin denemeleri simülasyon programları ile gerçekleştirilebilmektedir. Bunlarla birlikte tren işletmesinin bütün bir hat için bağlı analizleri yapılabilir.

Raylı ulaşım sistemlerinin tasarım ve analizinde simülasyon büyük bir önem taşımaktadır. Simülasyon yardımı ile güç sistemi boyutlandırılabilen, istenilen optimizasyon çalışmaları yapılabilen, olası problemler daha sistem inşa edilmeden görülerek çözülmekte ve sonuç olarak maliyette önemli azalmalar sağlanabilmektedir.

Simülasyon çalışmaları planlamanın doğru yapılıp yapılmadığının test edilmesinde ve tasarlanan sistemin optimize edilmesinde önemli bir yer tutar. Bunun dışında hazırdaki bir sistem üzerinde kullanılan araçların değiştirilmesi veya headway (trenler arası süre) zamanın kısaltılması gibi büyük modifikasyonlar yapılacağı zaman da simülasyon yapılmalıdır. Genel olarak bakıldığında simülasyon programlarının şu amaçlarla kullanılabileceği görülür:

- İşletme şartlarında tren performansının belirlenmesi
- Transformatör merkezlerinin ve kesicilerin boyutlandırılması

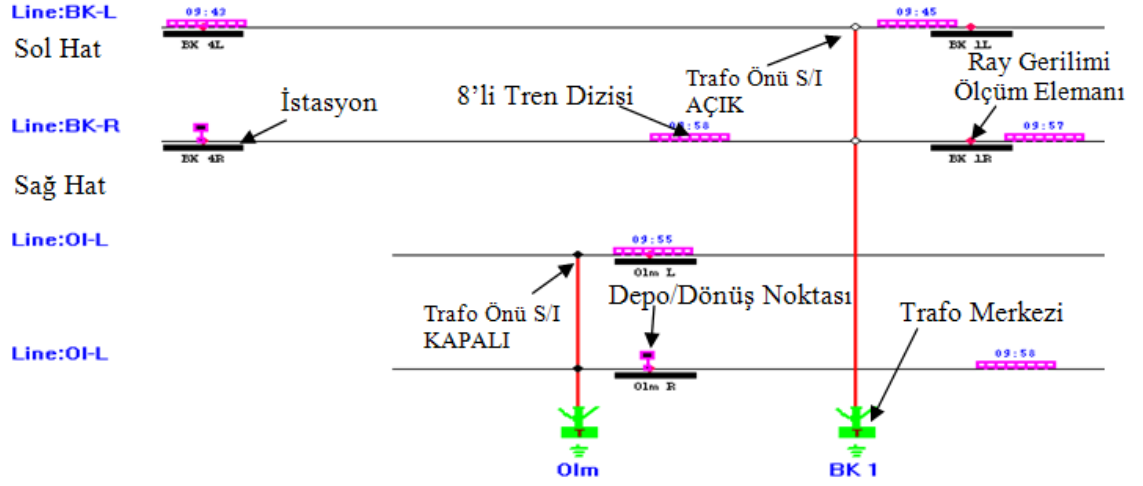
- Katener sisteminin yeterliliğinin saptanması
- Bir trenin pantografındaki maksimum, minimum ve ortalama gerilim değerlerinin bulunması
- Enerji tüketiminin ve kayıplarının saptanması [4],[10]
- Enerji tasarruf programlarının uygulamadan önce test edilmesi [30]
- Ray Gerilimi ve Kaçak akım analizi [31]
- Farklı besleme şekillerinin test edilmesi [4]
- Regeneratif frenlemenin etkisi ve hattın üretilen bu frenleme enerjisini kabul oranının (receptivity rate) belirlenmesi
- Kısa devre akım ve gerilimlerinin analizi
- Araç zaman çizelgelerinin iyileştirilmesi

Yukarıda verilen maddelerden herhangi birinde yapılacak ufak iyileştirmeler dahi çoğu durumda yüzbinlerce dolarla ifade edilebilecek maliyet düşümlerine sebep olabilmektedir. Bazı durumlarda ise (ray gerilimi ve kısa devre analizi gibi) hesaplamaların doğru yapılması hayati önem taşımaktadır.

Dünyanın çeşitli ülkelerinde bu konuda simülasyon çalışmaları uzun süredir yapılmakta olup [32]-[36] ülkemizde daha önce yapılmış olan çalışmalar [37]-[38] daha çok tek aracın (yada dizinin) hareket mekanizmasının simülasyonu ile sınırlı olup tüm sistemi (birden fazla dizi birden fazla yol) ele almamaktadır.

2.4.1 Sistem Parametreleri

Bir raylı ulaşım sisteminde bir çok bileşen bulunduğu için sisteme ilişkin parametrelerin uygun bir kullanıcı ara yüzü ile alınması olası hataların en aza indirilmesi açısından büyük önem taşır [39]. Geliştirilen SimuX [40] programında tüm sistem parametreleri Visual C++ ortamında geliştirilen ve görselliği üst seviyede olan bir kullanıcı ara yüzü ile sisteme dahil edilmekte ve mümkün olduğunca, hattın ölçekli şeması üzerinde fare ile etkileşebilecek şekilde temsil edilmektedirler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: SimuX Ortamında Sistemin Temsili.

Simülasyon için gerekli olan parametrelerden bazıları üç ana bölüm altında aşağıda listelenmiştir:

Hatlar

- Hat sayısı, isimlendirmeleri ve metrajı
- Yolcu istasyonları ve bekleme süresi (minimum, maksimum yada ortalama)
- Kurplar (dönüşler)
- Eğimler
- Hız sınırlamaları ve maksimum işletme hızı (gidiş ve geliş yönlerinde farklı olabilir)
- Trenleri hatlara verilip alındığı depolara ilişkin veriler
- Hat üzerinde işleyen dizilere ilişkin veriler (kaçlı dizi, başlangıç ve hedef noktaları, uğranılan istasyon isimleri, TAS gibi)
- Trafik ışıkları ve bunlara bağlı ekipmanlara (örneğin, halkalar) ilişkin veriler

Cer Gücü ve Katener Sistemi

- Trafo merkezi sayısı, yerleri ve isimlendirmeleri
- Trafo merkezi iç ekipman değerleri
- (+) ve (-) fider kablolarının ve kesicilerinin özellikleri (kesime gitme akımları, bunların RMS değerleri, her bir kablo için ayrı ayrı bağlantı noktası)
- Trafolar arası izole bölgeler
- Katener sistemi verileri

- Jumper (eş-potansiyel bağlantı) noktaları (Katener sistemi üzerinde ya da raylar üzerinde)
- Ray verileri (her bölge için rayların elektriksel özellikleri, ray toprak arası geçirgenlik dirençleri vb.)
- Topraklama sistemine ilişkin veriler (Topraklama noktaları, bu noktalarda (varsa) kullanılan elektronik ekipmanlara (Rail Potential Control Device – RPCD) ilişkin veriler)

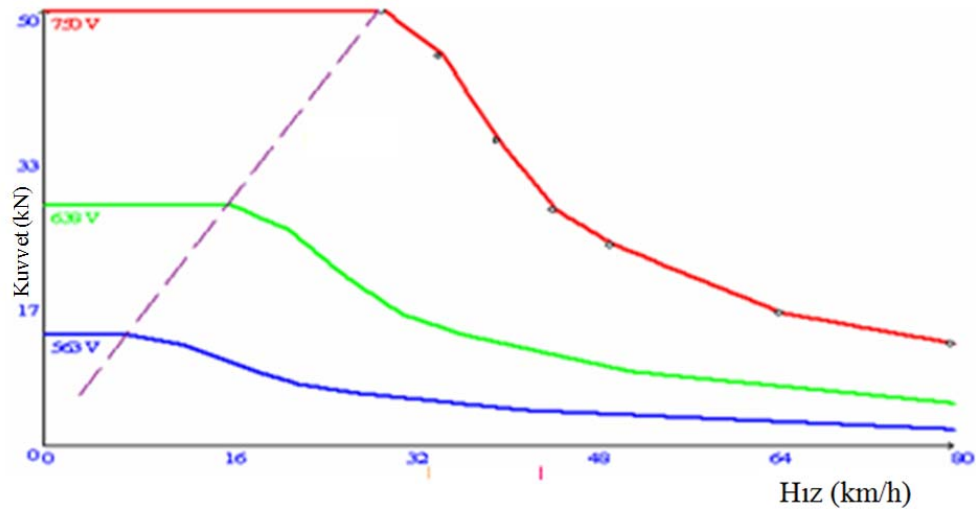
Araçlar

i. Mekanik veriler

- Araç boyutuna ilişkin veriler
- Araç maksimum hızı
- Araç boş/dolu ağırlık bilgileri
- Maksimum hızlanma ve frenleme ivme değerleri
- Cer kuvveti – Hız diyagramı
- Frenleme kuvveti – Hız diyagramı

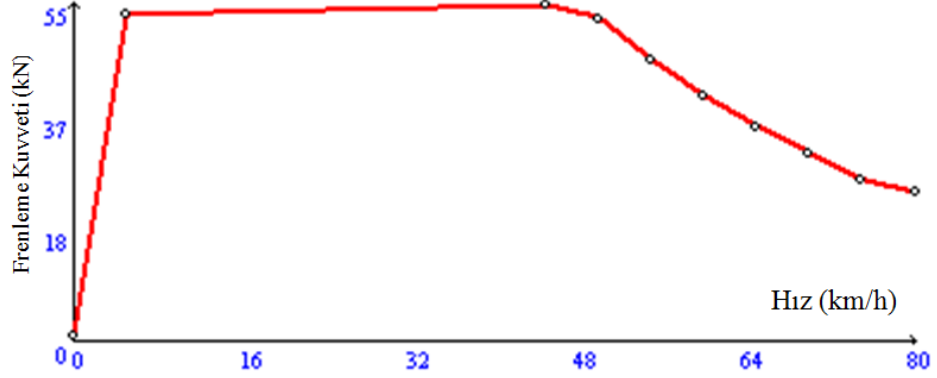
ii. Elektriksel veriler

- Nominal, minimum ve maksimum gerilim değerleri
- Yardımcı güç sistemine ait değerler
- Kontrol sistemi verileri
- Hat gerilimi – Cer kuvveti diyagramı

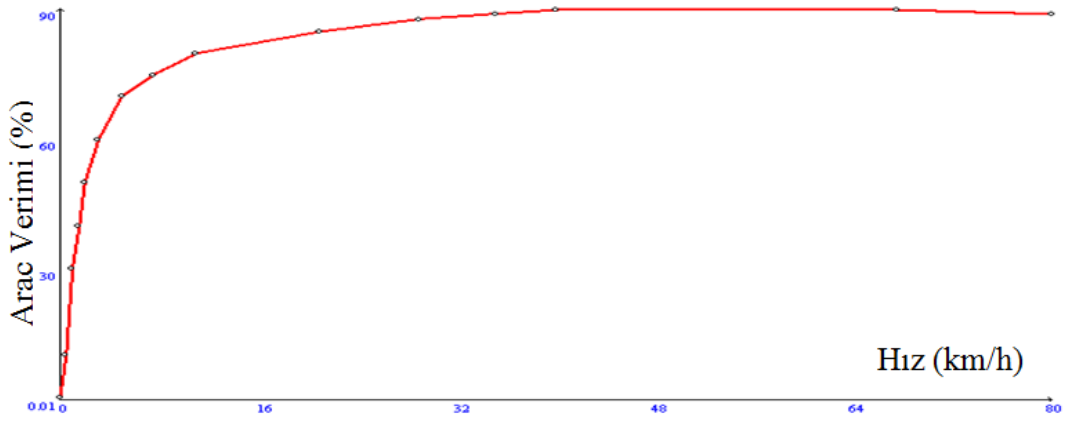


Şekil 2.6: Bir Araca ait Cer Kuvveti (kN) – Hız diyagramı (km/h)

Bir araca ait cer kuvvetinin farklı gerilim seviyeleri için hıza bağlı değişimi Şekil 2.6 ve dinamik frenleme kuvvetinin hıza bağlı değişimi Şekil 2.7’de verilmiştir. Yine aynı araca ait hıza bağlı verim eğrisi Şekil 2.8’de verilmiştir. Verilmiş olan bu eğriler bir araca özel olup, farklı tipteki araç için farklı olabilir.



Şekil 2.7: Bir Araca ait Dinamik Fren Kuvveti (kN) – Hız diagramı (km/h)



Şekil 2.8: Bir Araca ait Verim (%) – Hız diagramı (km/h)

Şekil 2.6’den araçların zayıf cer gücü besleme sistemi olan hatlarda da çalışabilmesi için tahrik sisteminin kontrolünün gerilime göre de gerçekleştirildiği görülmektedir. Gerilim seviyesi azaldıkça araç güç talebini azaltarak durumun daha da kötüye gitmesine mani olmaktadır. Dolayısı ile araç trafo merkezlerinden birinin devre dışı kalması durumlarında bile işletmeye devam edebilmektedir. Ancak, bu özellik her araçta bulunmamaktadır. Simülatör yazılımlarında bu karakteristiğin ihmal edilmesi sonuçların %30 mertebelerine kadar abartılı bulunmasına yol açabilmektedir.

2.4.2 Mekanik Bileşen

Raylı sistemler birbiriyle etkileşim halinde bulunan mekanik, elektrik ve sosyal bileşenlerden oluşurlar. Bunlardan mekanik bileşen daha çok trenlerin hareketlerinin simülasyonu üzerine yoğunlaşmıştır ki burada kayma ve patinaj olmadığı varsayımı altında Newton’un 2. kanunu kullanılabilir. (2.1)’de verilen formülden yola çıkarak

tren hareketlerinin simülasyonunda kullanılabilecek bir algoritma Şekil 2.9'da verilmiştir. Hesaplamalar bölüm 2.2'de verilmiş olan temel formüllerin jerk limitini de dikkate alarak gerçekleştirilir.

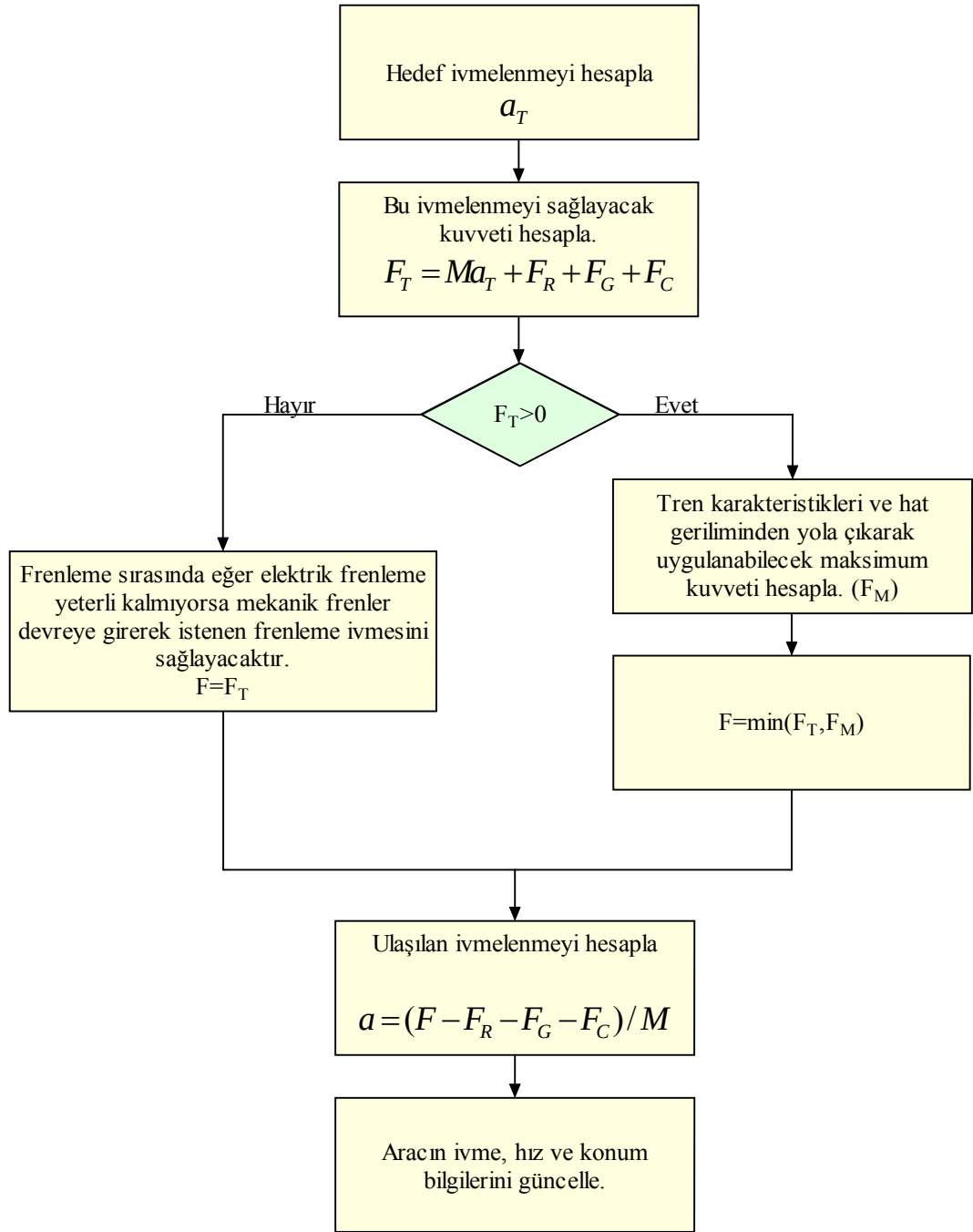
Şekil 2.9'daki algorithmadan anlaşılacağı üzere trenlerin talep ettiği ivme ile gerçekleştirebildikleri ivme değeri girilen tüm verilere bağlı olarak her adımda hesap edilmektedir.

2.4.3 Elektrik Bileşen

Bölüm 2.3'de de belirtildiği üzere DC Beslemeli raylı ulaşım sistemlerini dirençler, gerilim kaynakları ve akım kaynaklarından oluşmuş çok büyük elektrik şebekesi olarak modellemek mümkündür. Yalnız bu şebekenin alışılmış elektrik şebekelerinden farkı içlerinde hareket eden ve dinamik bir şekilde değer değiştiren elemanların olmasıdır. Trenlerin hareketine bağlı olarak şebekenin topolojisi değişmekte ve şebeke içindeki bazı elemanların (örneğin tren trafo arası katener direnci) değerleri değişebilmektedir. Üstelik regeneratif frenleme, trafo merkezlerindeki koruma devreleri ve ray gerilimi yükselmesine karşı kullanılan topraklama elemanlarının (RPCD) varlığı elektrik şebekesinin çözümü sırasında lineer olmayan elemanları da göz önüne almayı zorunlu kılmaktadır.

Literatürde bu tür devrelerin çözümü için “modifiye edilmiş yük akım yaklaşımı” ve “doğrudan matris yaklaşımı” olmak üzere iki ana yöntem önerilmiştir [41]. Düşüm analizi kullanılarak yapılan doğrudan matris yaklaşımı geliştirilen SimuX programı tarafından kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma göre verilen bir t anı için sistemdeki tüm elemanlar dirençler ile gerilim ve/veya akım kaynakları olarak modellenmekte daha sonra elde edilen sistem empedans matrisinin tersi alınarak çözüme gidilmektedir. Söz konusu empedans matrisi çoğu kere yüksek boyutlara sahip olup (1000 x 1000 gibi) ters alma işleminin etkin bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır [41]. Sistemin lineer olmayan özelliklerinden dolayı bazı adımlarda bu empedans matrisine ilişkin denklemin bir adım için birden fazla kere çözülmesi gerekebilir.

Şekil 2.9'dan da görüleceği üzere elektrik şebekesinin çözümüne bağlı olarak bulunan hat gerilimleri trenlerin ulaşabilecekleri maksimum ivmelenmeyi belirlemektedir. Diğer taraftan trenlere motorlarından uygulanan kuvvete bağlı olarak pantograf gerilimleri değişmektedir. Bunun yanında trenin hareketi sonunda elektrik şebekesi değiştiği için mekanik ve elektrik bileşenlerin simülasyonları birlikte yapılmalıdır.



Şekil 2.9: Tren Hareketlerinin Simülasyonu

2.4.4 Sosyal Bileşen

Raylı ulaşım sistemlerinin simülasyonunda çoğu zaman göz ardı edilen bir unsur sistemin insanları taşıdığı ve insanların gün içindeki hareketlerine bağlı olarak değişiklikler arz edeceğidir. Ayrıca bazı istasyonlar arası yolcu talebinin fazla olması sonucu belirli bölgelerde tren kütlelerinin değişeceği ve bunun sistemin diğer bileşenlerini etkileyeceği unutulmamalıdır. Elektrik sistemin boyutlandırılması sırasında en kötü koşullar göz önüne alındığından trenler tam yüklü olarak kabul edilebilir.

2.4.5 Sonuçların Görüntülenmesi ve Örnek Çıktılar

Geliştirilen SimuX programında trenlerin hareketleri ve sisteme ilişkin ana parametrelerin değerleri anlık olarak ana ekran üzerinde gösterilir. Scope adı verilen pencereler yardımıyla istenilen değişkenlerin zaman içindeki değişimlerinin grafiksel olarak kullanıcıya gösterilebilmesi öngörülmüştür. Bunun dışında tüm verileri MATLAB, Mathematica ya da Excel gibi programlara aktarmak, XML, HTML yada sade yazı formatlarında rapor üretmek, sistemde rastlanan önemli olaylara ilişkin mesajları görüntülemek mümkündür.

Örnek Çıktılar

Bir simülasyon testi sonucunda kayda alınan yüzlerce parametreden önemli olanlarının özet tablolar ve grafikler halinde sunulması, simülasyon sonuçlarının yorumlanması için son derece önemlidir.

Tablo 2.1’de SimuX programının Kabataş-Zeytinburnu tramvay hattı için gerçekleştirilmiş olan 2 saatlik doruk saat simülasyon sonucunda elde edilmiş olan ana parametreler görülmektedir. Bu tablodan sistemde iki hattın, sekiz trafo merkezinin, dört depo noktasının olduğu görülmektedir. Simülasyonun bittiği anda sistemde 22 trenin var olduğu da aynı tablodan görülmektedir. Katener ve/veya ray sistemleri arasında toplam 143 adet paralelleme olduğu da belirtilmektedir.

Tablo 2.1’deki ikinci grup bilgilerden doruk saatleri kapsayan bu işletme şartlarında trenlerin karşılaştığı minimum gerilimin 667 V, maksimum ray geriliminin ise 39 V olacağı görülmektedir. Aynı tabloda ayrıca, toplam enerji tüketiminin 4769 kWh, gerçekleşen araç*km’sinin 1490 km, dolayısı ile araç*km başına enerji tüketiminin 3.2 kWh olacağı verilmektedir. Tabloda son olarak, ana şebekeden talep edilecek toplam güç değerinin anlık maksimum değerinin 7497.5 kW, bunun 10 dakikalık kayan pencerelerde hesap edilen RMS değerlerinin maksimumunun 3132 kW olarak hesap edilmiştir. Bu değer bize sistemi besleyen OG şebekenin cer gücü sistemi tarafından yüklenme miktarını göstermektedir.

Tablo 2.1: Tramvay Hattı Genel Parametreler

Hat Sayısı :	2	Min. Tren Gerilimi [V] :	667.01	Mevcut Zaman :	09:59:59
TM Sayısı :	8	Max. Ray Gerilimi [V] :	38.88	Simülasyon Süresi :	00:12:07
Depo Sayısı :	4	Toplam Araç km :	1490.19		
Tren Sayısı :	22	Max. Güç [kW] :	7497.50	Max. RMS Güç [kW]:	3132.67
Parallelleme :	143	Toplam Enerji [kWh] :	4769.30	kWh/(Araç*km) :	3.20

Tablo 2.2’de yukarıda bahsedilen simülasyon sonucunda elde edilen trafo merkezi verileri verilmiştir. Bu tabloda her bir trafo merkezinden çekilecek anlık güç ve her bir fiderden akacak anlık maksimum akım değerleri verilmektedir. Ayrıca, her bir trafo merkezinden çekilecek enerji miktarı da bu tabloda gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Tramvay Hattı Trafo Merkezi Verileri¹

Transformers:	Iw1 (max):	Ie1 (max):	Iw2 (max):	Ie2 (max):	Power (max):	Energy
Dolmabahce	0.00	914.02	0.00	918.32	1388.06	254.64
Karakoy	808.60	713.11	794.98	702.35	1609.88	486.43
Gulhane	698.85	746.38	695.71	746.38	1409.73	497.05
Beyazit	888.29	1308.26	888.29	1307.73	1993.69	742.53
Haseki	1250.93	1580.44	1256.81	1568.53	2792.69	853.13
Pazartekke	1508.69	844.21	1352.82	844.21	2582.78	789.21
Hal	1247.90	848.80	1247.93	816.63	1610.06	587.11
Demirciler	691.03	745.58	627.23	745.58	1292.77	559.20

Tablo 2.2’den Haseki ve Pazartekke trafo merkezlerinin en çok yüklenecek merkezler olacağı görülmektedir. Aynı durum fider akımlarında da gözlenmektedir.

Trafo merkezlerinin, fider kablolarının ve katener/3. ray sisteminin yüklenme durumlarının analizinde gerekli olan RMS değerler Tablo 2.3’de sunulmaktadır. Bu tablodaki değerler istenen pencere aralığında hesap edilebilmektedir. Özellikle cer trafo ve doğrultucuları trenlerin oluşturduğu darbeleri yükleri kaldırabilmesi için dayanım sınırları oldukça yüksek olacak şekilde imal edilmektedir. %150 yüke 1 saat, %200 yüke 1 dakika dayanım nerede ise standart olup bu değerlerin üzerindeki yüklenmelere de dayanabilen modeller mevcuttur.

Tablo 2.3: Tramvay Hattı Trafo Merkezi Maksimum RMS Değerleri

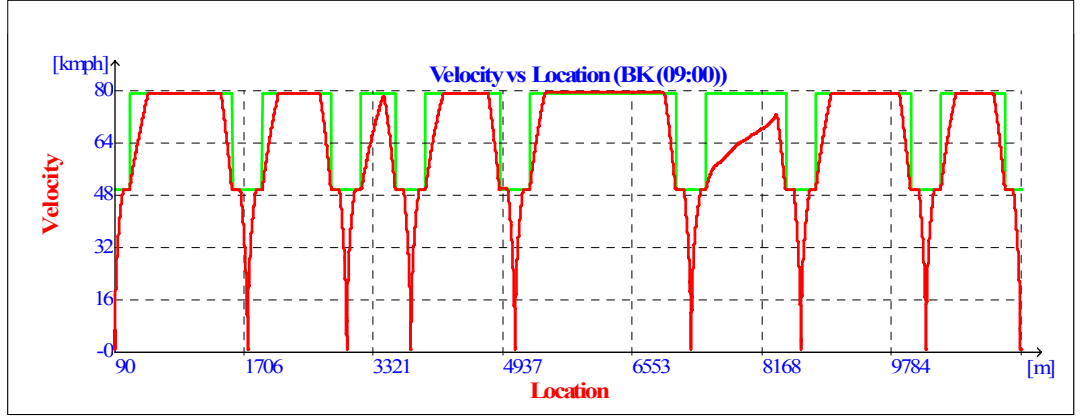
Transformers:	Iw1 (max rms):	Ie1 (max rms):	Iw2 (max rms):	Ie2 (max rms):	Power (max rms)
Dolmabahce	0.00	154.23	0.00	154.66	238.12
Karakoy	168.83	181.65	171.34	196.97	393.42
Gulhane	161.76	201.89	168.39	202.76	373.18
Beyazit	227.96	316.12	233.91	316.20	613.23
Haseki	339.01	383.95	343.09	389.08	730.22
Pazartekke	321.64	254.93	321.04	254.19	638.34
Hal	299.19	186.60	281.07	181.18	465.37
Demirciler	157.83	234.61	149.16	225.41	404.91

Tablo 2.3’deki değerler incelendiği zaman trafolarla maksimum yüklenme 730 kW ile Haseki TM’de gerçekleşmektedir. Fider akımlarına ait RMS değerler ise 400 A değerinin altında kalmaktadır.

SimuX’un tren performansına ait hesaplamalarından bir örnek grafik Şekil 2.10’da verilmiştir. SimuX’la yapılmış olan bir proje çalışmasına ait olan bu grafikte bir trene

¹ **Iw1:** 1. yol (sol hat) Kabataş yönü
Ie1: 1. yol (sol hat) Zeytinburnu yönü
Iw2: 2. yol (sağ hat) Kabataş yönü
Ie2: 2. yol (sağ hat) Zeytinburnu yönü’ndeki akımlar anlamına gelmektedir.

ait hız profilinin yere göre değişimi verilmektedir. Grafikte ayrıca hız sınırlamaları da görülmektedir.



Şekil 2.10: Bir Çalışmadan Bir Trene Ait Hız – Yer Profili

3 ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN ÖNEMLİ PARAMETRELERİN ve BOŞTA GİTME ŞEKİLLERİNİN İNCELENMESİ

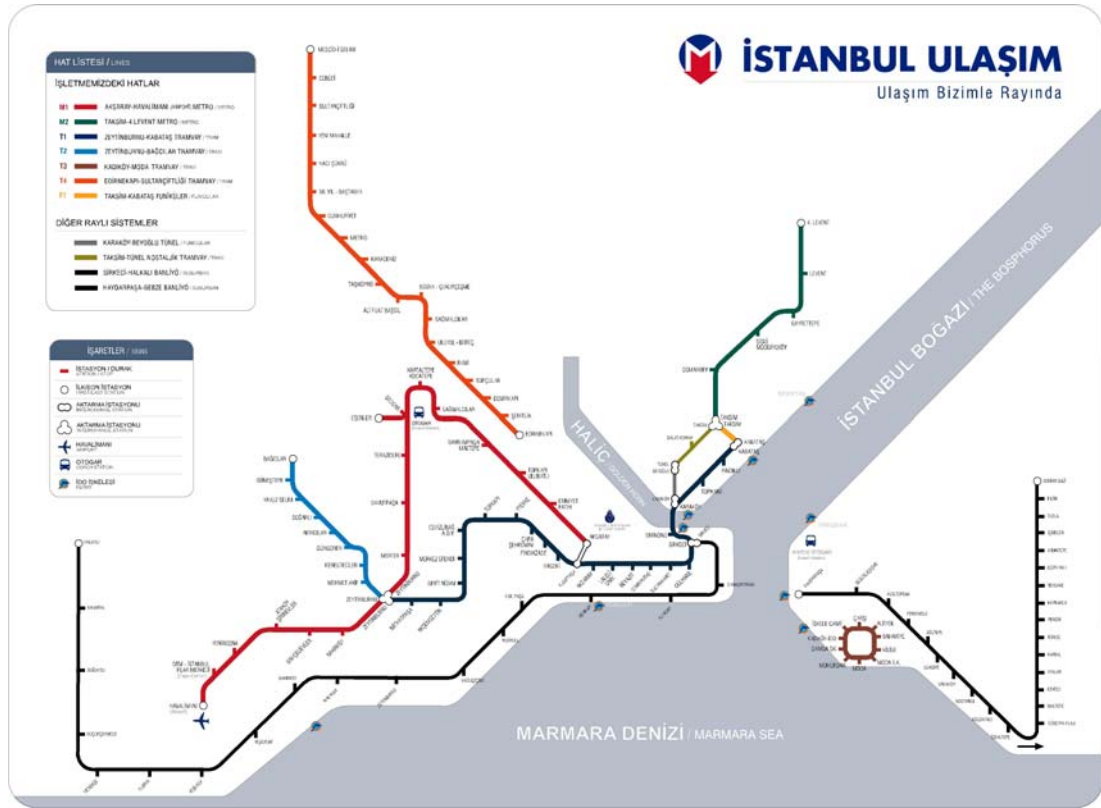
Bu bölümde raylı sistemlerde bazı ana parametrelerin değişiminin enerji tüketimi üzerine etkileri Aksaray – Havalimanı metro hattı verileri kullanılarak incelenecektir. Ancak, öncelikle yapılacak enerji verimliliği çalışmalarının getirilerin anlaşılabilmesi amacı ile İstanbul ULAŞIM AŞ tarafından işletilmekte olan İstanbul Raylı Sistem hatlarının çok öz bir tanıtımı ve bu hatların enerji tüketim istatistikleri sunulacaktır.

3.1 İstanbul Raylı Sistem Hatları ve Enerji Tüketimleri

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından İstanbul'da kent içi raylı sistemlerin işletmeciliğini yapmak üzere kurulan İstanbul Ulaşım A.Ş (İUAŞ), 2007 Ekim itibari ile, toplam 59.2 km uzunluğundaki kent içi raylı sistem hatlarının işletmeciliğini yapmaktadır. Bu hatlar; Taksim-4 Levent Metro, Aksaray – Havalimanı Metro, Kabataş-Zeytinburnu Tramvay, Zeytinburnu-Bağcılar ve son olarak Eylül 2007'de açılan Edirnekapi-Sultançiftliği Tramvay hatlarıdır. Bu ana hatların haricinde Taksim-Kabataş Füniküler, Kadıköy-Moda Tramvayı, Eyüp-Piyer Loti ve Maçka-Taşkışla Teleferik sistemlerinin de işletmesinden sorumludur.

Şekil 3.1'de İstanbul'daki raylı sistemlerin bir haritası verilmiştir. Haritada İETT tarafından işletilmekte olan Karaköy-Şişhane Füniküler (Tünel) ve Taksim-Şişhane Tramvayı, TCDD tarafından işletilmekte olan Haydarpaşa-Gebze ve Sirkeci-Halkalı Banliyö hatları da görülmektedir.

İşletmeciliğini yaptığı Zeytinburnu-Kabataş tramvay hattı UITP tarafından 2004 yılında yüksek yolcu talebini karşılama alanında dünyada en iyi uygulama seçilen Ulaşım A.Ş. her gün yaklaşık 750.000 yolcuya hizmet vermektedir. İstanbul'da giderek ivme kazanan raylı sistem yatırımlarının tamamlanmasıyla birlikte kısa zamanda çok daha fazla sayıda yolcuya hizmet verecek olan Ulaşım A.Ş. 2005 yılında imzaladığı Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği Sürdürülebilir Gelişme Beyannamesi ile sürdürülebilir gelişme alanındaki taahhüdünü de ortaya koymuştur.



Şekil 3.1: İstanbul'daki Raylı Sistemler (Ekim 2007)

İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Konya ve Eskişehir gibi şehirlerimizde raylı sistemler kullanılmakta, Adana, Kayseri, Antalya, Samsun, Rize, Gaziantep, Malatya, Denizli gibi şehirlerimizde ise çalışmalar çeşitli aşamalarda devam etmektedir. Halen raylı sistemlere sahip illerimizde ise bu hatları uzatma ve/veya yeni hatlar yaparak tüm sistemi birbirine ekleme şeklinde çalışmalar devam etmektedir.

3.1.1 Taksim-4 Levent Metrosu

Hat üzerinde her bir istasyon için ikişer adet yardımcı güç transformatörü bulunmakta, bunlar istasyon ve tesislerin 34.5 kV / 400–230 Volt AC besleme kaynağını temin etmekte kullanılmaktadırlar. Toplam sayıları, 2×6 istasyon = 12 adettir. Her istasyon yapısının büyüklüğüne göre kurulu güç değeri değişmekle beraber toplamda yardımcı kurulu gücü, 24 MVA dır. Bunlara ek olarak yine değişik istasyonlarda kurulu bulunan ana güç transformatör merkezleri ile de 34.5 kV AC gerilim, trafo-redresör gurupları üzerinden 750 V DC anma gerilimine dönüştürülerek, sisteme dağıtılmaktadır. Ana cer gücü, sistemde 5 istasyon $\times 6.6 = 33$ MVA'dır. Acil güç beslemesi olarak hattın her bir ucunda 5 MVA'lık iki adet jeneratör otomatik olarak devreye girmek üzere bekleme konumundadır. Metro sisteminin TEİAŞ'dan ring beslemesi Kasımpaşa ve Levent'ten gerçekleştirildiği için, enerji tüketimini belirleyen ölçümlerde buralardan yapılmaktadır.

3.1.2 Aksaray-Havalimanı Metrosu

Hafif Metrodaki trafo merkezi sayısı 12 olup, 9 tanesi katener sistemini beslemektedir. Genelde, her trafo merkezinde 2 adet trafo vardır. Hafif Metro hattının kurulu cer gücü, 38.4 MVA'dır. Yardımcı güçler (10.15 MVA) ile toplam kurulu güç 39.55 MVA'tır. Ferhatpaşa 'da genel atölye ve idari binalar olduğundan biri yedek olmak üzere 2 adet 1.250 kVA'lık yardımcı trafo ve 80 kVA'lık jeneratör mevcuttur.

3.1.3 Kabataş-Bağcılar Arasındaki Tramvay Hatları

Tramvay hatlarında 5 ayrı 34.5 kV BEDAŞ girişi mevcuttur. Tramvay hatları 10 adet trafo merkezi tarafından beslenmektedir. 5 adet trafo merkezinde 2x1 MVA lık bir kurulu güç vardır. Diğer 5 adet trafo merkezinde ise 2 x 1.5 MVA olmak üzere toplam kurulu gücü 25 MVA'dır. Yardımcı güç ise 500 kVA'dır. Toplam kurulu güç 25.5 MVA olmaktadır.

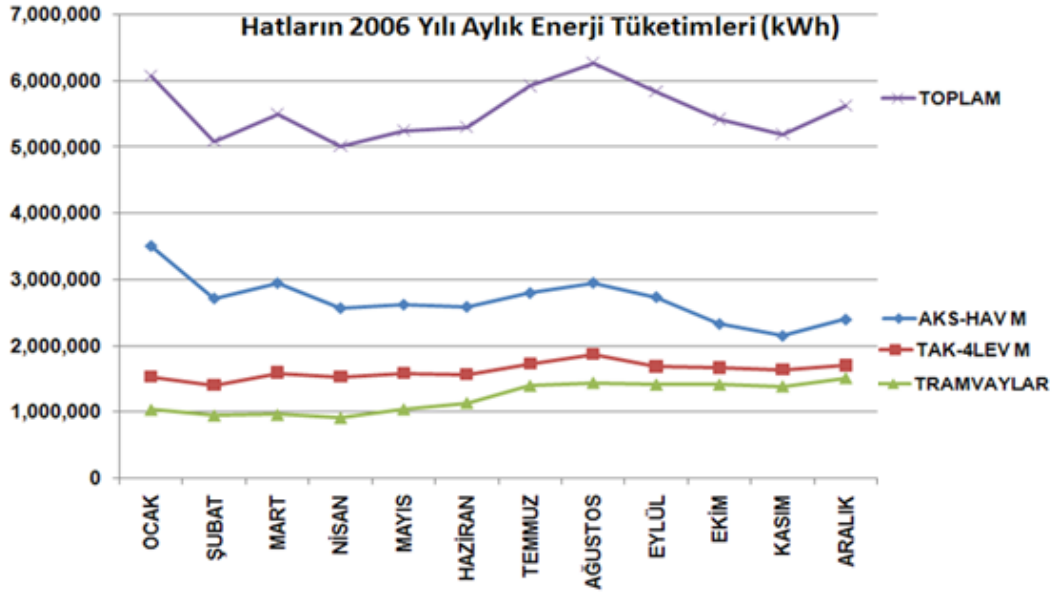
3.1.4 Enerji Tüketimleri

Sistemde 2002-2006 yıllarında BEDAŞ faturalarından tespit edilen ortalama aylık elektrik enerjisi tüketimleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Hatların 2002-2006 Yıllarındaki Ortalama Aylık Enerji Tüketimleri

Yıllara Göre Hatların Aylık Ortalama Enerji Tüketimleri (kWh)				
Yıl	Aks-Hav Metro	Tak-4Lev Metro	Tramvaylar	Toplam
2002	1881400	1268017	928102	4077519
2003	2190612	1294873	963607	4449092
2004	2499968	1461435	1009174	4970577
2005	2656533	1491960	1014507	5163000
2006	2693944	1625311	1225476	5544731

Tablo 3.1'deki değerler incelendiği zaman enerji tüketim seviyelerinin sürekli olarak artmakta oldukları görülmektedir. Bundaki ana etken taşınan yolcu sayısının artması olmakla beraber büyük artışların gözlemlendiği 2005-2006 yılları geçişinde Zeytinburnu-Bağcılar Tramvay hattının ve Taksim-Kabataş Füniküler hattının açılmış olması etkili olmuştur. Şekil 3.2'deki grafikler hatların 2006 yılındaki enerji tüketimlerinin aylara göre değişimini vermektedir.



Şekil 3.2: Raylı Sistem Hatlarının Aylık Enerji Tüketimleri (2006)

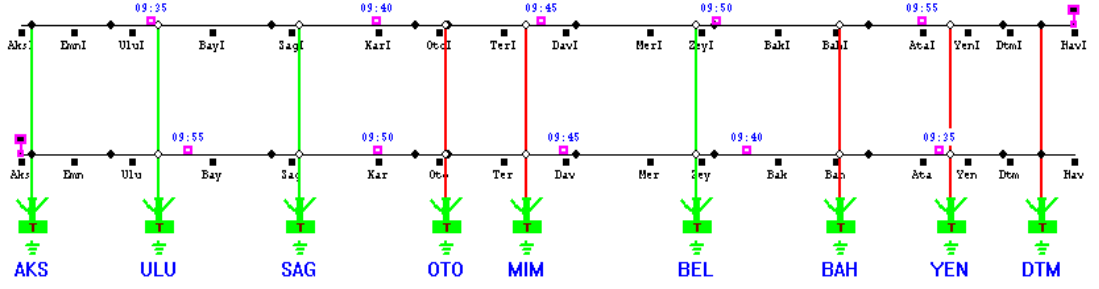
Hafif metro olan Aksaray – Havalimanı hattındaki aylık ortalama enerji tüketim miktarının içinde trenlerin tahriki için kullanılan cer gücü enerji miktarı 2200000 kWh'tır. Dolayısı ile bu miktarda yapılacak olan %1'lik bir tasarruf aylık 22000 kWh, yıllık ise 264000 kWh daha az enerji tüketimi demektir. Bu hatta cer gücü tüketiminde 1 yılda ortalama %5 tasarruf elde edilmesi tramvay hatlarının 1 aylık tüketimine eşdeğer azaltım sağlayacaktır.

Tek bir hatta elde edilecek tasarrufun miktarı göz önüne alınırsa bir çok hattan oluşan komple bir raylı sistem ağında elde edilecek tasarruf miktarı düşünülürse enerji tüketimini azaltma için yapılacak her çalışmanın önemi daha iyi anlaşılabilecektir.

3.2 Test Hattı: Aksaray – Havalimanı Metro Hattı

Yapılan bütün simülasyon testlerinde Aksaray – Havalimanı LRT hattı karakteristikleri kullanılmıştır. Hattın ana özellikleri aşağıdaki gibidir.

Hat uzunluğu	:19 km
Tren Sayısı	:4 tahrikli araçtan müteşekkil, 92 m.
Yolcu istasyonu	:17
Trafo merkezi (TM)	:9
Nominal Gerilim	:750 VDC, Katener sistemi
Günlük Yolcu	:240000



Şekil 3.3: LRT Hattının SimuX Gösterimi

Şekil 3.3’de LRT hattının SimuX görünümü verilmiştir. Üzerinde zaman bulunan küçük içi boş kutular her iki son istasyondan çıkan trenleri, isim yazan içi dolu kutular ise istasyonları göstermektedir.

Şekil 2.6’da bu hatta kullanılan bir araca ait Cer Kuvveti – Hız eğrisi verilmiştir. Diagramdan da görüldüğü gibi trenin, düşük gerilim durumunda güç sisteminden talep ettiği güç azalmaktadır.

İstasyonlarda bekleme süresi 15 ile 25 saniye arasında rastgele olarak atanmıştır. Bu ayarlama her tren için rastlantısal yapılmıştır. Bu şekilde Simülasyon sonuçlarına yolcu ve makinist davranışlarının etkileri de katılabilmektedir.

3.3 Enerji Tüketimine Etki Eden Ana Parametrelerin İncelenmesi

Farklı parametrelerin farklı değerlerinin etkisini anlamak için bir çok simülasyon testi yapılmıştır.

Geri kazanım oranı frenleme enerjisinin kullanım oranının yüzdesel olarak tanımıdır. Araç*km başına düşen enerji tüketimi ise katedilen her araç*km için yerel elektrik dağıtım şebekesinden çekilen enerjidir.

3.3.1 İşletme Sıklığının Etkisinin Araştırılması

Trenler normal olarak belli zaman aralıkları ile ard arda hat’a gönderilir. Buna trenler arası süre (TAS) denir. Metro sistemlerinde bu 75 saniyeye kadar düşebilir, banliyö hatlarında ise 2.5-10 dakika arasındadır.

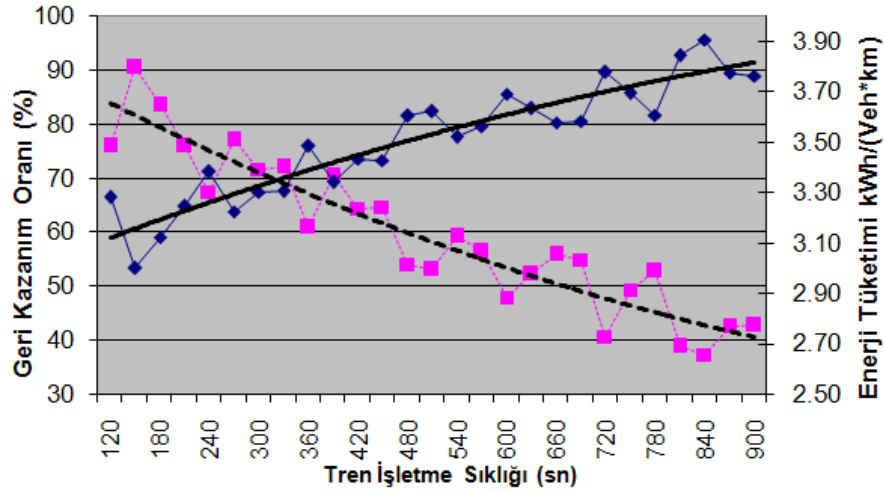
TAS hattaki geri kazanım oranını ve dolayısı ile enerji tüketimini etkiler. TAS’ın küçük olması, tanımlanmış bir güç bölgesinde daha çok aracın aynı anda var olması ve dolayısı ile ivmelenen, frenleyen trenlerin eş zamanlı bulunma olasılığının artması demektir [42].

