T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN AKILLI ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Ahmet YILDIZ

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Kasım, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN AKILLI ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Ahmet YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.11.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Bülent ORAL, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Suat İLHAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üye. Ali DURUSU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Kentsel Raylı Ulaşım Sistemleri İçin Akıllı Enerji Yönetim Algoritması Geliştirilmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet YILDIZ

İmza

Bu çalışma, “Metro İstanbul A.Ş. Ar-Ge Müdürlüğü’nün AR220006” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

ve

sevgili eşime

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi birikimi ile çalışmaya yön veren ve sunduğu katkılarla destek olan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a, ve tecrübesiyle büyük yardımları olan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Kemal KESKİN'e teşekkür ederim.

Sundukları çok değerli katkılar ile tezimin gelişmesinde büyük desteklerini gördüğüm, tez izleme jürimde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Bülent ORAL ve Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU'na teşekkür ederim.

Veri paylaşımı ve saha testleri konusunda desteğini esirgemeyen Metro İstanbul'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan ve desteğini eksik etmeyen sevgili eşim Rumeysa'ya, eğitim hayatım boyunca sundukları maddi ve manevi destekleri ile bu güne gelmemi sağlayan anneme, babama ve rahmetli babaannem Şerife YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ahmet YILDIZ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR **v**

SİMGE LİSTESİ **viii**

KISALTMA LİSTESİ **xi**

ŞEKİL LİSTESİ **xiii**

TABLO LİSTESİ **xviii**

ÖZET **xxii**

ABSTRACT **xxiv**

1 GİRİŞ **26**

1.1 Literatür Özeti 28

1.2 Tezin Amacı 44

1.3 Hipotez 45

2 SİSTEM TANITIMI **47**

2.1 İstanbul M3 Metrosu Hat Tanıtımı 47

2.2 İstanbul M3 Metrosu Araç Tanıtımı 55

2.3 İstanbul M3 Metrosu Elektrifikasyonu 64

3 TREN HAREKET MODELİ OLUŞTURULMASI VE MODELİN GERÇEK BİR METRO HATTI ÜZERİNDE DOĞRULANMASI **67**

3.1 Tren Hareketinin Matematiksel Modeli 67

3.2 Tren Sürüş Modları 71

3.3 Tren Hareket Simülatörü Tasarımı ve Enerji Tüketim Hesabı 73

3.4 Tren İşletim Optimizasyonuna Ait Genel Matematiksel Yaklaşım 76

3.5 Geliştirilen Tren Hareket Simülatörünün Gerçek Bir Metro Hattı Üzerinde Doğrulanması 78

4 RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ENERJİ TASARRUFU TEKNİKLERİ **93**

4.1 Çekiş (Cer) Enerjisi Optimizasyonu 95

4.2 Rejeneratif Frenleme Enerjisi 101

4.3 Enerji Depolama Sistemleri 103

4.4 Sistem Enerji Optimizasyonu 105

4.5 İşletmesel Enerji Optimizasyonu 106

4.6 Diğer Enerji Tasarrufu Yöntemleri 110

5 METASEZGİSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK CER ENERJİSİ OPTİMİZASYONU VE UYGULAMASI **112**

5.1 Enerji Verimli Tren Sürüş Modeli 115

5.2 Genetik Algoritma (GA) ve GA İle Tren Hız Profili Optimizasyonu 119
5.3 Benzetimli Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm-SA) ve SA ile Tren Hız Profili Optimizasyonu 142
5.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve PSO ile Tren Hız Profili Optimizasyonu 160
5.5 Deniz Yırtıcıları Algoritması (Marine Predators Algorithm - MPA) ve MPA ile Tren Hız Profili Optimizasyonu 178
5.6 Saha Uygulaması 200
6 ZAMAN ÇİZELGESİNİN YENİDEN DÜZENLENMESİ İLE ENTEGRE ENERJİ OPTİMİZASYONU 212
6.1 Zaman Çizelgesi Düzenlemesi (Sefer Planlaması) 212
6.2 Çoklu Tren Hareket Simülatörü Yapısı 214
6.3 Rejeneratif Frenleme Enerjisi Modelinin Geliştirilmesi 216
6.4 Mevcut Durum Tanıtımı 220
6.5 Entegre Enerji Optimizasyonu 223
6.6 Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 238
7 TARTIŞMA 241
7.1 Tren Hareket Simülatörü 242
7.2 Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak Tren Hız Profili Optimizasyonu 245
7.3 Entegre Enerji Optimizasyonu 252
8 SONUÇLAR 255
KAYNAKÇA 260
A EK 276
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 277

SİMGE LİSTESİ

α	Yolun eğim açısı
α^0	Eğrinin açısal uzunluğu
α_i, s_i, v_i	i anındaki trenin ivmesi, konumu ve hızı
β	Dönme payı
ΔT	Simülasyon adım boyutu
E_c	Trenin anlık enerji tüketimi
E_f	Frenleme kuvveti
E_{it}	İstasyonlar arası enerji tüketimi
E_{MGG}	MGG fazında trenin tükettiği enerji
E_{opt}	En aza indirilmesi gereken enerji tüketimi
E_{RFE}	Rejeneratif frenleme enerjisi
E_{SHG}	SHG fazında trenin tükettiği enerji
E_{sj}	Tek bir trenin seyahati için tüketilen enerji
E_{toplam}	Trenin istasyonlar arasında toplam tükettiği enerji
F_c	Trenin cer kuvveti
F_{cmax}	Maksimum cer kuvveti
F_f	Tren frenleme kuvveti
F_{fmax}	Maksimum frenleme kuvveti
F_G	Gradyan direnci
F_R	Temel hareket direnci
F_T	Tünel direnci
F_V	Viraj direnci
FFsG	Frenleme-frenleme senkronize grubu
FFsS	Frenleme-frenleme senkronize süresi
FHsG	Frenleme-hızlanma senkronize grubu
FHsS	Frenleme-hızlanma senkronize süresi
g	Yer çekimi ivmesi
η	Sürtünme kuvveti
HHsG	Hızlanma-hızlanma senkronize grubu

HHsS	Hızlanma-hızlanma senkronize süresi
Hw	Headway süresi
Hw_{min}	İki tren arasındaki en düşük headway süresi
Hw_r	Önceden planlanmış headway ile optimal headway arasındaki izin verilen en büyük fark
Hw_s	Planlanmış trenler arası sefer süresi
IT	İstasyonlar arası seyahat süresi
IT_r	planlanan seyahat süresi ile optimum seyahat süresi arasındaki en büyük farkı
J	Jerk (konfor) parametresi
lt	Trenin uzunluğu
ltu	Tünel uzunluğu
λ	Dönen kütlenin atalet etkisi
M	Trenin kütlesi
Me	Trenin etkin kütlesi
Mt	Trenin dara kütlesi
My	Yolcu yükü
$OPTD_{profil}$	Optimal hız profillerinin tutulduğu veri seti
P_{mec}	Trenin mekanik gücü
P_i	i'ninci en iyi bireyin seçilme olasılığı
t	Anlık seyahat süresi
T_{bs}	Belirlenmiş seyahat süresi
T_D	Simüle edilmiş günlük yolculuk süresi
T_f	Yeni seyahat süresi ile belirlenmiş seyahat süresi arasındaki fark
T_{SD}	Planlanan günlük yolculuk süresi
T_{sj}	Tek bir seyahat için geçen süre
TSS_{opt}	Maksimum olması gereken toplam senkronize edilmiş süre
T_{stt}	Planlanan toplam seyahat süresi
T_{to}	Yeni seyahat süresi ile belirlenmiş seyahat süresi arasındaki tolerans
v	Trenin anlık hızı
V_{fr}	Frenlemenin başladığı andaki trenin hızı

V_{SHG}	SHG fazında trenin hızı
ω_{FHsS}	FHsS ile ilgili ağırlıklandırma
ω_{FFsS}	FFsS ile ilgili ağırlıklandırma
ω_{HHsS}	HHsS ile ilgili ağırlıklandırma
x	Trenin anlık konumu
x_{cr}	Eğrinin doğrusal uzunluğu
x	Trenin güvenli duruş mesafesi

KISALTMA LİSTESİ

ABC	Artificial bee colony (Yapay arı kolonisi)
ACO	Ant colony algortihm (Karınca kolonisi algoritması)
ATO	Automatic train operation (Otomatik tren işletimi)
BBBC	Big bang-big crunch (Büyük patlama büyük çöküş)
BG	Boşta gitme
CBTC	Communications-based train control (İletişim tabanlı tren kontrolü)
CGA	Column generation algorithm (Sütün oluşturma algoritması)
ÇTHS	Çoklu tren hareket simülatörü
DAS	Driver Advisory Systems (Sürücü danışma sistemi)
DE	Differential Evolution (Diferansiyel Evrim)
DP	Dinamik programlama
EBF	Enhanced brute force (Geliştirilmiş kaba kuvvet algoritması)
EDS	Enerji depolama sistemleri
FA	Firefly algorithm (Ateş böceği algoritması)
FAD	Fish Aggregating Device (Balık Toplama Cihazı)
FESS	Flywheel energy storage system (Volanlı enerji depolama sistemi)
FR	Frenleme
GA	Genetic algorithm (Genetik algoritma)
GSA	Genetic simulated annealing (Genetik benzetimli tavlama)
GM	Gradient method (Gradyan yöntemi)
HFS	Hareket fazı sırası
İBB	İstanbul büyükşehir belediyesi
KGK	Kesintisiz güç kaynağı
LRA	Lagrange relaxation algorithm (Lagrange gevşetme algoritması)
MGG	Maksimum güçte gitme
MPA	Marine predators algorithm (Deniz yırtıcıları algoritması)
MPGA	Multi population genetic algorithm (Çok popülayonlu genetik algoritma)
OG	Orta gerilim
PDF	Probably density function (Olasılık yoğunluk fonksiyonu)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
RFE	Rejeneratif frenleme enerjisi
SA	Simulated annealing (Benzetimli tavlama)

SQP	Sequential quadratic programming (İkinci dereceden programlama)
SHG	Sabit hızda gitme
TAS	Trenler arası sefer süresi
THS	Tren hareket simülatörü
TM	Transformatör merkezi
YG	Yüksek gerilim
YSA	Yapay sinir ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Metro İstanbul 2021 yılına ait genel enerji tüketim dağılımı 29
Şekil 2.1 M3 metro hattı istasyon bilgileri 47
Şekil 2.2 M3 metro hattı güzergah ve boy kesiti Autocad çizimi 49
Şekil 2.3 M3 metro hattı yokuş iniş-çıkış (gradyan bilgileri) 53
Şekil 2.4 M3 metro hattında çalışan tren yapısı 55
Şekil 2.5 M3 hattında aktif olarak kullanılan tren görseli 56
Şekil 2.6 Trene ait bir vagon görünümü 56
Şekil 2.7 Boji detaylı görünümü 57
Şekil 2.8 Trene ait asenkron cer motoru 59
Şekil 2.9 M3 metro trenlerinde bulunan fren direnci görseli 60
Şekil 2.10 M3 metro trenlerinde bulunan fren direnci görseli 60
Şekil 2.11 Elektriksel frenleme modları 61
Şekil 2.12 AW0 yüklü durum için a) cer kuvveti & hız ve b) fren kuvveti & hız grafikleri 63
Şekil 2.13 AW3 yüklü durum için a) cer kuvveti & hız ve b) fren kuvveti & hız grafikleri 63
Şekil 2.14 M3 metro hattı elektrifikasyon yapısı [68] 64
Şekil 2.15 M3 metro hattı enerji besleme diyagramı 65
Şekil 3.1 Bir tren üzerindeki kuvvetler 67
Şekil 3.2 Trene ait çekiş, çalışma direnci ve frenleme eğrileri; a) Tren cer kuvveti, b) Frenleme kuvveti 69
Şekil 3.3 Optimal tren hız profiline ait hız-konum örneği 72
Şekil 3.4 Tren hareket simülatörü yapısının şeması 74
Şekil 3.5 Hareket fazları için değişim zamanlarını gösteren yapı 75
Şekil 3.6 Tren hareket modelinde anlık hareketin zamana göre oluşumu 77
Şekil 3.7 Metro aracında bulunan ölçüm cihazı 79
Şekil 3.8 Saha testlerine ait görseller; a)- THS doğrulanması için kullanılan trenin dış görseli, b) boş trenin iç görseli 80
Şekil 3.9 THS ve gerçek tren sürüşü karşılaştırmaları test-1; a) hız-konum karşılaştırması, b) hız-zaman karşılaştırması 81
Şekil 3.10 THS ve gerçek tren sürüşü karşılaştırmaları test-2; a) hız-konum karşılaştırması, b) hız-zaman karşılaştırması 84
Şekil 3.11 THS ve gerçek tren sürüşü karşılaştırmaları test-3; a) hız-konum karşılaştırması, b) hız-zaman karşılaştırması 86

Şekil 3.12 THS ve gerçek tren sürüşü Metrokent-Kirazlı istasyonları arası hız-konum karşılaştırması 89

Şekil 3.13 THS ve gerçek tren sürüşü Metrokent-Kirazlı istasyonları arası hız-zaman karşılaştırması 89

Şekil 3.14 THS ve gerçek tren sürüşü Kirazlı- Metrokent istasyonları arası hız-konum karşılaştırması 91

Şekil 3.15 THS ve gerçek tren sürüşü Kirazlı- Metrokent istasyonları arası hız-zaman karşılaştırması 91

Şekil 4.1 Raylı sistemlerde enerji akış şeması 94

Şekil 4.2 İstanbul raylı ulaşım sistemi enerji tüketim dağılımı-2021 yılı 95

Şekil 4.3 Çeşitli hız profili örnekleri 97

Şekil 4.4 Bir tepenin üzerine planlanan istasyon tasarımına bir örnek 100

Şekil 4.5 Metro sistemlerinde enerji tüketimi dağılımı [97] 102

Şekil 5.1 Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması [153] 113

Şekil 5.2 Tren hareket simülatörü temel yapısı 116

Şekil 5.3 Sürüş kontrollerine sahip bir hız yörüngesi örneği 117

Şekil 5.4 Genetik algoritma akış şeması 121

Şekil 5.5 Tek noktalı çaprazlama örneği 122

Şekil 5.6 Çift noktalı çaprazlama örneği 123

Şekil 5.7 Uniform çaprazlama örneği 123

Şekil 5.8 Rulet tekerleği yöntemi örneği [164] 124

Şekil 5.9 Turnuva yöntemi temsili [165] 125

Şekil 5.10 Tek gen mutasyon örneği 126

Şekil 5.11 İki gen mutasyon örneği 126

Şekil 5.12 GA tabanlı optimum geçiş noktalarının bulunması 127

Şekil 5.13 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası GA ile optimize edilmiş sürüş 129

Şekil 5.14 Mahmutbey-Yenimahalle istasyonları arası GA ile optimize edilmiş sürüş 130

Şekil 5.15 İstoç-İkitelli istasyonları arası GA ile optimize edilmiş sürüş 131

Şekil 5.16 Metrokent-Kirazlı yönü hız-konum grafiği 132

Şekil 5.17 Metrokent-Kirazlı yönü hız-zaman grafiği 133

Şekil 5.18 Kirazlı-Metrokent yönü hız-konum grafiği 135

Şekil 5.19 Kirazlı-Metrokent yönü hız-zaman grafiği 135

Şekil 5.20 Mevcut sürüş ve GA ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği 139

Şekil 5.21 Enerji tüketimi E'nin T seyahat süresine bağlılığı [172] 141

Şekil 5.22 İkitelli-Turgut Özal istasyonları arası hız-seyahat süresi grafiği 141

Şekil 5.23 SA algoritması akış şeması 145

Şekil 5.24 Siteler – Turgut Özal istasyonları arası SA ile optimize edilmiş sürüş 147

Şekil 5.25 Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arası SA ile optimize edilmiş sürüş 148

Şekil 5.26 İstoç – İkitelli istasyonları arası SA ile optimize edilmiş sürüş 149

Şekil 5.27 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği 150

Şekil 5.28 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği 151

Şekil 5.29 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği 153

Şekil 5.30 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği 153

Şekil 5.31 Mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği 157

Şekil 5.32 Seyahat süresi artışı dikkate alınarak SA ile optimize edilmiş hız profili 159

Şekil 5.33 PSO algoritması akış şeması 163

Şekil 5.34 Mahmutbey – İstoç istasyonları arası PSO ile optimize edilmiş sürüş 165

Şekil 5.35 Kirazlı – Yenimahalle istasyonları arası PSO ile optimize edilmiş sürüş 166

Şekil 5.36 Turgut Özal – İkitelli istasyonları arası PSO ile optimize edilmiş sürüş 167

Şekil 5.37 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği 169

Şekil 5.38 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği 169

Şekil 5.39 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği 171

Şekil 5.40 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği 172

Şekil 5.41 Mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği 175

Şekil 5.42 Seyahat süresi artışı dikkate alınarak PSO ile optimize edilmiş hız profili 177

Şekil 5.43 MPA algoritması akış şeması 185

Şekil 5.44 Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arası MPA ile optimize edilmiş sürüş 188

Şekil 5.45 İkitelli – İstoç istasyonları arası MPA ile optimize edilmiş sürüş 189

Şekil 5.46 Siteler – Turgut Özal istasyonları arası MPA ile optimize edilmiş sürüş 190

Şekil 5.47 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği 191

Şekil 5.48 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği 192

Şekil 5.49 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği 194

Şekil 5.50 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği 194

Şekil 5.51 Mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği 197

Şekil 5.52 Seyahat süresi artışı dikkate alınarak MPA ile optimize edilmiş hız profili 199

Şekil 5.53 Gerçek saha testleri için kullanılan tren 201

Şekil 5.54 Tren içerisinde test öncesi bilgilendirme ve kontrollerin yapılması 202

Şekil 5.55 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler M – K doğrultusu hız-konum grafiği 203

Şekil 5.56 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler M – K doğrultusu hız-zaman grafiği 204

Şekil 5.57 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler K – M doğrultusu hız-konum grafiği 205

Şekil 5.58 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler K – M doğrultusu hız-zaman grafiği 206

Şekil 5.59 Gerçek tren mevcut ve optimize edilmiş sürüşler M-K doğrultusu hız-zaman grafiği 210

Şekil 5.60 Gerçek tren mevcut ve optimize edilmiş sürüşler K-M doğrultusu hız-zaman grafiği 211

Şekil 6.1 ÇTHS yapısının şeması 215

Şekil 6.2 Tren vagonunda bulunan enerji ölçüm cihazı 217

Şekil 6.3 Gerçek tren ile frenleme test grafiği 219

Şekil 6.4 Gerçek ve benzetilmiş RFE eğrisi 220

Şekil 6.5 RFE'nin yeniden kullanımına ilişkin örnek bir gösterim 226

Şekil 6.6 İstanbul M3 metro hattı çevrim zamanı unsurları 226

Şekil 6.7 RFE kullanımının artırılması 228

Şekil 6.8 Metrokent-Kirazlı istasyonları arasında mevcut hız profili ve optimum hız profili hız-konum grafiği 233

Şekil 6.9 Kirazlı- Metrokent istasyonları arasında mevcut hız profili ve optimum hız profili hız-konum grafiği 234

Şekil 6.10 M3 metro hattının optimize edilmiş zaman çizelgesi 234

Şekil 6.11 Optimize edilmiş zaman çizelgesi detay gösterimi 237

Şekil 7.1 M3 metrosu gidiş-dönüş hattı üzerinde THS ve gerçek tren hareketi karşılaştırılması 244

Şekil 7.2 GA, SA, MPA ve PSO algoritmalarına göre Metrokent-Kirazlı istasyonları arasındaki hız profilleri..... 246

Şekil 7.3 GA, SA, MPA ve PSO algoritmalarına göre Kirazlı-Metrokent istasyonları arasındaki hız profilleri..... 247

Şekil 7.4 Saha – THS mevcut ve optimize edilmiş sürüşler hız-zaman grafiği .. 249

Şekil 7.5 Saha – THS mevcut ve optimize edilmiş sürüşler hız-zaman grafiği .. 250

Şekil 7.6 Mevcut ve entegre optimizasyon sonrası elde edilen hız profili karşılaştırması 252

Şekil 7.7 Optimal zaman çizelgesi 253

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 M3 metro hattı gradyan bilgileri tablosu 49
Tablo 2.2 M3 metro hattı eğim (viraj-kavis) bilgileri 54
Tablo 2.3 M3 metro aracı nominal performans değerleri 55
Tablo 2.4 Cer invertör ünitesi teknik özellikleri 57
Tablo 2.5 Asenkron cer motoru ana parametreleri 58
Tablo 2.6 Vagonların detaylı kütle bilgileri 62
Tablo 2.7 Transformatörlerin kurulu güç bilgileri 66
Tablo 3.1 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası test-1 80
Tablo 3.2 Model doğruluk kıyaslaması-1 82
Tablo 3.3 Model hata oranları-1 82
Tablo 3.4 İkitelli-İstoç istasyonları arası test-2 83
Tablo 3.5 Model doğruluk kıyaslaması-2 84
Tablo 3.6 Model hata oranları-2 85
Tablo 3.7 İkitelli-İstoç istasyonları arası test-2 86
Tablo 3.8 Model doğruluk kıyaslaması-3 87
Tablo 3.9 Model hata oranları-3 87
Tablo 3.10 Çok istsyonlu THS doğruluk karşılaştırması Metrokent-Kirazlı yönü 90
Tablo 3.11 Çok istsyonlu THS doğruluk karşılaştırması Kirazlı- Metrokent yönü 92
Tablo 5.1 Bazı metasezgisel yöntemler ve yaygın uygulama alanları [154, 155] 113
Tablo 5.2 Genetik algoritma kaba kodu 120
Tablo 5.3 Kullanılan genetic algoritma parametreleri 127
Tablo 5.4 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası karşılaştırma tablosu 129
Tablo 5.5 Mahmutbey-Yenimahalle istasyonları arası karşılaştırma tablosu 130
Tablo 5.6 İstoç-İkitelli istasyonları arası karşılaştırma tablosu 131
Tablo 5.7 Metrokent-Kirazlı yönü mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 133
Tablo 5.8 Kirazlı-Metrokent yönü mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 136
Tablo 5.9 Tüm parkur boyunca mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları 137
Tablo 5.10 Konfor değerlendirme standardı [168] 138

Tablo 5.11 Üç farklı sürüş stratejisi karşılaştırma tablosu 140

Tablo 5.12 Seyahat süresine karşın enerji tüketimi tablosu 142

Tablo 5.13 Benzetimli tavlama algoritması kaba kodu 144

Tablo 5.14 SA algoritması parametreleri 146

Tablo 5.15 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 148

Tablo 5.16 Mahmutbey -Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 149

Tablo 5.17 İstoç - İkitelli istasyonları arası mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 150

Tablo 5.18 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 152

Tablo 5.19 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 154

Tablo 5.20 Tüm parkur boyunca mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları 156

Tablo 5.21 Başakkonutları-Siteler istayonları arası farklı sürüş stratejilerinin karşılaştırılması 158

Tablo 5.22 Seyahat süresi esnekliğinin SA ile incelenmesi 159

Tablo 5.23 Parçacık sürü optimizasyonu kaba kodu 162

Tablo 5.24 PSO algoritması parametreleri 163

Tablo 5.25 Mahmutbey – İstoç istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 165

Tablo 5.26 Kirazlı – Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 166

Tablo 5.27 Turgut Özal – İkitelli istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 168

Tablo 5.28 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 170

Tablo 5.29 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 173

Tablo 5.30 Tüm parkur boyunca mevcut ve PSO ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları 174

Tablo 5.31 İkitelli Sanayi – İstoç istasyonları arası farklı sürüş stratejilerinin karşılaştırılması 176

Tablo 5.32 Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında seyahat süresi artışına karşın enerji tüketimi 177

Tablo 5.33 MPA algoritması kaba kodu 186

Tablo 5.34 MPA algoritması parametreleri 187

Tablo 5.35 Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 188

Tablo 5.36 İkitelli – İstoç istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 189

Tablo 5.37 Siteler – Turgut Özal istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu 191

Tablo 5.38 Metrokent – Kirazlı yönü mevut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 192

Tablo 5.39 Kirazlı – Metrokent yönü mevut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları 195

Tablo 5.40 Tüm parkur boyunca mevcut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları 197

Tablo 5.41 Başakkonutları - Siteler istasyonları arası farklı sürüş stratejilerinin karşılaştırılması 198

Tablo 5.42 Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında seyahat süresi artışına karşın enerji tüketimi 200

Tablo 5.43 M – K doğrultusunda gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi 204

Tablo 5.44 K – M doğrultusunda gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi 206

Tablo 5.45 Metrokent-Kirazlı yönü istasyon bazlı yolcu sayıları 207

Tablo 5.46 Kirazlı-Metrokent yönü istasyon bazlı yolcu sayıları 208

Tablo 5.47 M-K doğrultusunda mevcut ve optimal hız profillerine göre gerçek tren sürüşünün saha sonuçları 210

Tablo 5.48 K-M doğrultusunda mevcut ve optimal hız profillerine göre gerçek tren sürüşünün saha sonuçları 211

Tablo 6.1 RFE sonuç tablosu 217

Tablo 6.2 M3 metrosu optimize edilecek zaman çizelgesi (M-K yönü) 221

Tablo 6.3 M3 metrosu optimize edilecek zaman çizelgesi (K-M yönü) 221

Tablo 6.4 Mevcut zaman çizelgesi genel bilgileri 222

Tablo 6.5 Tren hareketi optimizasyonu kısıtlamaları 225

Tablo 6.6 Mevcut zaman çizelgesi genel bilgileri 235

Tablo 6.7 Optimize edilmiş zaman çizelgesi sonuçları 237

Tablo 6.8 Optimizasyonlu ve optimizasyonsuz tren işletim sonuçları 239

Tablo 6.9 Headwayl'lere göre işletme altındaki tren sayısı 240

Tablo 7.1 Tam bir rota için THS ve gerçek tren hareketi karşılaştırması 244

Tablo 7.2 Simülasyon sonuçlarının Metrokent-Kirazlı yönüne göre karşılaştırılması 246

Tablo 7.3 Simülasyon sonuçlarının Kirazlı-Metrokent yönüne göre karşılaştırılması 248

Tablo 7.4 Gerçek tren sürüşü – THS sonuçlarının değerlendirilmesi 249

Tablo 7.5 Değişken yüklü durum için gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi 251

Tablo 7.6 Mevcut ve optimal zaman çizelgesinde trenler arası sefer süreleri karşılaştırması 253

Tablo 7.7 Mevcut ve entegre optimizasyon sonrası tren işletim sonuçları 254

ÖZET

Kentsel Raylı Ulaşım Sistemleri İçin Akıllı Enerji Yönetim Algoritması Geliştirilmesi

Ahmet YILDIZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Çevre kirliliğinin artması, küresel ısınma ve enerji talebindeki artışın neden olduğu enerji kıtlığı, özellikle ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği araştırmalarına yol açmıştır. Raylı sistemler, yüksek kapasiteli ulaşım taleplerini az enerji kullanımıyla ve hizmet kalitesini düşürmeden karşılayabildikleri için ulaşım ağlarında önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda hem kentiçi metro/tramvay sistemleriyle hem de hız tren hatlarıyla şehirlerarası taşımacılıkta önem kazanan raylı sistem ulaşımının en önemli giderlerinden biri, trenin cer enerjisi tüketimidir. Ayrıca hatlardaki eğim, kurp, tünel direnci gibi hızı düşürücü faktörler, cer motoru ve fren sistemlerindeki verim kaybı, hava akımı, basınç gibi doğal etkenler vb. birçok parametre enerji maliyetini dinamik olarak belirlemektedir. Tez çalışmasında öncelikle demiryolu sistemlerinde kullanılan bir trenin matematiksel modeli verilmiştir. Aracın hareketini sağlayan çekiş kuvveti ve hareket yönüne zıt olan kuvvetler kapsamlı bir şekilde incelenmiş, aracın enerji tüketimi analiz edilmiş ve simülasyon programının temel çerçevesi oluşturulmuştur.