Bu çalışmada, 120 saniyeden başlayarak, otuzar saniyelik artışlarla, 15 dakikaya kadar, toplam 27 farklı TAS için simülasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Tablo

3.2'de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 3.4'de verilmiştir. 150 ve 180 saniyelik işletmede geri kazanım oranı fazla çıkmaktadır. Bunun bir sebebi bu sefer aralıklarında frenleyen ve hızlanan trenlerin senkronizasyonunun daha fazla olması ihtimalidir.

Tablo 3.2: Farklı TAS İçin Geri Kazanım Oranı ve Araç*km Enerji Tüketimi

TAS (s)	Geri Kazanım Oranı (%)	kWh/(Araç*km)	TAS (s)	Geri Kazanım Oranı (%)	kWh/(Araç*km)
120	76.0	3.28	540	59.0	3.52
150	90.5	3.00	570	56.5	3.57
180	83.5	3.12	600	48.0	3.69
210	76.0	3.25	630	52.0	3.64
240	67.5	3.39	660	56.0	3.58
270	77.0	3.22	690	55.0	3.58
300	72.0	3.30	720	40.5	3.78
330	72.0	3.30	750	49.0	3.70
360	61.0	3.48	780	52.5	3.61
390	70.0	3.34	810	39.0	3.84
420	64.0	3.44	840	37.0	3.91
450	64.0	3.43	870	42.5	3.78
480	54.0	3.61	900	42.5	3.76
510	53.0	3.62			



Şekil 3.4: Farklı TAS'lar İçin Geri Kazanım Oranı ve kWh/Araç/km

Şekil 3.4'de gösterilen kesikli çizgiler artan TAS ile geri kazanım oranının değişimini göstermektedir. Koyu çizgili eğri ise Araç*km başına düşen enerji tüketimini göstermektedir.

Şekil 3.4 beklenen sonucu özetlemektedir: Artan TAS ile Araç*km başına düşen enerji tüketimi artarken, geri kazanım oranı azalmaktadır. Geri kazanım oranı ile

Araç*km başına düşen enerji tüketimi eğrileri salınım göstermekte ise de bu eğrilerin eğilimleri neredeyse doğrusaldır.

Bu sonuç, TAS'ın sadece yolcu konforunu değil enerji verimliliğini de arttırdığını göstermektedir. Bu nedenle daha kısa trenlerin küçük TAS ile kullanılması yolcu konforu ile birlikte enerji verimliliğini de maksimize etmeyi destekler yöndedir.

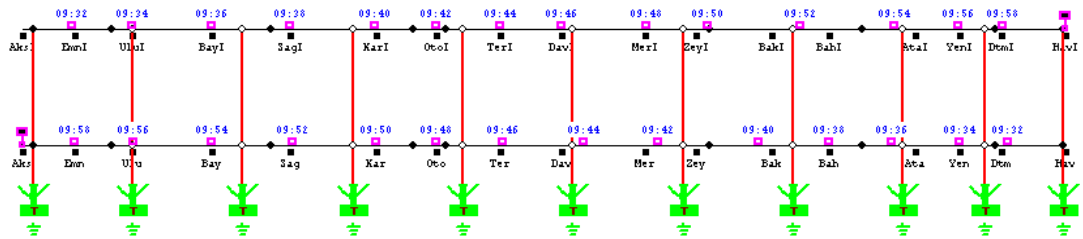
120 s ve 300 s TAS'lar için olan testler tekrarlanmış ve sistemin toplam enerji geri kullanım (reküperasyon) oranı hesaplanmıştır. Bunun anlamı, talep edilen toplam enerjinin yüzde kaçının frenleme enerjisinden sağlandığıdır. Testlerin sonuçları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Enerji Reküperasyon Oranları

Açıklama	TAS (s)	
	120	300
Araç*km için enerji tüketimi (kWh)	3.286	3.312
Şebekeden çekilen enerji (kWh), a	26451	10830
Regenere edilen enerji (kWh), b	14658	5979
Fren dirençlerinde yakılan enerji (kWh), c	3280	1600
Kullanılan regenere enerji (kWh), d=b-c	11378	4379
Toplam enerji tüketimi (kWh), e=a+d	37829	15209
Reküperasyon oranı (%), d/e*100	30.08	28.79
100% Geri kazanım oranı için reküperasyon oranı (%)	38.75	39.31

Tablo 3.3'deki son satır frenleme enerjisinin %100'ünün kullanılması durumunda elde edilebilecek reküperasyon oranını göstermektedir ki bu durumda reküperasyon oranı %39'a ulaşmaktadır. Verilen test hattında reküperasyon oranı %29 civarındadır.

Diğer bir parametre olan, frenleme ivmesi, üzerinde detaylı çalışmadan önce, iki simülasyon testi ile 2 ilave trafo merkezi ilave edilerek güçlendirilmiş bir cer gücü sisteminin etkisine kısa bir bakış yapılmıştır.



Şekil 3.5: İlave TM'li Konfigürasyon

Şekil 3.5'de güçlendirilmiş cer gücü sistem konfigürasyonu gösterilmiştir. Trafo merkezleri hat boyunca daha eşit bir şekilde dağıtılarak hattı beslemesi sağlanmıştır. 120 s ve 300 s TAS'lar ile yapılan iki test sonucu

Tablo 3.4'de özetlenmiştir.

Tablo 3.4: Hatta TM Eklenmesi Durumunda Enerji Reküperasyon Oranları

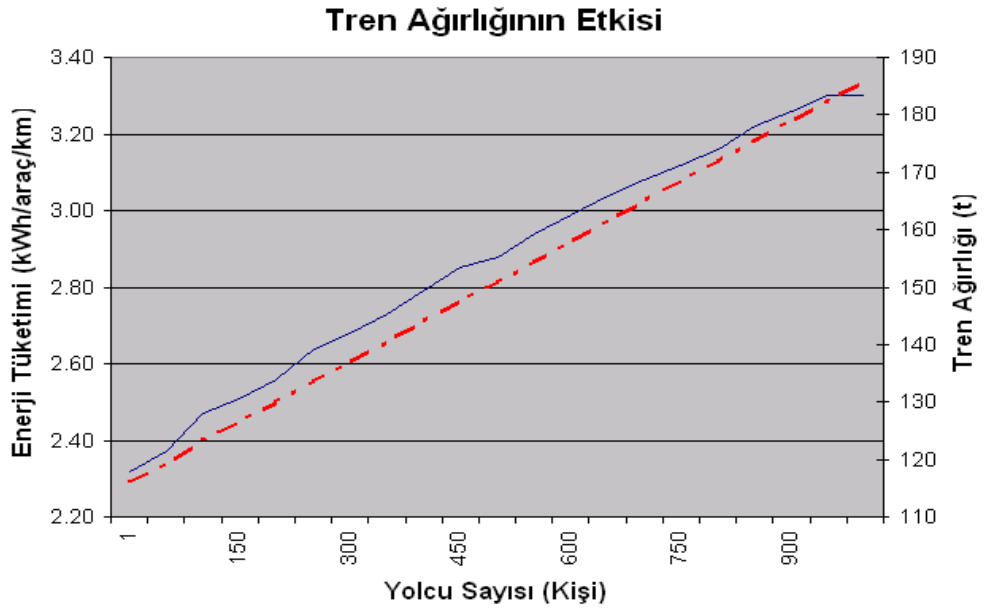
Açıklama	TAS (s)	
	120	300
Araç*km için enerji tüketimi (kWh)	3.225	3.250
Rekuperasyon oranı (%)	30.29	29.41
100% geri kazanım oranı için rekuperasyon oranı (%)	39.56	39.78

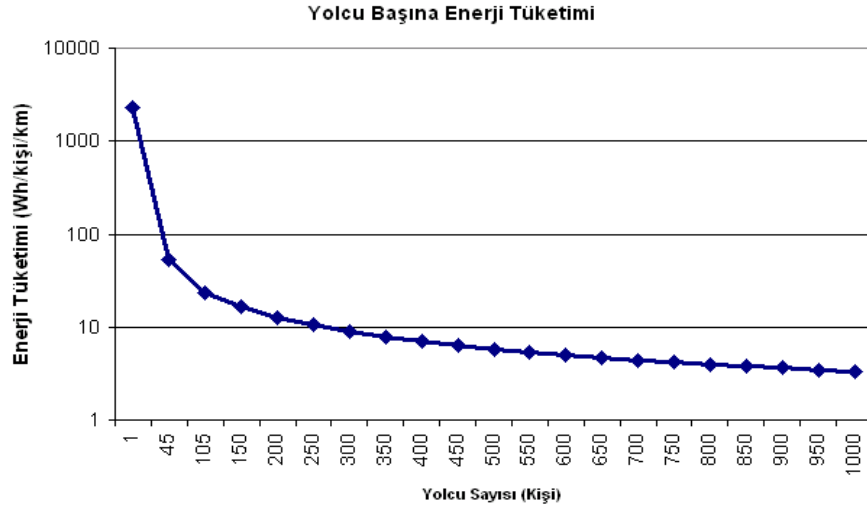
Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'deki değerler trafo merkezi sayısının artırılmasının rekuperasyon oranına fazla etkisi olmadığını, fakat araç*km başına düşen enerji tüketimini çok az da olsa azalttığını göstermektedir. Bunun sebebi yük dağılımının iyileşmesi sonucu hat kayıplarının azalmasıdır.

3.3.2 Tren Ağırlığının Etkisi

Doğal olarak trenlerin ağırlığı doluluk oranına bağlıdır. Tren içinde seyahat eden yolcu sayısı arttıkça trenin ağırlığı ve dolayısı ile enerji tüketim miktarı artacaktır. Bunun etkisini araştırmak için boş araçtan tam yüke kadar tren içindeki yolcu sayısı 50'şer artırılarak testler yapılmıştır. Simülasyonlarda yolcu ağırlığı 70 kg olarak alınmıştır. Testlerin sonuçları Şekil 3.6'da verilmiştir.

Şekil 3.6'da kesikli doğrusal çizgi tren ağırlığını, diğer çizgi ise araç*km için enerji tüketimini vermektedir. Her iki eğrinin orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ancak, boş halde tam dolu hale kadar araç ağırlığı %60 artarken, enerji tüketimindeki artış %42 olmaktadır. Taşınan yolcu başına tüketilen enerji miktarı daha anlamlı bir değer olarak düşünülebilir. Bu parametrenin artan yolcu sayısı ile değişimi Şekil 3.7'de verilmiştir.

**Şekil 3.6:** Farklı Yolcu Sayıları İçin kWh/Araç/km) Ve Tren Ağırlığı



Şekil 3.7: Farklı Yolcu Sayıları İçin Wh/(kişi*km)

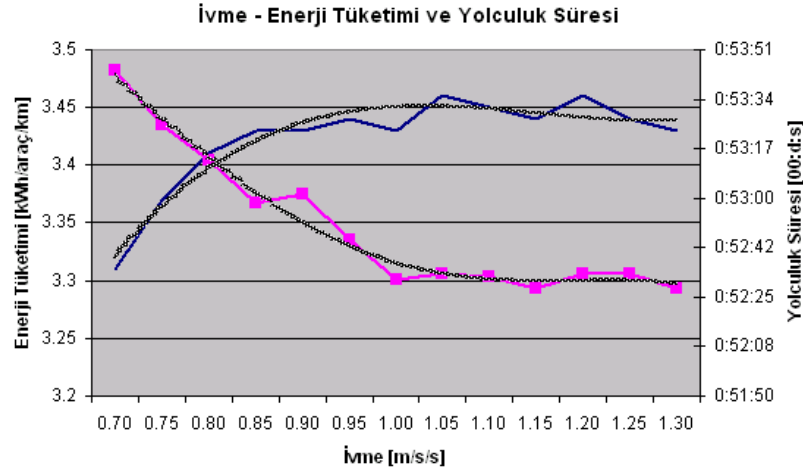
Şekil 3.7'den kişi*km için enerji tüketiminin 250 yolcu durumunda yaklaşık 10 Wh iken bu değer 1000 yolcu taşınması durumunda 3.30 Wh'e düştüğü görülmektedir.

3.3.3 Hızlanma İvmesinin (a) Etkisi

Simülasyonlarda kullanılan araçların hızlanma ivmesinin nominal değeri 0.7 m/s^2 'dir. Bu çalışmada hızlanma ivmesine ait değer, enerji tüketimine ve trenlerin geliş ve gidiş yönlerindeki toplam yolculuk süresi olan tur süresine etkisi araştırılmıştır. Hızlanma ivmesi 0.05 m/s^2 'lik aralıklarla, 0.7 m/s^2 'den 1.3 m/s^2 'e kadar artırılarak, 15 test, yapılmıştır. CPU zamanının azaltılması amacı ile simülasyonlar sadece 300 s TAS'lar için yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.5'de verilmiştir. Değerler grafik halinde Şekil 3.8'de sunulmuştur.

Tablo 3.5: Farklı Hızlanma İvmeleri İçin Enerji Tüketimi ve Tur Süresi

İvme (m/s^2)	Enerji Tüketimi $\text{kWh}/(\text{Araç} \cdot \text{km})$	Tur Süresi (35 km için)
0.70	3.31	0:53:44
0.75	3.37	0:53:25
0.80	3.41	0:53:13
0.85	3.43	0:52:58
0.90	3.43	0:53:01
0.95	3.44	0:52:45
1.00	3.43	0:52:31
1.05	3.46	0:52:33
1.10	3.45	0:52:32
1.15	3.44	0:52:28
1.20	3.46	0:52:33
1.25	3.44	0:52:33
1.30	3.43	0:52:28



Şekil 3.8: Farklı Hızlanma İvmeleri İçin kWh/Araç/km ve Tur Süresi Grafiği

Beklenildiği gibi Şekil 3.8 incelendiği zaman artan ivme ile enerji tüketiminin arttığı, yolculuk süresinin ise azaldığı görülmektedir. Her iki eğriden de görüldüğü üzere 1.05 m/s^2 ivme değerinden sonra eğriler düzleşmektedir. Bunun sebebi araçların üretebileceği cer kuvvetidir. Tam yüklü bir treni, bu ivme değerinin üzerinde ivmelendirmeye tren setinin gücü yetmeyecektir. Sadece yokuş inilirken bu değer aşılabılır, ancak izin verilen maksimum ivme değeri, bu durumlar gözetilerek, sınırlandırılmıştır.

3.3.4 Frenleme İvmesinin Etkisinin Araştırılması

Şekil 3.9'da testlerde kullanılan araçların elektrik ve mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Mechanical Properties			
Maximum Acceleration [m/s²]:	0.7	Maximum Velocity [km/h]:	80
Maximum Deceleration [m/s²]:	1.1	Empty Weight [kg]:	29000
Emergency Brake Deceleration [m/s²]:		Loaded Weight [kg]:	50200
Front Area [m²]:	8	Rotational Mass Factor [%]:	
Number of Axles:	6	Number of Passengers:	250
Safety Distance [m]:	55	Comfort Rate [m/s³]:	1
Length [m]:	23		
Electrical Properties			
Auxiliary Power [kW]:	27	Minimum Operating Voltage [V]:	525
Allowed Maximum Voltage in Braking [V]:	900	Maximum Operating Voltage [V]:	900
		Nominal Operating Voltage [V]:	750

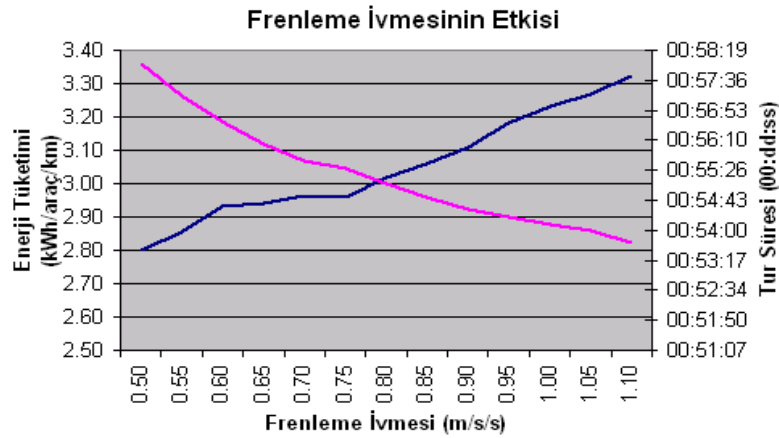
Şekil 3.9: Araçlara Ait Elektrik ve Mekanik Özellikler

Şekil 3.9'da, frenleme ivmesinin (a_b) nominal değeri 1.1 m/s^2 'dir. Bu frenleme ivmesi 0.05 m/s^2 'lik aralıklarla, 0.5 den 1.1 m/s^2 ' e kadar arttırılarak 13 simülasyon yapılmıştır. CPU zamanının kısaltılması amacı ile simülasyonlar 300 s TAS'lar için yapılmıştır.

Tablo 3.6'da değişik frenleme ivme değerlerindeki test sonuçlarından alınan veriler gösterilmiştir. Tablo 3.6' dan da görüleceği üzere frenleme ivmesinin azaltılması, enerji geri kazanım oranına etki etmektedir. Daha düşük frenleme ivmesi daha yüksek geri kazanım oranı vermektedir. Ayrıca Araç*km başına tüketilen enerji frenleme ivme oranı ile birlikte azalmaktadır. Ancak, bu kazançlara karşılık bir kayıp oluşmaktadır; çok düşük frenleme ivmeleri için yolculuk süresi önemli bir şekilde artmaktadır. 1.1 m/s² ve 0.50 m/s² frenleme oranları için tur zamanında 286 s'lik bir fark oluşmaktadır. Araç*km başına enerji tüketiminin ve tur süresinin değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.6: TAS 300 s'de Farklı a_b için Geri Kazanım Oranı ve Enerji Tüketimleri

Frenleme İvmesi (m/s ²)	Geri Kazanım Oranı (%)	kWh / Araç*km	Tur Zamanı (s)
0.50	83.96	2.80	3749
0.55	81.79	2.85	3698
0.60	78.55	2.93	3657
0.65	79.93	2.94	3621
0.70	80.34	2.96	3596
0.75	81.81	2.96	3581
0.80	80.05	3.02	3558
0.85	78.76	3.06	3536
0.90	77.55	3.11	3517
0.95	74.85	3.18	3503
1.00	74.03	3.23	3490
1.05	72.77	3.27	3480
1.10	70.97	3.32	3463



Şekil 3.10: Tur Süresi ve kWh/Araç/km - a_b Eğrileri

Şekil 3.10'dan frenleme ivme oranının artması ile birlikte Araç*km başına enerji tüketiminin artarken tur süresinin azaldığı görülmektedir. Farklı frenleme ivme oranlarının etkisinin daha iyi anlaşılması için 3 adet test daha yapılmıştır. Fakat bu simülasyonlarda TAS 150 s alınmıştır. Bu üç simülasyonun sonuçları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7: TAS 150 s’de Farklı a_b İçin Geri Kazanım Oranı ve Enerji Tüketimleri

Frenleme İvmesi (m/s ²)	Geri Kazanım Oranı (%)	kWh/ Araç*km
1.10	90.53	3.00
0.95	91.14	2.91
0.80	92.12	2.81

Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’deki sonuçlar karşılaştırıldığında, geri kazanım oran değeri 150 s’lik TAS simülasyonlarında sadece %1.59 artarken, 300 s’lik TAS simülasyonlarında bu artış miktarı %9.08 olarak gerçekleşmiştir.

Bu temel testlerin sonuçlarına bakılarak frenleme ivmesinin azaltılmasının kısa TAS’larda daha uzun TAS’larda olduğu kadar etkili olmadığı söylenebilir. Bu uygulamanın yolculuk süresine oldukça olumsuz bir etkisi vardır.

3.3.5 Tren İç İhtiyacının Etkisinin Araştırılması

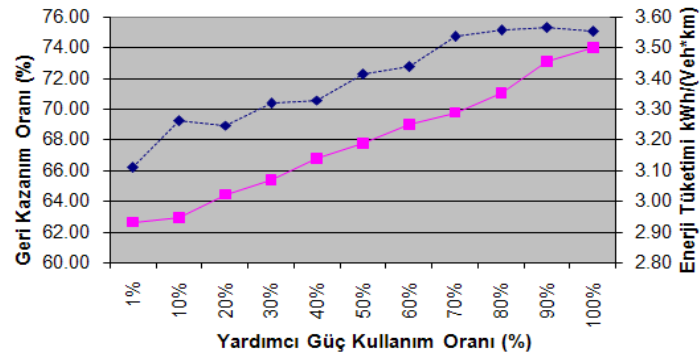
Trenler sadece hareket için enerji çekmez, ayrıca klima ve aydınlatma gibi yardımcı sistemler için de enerji çeker. Simülasyonlarda kullanılan araçların nominal yardımcı güç değeri 27 kW’tır. Bütün simülasyonlar sırasında bu gücün %70’inin her zaman talep edildiği kabul edilmiştir.

Yardımcı servislerin enerji talebi tren regeneratif modda iken frenleme enerjisinden sağlanmaktadır. Diğer zamanlarda bu enerji, katener sistemi üzerinden, hatta bulunan ve frenleyen trenlerden veya şebekeden sağlanmaktadır.

Yardımcı güçlerin kullanım oranı geri kazanım oranını ve enerji tüketimini etkilemektedir. 11 değişik yardımcı güç kullanım oranı kullanılarak simülasyon testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 3.8’de özetlenmiştir. Şekil 3.11’de enerji tüketiminin değişimi görülmektedir.

Tablo 3.8: TAS 300 s’de Farklı Yardımcı Güç Kullanım Oranları İçin Geri Kazanım Oranı ve Enerji Tüketimleri

Yardımcı Güç Kullanım Oranı (%)	Geri Kazanım Oranı (%)	kWh/ veh*km
1	66.19	2.93
10	69.24	2.95
20	68.95	3.02
30	70.39	3.07
40	70.58	3.14
50	72.29	3.19
60	72.73	3.25
70	74.72	3.29
80	75.13	3.35
90	75.30	3.45
100	75.08	3.50



Şekil 3.11: TAS 300 s için Enerji Tüketimi – Yardımcı Güç Kullanım Oranı

Şekil 3.11'deki eğri yardımcı güç kullanım oranına bağlı olarak Araç*km başına düşen enerji tüketimini ve geri kazanım oranını temsil etmektedir. Eğri beklenen sonucu göstermektedir: Artan yardımcı güç kullanım oranı ile Araç*km başına enerji tüketimi ve geri kazanım oranı artmaktadır.

6 simülasyon daha yapılarak, daha küçük TAS'larda farklı yardımcı güç kullanım oranlarının etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Tablo 3.9'da verilmiştir. Benzer sonuçlar burada da elde edilmiştir: Artan iç ihtiyaç kullanım oranı ile geri kazanım oranı ve enerji tüketimi artmıştır.

Tablo 3.9: TAS 150 s İçin Geri Kazanım Oranı ve kWh/Araç*km – Yardımcı Güç Kullanım Oranı Değerleri

Yardımcı Güç Kullanım Oranı (%)	Geri Kazanım Oranı (%)	kWh/Araç*km
1	88.31	2.55
20	88.90	2.68
40	89.91	2.80
60	90.90	2.93
80	91.01	3.08
100	92.45	3.20

3.4 Boşta Gitme İşletme Şartlarının İncelenmesi

3.4.1 Normal Duruma İlişkin Test

4'lü dizilerden oluşan trenler hattın her iki ucundan 180 s ara ile kaldırılmışlardır. Simülasyon testlerinde kullanılan veriler gerçekçi veriler olup daha önceki çalışmalarda kullanılan verilerdir.

Bu durumda, trenlere hatta hız sınırı olmayan yerlerde izin verilen maksimum hız olan 80 km/h'e kadar hızlanmaları ve bu hızda kalmaları emri verilmiştir. Bu durum işletme hızı açısından en iyi durumdur, ancak enerji tüketimi de fazladır. Sonuçlar Tablo 3.10 ve Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.10: Normal Durumda Ana Parametreler

Hat Sayısı :	2	Min. Tren Gerilimi [V] :	647.04	Mevcut Zaman :	09:59:59
TM Sayısı :	9	Max. Ray Gerilimi [V] :	52.85	Simülasyon Süresi :	00:12:22
Depo Sayısı :	2	Toplam Araç km :	5396.11		
Tren Sayısı :	18	Max. Güç [kW] :	21246.66	Max. RMS Güç [kW]:	10290.46
Paralleleme :	0	Toplam Enerji [kWh] :	16848.53	kWh/(Araç*km) :	3.12

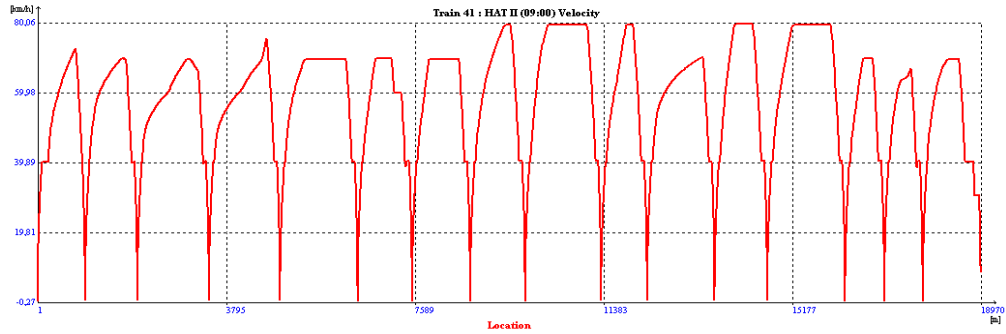
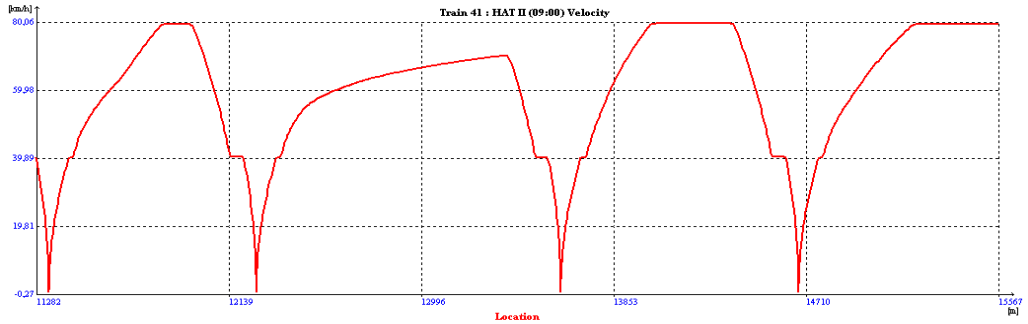
Tablo 3.11: Normal Durumda Her İki Yöndeki Tren İstatistikleri

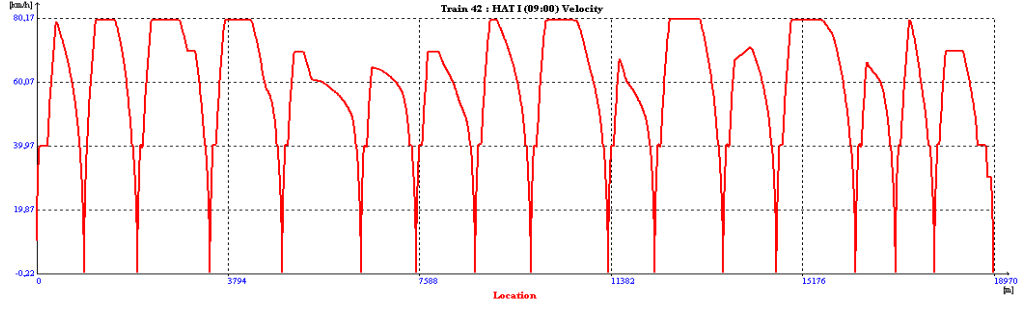
İlk İstasyon	Son İstasyon	Mesafe [m]	Sayı	Yolculuk Süresi				Ortalama Hız [km/h]
				Min	Mak	Ort	Std Dev	
Havl	Emnl	18021	31	26:35	27:09	26:53	8.75	40.20
Aks	Dtm	17801	31	26:27	27:15	26:53	10.58	39.72

Araç*km enerji tüketimi 3.122 kWh olarak saptanmıştır. Her iki yöndeki ortalama toplam yolculuk süresi 53 dakika 46 s'dir.

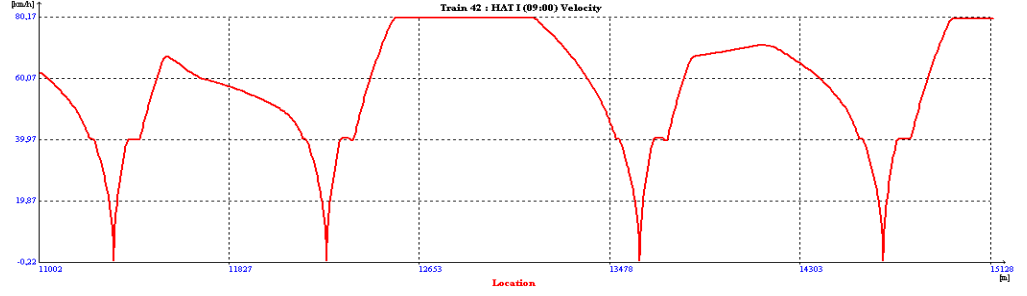
Hatta yolculuk yapan trenlere ait hız – yer grafikleri ve bunların yakınlaştırılmış durumları Şekil 3.12 - Şekil 3.15'de verilmiştir.

Şekil 3.12'den görüleceği üzere trenler, özellikle Aksaray – Havalimanı yönünde çalışanlar, hattın büyük kısmında maksimum hız olan 80 km/h'a erişememektedirler. Bu durum hattaki eğimler ve araçların karakteristiklerinden ve hız sınırlamalarından kaynaklanmaktadır.

**Şekil 3.12: Aksaray – Havalimanı Yönünde Çalışan Bir Trene Ait Hız – Yer Grafiği****Şekil 3.13: Şekil 3.12'de Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali**



Şekil 3.14: Havalimanı – Aksaray Yönünde Çalışan Bir Trene Ait Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.15: Şekil 3.14'de Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali

3.4.2 $V_{max} = 70 \text{ km/h}$ 'a İndirilmiş Durum

Trenlerin hattın hangi bölgesinde kaç km maksimum hız ile gidebileceği sinyalizasyon sisteminde tanımlanır. Emniyetli bir yolculuk için bu şarttır. Bu hız sınırlamaları, hattaki dönüşler, makaslar ve istasyonlar tarafından belirlenir.

Aksaray – Havalimanı metro hattında trenlerin maksimum 80 km/h ile gitmelerine izin verilmekte olup, V_{max} hızının belli bir miktar aşılması durumunda, tren koruması otomatik devreye girerek treni durdurur.

Taksim – 4 Levent metro hattında otomatik tren işletimi idaresindeki sistemde, doruk saatler haricinde, tarifenin önünde giden araçlara daha düşük maksimum hız emri verilerek enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu çalışmada benzeri bir uygulamanın, Aksaray – Havalimanı hattında etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, normal durum simülasyonunda V_{max} hızı 70 km/h olarak tanımlanmış ve test tekrar edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.12 ve Tablo 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.12: Azaltılmış Maksimum Hız Durumunda Ana Parametreler

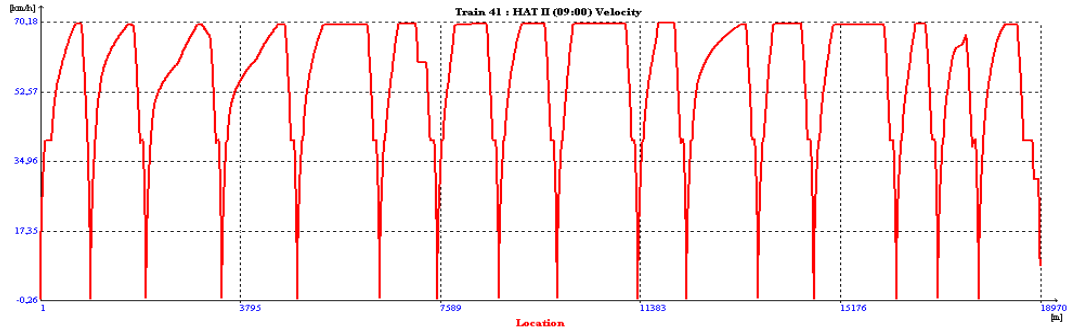
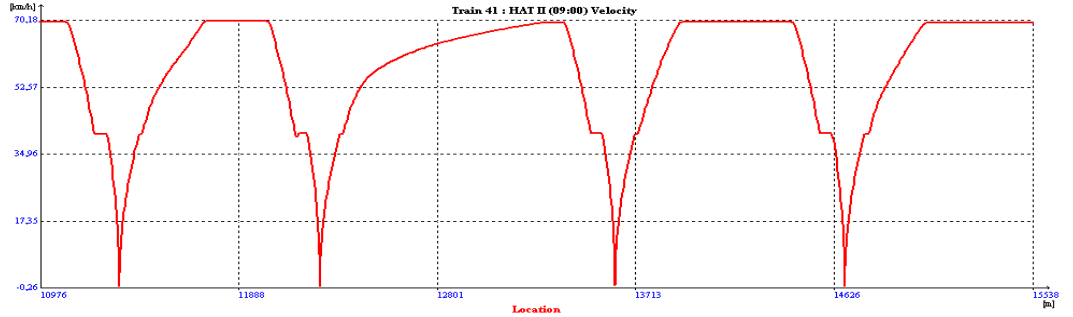
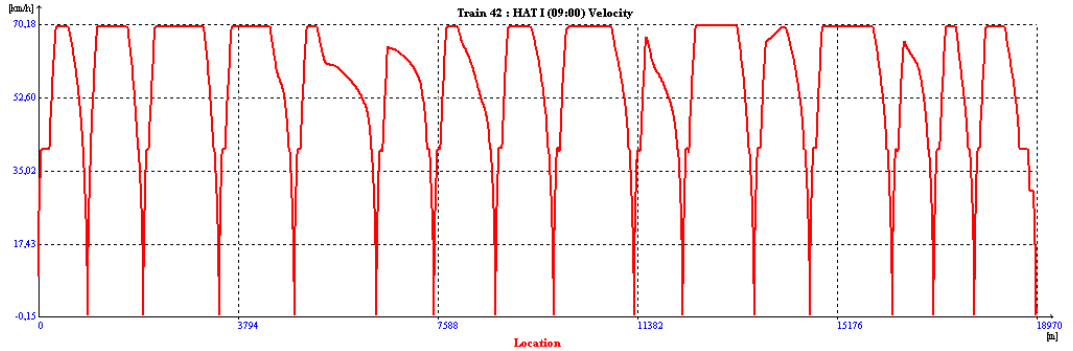
Hat Sayısı :	2	Min. Tren Gerilimi [V] :	646.38	Mevcut Zaman :	09:59:59
TM Sayısı :	9	Max. Ray Gerilimi [V] :	53.06	Simülasyon Süresi :	00:04:25
Depo Sayısı :	2	Toplam Araç km :	5388.74		
Tren Sayısı :	18	Max. Güç [kW] :	20061.96	Max. RMS Güç [kW]:	9671.23
Paralleleme :	0	Toplam Enerji [kWh] :	15473.37	kWh/(Araç*km) :	2.87

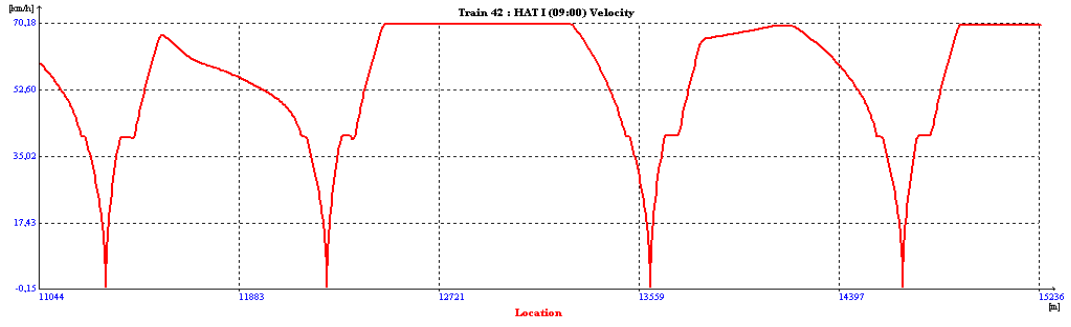
Tablo 3.13: Azaltılmış Maksimum Hız Durumunda Her İki Yöndeki Tren İstatistikleri

İlk İstasyon	Son İstasyon	Mesafe [m]	Sayı	Yolculuk Süresi				Ortalama Hız [km/h]
				Min	Mak	Ort	Std Dev	
Havl	Emnl	18020	31	27:02	27:46	27:22	9.55	39.49
Aks	Dtm	17799	31	26:41	27:26	27:05	10.81	39.42

Bu değerler incelendiği zaman, beklenildiği gibi normal duruma göre ortalama yolculuk süresi artarken enerji tüketimi azalmıştır.

Hatta yolculuk yapan trenlere ait hız – yer grafikleri ve bunların yakınlaştırılmış durumları Şekil 3.16 - Şekil 3.19'da verilmiştir. Şekil 3.16'dan görüleceği üzere trenler hattın büyük kısmında maksimum hız olan 70 km/h'a erişebilmektedirler.

**Şekil 3.16:** Azaltılmış Maksimum Hız için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği**Şekil 3.17:** Şekil 3.16'da Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali**Şekil 3.18:** Azaltılmış Maksimum Hız için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.19: Şekil 3.18’de Verilmiş Olan Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali

3.4.3 Boşta Gitme Durumları

Bu işletme şartında trenlere maksimum hızı koruyarak gitme yerine belli şartlar altında tanımlanmış noktalarda ivme kolunu sıfıra alarak boşta gitmeleri emri verilir. Hattın geometrisine bağlı olarak bu noktaların belirlenmesi çok büyük çözüm uzayının analizini gerektirmektedir. Tipik bir boşta gitme durumuna ait hız profili Şekil 1.13’de verilmiştir. Aşağıdaki bölümde bu profil üzerindeki bazı parametrelerin enerji tüketimi ve yolculuk süresi üzerine etkileri verilmiştir.

Durum I ($V_C = 60 \text{ km/h}$, $V_{RM} = 45 \text{ km/h}$, $S_{CS} = 250 \text{ m}$)

Trenler istasyondan ayrıldıktan sonra 250 m yol aldıktan sonra hızları 60 km/h’a erişmişse boşta gitmeye geçerler. Karşı dirençlerin etkisi ile yavaşlayan trenin hızı 45 km/h’ın altına inerse tekrar maksimum ivme ile hızlanmaya geçer. Dolayısı ile eğer mesafe çok uzun ve hat fazla eğimli ise 15 km/h’lık bir bant aralığında tren boşta gitme-motor paternini tekrarlar. Doğal olarak, hat negatif eğimli yani yokuş aşağı ise 60 km/h’a gelince boşta gitmeye geçse de tren o bölge için tanımlanmış olan maksimum hıza erişene kadar hızlanmaya devam edecektir. Sonuçlar Tablo 3.14 ve Tablo 3.15’de verilmiştir.

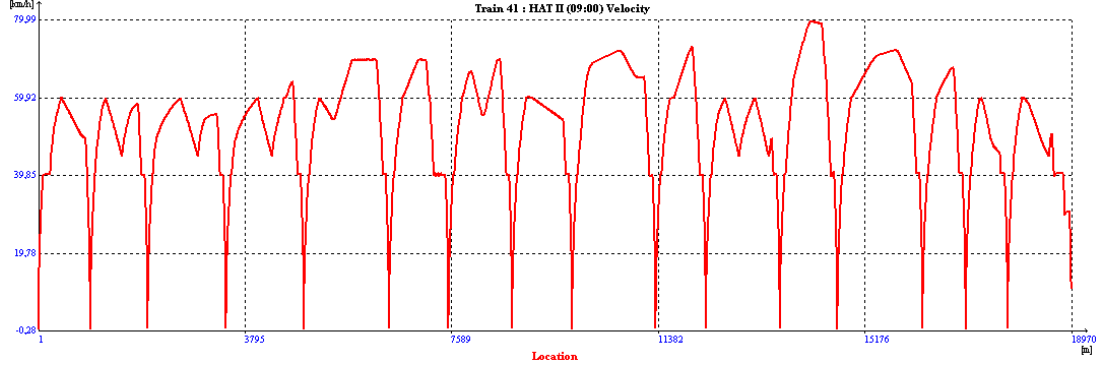
Tablo 3.14: Boşta Gitme Durumu - 1 için Ana Parametreler

Hat Sayısı :	2	Min. Tren Gerilimi [V] :	648.11	Mevcut Zaman :	09:59:59
TM Sayısı :	9	Max. Ray Gerilimi [V] :	54.90	Simülasyon Süresi :	00:12:06
Depo Sayısı :	2	Toplam Araç km :	5353.36		
Tren Sayısı :	20	Max. Güç [kW] :	20613.62	Max. RMS Güç [kW]:	9099.69
Paralelleme :	0	Toplam Enerji [kWh] :	13894.28	kWh/(Araç*km) :	2.60

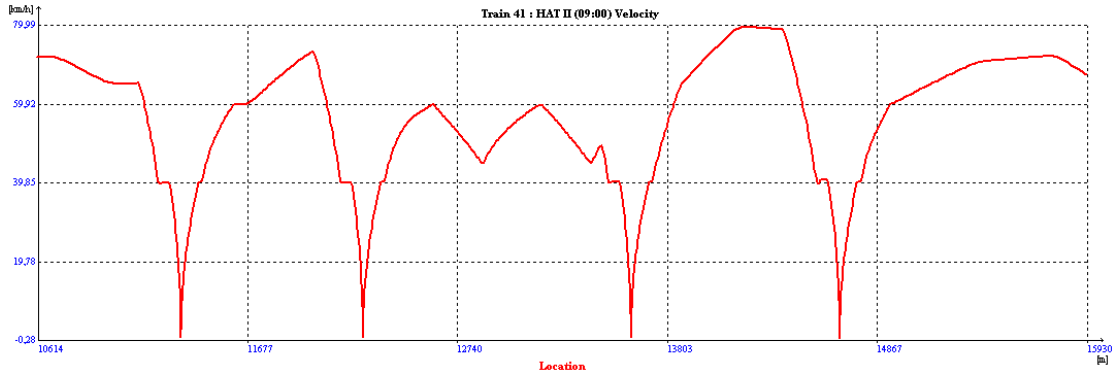
Tablo 3.15: Boşta Gitme Durumu - 1 için Tren İstatistikleri

İlk istasyon	Son İstasyon	Mesafe [m]	Sayı	Yolculuk Süresi				Ortalama Hız
				Min	Mak	Ort	Std Dev	
Havl	Emnl	18019	30	28:11	29:02	28:27	10.93	38.00
Aks	Dtm	17800	30	27:52	28:38	28:10	10.37	37.91

Tablo 3.14'den görüleceği üzere ciddi bir enerji tasarrufu elde edilmiştir, ancak bunun karşılığı olarak ciddi bir zaman kaybı oluşmuştur. Şekil 3.20'de verilen hız grafiğinden de bu durumun yolculuk konforu açısından çok uygun olmayacağı görülmektedir.



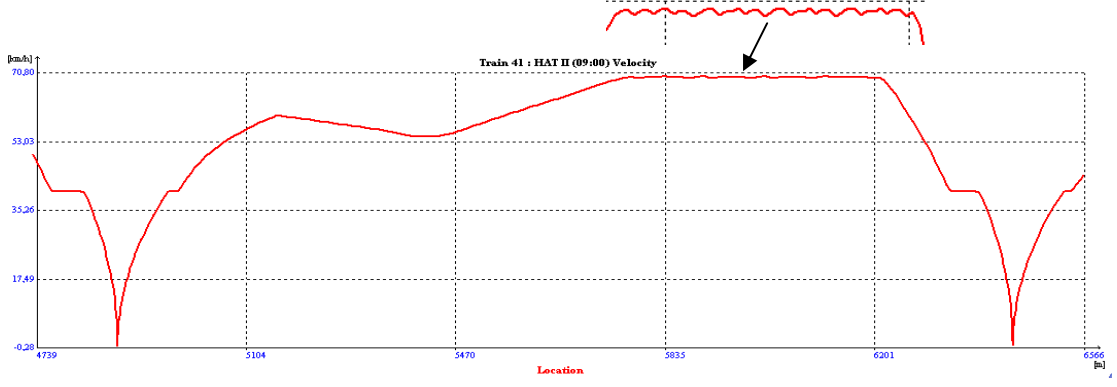
Şekil 3.20: Boşta Gitme Durumu -1 için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.21: Şekil 3.20'deki Grafiğin Yakınlaştırılmış Hali

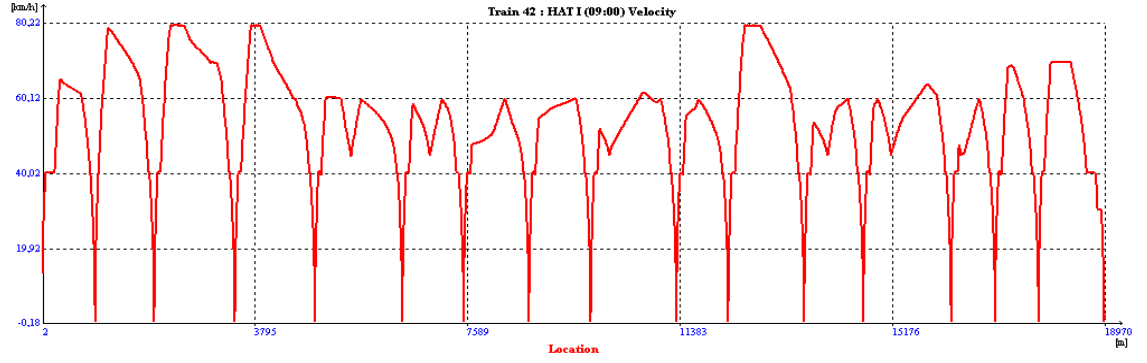
Şekil 3.21'deki yakınlaştırılmış grafikten görüleceği üzere ivmelenmekte olan tren 12650 m civarında 60 km/h hıza erişmiş ve boşta gitmeye başlamıştır. Karşı dirençler sebebi ile hız kaybı 45 km/h'e kadar devam etmiş ve tren tekrar motor moduna geçerek ivmelenmeye başlamıştır. Benzeri lojik işlemiş ve bu durum bir kere daha tekrar etmiştir. Üçüncü ivmelenme sırasında tren istasyona yaklaştığını fark ederek, istasyon girişindeki 40 km/h hız sınırlandırmasına riayet etmek için frenlemeye geçmiş ve istasyonda durmuştur. 6 adet diğer istasyonda daha buna benzer durum gerçekleşerek tren boşta gitme modunda iken tekrar ivmelenmek durumunda kalmıştır.

Aksi durum, yani süzülürken giderek hızlanma sebebi ile V_{max} 'a takılma durumu ise yaklaşık 13850 m'de gözlemlenmektedir. Bu noktada % -3.38 bir eğim vardır, ve boşta gitmeye geçen tren bunun etkisi ile hızlanmaktadır. Eğer tren o bölgedeki hız sınırını aşarsa frenlemeye geçerek tanımlanmış olan bu maksimum hızda tutmaya çalışacaktır. Bu durum, Şekil 3.22'deki grafikte daha net olarak görülmektedir.

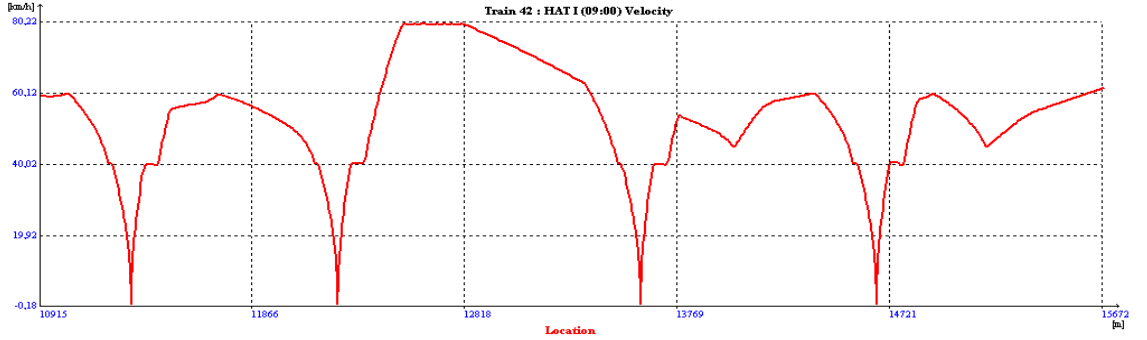


Şekil 3.22: Boşta Gitme Durumu -1 için Hızlanan Bir Trenin Hız Profili

Havalimanı – Aksaray trenlerine ait hız-yer grafiği ise Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.23: Boşta Gitme Durumu -1 için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.24: Şekil 3.23’ün Yakınlaştırılmış Hali

Tren bu yönde de 6 defa boşta gitme modunda iken tekrar motor konuma geçmek durumunda kalmıştır. Parametrelerin değiştirilmesi daha uygun olacaktır. Bu amaçla iki ilave boşta gitme testi daha yapılmıştır.

Durum 2 ($V_C = 70$ km/h, $V_{RM} = 50$ km/h, $S_{CS} = 400$ m)

Parametreler değiştirilerek simülasyon tekrar edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.16 ve Tablo 3.17’de ve grafikler ise Şekil 3.25 - Şekil 3.28’de verilmiştir.

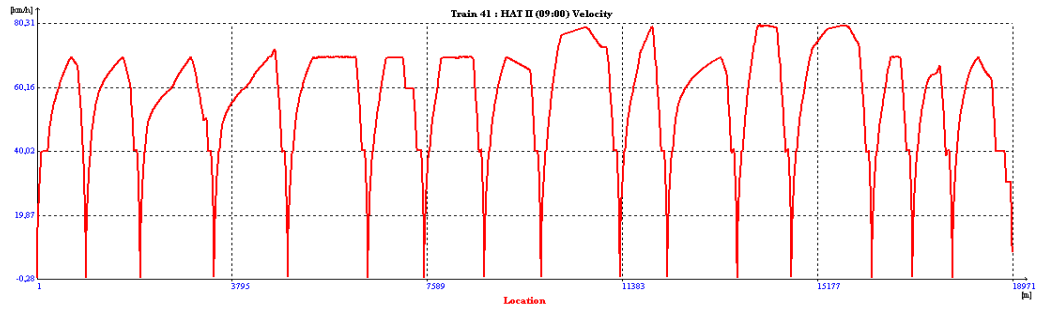
Tablolardaki değerlerden bir önceki durumuna göre enerji tüketimi artmış, ancak yolculuk süresi azalmış gözükmektedir. Şekillerdeki hız profilleri incelendiği zaman bu durumun yolcu konforu açısından daha uygun olacağı söylenebilir.

Tablo 3.16: Boşta Gitme Durumu - 2 için Ana Parametreler

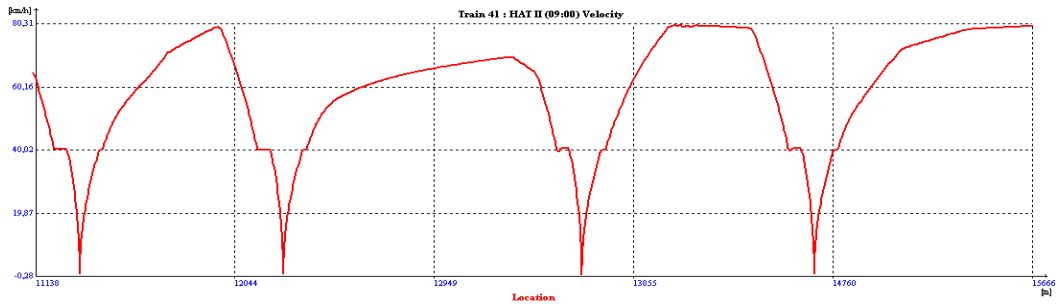
Hat Sayısı :	2	Min. Tren Gerilimi [V] :	646.17	Mevcut Zaman :	09:59:59
TM Sayısı :	9	Max. Ray Gerilimi [V] :	55.79	Simülasyon Süresi :	00:04:40
Depo Sayısı :	2	Toplam Araç km :	5382.57		
Tren Sayısı :	18	Max. Güç [kW] :	21564.71	Max. RMS Güç [kW]:	9933.68
Parallellleme :	0	Toplam Enerji [kWh] :	15597.48	kWh/(Araç*km) :	2.90

Tablo 3.17: Boşta Gitme Durumu - 2 için Tren İstatistikleri

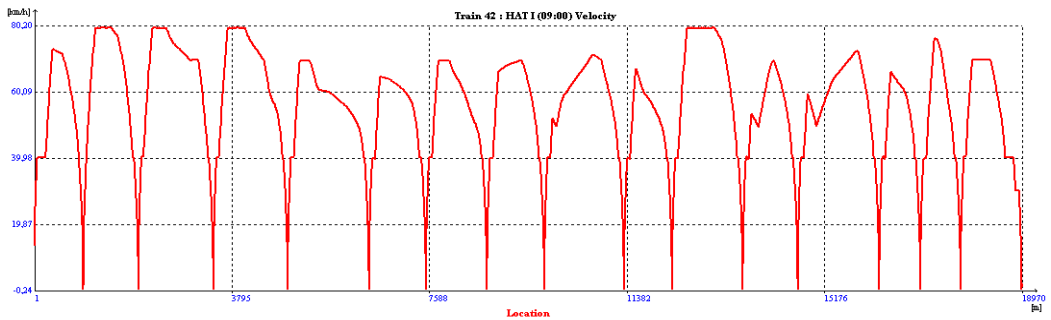
İlk İstasyon	Son İstasyon	Mesafe [m]	Sayı	Yolculuk Süresi				Ortalama Hız
				Min	Mak	Ort	Std Dev	
Havl	Emnl	18022	31	27:11	27:47	27:25	8.98	39.42
Aks	Dtm	17801	31	26:35	27:20	26:55	9.94	39.67



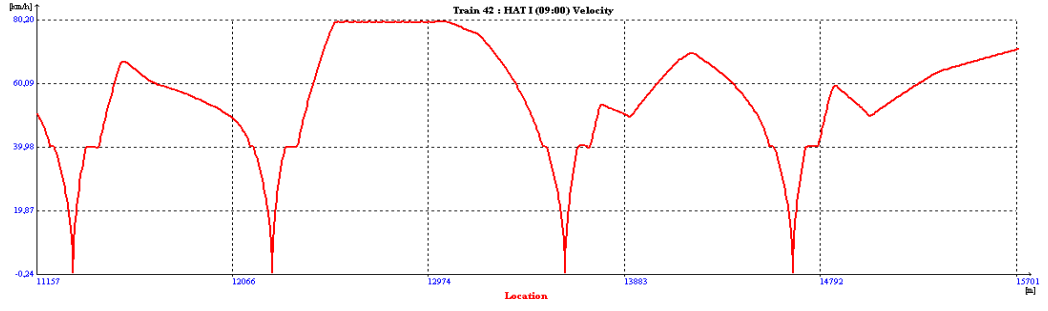
Şekil 3.25: Boşta Gitme Durumu - 2 için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.26: Şekil 3.25'in Yakınlaştırılmış Hali



Şekil 3.27: Boşta Gitme Durumu - 2 için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.28: Şekil 3.27'nin Yakınlaştırılmış Hali

Durum 3 ($V_{\max} = 70 \text{ km/h}$, $V_C = 70 \text{ km/h}$, $V_{RM} = 40 \text{ km/h}$, $V_{CS} = 500 \text{ m}$)

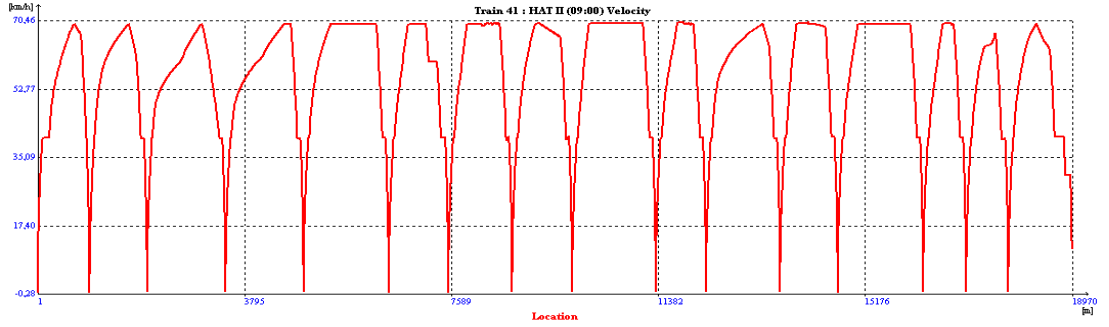
Parametreler tekrar değiştirilerek simülasyon yinelenmiştir. Sonuçlar Tablo 3.18 ve Tablo 3.19'da ve grafikler ise Şekil 3.29 - Şekil 3.32'de verilmiştir.

Tablo 3.18: Boşta Gitme Durumu - 3 için Ana Parametreler

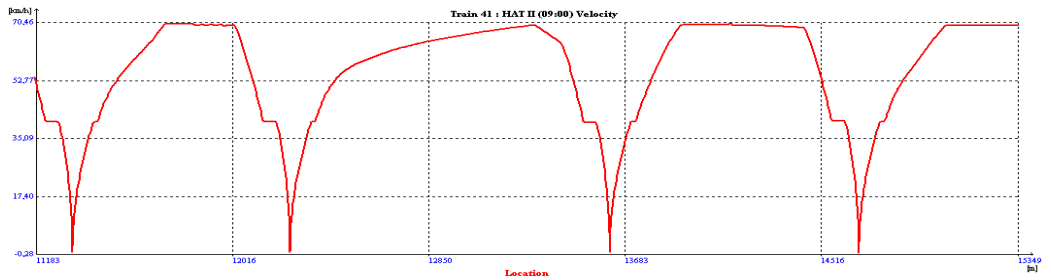
Hat Sayısı :	2	Min. Tren Gerilimi [V] :	642.16	Mevcut Zaman :	09:59:59
TM Sayısı :	9	Max. Ray Gerilimi [V] :	54.77	Simülasyon Süresi :	00:04:59
Depo Sayısı :	2	Toplam Araç km :	5380.55		
Tren Sayısı :	18	Max. Güç [kW] :	20070.89	Max. RMS Güç [kW]:	9494.38
Paralelleme :	0	Toplam Enerji [kWh] :	15080.63	kWh/(Araç*km) :	2.80

Tablo 3.19: Boşta Gitme Durumu - 3 için Tren İstatistikleri

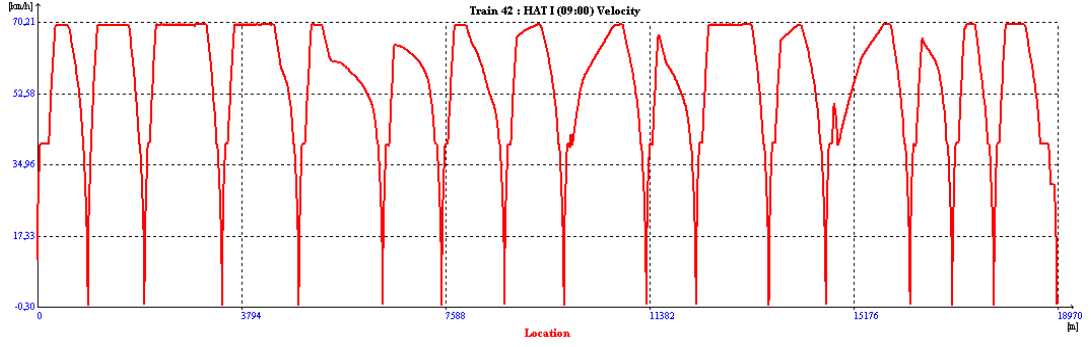
İlk İstasyon	Son İstasyon	Mesafe [m]	Sayı	Yolculuk Süresi				Ortalama Hız
				Min	Mak	Ort	Std Dev	
Havl	Emnl	18020	31	27:18	27:59	27:41	10.62	39.05
Aks	Dtm	17801	31	26:39	27:20	27:05	11.33	39.42



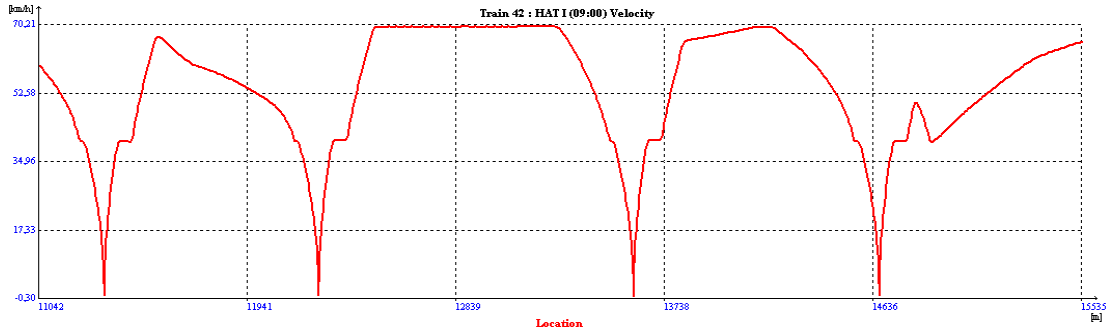
Şekil 3.29: Boşta Gitme Durumu - 3 için Aksaray – Havalimanı Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.30: Şekil 3.29'un Yakınlaştırılmış Hali



Şekil 3.31: Boşta Gitme Durumu - 3 için Havalimanı – Aksaray Hız – Yer Grafiği



Şekil 3.32: Şekil 3.31'in Yakınlaştırılmış Hali

3.4.4 Sonuçların Karşılaştırması

Bu bölümde gerçekleştirilen tüm simülasyon testlerinin sonuçları toplu şekilde Tablo 3.20'de verilmiştir.

Tablo 3.20: Test Sonuçlarının Karşılaştırma Tablosu

Açıklama	Normal Durumlar		Boşta Gitme Durumları		
	Vmax = 80	Vmax =70	60-45-250	70-50-400	70-40-500, Vmax=70
Toplam enerji tüketimi (kWh)	16848	15473.4	13894.3	15597.5	15080.63
Regenere edilen enerji (kWh)	9188.46	8844	6607.75	8281.58	8431.72
Dirençlerde yakılan enerji (kWh)	1515.52	1411	1182.79	1454.42	1438.37
Kümülatif geri kazanım oranı (%)	83.51	84.05	82.10	82.44	82.941
Geri kazanılan enerji (kWh)	7672.95	7433	5424.96	6827.16	6993.35
Enerji kaybı (kWh)	2027.71	1854.32	1577.93	1831.71	1787.34
Toplam yolculuk süresi (s)	3226	3267	3397	3260	3286
kWh/Araç/km	3.122	2.871	2.595	2.898	2803
Normal durum yolculuk süresine göre fark (%)		1.27	5.30	1.05	1.86
Normal durum enerji tüketimine göre fark (%)		-8.04	-16.88	-7.17	-10.22

Tablo 3.20'nin son iki satırı en hızlı, ancak en fazla enerji tüketimli hal olan normal duruma göre yüzdesel farkları vermektedir. Son satır enerji tüketimindeki tasarrufu verirken, bir üstteki satır ise buna karşılık yolculuk süresindeki artışı vermektedir.

Maksimum hızın 80 km/h'den 70 km/h'a indirilmesi %8'lik bir enerji tasarrufu sağlayacaktır. Buna karşılık yolculuk süresi ise %1.27 artacaktır.

İlk boşta gitme durumunda yaklaşık %17 enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmektedir. Ancak, bu durumda yolculuk süresinin %5.3 artacağı görülmektedir. 1 saatlik toplam parkur süresi için bu 3.18 dakikalık süre uzaması demektir. 3 dakikalık sefer yapılan işletme şartı için dizi sayısının bir artırılması anlamına gelen bu boşta gitme modunun normal şartlarda gerçekleştirilmesi zordur.

Ancak, 70-50 km/h arası boşta gitme durumunda yolculuk süresi sadece %1 artmaktadır. 1 saatlik parkurda 37 saniyelik bir süre uzamasına karşılık %7.2 enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Son test durumunda ise 67 saniye süre artışına karşılık %10.2 tasarruf elde edilebileceği görülmektedir. Hatta 67 s açık, rahatlıkla kapatılabilir.

4 İKİ İSTASYON ARASINDA TRENLERİN BOŞTA GİTME NOKTALARININ OPTİMİZASYONU

Bir önceki bölümdeki birkaç örnek çalışmada trenlerin boşta gitmeye başlama noktalarının enerji tüketimine ve yolculuk süresine doğrudan etki yaptıkları gösterilmişti. Boşta gitmeye başlama noktalarının enerji tüketimi ve yolculuk süresine göre optimizasyonu ile gerçekleştirilecek olan enerji tasarruflu sürüş kontrolünün en verimli yöntem olduğu vurgulanmıştı.

Karmaşık sistemlerde en uygun boşta gitmeye başlama noktalarının analitik olarak saptanmasının neredeyse imkansız olduğu, dolayısı ile genetik algoritma gibi sezgisel yöntemlerle optimum noktalara yaklaşılabileceği, bu sebeble bu çalışmada, Yapay Sinir Ağlarının (YSA) gerçek sistem simülatörlerinin yerine alacak şekilde eğitilebileceği ve bu ağların optimizasyon esnasında Genetik Algoritma (GA) tarafından kullanılması planlandığı Bölüm 1’de anlatılmıştı.

Çalışmanın bu aşamasında SimuX çıktıları kullanılarak Matlab’ın YSA aracında oluşturulan ağların eğitilmesi ve eğitilmiş olan bu ağın yine Matlab’ın GA aracı tarafından çağrılarak kullanılması sağlanmıştır.

İlk olarak basit bir hat güzergahı ile başlanmış ve 2 istasyonlu düz bir hat’a ilişkin optimizasyon gerçekleştirilmiş, ve daha sonra daha karmaşık durumlar ele alınmıştır.

4.1 İki İstasyon Arasında Çalışan Tek Tren Durumunun Optimizasyonu

Literatürde bulunan daha önceki çalışmalarda da ele alınmış olan bu durum, yukarıda önerilen yöntemle optimize edilmeye çalışılmıştır. Aşağıda ele alınan test hattına ilişkin bilgiler verilmiştir. Hattın SimuX gösterimi Şekil 4.1’de görülmektedir.

4.1.1 Test Hattı

Hat uzunluğu	:1 km
Araç Sayısı	:1 tahrikli araçtan oluşmuş, 23 m.
Yolcu istasyonu	:2
Trafo merkezi	:1 adet, hat sonunda

Nominal Gerilim :750 VDC

Katener sistemi direnci:($4.44 \times 10^{-5} \Omega/m$)

Maksimum hız :80 km/h

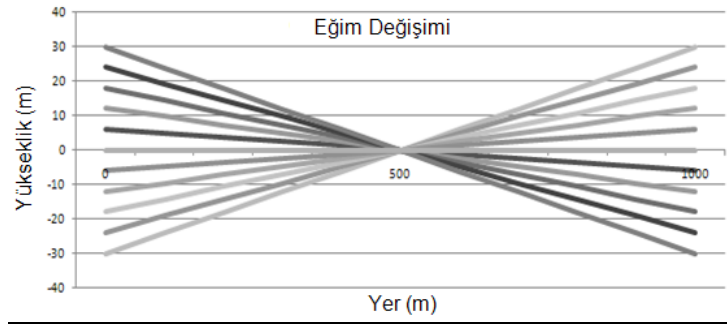


Şekil 4.1: Test Hattının SimuX Gösterimi

Yapılan tüm simülasyonlarda Aksaray – Havalimanı metro hattında kullanılan ABB araçlarına ait karakteristikler kullanılmıştır. Bir araca ait cer kuvveti – hız diagramı Şekil 2.6’da, elektriksel ve mekaniksel ana veriler ise Şekil 3.9’da verilmiştir. Aracın maksimum hızlanma ivmesi 0.7 m/s^2 , sabit olan nominal frenleme ivmesi ise 1.1 m/s^2 ’dir.

4.1.2 Farklı Hat Eğimlerinde Boşta Gitme Noktasının Enerji Tüketimi (E) ve Yolculuk Süresi (T) Üzerine Etkisi

Şekil 4.1’de verilen hattın orta noktasında, 500 m, bir eğim değişim noktasının olduğu varsayılmıştır. Hattın iki bölümündeki eğim değeri $\%-3$ ’den $\%+3$ ’e $\%0.6$ ’lık aralıklarla değiştirilerek elde edilen 121 farklı hat profilinin eğimlerin değişimleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



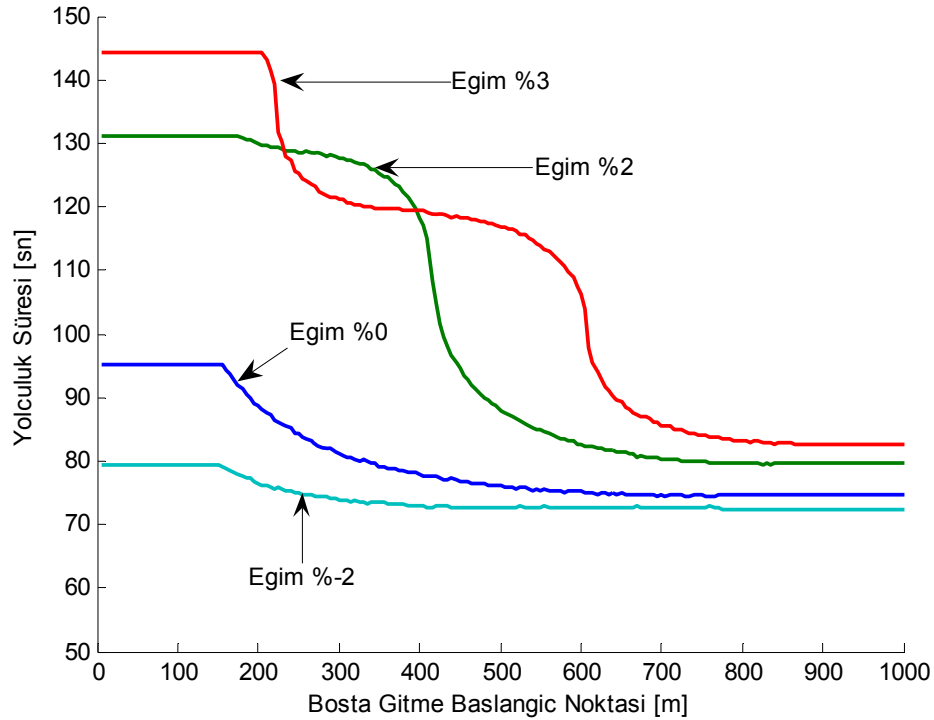
Şekil 4.2: Test Hattının Eğim Profilleri

Bu farklı hat profilleri için Simulasyonlar yapılmış ve her bir profil için boşta gitme noktası 5 m’den 1000 m’ye kadar 5 m aralıklarla arttırılarak simülasyonlar tekrar edilmiştir. Bunun için Matlab’da yazılmış olan Run.m dosyası (bkz. EK B) çağırılmıştır. Boşta gitmeye başlama hızı (V_C) 50 km/h, sona erdirme hızı (V_{RM}) ise 1 km/h olarak tanımlanmıştır. SimuX sırası ile benzetimleri yaparak istenen parametreleri bir “.txt” dosyasına kaydetmiştir. Bu dosyada; boşta gitme başlama

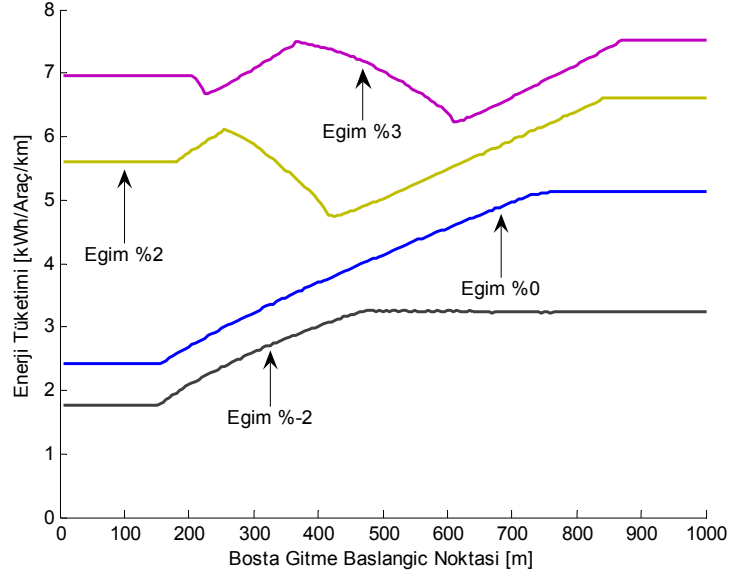
noktası, kWh/Araç/km enerji tüketimi (E) ve yolculuk süresi (T) gibi optimizasyonda kullanılacak olan önemli parametreler bulunmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de %-2, %0, %+2, ve %+3 sürekli eğimli hat durumları için T ve E’nin boşta gitme noktasına göre değişimleri verilmiştir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’deki grafiklerden E’deki değişimin T’deki değişime oranla daha doğrusal olmayan özellik taşıdığı tespit edilebilir. E’nin doğrusallığı yokuş yukarı eğim değerinin yükselmesiyle daha fazla bozulmaktadır. Ayrıca, %+2 ve %+3 eğim durumlarındaki yolculuk süresine ait eğriler belli noktalarda çakışmaktadır. Bunun temel nedeni; boşta gitmekte olan aracın aşırı hız kaybederek tanımlanmış olan 1 km/h tekrar ivmelenme hızına (V_{RM}) inmesi sebebi ile aracın tekrar ivmelenmeye ihtiyaç duymasıdır. Çok erken başlatılan boşta gitme durumlarında boşta gitme, tekrar hızlanma döngüsü birden fazla tekrar edebilir.

Tam gaz işletme durumunda tüketilen enerji miktarı, E_{max} , %-2 eğim için 3.2 kWh/araç/km’ nin biraz üstündedir, oysa bu değer %+3 yokuş yukarı tırmanma durumunda 7.5 kWh/Araç/km’ ye çıkmaktadır. Tam gaz işletme durumunda gerçekleşen yolculuk süresi, T_{min} , %-2 eğim durumu için 72.5 s iken, bu değer %+3 eğim olması durumunda 82.5 s’e çıkmaktadır. 10 saniyelik fark sadece eğim etkisinden meydana gelmez, düşük gerilimde araç performansının azalmasından da kaynaklanmaktadır.

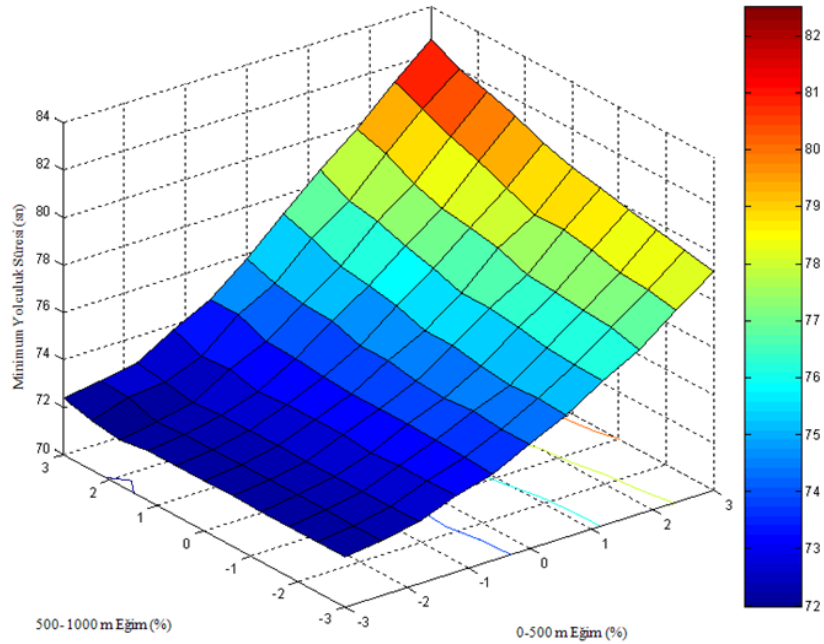


Şekil 4.3: Değişik Eğim Durumlarında Farklı Boşta Gitme Noktaları için T Eğrileri

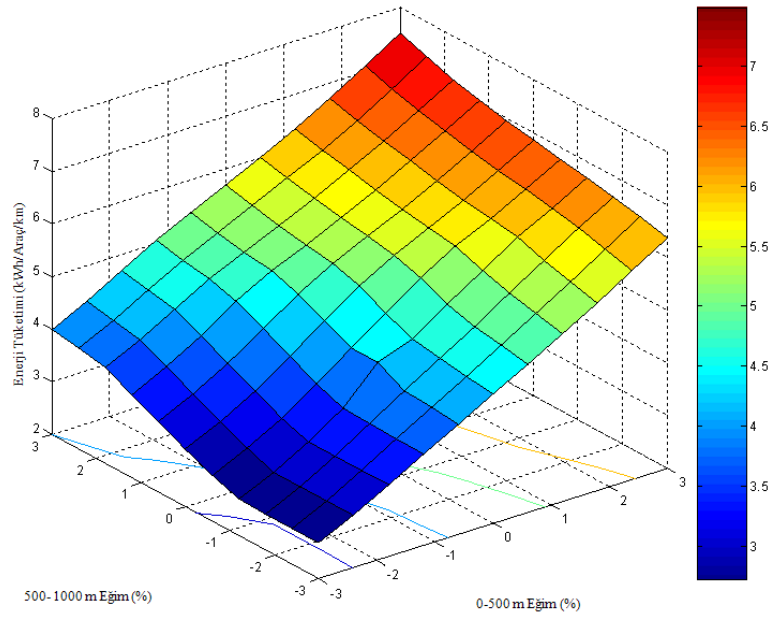


Şekil 4.4: Değişik Eğim Durumlarında Farklı Boşta Gitme Noktaları için E Eğrileri

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da tam gaz durumu için minimum yolculuk süresinin ve enerji tüketim değerlerinin hattın eğim değerlerine bağlı değişimini gösteren 3 boyutlu yüzeyler ile gösterilmiştir. Bu yüzeylerin X ve Y eksenleri hattın ilk ve ikinci yarısındaki eğim değerlerini, Z eksenleri ise yolculuk süresi ve enerji tüketim değerlerini vermektedir. Şekillerdeki yüzeyler oldukça pürüzsüz olup keskin çıkıntılar veya çukurlar görülmemektedir. Tüm bu değerler boşta gitme durumları ile karşılaştırmalarda baz alınacaktır.

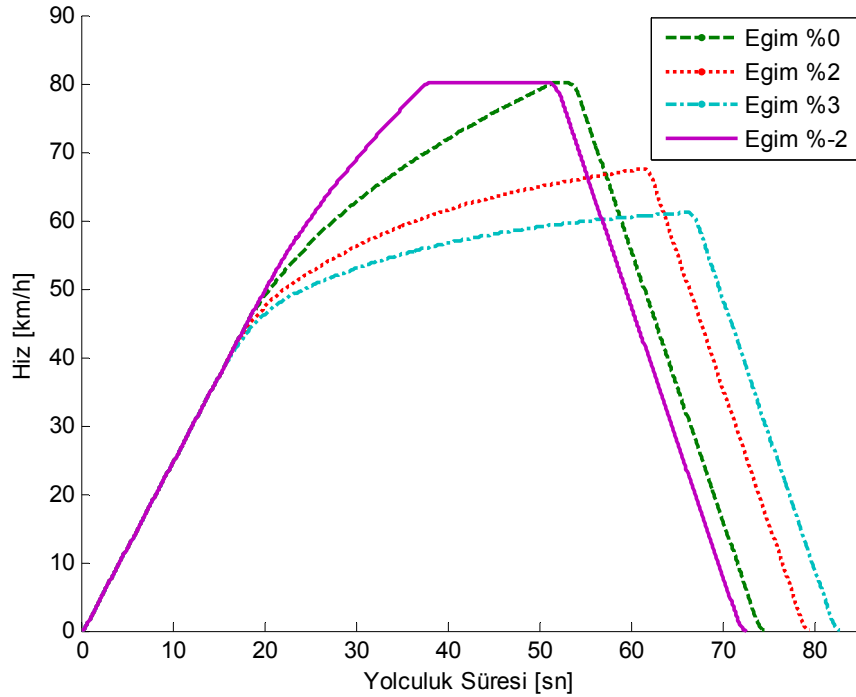


Şekil 4.5: Farklı Eğim Değişimlerine Göre Elde Edilen T_{min} Yüzeyi



Şekil 4.6: Farklı Eğimlerde T_{min} Süreleri için Elde Edilen E_{max} Yüzeyi

Şekil 4.7 %-2, %0, %+2 ve %+3 sürekli eğimlerin tam gaz durumları için zaman-hız grafiğini vermektedir. Eğim değerinin yükselmesiyle 1 km hat uzunluğunu tamamlama süresi artmaktadır. Artan eğim değeri ile enerji tüketimi artarken ulaşılabilen maksimum hız düşmektedir: Tüketim değerleri sırasıyla 3.25 - 5.15 - 6.60 – 7.53 kWh /Araç/km'dir.



Şekil 4.7: Değişik Eğimler için Elde Edilen Hız – Zaman Eğrileri

4.1.3 Farklı Hat Eğimlerinde Verilen Zaman Artışları için En Uygun Boşta Gitme Noktalarının Tespiti

İşletmeciler, enerji verimliliği olmayan, tam gaz çalışma tarzını her zaman kullanmazlar, çünkü bu tür bir işletme herhangi bir aksaklık için savunmasızdır. Bu nedenle normal işletme şartlarında minimum yolculuk süresine ek zaman denilen fazladan bazı süreler ilave edilir. Bu ek zaman, normal işletim koşulları altında enerji verimliliği için kullanılır, ve bir aksama durumunda, oluşan zaman kaybını kapatmak için kullanılır.

Tanımlanmış olan ek zamanın hat boyunca nasıl dağıtılarak kullanılacağı önemli bir karardır. Hattın değişik bölgelerinde aynı oranlardaki süre uzamaları için elde edilen enerji tasarruf değerleri çok fazla farklılık arz edebilir. Bu sebeple önerilen boşta gitme noktasının hem enerji tüketimi hem de yolculuk süresi üzerine yapacağı etkiyi dikkate alan bir uygunluk fonksiyonu ile uygunluğu test edilmelidir. Uygunluk fonksiyonunu minimize eden şart en uygun değerdir. Çalışmada kullanılan “Uygunluk Fonksiyonu” aşağıda verilmiştir.

$$f = E \frac{w_E}{E_{Hedef}} + T \frac{w_T}{T_{Hedef}} \quad (4.1)$$

Formülde;

E ve T önerilen boşta gitme noktası için elde edilen enerji ve yolculuk süresidir.

w_E ve w_T enerji ve zamana ait ağırlıklardır. Önemleri değerleri ile ters orantılıdır.

E_{Hedef} ve T_{Hedef} ise hedeflenen enerji ve yolculuk süresidir.

Çalışmanın bu aşamasında T_{min} 'in %1, %3, ve %5'lik fazlası için en uygun boşta gitme noktaları belirlenmiştir. Bu izin verilen süre artış değerleri sadece karşılaştırmalarda rahatlık sağlanması için seçilmiş olup herhangi bir süre artış miktarı için de en uygun değer bulunabilir.

Optimize edilmeye çalışılan sistem basit olup, sadece boşta gitme noktası olan bir değişken içermektedir. Bu yüzden YSA'a ihtiyaç yoktur, bunun yerine uygunluk fonksiyonunu minimize eden boşta gitme noktalarını bulmak için MS Excel kullanılmıştır.

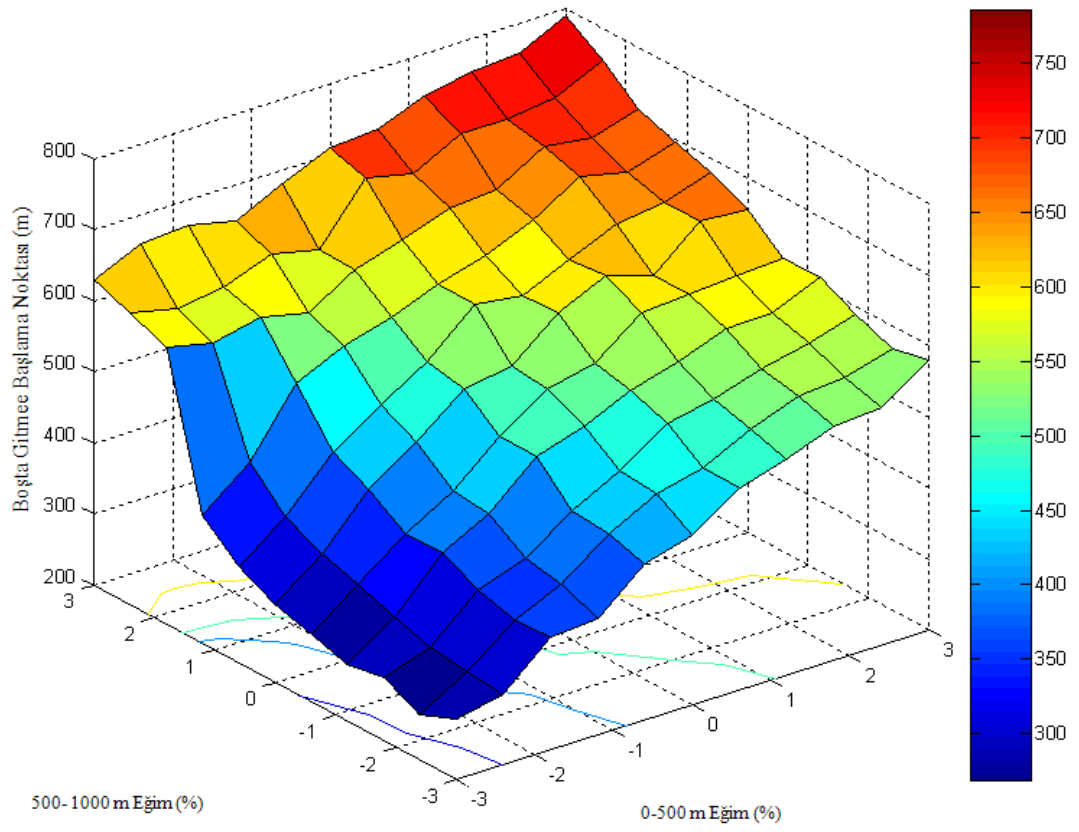
Şekil 4.8, farklı eğim kombinasyonları için tam gaz durumuna ait T_{min} değerlerine oranla %1'lik süresi artışına sebep olan en uygun boşta gitme noktalarını göstermektedir. Şekil 4.9 bu en uygun noktalar için elde edilen enerji tasarrufu yüzeyini vermektedir. Bu yüzeylerin X ve Y eksenleri hattın ilk ve ikinci yarısındaki

eğim değerlerini, Z eksenleri ise en uygun boşta gitmeye başlama noktalarını ve bu noktalarda boşta gidilmeye başlanması durumunda tam gaz modundaki enerji tüketime göre tasarruf oranını vermektedir.

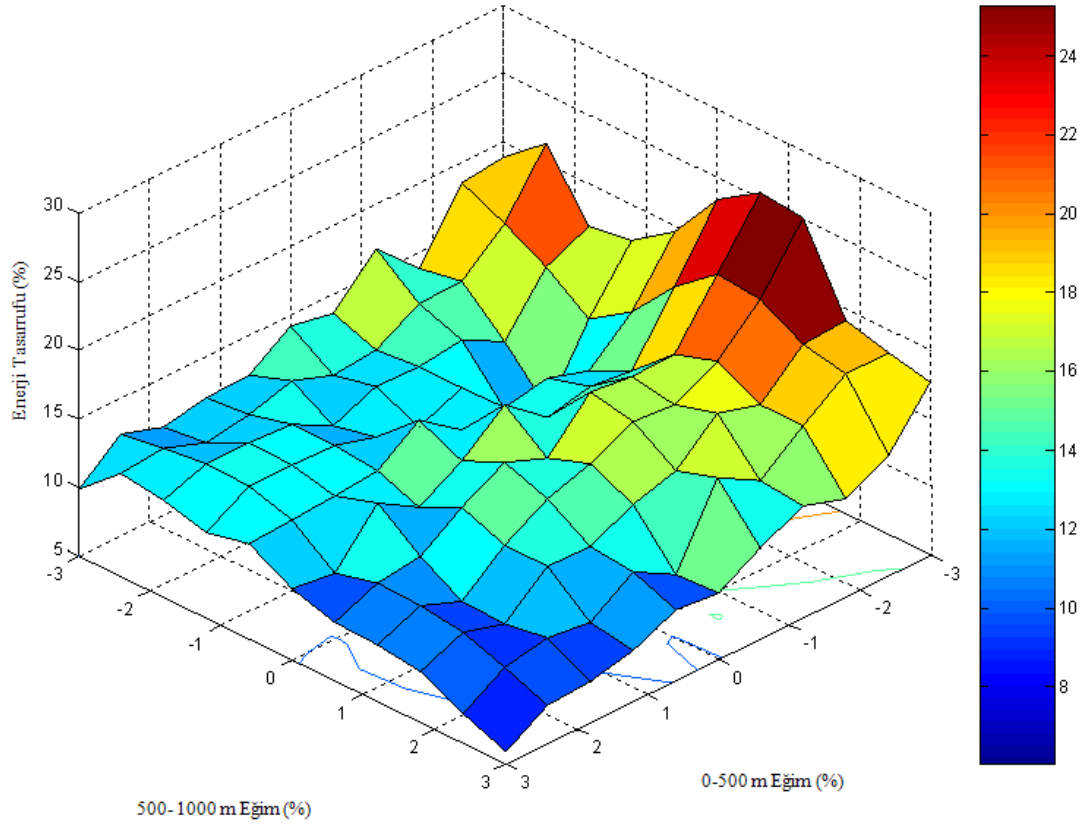
Şekillerden görüleceği üzere artan eğim değerleri ile trenlerin boşta geçme noktası gecikmektedir. %-3 sürekli eğim için en uygun boşta gitme noktası 286 m olarak bulunmuş ve bu boşta gitme noktası için tam gaz moduna göre enerji azaltımı %18.93 olarak gerçekleşmiştir. %+3 sürekli eğim için en uygun boşta gitme noktası 790 m olarak saptanmış ve sadece %5.91 enerji tasarrufu elde edilebilmiştir. Maksimum enerji tasarrufu, %-3 ve %+0.6 hat profilinde bulunmuş olan en uygun boşta gitme noktasında (335 m) %25.44'lük elde edilmiştir.

Yukarıdaki değerler aynı miktardaki süre uzaması için elde edilebilecek tasarruf miktarının, hattın eğim durumuna göre ne kadar büyük farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısı ile hattın istasyon - istasyon optimize edilmesinden ziyade bir bütün olarak komple optimize edilmesinin gerekliliği de bu yüzeylerden anlaşılmaktadır.

Bu konunun netleştirilmesi için ilk iki istasyon arası sürekli çıkış, son iki istasyon arasında ise sürekli iniş olan 3 istasyonlu bir hat olduğu düşünölsün. Tam gaz işletme şartında bu hattaki trenin toplam yolculuk süresinin, 2. istasyondaki bekleme süresi hariç, 200 s olduğunu ve izin verilen süre uzatımının %5, yani 10 s, olduğu kabul edilsin. İstasyonlar arasında ayrı ayrı optimizasyon yapılması durumunda, izin verilen 10 s'lik süre artışı yaklaşık eşit olarak, 5 s'lik bölümler halinde iki bölgeye paylaştırılacak ve optimum noktalar ayrı ayrı bulunacaktır. Ancak, yukarıdaki çalışmalardan da görüleceği üzere iki bölümde elde edilecek tasarruf oranları farklı eğim değerlerinden ötürü son derece farklı olacaktır. İstasyonlar arasında ayrı ayrı optimize edilmesi yerine 3 istasyon arasının birlikte optimize edilmesi ile izin verilen süre artışının paylaşımının 5 saniye, 5 saniye değilde, belki 2 saniye ve 8 saniye olması durumunda daha fazla tasarruf elde edilebileceği bulunabilecektir. Aynı yolculuk süresi artışı için çok daha fazla tasarruf elde edilebilecektir.