Trenlerde enerji kullanımını azaltmanın etkili bir yolu, belirli istasyonlar arasında seyahat eden aracın ideal hız profilini hesaplamaktır. Diğer bir yöntem ise frenleyen trenlerin ürettiği rejeneratif enerjinin verimli şekilde değerlendirilmesidir. Tezde, ilk olarak enerji verimli sürüşün sağlanması için optimal hareket modu stratejisinin belirlenmesi yaklaşımı ele alınmıştır. Her bir istasyon arası için, maksimum hızda gitme, boşta gitme, sabit hızda gitme ve frenleme noktalarının konumları, geliştirilen simülasyon yazılımı ve çeşitli sezgisel tabanlı algoritmalar yardımıyla optimize edilmiştir. Faydalanılan optimizasyon yöntemlerinden Genetik Algoritma, Benzetilmiş Tavlama Algoritması ve Parçacık Sürü optimizasyonu yöntemleri ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar olmasına karşın, bu tezde yapılan çalışmalar farklı kısıtlar ve parametreler altında değerlendirilmektedir. Bu alandaki çalışmalara en büyük katkı Deniz Yırtıcıları Algoritması'nın tren işletiminin optimizasyonuna uygulanması ve performanslarının kendi aralarında karşılaştırmalı olarak sunulmasıdır. Ayrıca simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar, gerçek bir metro hattında pratikte kullanılmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. İkinci olarak, rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum düzeyde faydalanılması amacıyla zaman çizelgesi optimizasyonu yapılmıştır. Bu alandaki en önemli iki katkı ise, özgün bir rejeneratif frenleme enerjisi modeli ile entegre bir optimizasyon yapısının geliştirilmesidir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu tren hareket simülatörü ve entegre optimizasyon modeli ile, aynı elektrik bölgesinde bulunan iki trenden birinin frenleme diğerinin ise hızlanma modunda olduğu senkronize sürenin artırılması sağlanmıştır. Amaç fonksiyonunda, katener hattı geriliminin aşırı yükselmemesi veya düşmemesi için, iki trenin aynı anda hızlanma veya frenleme modunda olmaması durumu da dikkate alınmıştır. İstasyonlar arası hız profili, seyahat süreleri (sabit bir toplam seyahat süresi altında) ve trenler arası sefer süreleri entegre bir yapı altında optimize edilerek M3 metro hattının cer enerjisi tüketimi önemli miktarda azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistemler, enerji verimliliği, hız profili optimizasyonu, zaman çizelgesi optimizasyonu, modelleme, simülasyon, sezgisel algoritmalar

ABSTRACT

Development of Intelligent Energy Management Algorithm for Urban Rail Transportation Systems

Ahmet YILDIZ

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oktay ARIKAN

Energy shortage caused by the increase in environmental pollution, global warming and increase in energy demand have led to energy efficiency researches, especially in transportation systems. Rail systems play an important role in transportation networks because they can meet high-capacity transportation demands with low energy consumption and without reducing service quality. One of the most important expenses of rail system transportation, which has gained importance in intercity transportation with both urban metro/tram systems and speed train lines in recent years, is the traction energy consumption of the train. In addition, speed-reducing factors such as slopes, curves and tunnel resistance in the lines, loss of efficiency in the traction motor and brake systems, natural factors such as air flow and pressure, etc., determine the energy cost dynamically. In the thesis study, firstly, a mathematical model of a train used in railway systems is given. The traction force that enables the movement of the vehicle and the forces opposing the direction of movement were examined comprehensively, the energy consumption of the vehicle was analyzed and the basic framework of the simulation program was created.

An effective way to reduce energy use in trains is to calculate the optimal speed profile of the vehicle traveling between specific stations. Another method is the efficient use of regenerative energy produced by braking trains. In the thesis, firstly, the approach of determining the optimal motion mode strategy to ensure energy efficient driving is discussed. For each inter-station, the positions of the maximum accelaration, coasting, cruising and braking points have been optimized with the help of the developed simulation software and various heuristic-based algorithms. Although there are previous studies on the used optimization methods Genetic Algorithm, Simulated Annealing Algorithm and Particle Swarm optimization methods, the studies conducted in this thesis are evaluated under different constraints and parameters. The biggest contribution to the studies in this field is the application of the Marine Predators Algorithm to the optimization of train operation and the comparative presentation of their performances. In addition, the results obtained in the simulation environment were used in practice on a real metro line and compared with the simulation results. Secondly, to maximize the regenerative braking energy, an optimal adjustment of timetable has been made. The two most important contributions in this area are the development of a unique regenerative braking energy model and an integrated optimization structure. With the multi-train motion simulator and integrated optimization model developed within the scope of the thesis, the synchronized time in which one of the two trains in the same electrical zone is in the braking mode and the other in the acceleration mode has been increased. In the objective function, the condition that two trains are not in acceleration or braking mode at the same time is also taken into account so that the catenary line voltage does not increase or decrease excessively. The traction energy consumption of the M3 metro line has been significantly reduced by optimizing the speed profile between stations, travel times (under a fixed total travel time) and inter-train journey times under an integrated structure.

Keywords: Rail systems, energy efficiency, speed profile optimization, timetable optimization, modelling, simulation, heuristic algorithms

1
GİRİŞ

Ulaşım ağlarında önemli rol oynayan elektrikli raylı sistemler, yüksek taşıma potansiyeli, güvenilirliği ve enerji verimliliği açısından hem şehir içi hem de şehirlerarası ulaştırmada diğer ulaşım türlerine göre üstünlük sağlamaktadır. Enerji verimli ve çevre dostu bir model olmasına rağmen demiryolu taşımacılığı her gün çok fazla enerji tüketmektedir. Bu da yüksek karbon salınımı ile sonuçlanmaktadır. Tüm sektörler içinde fosil yakıtlara en fazla güvenen ulaşım ve toplu taşımadır ve 2021'de dünya çapında toplam CO_2 emisyonlarının 770 milyon metrik ton ($MtCO_2$) ile %37'sinden sorumludur [1]. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) 2021 yılında ulaşım sektöründeki karbondioksit emisyonları, toplam emisyonların yüzde 38'ini oluşturarak toplam emisyonlar arasındaki en büyük payı almıştır [2]. Yine aynı yılda Avrupa Birliği'nde (AB) kullanılan toplam enerjinin %29,2'sini ulaşım sektörü oluşturmuştur [3]. AB'de raylı sistem taşımacılığı özelinde ise, 2020'de toplam 3,5 milyon metrik ton karbondioksit ($MtCO_2$) emisyonu üretilmiştir [4]. Türkiye, Çevre, Şehircilik ve İklim Bakanlığı sera gazı emisyonu tablolarından elde edilen verilere göre ulaşım için harcanan CO_2 toplam miktarın % 15,3'üne tekabül etmekte ve bu oranın artacağı tahmin edilmektedir [5]. Bu nedenle, raylı ulaştırma sistemlerinin devamlılığı için gereken güvenilirlik, hız ve kalitenin yanı sıra küresel ısınma, çevre kirliliği ve büyümenin getirdiği enerji talebindeki artış, önceliğin enerji verimliliği çalışmalarına verilmesine neden olmuştur.

Büyük taşıma kapasiteleri, güvenlikleri, yerel kirletici maddelerin bulunmaması ve kentsel toplu taşımanın trafik etkisini düşürme potansiyelleri nedeniyle elektrikli raylı ulaşım sistemleri popülerlik kazanmaktadır. Enerji tasarruflu bir ulaştırma modeli olmasına rağmen raylı sistem taşımacılığı yine de her gün yüksek miktarlarda enerji kullanmaktadır. Örneğin, Hong Kong'un demiryolu ağında bir istasyon için elektriğin maliyeti haftalık 230 megavat/saat'e dayanmaktadır [6]. İstanbul raylı ulaşımına gelince, şuan için yaklaşık 213.92 kilometre hat uzunluğuna sahip İstanbul demiryolu ağı yılda yaklaşık olarak 400 milyon kWh enerji harcamaktadır. İlerleyen yıllarda proje ve inşaa halindeki metro sistemlerinin açılması ile birlikte İstanbul'un 1000 km'yi aşacak bir raylı ulaşım ağına sahip olacağı beklenmektedir [7]. Bu sebeple elektrik enerjisi kullanımının düşürülmesi

raylı sistemlerde önem arz etmektedir. Bu alanda yapılacak en ufak iyileştirmenin bile kayda değer enerji tasarrufu sağlayabileceği unutulmamalıdır.

Ulaştırma sistemleri arasında çevre dostu olarak değerlendirilen demiryolu sistemlerinin aynı zamanda enerji açısından da verimli olduğu düşünülmektedir. İlerleyen teknoloji sayesinde raylı sistemlerin enerji tüketimleri giderek düşürülmüştür. Tüketim miktarlarını mümkün olduğunca daha düşürebilmek için bu tez çalışmasında öncelikle, enerji tüketiminin büyük bir kısmından sorumlu olan cer enerjisi tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. Çeşitli sezgisel optimizasyon tekniklerinden faydalanılarak trenlerin belirli güzergahı boyunca uyacakları hareket modları belirlenerek hız profilleri optimize edilecek ve daha verimli sürüş stratejileri geliştirilecektir. Ardından sistem bazında enerji verimliliği sağlamak amacıyla entegre bir optimizasyon yaklaşımı ile zaman çizelgesi optimizasyonu yapılacaktır. Böylece hem trenlerin sürüşü sırasındaki enerji tüketimi minimize edilirken aynı zamanda frenleyen trenlerden üretilen rejeneratif enerji de etkin bir şekilde değerlendirilecek ve genel enerji tüketimi büyük ölçüde azaltılacaktır.

Bu tezin ilk bölümünde konuyla ilgili literatür gözden geçirilmiş ve ilgili önceki araştırmalara referanslar verilmiştir. 2. bölümde, İstanbul M3 metro hattı, hattın işletmesel parametreleri, elektrifikasyonu ve bu hat üzerinde kullanılan trenin teknik özelliklerinin açıklandığı sistem tanıtılmıştır. 3. bölümde, tren hareket simülatörünün yapısı, trenin dinamik hareket modeli, trene etki eden cer kuvveti ve tren hareketine zıt olan kuvvetlerle birlikte ele alınmıştır. Tren enerji tüketim modelinin yanı sıra tren hareket stratejisinin modları da yer almaktadır. Bunlara ek olarak 3. bölüm, geliştirilen hareket simülatörünün gerçek trenler kullanılarak saha testleri ile doğrulanmasını içermektedir. 4. bölümde, elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde enerji tasarrufu teknikleri kapsamlıca açıklanmıştır. 5. bölümde, öncelikle enerji tasarruflu tren hareketi bir eniyileme problemi olarak tanımlanmaktadır. Ardından, Genetik Algoritma tanıtılmakta ve bu algoritma enerji tasarruflu tren hareketi optimizasyonu probleminin çözümü için uygulanmaktadır. Sonrasında sırasıyla, Benzetilmiş Tavlama, Parçacık Sürü ve Deniz Yırtıcıları algoritmaları tanıtılmakta ve enerji verimli tren işletimi amacıyla, her bir istayon aralığı için optimal hız profillerinin bulunmasında kullanılmaktadırlar. Son olarak, bu metasezgisel optimizasyon teknikleri ile elde edilen hız profilleri gerçek bir trene uygulanarak saha sonuçları paylaşılmaktadır. 6. bölüm, entegre bir optimizasyon

yaklaşımını ve bu amaçla geliştirilen çoklu tren hareket simülatörünün yapısını açıklamaktadır. Rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum şekilde faydalanmak amacıyla eşzamanlı gerçekleştirilen, istasyonlar arası hız profili, seyahat süresi dağılımı ve trenler arası sefer süresini en iyileyen bir zaman çizelgesi optimizayon yöntemi tanıtılmaktadır. 7. Bölümde bu tez çalışması ve sonuçları genel olarak yorumlanmaktadır. 8. bölüm olan tezin bu son kısmında ise, çalışmaya ait özet sonuçlar, çalışmanın ana katkıları ve gelecekteki yapılabilecek çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmaktadır.

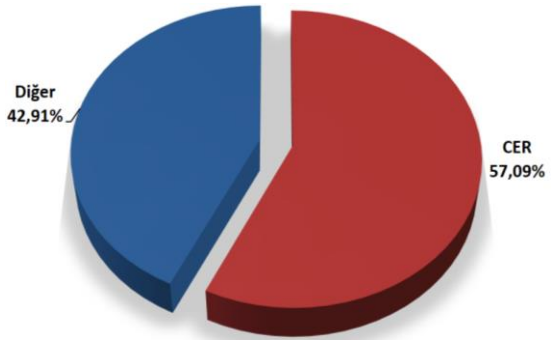
1.1 Literatür Özeti

Son dönemde küresel enerji talebinde yaşanan artış nedeniyle araştırmacılar alternatif enerji kaynakları, yenilenebilir enerji ve daha verimli enerji kullanımı gibi konulara giderek daha fazla odaklanmaktadırlar. Daha önce anlatılan sistem ve teknolojilerin hayatımızda önemli bir yeri ve önemi olmasına rağmen bu sistemler arasında ulaşım ve raylı sistem araçları öne çıkmaktadır. Bu araçlar, ister fosil yakıtla ister elektrikle çalışsın, enerji kullanımının büyük bir kısmını oluşturmaktadırlar.

Trenlerin insanları veya yükleri varış noktalarına taşımak için ihtiyaç duyduğu enerji, cer gücü sistemleri tarafından sağlanmaktadır. Karayolu taşımacılığının en etkili modlarından biri demiryolu sistemidir ve bunun tekerlekler ile raylar arasındaki yuvarlanma direncinin düşük olması nedeniyle böyle olduğu düşünülmektedir [8]. Bununla beraber enerji fiyatlarının yükselmesi ve çevresel kaygıların artması sebebiyle son yıllarda trenlerin enerji verimli işletim tekniklerine artan bir ilgi gösterilmektedir. Enerji yönetimi uygulamalarını optimize etmek için demiryolu taşımacılığına yönelik artan bir talep vardır. Avrupa Demiryolu ve Altyapı Şirketleri Topluluğu ve Uluslararası Demiryolları Birliği üyeleri, ulaşımda sürdürülebilirliği artırmak amacıyla 2010 yılında Avrupa demiryolu endüstrisindeki çevre ve sürdürülebilirlik konularına koordineli bir yaklaşım ortaya koymuşlardır [9]. Bunun ışığında, 2030 yılına kadar çalışan trenlerin kullandığı enerjinin 1990 yılı seviyelerine göre %30 oranında azaltılması belirlenmiştir [10].

Demiryolu sistemleri birçok alt sistemden oluştuğu için literatürde enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar farklılık göstermektedir. Trenin hareketi için tüketilen cer enerjisi toplam tüketimdeki en büyük paya sahiptir. Örneğin, İstanbul raylı toplu

taşıma sistemi için, Şekil 1.1'deki 2021 enerji tüketim grafiğinde görüldüğü gibi, toplam enerji tüketiminin %57'si cer enerjisidir.