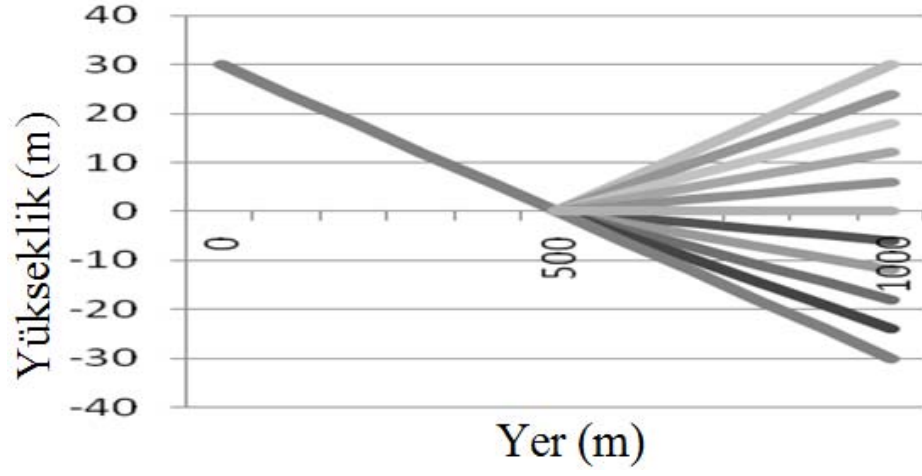


Şekil 4.8: T_{min} 'de %1'lik Artış için Optimum Boşta Gitme Noktalarına ait Yüzey

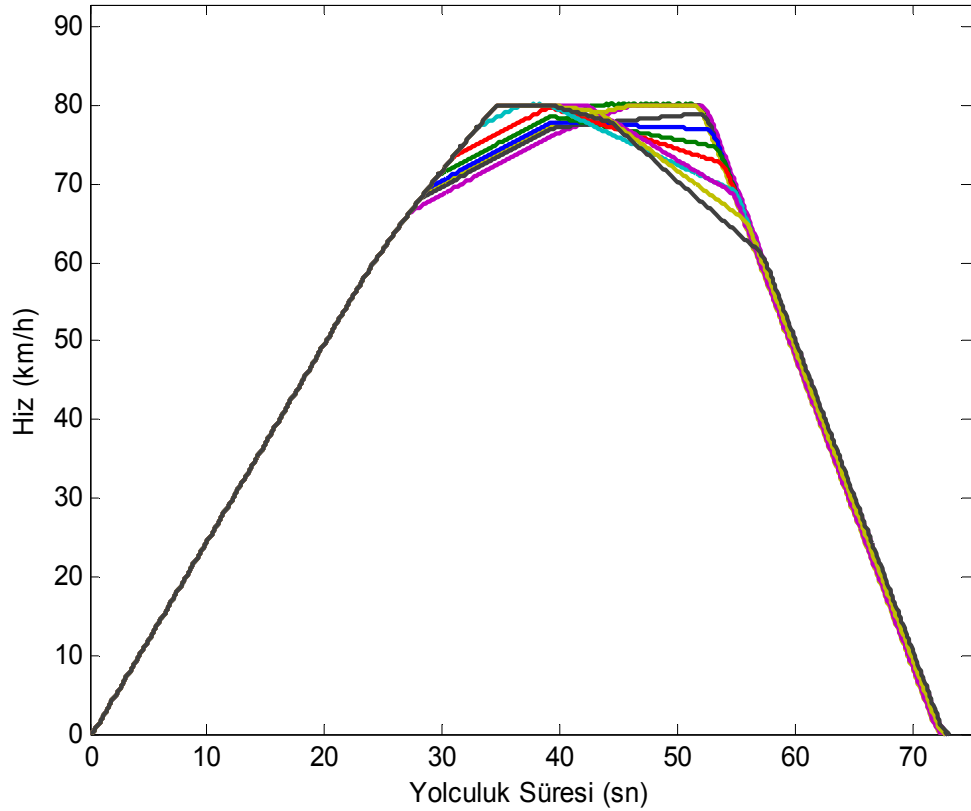


Şekil 4.9: T_{min} 'de %1'lik Artışa Karşılık Elde Edilen Enerji Tasarrufu (%) Yüzeyi

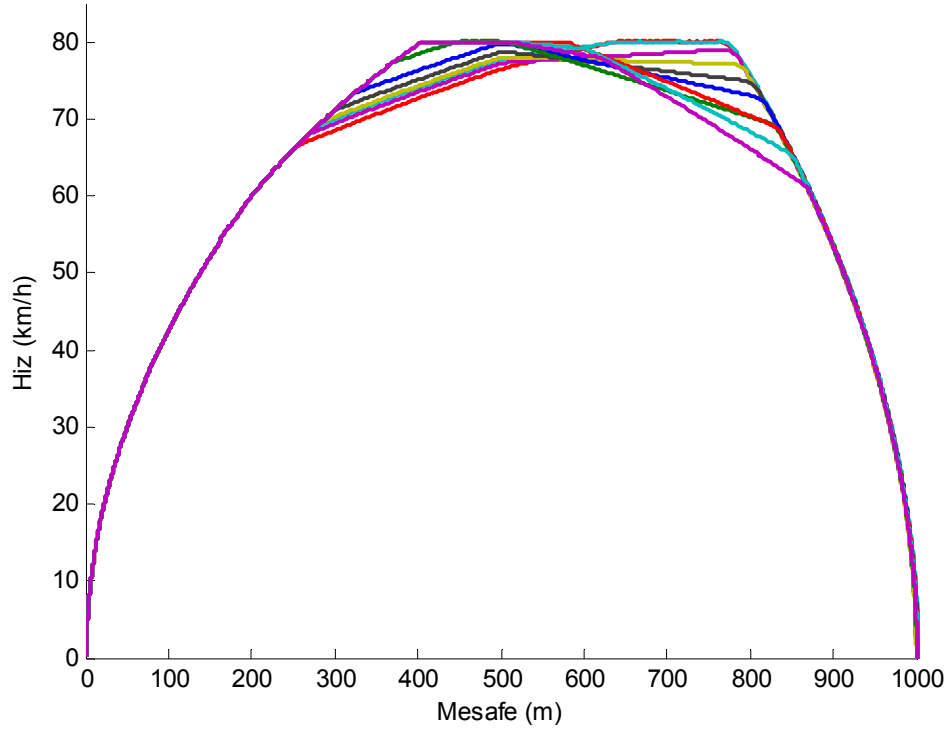
Şekil 4.10'da değişik hat profilleri ve bu profiller için yolculuk süresindeki %1'lik artış için elde edilen optimum hız-zaman ve hız-yer eğrileri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.10: Değişik Hat Profilleri



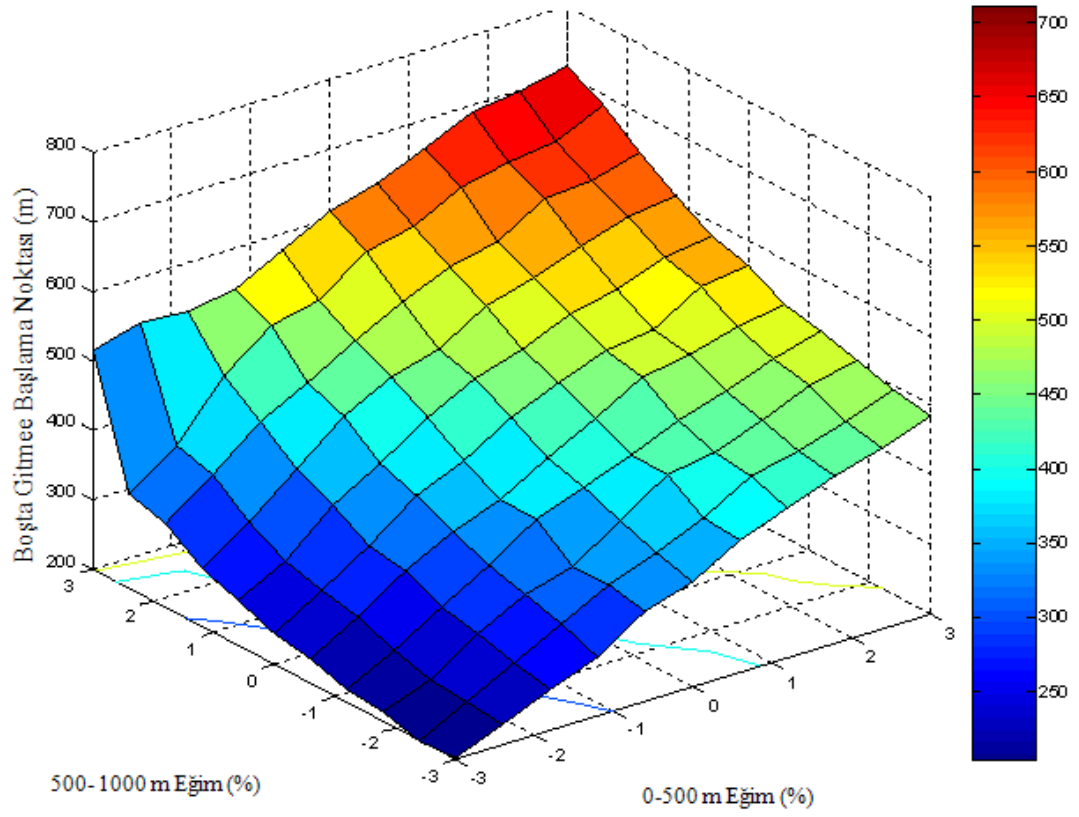
Şekil 4.11: Şekil 4.10'deki Hat Profillerinde %1'lik T Artışı Veren Boşta Gitme Noktaları için Hız – Zaman Eğrileri



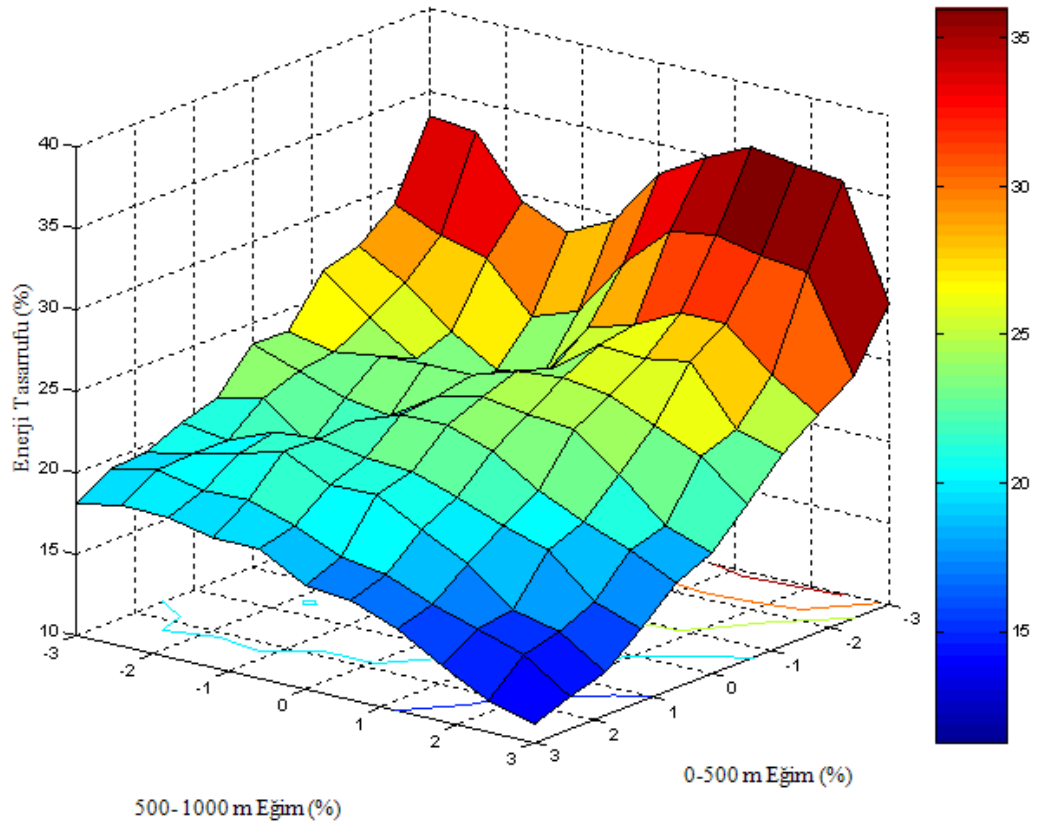
Şekil 4.12: Şekil 4.10'deki Hat Profillerinde %1'lik T Artışı Veren Boşta Gitme Noktaları için Hız -Yer Profilleri

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de T'deki %3'lük artış için benzer yüzeyler verilmiştir. +%3'lük eğime sahip hatta 715 m'de boşta gitmeye başlama ile %11.09'luk enerji tasarrufu elde edilmiştir. %-3 ve %+1.2'lik eğimler içeren hat profilinde trenin 285 m'de boşa geçmesi halinde %36.14'lük değeri ile maksimum enerji tasarrufu elde edilmiştir.

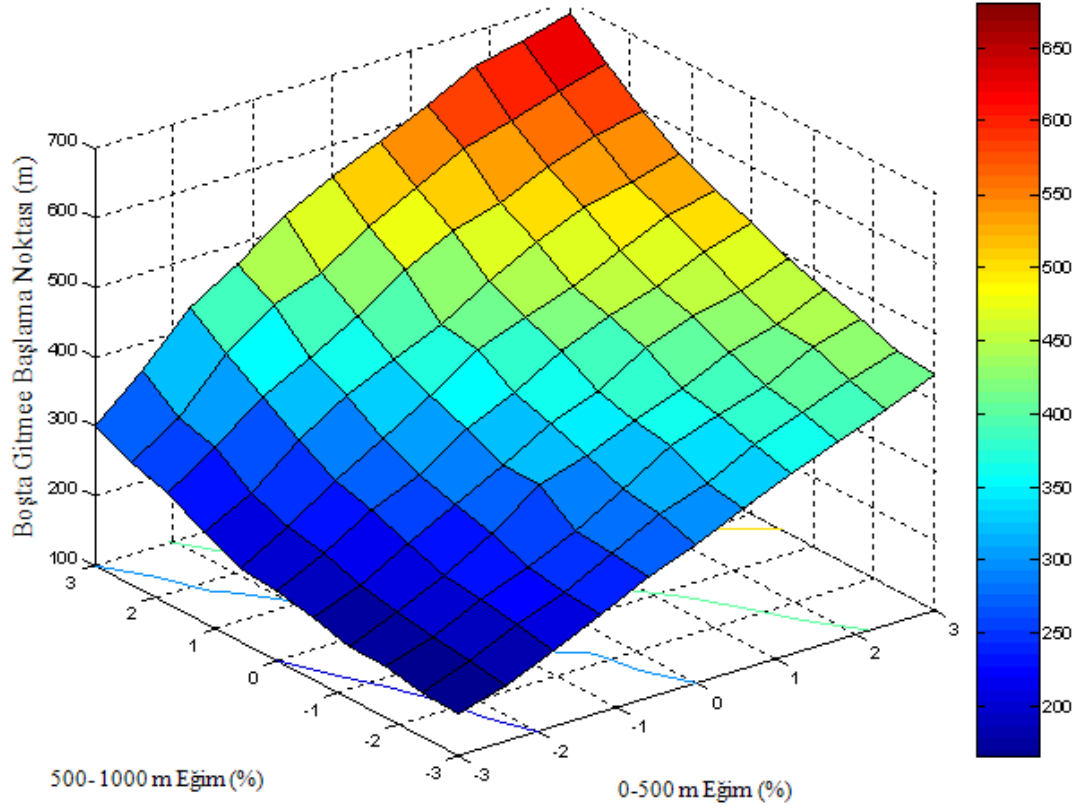
Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 T'deki %5'lik artış için yüzeyleri vermektedir. %-3 ve %+0.6'lık eğimler içeren hat profilinde 205 m'de %43.78'lik maksimum enerji tasarrufu elde edilmiştir.



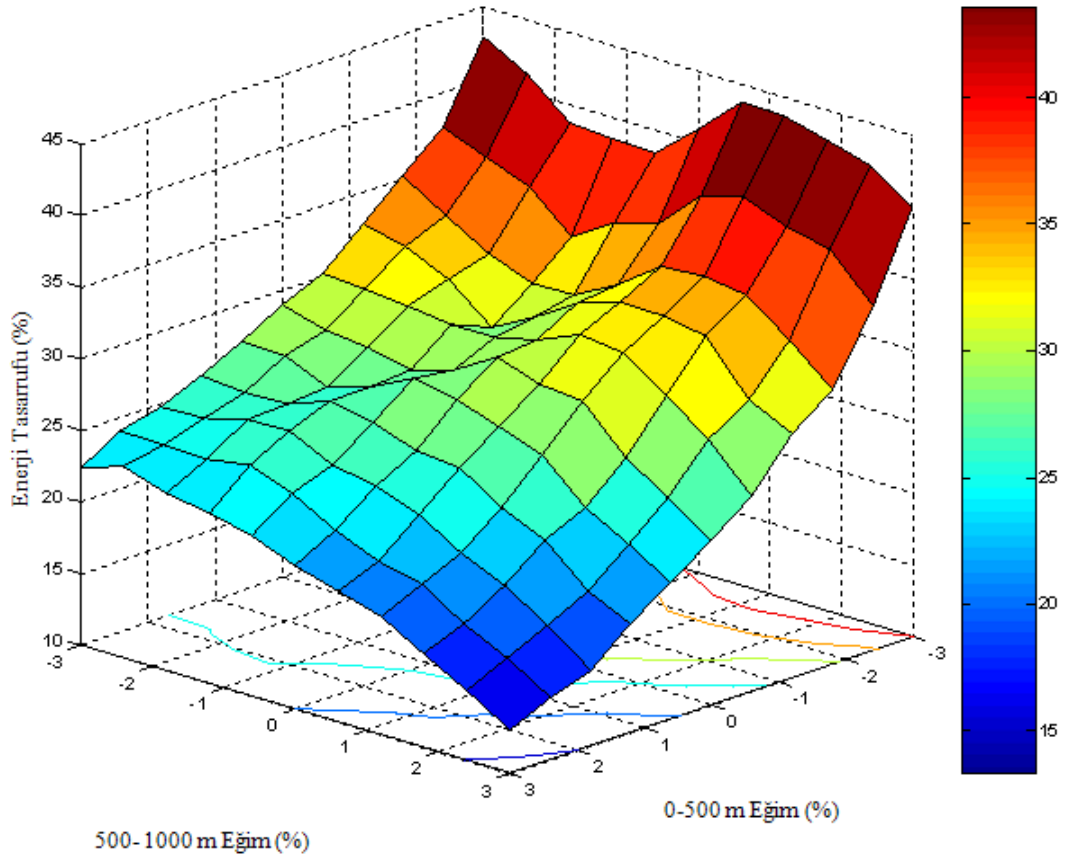
Şekil 4.13: T_{min} 'de %3'lük Artış için Optimum Boşta Gitme Noktalarına ait Yüzey



Şekil 4.14: T_{min} 'de %3'lük Artışa Karşılık Elde Edilen Enerji Tasarrufu (%) Yüzeyi

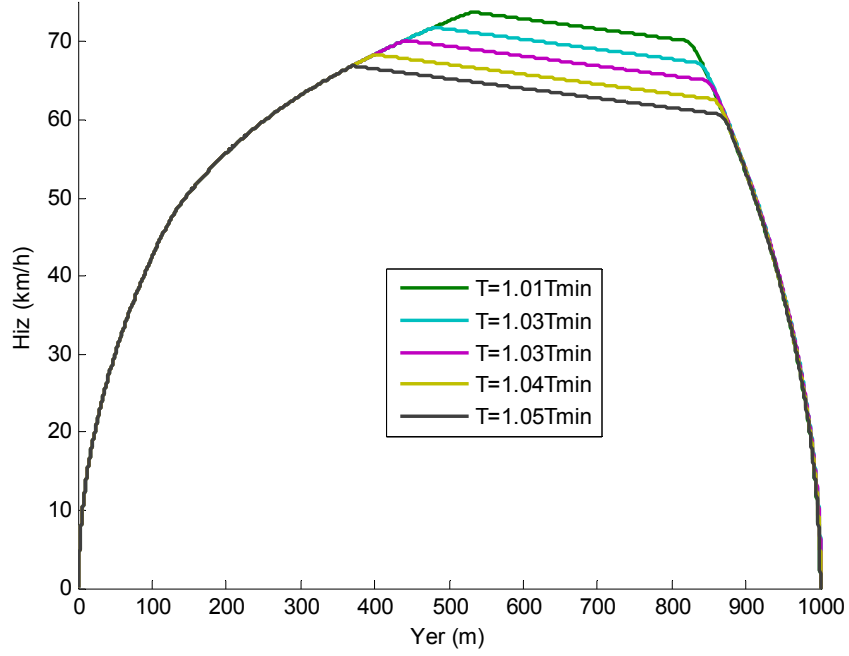


Şekil 4.15: T_{min} 'de %5'lik Artış için Optimum Boşta Gitme Noktalarına ait Yüzey

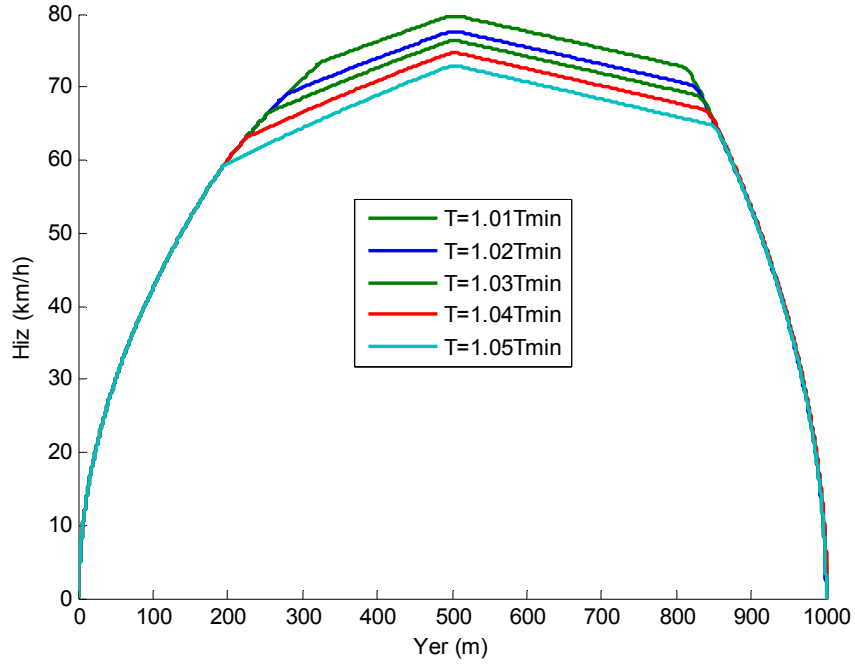


Şekil 4.16: T_{min} 'de %5'lik Artışa Karşılık Elde Edilen Enerji Tasarrufu (%) Yüzeyi

Şekil 4.17’de eğim bulunmayan hatta farklı süre artışları için elde edilen optimum Hız-Yer profilleri verilmiştir. Benzeri profiller hattın ilk yarısında %-3, diğer yarısında %0.6 eğim olması durumu için Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17: Eğim Bulunmayan Hatta Farklı Süre Artışlarında Optimum Hız-Yer Eğrileri



Şekil 4.18: Eğimli (0-500 m’de %-3, 500-1000 m’de %0.6) Hatta Farklı Süre Artışlarında Optimum Hız-Yer Eğrileri

Tablo 4.1’de Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilen optimum hız profilleri ile elde edilen enerji tasarruf değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1: İki Eğim Kombinasyonu için T_{min} ’e Göre Süre Artışına Ait Optimum Boşta Gitme Noktaları ve Elde Edilen Enerji Tasarruf Değerleri

		T_{min} ’e Göre Süre Artışı				
		%1	%2	%3	%4	%5
E1*=%0.0	X_{opt} (m)	540	490	450	410	380
E2*=%0.0	ΔE (%)	16.06	20.40	23.74	27.23	29.83
E1=%-3.0	X_{opt} (m)	335	290	265	235	205
E2=%0.6	ΔE (%)	25.44	31.39	34.76	39.21	43.78

*E1 hattın ilk yarısındaki eğim değerini, E2 ise ikinci yarısındaki eğim değerini vermektedir.

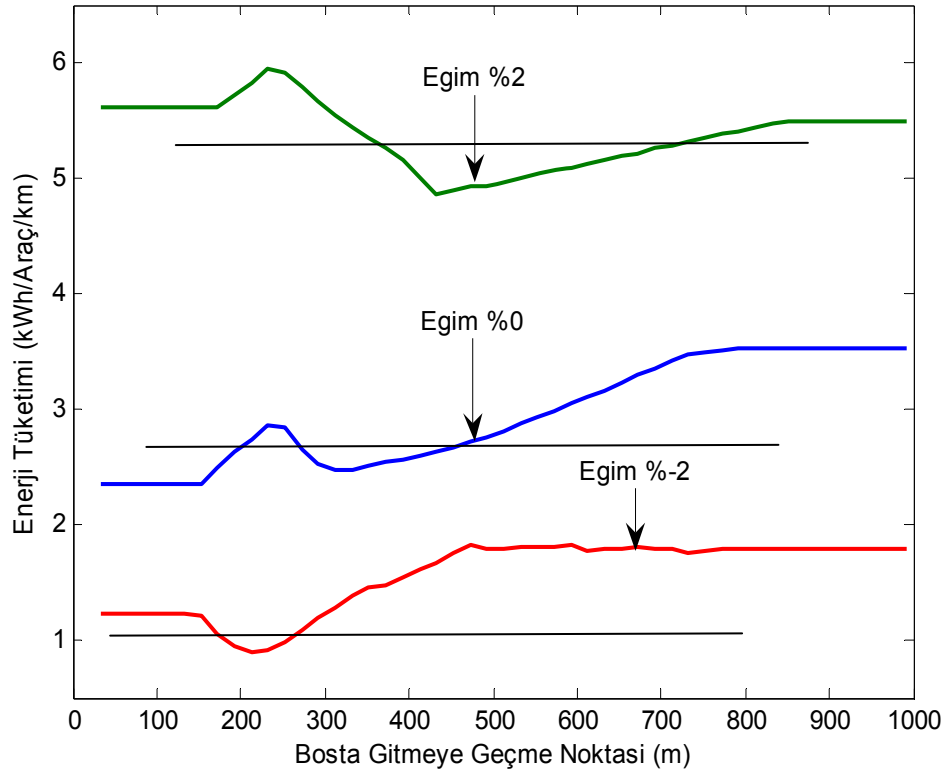
4.2 İki İstasyon Arasında 45 s Aralıkla (TAS) Tren Koşturulması Durumu

Regeneratif frenlemenin etkisinin de görülebilmesi için, gerçekte olması mümkün olmayan, 45 s’lik aralıklarla tren işletilmesine ait simülasyonlar yapılmıştır. Testlerde yarım saatlik işletme durumu ele alınmıştır. Her bir eğim durumu için boşta gitmeye başlama noktası 20 m’lik aralıkla arttırılarak 49 adet simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de sırasıyla E ve T’nin farklı boşta gitme başlangıç noktaları için değişimleri verilmiştir. T değerleri, yolculuğunu tamamlamış olan 28 trene ait yolculuk sürelerinin ortalamasıdır.

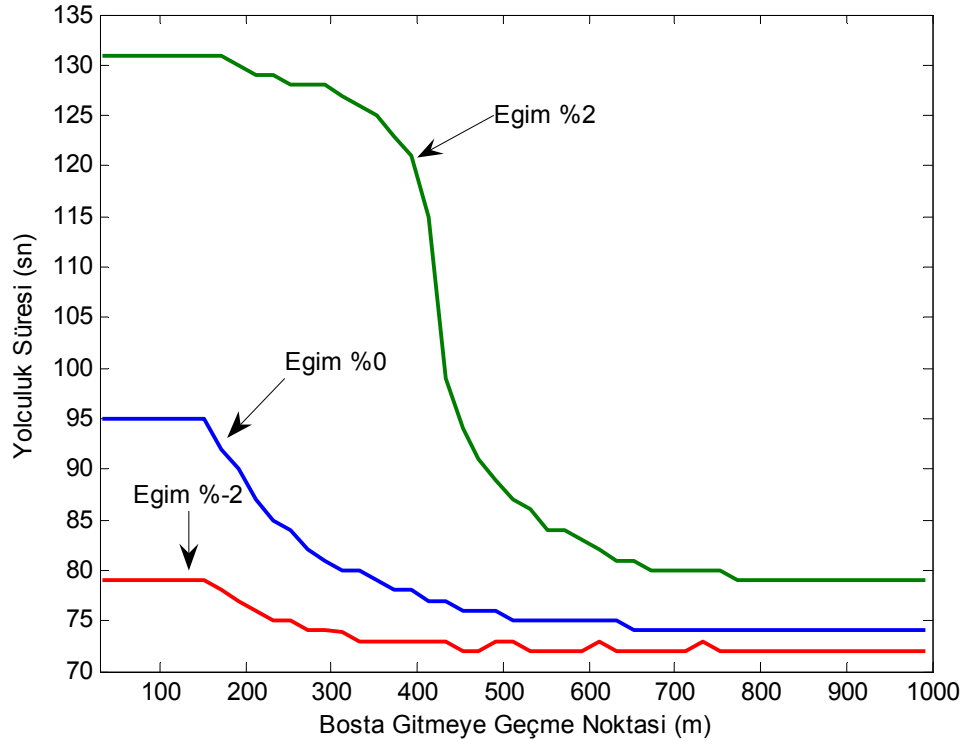
Şekil 4.19’daki E eğrileri Şekil 4.4’deki tek tren durumuna ait E eğrileri ile karşılaştırıldığı zaman regeneratif frenlemenin etkisi rahatlıkla görülebilmektedir: Tüm durumlar için enerji tüketiminin azaldığı gözlenmiştir. Eğim olmayan hat için tek tren olması durumunda, boşta gitmeye geçme noktasına bağlı olarak Araç*km için 2.42-5.14 kWh arasında enerji tüketimi gerçekleşirken enerji tüketimi çoklu tren durumunda 2.35-3.52 kWh arasında gerçekleşmektedir. Özellikle tam gaz durumunda enerji tüketim değeri %31.5 oranında azalmaktadır.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’deki eğriler incelenirse, aynı E değeri 2-3 farklı (yatay çizgilerden görüleceği üzere) boşta gitme noktasında da elde edilebilmektedir. Örneğin eğimin %0 olduğu durum için 210 m, 260 m ve 470 m civarlarında boşta geçme durumunda araç*km başına enerji tüketimi aynı değer, 2.7 kWh, olacaktır. Ancak bu noktalarda boşta geçme durumunda trenlerin ortalama yolculuk süreleri ise sırası ile 88, 83 ve 76 s olacaktır. Bu sonuçlar optimizasyonun hem yolculuk süresi hem de enerji tüketimini dikkate alan bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmesinin zorunluluğunu göstermektedir.



Şekil 4.19: Farklı Eğimli Hatlarda 45 s TAS İçin Farklı Boşta Gitme Noktalarında E'nin Değişimi

Şekil 4.20'den eğimin yolculuk üzerine etkisi net bir şekilde anlaşılmaktadır. Eğim değerinin çıkış yönündeki etkisi iniş yönündekine göre daha fazla olmaktadır. Eğim değerinin $\%+2$ 'ye artması yolculuk süresini 36 s arttırırken, eğim değerinin $\%-2$ inmesi ise yolculuk süresini 16 s azaltmaktadır. Eğim değeri arttıkça doğrusallıktan uzaklaşmaktadır.



Şekil 4.20: Farklı Eğimli Hatlarda 45 s TAS İçin Farklı Boşta Gitme Noktalarında T'nin Değişimi

4.2.1 Düz Hatta İki İstasyon Arasında 45 s Aralıklı Tren İşletimi Durumunun Optimizasyonu

Burada denklem 4.1'de verilen uygunluk fonksiyonu kullanılarak hedeflenen yolculuk süresi için en düşük enerji tüketimini veren boşta gitme noktasının bulunması hedeflenmiştir. Hem Yapay Sinir Ağları (YSA) hem de Genetik Algoritmalar (GA) kullanılarak en uygun çözüm bulunacaktır.

Problem henüz tek boyutlu olduğundan, Excel kullanılabilir olmasına rağmen, Excel yerine YSA ve GA kullanılarak işlemin hızlandırılması ve daha hassas sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır.

GA'nın çalışma prensipleri bölüm 0'de verilmiştir. Burada YSA'lar kullanılarak, simülatörle test edilmeyen boşta gitme noktalarına ait E ve T değerlerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır. YSA'lar ile çok kısıtlı sayıda simülasyon girdi/çıktısı ile sistem modellenebilmektedir (Bkz. EK A).

Bu çalışmada Matlab Version 7.0.0.19920 (R14) programının 'Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 1.0.1 (GATool)' ve 'Neural Network Toolbox Version 4.0' araçları kullanılmıştır.

İşleyen bir YSA oluşturmak ve eğitmek için; kullanılacak ağ tipi, katman sayısı ve her bir katmandaki nöron sayısı, öğretim fonksiyonu, katmanların aktivasyon (transfer) fonksiyonları gibi birçok parametrenin ve kuralın belirlenmesi gereklidir.

Burada 'İleri beslemeli geri yayımlı (Feed Forward Back Propagation)' ağ tipi 'Azaltılmış hafıza LM eğitme fonksiyonu (Reduced Memory Levenberg-Marquardt)' kullanılmıştır. Kullanılan ağlarda giriş ve çıkış katmanları dışında bir adet gizli katman kullanılmıştır. Kullanılan nöron sayısı probleme göre değişkenlik göstermektedir.

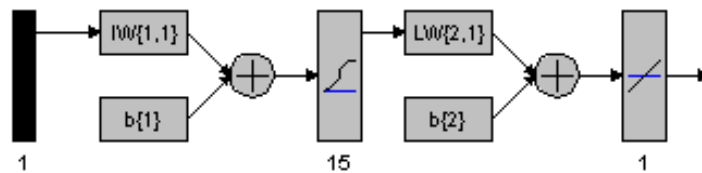
YSA'ları raylı sistemlerin güç besleme sistemlerine ait çalışmalarda kullanan Gordon ve arkadaşları YSA'ların hat üzerinde düşük gerilim oluşan noktaların tahmininde oldukça başarılı olduğunu, benzer yaklaşımın trafolardan çekilen güç seviyesinde azaltılmasında da kullanılabileceğini belirtmektedirler [21].

YSA Eğitimleri

Simülâtörde gerçekleştirilmiş olan 49 simülasyona ait giriş (boşta gitme noktası) ve çıkışlar (E ve T değerleri) kullanılarak, simülasyonu yapılmamış olan ara noktalarda boşta gitme durumlarına ait E ve T tahminlerinde bulunacak YSA'lar eğitilmiştir.

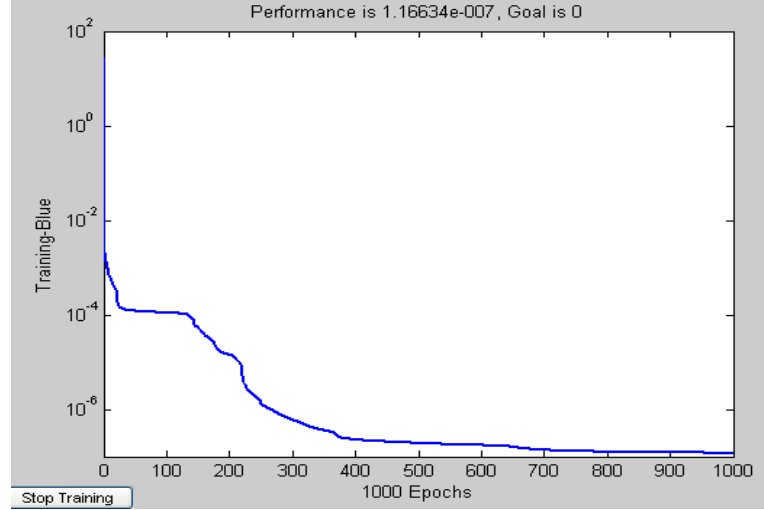
İki çıkışlı tek bir YSA ile elde edilen hata oranları tatmin edici olmamış, detayları burada verilmemiş olsa da, gerçekleştirilmiş olan çok sayıda gizli katman içeren YSA'lar ile de, istenen performans elde edilememiştir.

Şekil 4.21'de E tahmin etmede kullanılmak üzere oluşturulan YSA'nın Matlab gösterimi görülmektedir. Buradan kullanılan ağın topolojisinin 1-15-1, yani giriş ve çıkış katmanlarında tek eleman gizli katmanda ise 15 elemanı, olduğu görülmektedir. Nöron sayısı olarak farklı nöron sayılarının denenmesi sonucu en ufak hatayı verdiği görülen 15 alınmıştır. Gizli katmandaki aktivasyon fonksiyonu sigmoid, çıkış katmanındaki ise lineer seçilmiştir.



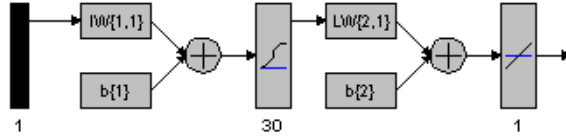
Şekil 4.21: Enerji Tüketimi (E) için 15 Nöronlu Bir Ağ

Şekil 4.22'de E için eğitilen YSA'nın performans eğrisi verilmiştir. Bu eğriden YSA'nın 49 verilik eğitim setinin 1000 kez çalıştırılması ile ortalama karesel hatanın (Mean Squared Error-MSE) 10^{-7} mertebesine düştüğü görülmektedir.

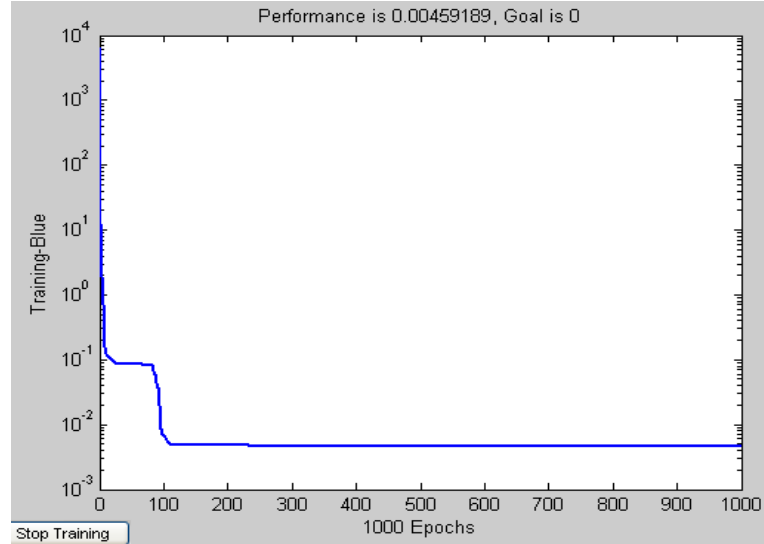


Şekil 4.22: 15 Nöronlu Bir Ağ İle Enerji Tüketimini (E) Öğrenme Performansı

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de ise yolculuk süresinin tahmini için eğitilen YSA ve performansı görülmektedir. Bu ağa ait hata değeri de oldukça düşüktür.



Şekil 4.23: Yolculuk Süresi (T) için 30 Nöronlu Bir Ağ

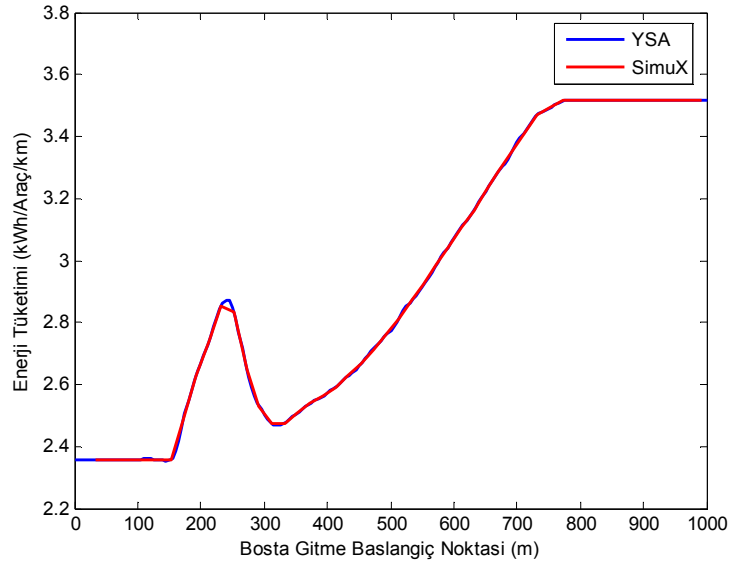


Şekil 4.24: 30 Nöronlu Bir Ağ İle Yolculuk Süresini (T) Öğrenme Performansı

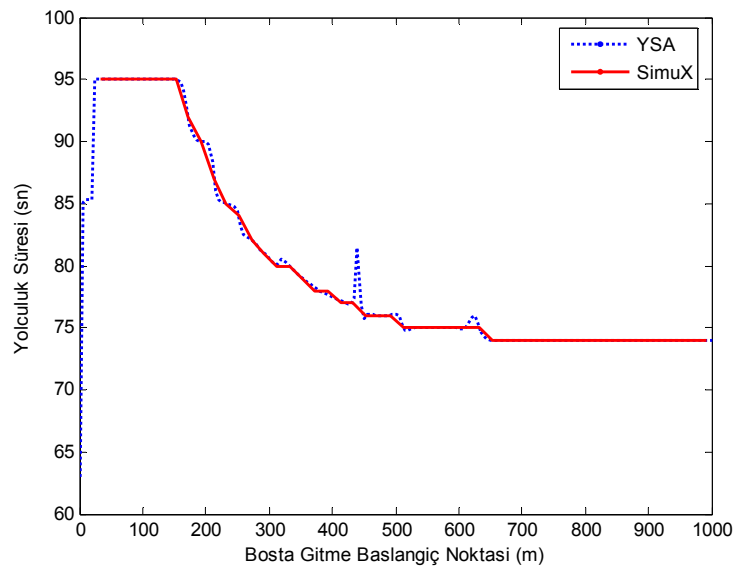
Her iki ağın da eğitim setleri için verdikleri hata değerleri oldukça düşüktür. Yapılan testlerde YSA'ların kendilerine daha önce gösterilmemiş olan boşta gitme noktaları için de oldukça mantıklı değerler verdiği, ağların yeteri kadar hassasiyetle E ve T değerlerini tahmin edebildiği görülmüştür.

SimuX'un ve YSA'ların 0-1000 m arasındaki boşa gitme başlangıç noktaları için üretmiş oldukları E değerlerinin değişimi Şekil 4.25'deki grafikte verilmiştir. Eğriler neredeyse tamamen aynıdır. Tek sapma noktası 230 m civarında gözlenmektedir. Bunun sebebi SimuX'un 20 m'de bir koşturulmuş olmasıdır. YSA'nın tahmini bu noktada daha gerçekçi olabilir.

Şekil 4.26'daki iki grafikte ise T değerlerine ait grafikler verilmiştir. 440 m civarlarında eğriler arasında biraz sapma görülmektedir. Diğer kısımlarda ise eğriler birbirine benzemektedir.



Şekil 4.25: YSA'nın ve SimuX'un Boşa Gitme Başlangıçları İçin Ürettikleri E Eğrileri



Şekil 4.26: YSA'nın ve SimuX'un Boşa Gitme Başlangıçları İçin Ürettikleri T Eğrileri

Genetik Algoritma ile En Uygun Çözümün Aranması

Genetik algoritma (GA) güçlü bir doğrudan arama yöntemidir. GA, optimize edilmek istenen değişkenler için (bu durumda bir tanedir) rastgele girişleri üretir. Daha sonra bir uygunluk fonksiyonunu çağırır ve bu rastgele atanmış değerler için değerini hesaplar. GA'nın amacı uygunluk fonksiyonun değerini minimize eden değişken değerlerini bulmaktır. Bu işlemi her bir nesil için tanımlanmış olan birey sayısınca tekrarlar. GA bir nesil içindeki en düşük uygunluk değerini veren bireylerin bir kısmını bir sonraki nesile aktarır, uygun olmayan sonuçları ise çaprazlamaya veya mutasyona tabi tutar, en kötülerini ise direkt eler, bunların yerlerine dışarıdan yeni bireyleri nüfusa dahil eder. Bunların oranları başta tanımlanır. Her nesilde uygunluk değerini minimize eden değerlere yaklaşılar ve tanımlanmış olan nesil sayısına ulaşıncaya veya belli bir nesil sayısı süresince sonuçta bir iyileşme elde edilemezse GA optimizasyonu biter.

Formül 4.1'de verilmiş olan uygunluk fonksiyonu Matlab fitfnc.m dosyası haline getirilmiştir. Kullanılan M dosyaları EK B'de verilmiştir. Bu dosyadaki Eag ve Tag değişkenleri; enerji ve süre için ayrı ayrı eğitilmiş olan YSA'lardır. Ayrıca, optimizasyonu hızlandırmak amacı ile TmaxAllowed (izin verilen en büyük yolculuk süresi) ve xmin (atanabilecek en erken boşta gitmeye başlama noktası) ve xmax (atanabilecek en geç boşta gitmeye başlama noktası) değişkenleri tanımlanmıştır. GA bu fonksiyonu minimize etmeye çalışmaktadır. Dolayısı ile bu tanımlanmış değerlerin dışındaki girişler için 1000 değerini atamakla gereksiz yere zaman kaybedilmemektedir.

Genetik Algoritma İle Optimum Boşta Gitme Noktasının Bulunması

Aşağıda verilen Setup.m kodu ile Matlab'a, GA optimizasyonunda kullanılacak olan parametreler ve ağlar tanıtılmaktadır.

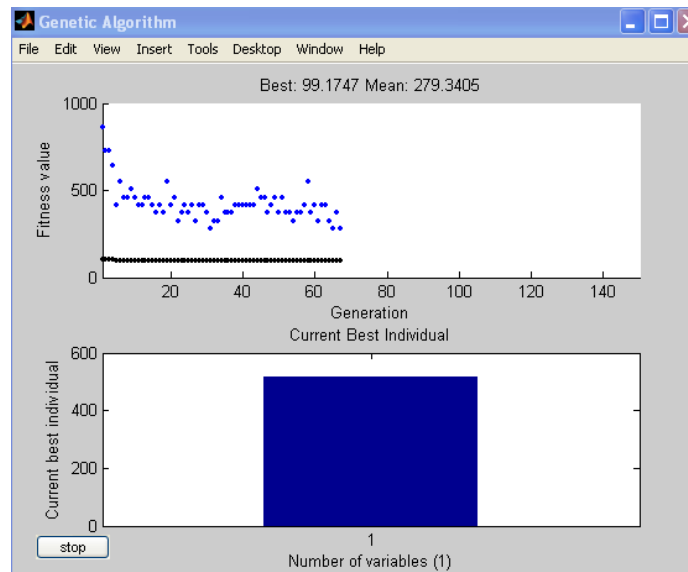
```
%Bu fonksiyon global değişkenlerin atanması içindir. Tmin ve Emax değerleri tam gaz %sürüşde elde edilen minimum süre ve bunun için harcanan enerji değeridir.  
%Optimizasyon sonucunda elde edilen enerji tasarrufu ve bunun için yolculuk %süresindeki artışı yüzde cinsinden hesaplamak için gereklidirler.  
global Eag Tag wE wT EHedef THedef TmaxAllowed xmin xmax Tmin Emax  
Eag=EagNormal45HT;           %Kullanılan YSA  
Tag=TagNormal45HT;           %Kullanılan YSA  
EHedef=3.0;                   %Hedef enerji değeri  
THedef=74.5;                  %Hedef yolculuk süresi  
TmaxAllowed=75;               %Müsade edilen en fazla yolculuk süresi  
wE=20;                        %Hedef enerji değerine ulaşmanın önemi (100-wT)  
wT=80;                        %Hedef zaman değerine ulaşmanın önemi (100-wE)  
xmin=200;                     %Minimum boşta gitmeye başlama noktası  
xmax=700;                     %Maksimum boşta gitmeye başlama noktası  
Tmin=74;                      %Tam gaz durumu için yolculuk süresi  
Emax=3.52;                    %Tam gaz durumu için enerji tüketimi
```

Optimizasyon öncesi bu parametrelerle hangi süre civarında optimizasyon yapılmak istenildiği GATool'a tanıtılmaktadır.

Setup.m'deki değerlerden en hızlı tamamlama süresinin (T_{min}) 74 s, bunun neticesi oluşan enerji tüketiminin değerinin 3.52 kWh/Araç/km olduğu görülmektedir. Ayrıca E ve T'nin ağırlıkları 20 ve 80 seçilerek aramada enerji tüketimine göre daha hassas olunması sağlanmıştır. Optimizasyonla hedeflenen enerji tüketimi 3.0 kWh/Araç/km ve bunun mümkünse 74.5-75 s yolculuk süresi ile sağlanması talep edilmektedir. Son olarak, trenin $200 < x < 700$ m arasında boşta gitmeye başladığı durumların dikkate alınması bildirilmektedir. Optimizasyon işlemine ait adımlar aşağıda verilmiştir:

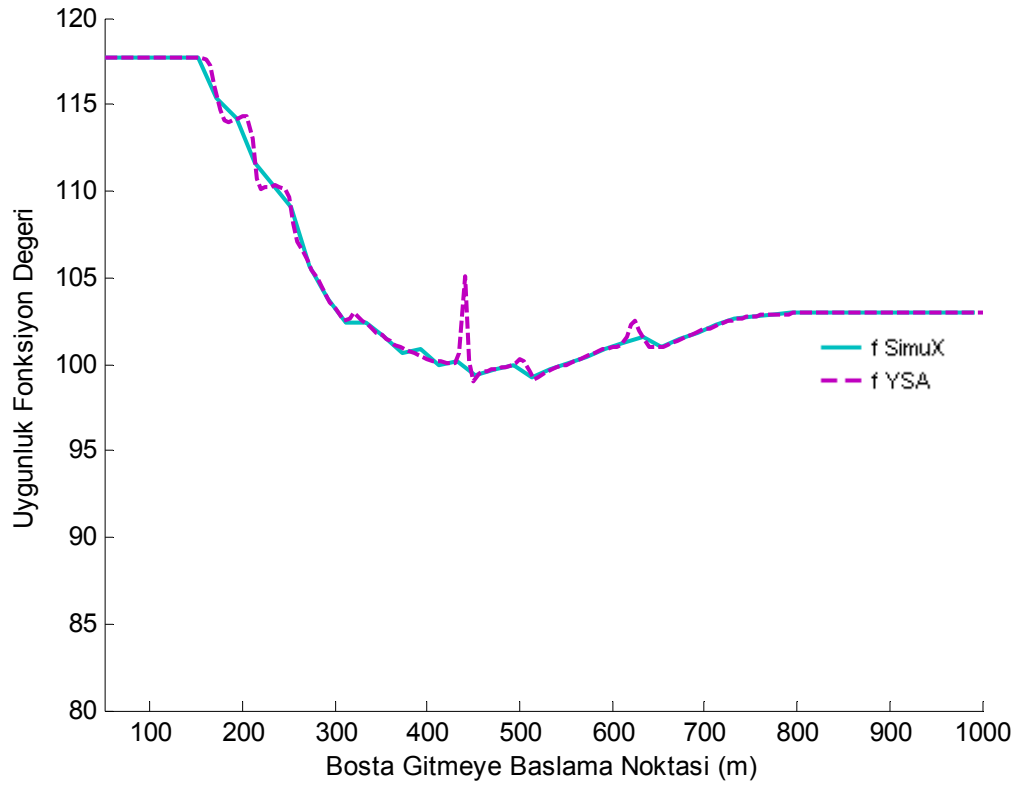
1. Matlab komut penceresinden setup.m çağrılarak istenen parametreler girilir. Bunun için eğitilmiş olan ağların çalışma alanında (workspace) yüklü olması lazımdır.
2. GATool komutu ile GA aracı açılır.
3. FitneTM Function kısmına @fitfn yazılır, ve değişken sayısı 1 olarak tanımlanır. Ayrıca GA optimizasyon durdurma kriterleri değiştirilir. Start komutu ile optimizasyon başlatılır.

Şekil 4.27'de 67. iterasyonda durmuş olan optimizasyonun uygunluk değerinin değişimi ve en uygun çözümün değeri verilmiştir. GAToolbox'ında uygunluk fonksiyonunun 514.42 metrede en küçük değerini aldığı gösterilmektedir. Uygunluk fonksiyonu bu değer için 99.1747 değerini almakta olup, bunun 100'ün altında olması hedeflere ulaşıldığının bir göstergesidir.



Şekil 4.27: Düz Hatta 45s TAS Durumuna Ait Optimizasyon Sonuçları

Şekil 4.28’de boşta gitmeye başlama noktalarına bağlı olarak uygunluk fonksiyonun SimuX ve YSA sonuçlarına göre değişimini vermektedir. Grafikler çizdirilirken anlaşılabilirliği arttırmak için x_{min} , x_{max} ve $T_{maxAllowed}$ kısıtları kullanılmamıştır. GA tarafından bulunan 514.42 m’de boşta gitmeye başlama durumu en düşük uygunluk fonksiyonu değerini vermektedir. T’ye ait ağırlık değeri düşük tutulduğu için T’nin sonuç üzerine etkisi daha fazla olmaktadır. Bu durum uygunluk fonksiyonuna ait eğrinin T eğrisine benzemesine yol açmaktadır.



Şekil 4.28: Boşta Gitmeye Başlama Noktalarına Bağlı Uygunluk Fonksiyonu Eğrisi

Yazılmış olan küçük bir m dosyası ile bulunan bu optimum noktada boşta gitmenin başlaması durumunda oluşacak enerji tüketimi (E), yolculuk süresi (T) ve bu değerlerin tam gaz durumuna ait değerlere göre yüzdelik farkları (fT , ΔT ve fE , ΔE) sorgulanabilir.

Fark.m:

```
function [fT,fE]=fark(x)
global Eag Tag Tmin Emax
E=sim(Eag,x)
T=sim(Tag,x)
fT=(T-Tmin)/Tmin *100
fE=(Emax-E)/Emax *100
```

Bulunan optimum nokta (514.42 m) için YSA'ların verdiği değerler ve bunların tam gaz işletim değerlerine göre yüzdesel farkları;

$$\begin{aligned}
 E &= 2.8181 \text{ (kWh/Araç/km)} && \rightarrow \text{YSA'nın } E \text{ tahmini} \\
 T &= 74.8610 \text{ (s)} && \rightarrow \text{YSA'nın } T \text{ tahmini} \\
 \Delta T &= 1.1635 \text{ (\%)} && \rightarrow T\text{'deki artış yüzdesi} \\
 \Delta E &= 19.9416 \text{ (\%)} && \rightarrow E\text{'deki azalış yüzdesi}
 \end{aligned}$$

Yukarıdaki değerlere bakılınca optimum nokta olarak bulunan 514.42 m'de boşta gitmeye başlama durumunda, trenlerin ortalama 2.81 kWh/Araç/km enerji tüketecekleri ve tam gaz işletmeye göre %19.94'lük bir tasarruf sağlayacakları görülmektedir. Bu tasarrufa karşılık, yolculuk süresinin 0.86 s, yani %1.16 oranında artacağı tespit edilmiştir. Sonuçlar bize uygunluk fonksiyonunun istediğimiz şekilde işlediğini göstermektedir: Yolculuk süresi 74.5-75 s arasında ve enerji tüketimi 3 kWh/km değerinin altındadır.

Bu noktada tek tren durumu ile bir karşılaştırma yapıldığı zaman regeneratif frenlemenin enerji tüketimi üzerine etkisi daha net anlaşılabacaktır. Tek tren olması durumunda %1'lik süre artışı için bulunan optimum boşa geçme noktası 540 m civarında idi (bkz Tablo 4.1). Bu durumda oluşan enerji tüketimi, tam gaz durumuna ait tüketim değeri olan 5.14 kWh/Araç/km'den %16.06 daha az, 4.31 kWh/Araç/km olarak bulunmuştu. Çok tren olması durumunda da benzer oranlarda tasarruf elde edilmiştir. Boşa geçme noktası da çok değişmemiştir. Ancak, hattın eğim değerleri ile bu değerlerin değişebileceği unutulmamalıdır.

Parametrelerin etkisi bir kaç test ile araştırılmıştır. Tablo 4.2'de verilmiş olan sonuçlar incelendiği zaman hedeflenen süreye yakın yerlerde optimizasyon sağlanabilmekte olduğu görülmektedir. w_E ve w_T ağırlık değerlerinin etkisi azda olsa gözlenmektedir. Bu parametreler özellikle T_{Hedef} 'i fazla arttırdığımız zaman daha etkili olmaktadır.

Tablo 4.2: Farklı Parametreler İçin Optimizasyon Sonuçları

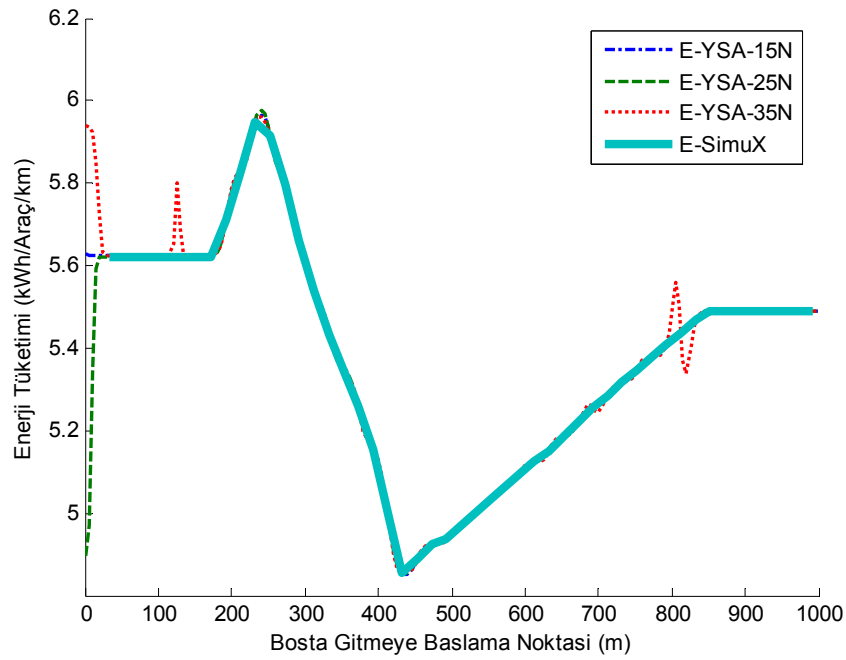
E_{Hedef}	T_{Hedef}	T_{maxAll}	w_E	w_T	X	E	fE	T	fT
3.0	74.5	75	20	80	514.42	2.82	19.94	74.86	1.16
"	"	"	80	20	515.65	2.82	19.81	74.82	1.11
"	75	75	20	80	515.56	"	"	"	"
"	75	76	20	80	446.46	2.65	24.67	75.48	2.00
2.75	"	"	20	80	446.23	"	"	"	"
"	77	78	50	50	389.72	2.56	27.34	77.70	5.00
"	"	"	80	20	388.13	"	"	"	"
"	76	76.5	50	50	447.49	2.65	24.61	75.32	1.78
3.00	"	"	80	20	448.88	"	"	"	"
"	80	82	80	20	324.71	2.47	29.90	80.36	8.59
3.52	75	77	40	60	447.85	2.65	24.59	75.35	1.82
"	"	"	80	20	422.3	2.61	25.88	77	4.05

E_{Hedef} 'in etkisi fazla gözlenmemiştir. Ayrıca, amaç belli süre artışı çerçevesinde mümkün olan en iyi enerji tasarrufunu yakalamak olduğu için bu değerin E_{max} değerine eşit olarak seçilmesi daha mantıklı olmaktadır.

4.2.2 %2 Eğimli Bir Hatta, İki İstasyon Arasında 45 s Aralıklarla Tren Koşturulması Durumu

Hattın sürekli olarak %2 eğim ile yükseldiği durum için boşta gitme noktasının, 32.5 m'den başlayarak 20 m aralıkla, 992.5 m'ye kadar değiştirildiği, 49 adet farklı durum, SimuX'da test edilerek veri setleri ile YSA'lar eğitilmiştir.

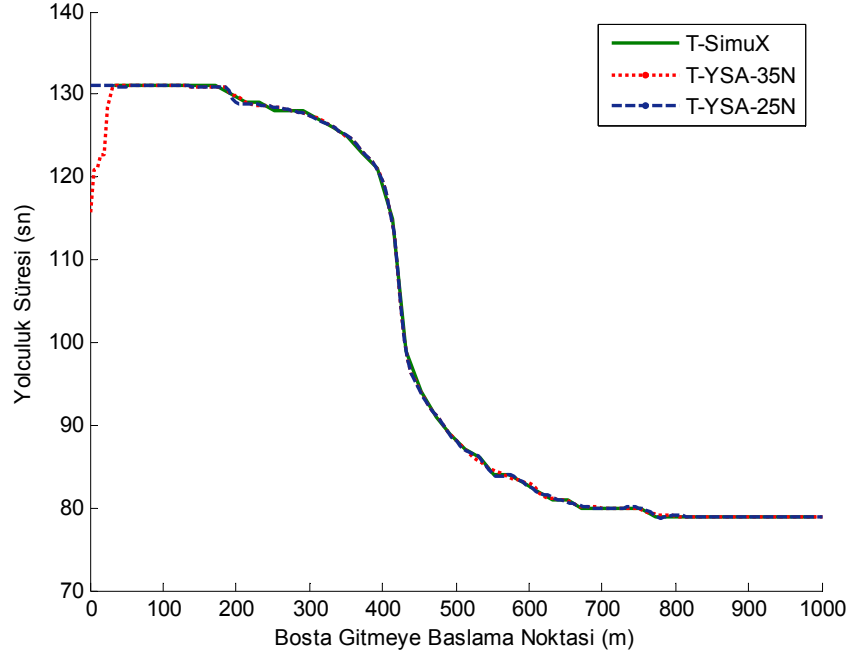
E ve T için ayrı ayrı YSA'lar eğitilmiştir. E için Şekil 4.21'deki ile aynı karakteristiklerde 15 Nöronlu bir YSA eğitilmiştir. Nöron sayısı 25 ve 35 olan iki ayrı ağ daha eğitilmiş ve bu 3 eğitilmiş ağın 0-1000 m arasında, 5 m'de bir boşta gitmeye başlama durumları için ürettikleri cevaplar SimuX'un ürettiği sonuçlar ile karşılaştırmak için aynı eksen takımında verilmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29: E İçin Eğitilen YSA'ların ve SimuX'un Verdiği Sonuçlar

Burada 15 nöronlu ağın simülatörün çıktılarına en uygun çıktıları verdiği görülmektedir. 25 nöronlu ağ 0-50 m arasında sapma göstermektedir. 35 nöronlu ağ ise en fazla sapma gösteren sonuçları vermiştir. Ancak, yine de, her 3 YSA optimizasyon sınırları içinde SimuX ile tamamen aynı sonuçları vermektedirler. Burada hem sonuçlarının doğruluğu hem de, optimizasyon işlem hızından kazanç sağlaması nedeni ile 15 nöronlu YSA'nın kullanılmasına karar verilmiştir.

T içinde benzer şekilde 25 ve 35 nöronlu ağlar eğitilmiştir. Şekil 4.30'da YSA'ların 0-1000 m arasında 5 m'de bir boşta gitmeye başlama durumları için ürettikleri cevaplar SimuX'un ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmak amacı ile aynı eksen takımında verilmiştir.



Şekil 4.30: T İçin Eğitilen 35 Nöronlu YSA'nın Verdiği Sonuçlar

Grafiklerden görüldüğü gibi, YSA ve SimuX'un neredeyse aynı cevapları verdiği söylenebilir. Farklılık sadece 0-50 m arasında gözle fark edilebilir hal almaktadır. Bu bölge ise zaten GA tarafından dikkate alınmamaktadır. Uygunluk fonksiyonunda girilen parametrelerden biri ile bu bölgeler otomatik olarak elenmektedir.

GA ile Optimizasyon

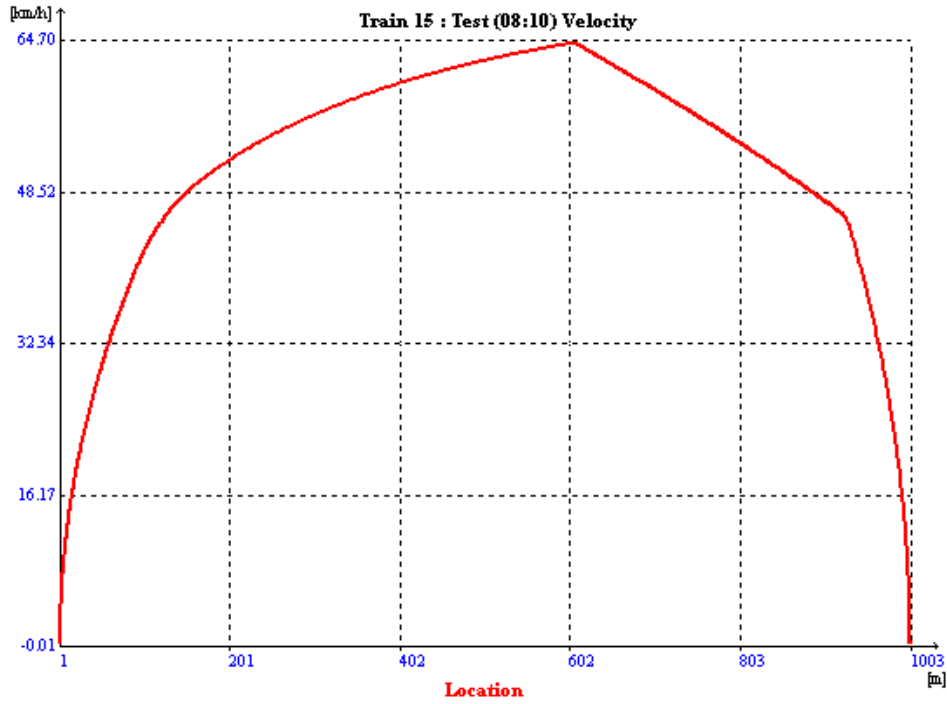
Yaklaşık %3 süre artışına karşılık en düşük enerji tüketimini veren boşta gitmeye başlama noktasının bulunmasına yönelik optimizasyon için aşağıdaki parametreler kullanılmıştır;

```
EHedef=5.49;
THedef=81;
TmaxAllowed=82;
wE=80;
wT=20;
xmin=300;
xmax=800;
Tmin=79;
Emax=5.49;
```

GA optimizasyon aracı, yukarıdaki şartlar çerçevesinde, 617.68 m'de boşta gitmeye başlamanın en uygun olacağını saptamıştır. Bu değer için elde edilen E ve T değerleri, ve bunların $T_{\min}$ ve $E_{\max}$ değerlerine göre fark yüzdeleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} E &= 5.1317 \text{ (kWh/Araç/km)} & T &= 81.3645 \text{ (s)} \\ \Delta E &= 6.5262 \text{ (\%)} & \Delta T &= 2.99 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Görüldüğü üzere yolculuk süresi yaklaşık %2.99 uzamasına (2.36 s) rağmen enerji tasarrufu sadece %6.5 mertebesinde kalmaktadır. Önerilen noktada (617.68 m) boşta gitmeye başlaması durumunda trenlere ait Hız-Yer grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir. Tren belirtilen noktada (617.68 m) boşta gitmeye başlamaktadır. Bu noktada trenin hızı 64.7 km/h'dir, %2 eğimden ötürü yaklaşık 300 m boyunca boşta giderek hız kaybeden tren yaklaşık 45 km/h hızda iken ikinci istasyon için frenlemeye geçerek durmaktadır.



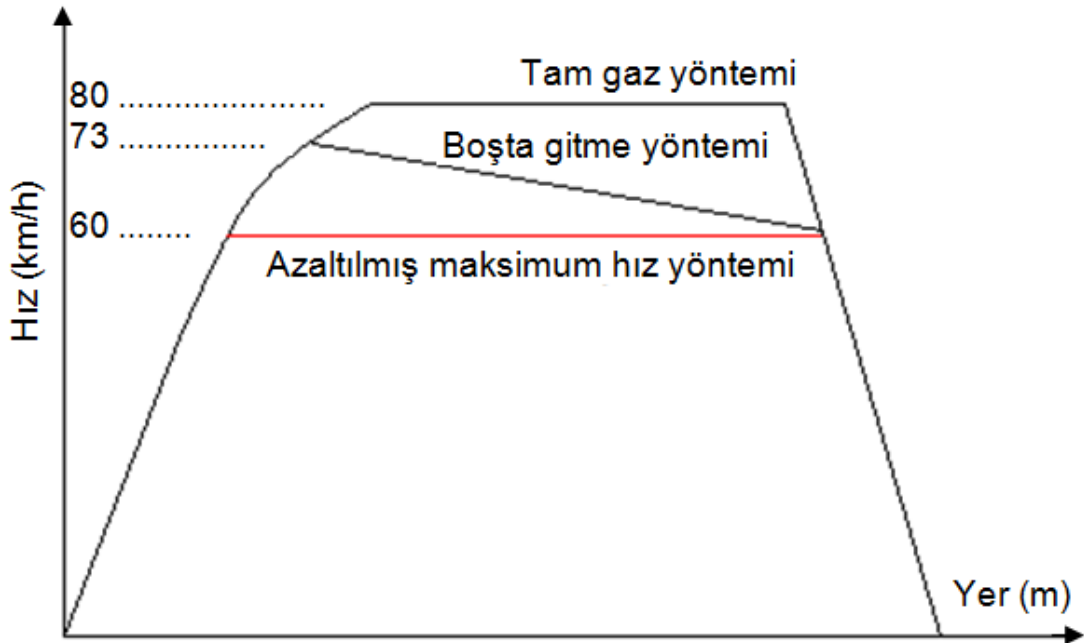
Şekil 4.31: %2 Eğimli Hatta, 45 s TAS İşletimde, Trenlerin 617.68 m'de Boşta Gitmeye Başlaması Durumunda Oluşan Hız-Yer Grafiği

Bölüm 4.1.3'deki grafiklerden +%2'lik eğime sahip hatta tek tren işletilmesi durumunda %3'lük süre artışına karşılık bulunmuş olan optimum süzülme noktası da 620 m civarlarındadır. Ancak, bu durumda enerji tüketiminden elde edilecek tasarruf değeri %15 civarında bulunmuştu. Benzer koşullar altında, elde edilen enerji tasarruf değerinin çok trenli durumda tek trenli duruma göre daha az olmasının sebebi trenlerin regeneratif frenleme yaparak birbirlerini beslemesidir.

4.3 Azaltılmış Maksimum Hız Yöntemi ve Karşılaştırması

Dünya’da bir çok otomatik sürüşlü metro hattında, Taksim – 4 Levent metro hattında olduğu gibi, boшта gitme yöntemi yerine, doruk saatler dışında trenin maksimum hız değeri düşürülerek enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu yöntemde; küçük gecikmeleri telafi etmek için tanımlanmış olan ilave süre kadar süre kaybına yol açacak azaltılmış maksimum hız değeri bulunarak trenlere bu hızın aşılması emri verilmektedir. Trenler daha düşük hızda ivme keserek, bu hız değerinde yol almakta ve dolayısı ile daha az enerji tüketmektedirler. Ancak, uzun süre belli bir sabit hızda gitmek için motorların küçük sürelerle de olsa sık sık devreye alınıp çıkartılmaları gerekliliği sebebi ile motorların daha fazla zorlanacağı dikkatlerden kaçırılmamalıdır.



Şekil 4.32: Farklı İşletme Yöntemleri için Hız – Yer Eğrileri

Boşta gitme yönteminin azaltılmış maksimum hız yöntemine göre avantaj sağlayıp sağlamadığını anlamak için bir dizi benzetim çalışması yapılmıştır. Çalışmada, yukarıda örnek olarak verilen Şekil 4.32’ de gösterildiği gibi tam gaz yönteminde elde edilen yolculuk süresine göre belli bir süre uzamasına yol açan boşta gitme noktası ve bu sürüş yöntemi ile elde edilen enerji tasarrufu bulunmuştur. Daha sonra aynı süre artışını veren azaltılmış maksimum hız değeri ve bu durum için enerji tüketim değerleri benzetim çalışmaları ile tespit edilmiştir.

Tablo 4.3’ de gerçekleştirilmiş çalışmaların sonuçları özetlenmiştir. 1 km uzunluğundaki düz yol durumunda elde edilen tasarruf miktarları incelendiği zaman

boşta gitme yönteminin azaltılmış maksimum hız yöntemine göre %3-4 oranlarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak, hattın güzergahı V biçinde olursa, aynı süre artışları için elde edilen enerji tasarruf miktarları, boşta gitme yönteminde %20-30 daha fazla gerçekleşmektedir.

Tablo 4.3: T_{min} 'e Aynı Süre Artışına Yol Açan Boşta Gitme ve Azaltılmış Maksimum Hız Yöntemlerinde Elde Edilen Enerji Tasarruf Değerleri

Yöntem		T_{min} 'e Göre Süre Artışı					
		%1		%3		%5	
		Boşta Gitme	Düşük V_{max}	Boşta Gitme	Düşük V_{max}	Boşta Gitme	Düşük V_{max}
E1*=%0.0	V_{max} (km/h)	73.6	72	70.1	67.5	66.8	64
E2*=%0.0	ΔE (%)	16.3	13.5	23.8	20.6	30	25.9
E1=%-3.0	V_{max} (km/h)	79.7	76	76.2	71.5	72.7	68.5
E2=%0.6	ΔE (%)	25.4	6.1	34.9	12.4	44	16.6

*E1 hattın ilk yarısındaki eğim değerini, E2 ise ikinci yarısındaki eğim değerini vermektedir.

Tablo 4.3, boşta gitme yönteminin azaltılmış maksimum hız yöntemine göre daha fazla enerji tasarrufu sağladığını ve oluşan farkın hattın güzergahına bağlı olarak farklı değerlerde oluşacağını göstermektedir.

4.4 İki İstasyonlu Durumların Değerlendirmesi

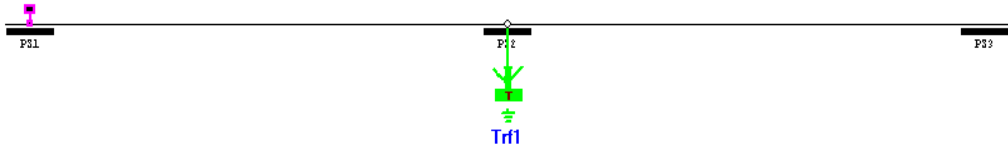
İki istasyonlu durumlarda, başka simülasyon yapılmadan aşağıda verilen hususlar söylenebilir;

1. Yapılan farklı YSA eğitime testlerinden sonra, E ve T için ayrı ayrı YSA'ların eğitilmesinin 2 çıkışlı tek bir YSA'nın eğitilmesinin daha kolay olduğu ve sonuçların da daha hassas olduğu saptanmıştır.
2. Gizli katmandaki nöron sayısı sonuçların doğruluğunu etkilemekle beraber nöron sayısının artışı ile performans arasında doğru bir orantı gözlenmemiştir.
3. GATool'un daha hızlı ve doğru çalışması için, YSA'ların genelde yüksek hata payına sahip olduğu uç noktalar dikkate alınmamalıdır.
4. Hattın geometrisi donuclar üzerinde çok etkilidir. Sürekli yokuş yukarı olan bir hatta, %3'lük süre artışı ile çok az tasarruf elde edilebilmekte iken, yokuş aşağı olan hatta bu tersine dönmektedir. Bu nedenle, yokuş yukarı çıkışlarda tasarruf hedeflenmemeli, bunun yerine yokuş aşağı inişlerde daha fazla zaman kaybına izin verilmelidir.

5 ÜÇ İSTASYONLU DURUMLARIN OPTİMİZASYONU

5.1 Test Hattı

Doğal olarak, üç ve daha fazla istasyon durumunda optimizasyon daha karmaşıktır ve daha geniş bir çözüm uzayında kombinasyonların araştırılmasını gerektirir. Şekil 5.1’de verilen test hattı; 2 km uzunluğunda olup, 51 m, 1000 m, ve 1950 m’lerde 3 istasyon içermektedir. İstasyonlarda bekleme süresi 20 saniye olarak alınmıştır. Tren istasyona girerken ve istasyondan ayrılırken hız limiti 50 km/h’ dir. İki istasyon durumundaki araçlardan oluşan, 4’lü dizi, kullanılmıştır. Katener sistem direnci $6,02 \times 10^{-5} \Omega/m$ olarak alınmıştır. Hat, boşta çalışma gerilimi 820 V DC olan bir adet trafo merkezi ile hattın 1000. m’sinden beslenmektedir.



Şekil 5.1: Üç İstasyonlu Test Hattının Gösterimi

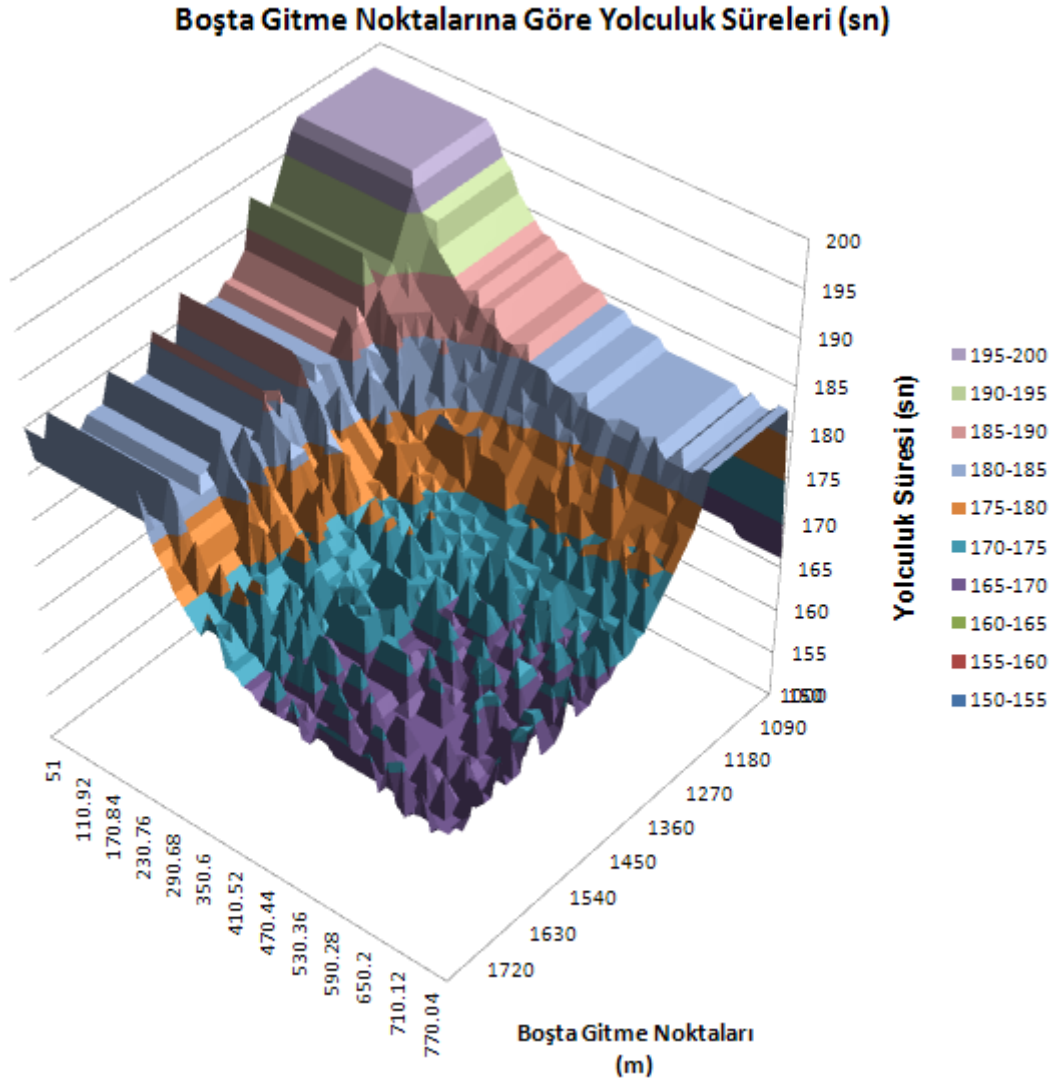
5.2 Üç İstasyonlu Düz Hattı Ait Optimizasyon

Üzerinde 3 istasyon bulunan bu hatta 2 adet boşta gitme noktası (X_1 ve X_2) bulunacaktır. Yukarıda belirtilen hat yapısı ile 200 adet rastgele boşta gitme noktası kombinasyonu için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve girdi-çıkıtlı bilgileri bir txt dosyasına yazdırılmıştır. Tablo 5.1’de verilmiş olan dosyada ilk 2 sütun 1. ve 2. boşta gitmeye başlama mesafelerini, 3. sütundaki değer kWh/Araç/km enerji tüketimini ve son sütun ise trenin yolculuk süresini vermektedir.

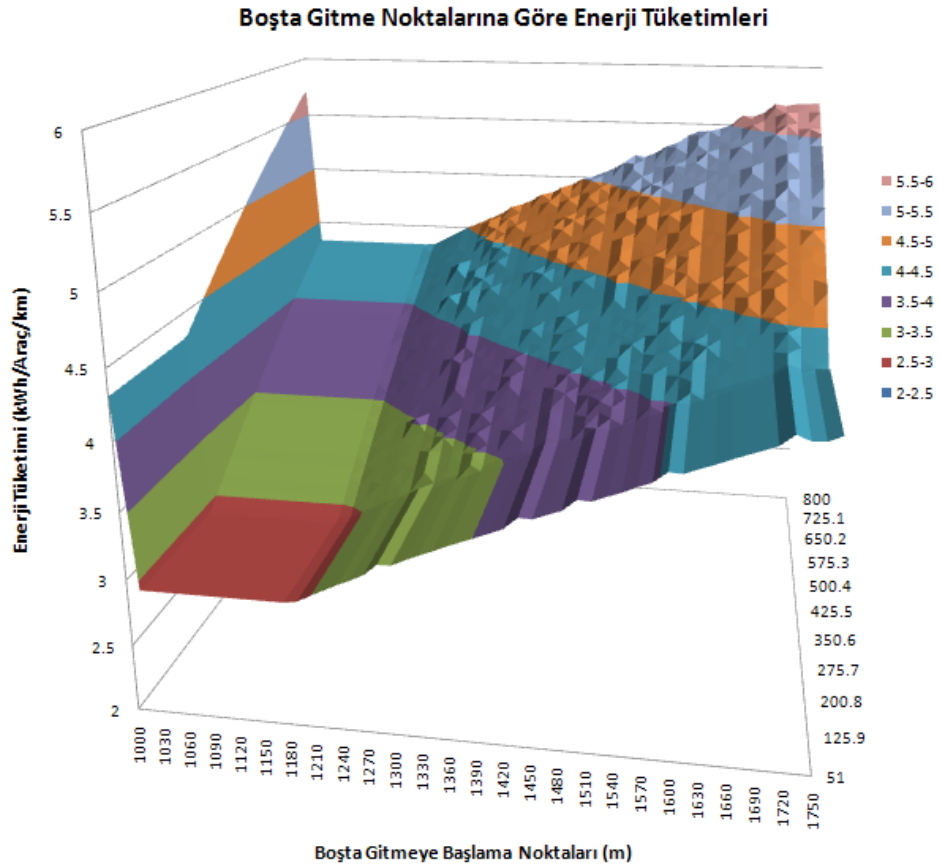
Tablo 5.1: Üç İstasyonlu İşletmede: Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Bazı Test Sonuçları

Test No	X_1 (m)	X_2 (m)	E (kWh/km)	T (s)
1	599.76	1404.7	4.48463	170
2	771.07	1514.42	5.17509	167
3	465.5	1657.62	4.75807	170
4	269.7	1009.67	2.9317	198

Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için, $50 \text{ m} < X_1 < 800 \text{ m}$ ve $1000 \text{ m} < X_2 < 1750 \text{ m}$ arasındaki her iki boşta gitme noktası 15 m aralıkla değiştirilerek 2601 farklı X_1 ve X_2 kombinasyonu için yapılan simülasyonlarla bulunan T ve E değerlerinin oluşturduğu yüzeyler Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verilmiştir.



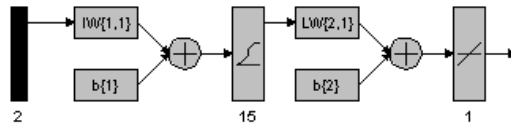
Şekil 5.2: X_1 ve X_2 Değerleri İçin T Değerleri



Şekil 5.3: X_1 ve X_2 Değerleri İçin E Değerleri

5.2.1 Yapay Sinir Ağları ve Eğitimi

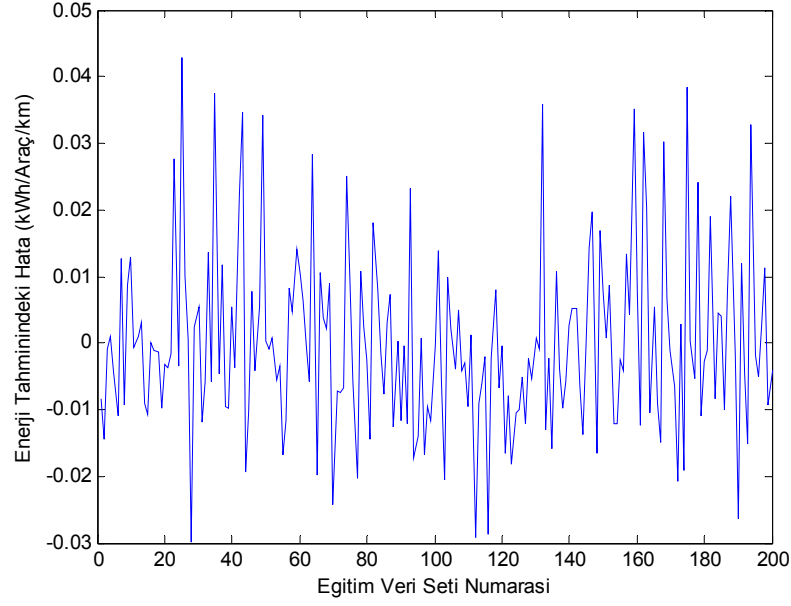
Üç istasyonlu durum için YSA'ların eğitimlerinde yukarıda sözü edilen 200 adet veri seti kullanılmıştır. E için eğitilmiş 2-15-1 YSA Şekil 5.4'de verilmiştir.



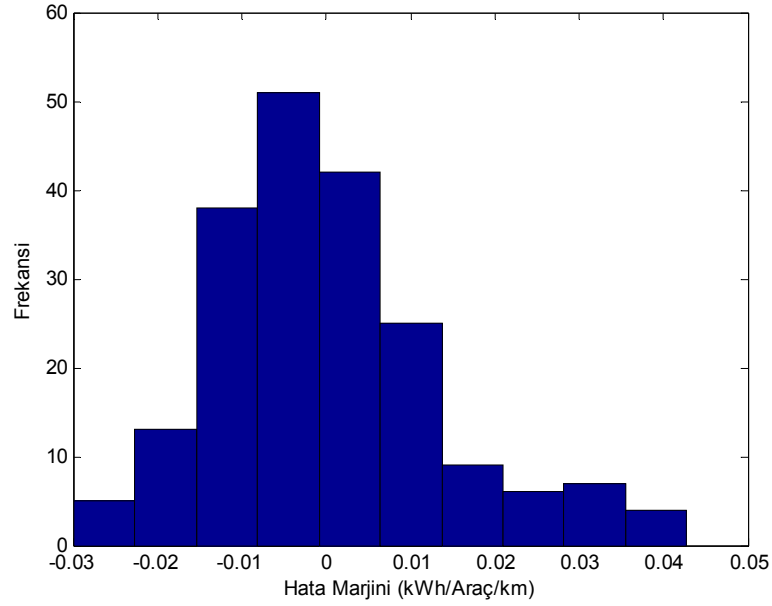
Şekil 5.4: E Tahmini için 2-15-1 YSA

Şekil 5.4'deki YSA'nın 200 adet eğitim verisi için eğitilmesinden sonra her bir giriş verisi için bulunduğu E değerlerinin olması gerekene göre hata miktarlarına ait grafik Şekil 5.5'de ve bunların histogram dağılımı Şekil 5.6'da verilmiştir.

Şekil 5.5'den, baz alınan SimuX değerlerine göre YSA'nın tahminlerindeki en büyük hata değerinin 0.04 kWh/Araç/km olduğu görülmektedir. Bu miktardaki hata, 5 kWh/Araç/km değerinin %1'inden dahi küçük hata demektir. Şekil 5.6'da verilmiş olan hata dağılımı incelendiği zaman hataların büyük kısmının -0.02 ila 0.02 kWh/Araç/km arasında olduğu görülmektedir. Bu hata değerleri ve hataların dağılımı YSA'nın başarılı bir şekilde eğitildiğini göstermektedir.

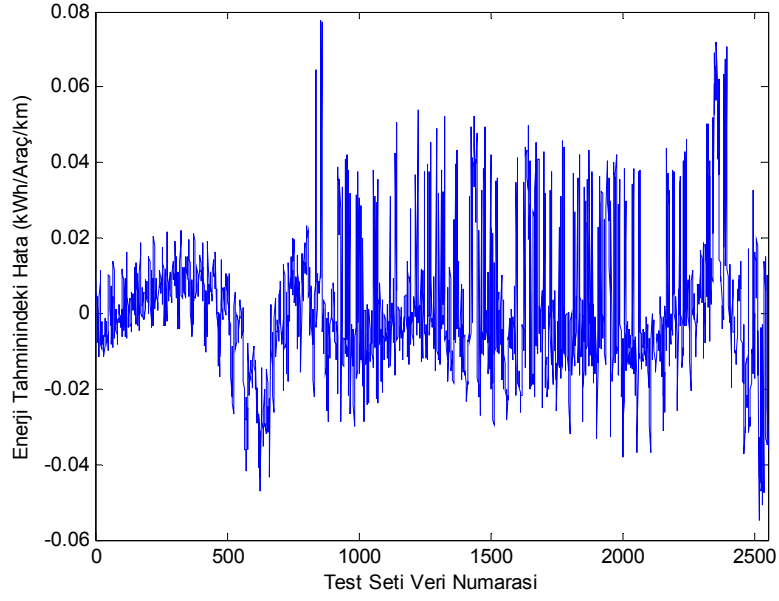


Şekil 5.5: Eğitim Setine Ait YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataları

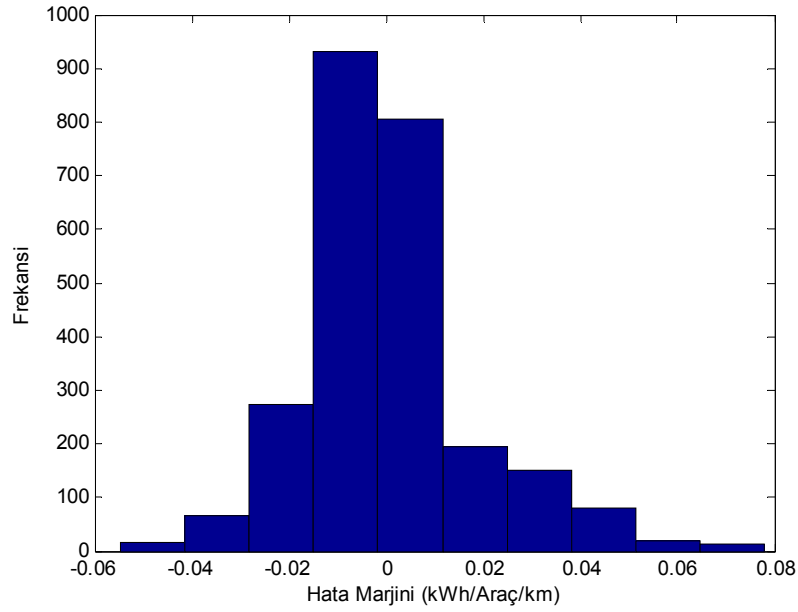


Şekil 5.6: Eğitim Setine Ait YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataların Dağılımı

Eğitilmiş YSA'ların sonuçlarının doğruluğu daha önceden eğitimde kullanılmayan veri setleri ile test edilip denetlenmelidir. Bu sebeble, birinci boşta gitme noktası 51-800 m arasında 15 metrelik adımlarla, ikinci boşta gitme noktası ise 1015-1750 m arasında 15 metrelik adımlarla değiştirilerek 2550'yi aşkın farklı kombinasyon SimuX ile simule edilmiş ve bu simülasyonların sonuçları eğitilmiş YSA'ya girilmiştir. Bu test verileri için YSA'nın ürettiği E değerlerinin simülasyon sonuçlarına göre hataları Şekil 5.7'de histogram dağılımı Şekil 5.8'de verilmiştir.