Şekil 1.1 Metro İstanbul 2021 yılına ait genel enerji tüketim dağılımı

Cer enerjisinin maliyeti dinamik olarak çeşitli faktörler tarafından belirlenmektedir. Çekiş gücü kullanım yaklaşımı, raylı sistemdeki kurp ve viraj gibi hızı düşüren unsurlar, frenleme verimliliğinin kaybı, trenlerin zamanlama hataları, rüzgar ve basınç gibi doğal unsurlar sonucunda enerji maliyetleri artmaktadır. Aşırı enerji maliyetlerini azaltmak ve ortadan kaldırmak için çeşitli teknikler uygulanabilir. Raylı sistemlerde enerji verimliliği yöntemleri olarak literatürde sıklıkla geçen başlıklar şu şekildedir: hız profili optimizasyonu, zaman çizelgesi optimizasyonu, optimal güzergah tasarımı, araç kütle azaltımı, enerji depolama sistemleri, yüksek gerilim ile enerji iletimi, katener hatlarınının paralellenmesi, tersinir cer transformatör merkezlerinin kurulumu, süperiletkenler ile enerji iletimi, güç aktarım organlarında optimizasyon ve sabit tesisler tarafında (asansör, yürüyen merdiven, ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma, depo alanları vb.) optimizasyondur.

Bu tez çalışmasında, cer enerjisi tüketimini en aza indirmek amacıyla, tren hız profili optimizasoynu, rejeneratif frenleme enerjisinin verimli kullanılması, zaman çizelgesi optimizasyonu ve optimizasyon tekniklerinin karşılaştırılması konuları ele alınmıştır. Demiryolu cer enerjisi optimizasyonu ile ilgili literatür bu bölümde gözden geçirilmiş ve analiz edilmiştir. Önceki literatürü karşılaştırarak ve özetleyerek, bu tezin hipotezi önerilmiştir.

1.1.1 Hız Profili Optimizasyonu ile Enerji Verimli Tren İşletimi

Enerji tasarruflu tren hareketi problemi ilk olarak 1968 yılında Ichikawa tarafından incelenmiştir. Aracın arzu edilen anda bir sonraki ulaşacağı durakta olması ve hız

sınırlamalarına uyularak enerji tasarruflu yolculuğu için çalışmalar yapılmıştır. Problem öncelikle sınırlı durum değişkenleri problemi şeklinde değerlendirilmiş ve çözülmesi amacıyla özgün bir metod önerilmiştir [11]. Bu çalışmanın ardından 1975'te Hoang ve arkadaşları Montreal demiryolu hattında harcanan enerji miktarını düşürmek amacıyla optimum kontrol ve optimizasyon yöntemlerini beraber kullanmışlardır. Burada, doğrudan arama algoritmasını temel alan bir yöntem ortaya koyulmuş ve bu metodla hız profili optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen optimal hız profili ile, diğer optimize edilmemiş mevcut hız profiline göre %7,73 enerji verimliliği elde etmişlerdir [12]. Dinamik bir model olan tren hareketinin optimal kontrolünde, mevcut herhangi bir hareket modundan diğer birine geçişini sağlayacak kontrol girdisi, Pontryagin'in Maksimum Prensibi yönteminden faydalanılarak da bulunabilmektedir. Optimal tren hareketi sorununun çözümünde Pontryagin'in Maksimum Prensibi (PMP) yönteminin uygulanması ile bu konuda farklı bir fikir ortaya çıkmıştır. Bu durumda 1990 yılında, eğimsiz düz bir güzergah düşünülerek iki durak arasındaki seyahatte enerji kullanımının en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmanın literatüre en büyük katkısı, PMP'yi kullanarak ileri sürdüğü optimum tren hareketi yaklaşımı olmuştur. Bu yaklaşımda, yolculuk maksimum hızlanma fazıyla başlamakta ardından belirli bir konumda hız sabitlenmekte devamında ise belirlenen bir konuma kadar boşta gitme fazında gidilmekte ve nihayetinde fren uygulanmasıyla seyahat tamamlanmaktadır. Dört hareket modunun da yer aldığı bu yaklaşımdan bazı modların çıkarılmasıyla da optimum hareket sağlanabilmektedir [13]. Daha sonra yazarlar yukarıda bahsedilen araştırmaya ek olarak raylı sistemdeki eğim ve hız değişimlerini dikkate alan yeni çalışmalar üretmişlerdir [14]. Trenin hareket etmesini sağlayan temel kuvvetler çekiş (cer) ve fren kuvvetidir. Khmelnitsky, trenin daha az enerji kullanması için bu iki kuvvetin nasıl dengeleneceğine ilişkin araştırmasında, analitik unsurlarını Pontryagin'in Maksimum Prensibi'nden alan sayısal bir algoritma geliştirmiştir. Algoritma, sağlanan yolculuk süresi, hız sınırları, eğim ve diğer girdileri dikkate alarak enerji kullanımını en aza indirecek hız profili çıktısını üretmektedir. Çalışma çıktısı olarak, enerji tasarrufunun sağlanması açısından hattın yokuş yukarı olan kısımlarında sabit hızda gitme fazından, maksimum hızda gitme fazına geçilmesi ve aynı şekilde hattın aşağı inişli olan kısımlarında ise boşta gitme fazına geçilmesi gerektiği gösterilmiştir [15]. Aynı yıl Howlett'in sunduğu makalesinde tren kontrolü konusu sürekli ve süreksiz

kontrol girdileri için bağımsız olarak incelenmiştir. Sürekli kontrol için Khmelnitsky'nin sonuçlarına benzer sonuçlar elde etmesine rağmen hızı ana bağımlı durum değişkeni olarak tanımlamış ve özel bir formül ortaya çıkarmıştır. Ortaya çıkan problemleri çözmek ve fazlar arası en iyi geçiş sürelerini belirlemek için Kuhn-Tucker denklemleri kullanılmıştır [16].

Enerji tüketimini en aza indirecek şekilde optimal raylı taşıt hareketi probleminin çözümü için uygulanan hız profili belirlenmesi yöntemi global bir optimizasyon problemidir. Sezgisel yaklaşımlar, karmaşık senaryoları simüle etmedeki uyarlanabilirlikleri nedeniyle enerji verimli tren hız profili yönetimi için en popüler stratejilerdir [17]. Bu bağlamda global eniyileme problemlerinin çözümünde yaygın olarak tercih edilen Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA), tren hareketinin eniyilenmesinde de zamanla yer almıştır. Bu konuda ilk defa 1997'de Chang ve Sim, GA optimizasyon yöntemini temel alan bir boşta gitme kontrol yaklaşımı geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem enerji harcamasına ilave olarak dakiklik ve konfor sınırlamalarını da dikkate almıştır. Otomatik tren işletimi (Automatic Train Operation - ATO) sistemlerine uygulanabiliyor olması sebebi ile de ilgi çekmiştir. Sezgisel çözüm teknikleri artık bu sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Algoritmanın en iyi çözüme hızlı yakınsaması ve bulanık mantıkla kontrol edilen ATO'ya göre üstün performansının gösterilmesi nedeniyle artık bu alanda sezgisel çözüm tekniklerinin kullanılabileceği gösterilmiştir [18]. Boşta gitme fazının uygulanması, seyahat süresi ve enerji kullanımı arasındaki denge sağlandığı sürece tren işletiminde ekonomik bir seyahat sağlayabilmektedir. Enerji verimli tren sürüşünün boşta gitme noktalarının tespit edilmesine dayanan Wong ve Ho'nun çalışmalarında, Genetik Algoritma yöntemi ile, trenlerin akışına bağlı olarak kaç adet boşa gitme noktasına erişilebileceğine karar verilmiştir. GA yöntemi ile ayrıca her bir noktanın optimum konumları da bulunmuştur [19]. Bir diğer çalışmada, optimal çözümün biçimini, ATO sistemlerine entegre edilebilecek tren sürüş stratejisini ve enerji tüketiminin nasıl azaltılabileceği gösterilmiştir. Trenin sabit olmayan bir gradyan eğrisi boyunca ve hız limitleri ile otomatik çalışma modunda sürüleceği durum ele alınmıştır. Çalışmada, genetik algoritma kullanarak, optimal bir tren sürüş stratejisi oluşturulmuştur. Sonuçlar, P. Howlett'in kısıtlı optimal tekniği (Lagrange fonksiyonu ve Kuhn-Tucker denklemleri) kullanan optimizasyon tekniği ile enerji maliyet faydası açısından

karşılaştırılmıştır. Örnek olay incelemeleri için Seoul Büyükşehir Metro sisteminin bir demiryolu hattı modellenmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre, önerilen algoritmanın etkin enerji maliyeti avantajı sağlayabileceği gösterilmiştir [20]. 2008'de belirli bir güzergah boyunca trenin boşta gideceği konumlarının optimizasyonu için, Söylemez tarafından, yeni bir metod önerilmiştir. Çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve GA yöntemi birlikte kullanılarak, İstanbul M1 metro hattının beş istasyon arası için en ideal boşta gitme konumları elde edilmiştir. YSA'nın eğitilmesi için bir simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. YSA'lar eğitildikten sonra enerji tüketimini, seyahat süresini ve yeni boşta gitme noktalarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Son olarak, YSA'nın çıktıları, trenin en uygun frenleme noktalarını bulmak için optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üç istasyon arasındaki hareket için %4,81 yolculuk süresinin uzamasına karşın, %30,85 enerji tasarrufu sağlanmış, aynı şekilde beş istasyon arasındaki hareket için de %4,65 yolcuk süresinin uzamasına karşın %18,25 oranında enerji tasarrufu elde edilmiştir [21]. GA yöntemine dayalı bir başka çalışmada, hız profili optimizasyon yaklaşımı sunulmuştur. GA tekniğinin hedefi, istasyonlar arasındaki enerji tüketimini minimize edecek optimal hız profilini bulmaktır. En iyilenmiş hızlanma yörüngesi, izin verilen maksimum seyahat süresi, hat boyundaki hız sınırlamaları ve maksimum hızlanma ve sarsıntı gibi hem fiziksel hem de işletmesel kısıtlamaları dikkate almaktır. Elde edilen verilerden çıkarılan sonuç, en iyi profilin kullanımı ile mevcut profile kıyasla enerji tüketiminde %14 azalma meydana getirildiğini göstermektedir [22]. Chao ve arkadaşlarının çalışmasında, cer enerjisi tasarrufu gerçekleştirmek için çok noktalı boşta gitme yöntemi tanıtılmıştır. Bu çok noktalı entegre optimizasyon problemini çözüme kavuşturmak amacıyla çok popülasyonlu genetik algoritma (Multi Population Genetic Algorithm-MPGA) tercih edilmiştir. Popülasyonun MPGA çeşitliliği, paralel optimizasyon ile küresel arama kapasitesini ve yakınsama hızını en iyilemektedir. Trenin gerçek durumununun simülasyonunu yapabilmek için çok parçacıklı bir araç modeli oluşturulmuştur. Shanghai metrosu hat 7'nin gerçek güzergah durumuna ve tren parametrelerine dayanan simülasyon sonuçları, MPGA ile çok noktalı boşta gitme kontrolünün önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayabileceği gösterilmiştir [23]. Benzer şekilde Youneng ve arkadaşları birden fazla istasyon için tren sürüşünü optimize ederek cer enerjisi tüketimini azaltmak amacıyla bir yaklaşım önermiştir. Önerilen optimizasyon yaklaşımında hem yolculuk süresi hem de sürüş stratejisi göz önünde

bulundurulmuştur. Problemi çözmek için MPGA kullanmışlardır. Pekin Changping metro hattından tedarik edilen operasyon verilerine dayanarak, önerilen yöntemin birkaç istasyonun enerji tüketimini %6,16 oranında azaltabileceğini kanıtlanmıştır [24]. Ning Zhao ve arkadaşlarının çalışmasında, kentsel raylı toplu taşıma sistemi üzerinde bir sürüş stratejisi optimizasyonu çalışması ve saha testi sonuçları sunulmuştur. Bu amaç için, özel olarak GA tabanlı bir optimizasyon tekniği geliştirilmiştir. Elde edilen optimizasyon çıktılarının uygulanabilirliğini ve performansını belirlemek ve değerlendirmek amacıyla Guangzhou Metro Hattı 7 üzerinde saha testleri yapılmıştır. Testler başlamadan önce, sürücülerin optimizasyon tarafından önerilen enerji tasarruflu sürüş talimatlarını uygulamalarına yardımcı olmak amacıyla sürücü eğitimi çalışması geliştirilmiştir. Saha testlerinin sonuçları, optimum hareket stratejisi kullanılarak verilen sabit seyahat zamanı içerisinde tren cer enerji kullanımının büyük ölçüde azaltılabileceğini göstererek, oluşturulan optimizasyon yönteminin uygulanabilirliğini ve etkinliğini ortaya koymaktadır [25]. Leon ve Steven çalışmalarında, tren sürüşü ve rejeneratif frenlemenin enerji tasarrufu stratejilerini birleştiren bir yöntem sunmuşlardır. Bu çalışmada, iki strateji arasında, boşta gitme ve tahrik (cer) aralarında bir ödünleşme içerisinde modellenmiştir. Frenleme enerjisini değerlendirmek için yol kenarı depolama sistemleri ile sürdürülebilir tren operasyonunu değerlendirmek için temel kinematik denklemlere dayalı bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, enerji tüketimini en aza indiren hız profillerini, tren tarifesi, hat hizalaması, hız sınırı, iletim hatlarındaki depolama sınırı ve enerji kayıpları gibi parametreleri dikkate alarak optimize etmektir. Optimizasyon probleminin çözümünü aramak için bir Genetik Algoritma geliştirilmiştir. Önerilen modelin uygulanabilirliğini test etmek ve bu çalışmada geliştirilen fikirlerin sahada uygulanması amacıyla Long Island demiryolu hattının bir bölümünde, çeşitli senaryoları (depolama sistemli ve depolamasız) inceleyen bir vaka çalışması yapılmıştır. İncelenen senaryolardan en yüksek verimin, boşta gitme ve rejeneratif frenlemenin enerji tasarrufu stratejilerinin birleşiminden sağlandığı belirtilmiştir [26]. Sicre ve arkadaşları, enerji verimli manuel tren sürüşü için GA optimizasyon tekniğini bulanık parametrelerle birleştirmiştir. Bulanık parametreler, manuel sürüşlerde belirsizliği yakalamaya yardımcı olmaktadır. Hedef çalışma süresine ve ihtiyaç duyulan en az enerji miktarına sahip bir çözüm bulmak GA kullanmanın amacıdır. Geleneksel manuel sürüş yöntemiyle karşılaştırıldığında,

algoritmanın gerçek bir İspanyol yüksek hızlı tren hattında enerji kullanımını yaklaşık %6,7 oranında iyileştirdiği kanıtlanmıştır [27]. Ma ve arkadaşları, optimizasyon problemine bir maliyet cezası olarak eklenen çalışma süresini de hesaba katan enerji kullanımını azaltmak için bir Genetik Algoritma optimizasyon tekniği önermişlerdir. Bir şehir içi raylı sistemde, algoritma test edilmiş ve yaklaşık %11 enerji tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir [28]. Bir başka çalışmada, diğerlerinden farklı olarak, iklimsel belirsizlik dikkate alınarak verimli hareket komutları sunmak amacıyla ekonomik sürüş modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon problemini çözüme kavuşturmak amacıyla GA metodu tercih edilmiş, sıcaklık, basınç ve rüzgardaki belirsizliği tanımlamak için ise bulanık sayılar metodu kullanılmıştır [29]. Hız yörüngesi optimizasyonu yöntemi ile cer enerjisi tüketimini azaltmaya yönelik çok sayıda literatür çalışması GA stratejisini dikkate almıştır [30, 31, 32, 33].