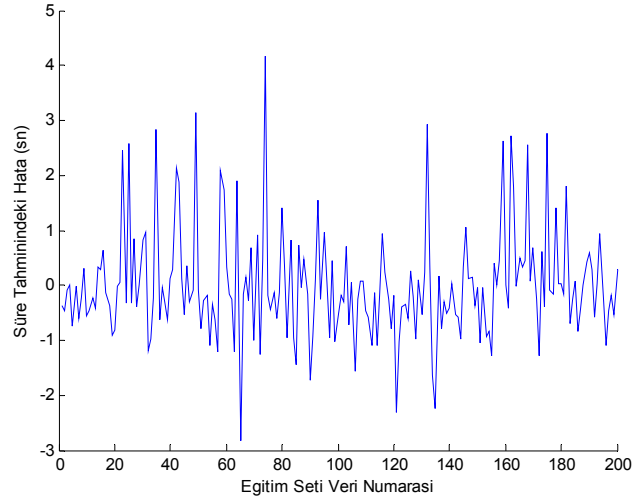
Şekil 5.7: Test Setine Ait YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataları



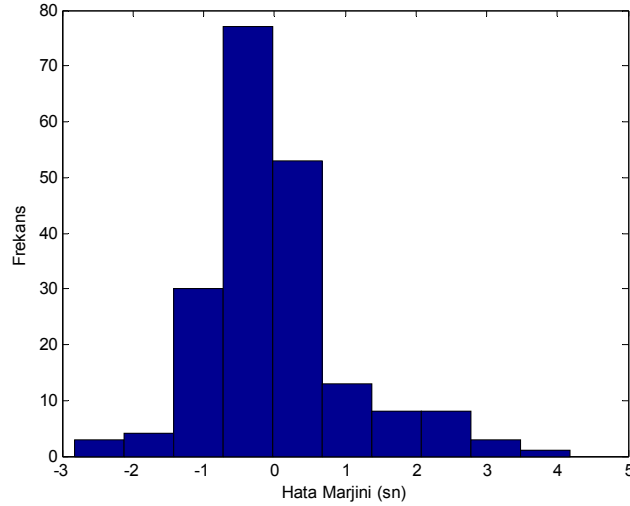
Şekil 5.8: Test Seti İçin YSA Çıktılarının E Değerlerindeki Hataların Dağılımı

Hedeflerle kıyaslandığında YSA'nın maksimum hata derecesinin %3'ün altında olduğu görülebilmektedir. Histogramdan ise 2550 adet test verisine ait hataların büyük çoğunluğunun %2 sınırının altında kaldığı görülmektedir.

T için ayrı bir 2-32-1 YSA, 200 adet eğitim verisi ile eğitilmiştir. Hataların grafiği Şekil 5.9 ve histogram dağılımı Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.9: Eğitim Setine Ait YSA Çıktılarının T Değerlerindeki Hataları



Şekil 5.10: Eğitim Seti İçin YSA Çıktılarının T Değerlerindeki Hataların Dağılımı

T için olan YSA %2'den daha az hata ile farklı boşta gitme verileri için yolculuk sürelerini tahmin etmeyi başarmıştır. X_1 , 245-800 m arası ve X_2 , 1240-1750 m arasında seçilen 1330 farklı test verisi YSA'da simüle edildiğinde maksimum hata %3 civarında bulunmuştur.

5.2.2 GA ile Optimizasyon

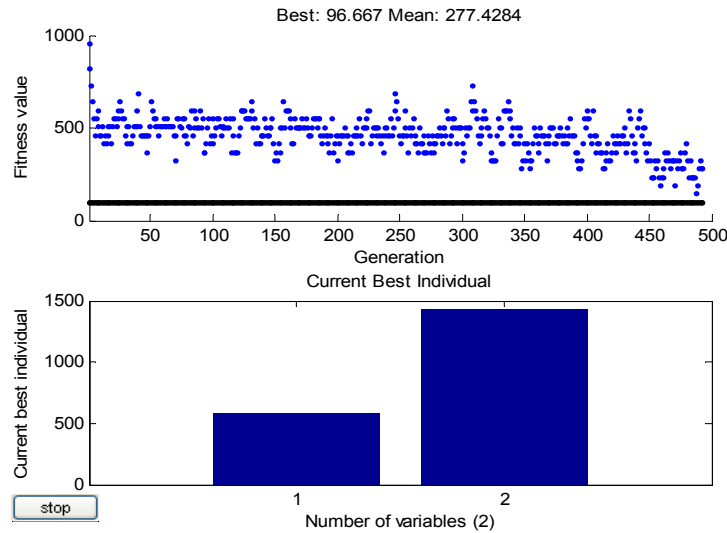
Matlab GATool aracı en uygun boşta gitme noktalarının bulunmasında kullanılmıştır. Optimizasyonun hızını artırmak için boşta gitme noktalarının GA tarafından ilk rastgele atanmasında X_{min} ve X_{max} dizilerinin kullanılması fayda sağlamıştır. Bu sınırlandırmalar aracın istasyon duruşu için frenleme yapması gereken veya ilk kalkışta 50 km/h'ye ulaşamadığı yerlerin optimizasyon için gerçekleştirilen aramada ihmal edilmesini hedeflemektedir. Bir tam gaz çalışmasının Hız-Yer profiline bakarak

bunların değerleri optimizasyon öncesi çalışma ile belirlenir. Bu test durumu için $xmin=[300 \ 1300]$; $xmax=[800 \ 1800]$ olarak atanmışlardır. Kullanılan **Setup.m** dosyası aşağıda verilmiştir;

```
global Eag Tag wE wT EHedef THedef TmaxAllowed xmin xmax Tmin Emax
Eag=Eag3PS; Tag=Tag3PS;
EHedef=5.5;
THedef=169;
TmaxAllowed=171;
wE=20;
wT=80;
xmin=[300 1300];
xmax=[800 1800];
Tmin=166;
Emax=5.7;
```

$E_{Hedef}=5.5$; $T_{Hedef}=169$; $T_{maxAllowed}=171$; $w_E=20$; $w_T=80$ Durumu

Setup.m dosyasında $xmin$ ve $xmax$ 'lar artık bir dizi olarak tanımlanmakta olup, bu girilen değerler için, $300 < X_1 < 800$ m ve $1300 < X_2 < 1800$ m aralığında sorgulama yapılacaktır. Şekil 5.11'de GATool'un yapmış olduğu optimizasyonun çıktıları verilmiştir.



Şekil 5.11: Üç İstasyonlu Düz Hatta İlişkin Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon verilen sınır şartları için 582 m ve 1434 m'lerde boşta gitmeye başlamanın en uygun olacağını göstermektedir. Bu sonuçlar yaklaşımın doğruluğunu göstermektedir. Gerilim düşümünün araç performansı üzerine etkileri sonuçları etkilemektedir. İstasyonlar arası mesafeler eşit olsa da, bulunan en uygun boşta gitmeye başlama noktaları birbirinden farklıdır. Tren ilk istasyondan çıktıktan 531 metre sonra boşta gitmeye başlarken, ikinci istasyondan çıkış yaptıktan 434 metre sonra boşta gitmeye başlamasının en uygun olacağı saptanmıştır.

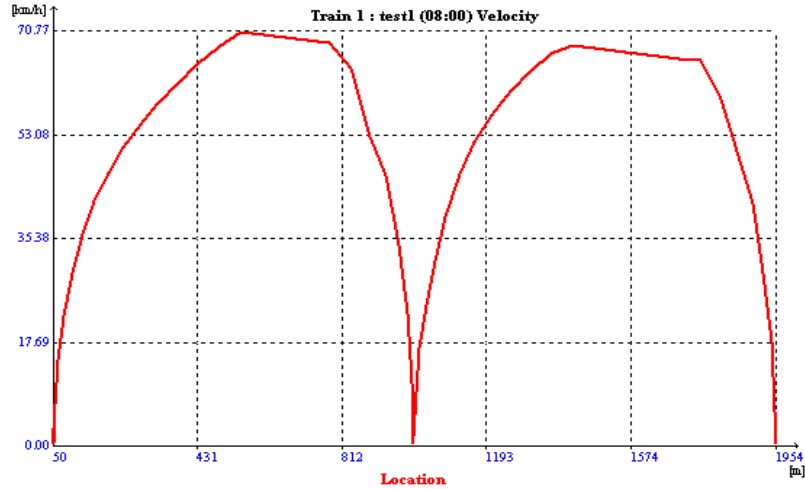
İstasyonların trafoya yakın, veya uzak olması trenin hızlanmasına, dolayısı ile yolculuk süresine ve enerji tüketimine etki etmektedir.

GA her seferinde rastgele başlangıç koşulları kullandığı için sonuçlar her seferinde az da olsa farklı olabilmektedir. GATool ile optimizasyon bir çok kez tekrar başlatılmış ve bulunan X_1 ve X_2 değerleri kayda alınmıştır. Sonuç olarak X_1 değerinin 579-592 m arasında ve X_2 değeri 1430-1475 m arasında olması gerektiği saptanmıştır.

Bulunan noktalarda ($X_1 = 582$ m ve $X_2 = 1434$ m) boşta gitmeye geçilmesi durumunda baz alınan tam gaz durumuna göre yolculuk süresindeki artış ve enerji tasarrufu yüzdesel olarak aşağıda verilmiştir. Yolculuk süresi tam gaz işletme modundaki yolculuk süresine göre %2.0542 artarak 169.409 saniye olacak, ancak enerji tüketimi ise tam gaz durumundaki değere göre %20.5206 azalarak 4.5303 kWh/Araç/km olacaktır.

$$\begin{aligned} E &= 4.5303 \text{ (kWh/Araç/km)} & T &= 169.4090 \text{ (s)} \\ \Delta E &= 20.5206 \text{ (\%)} & \Delta T &= 2.0542 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Sonuçları karşılaştırmalarda baz alınan SimuX yazılımı bulunan boşta gitmeye başlama noktaları için koşturulduğu zaman, yolculuk süresini 170 s, enerji tüketimini 4.52 kWh/km olarak saptamaktadır. YSA'ların bulduğu sonuçlar; E için %0.22 hata oranı ile, T için %0.35 hata oranı ile doğrudur. Şekil 5.12'de önerilen boşta gitme durumu için oluşan Hız-Yer grafiği görülmektedir.



Şekil 5.12: 582 m ve 1434 m'de Boşta Gitme Durumda Tren Hız-Yer Grafiği

Tablo 5.2'de farklı T_{Hedef} ve $T_{maxAllowed}$ değerleri için üçer kez tekrar edilen GA optimizasyonları sonucunda elde edilmiş X_1 ve X_2 değerleri görülmektedir. Her bir rastgele başlangıç koşulu için GA optimizasyonuna ait sonuçlar küçük farklılıklar gösterse de en uygun boşta gitme başlangıç noktaları her seferinde birbirlerine yakın değerlerde çıkmaktadır.

Tablo 5.2: Farklı Setup Parametreleri için Gerçekleştirilmiş Farklı GA Sonuçları

Test No	$T_{Hedef}=169$ s $T_{maxAllowed}=171$ s		$T_{Hedef}=170$ s $T_{maxAllowed}=172$ s		$T_{Hedef}=175$ s $T_{maxAllowed}=177$ s	
	X_1 (m)	X_2 (m)	X_1 (m)	X_2 (m)	X_1 (m)	X_2 (m)
1	582	1432	445	1471	394	1341
2	588	1475	446	1473	421	1321
3	586	1435	454	1456	419	1315

Bulunan en uygun boşta gitmeye başlama değerleri için YSA'ların ve SimuX'un cevapları Tablo 5.3'de verilmiştir.

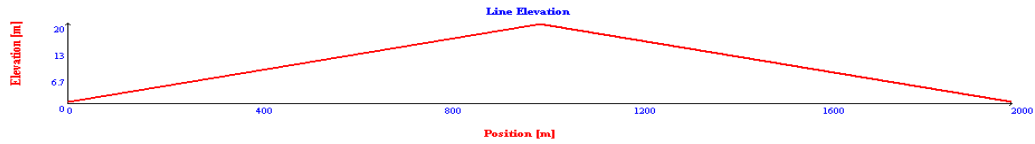
Tablo 5.3: Optimum Noktalar için YSA'ların ve SimuX'un Cevapları

	$X_1=582$ m $X_2=1432$ m		$X_1=445$ m $X_2=1471$ m		$X_1=394$ m $X_2=1341$ m	
	YSA	SimuX	YSA	SimuX	YSA	SimuX
E (kWh/Araç/km)	4.5251	4.518	4.2563	4.246	3.7605	3.756
ΔE (%)	20.6131	-	25.3282	-	34.0272	-
T (s)	169.4472	171	171.9298	172	176.7726	177
ΔT (%)	2.0766	-	3.5722	-	6.4895	-

Yukarıdaki tablodan görüleceği üzere, GA ile istenen süre için optimizasyon yapılabilir. Bu optimum noktalarda boşta gitme durumunda YSA'nın ürettiği cevapların, SimuX'un sonuçlarına çok yakın olduğu dikkati çekmektedir.

5.3 Üç İstasyonlu, +%2 ve %-2 Eğimli Hat Durumuna Ait Analizler

İlk iki istasyon arasında +%2 sürekli yokuş yukarı çıkış ve son iki istasyon arasında %-2 eğimin olduğu kabul edilmiştir (Şekil 5.13).

**Şekil 5.13:** Üç İstasyonlu, +%2 ve %-2 Eğimli Hat Profili

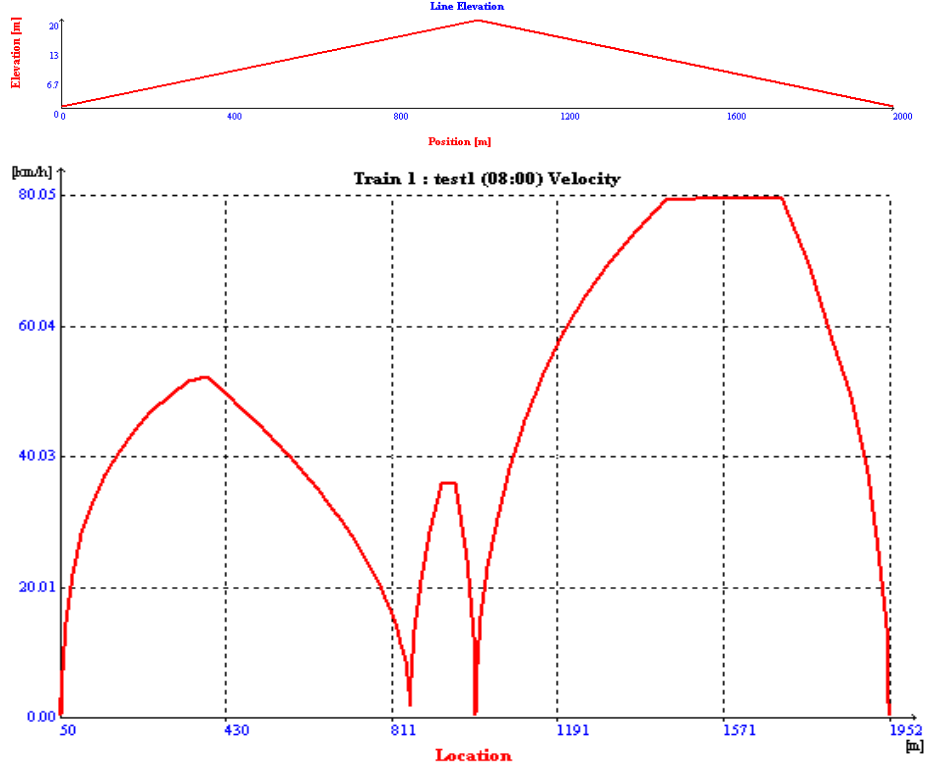
Bu hat durumu için SimuX ile oluşturulan eğitim setinin bir kısmı Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4: Çıkış-İnişli Hattta Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Bazı Test Sonuçları

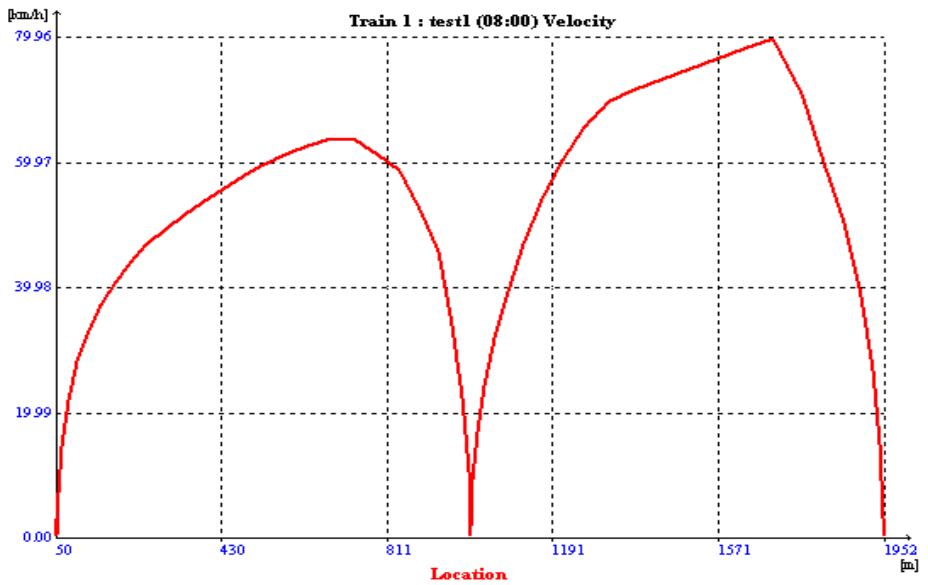
Test No	X_1 (m)	X_2 (m)	E (kWh/Araç/km)	T (s)
1	672.64	1560.56	5.16143	177
2	102.92	1114.95	4.68862	230
3	225.15	1439.01	5.37392	224
4	415.68	1697.43	5.19157	217
5	762.25	1352.35	5.08298	172

Tablo 5.4'in son iki satırındaki E ve T değerleri için; 172 s ve 217 s'lik yolculuk sürelerine karşılık enerji tüketiminde ciddi bir fark görülmemektedir. Test No 4'deki

415.68 m ve 1697.43 m'lerde boşta gitme durumuna ait Hız-Yer grafiği hat profili ile birlikte şekil 5.14'de verilmiştir. Test No 5'deki 762.25 m ve 1352.35 m'lerde boşta gitme durumuna ait Hız-Yer grafiği şekil 5.15'de verilmiştir. İlk grafikte tren yokuş çıkarken erkenden boşta gitmeye geğmekte, dolayısı ile hızla hız kaybederek 1 km/h olarak tanımlanmış olan tekrar motor hızına inmekte ve tekrar ivmelenmektedir. Bu durumda enerji tüketimini arttırmaktadır.



şekil 5.14: 416 m ve 1697 m'lerde Boşta Gitme Olması Durumunda Hız-Yer Grafiği



şekil 5.15: 762 m ve 1352 m'lerde Boşta Gitme Olması Durumunda Hız-Yer Grafiği

5.3.1 YSA Eğitimi Aşaması

Bu durumda 25 nöronlu bir ağa enerji tüketimleri, 27 nöronlu başka bir ağa yolculuk süresi öğretilmiştir. Bu ağlar ile yapılan GA optimizasyon çalışmaları aşağıda verilmiştir.

5.3.2 GA ile Optimizasyon

Tam gaz işletme modunda 172 saniye olan yolculuk süresini 200 saniyeye çıkartan en uygun boşta gitme noktalarının bulunmasında GA için kullanılan parametreler şunlardır:

```
EHedef=5.64;  
THedef=200;  
TmaxAllowed=200;  
wE=90;  
wT=10;  
xmin=[200 1200];  
xmax=[900 1900];  
Tmin=172;  
Emax=5.64;
```

Yukarıdaki ve başka bir durum için yapılan optimizasyonlara ait sonuçlar Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5: Farklı Parametreler İçin Optimizasyon Sonuçları

No	T _{Hedef} (s)	T _{maxAll} (s)	w _E	w _T	X ₁ (m)	X ₂ (m)	E (kWh/Araç/km)	ΔE (%)	T (s)	ΔT (%)
1	200	200	90	10	509	1201	4.00	29.05	197.95	15.08
2	176	176	90	10	715	1324	4.90	13.22	175.97	2.31

GA optimizasyonunun, bu hat için de, başarı ile gerçekleştirilebildiği görülmektedir.

5.4 Üç İstasyonlu, %-2 ve %+2 Eğimli Hat Durumuna Ait Analizler

Bu durum bir önceki bölümde incelenen durumun tersine ikinci istasyona kadar %-2 eğimle alçalmaktadır. İkinci istasyondan sonra üçüncü istasyona kadar ise %+2 eğimle yükselmektedir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16: Üç İstasyonlu, %-2 ve %+2 Eğimli Hat Profili

Bu durum için yapılmış olan testlerin bir kısmına ait sonuçlar Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: İnişli - Çıkışlı Hatta Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Bazı Test Sonuçları

Test No	X_1 (m)	X_2 (m)	E (kWh/Araç/km)	T (s)
1	607.22	1108.09	5.3514	217
2	410.65	1539.35	4.36539	172
3	96.36	1584.27	3.98065	175
4	418.7	1137.16	5.03462	218
5	442.8	1589.03	4.58678	170

Bu hat durumunda E için 25 nöronlu ve T için 37 nöronlu YSA'lar eğitilmiştir.

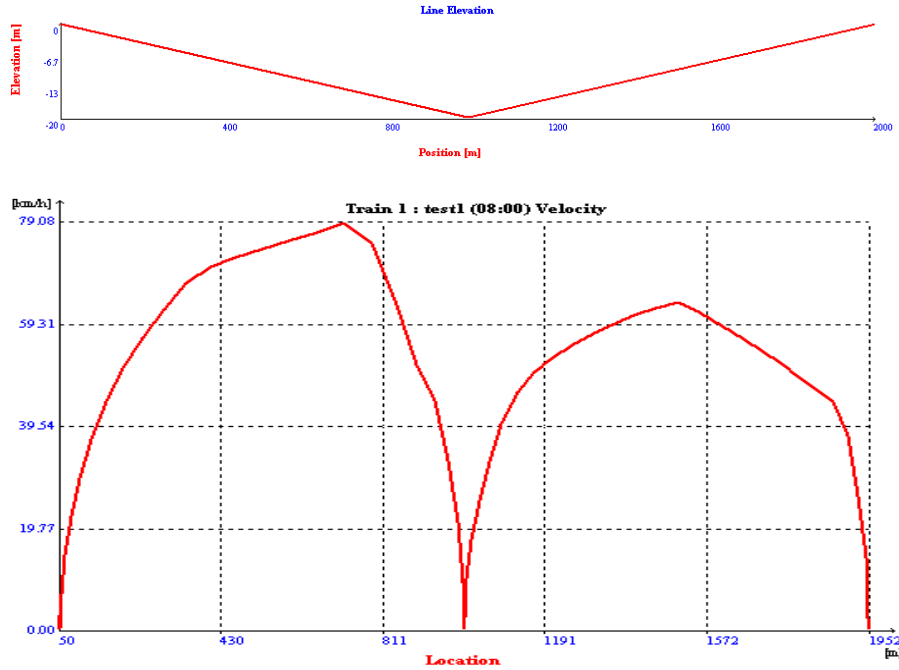
5.4.1 GA ile optimizasyon

Tam gaz işletme modunda 167 saniye olan yolculuk süresini 171 saniyeye çıkartan en uygun boşta gitme noktalarının bulunmasında optimizasyon için şu parametreler kullanılmıştır:

Yukarıda verilen koşullar altında optimum boşta gitme noktaları 423 m ve 1556 m olarak bulunmuştur. SimuX'un bulunan bu optimum boşta gitme noktaları için verdiği Hız-Yer grafiği hat profili ile birlikte Şekil 5.17'de verilmiştir. Bu durum için YSA'ların, E ve T için verdiği değerler ve bunların tam gaz durumuna ait değerlere göre yüzdesel farkları şu şekildedir:

$$\begin{aligned} E &= 4.4234 \text{ (kWh/Araç/km)} & T &= 170.8271 \text{ (s)} \\ \Delta E &= 18.5385 \text{ (\%)} & \Delta T &= 2.2917 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Tam gaz işletme moduna göre, %2.2917'lik süre artışına karşılık %18.5385 enerji tasarrufu elde edilmektedir.



Şekil 5.17: Optimum Noktalarda Boşta Gitme İçin Hız-Yer Grafiği

$T_{Hedef}=178$ saniye alınması durumu için optimum boşta gitmeye başlama noktaları 208 m ve 1523 m olarak bulunmuştur. Bu durum için YSA'ların, E ve T için verdiği değerler ve bunların tam gaz durumuna ait değerlere göre yüzdesel farkları şu şekildedir:

$$\begin{aligned} E &= 3.7139 \text{ (kWh/Araç/km)} & T &= 177.9388 \text{ (s)} \\ \Delta E &= 31.6046 \text{ (\%)} & \Delta T &= 6.5502 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Tam gaz işletme moduna göre, %6.5502'lik süre artışına karşılık %31.6046 enerji tasarrufu elde edilmektedir.

5.5 Farklı Eğimlere Sahip Bir Hattı, 3 İstasyon Olması Durumu

Tablo 5.7 ve Şekil 5.18'dan da görüleceği üzere test hattının eğim değerleri daha gerçekçi seçilerek, 200 adet rastgele boşta gitme noktası kombinasyonu için simülasyon testi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.7: Eğim Değerleri

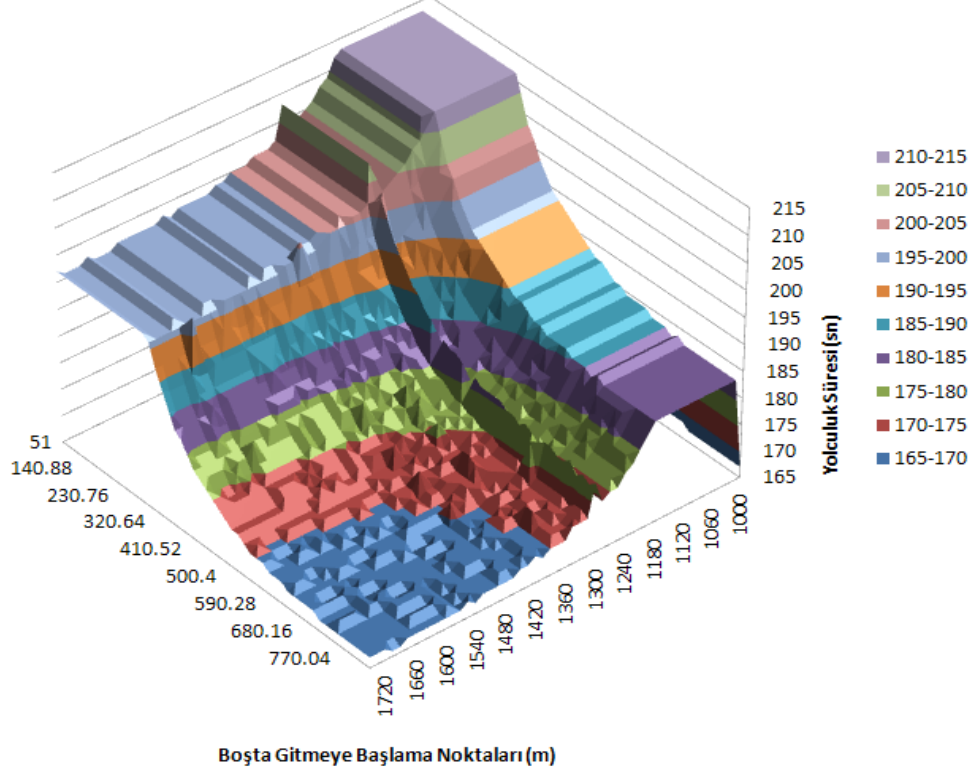
Başlangıç (m)	Bitiş (m)	Eğim (%)
0.00	250.0	0
250.00	800.0	1
800.00	1250.0	-1.5
1250.00	1600.0	0
1600.00	1800.0	2
1800.00	2000.0	-0.8



Şekil 5.18: Farklı Eğimlere Sahip Hattın Görünümü

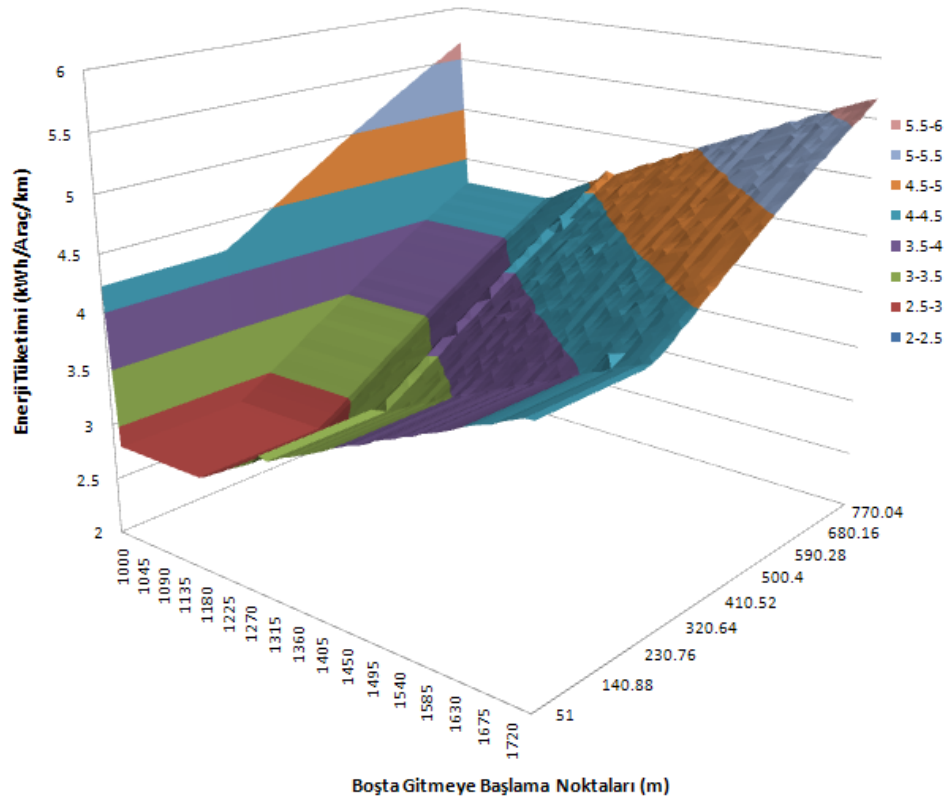
Düz hatta olduğu gibi bu hat içinde boşta gitmeye başlama noktaları için 15 m'lik artışlarla (51x51'lik bir matris) 2601 adet test gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda elde edilmiş olan yolculuk süreleri ve enerji tüketim değerleri sırasıyla Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de yüzey halinde verilmiştir.

Boşta Gitme Noktalarına Göre Yolculuk Süreleri (sn)



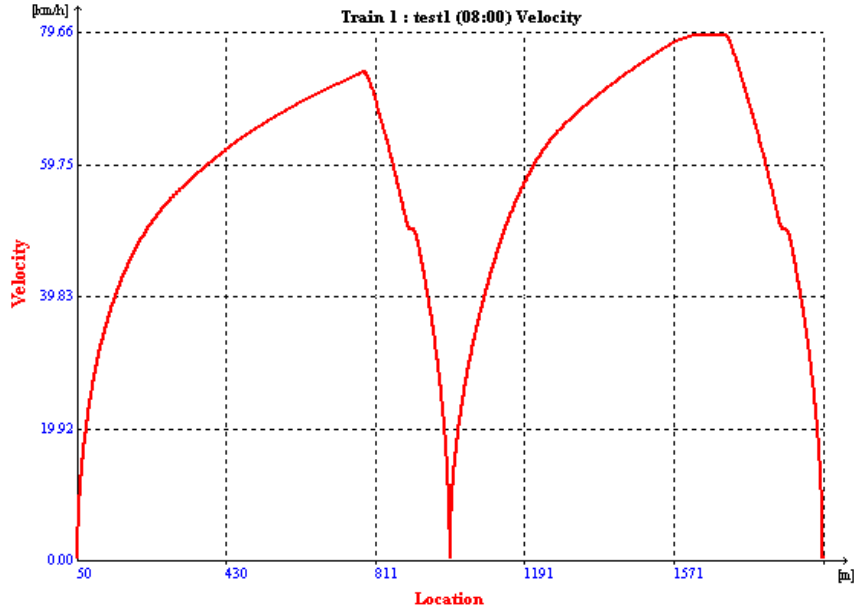
Şekil 5.19: Farklı Eğimli Hatta X_1 ve X_2 Değerleri İçin T Değerleri

Boşta Gitme Noktalarına Göre Enerji Tüketimleri



Şekil 5.20: Farklı Eğimli Hatta X_1 ve X_2 Değerleri İçin E Değerleri

SimuX ile yapılan tam gaz durumuna ait simülasyonu sonucu $E_{\text{SimuX}}=5.718$ kWh/km ve $T_{\text{SimuX}}=168$ s değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.21’de bu hat için elde edilmiş olan tren tam gaz işletme durumuna ait Hız-Yer grafiği görülmektedir.



Şekil 5.21: Farklı Eğimli Hatta, 3 İstasyon Durumu İçin, Trene Ait Hız-Yer Grafiği

5.5.1 GA ile Optimizasyon

Burada, parametrelerin etkisi bir kaç GA testi ile araştırılmıştır. Tablo 5.8’de verilmiş olan sonuçlar incelendiği zaman hedeflenen süreye yakın yerlerde optimizasyon sağlanabilmekte olduğu görülmektedir. w_E ve w_T ağırlık değerlerinin etkisi az da olsa gözlenmektedir. Bu parametreler özellikle T_{Hedef} ’ı fazla arttırdığımız zaman daha etkili olmaktadır.

Tablo 5.8: Farklı Parametreler İçin Optimizasyon Sonuçları

No	T_{Hedef} (s)	T_{maxAll} (s)	w_E	w_T	X_1 (m)	X_2 (m)	E (kWh/Araç/km)	ΔE (%)	T (s)	ΔT (%)
1	170	172	50	50	531	1447	4.27	25.41	171.92	2.33
2	“	“	80	20	694	1367	4.48	21.71	171.85	2.29
3	“	“	20	80	519	1465	4.28	25.13	171.55	2.11

Normal bir hatta olabilecek değişik eğim içeren güzergaha ait yapılan bu optimizasyonların istenilen şekilde gerçekleştirilebildiği görülmüştür.

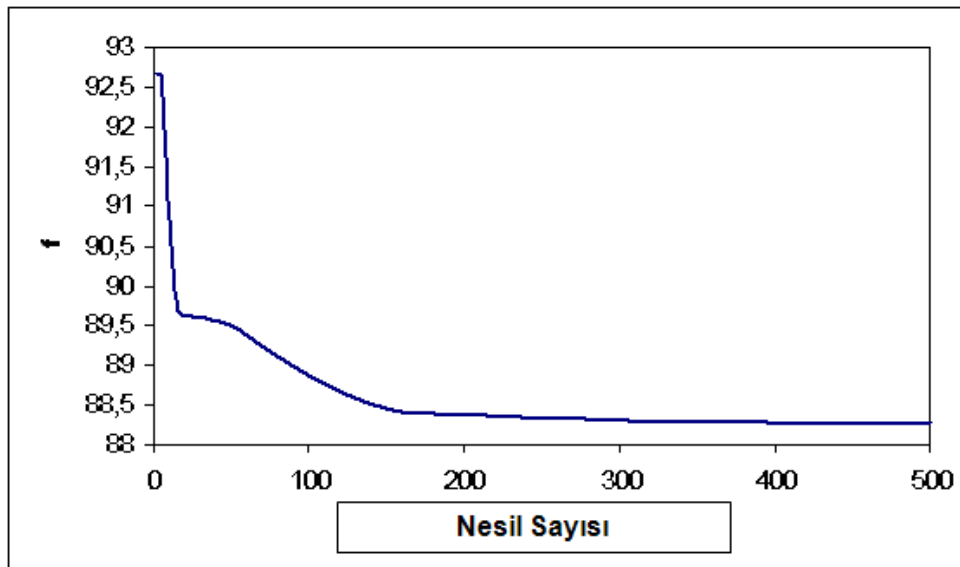
5.6 YSA Kullanımının Avantajı

YSA kullanılmaması durumunda GA doğrudan simülasyon programını çağırarak rastgele atanmış olan boşta gitme noktaları için simülasyonları yaparak optimizasyonu gerçekleştirmeye çalışacaktır. Bu bölüme kadar yapılmış olan optimizasyonlarda hat güzergahı oldukça basit olduğu için, simülatörün çözümleri

bulması saniyeler mertebesinde gerçekleşmektedir. Ancak, optimize edilmeye çalışılan hat güzergahı uzadıkça ve yapısı değişikçe çözüm süresi de artmaktadır. 20 km'lik gerçekçi bir hattın simülasyonu 2.0 GHz hıza sahip bir bilgisayarda 5 dakika kadar sürebilmektedir. Dolayısı ile bir GA optimizasyonunda gerçekleştirilecek olan simülasyon sayısı, optimizasyon hızına doğrudan etki edecektir.

GA'nın parametrelerinde nesil sayısı ve bir nesildeki birey sayısının tanımlanması gereklidir. Bunların GA sonuçlarının hassasiyeti üzerine etkilerinin ve tezde önerilen yöntemin getirdiği zaman tasarrufunun boyutunun anlaşılması için farklı nesil ve birey sayıları için bir çok optimizasyon testi gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucunda 12 bireylik nüfus ile 250 nesil sonrasında veya 20 bireylik nüfus ile 150-200 nesil sonrasında elde edilen optimum noktaların, 20 bireylik nüfusun 500 nesil sonrasında eriştiği optimum noktalardan farkının önemsiz sayılabilecek seviyede olduğu tespit edilmiştir (bkz. Şekil 5.22). Bunun anlamı; eğer simülasyon programı doğrudan GA tarafından çağrılrsa idi, en uygun sonucun elde edilebilmesi için simülasyon programının en az 3000 kere çağrılması gerekecekti. YSA'ların eğitimi içinse sadece 200 kere çağrılması yeterli olmaktadır.

Kazanılan bu hızın en büyük üstünlüğü farklı GA ve uygunluk fonksiyonu parametreleri için optimizasyonların rahatlıkla, hızlı bir şekilde tekrar tekrar gerçekleştirilebilmesidir. Benzer şekilde farklı hedef yolculuk süreleri için simülasyon testlerinin tekrar edilmesine gerek kalmamakta, eğitilmiş YSA'lar kendilerine öğretilen sınır şartlar içinde herhangi bir yolculuk süresinde optimizasyonda kullanılabilmektedir.



Şekil 5.22: En İyi Bireye Ait Uygunluk Değerinin Nesil Sayısına Bağlı Değişimi
($T_{Hedef}=171$ s, Nesildeki Birey Sayısı= 20)

5.7 Sonuçlar ve Değerlendirme

Tezin bu bölümünde 3 istasyonlu bir hat için boşta gitme noktalarının, verilen bir yolculuk süresi için optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu alışmalar esnasında 2 giriş – 2 çıkışlı tek bir YSA yerine enerji (E) ve yolculuk süresi (T) için, iki ayrı YSA'nın eğitilmesinin hata oranlarını aşağıya çekebildiği görülerek, çalışmalar bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. GA'nın iki boşta gitme noktasının optimum değerlerini rahatlıkla saptayabildiği tespit edilmiştir. YSA eğitimleri ve GA optimizasyonları farklı güzergah durumları için başarı ile gerçekleştirilmiştir.

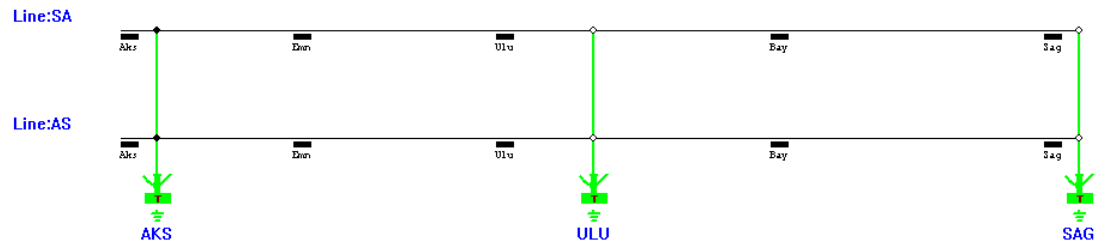
Her bir farklı güzergah durumu için, sadece 200 adet simülasyon sonucu kullanılarak, eğitilen YSA'lar yeni boşta gitme noktalarına ait E ve T değerlerini, gerçek değerlere göre en azla %3 hata ile tahmin edebilmiştir.

Önerilen yöntemle, GA'nın farklı parametrelerinin ve farklı hedef yolculuk süreleri için, optimizasyonlar çok hızlı bir şekilde gerçeklenebilmektedir. Önerilen yöntemin getirdiği bu üstünlük optimize edilmek istenen hat büyüdükçe katlanarak artmaktadır.

6 ÇOK İSTASYONLU GERÇEK İŞLETME ŞARTLARINA SAHİP SİSTEMLERİN OPTİMİZASYONU

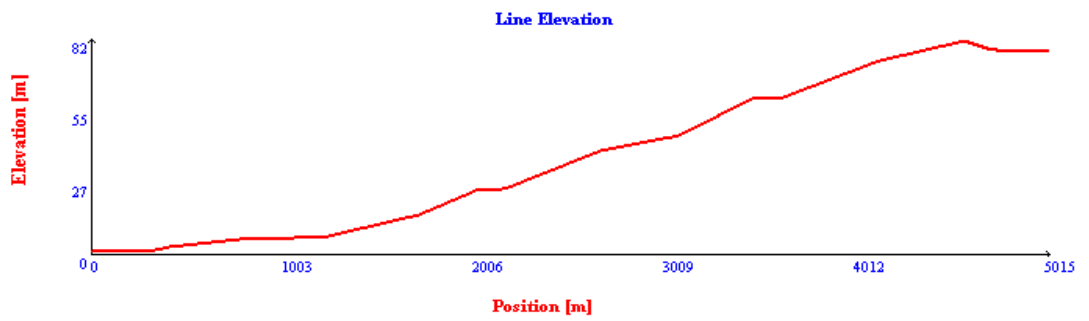
6.1 Beş İstasyon, İki Hat ve Çok Trenli Durumun Optimizasyonu

Bu durum için Aksaray-Havalimanı metro hattının ilk 5 istasyonunu içeren Aksaray-Sağmalcılar kısmına ait gerçekçi değerler kullanılmıştır.



Şekil 6.1: Aksaray-Sağmalcılar Hattının Basit Şeması

Şekil 6.1’de görülen hat bölümünde, 5 istasyon bulunmaktadır: Aksaray (Aks), Emniyet (Emn), Ulubatlı (Ulu), Bayrampaşa (Bay) ve Sağmalcılar (Sag). Bu istasyonlar sırası ile 50, 950, 2006, 3445 ve 4875 m’dedir. Hattın bu bölümü 3 adet trafo merkezi ile beslenmektedir. Hattın eğim değişimine ait profil Şekil 6.2’de verilmiştir. Hattın maksimum eğim değeri $\%+3.7$ ’dir. Sağmalcılar – Aksaray hattı SA hattı, ters istikamet ise AS hattı olarak adlandırılmıştır.

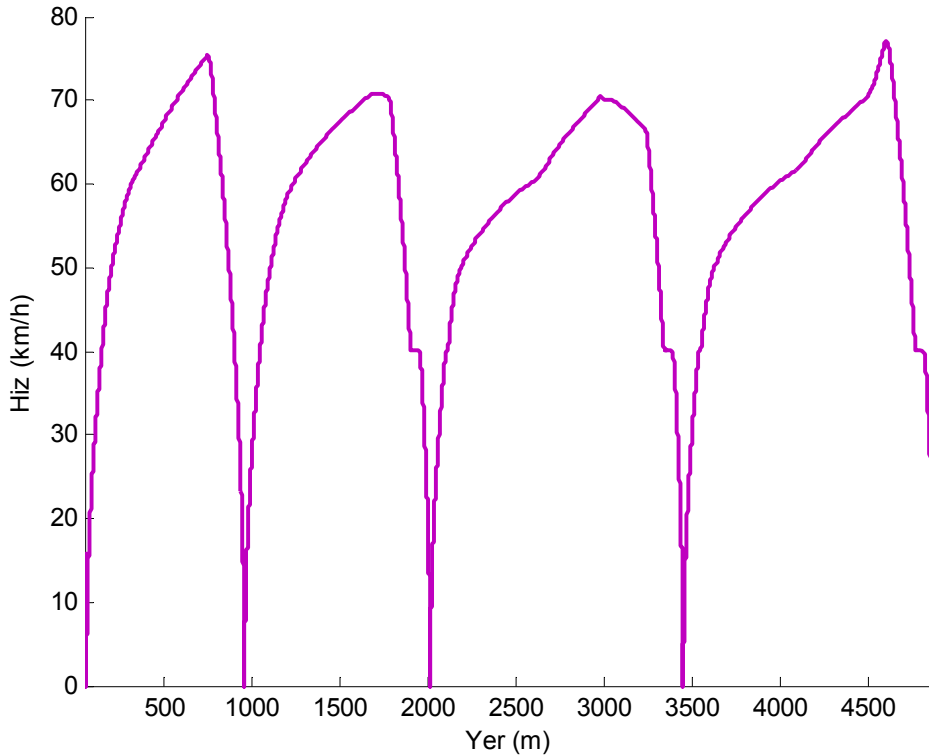


Şekil 6.2: Aksaray – Sağmalcılar Hattına Ait Eğim Değerleri ve Profili

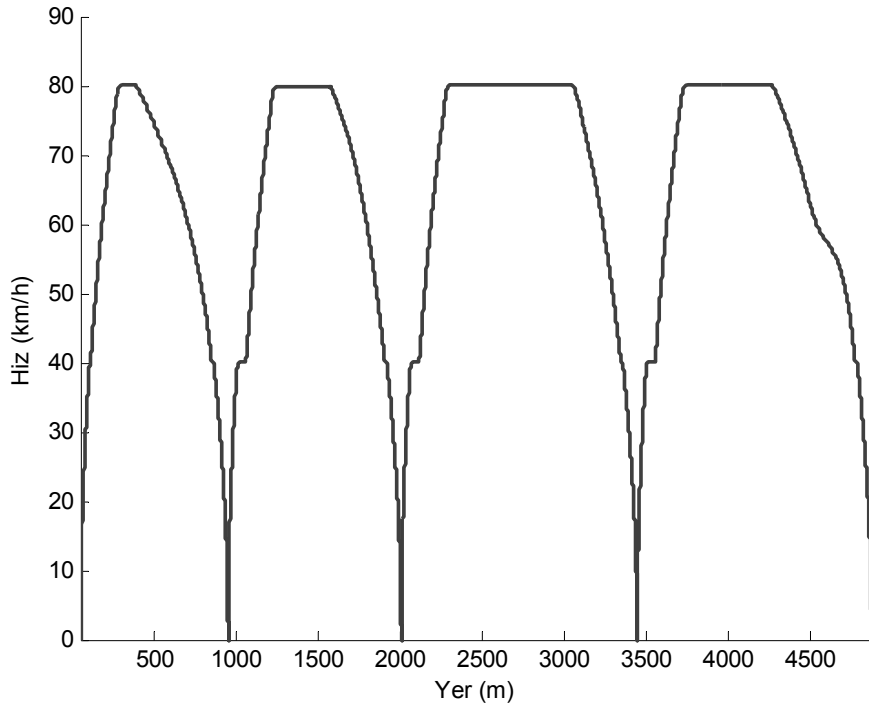
Hattın her iki ucundan da 4 vagonlu tren dizileri, her 150 saniyede bir hatta çıkmaktadır. İstasyon bekleme zamanı 20 saniyeye ayarlanmıştır. SA hattındaki trenler yokuş aşağı çalışırken, AS hattındaki trenler yokuş yukarı çalışmaktadır. Tam gaz işletim durumu için gerçekleştirilen simülasyon ile enerji tüketimi araç*km başına 3.067 kWh olarak bulunmuştur. SA trenleri için ortalama yolculuk süresi (T_1) 398 s,

AS trenleri için ise 424 s (T_2) olarak saptanmıştır. Yolculuk sürelerindeki bu farklılık Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'den net olarak görülebilmektedir: AS trenleri yokuş yukarı tırmanırken eğim kuvvetinin üstesinden gelmek için çekiş güçlerinin bir kısmını kaybederek daha yavaş hız kazanırlar. Oysa SA trenleri yer çekimi kuvvetinin desteklemesi sebebi ile kolaylıkla hızlanır ve maksimum hıza ulaşırlar. Her iki hattaki yolculuk sürelerinin toplamı olan parkur süresi, ilk istasyonlarda bekleme zamanları hariç, ortalama 822 saniyedir.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de her iki yöndeki trenlerin Hız-Yer eğrileri verilmiştir. Yukarıdaki açıklamalar bu grafiklerden daha net bir biçimde anlaşılabilmektedir. Aksaray – Sağmalcılar trenleri yokuş yukarı seyahat etmekte olup tanımlı olan 80 km/h maksimum hıza erişememekte, 77 km/h hızda kalmaktadırlar. Ters yöndeki trenler ise rahatlıkla maksimum hıza erişebilmekte ve bu hızla belli süreler yol almaktadırlar. İstasyon giriş-çıkışlarındaki 40 km/h hız sınırlamasının etkisi frenleme modlarında kendini göstermektedir. Trenlerin hızlanma ivmelenmesi 0.7 m/s^2 olduğu için istasyonlardan kalkışta 40 km/h hız sınırı takılmamaktadırlar.



Şekil 6.3: Aksaray-Sağmalcılar Trenlerine Ait Hız-Yer Grafikleri



Şekil 6.4: Sağmalcılar-Aksaray Trenlerine Ait Hız-Yer Grafikleri

6.1.1 Yapılan Testler

SimuX ile birçok test gerçekleştirilmiştir. Bunun için EK-B'de verilmiş olan run_multi.m dosyası oluşturulmuştur. Bu dosya ile istenilen sayıda farklı, rastgele, boşta gitme başlama noktası için test yapılabilmektedir.

Bu testler ile 8 boşta gitme noktası giriş değerleri olarak, araç*km başına oluşan enerji tüketimi ve her iki yola ait yolculuk süreleri çıktı olarak kayıt altına alınmaktadır.

Bütün bu testlerde her iki hat içinde boşta gitme başlangıç noktaları aşağıdaki aralıklarda seçilmiştir;

200-750; 1150-1806; 2206-3245; 3645-4675

Elde edilen sonuçlardan bazıları Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: Farklı Boşta Gitme Noktaları İçin Optimizasyon Sonuçları

Test No	Yol1 (SA) Boşta Gitme Noktaları (m)				Yol2 (AS) Boşta Gitme Noktaları (m)				E	T ₁ (s)	T ₂ (s)
1	730.0	1770.9	3126.9	4198.8	647.2	1309.1	2584.1	4342.9	2.8633	410.9	511.3
2	308.4	1277.6	2777.8	3663.9	288.6	1501.1	2650.8	4064.3	2.7551	398.8	516.3
3	657.8	1276.4	2912.4	4590.9	225.4	1727.8	2644.8	4114.4	2.7224	402.8	511.7
4	539.6	1637.2	3240.8	4600.8	210.5	1400.1	2888.6	3674.1	2.5653	403.9	587.9
5	304.9	1685.7	2645	4042.4	593.9	1547.1	2291	3779.3	2.9719	399.78	562.0

Tablo 6.1'deki değerler incelendiği zaman rastgele atanmış olan boşta gitme noktalarının yukarıda tanımlanmış aralıklarda kaldığı görülmektedir. Birinci yola ait olan yolculuk süresi T_1 çok fazla değişmemektedir. İkinci yola ait olan yolculuk süresi T_2 ise çok değişkenlik arz etmektedir. Bunun nedeni birinci yolun yokuş aşağı olması ve trenler boşta gitse dahi hızlanabilmeleri, ters yöndeki trenlerin ise boşta gitmeleri durumunda, yavaşlayarak hız kaybetmeleridir.

Bu koşullar için toplamda 9750 farklı test yapılmıştır. Bu testlerin sonuçlarındaki değişimler aşağıda verilmiştir;

$$T_1=398 - 415 \text{ s, fark } 17 \text{ s}$$

$$T_2=425 - 670 \text{ s, fark } 245 \text{ s}$$

Yukarıdaki değerler incelendiği zaman özellikle yokuş yukarı olan ikinci hattaki yolculuk süresinin min ve max'ları arasında 245 s (%58) fark olduğu görülmektedir. Bu miktar işletme şartlarında kabul edilemez bir farktır.

Mevcut işletmelerde, istasyonda bekleme sürelerinden kısaltma veya başka yöntemlerle kazanılarak, boşta gitmede, kullanılacak süre artışı, %2-5'i aşmasına müsaade edilmez. Yeni hatlarda ise, olası küçük gecikmeler düşünülerek, yolculuk süresi tam gaz süresine göre, %8-10 civarında fazla olacak zaman çizelgeleri hazırlanmaktadır.

Bu sebeble, boşta gitme başlangıç noktasının aralıklarının daha mantıklı seçilmesi gerekir. Örneğin hiçbir sürücü %3.7'lik eğim olan güzergahta istasyondan ayrılır ayrılmaz boşta gitmeye geçmez, çünkü bu durumda hız, çok kısa sürede, kabul edilemeyecek kadar düşecektir.

Bu çalışmada yukarıdaki koşullar ile gerçekleştirilen toplam 9750 test sonucu ile YSA'lar eğitime çalışılmıştır. E için 15 nöronlu YSA çok küçük hatalar ile öğrenebilmiştir. Değişimin fazla olmadığı T_1 içinde 15 nöronlu yeterli hassasiyette öğrenme gerçekleştirmiştir. Ancak T_2 için yapılan eğitimlerde nöron sayısı ne kadar arttırılırsa arttırılsın, istenilen seviyede öğrenme elde edilememiştir.

Bu sebeble, boşta gitme başlangıç noktalarının seçilme aralıkları daha mantıklı olarak sınırlandırılmış ve 7500 adet yeni test gerçekleştirilmiştir. Bunlardan 6000'i eğitimde geri kalan 1500'ü ise eğitilmiş ağların testinde kullanılmıştır. Bu yeni durum için seçilen boşta gitmeye başlangıç aralıkları şu şekildedir:

Birinci yol 800-500; 1850-1500; 3300-2900; 4600-4200

İkinci yol 650-800; 1500-1650; 2900-3150; 4350-4600

Bu koşullarla yapılan testlerle YSA'lar eğitilmiştir.

6000 adetlik veri setlerinde T_1 : 399-417.5 s, T_2 : 426.7-463.5 s aralığında bulunmuştur.

Enerji için (E), 15 nöronlu, T_1 , T_2 ve toplam parkura ait süre (T) için 32 nöronlu YSA'lar eğitilmiştir.

Bu YSA'lar, eğitimde kullanılmamış olan 1500'lük veri setleri ile sınanmıştır. Bu sınamada setlerinde T_1 için eğitilen YSA'nın maksimum hatası 1 s'nin altında, T_2 için eğitilen YSA'da ise maksimum hata 3.5 s (hata payı <%1) olarak bulunmuştur. T için eğitilen YSA'da ise bu değer 3.8 s'dir. Enerji tüketimi tahmini için eğitilen YSA'nın maksimum hatası ise 0.05 kWh/km'dir (max. hata payı yaklaşık %1.5). Bu değerler tatmin edicidir.

Toplam yolculuk süresi olan T üzerinden optimizasyonlar gerçekleştirilecektir.

6.1.2 Genetik Algoritma ile Optimizasyon

835 ile 840 saniye arasındaki bir yolculuk süresi için en uygun boşta gitmeye başlama noktalarının bulunması amacı ile optimizasyonda şu parametreler kullanılmıştır.

$T_{Hedef}=835$; $T_{maxAllowed}=840$; $w_E=20$; $w_T=80$ durumu

$xmin=[500 \ 1500 \ 2900 \ 4200 \ 650 \ 1500 \ 2900 \ 4350]$;
 $xmax=[800 \ 1850 \ 3300 \ 4600 \ 800 \ 1650 \ 3150 \ 4600]$;
 $Tmin=822$; $E_{max}=3.067$;

Yukarıda verilen koşullar için yapılan optimizasyon sonucunda aşağıdaki boşta gitme noktaları en uygun bulunmuştur. İlk 4 değer, Sağmalcılar – Aksaray trenlerine, sonraki 4 değer ise Aksaray – Sağmalcılar trenlerine ait boşta gitmeye başlama noktalarıdır.

$[611.8 \ 1822.9 \ 2900.4 \ 4500.6 \ 650.01 \ 1569.7 \ 3092.7 \ 4350.3]$

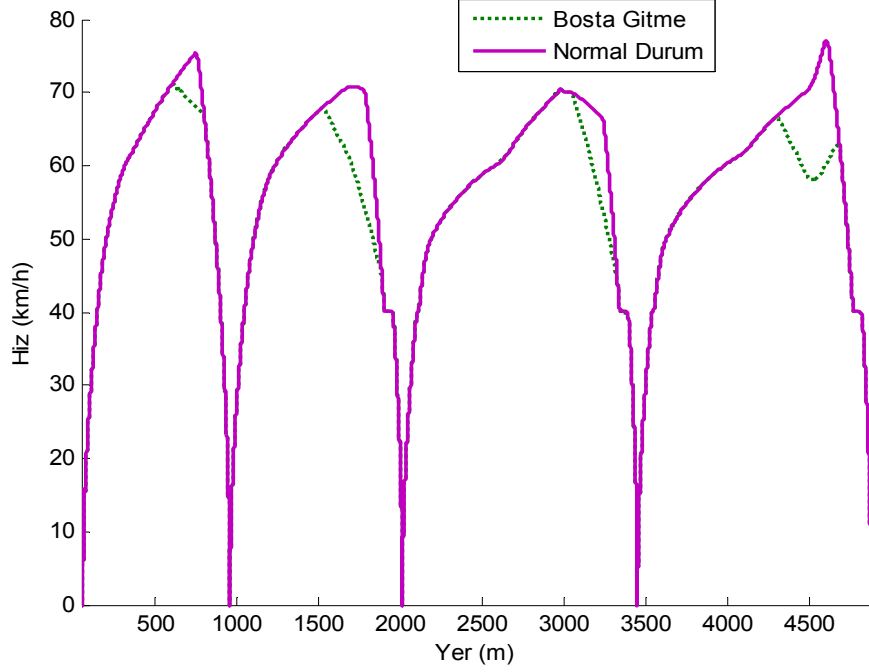
Bu noktalarda trenlerin boşta gitmeye başlaması durumunda oluşan enerji tüketimi ve yolculuk süresi ve bunların tam gaz işletme değerlerine göre farkları aşağıda verilmiştir.

$E = 2.6078 \text{ (kWh/Araç/km)}$ $T = 838.6824 \text{ (s)}$
 $\Delta E = 14.9724 \text{ (\%)}$ $\Delta T = 2.0295 \text{ (\%)}$

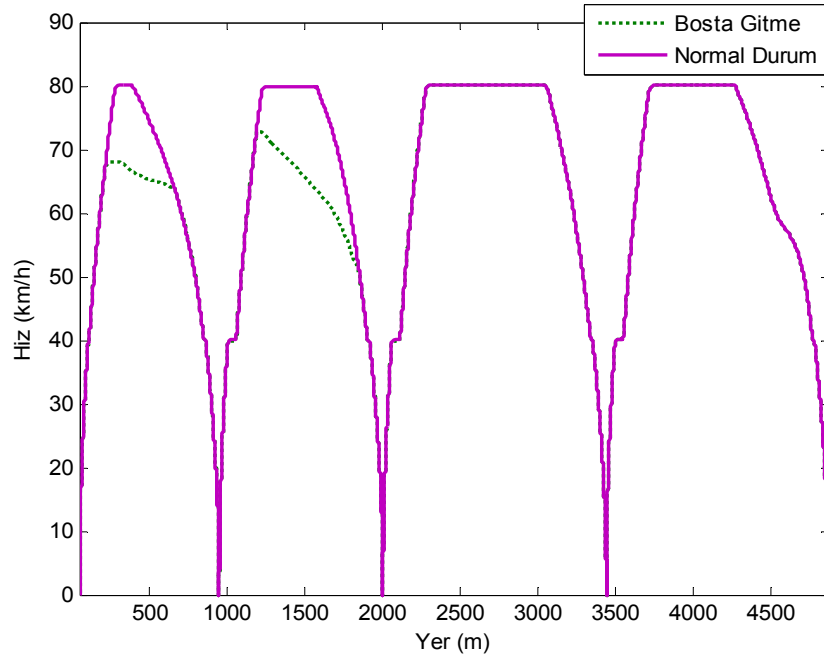
%2.03'lük süre artışına karşılık enerji tüketimi %14.97 azalmaktadır. En uygun değerler için SimuX'da elde edilen değerler;

$E_{SimuX}=2.61 \text{ kWh/Araç/km}$
 $T_{1SimuX} = 06:46$
 $T_{2SimuX} = 07:14'dür. Toplam T=14' 00''=840 \text{ s. (YSA'nın hata payı 1.3 s)}$

En uygun boşta gitme noktaları için trenlere ait Hız-Yer grafikleri şekil 6.5 ve şekil 6.6'da, boşta gitmenin olmadığı normal duruma ait eğrilerle birlikte verilmiştir. Aksaray-Sağmalcılar seferini yapan trenlerin, yaklaşık 70 km/h hızda boşta gitmeye başlamaları istenmektedir.



şekil 6.5: Aksaray – Sağmalcılar Trenine Ait Optimum Hız Profili



şekil 6.6: Sağmalcılar – Aksaray Trenine Ait Optimum Hız Profili

$T_{Hedef}=862$; $T_{maxAllowed}=862$; $w_E=80$; $w_T=20$ durumu

Toplam yolculuk süresinin 862 s olduğu, optimum boşta gitme noktalarının tespiti istenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

[799.89 1849.5 3129.6 4599.7 650.12 1521.7 2981.1 4350.2]

Bu noktalarda boşta gitmeye başlama durumu için YSA'ların tahmin ettiği değerler:

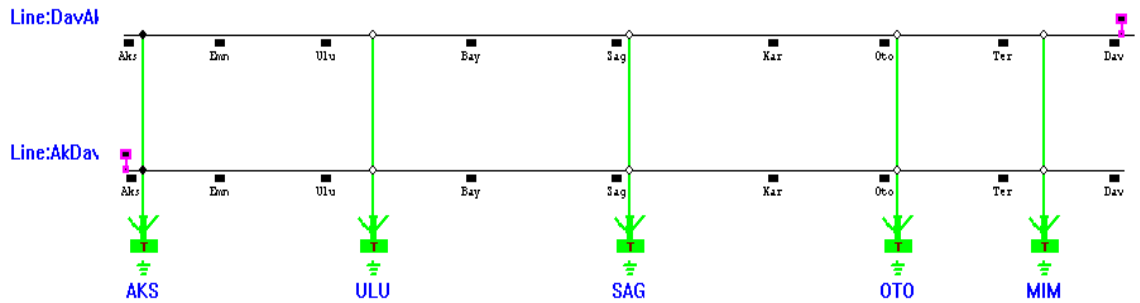
$$\begin{aligned} E &= 2.5074 \text{ (kWh/Araç/km)} & T &= 855.5724 \text{ (s)} \\ \Delta E &= 18.2468 \text{ (\%)} & \Delta T &= 4.0842 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Görüldüğü üzere bulunan boşta gitme noktalarının neredeyse tamamı boşta gitme başlama noktalarının sınır değerlerinde çıktığı halde yolculuk süresi 856 s olan durum optimum çıkmıştır. Yani, trenler kendine izin verilen en erken mesafede boşta gitmeye başlamaktadırlar. Bu değerler için simülatörün ürettiği değerler aşağıdadır.

$$\begin{aligned} E_{SimuX} &= 2.513 \text{ kWh/Araç/km (YSA'nın hata payı 0.0056 kWh/Araç/km)} \\ T_{1SimuX} &= 06:54 \\ T_{2SimuX} &= 07:21'dür. \text{ Toplam } T=14'15''=855 \text{ s. (YSA'nın hata payı 0.5 s)} \end{aligned}$$

6.2 Dokuz İstasyonlu, İki Hatlı, Çok Trenli Durumun Optimizasyonu

Testler, Aksaray-Havalimanı metro hattındaki ilk 9 istasyonu (Davutpaşaya kadar) kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu hat kısmına ait genel görünüm Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7: Aksaray – Davutpaşa Hat Bölgesi

Şekil 6.7'den de görüleceği üzere bu hat bölümü 5 adet trafo merkezi tarafından beslenmektedir. Hattın uzunluğu yaklaşık 10 km'dir. Hattın eğim profilinin değişimi Şekil 6.8'de ve eğim değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.8: Aksaray – Davutpaşa Hattı Eğim Profili

Tablo 6.2: Aksaray – Davutpaşa Hattındaki Eğim Değerleri

No	Başlangıç (m)	Eğim (%)	No	Başlangıç (m)	Eğim (%)
1	0.00	0.1	14	4525.00	-2.4
2	295.00	1.5	15	4673.00	-0.2
3	401.00	0.8	16	5071.00	0.4
4	782.00	0.1	17	5446.00	-3
5	1178.00	1.8	18	6301.00	-0.1
6	1702.00	3.2	19	6637.00	-2.5
7	1983.00	0.4	20	7284.00	0.1
8	2146.00	3	21	7600.00	0.1
9	2634.00	1.4	22	8049.00	-1.6
10	3035.00	3.7	23	8397.00	-3.1
11	3422.00	0.1	24	8593.00	-0.2
12	3586.00	2.8	25	9102.00	0.1
13	4111.00	1.8			

Hat boyunca hattın geometrik özelliklerinden ve sinyalizasyon sisteminden kaynaklanan hız sınırlamaları bulunmaktadır. Bunların bölgeleri Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3: Aksaray – Davutpaşa Hattındaki Hız Sınırlamaları

Başlangıç (m)	Bitiş (m)	Hız Sınırı (km/h)
0.00	211.00	40
211.00	1906.00	80
1906.00	2106.00	40
2106.00	3000.00	80
3000.00	3345.00	70
3345.00	3545.00	40
3545.00	4775.00	80
4775.00	4975.00	40
4975.00	6332.00	70
6332.00	6542.00	40
6542.00	7180.00	70
7180.00	7402.00	60
7402.00	7637.00	40
7637.00	8595.00	70
8595.00	8805.00	40
8805.00	9697.00	80
9697.00	10000.00	40

Tablo 6.4: Aksaray – Davutpaşa Bölgesindeki İstasyon Yerleri

İstasyon	Yeri (m)
Aksaray	50
Emniyet	950
Ulubatlı	2006
Bayrampaşa	3445
Sağmalcılar	4875
Kartaltepe	6436
Otogar	7530
Terazidere	8700
Davutpaşa	9802

Hatta bulunan istasyonların orta noktalarının listesi Tablo 6.4’de verilmiştir. İstasyonların uzunluğu 100 m’dir.

Trenler her iki uçtan 150 s ara ile çıkmaktadırlar. Bu noktada testlerin daha hızlı bitirilmesi için simülasyon örnekleme zamanı 250 ms alınmıştır. Simülasyon süresi ise normal yolculuk süresinin 2 katından fazla olarak 35 dakika tanımlanmıştır.

Normal işletme durumuna ait test sonuçları aşağıda verilmiştir:

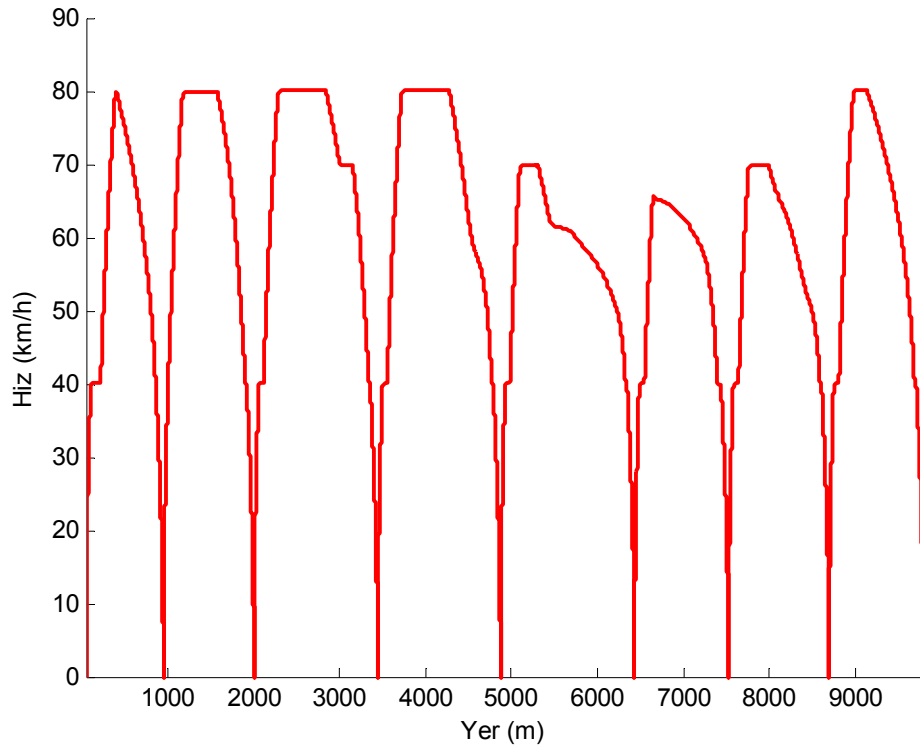
Enerji tüketim değeri: $E = 3.03 \text{ kWh/km}$ olarak bulunmuştur.

Davutpaşa – Aksaray trenlerinin yolculuk süresi: $T_1 = 855 \text{ s}$

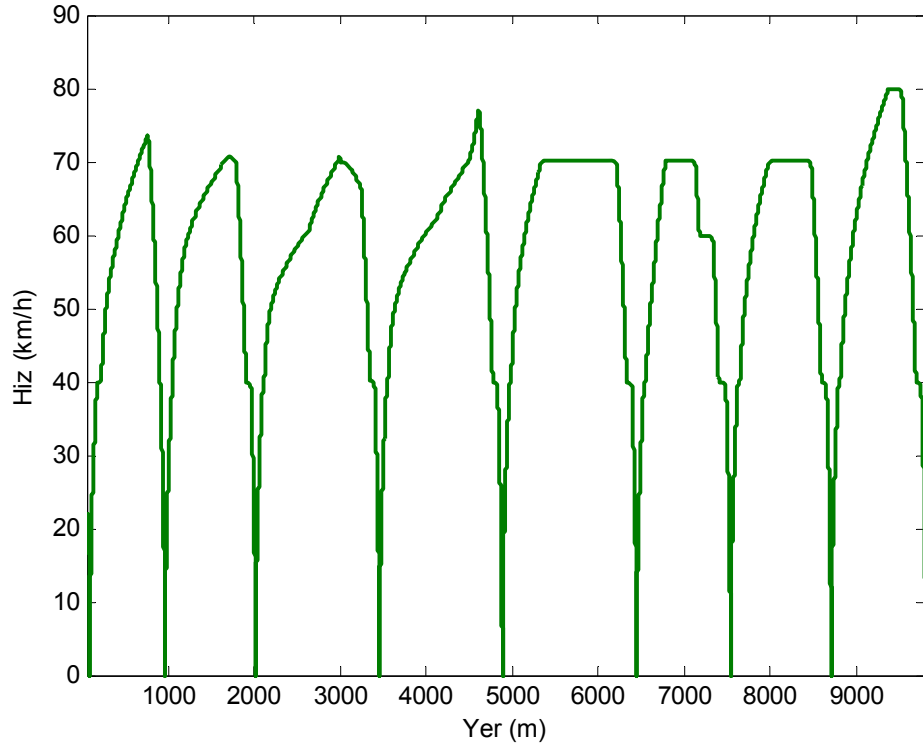
Aksaray – Davutpaşa trenlerinin yolculuk süresi: $T_2 = 866 \text{ s}$

Aksaray – Davutpaşa – Aksaray Tur süresi: $T = 1721 \text{ s}$

olarak saptanmıştır. Trenlere ait örnek Hız-Yer profilleri Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.9: Davutpaşa – Aksaray Trenine Ait Hız – Yer Profili



Şekil 6.10: Aksaray – Davutpaşa Trenine Ait Hız – Yer Profili

6.2.1 Yapılan Testler

SimuX ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde her bir yol için 8 adet olmak üzere toplam 16 adet rastgele boşta gitme noktası atanmıştır. Bu atamalar esnasında;

1. Yoldaki (Davutpaşa - Aksaray) trenlerin

800-400, 1850-1450, 3300-2900, 4625-4200, 5700-5200, 7000-6600, 8200-7700, 9400-8900

2. Yoldaki (Aksaray - Davutpaşa) trenlerin

650-850, 1500-1700, 2900-3200, 4350-4650, 5100-5600, 6600-7000, 7700-8200, 8900-9400

m aralıklarında boşta gitme moduna geçebilecekleri belirtilmiş ve boşta gitme başlangıç noktaları bu bölgelerden rastgele seçilmiştir. Rakamların yazılışında trenlerin hareket yönü dikkate alınmıştır.

Bu koşullarda 4900 adet test gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bir tanesi aşağıda Tablo 6.5’de verilmiştir; İlk satır birinci yola (Dav-Aks), ikinci satır ise ikinci yola (Aks-Dav) ait boşta gitme başlangıç değerleridir. Son satırdaki değer ise Araç*km başına enerji tüketimidir. Son iki kolondaki rakamlar trenlerin yolculuk süreleridir.

Tablo 6.5: Örnek Bir 9 İstasyonlu Boşta Gitme Durumu Verisi

	Boşta Gitmeye Başlama Noktası (m)								Süre (s)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Dav-Aks	780.05	1542.5	3142.7	4406.5	5645.6	6904.8	7928.2	8909.3	896.28
Aks-Dav	814.28	1588.9	3084.6	4587.6	5560.9	6895.3	7788.1	9102.9	888.13
Enerji Tüketimi : 2.7297 kWh/Araç/km									

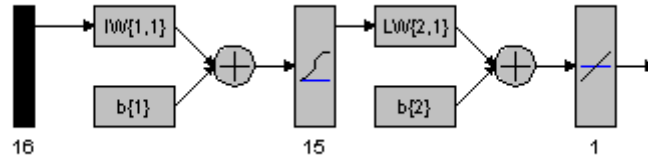
Bu 4900 testin sonuçlarındaki değişimler aşağıda Tablo 6.6'da verilmiştir;

Tablo 6.6: Testlerdeki Bulunan Değerlerin Değişim Aralığı

	Minimum	Maksimum	Tam Gaz Değeri
T_1 (s)	857	945	855
T_2 (s)	872	934	866
T (s)	1735	1844	1721
E (kWh/Araç/km)	2.61	2.94	3.03

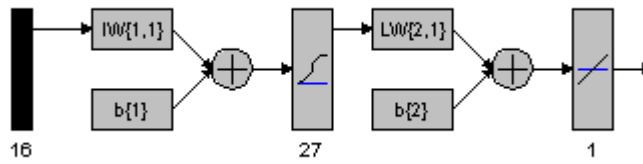
6.2.2 YSA Eğitimleri

E için Şekil 6.11'deki 16 giriş 15 nöronlu YSA'nın eğitimi 4000 veri set ile gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 6.11:** E İçin Eğitilen YSA

E'ye ilişkin eğitilmiş YSA'nın eğitimde kullanılan 4000 adet set için verdiği hata değerleri -0.1 ve +0.1 kWh/km arasında değişmektedir. Hem eğitim, hem de 900 adet test veri setlerine YSA'nın ürettiği cevaplardaki maksimum hata payı %3 civarındadır. Ancak, verilerin çok büyük bir bölümü için hata payı 0.05 kWh değerinin altındadır.

T için Şekil 6.12'deki 16 giriş 27 nöronlu YSA eğitilmiştir.

**Şekil 6.12:** T İçin Eğitilen YSA

Bu ağın eğitimde kullanılan 4000 adet set ve 900 adet test seti için verdiği hata değerleri $-6.5 \div 7.0$ s arasında değişmektedir. Gerçek değerlere göre max. hata payı %0.4 civarındadır.

6.2.3 GA Optimizasyonları

YSA'lar eğitildikten sonra optimizasyona geçilmiştir.

$T_{Hedef}=1800$; $w_E=90$; $w_T=10$ durumu

Tam gaz işletme durumuna ait yolculuk süresinin %4.6 fazlasına tekabül eden 1800 s'lik yolculuk süresi için istenen optimum boşta gitme noktaları, genetik algoritma tarafından aşağıda verilmiş olan xmin ve xmax değerleri arasında aranmıştır. Bunu sağlamak için GA aracında, "Population" sekmesindeki "Initial Range" kısmına xmin ve xmax değerleri girilerek optimizasyon süresinin kısaltılması sağlanmaktadır. Şekil 6.13'de Matlab GATool'un arayüzü görülmektedir.

$xmin=[400 \ 1450 \ 2900 \ 4200 \ 5200 \ 6600 \ 7700 \ 8900 \ 650 \ 1500 \ 2900 \ 4350 \ 5100 \ 6600 \ 7700 \ 8900]$
 $xmax=[800 \ 1850 \ 3300 \ 4625 \ 5700 \ 7000 \ 8200 \ 9400 \ 850 \ 1700 \ 3200 \ 4650 \ 5600 \ 7000 \ 8200 \ 9400]$

1	2	3	4	5
767.61733	1828.92511	3125.13919	4564.90973	5543.12511

Şekil 6.13: Matlab GATool Aracının Genel Görünüşü

GA'nın farklı birey ve nesil sayıları için optimizasyon sonucunda bulunmuş olan en uygun değerler Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7: 9 İstasyonlu Hatta, 1800 s için En Uygun Boşta Gitme Durumu Verileri

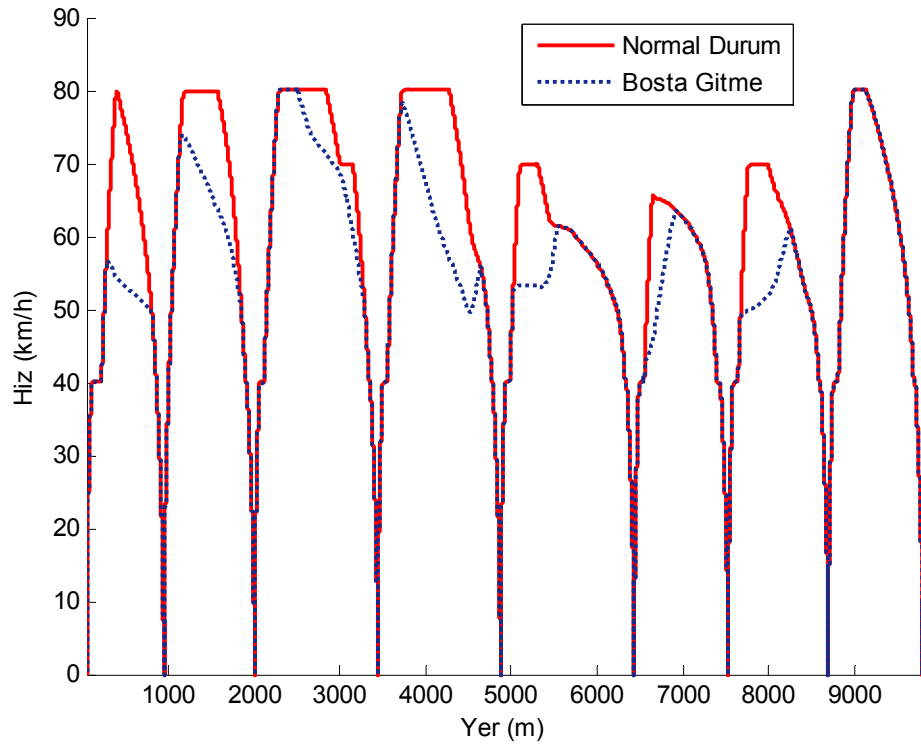
GA Parametre		Bulunan En Uygun Boşta Gitmeye Başlama Noktaları (m)								E (kWh)	ΔE (%)
Birey	Nesil	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	500	787.62	1828.9	3125.1	4564.9	5543.2	6843.9	8194.4	8903.2	2.554	15.71
		651.8	1638	3000.5	4352.5	5160.8	6644.1	8192.8	8959.7		
30	1000	757.26	1800.7	3230.5	4551.3	5521.4	6836.4	8198	9212.2	2.535	16.32
		650.35	1503	3010.9	4351	5151.6	6601.8	8101.5	9021.1		
50	500	788.75	1744.4	3221.7	4528.6	5555.6	6825.3	8102.6	8984.8	2.552	15.78
		671.81	1501.5	3015.8	4354.8	5123	6637.9	8008.9	8987.1		
50	1000	782.33	1847.9	3231.1	4553.1	5526.3	6863.9	8169.6	9125.3	2.538	16.28
		651.39	1508.7	3005.7	4350	5177.1	6662.4	8073.7	8998.9		
100	1000	768.57	1849	3281.1	4590.8	5495.2	6859.5	8199.3	9222.9	2.533	16.39
		650.15	1501.4	3007.8	4350.3	5195.6	6634.7	8127.3	9027.3		

Yolculuk süresinin 1800 s'ye çıkması yolculuk süresinin %4.6 artması demektir. Bu süre artışına karşılık enerji tüketiminde elde edilen tasarruf miktarı %16 civarındadır.

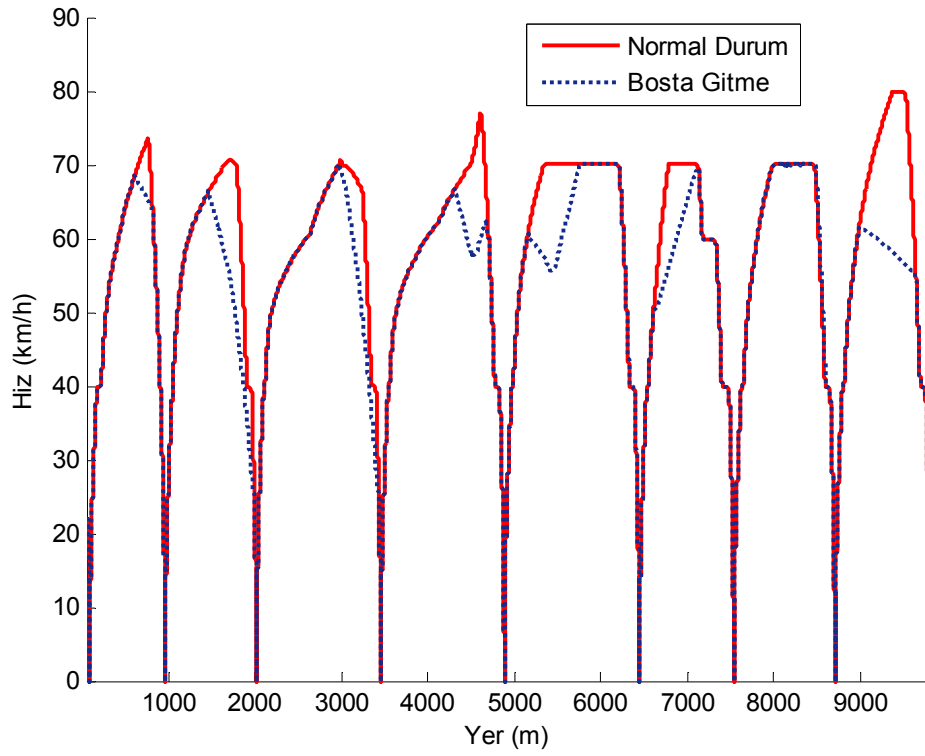
Tablo 6.7'deki değerler incelendiği zaman, GA'in birey sayısının artırılmasının sonuçlara çok fazla etkisi olmadığı görülmektedir. Nesil sayısının artırılmasının etkisi daha fazla gözlenmektedir. Yukarıda tablonun üretilmesi önerilen yöntemin en büyük üstünlüğünü bir kez daha göstermektedir. Örneğin, sadece son satırın oluşturulması için 100 bin kez simülasyon yapılması gereklidir. Eğitilmiş YSA'ların kullanılması ile bu hesaplar birkaç dakikada tamamlanabilmektedir.

Tablo 6.7'nin son satırındaki en uygun boşta gitmeye başlama noktaları SimuX'a girilerek her iki yöndeki trenlerin Hız – Yer eğrileri çıkartılmıştır. Bu eğriler, boşta gitmenin olmadığı tam gaz durumuna ait eğrilerle birlikte Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de verilmiştir.

Bu koşullar için SimuX'un verdiği E değeri 2.53 kWh/Araç/km, T ise 1807 s'dir. YSA'ların sonuçlarındaki hata oranları nerede ise ihmal edilebilecek kadar düşüktür.



Şekil 6.14: 1800 s için Davutpaşa – Aksaray Trenine Ait Optimum Hız Profili



Şekil 6.15: 1800 s için Aksaray - Davutpaşa Trenine Ait Optimum Hız Profili

T_{Hedef} =1775 s için Optimizasyon

Popülasyon boyutu 50, nesil sayısı 1500 seçilerek yapılan optimizasyon sonucunda bulunan değerler aşağıda verilmiştir;

686.74 1756.8 3012.7 4503.3 5468.3 6836.2 8140.1 9319
650.15 1526.9 3006.7 4351.4 5247.1 6704.9 8028.7 9052.7

$E = 2.5917$ (kWh/Araç/km) $T = 1775$ (s)
 $\Delta E = 14.4656$ (%) $\Delta T = 3.1377$ (%)

T_{Hedef} =1765 s için Optimizasyon

1000 nesil için elde edilen sonuçlar;

798.62 1846.5 3220.5 4495.9 5403.9 6803.9 8151.3 9398.9
650.12 1612.8 3130.8 4357.4 5332.5 6824.4 8182.7 9160.1

$E = 2.6242$ (kWh/Araç/km) $T = 1765$ (s)
 $\Delta E = 13.3916$ (%) $\Delta T = 2.5567$ (%)

T_{Hedef} = 1900 s İçin Optimizasyon

Yaklaşık %10.4'lük bir süre artışına karşılık gelen bu optimizasyon gerçekleştirilememiştir. Sebebi; YSA'ların eğitiminde kullanılan veri setlerinde boşta gitmeler belli bölgelerle sınırlandırılmıştı. Yapılan 4900 testte elde edilen en uzun yolculuk süresi 1844 s'dir. Ayrıca, GA'in optimizasyonunda kullanılan uygunluk fonksiyonunda tanımlanmış olan xmin ve xmax dizilerinin dışında atanacak olan boşta gitme noktaları için uygunluk fonksiyonunun otomatik olarak yüksek bir değer aldığı hatırlanmalıdır.

Gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda bulunan en uygun boşta gitme noktaları ve bu çözüm için YSA'ların verdiği cevaplar aşağıda verilmiştir.

799.86 1849.9 3299.6 4618.9 5540 6859.8 8199.9 9165.6
650.41 1501.2 3008.4 4350.3 5108.6 6601.2 8117 8900.6

$E = 2.5113$ (kWh/Araç/km) $T = 1828.2$ (s)
 $\Delta E = 17.1182$ (%) $\Delta T = 5.8104$ (%)

Bulunan T süresi 1828 s olup, elde edilecek enerji tasarrufu %17.11'dir.

Olabilecek en erken boşta gitme başlangıç noktaları aşağıda tekrar verilmiştir. İlk satır birinci yola, ikinci satır ise ikinci yola aittir. Yukarıda bulunan en uygun boşta gitme değerleri ile karşılaştırıldığı zaman, sarıya boyanmış olan 5 nokta haricindeki 11 bölgede trenler zaten olabilecek en uç noktalara optimize olmuştur. Optimizasyonun, sınır şartları içinde olası en uygun sonucu bulduğu söylenebilir.

800, 1850, 3300, 4625, 5700, 7000, 8200, 9400
650, 1500, 2900, 4350, 5100, 6600, 7700, 8900

6.3 Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi ve Gerçek Sisteme Uygulaması

Şimdiye kadar yapılan çoklu tren çoklu hat optimizasyon sonuçları, önceki tek tren, iki ve üç istasyon sonuçları ile karşılaştırıldığı zaman aşağıdaki hususlar göze çarpmaktadır;

Tek tren iki ve üç istasyonlu optimizasyon sonuçları literatürdeki sonuçları teyit eder nitelikte olup, burada %5'lik zaman artışına karşılık, hat güzergahına da bağlı olarak %35'lere varan enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak, çok istasyon, tren ve hat durumunda, ne yazık ki, bu bulgu doğruluğunu yitirmekte ve %5 süre artışına karşılık tasarruf miktarı %15'ler civarında kalmaktadır. Bunun ana sebebi çoklu tren ve hat uygulamalarında frenleme enerjisinin dikkate alınmasıdır.

Önerilen bu yöntemle, gerçekçi bir sistemin optimizasyonu başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Simülatör + YSA + GA kullanımının optimizasyon sürecine getirdiği üstünlükler açıkça gösterilmiştir: YSA'lar eğitildikten sonra optimizasyon işlemi çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Geliştirilmiş olan bu yöntemle hem GA'nın hem de uygunluk fonksiyonunun farklı parametreleri için istenilen sayıda optimizasyon işlemi rahatlıkla gerçekleştirilerek her bir parametrenin etkisi incelenebilmektedir.

Tezde önerilen yöntemle Aksaray – Havalimanı metro hattının tamamına ait boşta gitmelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Manuel sürüşlü olan hatta her yönde 17 istasyon bulunmaktadır. Dolayısı ile 32 adet boşta gitmeye başlama noktası için optimizasyon gerekmiştir. Optimizasyonu gerçekleştirmek için 180 s aralıkla trenlerin çalıştırıldığı 6000 farklı boşta gitmeye başlama noktalarını içeren kombinasyona ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların girdi ve çıktı setleri ile yapay sinir ağları eğitilmiş ve sonuçları test edilmiştir. Genetik algoritma ile en uygun boşta alma noktaları saptanmıştır. Bulunan noktalar araç kabinlerindeki makinist bilgilendirme sistemine yüklenmiş ve makinistlerin bu noktalarda ivme kolunu boşta almaları sağlanmıştır. İlk ölçümler gerçekleştirilmiş ve önerilen noktalarda boşta gitmeye başlama ile, 10-12 yıllık tecrübeli sürücülere göre % 4.5 daha fazla enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir.

7 SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bir raylı taşıma sisteminde enerji tüketimi bir çok farklı parametreye bağlıdır. Tezin ilk bölümlerinde uygulamada kullanılan değişik tasarruflu işletme yöntemleri üzerine simülasyon testlerine ait sonuçlar verilmiştir. Ele alınan yöntemler; tren işletme sıklığının arttırılması, frenleme ivme oranının azaltılması, tren yardımcı güç kullanım oranının azaltılması, trenlerin maksimum hızlarının azaltılması ve son olarak boşta gitme algoritmasının uygulanmasıdır. Bu yöntemlerin enerji tüketimi, enerjinin geri kazanım oranı, yolculuk süresi üzerine etkileri araştırılmıştır. Özellikle, sık tren işletmeciliğinin hem yolcu konforuna hem de enerji tüketimi üzerine olumlu etkilerinin olduğu gözlenmiştir.

Bir raylı sistemde tren rotası boyunca hız profilini en uygun hale getirmenin, enerji tüketimini azaltmada en etkili yöntemlerden biri olduğu önceki çalışmalara paralel olarak gösterilmiştir. En uygun boşta gitme noktalarının saptanmasında araç karakteristikleri, güç sistemi konfigürasyonu ve güzergah profili son derece büyük bir önem arz etmektedir.

İstasyonlar arası mesafe içinden en uygun boşta geçme noktasının saptanması için çok büyük bir çözüm uzayının taranması, denenmesi gerekmektedir. İstasyon sayısı, dolayısı ile boşta geçme noktalarının sayısı arttıkça bu çözüm uzayı katlanarak artmakta, optimizasyon yapabilme süresi de uzamaktadır. Bu sıkıntılardan ötürü şimdiye kadar yapılmış bilimsel çalışmalarda sadece 2 istasyon arasında tek tren işletilmesi ele alınmıştır.