Enerji verimli tren hareketi probleminin çözümünde Genetik Algoritmanın yanı sıra diğer optimizasyon algoritmalarından da faydalanılmıştır. Liqian ve arkadaşlarının çalışmasında, karınca kolonisi algoritmasına (Ant Colony Algorithm - ACO) dayalı bir hız profili optimizasyon tekniği önerilmektedir. Pekin Yizhuang metro hattındaki saha araştırmaları, önerilen optimum hız profilini doğrulamış ve neredeyse aynı çalışma süresi korunurken enerji tüketiminin %8,64 azaltabileceğini göstermiştir [34]. Benzer şekilde Ke ve diğerleri, en az enerji kullanımı ile hız profilini tayin etmek için karınca kolonisi optimizasyon algoritması kullanmışlardır [35]. Bir diğer çalışmada, tren hız profillerini optimize etmeye yönelik yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşım, MAX-MIN karınca sistemi algoritmasına dayanmaktadır. Yaklaşımın hesaplama süresi tolere edilebilir bir düzeye düştüğü için çevrimiçi optimizasyon mümkün olmuştur [36]. Bir diğer çalışmada da benzer olarak, ayrık kombinasyon optimizasyon yapısının yaklaşık hesaplamalarını kullanarak MAX-MIN karınca kolonisi optimizasyon yapısı ile en iyilenmiş hız profilini bulmak amacıyla iki kademeli tekniğe dayanan hızlı ve etkili bir algoritma önerilmektedir. Algoritma, tren makinistlerinin tecrübelerini dikkate alınarak geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yaklaşımın enerji verimli ve gerçek zamanlı performans sunduğunu göstermektedir [37]. Mohammad Ali ve arkadaşlarının çalışmasında, karınca kolonisi optimizasyonu, çeşitli ray eğimleri ve gradyanları için elektrikli trenlerin enerji verimliliği problemine uygulanmıştır.

Hızlanma, sabit hızda gitme, boşta gitme ve frenleme gibi hareket stratejilerinde geçiş noktalarının doğru belirlenmesi ile trenlerin güvenli seyahati için en uygun hız profili elde edilmiştir. Simülasyon için, Tahran metrosunun gerçek demiryolu verilerinden faydalanılmıştır [38]. Cer enerjisi tüketimini azaltmak için en uygun hız profillerini bulmak amacıyla karınca kolonisi algoritmasını kullanan diğer bazı çalışmalar arasında [39, 40, 41] bulunmaktadır.

Aynı problemin çözümünde sık kullanılan sezgisel algoritmalardan bir diğeri de Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing - SA) algoritmasıdır. Agostinho ve arkadaşları, mevcut zaman çizelgesiyle sınırlı, tren cer enerjisi tüketimini en aza indiren bir SA optimizasyon algoritması önermişlerdir. Bu çalışmada hesaplama süresi minimizasyonu için, SA algoritmasının operatörlerinden biri olan "yeniden tavlama" süreci kullanılmamıştır. Optimizasyonda durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı 100 ile sınırlandırılmıştır. Sabit hızda gitme ile frenleme hızlarının optimal değerleri bulunarak en ideal hız profili elde edilmiştir [42]. SA algoritmasını kullanarak Kitae ve Steven, hat geometrisi, hız sınırı ve yolculuk süresinin hesaba katılmasıyla tren hareket aşamalarını optimize etmişlerdir [43]. [44]'de verilen bir başka çalışmada, belirli bir rota için elektrikli tren tarafından kullanılan minimum enerji miktarı SA algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Ting Xie ve arkadaşları, hız limiti, hat hizalaması ve çalışma süresini kapsamlı bir şekilde dikkate alarak enerji tüketimini en aza indirmek için optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Çalışmada, amaç fonksiyonu toplam enerji tüketimidir. Karar değişkenleri, trenin bekleme durumuna girdiği konumdur. Optimize edilmiş boşta gitme noktasını aramak için bir SA yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen model, Şanghay metrosunun bir kısmına uygulanmıştır. Deney çıktıları, seyahat süresinde çok az bir uzama olmasına karşın, yöntemin enerji kullanımını etkili bir şekilde düşürebileceğini göstermiştir [45]. Benzer çalışmalar [46, 47] tarafından da yürütülmüştür.

Enerji verimli sürüş profillerinin elde edilmesinde literatürde sıkça başvurulan sezgisel yöntemlerden bir diğeri de parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO)'dur. Domínguez ve arkadaşları, hem yolculuk süresini hem de enerji tüketimini hedef olarak kabul eden çok amaçlı bir PSO algoritması sunmuştur. Tren hareketinin doğru simülasyonuna dayanan bu algoritma, yolculuk süresi ile enerji tüketimi arasında uzlaşma sağlayan Pareto eğrisi olarak

tanımlanmıştır [48]. Bir tren işletimindeki iki ana belirsizliği, yani tren yükü ve hattaki gecikmeleri göz önünde bulunduran Fernández-Rodriguez ve diğerleri, otomatik tren işletimi (Automatic Train Operation-ATO) sistemine entegre edilebilecek sağlam ve verimli hız profilleri tasarlayan bir model geliştirmiştir. Önerilen prosedürün adımları şunlardır: ilk adımda, yolcu yükü değişimlerinden etkilenmeyen tüm olası hız profillerinin bir Pareto eğrisi elde edilir; ikinci adımda, sağlam Pareto sınırından hız profillerini seçmek için enerji verimliliğini ve olası gecikmeleri de hesaba katan bir PSO algoritması kullanılır. Bu prosedür, gecikme faktörünün dahil edilmesinin %14'e kadar enerji verimliliği sağladığını gösteren bir durum çalışması üzerinde test edilmiştir [49]. Bir diğer çalışmada, hız sınırı ve gradyan dikkate alınarak, yolculuk süresi kısıtlaması ile enerji verimli bir optimizasyon modeli oluşturulmuş ve PSO kullanılarak optimal enerji verimli sürüş stratejisi önerilmiştir. Enerji verimli sürüşün optimizasyon yöntemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, istasyonlar arası sabit yolculuk süresi koşulu altında, trenin istasyonlar arası enerji verimli sürüş stratejisi PSO ile optimize edilmiş ve yolculuk süresi ile enerji tüketimi arasındaki ilişki elde edilmiştir. İkinci aşamada, tüm durakların toplam yolculuk süresi sabit olmak koşuluyla, yolculuk süresi yeniden dağıtılmış ve tüm hat için trenin enerji verimli sürüş stratejisi elde edilmiştir. Pekin Metrosu Yizhuang hattının gerçek hat verilerine ve araç parametrelerine dayanarak, optimizasyon yöntemi doğrulanmıştır. Simülasyon çıktısı, optimizasyon sonrasında, Wanyuan Caddesi-Rongjingdong Caddesi'ndeki ilk aşamada aracın istasyonlar arası işletme enerji kullanımının %6,15 oranında azaldığını ve ikinci aşamada tüm istasyonların toplam işletme enerji kullanımının % 14,77 oranında azaldığını göstermiştir [50]. Benzer çalışmalar [51, 52] tarafından da incelenmiştir.

Sezgisel tabanlı optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra farklı teknikler kullanılarak da raylı sistemlerde enerji verimli sürüş stilleri geliştirilmektedir. Açıkbaş tarafından yapılan araştırmaya göre, Yapay Sinir Ağı (YSA) tekniği kullanılarak trenin güzergahı boyunca hız profilinin optimize edilmesi sağlanmaktadır. Bu da cer enerjisi tüketiminin azaltılması ile sonuçlanmaktadır [53]. Jaramillo ve arkadaşlarının çalışmasında, raylı sistemlerin cer enerjisi tüketimini doğru tahmin edebilmek amacıyla, Valensiya (İspanya) metro sisteminin verileri kullanılarak bir YSA modeli geliştirilmiştir. YSA'nın kalibrasyonu ve doğrulanması, metro

sisteminin verileri kullanılarak yapılmış olup geliştirilen sinir ağı, raylı sistem güç tüketimini yüksek doğrulukla tahmin edebilmiştir. Örnek bir yolculuk sonunda ölçülen ortalama enerji tüketimi 8,66 kWh/km iken YSA'da ortalama enerji tüketimi 8,51 kWh/km hesaplanmış ve %1,64 gibi küçük bir sapma ile elde edilmiştir [54]. Bir diğer çalışmada ise, demiryolları için matematiksel modeller oluşturmada kullanılan yöntem ve teknikler incelenmiştir. YSA ve bulanık sinir ağlarını içeren bu modeller, istatistiksel tekniklere ve yapay zeka teorisine dayanmaktadır. Ayrıca, önerilen çözümlerin Rus Demiryolları üzerinde test edilmesinin sonuçları da gösterilmiştir. Buna göre, cer enerjisi tüketim tahmini gerçek verilerle kıyaslandığında, YSA tahminindeki hata %4 ve bulanık sinir ağları kullanımındaki hata %1 olduğu ortaya koyulmuştur [55]. Chuang ve diğerleri tarafından da benzer şekilde enerji verimli sürüş sorununa bir çözüm olarak bir YSA önerilmiştir. Önerilen YSA modeli Kaohsiung metro hattının verileri doğrultusunda oluşturulmuş olup modelin amacı istasyonlar arası en uygun boşta gitme noktalarının bulunmasıdır [56]. Domínguez ve diğerleri, optimal hız profillerini belirlemek için Madrid şehrinin metro sisteminin detaylı bir benzetim modelini geliştirmişlerdir. Benzetim modeli, trenin önceden tayin edilen yolculuk süresini dikkate alarak enerji tüketimi açısından optimal hız profilini bulmaya yardımcı olan bir Pareto eğrisi vermektedir. Yöntemin yaklaşık %13 enerji verimliliği sağladığı gösterilmiş ve çalışma mevcut ATO hız profillerinin yeniden tasarlanmasıyla sonuçlanmıştır [57]. ATO sürücülerinin hız takibindeki yanlışlıktan motive olan Liu ve diğerleri, enerji verimli tren problemi için iki tabu arama algoritması önermişlerdir. Ortaya çıkan algoritmalar, Pekin metrosunda gerçekleştirilen iki vaka çalışması üzerinde test edilmiştir. İlk vaka çalışması yaklaşık %8,93 enerji azalması gösterirken, ikinci vaka çalışması %2,54 enerji azalması göstermiştir. Her iki algoritmanın da ana avantajı hızlarıdır, yani her ikisi de 1 saniye içerisinde optimal bir çözüm sunmaktadır. Bu da onları araçların online kontrolü için elverişli hale getirmektedir [58]. Enerji kullanımını en aza indirmek için Ko ve arkadaşları, Bellman'ın Dinamik Programlamasını (DP) kullanarak, pratik olarak değerlendirilebilecek bir hesaplama süresi (22 saniye) ile, bir raylı taşıtın optimal çalışmasını hesaplamışlardır. Yazarlar, çalışmalarının sonuçlarını gerçek bir hatta uyguladıklarında varış noktasında gereken mesafe ve hız hatasının sırasıyla 0,6m ve 0,1m/sn'den az olduğunu belirtmişlerdir [59]. Trenleri daha verimli bir şekilde sürmek için Ziyu ve diğerleri, ideal bir tren yörünge planlama

yaklaşımı önermişler ve DP yöntemi kullanılarak optimizasyon problemini çözmüşlerdir [60]. Son olarak, bazı çalışmalar farklı buluşsal yaklaşımlar ile gerçekçi yaklaşımları karşılaştırmıştır. Örneğin, Zhao ve arkadaşları Geliştirilmiş Kaba Kuvvet (Enhanced Brute Force-EBF) algoritmasını, optimum tren hız profili sonuçlarını hızlı ve verimli bir şekilde bulmak için GA ve ACO optimizasyon teknikleri ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, Genetik Algoritma ve Karınca Koloni Algoritması yöntemlerinin, daha kısa hesaplama süresi nedeniyle Geliştirilmiş Kaba Kuvvet algoritmasından daha iyi olduğunu öne sürmüşlerdir. Bununla birlikte üç algoritmanın sonuçları da bu tür optimizasyon tekniklerininin enerji verimli hız profilleri bulma konusundaki başarsını ortaya koyduğunu belirtmişlerdir [61]. Bir başka çalışmada, tek bir trenin optimal hız profilini belirlemek için Dinamik Programlama, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Genetik Algoritma teknikleri önerilmiştir. Simülasyon verileri analiz edildiğinde DP yönteminin ACO ve GA yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği keşfedilmiştir [62]. Bir metro sistemi için optimal boşta gitme noktalarını belirlemek amacıyla, sezgisel yöntem olan GA ve üç geleneksel yaklaşım, Altın Bölüm Arama, Fibonacci Arama ve Gradyan Tabanlı Arama, yöntemleri seçilmiştir. Bu çalışmaya ait sonuçlar [63] ve [64]'de karşılaştırılmıştır. Geleneksel arama tekniklerine kıyasla, sezgisel optimizasyon yönteminin daha hızlı ve daha iyi çözüm sağladığı keşfedilmiştir. 2017 yılında Keskin ve Karamancıoğlu tarafından, cer enerjisi tüketimini en aza indirmek amacıyla tren hız profillerinin optimize edilmesi için, Genetik Benzetimli Tavlama (Genetic Simulated Annealing-GSA), Ateş Böceği (Firefly-FA) ve Big Bang-Big Crunch (BBBC) olmak üzere üç metasezgisel algoritma incelenmiştir. Sonuçları doğrulamak için bir Matlab simülasyonu kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, BBBC tekniği, cer enerjisi tüketimini azaltmada FA ve GSA'ya göre sırasıyla %6 ve %3,34 oranında daha etkili çözüm sunmuştur. Böylece, BB-BC'nin diğer iki yönteme göre daha iyi performansa sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmada ayrıca, meta-sezgisel yöntem kullanarak optimal tren işletim problemini ele almanın verimli bir yöntem olduğu gösterilmiştir [65]. Bir diğer araştırmada ise yeni bir amaç fonksiyonu oluşturulmuş ve optimizasyon için genetik algoritmalar ve yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony-ABC) algoritmaları seçilmiştir. Çalışmayı test etmek için Ankaray metro hattı verileri kullanılmıştır. Sürüş için enerji tasarrufu, mevcut sürüş profile ile karşılaştırıldığında önerilen optimize sürüş, GA'da %13,79 ve ABC'de

%13,45 olduğu belirtilmiştir [66]. Enerji tüketimi optimizasyon problemini çözmek için başka bir çalışmada üç alternatif yaklaşım; dinamik programlama, gradyan yöntemleri (Gradient Method-GM) ve sıralı ikinci dereceden programlama (Sequential Quadratic Programming-SQP) kullanılmıştır. Bu algoritmalar çeşitli açılardan karşılaştırılmıştır. Örneğin, çözüme kavuşma süresi açısından GM, diğer iki yönteme göre daha hızlı sonuç bulmuştur. Uygulama kolaylığı açısından en kötü yöntem GM olurken hız sınırlamalarını dikkate alma kolaylığı açısından ise en iyi yöntemin DP olduğu sonucuna ulaşılmıştır [67].

1.1.2 Zaman Çizelgesi Optimizasyonu Yöntemi ile Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Etkin Kullanımı

Gerçekleştirilen çalışmalara göre, trenin çalışma sıklığına bağlı olarak, tüketilen toplam enerjinin kabaca %40'ı rejeneratif frenleme ile geri kazanılmaktadır [68]. Trenlerin zaman çizelgesine ve sürüş stratejisine doğrudan bağlı olan iki önemli enerji tasarrufu yolu ile, cer enerjisi tüketimi azaltılmakta ve rejenerasyon (yenilenen) enerjisi miktarı ise artırılmaktadır. Scheepmaker ve arkadaşları, tarife optimizasyonunu, mümkün olduğu kadar çok enerji tasarruflu sürüşe izin veren bir raylı sistem ağında araçların programlanması (zaman çizelgelerinin ayarlanması) olarak tanımlamışlardır. Amaç, bir veya birden fazla trenin, iki istasyon arasındaki çalışma süresini, toplam enerji tüketimi minimum olacak şekilde belirlemektir. Birden fazla tren düşünüldüğünde, bir trenin frenleme esnasında ürettiği enerjinin başka bir trene iletilmesini sağlayan rejeneratif frenleme, enerji verimliliği için ilave bir fırsat sunar [69]. Buna göre, Yang ve diğerleri, zaman çizelgesi optimizasyonunun hedefini, "rejeneratif enerjinin hızlanan diğer trenler tarafından kullanılabilmesi için en uygun zaman çizelgesini bulmak" olarak tanımlamışlardır [70]. Rejeneratif frenleme, özellikle diğer demiryolu ağlarından daha fazla enerji harcayan kentiçi demiryolu ağlarında faydalıdır.

Enerji tasarruflu sürüş ve çizelge planlaması yakından ilişkilidir. Enerji verimli sürüş tekniği, hızlanma ve frenleme sürelerini belirlemek için zaman çizelgesi optimizasyon yaklaşımını kullanır. Çoğu zaman, çizelgeleme optimizasyon problemini modellemek için bir tamsayılı programlama modeli veya karma tamsayılı programlama modeli kullanılır. Bu modellerin karmaşıklığından dolayı, literatürde buluşsal yaklaşımlardan (örneğin, genetik algoritmalar ve benzetilmiş tavlama algoritmaları) yoğun bir şekilde yararlanılmıştır. Bu bölümde, rejeneratif

frenlemeden mümkün olduğunca çok yararlanma hedefiyle enerji kullanımı açısından tasarruflu zaman çizelgesi optimizasyon yöntemleri ile ilgili literatür özetleri sunulmuştur.

Hız profili optimizasyonu gibi zaman çizelgesi optimizasyonunda da literatürde en sık başvurulan yöntemlerden biri, hızlı ve etkili çözüme yakınsamaları sebebi ile GA metotlarıdır. Albrecht, senkronizasyon süreleri ve trenler arası seyahat süreleri göz önüne alındığında tren çalışma sürelerini düzenlemek amacıyla enerji tüketimini ve güç artışlarını azaltan bir modeli çözmek için GA yaklaşımını ilk uygulayanlardan birisidir. Rejeneratif enerji kullanımının optimize edilmesi, güç tepe kontrolü üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu durum şu şekilde açıklanmaktadır: Güç tepe noktası kontrol edilmezse, havai temas hattının (katener) gerilimi maksimum seviyeye ulaşır ve rejeneratif frenlemenin yerini mekanik frenleme alır (bu da enerjinin ısı enerjisi olarak kaybolmasına neden olur) [71]. Chen ve diğerleri, toplam cer gücü yükünün eşit bir şekilde tüketilebilmesi ve böylece tepe güç kullanımının azaltılabilmesi için birden fazla trenin zaman çizelgelemesini dikkate almışlardır. Deneyler, GA metodunun düşürülmüş maksimum cer gücü ile optimal bir çözüm sunmada başarılı olduğunu göstermiştir [72]. Rejeneratif enerjinin daha verimli kullanılmasına yönelik doğrudan yaklaşımları inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Nasri ve arkadaşları, enerji kullanımı miktarı üzerindeki trenler arası sefer süresi ve rezerv sürelerinin etkisini dikkate alarak yenilenmiş enerjiyi daha etkili kullanmak için çoklu trenlerin çizelgelenmesini optimize etmişlerdir. Önerilen GA metodunun, enerji kullanımını %14'e kadar düşürdüğü gösterilmiştir [73]. Fournier ve diğerleri, hızlanmaların ve frenlemelerin daha iyi senkronize olması ve rejeneratif enerjinin kullanılması için metro trenlerinin istasyonlarda bekleme süresini değiştirmek amacıyla bir model geliştimişlerdir. Model, %6'ya kadar enerji tasarrufu sağlayan ve doğrusal programlamayı GA yöntemi ile birleştiren hibrit bir algoritma ile çözülmüştür [74]. Bir başka çalışmada, tren zaman çizelgeleme problemini çözmek için alternatif bir matematiksel model önerilmiştir. Optimale yakın tren zaman çizelgelerini kısa bir hesaplama süresi ile elde etmek için bir GA yöntemi geliştirilmiştir. Son olarak, Alman demiryolu ağına dayalı bir vaka çalışması üzerinde modelin uygulaması test edilerek etkinliği kanıtlanmıştır [75]. Uygun bir zaman çizelgesi, düşük gecikme süresine, uygun tren güzergahlarına ve seyahat eden yolcu trenleri ve yük trenleri

için minimum süreye sahip olmalıdır. Gholami ve Sotskov'un çalışmalarında, verimli ve sağlam tren rotaları ve bir zaman çizelgesi elde etmek için trenlerin rotalanması ve çizelgelenmesi için bir genetik algoritma yöntemi geliştirilmiştir. Algoritma, trenlerin hareket etmeye başlaması için daha iyi zamanlama bulmak ve daha az sayıda ve olası tren gecikmelerinin daha küçük toplam süresine sahip olmak amacıyla trenlerin hareket zamanlarını optimize etmektedir [76]. Yang ve diğerleri, rejeneratif frenleme enerjisini tam olarak kullanabilmek amacıyla bir tamsayılı programlama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımı çözmek için bir GA tabanlı optimizasyon yöntemi tasarlanmıştır. Ortaya çıkan algoritmanın, rejeneratif enerji kullanımını %36.16 oranında iyileştirdiği ve toplam enerji tüketimini %4.28 oranında azalttığı gösterilmiştir [77]. Yang ve arkadaşları, enerji tüketimini, yolcu bekleme süresini ve tren gecikmelerini entegre eden çok amaçlı bir zaman çizelgesi optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Optimizasyon problemini GA metodu ile çözmüşlerdir. Ortaya çıkan model, Pekin metrosundan elde edilen gerçek veriler kullanılarak çözülmüştür. Sonuçlar, bu yöntemin nihai enerji tüketimini %2,1 azaltabileceğini, yolcu bekleme süresini %15,8 ve tren gecikmelerini ise %24,81 iyileştirebileceğini göstermiştir [78]. Zaman çizelgesi optimizasyonu rejeneratif frenleme enerjisinin etkin bir şekilde kullanılmasının yanı sıra yolcu konforunu artırmak (istasyonlardaki yolcu bekleme sürelerini azaltarak) amacıyla da yapılmaktadır. Renjie ve arkadaşlarının çalışmasında, platformlarda toplam yolcu bekleme süresini en aza indirecek zaman çizelgesi optimizasyon modeli önerilmiştir. Minimizasyon problemlerini çözmek için genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Çalışma, Guangzhou Metro Hattı 14'ten toplanan verileri kullanarak, yolcuların platformlarda beklerken harcadığı genel süre miktarında %9,3'lük bir azalma olduğunu ortaya çıkardı. Bulgular, standart bir zaman çizelgesiyle karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşımın yolcu bekleme sürelerini kısaltabileceğini ve yolcu servisini iyileştirebileceğini gösterdi [79]. Li ve Lo, [80] ve [81], çoklu tren operasyonları için günlük zaman çizelgesinin optimizasyonunu sağlamak amacıyla zaman çizelgesi optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Tüm trenlerin sürüş stratejisi ve yolculuk süresi, sistemin net enerji kullanımını minimize etmek amacıyla, model rejeneratif frenlemenin dikkate alındığı genetik algoritma ile çözüme kavuşturulmuştur.

Benzetimli tavlama algoritması da çizelgeleme optimizasyonu probleminde tercih edilen optimizasyon yöntemlerinden biridir. Örtüşme ve toplam seyahat süresi, Zhao ve arkadaşlarının geliştirdiği optimizasyon modelinin iki hedefidir. Optimal zaman çizelgesini elde etmek amacıyla benzetilmiş tavlama algoritması kullanmışlardır. Hong Kong'dan alınan gerçek saha verilerini kullanan algoritmanın sonuçları, örtüşme süresinde %21,9'luk bir azalma ve toplam yolculuk süresinde %4,3'lük bir azalma olarak elde edilmiştir [82]. Le ve arkadaşları, rejenere edilmiş enerjinin faydalı kullanımını maksimize etmek amacıyla doğrusal olmayan bir tamsayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Model, SA optimizasyon yaklaşımı kullanılarak çözülmüş ve yenilenen enerji kullanımını %4 ila %12 oranında iyileştirdiği sonucu elde edilmiştir [83].

Zaman çizelgesi optimizasyonu tren üzeri veya yol kenarı enerji depolama sistemleri ile entegre edilmiş şekilde de gerçekleştirilmiştir. Bu konuda literatürde çeşitli optimizasyon teknikleri ile gerçekleştirilen çok sayıda çalışmalar mevcuttur. Araç içi veya yol kenarı gibi enerji depolama sistemleri sayesinde yeniden üretilmiş enerji verimli bir şekilde kullanılabilir. GA arama yaklaşımını kullanan Leon ve Steven, optimizasyon zorluğunu çözmek için yol kenarı enerji depolama sistemlerini rejeneratif frenleme ve boşta gitme yöntemi ile birleştirdi. Sonuç olarak, işletmenin yoğun olmayan ve yoğun olan operasyonlarında sırasıyla %14,3 ve %24,5 oranında enerji tasarrufu elde edilmiştir [84]. Bir diğer çalışmada, gerçek zamanlı hız ve ivme verileri kullanılarak enerji kullanımını düşürmek için volanlı enerji depolama sistemi (Flywheel energy storage system-FESS) tercih edilmiştir. 15 adet depolama modüllerinin kullanılması bu çalışma için %35.1 enerji tasarrufu sağlamıştır [85]. Huang ve arkadaşları, rejeneratif frenleme enerjisi için yerleşik enerji depolama ile bir metro hattının seyahat süresini ve hız yörüngelerini eşzamanlı olarak optimize etmek için dinamik programlama (Dynamic Programming-DP) modeli geliştirmişlerdir [86]. Bir diğer çalışmada, tramvayların frenleme enerjisini depolamak ve daha sonra tekrar kullanmak amacıyla, MATLAB/Simulink yazılımında süper kapasitör tabanlı depolama sistemlerinin etkisi simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda maksimum tepe akımlarının %20'ye kadar ve şebekeden alınan toplam enerjinin ise %21'e kadar başarıyla azaltıldığı belirtilmiştir [87]. [88]'de, enerji tüketimini en aza indirmek amacıyla bir süper kapasitörlü hibrit elektrikli tramvay için hız ve gerilim profillerinin

birleştirilmiş optimizasyonu sunulmuştur. He ve diğerleri, GA optimizasyon yöntemi kullanarak hem metro trenlerinin enerji tüketimini hem de transfer bekleme süresini azaltmak için kapsamlı bir strateji önermişlerdir. Çalışmada rejeneratif frenleme enerjisi kullanımının maksimizasyonu ve transfer bekleme süresinin minimizasyonu, trenler arasındaki sefer süresi ve istasyonda bekleme süresi gibi zaman parametrelerinin optimize edilmesiyle başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir [89]. Roumpekas ve diğerleri tarafından, çalışma süresini ve enerji kullanımını azaltırken yolcu konforunu en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bir tamsayılı doğrusal programlama yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen model Atina (Yunanistan) Metro Hattı 3'e uygulanmıştır. Sonuçlar, önerilen modelin yolcu konforunu dikkate alırken seyahat sürelerini azaltmadaki etkinliğini doğrulamaktadır [90].