Tezde trenlerin boşta gitmeye başlama noktalarının, verilen bir hedef yolculuk süresi için, mümkün olduğunca hızlı bir şekilde optimize edilebilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Tezde önerilen yaklaşım, GA (Genetik Algoritma), YSA (Yapay Sinir Ağları), ve çok hatlı ve çok trenli sistem simulasyon yazılımının birlikte kullanımıyla gerçekleştirilmiş olan gerçekçi sistem modellemesini içermektedir. Simulasyon yazılımı araçların regeneratif frenleme yapabilme ve düşük gerilimdeki performansını da modellemektedir.

Tez çalışmasının ilk aşamalarında, literatürde sunulmuş olan 2 istasyonlu bir hat için farklı güzergah yapılarına ait testler gerçekleştirilmiş ve bu testlerden elde edilen verilerle YSA'lar eğitilmiştir. Daha sonra bu eğitilmiş olan ağlar kullanılarak

oluşturulmuş olan bir uygunluk fonksiyonu çerçevesinde Genetik Algoritma (GA) ile boşta gitme noktasının en iyilenmesi sağlanmıştır.

Simulasyon yazılımı, YSA için eğitim ve test verilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Eğitilmiş YSA'lar değişik boşta gitmeye başlama konumları için yolculuk süreleri ve enerji tüketimlerini tahmin etmede kullanılmıştır. Optimizasyon kısmında, hedef yolculuk süresi, hedef enerji tüketimi ve ağırlık faktörleri içeren bir uygunluk fonksiyonunun kullanılması önerilmiştir. Uygunluk fonksiyonunu minimize eden en optimum boşta gitme noktalarının belirlenmesinde, GA araştırma yöntemi kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonunda değişik ağırlık değerleri, GA'nın farklı parametreleri ile optimizasyonlar gerçekleştirmek için eğitilmiş olan YSA'ların kullanılmasının mümkün olduğu ve bunun çalışmalarda büyük bir kolaylık sağladığı gösterilmiştir.

Optimize edilen hat durumları iki istasyonlu durumdan sonra sistematik olarak daha büyük ve gerçekçi sistemlere doğru genişletilmiştir. Önerilen yöntemle Aksaray – Havalimanı metro hattının yaklaşık yarı uzunluğu olan 9 istasyonlu kısmında trenlerin boşta gitme noktaları farklı hede süreler için başarılı bir şekilde optimize edilebilmiştir.

Yapılan çalışmalar çoklu tren, çoklu hat durumunda elde edilen enerji tasarruf oranlarının tek trenli durumlara göre daha az olabileceği gösterilmiş, ve bunun sebebinin çoklu tren durumunda regeneratif frenleme enerjisinin hesaba katılmasının olduğu vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, yapılan çalışmalarla, önerilen Simülatör + YSA + GA hibrit yöntemin klasik Simülatör + GA yöntemine göre, bir çok üstünlük ve esneklik getirdiği gösterilmiştir.

Önerilen yöntemle yapılacak bir optimizasyon çalışmasının sonuçlarının gerçek hatlara da uygulanabileceği görülmüş olup, manuel sürürlü sistemlerde bunu gerçekleştirmenin en basit yolu, bir sürücü bilgilendirme sistemi ile sürücülerin uyarılması ve trenlerin saptanan noktalarda boşta alınmalarının sağlanmasıdır.

Yöntemin faydası özellikle işletmeye alınacak yeni hatlarda ortaya çıkmaktadır: Normal olarak sürücüler yeni açılan hattı tanıyarak, zamanla en iyi olmasa da, iyi sayılabilecek bir enerji verimli sürüş yöntemini uzmanlıkları ile geliştirebilmektedirler.

Önerilen yöntemle, uzun bir süre alan bu deneme yanılma çalışmaları yapılmadan daha ilk günden itibaren enerji tasarruflu sürüş gerçekleştirilebilecektir. Aynı husus otomatik sürüş kontrollü sistemlerde enerji tasarruf miktarının, daha da iyileştirilmesi için kullanılabilir. Elde edilebilecek enerji tasarrufunun boyutunu açıklamak için bir

örnek vermek gerekirse; 20 km uzunluğundaki Aksaray – Havalimanı hattında, cer gücü, için gerçekleştirilen enerji tüketiminde yapılacak %5'lik bir tasarruf, 2007 Ekim verileri ile, Kabataş-Bağcılar tramvay hattının 1 aylık enerji tüketiminden daha fazlasını karşılayabilecek boyutlardadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesinin mevcut raylı sistem ağını 550 km'ye çıkartma planları düşünüldüğü zaman konunun önemi daha net anlaşılabilmektedir.

Bu çalışmada sabit olarak alınan, tren ağırlığının ve tren işletme sıklığının dinamik olarak değiştiği, gerçek sistemlerde optimum boşta gitme noktalarının gerçek zamanlı olarak hesap edilmesi konusu halen çözüm bekleyen bir konudur. İleriki çalışmalarda bu konunun ele alınması gereklidir.

Ayrıca, geliştirilen hibrit yöntemin başka çalışmalarda da kullanılabileceği düşünülmektedir. Yeni hatlarda olası trafo merkezi yerleşim düzenleri için, izin verilen minimum tren gerilimi ve maksimum ray gerilimi koşulları çerçevesinde, enerji tüketimini minimize eden, trafo merkezlerinin dağılımının bulunması, trafo yerlerinin optimize edilmesi de bu yöntemle ele alınabilecek olası bir konu olarak görülmektedir [43].

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.railway-energy.org/tfee/index.php>, Son erişim Ocak 2008.
- [2] **International Metropolitan Railways Committee**, 1997. Public Transport: The environment and economic efficiency, Part 2, *UITP 52. International Congress*, Stuttgart.
- [3] **European standard EN 50163**. Railway applications - Supply voltages of traction systems.
- [4] **Açıkbaş, S. and Söylemez, M.T.**, 2004. Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, *Computers in Railways IX*, WIT Press, ISBN:1-85312-715-9, pp. 951–960.
- [5] **Goh, E.J., Chu, K.N. and Ng, N.K.**, 2004. 1500V DC traction system for the North East Line, *Int'l Conf. on Power System Technology - POWERCON* Singapore, 21-24 November.
- [6] **İstanbul Ulaşım AŞ dahili rapor**, 2006. Kadıköy – Kartal metro hattı enerji tüketiminin 750 VDC ve 1500 VDC durumları için karşılaştırılması.
- [7] **Pham, K.D., Thomas, R.S. and Stinger, W.E.**, 2003. Operational and safety considerations in designing a light rail DC traction electrification system, *IEEE/ASME Joint Rail Conference*.
- [8] **ABB Traction**, 1992. LRT İstanbul specification of overhead contact system, design and installation document.
- [9] **Farran J.I.**, 2005. Implementation of a pioneering light rail system in Bordeaux – Looking forward, *TRB Annual Meeting*
- [10] **Açıkbaş, S. ve Söylemez, M.T.**, 2005. Raylı toplu taşımda enerji verimliliği ve katener sistemlerinin paralellenmesi, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli.
- [11] **Albrecht T.**, 2004. Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control, *Computers in Railways IX*, WIT Press, ISBN:1-85312-715-9 pp. 885-894.
- [12] **UITP**, 2005. The Cost Of Energy And How To Reduce It, Lisbon.
- [13] **Albert, H., Levin, C., Vietrose, E. and Witte, G.**, 1995. Reducing energy consumption in underground systems, September.
- [14] **Rufer A.**, 2003. Power electronic interface for a supercapacitor based energy storage substation in DC transportation networks, *EPE 2003*, Toulouse.
- [15] **Steiner, M. and Scholten, J.**, 2004. Energy storage on board of DC fed railway vehicles, *PESC 2004 Conference*, Aachen, Germany.
- [16] **Steiner, M. and Klohr, M.**, 2005. Energy storage on board of railway vehicles, *UITP Congress*, Roma, 5–9 June.

- [17] **Deutsche Bahn AG**, 2003. Evaluation of energy efficiency technologies for rolling stock and train operation of railways, Berlin, March.
- [18] **UITP**, 2005. Energy consumption at the Hochbahn, energy optimized driving. *EIESS*, November.
- [19] **Gill D.C.**, 1998. The impact of moving block train control on heavy metros, *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*, ISBN: 0 85296 703 9, pp. 235 -242.
- [20] **Wong, K.K. and Ho, T.K.**, 2003. Coast control of train movement with genetic algorithm, *ISBN: 0-7803-7804-0*
- [21] **Gordon, S.P. and Lehrer, D.G.**, 1998. Coordinated train control and energy management control strategies, *ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, p. 166-176.
- [22] **Chang, C.S. and Sim, S.S.**, 1997. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, **Vol. 144**, No. 1.
- [23] **Wong, K.K. and Ho, T.K.**, 2004. Coast control for mass rapid transit railways with searching methods, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, **Vol. 151**, No. 3.
- [24] **Wong, K.K. and Ho, T.K.**, 2004. Dynamic coast control of train movement with genetic algorithm, *Int'l Journal of System Science*, **Vol. 35**, No. 13-14, p. 835-846, 2004
- [25] **Wong, K.K. and Ho, T.K.**, 2003. Peak power demand reduction under moving block signalling using an expert system, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, **Vol. 150**, No. 4.
- [26] **Goldberg, D.E.**, 1989. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley.
- [27] **Gen, M., Cheng R.**, 1997. *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley & Sons.
- [28] **Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hillmansen, S. and Goodman, C.J.**, 2007. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways, *IET Electr. Power Appl.*, **Vol. 1**, No. 5, pp. 675–682.
- [29] **Açıkbaş, S.**, 1994. A method for stochastic assessment of railway electricity supply, *MSc. Dissertation*, UMIST, Manchester, England.
- [30] **Açıkbaş, S. and Söylemez, M.T.**, 2007. Energy wise driving of a mass transit train, *5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey.
- [31] **Söylemez, M. T., Açıkbaş, S. and Kaypmaz. A.**, 2005. Controlling rail potential of DC supplied rail traction systems, *TÜBİTAK ELEKTRİK Journal ELECO 2005 Special Edition*.
- [32] **Mellit, B., Goodman, C. J. and Arthurton, R. I. M.**, 1978. Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways, *IEE Proc.*, **Vol 125**, ITM 4, pp 298-303.
- [33] **Cai, Y., Irving, M.R. and Case, S.H.**, 1995. Modeling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, **Vol 142**, ITM 5, pp. 323-328.

- [34] **Cai, Y., Irving, M. R. and Case, S. H.**, 1995. Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, **Vol 142**, ITM 5, pp. 445-452.
- [35] **Goodman, C. J., Siu, L. K. and Ho, T. K.**, 1998. A review of simulation models for railway systems, *Int. Conf. on Developments in Mass Transit Systems*, IEE, pp. 80-84.
- [36] **Yu, D., Lo, K. L., Wang, X. and Wang, X.**, 2002. MRTS traction power supply system simulation using Matlab/Simulink, *Vehicular Technology Conference*, IEEE, pp. 308-312.
- [37] **Kurtulan, S.**, 1992. Bir elektrikli ulaşım sisteminin modellenmesi ve simülasyonu, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] **Ündil, S.**, 1994. Bir elektrikli ulaşım taşıtının bond graf metodu ile simülasyonu ve geçici rejim analizi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [39] **Söylemez, M. T. and Açıkbaz, S.**, 2004. Multi-train simulation of DC rail traction power systems with regenerative braking, *Computers in Railways IX*, WIT Press, Boston, ISBN: 1-85312-715-9, pp 941-950.
- [40] www.simulatorx.com, Son erişim Kasım 2007.
- [41] **Goodman, C.J. and Siu, L.K.**, 1994. DC railway power network solution by diakoptics, *Railroad Conference*, IEEE, pp. 103-110.
- [42] **Açıkbaz, S. ve Söylemez, M. T.**, 2007. Raylı toplu taşımada enerji tüketim değerine etki eden parametrelerin incelenmesi", *II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli.
- [43] **S. Açıkbaz, M. T. Söylemez**, 2008. Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms, *IET Elec. Power Appl.*, **Vol. 2**, No. 3, pp. 172-182.

EK A YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)

Bu kısımda yazılanlar büyük oranda Hasan Yurtoğlu tarafından hazırlanmış olan ve internet ortamında bulunan “DPT YAYIN NO:2683, Uzmanlık Tezi, YAPAY SİNİR AĞLARI METODOLOJİSİ İLE ÖNGÖRÜ MODELLEMESİ: BAZI MAKROEKONOMİK DEĞİŞKENLER İÇİN TÜRKİYE ÖRNEĞİ” dokümanından ve <http://www.backpropagation.netfirms.com> internet sitesinden alınmıştır. Ayrıca S. P. Gordon ve arkadaşları tarafından hazırlanmış olan “SANDIA REPORT, SAND2000-8206, Optimization of Automatic Train Control For Energy Management and Service Reliability” adlı rapordan da faydalanılmıştır.

Yapay Sinir Ağlarına İlişkin Tanımlar ve Çalışma Prensibi

Kapsamlı ve genel kabul gören bir tanım Haykin (1999) tarafından verilmektedir:

“Bir sinir ağı, basit işlem birimlerinden oluşan, deneyimsel bilgileri biriktirmeye yönelik doğal bir eğilimi olan ve bunların kullanılmasını sağlayan yoğun bir şekilde paralel dağıtılmış bir işlemcidir”.

Bu işlemci iki şekilde beyin ile benzerlik göstermektedir:

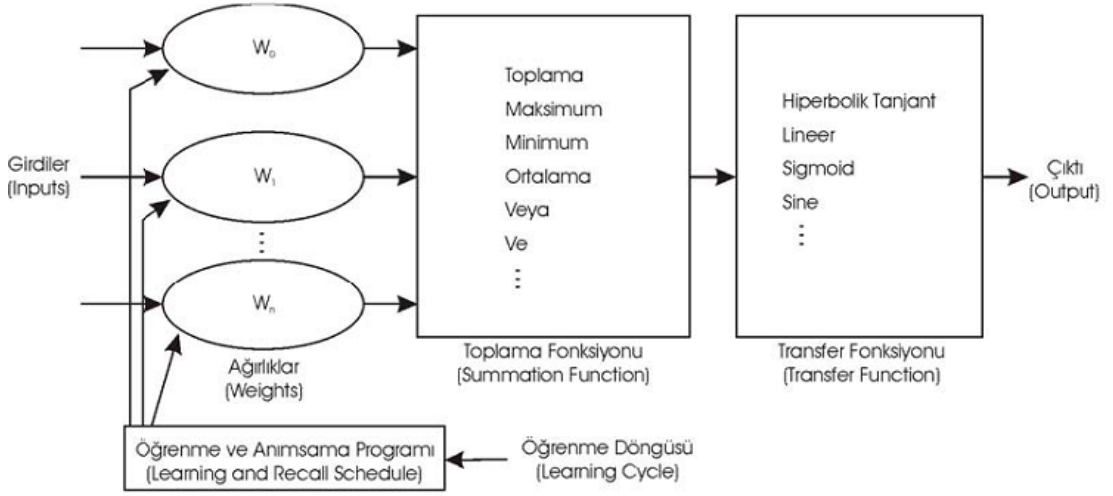
1. Bilgi, ağ tarafından bir öğrenme süreciyle çevreden elde edilir.
2. Elde edilen bilgileri biriktirmek için sinaptik ağırlıklar olarak da bilinen nöronlar arası bağlantı güçleri kullanılır.”

YSA'lar gerçek hayatta karşılaşılan problemlerde oldukça geniş bir uygulama alanı kazanmışlardır. Bugün, bir çok endüstride başarılı şekilde kullanılmaktadırlar. Uygulama alanları için bir sınır yoktur fakat, öngörü, modelleme ve sınıflandırma gibi bazı alanlarda ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. YSA'lar 1950'li yıllarda ortaya çıkmalarına rağmen, ancak 1980'li yılların ortalarında genel amaçlı kullanım için yeterli seviyeye gelmişlerdir. Bugün, YSA'lar bir çok ciddi problem üzerinde uygulanmaktadır ve bu problemlerin sayısı giderek artmaktadır. Verideki trend veya yapıyı (pattern) en iyi tanımlayan yöntem olmaları dolayısıyla, tahmin (prediction) ve öngörü işlemleri için çok uygundurlar.

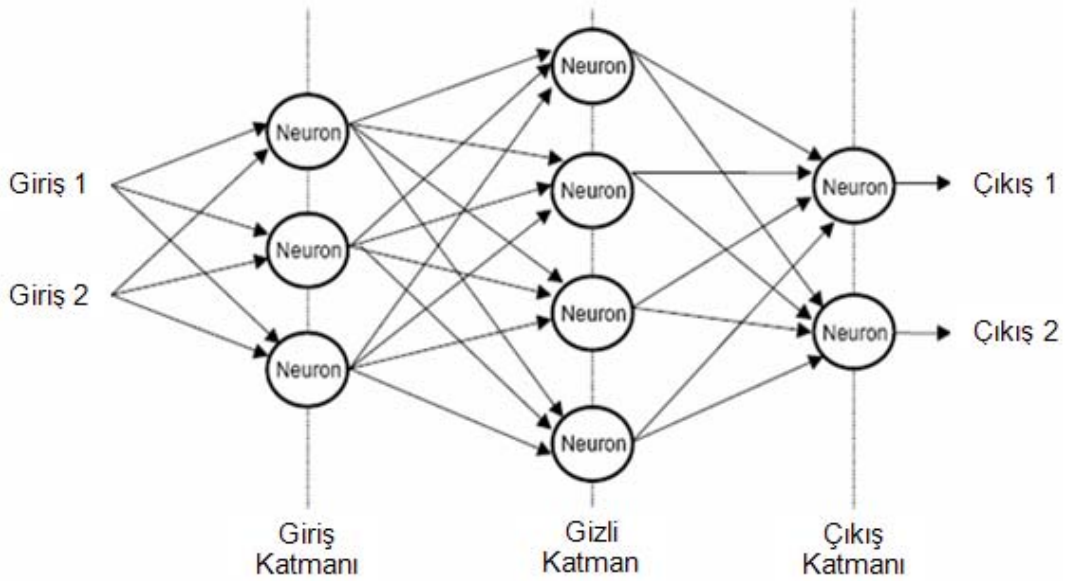
YSA'lar, tanımlanmamış girdi veriler hakkında karar verirken genelleme yapabildikleri için iyi birer yapı tanımlayıcısı (pattern recognition engine) ve sağlam sınıflandırıcıdır (robust classifier). Fonksiyonel tahmin (prediction) ve sistem modelleme gibi fiziksel işlemin anlaşılamadığı veya aşırı karmaşık olduğu problemler yanında konuşma, karakter ve sinyal tanımlama gibi çeşitli sınıflandırma problemleri için çözüm yolları sağlamaktadırlar. Ayrıca, kontrol problemlerinde de uygulama sahası bulmaktadırlar.

Şekil A.1'de, basit bir yapay nöron yapısının daha detaylı bir şeması sunulmaktadır. Şekilde, girdi değerler işlem elemanına üst sol bölümden girmektedir. İşlemde ilk adım, bu girdi değerlerin her birinin ilgili ağırlıklarla $w(i)$ ağırlıklandırılmalarıdır. Bir nöron genellikle, eşanlı olarak birçok sayıda girdi alır. Her girdinin kendi nispi ağırlığı vardır. Bu ağırlıklar, biyolojik nöronların değişen sinaptik etkililikleri ile aynı görevi üstlenirler. Her iki durumda da, bazı girdiler diğerlerine göre daha önemli hale gelirler. Bu sayede, işlem elemanının bir sinirsel tepki üretmesi işleminde daha fazla etkili olurlar. Ayrıca, ağırlıklar girdi sinyalin güçlülüğünü belirleyen adaptif

katsayılarıdır. Yani, girdinin bağlantı gücünün bir ölçüsüdür. Bu bağlantı güçleri, çeşitli eğitim setlerine göre değiştirilebilirler. Şekil A.2'de nöronların oluşturmuş olduğu bir yapay sinir ağı görülmektedir.



Şekil A.1: Bir Yapay Sinir Nöronunu Oluşturan Temel Bileşenler



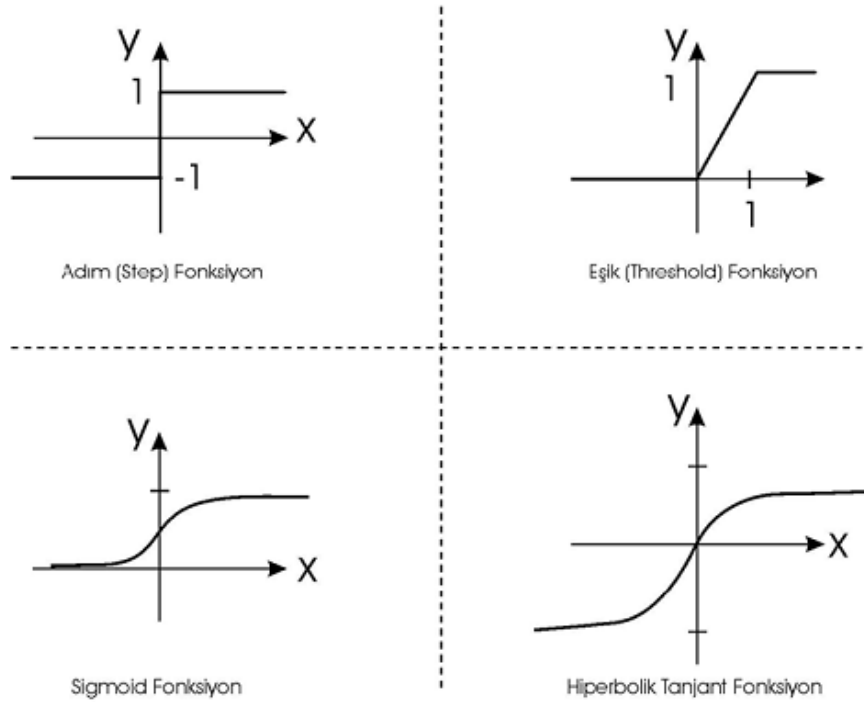
Şekil A.2: 2 Giriş ve 2 Çıkışlı Yapay Sinir Ağı

Ağırlıklandırmadan sonra, bu değiştirilmiş girdiler toplama fonksiyonuna gönderilirler. Toplama fonksiyonunda, adından da anlaşılacağı gibi, genelde toplama işlemi yapılmaktadır fakat bir çok farklı işlem çeşidi toplama fonksiyonu için kullanılabilir. Toplama fonksiyonu, bu basit çarpımlar toplamına ek olarak, minimum, maksimum, mod, çarpım veya çeşitli normalizasyon işlemlerinden birisi olabilir. Girdileri birleştirecek olan algoritma genellikle seçilen ağ mimarisine de bağlıdır. Bu fonksiyonlar farklı şekilde değerler üretebilir ve sonra bu değerler ileri doğru gönderilir. Ek olarak, uygulamacı kendi fonksiyonunu oluşturup toplama fonksiyonu olarak kullanabilir. Bazı toplama fonksiyonları, transfer fonksiyonuna iletmenden önce, sonuçları üzerinde ilave işlemler yaparlar. Bu işlem aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılan işlemdir. Bir aktivasyon fonksiyonu kullanmanın amacı toplama fonksiyonu çıktısının zamana bağlı olarak değişmesini sağlamaktır.

Fakat, aktivasyon fonksiyonu literatürü henüz tam olarak gelişmemiştir. Bundan dolayı, çoğu yapay sinir ağında birim aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Birim aktivasyon fonksiyonu ise bir aktivasyon fonksiyonu kullanılmaması ile aynı anlama gelmektedir. Ayrıca, aktivasyon fonksiyonu, her işlem birimi için ayrı ayrı kullanılan bir bileşenden ziyade ağıın genel bir bileşenidir. Yani, oluşturulan bir ağ yapısında, tüm işlem elemanları aynı aktivasyon fonksiyonunu kullanırlar.

Sonraki aşamada toplama fonksiyonunun çıktısı transfer fonksiyonuna gönderilir. Bu fonksiyon, aldığı değeri bir algoritma ile gerçek bir çıktıya dönüştürür. Transfer fonksiyonu genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Doğrusal fonksiyonlar genelde tercih edilmez çünkü doğrusal fonksiyonlarda çıktı, girdi ile orantılıdır. Bu durum, ilk YSA denemelerinin başarısızlıkla sonuçlanmasının temel nedenidir (Minsky ve Papert, 1969). Genellikle kullanılan transfer fonksiyonları eşik, sigmoid, hiperbolik tanjant vb. fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar arasında en çok kullanılanlar Şekil A.3'de gösterilmiştir. Transfer fonksiyonunun sonucu genellikle işlem elemanının çıktısıdır. Sigmoid transfer fonksiyonu, toplama fonksiyonundan gelen ve şekilde 'Toplam' olarak gösterilen değeri alır ve sıfır ile bir arasında bir değere dönüştürür. Sıfır ile bir arasındaki bu değer transfer fonksiyonunun ve dolayısıyla işlem elemanının çıktısıdır ve dış ortama veya girdi olarak başka bir nörona iletilir.

Transfer fonksiyonu işlemi öncesinde, sisteme tekdüze (uniform) dağılmış bir rassal hata eklenebilmektedir. Bu rassal hatanın kaynağı ve büyüklüğü, ağıın öğrenme işlemi sürecinde belirlenir. Sisteme böyle bir hata teriminin eklenmesinin sebebi, insan beyninin işlevinin, içinde bulunduğu ortamın şartlarından (örnek olarak sıcak/soğuk olmasından) etkileniyor olmasıdır. Bu yüzden, YSA literatüründe rassal hata ekleme işlemi "sıcaklık (temperature)" olarak da adlandırılmaktadır. Günümüzde, rassal hata kullanımı fiilen tam olarak yerleşmemiştir ve halen bir araştırma süreci içerisinde. Ayrıca, bazı ağlarda, transfer fonksiyonunun çıktısı üzerinde başka işlemler, ölçeklendirme ve sınırlandırma, yapılabilmektedir.



Şekil A.3: En Çok Kullanılan Transfer Fonksiyonları

Niçin YSA?

Teknolojik gelişme olarak da görülmesi gereken yapay sinir ağları metodolojisi, özellikleri ve yapabildikleri sayesinde önemli avantajlar sunmaktadır.

Doğrusal Olmayan Yapı

YSA'ların en önemli özelliklerinden birisi gerçek hayattaki olası doğrusal olmayan yapıları da dikkate alabilmesidir. Analiz konusunun içerdiği veri setinin doğrusal veya doğrusal olmayan yapı içeriyor olması, analiz sonuçlarını etkileyecek önemli bir faktördür. Bu yüzden, doğrusal olmayan yapıları dikkate alabilmesi YSA'ların önemli bir özelliğidir.

Öğrenme

Esin kaynağı insan beyninin çalışma sistemi olan bu yöntem, eğitime veya başlangıç tecrübesi sayesinde veriyi kullanarak öğrenme yeteneğine sahiptir. Bu özelliği sayesinde ise geleneksel teknikler için çok karmaşık kalan problemlere çözüm sağlayabilmektedirler. Ayrıca, insanların kolayca yapabildiği ama geleneksel yöntemlerin uygulanamadığı basit işlemler için de oldukça uygundur.

Yerel İşlem ve Esneklik

YSA'lar, geleneksel işlemcilerden farklı şekilde işlem yapmaktadırlar. Geleneksel işlemcilerde, tek bir merkezi işlem elemanı her hareketi sırasıyla gerçekleştirir. YSA modelleri, her biri büyük bir problemin bir parçası ile ilgilenen çok sayıda basit işlem elemanlarından oluşma ve bağlantı ağırlıklarının ayarlanabilmesi gibi özelliklerinden dolayı önemli derecede esnek bir yapıya sahiptirler. Bu esnek yapı sayesinde ağırlık bir kısmının zarar görmesi modelde sadece performans düşüklüğü yaratır. Modelin işlevini tamamen yitirmesi söz konusu olmaz. Ayrıca, toplam işlem yükünü paylaşan işlem elemanlarının birbirleri arasındaki yoğun bağlantı yapısı sinirsel hesaplamanın temel güç kaynağıdır. Bu yerel işlem yapısı sayesinde, YSA yöntemi en karmaşık problemlere bile uygulanabilmekte ve tatminkar çözümler sağlayabilmektedir.

Gerçek Zamanlı İşlem

YSA hesaplamaları paralel olarak yürütülebildiğinden gerçek zamanlı işlem yapılabilir.

Genelleme

YSA'lar öğrenme yeteneği sayesinde bilinen örnekleri kullanarak daha önce karşılaşılmamış durumlarda genelleme yapabilmekte yani, hatalı (noisy) veya kayıp veriler için çözüm üretebilmektedirler. Tanımlanmamış girdi veriler hakkında karar verirken genelleme yapabildikleri için iyi birer örgü algılayıcısı (pattern recognition engine) ve dayanıklı bir sınıflandırıcıdır (robust classifier).

Hafıza

Bunlara ek olarak, işlem elemanları arasındaki ağırlıklı bağlantılar sayesinde dağıtılmış hafızada bilgi saklayabildikleri söylenebilir.

Kendi İlişisini Oluşturma

Yapay sinir ağları, bilgilere (verilere) göre kendi ilişkilerini oluştururlar, denklem içermezler.

Sınırsız Sayıda Değişken ve Parametre

Diğer taraftan, YSA modelleri sınırsız sayıda değişken ve parametre ile çalışabilmektedir. Bu sayede mükemmel bir öngörü doğruluğu ile genel çözümler sağlanabilmektedir.

Karmaşık veya sorunlu veriden bile anlam çıkarabilmek gibi dikkate değer yetenekleriyle YSA'lar, insanlar veya bilgisayarlar tarafından anlaşılması zor trendleri belirlemek veya yapıları (pattern) çıkartmak için kullanılabilirler. Tam eğitilmiş bir Yapay Sinir Ağı modeli, analiz ettiği bilgi kümesi (veri tabanı) için uzman olarak düşünülebilir.

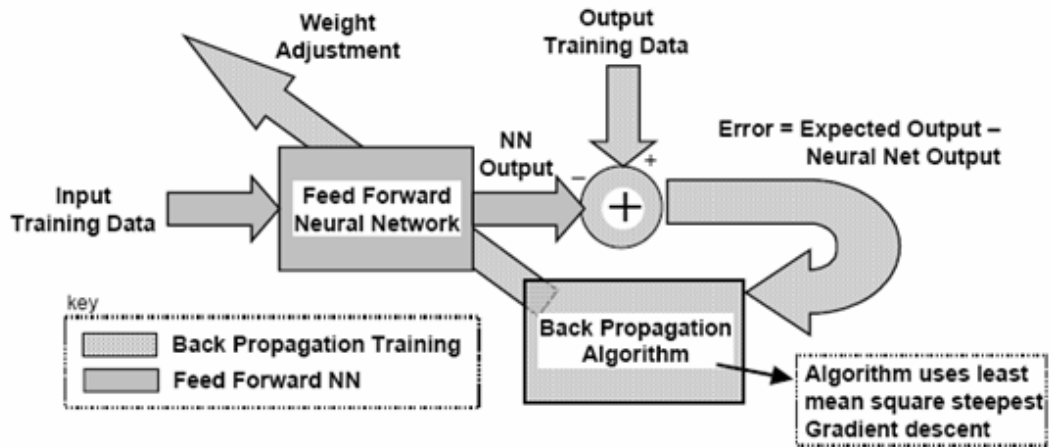
Bütün bu avantajlarla birlikte, YSA'ların kullanımında göz önünde bulundurulması gereken bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlar arasında en önemlisi geniş veri seti gereksinimidir. Sinir ağlarının eğitilebilmesine ve test edilebilmesine yetecek genişlikte veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Yine de, yeterli veri seti genişliği için kesin bir kriter yoktur; bir noktada uygulamaya bağlıdır. Dezavantaj sayılabilecek diğer bir nokta ise basit olarak görülebilecek modelleme yapılarına rağmen uygulamanın zor ve karmaşık olabilmesidir. Bazı durumlarda, bir yakınsama sağlamak bile imkansız olabilmektedir fakat bu durum da uygulama alanına bağlıdır ve genellikle çok karmaşık problemlerde ortaya çıkmaktadır.

Backpropagation (Geri Yayılım Algoritması - GYA)

Karmaşık verilerin sınıflandırılmasında kullanılan etkin YSA modellerinden birisi; ilk olarak Werbos tarafından düzenlenen daha sonra Parker, Rumelhart ve McClelland tarafından geliştirilen geri yayılım ağıdır (Back Propagation Network). Sınırları ise denetimli eğitim giriş ve çıkış örneklerinin çok sayıda olmasıdır. Backpropagation günümüzde en yaygın kullanılan öğrenimi kolay sonuçları etkin bir YSA'dır.

Yayınma ve uyum gösterme (Propagate - Adapt) olmak üzere iki aşamada işlemleri gerçekleştiren GYA, katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı (Multilayer), İleri Beslemeli (Feed Forward) ve Denetimli (Supervised) olarak eğitilen bir YSA modelidir.

Geri yayılım algoritması (Backpropagation) bir çok uygulamalarda kullanılmış olan anlaşılması kolay ve tercih edilen öğretim algoritmasıdır. Bu algoritma; hataları geriye doğru, çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayımlı öğrenme kuralı ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir tabakadaki ağırlıkları yeniden hesaplamak için kullanılmaktadır. Bir geri yayımlı ağ modelinde giriş, gizli ve çıkış olmak üzere 3 katman bulunmakla birlikte, problemin özelliklerine göre gizli katman sayısını artırabilmek mümkündür. Şekil A.4'de bir ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil A.4. Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağının Genel Yapısı

Giriş katmanı; giriş veri gruplarının ağa sunulduğu terminallerdir. Bu katmanda nöron sayısı giriş veri sayısı kadardır ve her bir giriş nöronu bir veri alır. Burada veri işlenmeden bir sonraki katman olan gizli katmana geçer.

Gizli katman; ağın temel işlevini gören katmandır. Bazı uygulamalarda ağda birden fazla gizli katman bulunabilir. Gizli katman sayısı ve katmandaki nöron sayısı probleme göre değişir, tamamen ağ tasarımcısının kontrolündedir ve onun tecrübesine bağlıdır. Bu katman; giriş katmanından aldığı ağırlıklandırılmış veriyi probleme uygun bir fonksiyonla işleyerek bir sonraki katmana iletir. Bu katmanda gereğinden az nöron kullanılması giriş verilerine göre daha az hassas çıkış elde edilmesine sebep olur. Aynı şekilde, gerektiğinden daha çok sayıda nöron kullanılması durumunda da aynı ağda yeni tip veri gruplarının işlenmesinde zorluklar ortaya çıkar.

Çıkış katmanı; yapay sinir ağının en uç katmanıdır. Gizli katmandan aldığı veriyi ağın kullandığı fonksiyonla işleyerek çıktısını verir. Çıkış katmanındaki nöron sayısı ağa sunulan her verinin çıkış sayısı kadardır. Bu katmandan elde edilen değerler yapay sinir ağının söz konusu problem için çıkış değerleridir.

Back propagation aşında; bir katmandan bir başka katmana, aradaki katmanı atlayarak geçebilmek mümkün değildir.

Bir giriş verisinin ağın ilk katmanında yer alan düğümlere uygulandığında en üst katman olan çıkış katmanına erişinceye kadar, bu veri üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen fiili çıktı, olması gereken çıktı ile karşılaştırılır. Fiili ve olması gereken değerler arasındaki fark, her çıktı düğümü için bir hata sinyali olarak hesaplanır. Hesaplanan hatalar, her çıktı düğümüne karşı gelen ara katmandaki düğümlere aktarılır. Böylece ara katmandaki düğümlerin herbiri toplam hatanın sadece hesaplanan bir kısmını içerir. Bu süreç her katmandaki düğümler toplam hatanın belirli bir kısmını içerecek şekilde giriş katmanına kadar tekrarlanır. Elde edilen hata sinyalleri temel alınarak, bağlantı ağırlıkları her düğümde yeniden düzenlenir. Bu düzenleme tüm verilerin kodlanabileceği bir duruma ağın yakınsamasını sağlar.

Yukarıda anlatıldığı gibi; ileri besleme safhasında, giriş tabakasındaki nöronlar veri değerlerini doğrudan gizli katmana iletirler. Gizli katmandaki her bir nöron kendi giriş değerlerini ağırlandırarak toplam değer hesap ederler ve bunları bir taşıma fonksiyonu ile işleyerek bir ileriki tabakaya veya doğrudan çıkış katmanına iletirler. Katmanlar arasındaki ağırlıklar başlangıçta rastgele küçük rakamlardan seçilir.

Çıkış katmanındaki, her bir nöron ağırlıklandırılmış değeri hesaplandıktan sonra, bu değer yine taşıma fonksiyonu ile karşılaştırılarak mevcut hata minimize edilmeye çalışılır. Hata değeri belli bir mertebeye ininceye kadar iterasyon işlemine devam edilir ve böylece ağın eğitim aşaması tamamlanmış olur. Katmanlar arasındaki bağlantılardaki ağırlık değerleri eğitimi tamamlamış ağdan alınarak deneme safhasında kullanılmak üzere saklanır.

EK B MATLAB KODLARI

Run.m:

```
%Carrying out simulation runs for different coasting start points
cd 'C:\Works\Basic';
minStartCoastingVelocity = 50; %Minimum Velocity [kmph] to start coasting
stopCoastingVelocity = 1; %Velocity [kmph] to terminate coasting mode
positionEast = 1000; %Position [m] to terminate coasting mode
%First delete the output file
!del out.txt
start=20;
stop=1000;
step=20;
for positionWest = start : step : stop %As positionWest changes between start and
stop with steps step
    %Prepare the configuration file
    fid=fopen('config.xml','wt');
    fprintf(fid,<Track>\n');
    fprintf(fid,<Line LineNo="1">\n');
    fprintf(fid,<CoastingRegionData Direction="Eastbound">\n');
    fprintf(fid,['<CoastingRegion PositionWest="%f" PositionEast="%f" ', ...
        ' StartCoastingMinVelocity="%f" EndCoastingVelocity="%f"
TrainType="All"/>\n'], ...
        [positionWest,positionEast,minStartCoastingVelocity,stopCoastingVelocity]);
    fprintf(fid,</CoastingRegionData>\n');
    fprintf(fid,</Line>\n');
    fprintf(fid,<OutputOptions OutputFileName="out.txt" Signature="%g"
ExitAfterSimulation="True" />\n', ...
        positionWest);
    fprintf(fid,</Track>\n');
    fclose(fid);
    %Call SimuX to execute configuration file
    !simux Normal_Durum config.xml
end
readData('out.txt');
```

Run.m file içinde boşta gitme noktalarını tanımlayan Config.xml dosyası oluşturulmakta.

Config.xml:

```
- <Track>
- <Line LineNo="1">
- <CoastingRegionData Direction="Eastbound">
  <CoastingRegion PositionWest="1000.000000" PositionEast="1000.000000"
  StartCoastingMinVelocity="50.000000" EndCoastingVelocity="1.000000"
  TrainType="All" />
  </CoastingRegionData>
</Line>
<OutputOptions OutputFileName="out.txt" Signature="1000"
ExitAfterSimulation="True" />
</Track>
```

Fitfnc.m:

```
%Bu fonksiyon belli bir girdi için uygunluk fonksiyonunun değerini hesaplar.
function z = fitfnc(x)
global Eag Tag wE wT EHedef THedef TmaxAllowed xmin xmax
%Eag ve Tag iki ayrı eğitilmiş ağıdır: Enerji ve Zaman
%wE ve wT enerji ve zamana ait öngörülen ağırlıklardır.
%EHedef ve THedef hedeflenen enerji ve yolculuk süresidir.
%TmaxAllowed işletme tarafından kabul edilebilecek en uzun yolculuk süresidir.
%xmin ve xmax ise genetik algoritmayı hızlandırmak için verilen boşta gitme
başlama %noktasına ait aralığı tanımlamaktadır.
if x < xmin | x>xmax
  z=1000;
else
  E=sim(Eag,x); %YSA yardımıyla enerji tüketimini bul.
  T=sim(Tag,x); %YSA yardımıyla yolculuk süresini bul.
  if T>TmaxAllowed
    z=1000;
  else
    z=E*wE/EHedef+T*wT/THedef;
  end
end
```

run_multi.m:

```
%% Calls SimuX multiple times for different coasting region configurations
%% Multiple lines are allowed.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%                CONFIGURATION
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%Change the working directory
cd 'D:\Works';
minStartCoastingVelocity = 50; %Minimum Velocity [kmph] to start coasting
stopCoastingVelocity = 1; %Velocity [kmph] to terminate coasting mode
station = [50 950 2006 3445 4875;
          50 950 2006 3445 4875]; %Positions [m] of the passenger stations for
coasting
coastWestPoints = [200 1150 2206 3645;
                  200 1150 2206 3645]; %Positions [m] of the passenger stations for
coasting
coastEastPoints = [750 1806 3245 4675;
                  750 1806 3245 4675]; %Positions [m] of the passenger stations for
coasting
direction = [-1 1]; %direction of line traffic 1 means eastbound traffic
resolution = 7; % Num of points to be used for each coasting region
configFileName='config_LRT_5PS_TwoLines_150HT.xml';
mesh = 0; %use mesh if mesh=1 otherwise use random points
%PLEASE DO NOT FORGET TO CHANGE file names in execution
%command at the end of this file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%                EXECUTION
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%First delete the output file
!del out.txt
[numLines,PSnumber]=size(stations);
CoastingRegionNumber=numLines*(PSnumber-1);
%This part produces a mesh for given PSnumber and resolution
row=zeros(1,CoastingRegionNumber);
SimulationNumber=resolution^CoastingRegionNumber;
SimulationNumber=6; %use this line only for DEBUGGING otherwise comment this
line out
CoastingPoints = row;
for num=1:1:SimulationNumber-1
    for digit=CoastingRegionNumber:-1:1
        row(digit) = row(digit) + 1;
        if(row(digit) >= resolution)
            row(digit) = 0;
        else
            break;
        end
    end
    CoastingPoints = [CoastingPoints; row];
end
CoastingPoints = (CoastingPoints+1)/(resolution-1)-(1/(resolution-1))

positionWestArray=zeros(SimulationNumber,CoastingRegionNumber);
for i=1:1:SimulationNumber %How many times SimuX will be called
    %Prepare the configuration file
    fid=fopen(configFileName,'wt');
    fprintf(fid,'<Track>\n');
    formatString='<OutputOptions OutputFileName="out.txt" Signature="';
```

```

offset=0;
for lineNo=1:1:numLines
    fprintf(fid,'<Line LineNo="%d">\n',lineNo);
    if direction(lineNo)==1
        dirstr = 'Eastbound';
    else
        dirstr = 'Westbound';
    end
    fprintf(fid,' <CoastingRegionData Direction="%s">\n',dirstr);
    numCoasting=PSnumber-1;
    for j=1:1:numCoasting %Defining the coasting start points for each station
        if mesh==1
            cp=CoastingPoints(i,offset+j);
        else
            cp=rand(1);
        end
        %positionWest= stations(lineNo,j)+(stations(lineNo,j+1)-stations(lineNo,j)-
200)*cp;
        %positionEast=stations(lineNo,j+1);
        if direction(lineNo) == 1 %Eastbound traffic
            pW=coastWestPoints(lineNo,j);
            positionWest= pW + (coastEastPoints(lineNo,j) - pW)*cp;
            positionEast=stations(lineNo,j+1);
            positionWestArray(i,offset+j)=positionWest;
        else %Westbound traffic
            pW=coastWestPoints(lineNo,j);
            positionEast= pW + (coastEastPoints(lineNo,j) - pW)*cp;
            positionWest=stations(lineNo,j);
            positionWestArray(i,offset+j)=positionEast;
        end
        fprintf(fid,[' <CoastingRegion PositionWest="%f" PositionEast="%f" ', ...
            ' StartCoastingMinVelocity="%f" EndCoastingVelocity="%f"
TrainType="All"/>\n'], ...
[positionWest,positionEast,minStartCoastingVelocity,stopCoastingVelocity]);
        %s=sprintf([' <CoastingRegion PositionWest="%f" PositionEast="%f" ',
...
            ' StartCoastingMinVelocity="%f" EndCoastingVelocity="%f"
TrainType="All"/>\n'], ...
            %
            [positionWest,positionEast,minStartCoastingVelocity,stopCoastingVelocity]);
        %s
        formatString = strcat(formatString,'%g ');
        if(j~=numCoasting || lineNo~=numLines) formatString =
strcat(formatString,'\t'); end
    end
    offset=offset+numCoasting;
    fprintf(fid,' </CoastingRegionData>\n');
    fprintf(fid,'</Line>\n');
end
formatString = strcat(formatString,'" ExitAfterSimulation="True" />\n');
%formatString
%positionWestArray(i,1:CoastingRegionNumber)
fprintf(fid,formatString, positionWestArray(i,1:CoastingRegionNumber) );
%sprintf(formatString, positionWestArray(i,1:CoastingRegionNumber));
fprintf(fid,'</Track>\n');
fclose(fid);
%Call SimuX to execute configuration file
!SimuX LRT_5PS_TwoLines_150HT config_LRT_5PS_TwoLines_150HT.xml
end
%positionWestArray

```

ÖZGEÇMİŞ

1971 doğumlu olan Süleyman AÇIKBAŞ, 1992 yılında İTÜ Elektrik – Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği bölümünü 3. olarak bitirmesine müteakip T.C. Milli Eğitim Bakanlığı - TCDD bursu ile Demiryolu Elektrifikasyonu konusunda yüksek lisans için İngiltere' ye gitti. University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST)' de MSc. in Electrical Power Engineering kursunu 1994 sonunda 2.'likle tamamladı. Ülkeye dönüşte TCDD 1. Bölgede Yüksek Mühendis olarak çalıştı. 1999 Temmuz'da İstanbul ULAŞIM San ve Tic AŞ' de görev alan Açıkbáš, farklı görevlerde bulundu. Mayıs 2008 tarihinden itibaren Kadıköy-Kartal Metro Hattı inşasında Elektromekanik İşler Yapım Müdürü olarak görev yapmaktadır.

Raylı toplu taşımacılık ve bunlara ilişkin cer gücü / katener /sinyalizasyon sistemleri üzerine bir çok uluslararası ve ulusal yayına sahiptir. Ayrıca, Kavrakoğlu Management Institute'un "*Executive e-MBA*" programını ve UITP'nin "*4th Training Programme for Public Transport Managers*" eğitimlerini de başarı ile tamamlamıştır. İngilizce ve Japonca bilmekte olup evli ve iki çocuk babasıdır.