İyileştirilmiş bir çizelgeleme elde etmek için iki sezgisel tekniği birleştiren çalışmalar vardır. Örneğin, Huang ve arkadaşları, yenilenmiş enerjiyi daha etkili kullanmak amacıyla tren hız profilini, trenlerin bekleme sürelerini ve zaman çizelgesini optimize edilecek entegre bir problemi çözmek için PSO algoritması ile GA metodunu kullanmışlardır. Tek bir trenin enerji verimli çalışmasını optimize etmek amacıyla GA tekniği tercih edilmiştir. Sonrasında, toplam enerji kullanımını minimize eden çoklu trenler için optimal çizelgeyi bulmak için PSO metodu kullanılmıştır. Önerilen yöntemin gneel enerji kullanımını %16,24 oranında düşürdüğü gösterilmiştir [91]. Zhao ve diğerleri, frenleme enerjisinden etkili fayda sağlamak amacıyla trenlerin zaman çizelgesi ve hız profilini eş zamanlı optimize etmek amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Bu entegre optimizasyon problemini çözmek için Kaba Kuvvet Algoritması ve Genetik Algoritma'yı beraber kullanmışlardır. Çalışma sonucu olarak mevcut duruma kıyasla optimize edilmiş durumda %25 enerji verimliliği elde edilmiştir [9]. Yue ve arkadaşları, zaman çizelgesi optimizasyonu için Lagrange gevşetme algoritmasına (Lagrange Relaxation Algorithm-LRA) ve sütun oluşturma algoritmasına (Column Generation Algorithm-CGA) dayalı yeni bir metot önermişlerdir. Öncelikle, problemi doğrusal bir biçime dönüştürmek için RLA'yı kullanmışlardır. Ardından CGA'ya dayalı ideal zaman çizelgesini elde etmişlerdir. Pekin-Şanghay yüksek hızlı demiryolu sisteminde test ettikten sonra, yaklaşımlarının mevcut hat koşullarına göre ek tesis ve ekipman eklenmesini gerektirmeden hat kapasitesini artırabileceği sonucuna

varmışlardır [92]. Zhou ve diğerleri bir raylı sistem hattının tek yönü için tren zaman çizelgesi problemini incelemişlerdir. Tren tarifesini hesaplamak için dal ve sınır algoritması (branch and bound algorithm) ve LRA algoritmasını hibrid olarak kullanmayı tercih etmişlerdir. Çalışma sonucunda, tarife ve toplam seyahat süresini sınırlamış ve trenlerin gecikmelerini en aza indirmiştir [93].

1.2 Tezin Amacı

Bu doktora tezinin amacı, şehiriçi raylı ulaşım sistemlerinde trenlerin hareketi sırasında harcanan cer enerjisi miktarını, hız profili optimizasyonu ve zaman çizelgesi optimizasyonu yöntemleri ile en aza indirmektir. Bunun yanı sıra raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliğinin önemini vurgulamak ve verimlilik yöntemleri hakkında genel bilgi sunmaktır.

Büyük güçlerin tüketildiği raylı ulaşım sistemlerinde, özellikle enerji maliyetlerinin arttığı günümüzde, enerji verimliliği kavramı büyük önem arz etmektedir. Raylı sistemlerde enerji tüketimi dağılımı, cer enerjisi (trenlere hareket tahriki sağlayan) ve iç ihtiyaç (aydınlatma, yürüyen merdiven, asansör, depo alanları vb.) şeklinde iki ana başlık altında toplanabilir. Bu durumda hemzemin yolları kullanan tramvay ve tünelleri kullanan metro hatlarında tüketilen enerji dağılımları da değişkenlik göstermektedir. Örneğin, yeraltı hatlarında (metro vb.) kullanılan elektrik enerjisinin ortalama %55'i trenlerin hareketi amacıyla harcanırken, %45'i iç ihtiyaçlar için kullanılmaktadır. Hemzemin yolları kullanan raylı sistemler (tramvay vb.) için bu durum cer tarafında %95, iç ihtiyaç tarafında ise %5 olarak kullanılmaktadır. Bu doktora çalışması, demiryolu sisteminde enerjinin en çok tüketildiği cer enerjisini en aza indirmeye yönelik çalışmaları kapsamaktadır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak, İstanbul M3 Metro Hattı'nın güzergahı, araç ve işletme kısıtlamaları göz önünde bulundurularak Matlab ortamında bir tren hareket simulatörü (THS) geliştirilmiştir. Bu model gerçek işletme altında bir tren sürülerek doğrulanmıştır. Ardından çeşitli senaryolar altında (konfor kısıtı, değişken yolcu yükünün etkisi, seyahat süresi etkisi vb.) farklı optimizasyon teknikleri ile (Genetik Algoritma, Benzetimli Tavlama Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Deniz Yırtıcıları Algoritması) bu hat üzerinde çalışan trenlerin hızlanma profillerinin optimizasyonu yapılmıştır. Optimize edilen hızlanma profilleri ile gerçek bir tren bu hat üzerinde bir makinist eşliğinde sürülerek gerçek saha

sonuçları da elde edilmiştir. Son olarak çoklu tren hareket simülatörü (ÇTHS) geliştirilmiş ve rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum seviyede faydalanmak amacıyla M3 Metro Hattı'nın zaman çizelgesi (trenlerin rotalanması) optimizasyonu iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada Genetik Algortima ile hız profili optimizasyonu yapılmış ardından bu hız profili ile trenlerin hareketi sağlanırken, Benzetimli Tavlama algoritması ile de çoklu trenlerin zaman çizelgesi (timetabeling) optimizasyonu (istasyonlar arası seyahat süresi ve trenler arası sefer süresi) yapılarak çalışma sonlandırılmıştır.

1.3 Hipotez

İstanbul şehiriçi raylı ulaşım sistemi enerji tüketiminin, ulaştırmada herhangi bir gecikme veya konfor bozulması olmaksızın, en aza indirilmesi amacıyla trenlerin hız profili ve zaman çizelgeleri, entegre bir optimizasyon problemi yaklaşımı ile eş zamanlı olarak eniyilenecektir. Simülasyon ortamında elde edilen sonuçların, gerçek hayat testleri ile pratikte kolaylıkla uygulanabileceği ve enerji verimliliğinin doğrulanacağı öngörülmektedir. Bu çalışmanın, kısa istasyonlar arasına sahip DC gerilim ile çalışan tüm şehiriçi metro/tramvay sistemleri için önemli miktarda enerji tasarrufu sunacağı öngörülmektedir.

İstanbul metrosunun toplam enerji tüketiminin %57'si cer motorları tarafından kullanılmaktadır. Sürüş tarzı, cer enerjisini etkileyen temel faktördür. Optimize edilmiş sürüş stratejileri, enerji verimliliğini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, literatür özetinde de bahsedildiği üzere bir raylı taşıt aracı frenleme esnasında aslında tükettiği enerjinin yol profiline bağlı olarak %40'ını besleme hattına geri verebilmektedir. Bu enerji, eğer o esnada bir başka tren ivmelenme aşamasında değilse veya bir depolama sistemi yok ise aynı araçta sargı dirençlerinde yakılarak ısı şeklinde kaybolmaktadır. Trenlerin zaman çizelgelerinin optimizasyonu yöntemi ile bu enerjinin büyük bir kısmından faydalanmak mümkündür. Hem hız profili hem de zaman çizelgesi optimizasyonunu birleştiren yeni entegre bir model ortaya konularak, şehiriçi raylı sistemlerin cer enerjisi tüketiminde önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasında önerilen, hız profili optimizasyonu ile cer enerjisi tüketiminin azaltılması, trenlerin zaman çizelgelerinin optimizasyonu yöntemi ile rejeneratif frenleme enerjisinden etkin bir şekilde faydalanılması ve bu iki amacı birleştiren

entegre model uygulamalarının sağlaması öngörülen katkıları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Hız profili optimizasyonu yöntemi ile yol profiline bağlı olarak boşta gitme (Coasting) fazının uygulanmasına ağırlık verilecektir. Bu aşamada cer enerjisi harcanmadığı için, Coasting uygulama süresinin artırılmasının (daha önceden tanımlanmış istasyonlar arası seyahat süresini artırmamak şartıyla) enerji verimliliğine katkı sağlayacağı ve transformatörlerdeki tepe değerlerin azaltılmasına yardımcı olacağı öngörülmektedir.
- Geliştirilen THS'ye hız profilini optimize ederken aynı zamanda konfor (sarsıntı) parametresini de dikkate alacak bir özellik dahil edilecektir. Bu özellik dahilinde elde edilen optimal hız profili ile tren sürülmesinin, ani hızlanma ve frenlemelerden kaçınılarak hem yolcu konfor ve güvenliğini artırılmasına hem de teker-ray aşınmalarının azaltılmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.
- Trenler arası sefer süreleri, istayonlar arası sefer süreleri (toplam seyahat süresi sabit kalmak şartıyla) ve istasyonlar arası hız profillerinin entegre bir model yapısında eş zamanlı optimize edilmesi ile, normalde büyük çoğunluğu kullanılmayarak ısı olarak yok olan rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum seviyede faydalanılması ve toplam cer enerjisi tüketiminin azaltılması öngörülmektedir. Ayrıca transformatör merkezlerinden talep edilen elektriksel güç, rejeneratif frenleme enerjisinden tedarik edileceği için transformatör ve kablo yüklenmelerinin alamzası, ömür ve bakım sürelerinin nispeten artırılması beklenmektedir.

Hız profili ve zaman çizelgesi optimizasyonunun şehiriçi raylı sistemlerin enerji verimliliği üzerindeki avantajlarının hem simülasyon çalışmalarından hem de gerçek saha uygulamalarından elde edilecek sonuçlarla kanıtlanacağı öngörülmektedir. Enerji maliyetlerinin zirveye ulaştığı günümüz koşullarında bu tür çalışmaların önemi giderek artmakta ve önem kazanmaktadır.

2
SİSTEM TANITIMI

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tren hareket modeli ve modelin doğrulanması ile çeşitli vaka çalışmaları altında hız profili optimizasoynu ve trenlerin zaman çizelgesi optimizasyonu çalışmalarında kullanılan veriler, Metro İstanbul A.Ş.'nin işletmeciliğini yaptığı M3 metrosunun hat, araç ve operasyonel verileridir. Bu veriler kullanılarak tren ve trenin hareket ettiği güzergahın matematiksel modeli oluşturulmuştur. Modelleme ve analiz çalışmaları yapılan M3 metro hattına ilişkin bilgiler bu bölümde verilmiştir.

2.1 İstanbul M3 Metrosu Hat Tanıtımı

2006 yılında Kirazlı İstasyonu ile Metrokent İstasyonlarını birbirine bağlayan güzergahta çalışmalara başlanmıştır. Hattın yaklaşık uzunluğu 16 km'dir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 9 istasyondan oluşmaktadır. Olimpiyat kampüsünde ayrıca bir atölye ve depolama alanı için bir tesis bulunmaktadır. M3 Metro hattı ile ilgili bazı önemli tarihler aşağıda verilmiştir:

- Tünel kazılarının tamamlanması : Mart 2009
- Araçların teslim alınmaya başlanması : Ocak 2010
- Araç testlerinin başlaması : Aralık 2010
- Sinyal sisteminin devreye alınması : Mart 2012
- Deneme seferlerinin başlatılması : Haziran 2012
- Hattın işletmeye açılışı : Haziran 2013
- Olimpiyat istasyonunun hizmete açılması : Kasım 2013



Şekil 2.1 M3 metro hattı istasyon bilgileri

Bu tez çalışmasında modellenen ve tren işletimi aktif olarak yapılan Kirazlı-Metrokent istasyonları arası mesafe, 11.211,00 metredir. Hattın işletmesel bazı önemli bilgileri aşağıdaki gibidir.

- Hat uzunluğu : 1,2 km
- Durak sayısı : 9
- Tren sayısı : 80 (20 adet 4'lü tren)
- Tam bir yolculuk süresi süresi : 20 dk
- Çalışma saatleri : 06:00 – 00:00
- Yolcu kapasitesi : 70.000 yolcu/saat
- Sefer aralığı tasarımı : 120 saniye
- Sefer aralığı : 5 dk. (pik saatte)
- Sefer aralığı : 10 dk (normal işletmede)

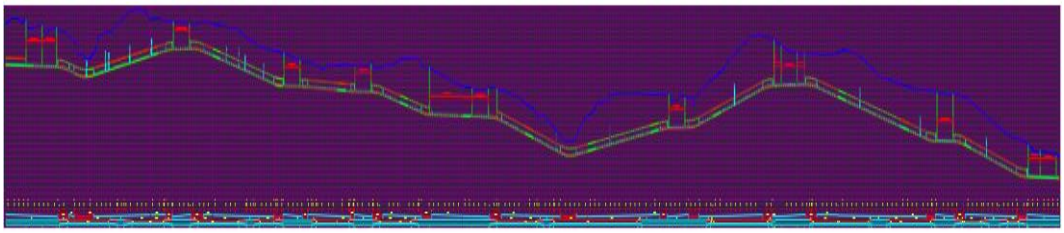
M3 hattındaki istasyonlarda 8 vagonlu trenlerin hareket etmesini sağlayan 180 metre uzunluğunda platformlar bulunmaktadır. Mahmutbey İstasyonu'na eklenen üçüncü şerit, araçların park etmesine olanak sağlamaktadır. Hattın istasyonlarının tamamı yer altı/tünel istasyonları olarak inşa edilmiştir. Olimpiyat kampüsünde atölye ve depolama kompleksi 120 vagon kapasiteli olup yaklaşık 70.000 m^2 alan üzerine inşa edilmiştir. Bakım üniteleri 10.000 m^2 kapalı alana sahip atölye binasında bulunmaktadır.

M3 metro hattı İstanbul halkının ulaşım ihtiyacını karşılama noktasında önemli bir yere sahip olup çeşitli raylı sistem hatları ile entegrasyonu mevcuttur.

- Turnike alanından peron alanına gidilerek, İkitelli-Sanayi istasyonunda, M9 Bahariye-Olimpiyat hattına geçilebilmektedir.
- Mahmutbey istasyonunda, M7 Mecidiyeköy-Mahmutbey hattına geçiş yapılabilir.
- Kirazlı istasyonunda, M1B Yenikapı-Kirazlı hattına geçiş yapılabilir.

Yukarıda M3 metro hattının yapısal, tarihsel ve operasyonel durumu hakkında genel olarak bilgi verilmiştir. Bu tez çalışmasının odaklandığı konu kapsamında bazı noktalarda çok daha detaylı teknik bilgilere ihtiyaç vardır. Tren hareketine karşıt gelen direnç kuvvetleri hattın yapısal durumuyla ilgilidir. Bunlar, tren rotası boyunca iniş-çıkışlar (gradyan), kavisler (kurp) ve tünel bilgileridir. Metrokent istasyonundan Kirazlı istasyonu doğrultusu boyunca ve tersi yöndeki Kirazlı istasyonundan Metrokent istasyonu boyunca tüm hattın yatay-düşey kurp uzunlukları, viraj açıları, yokuş iniş-çıkış uzunlukları, gradyan açıları ve istayonlar arası tünel uzunluk bilgilerinin detaylı olarak kullanılması gerekmektedir.

M3 metro hattının gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesi için gerekli olan veriler, Şekil 2.2'de örnek olarak bir kısmı gösterilen, bu hattın detaylı güzergah ve boy kesit bilgilerini içeren Autocad çiziminden elde edilmiştir.



Şekil 2.2 M3 metro hattı güzergah ve boy kesiti Autocad çizimi

Güzergah ve boy kesit çiziminden öncelikle hattın yokuş iniş-çıkış bilgileri elde edilmiştir. Bu bilgiler, trenin hareketi esnasındaki en önemli dirençlerden biri olan gradyan direncini belirlemede kullanılmış olup doğru bir şekilde çıkarılması önemlidir. Tablo 2.1'de detaylı bir şekilde istasyon bilgileri, istasyonlar arası mesafe ve gradyan eğim bilgileri paylaşılmıştır. İlgili veriler kullanılarak Matlab programında hattın gradyan yapısı görselleştirilmiş ve Şekil 3.3'te paylaşılmıştır.

Tablo 2.1 M3 metro hattı gradyan bilgileri tablosu

Mesafe aralığı (m)	**Gradyan (%)**	**İstasyon adı**	**Gradyan bilgileri**	**İstasyonlar arası mesafe**
5	-0,3		Eğim başlangıcı	1652
5	0,0	Metrokent	Peron başlangıcı	
185	0,0	Metrokent	Person sonu	
360	-0,3		Eğim bitişi	
486	-3,9		Eğim başlangıcı	
543	-3,9		Eğim bitişi	
764	2,44		Eğim başlangıcı	

Tablo 2.1 M3 metro hattı gradyan bilgileri tablosu (devamı)

Mesafe aralığı (m)	**Gradyan (%)**	**İstasyon adı**	**Gradyan bilgileri**	**İstasyonlar arası mesafe**
1572	2,44		Eğim bitişi	1652
1646	0,3		Eğim bitişi	
1657	0,0	Başakkonutları	Peron başlangıcı	
1837	0,0	Başakkonutları	Person sonu	
1851	0,3		Eğim bitişi	1244
1994	-3,29		Peron başlangıcı	
2784	-3,29		Eğim bitişi	
2890	-0,3		Eğim başlangıcı	
2901	0,0	Siteler	Peron başlangıcı	
3081	0,0	Siteler	Peron sonu	
3110	-0,3		Eğim bitişi	794
3167	-0,67		Eğim başlangıcı	
3648	-0,67		Eğim bitişi	
3688	-0,3		Eğim başlangıcı	
3695	0,0	Turgut Özal	Peron başlangıcı	

Tablo 2.1 M3 metro hattı gradyan bilgileri tablosu (devamı)

Mesafe aralığı (m)	**Gradyan (%)**	**İstasyon adı**	**Gradyan bilgileri**	**İstasyonlar arası mesafe**
3875	0,0	Turgut Özal	Peron sonu	794
3889	-0,3		Eğim bitişi	1309
4006	-3,24		Eğim başlangıcı	
4435	-3,24		Eğim bitişi	
4553	-0,3		Eğim başlangıcı	
5004	0,0	İkitelli Sanayi	Peron başlangıcı	
5184	0,0	İkitelli Sanayi	Peron sonu	
5198	-0,3		Eğim bitişi	2200
5335	-3,9		Peron başlangıcı	
5990	-3,9		Eğim bitişi	
6171	2,14		Eğim başlangıcı	
7102	2,14		Eğim bitişi	
7190	0,3		Eğim başlangıcı	
7204	0,0	İstoç	Peron başlangıcı	
7384	0,0	İstoç	Peron sonu	

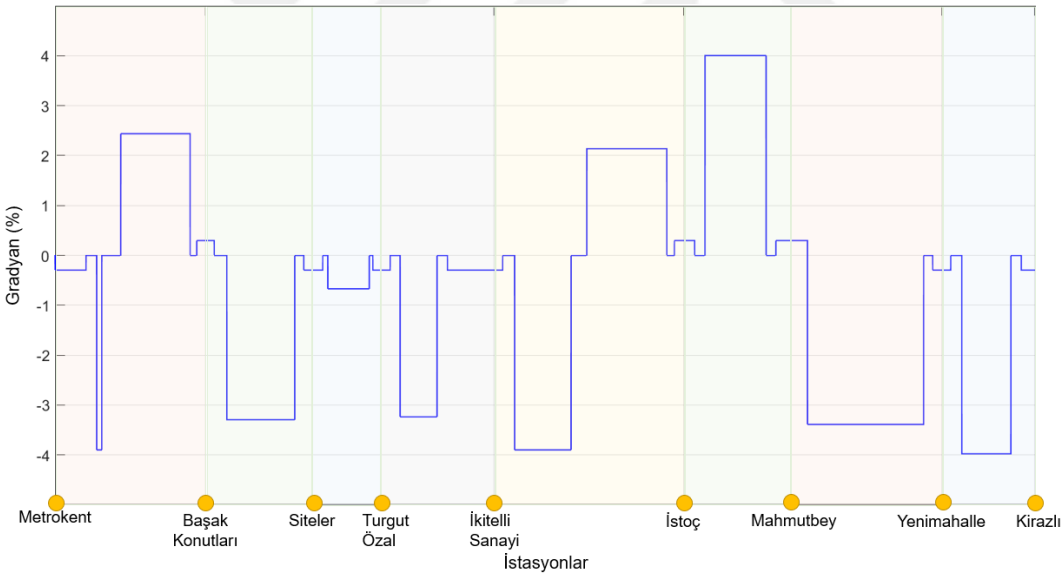
Tablo 2.1 M3 metro hattı gradyan bilgileri tablosu (devamı)

Mesafe aralığı (m)	**Gradyan (%)**	**İstasyon adı**	**Gradyan bilgileri**	**İstasyonlar arası mesafe**
7425	0,3		Eğim bitişi	1257
7542	4,0		Eğim başlangıcı	
8253	4,0		Eğim bitişi	
8365	0,3		Eğim başlangıcı	
8461	0,0	Mahmutbey	Peron başlangıcı	
8641	0,0	Mahmutbey	Peron sonu	
8732	0,3		Eğim bitişi	1743
8861	-3,39		Eğim başlangıcı	
10082	-3,39		Eğim bitişi	
10187	-0,3		Eğim başlangıcı	
10204	0,0	Yenimahalle	Person başlangıcı	
10384	0,0	Yenimahalle	Peron sonu	
10396	-0,3		Eğim bitişi	1153
10521	-3,98		Eğim başlangıcı	
11094	-3,98		Eğim bitişi	

Tablo 2.1 M3 metro hattı gradyan bilgileri tablosu (devamı)

Mesafe aralığı (m)	Gradyan (%)	İstasyon adı	Gradyan bilgileri	İstasyonlar arası mesafe
11212	-0,3		Eğim başlangıcı	1153
11357	0,0	Kirazlı	Peron başlangıcı	
11537	0,0	Kirazlı	Peron sonu	
11572	-0,3		Eğim bitişi	

Şekil 2.3, her bir istasyonlar arası iniş çıkış yolunun uzunluğunu ve eğimin yüzdesel olarak değerini göstermektedir.



Şekil 2.3 M3 metro hattı yokuş iniş-çıkış (gradyan bilgileri)

M3 Metro Hattının eğrilik değerleri, gerçek bir hattın tam olarak modellenmesi ve eğrilerin neden olduğu dirençlerin doğru hesaplanabilmesi için Autocad çiziminden elde edilmiş ve Tablo 2.2'de paylaşılmıştır. Tabloda, belirli mesafe aralıklarında eğrilik açısı, uzunluğu ve eğrinin yarıçapı bilgileri sunulmuştur. Tabloda verilen mesafe aralıkları dışında, örneğin 0-376, 1031-1103 gibi, eğrilik değeri sıfırdır yani bu aralıkların düz, eğimsiz bir yol olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 2.2 M3 metro hattı eğim (viraj-kavis) bilgileri

Mesafe aralığı (m)	Eğim yarıçapı (m)	Eğim uzunluğu (m)	Eğim açısı (derece)
376-1031	405	654	92,52
1103-1646	405	543	76,81
1849-2481	460	630	78,47
2555-2890	460	335	41,72
3209-3682	720	473	37,64
3891-4407	460	516	64,27
5202-5824	420	600	81,85
5871-6909	800	1030	73,76
7624-8362	780	738	54,21
8778-9471	824	693	48,18
9640-10181	1052	541	29,46
10397-10785	374	388	59,44
10899-11211	375	312	47,67

M3 hattı tamamen tünel içinde kalan bir metro olduğu için istasyonlar arası tünel uzunluğu bilgileri ayrıca paylaşılmamıştır. Her bir istasyonlar arası mesafe Tablo 2.1'de verilmiştir. Bu aralıkların tamamı tünel olarak değerlendirilmiş ve çalışmada tünel etkisinin direnç değeri de dikkate alınmıştır.

2.2 İstanbul M3 Metrosu Araç Tanıtımı

M3 metro hattında 80 adet araç yani 4 vagon dizili 20 adet tren ile işletme yapılmaktadır. Şekil 2.4'te verilen tren mimarisi incelendiğinde, her birinde 1 enerji tedarik sistemi (tahrik ünitesi) bulunan 2 adet sürücülü vagon (Mc1 + Mc2), 1 adet motorlu (M) ve 1 adet de taşıma (T) vagonundan oluşmaktadır. Mc1 ve Mc2 vagonları baş vagonlar olup trenin bir sürücü tarafından manuel olarak sürülmesine olanak sağlamaktadırlar. Normalde işletme otomatik tren operasyonu (Automatic Train Operation-ATO) ile yapılmaktadır.



Şekil 2.4 M3 metro hattında çalışan tren yapısı

Şekil 2.5'te gerçek görseli verilen trenin her bir motorlu vagonda 4 adet nominal değeri 150 kW olan asenkron cer motoru bulunmaktadır. Maksimum çalışma performansları göz önüne alındığında, sırasıyla 1,15 m/s^2 ve 1,04 m/s^2 hızlanma ve yavaşlama oranları ile 88 km/sa maksimum hıza ulaşabilir. Tablo 2.3'te, dört vagon birimi için ek özellikler sunulmuştur.

Tablo 2.3 M3 metro aracı nominal performans değerleri

Özellikler	**Değerler**
Maksimum adezyon	%0,16
Maksimum hız	88 km/sa
Maksimum işletme hızı	80 km/sa
Başlangıç ivmesi (0-40 km/sa)	1,10 m/s^2
Ortalama ivme (0-80 km/sa)	0,89 m/s^2
Maksimum frenleme ivmesi	1,04 m/s^2



Şekil 2.5 M3 hattında aktif olarak kullanılan tren görseli

M3 hattı trenlerinin bir vagonuna ait çizim Şekil 2.6'da verilmiştir. Burada, 1 numaralı kısım alçak gerilim kutusu ve fren modülünün, 2 numaralı kısım cer kutusunun (invertör ünitesi & giriş kutusu), 3 numaralı kısım fren dirençlerinin, sağ ve soldaki tekerleklerin göründüğü kısım ise bojilerin yerleşimini göstermektedir. Boji, demiryolu taşıtlarının önemli bir bileşenidir. Görevi, tekerleklerin hareketini sağlamak ve trenin geri kalan kısmını taşımaktır.

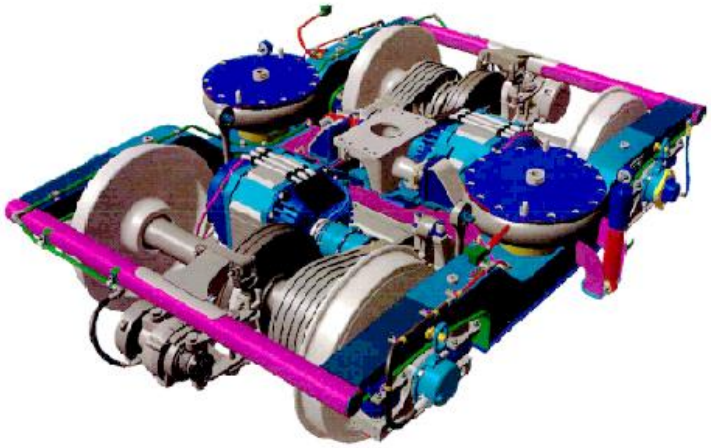


Şekil 2.6 Trene ait bir vagon görünümü

Yukarıda adı geçen bir metro aracının vagonunda bulunan donanım hakkında kısaca bilgi vermek gerekirse; giriş kutusu ekipman kabı, yüksek gerilim bağlantı sistemleri, giriş filtreleri, korumalar ve sevk kontrol ekipmanlarından oluşur. Fren direnç ünitesinde hava soğutma sistemi bulunur. Tahrik (cer) invertörü her motorlu vagonda bağımsızdır. Boji başına 2 adet olmak üzere, bir vagonda toplam 4 adet asenkron çekiş motoru bulunmaktadır. Her iki boji motoru için ise bir vagonda 1 adet tahrik fren sistemi bulunur.

Şekil 2.7'de bojinin daha detaylı görseli paylaşılmıştır. Her bir boji tekerlekere itme kuvveti sağlayan 2 adet cer motoru ve bir adet cer invertör ünitesini barındırır. M3

metro hattı trenleri için invertör nominal giriş gerilimi 1500 V DC (1800 V DC max.)'dir.



Şekil 2.7 Boji detaylı görünümü

İnvertör ağırlığı 450 kg olup DC tüketicilerinin güç tüketimi 2 x 150 W'dır. Cer invertör ünitesi özellikleri ile ilgili daha detaylı bilgiler aşağıdaki Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Cer invertör ünitesi teknik özellikleri

Özellikler	**Değerler**
Nominal çıkış gerilimi	1500 V DC (1800 V DC maks.)
Sabit çıkış RMS akımı	2 x 400 A
Başlangıç RMS akımı	2 x 500 A
PWM anahtarlama frekansı	2 – 2,5 kHz (tren işletimine bağlı)
Fren kıyıcı anahtarlama frekansı	1 kHz
Soğutma hava akışı	2 x 0,45 m^3/s
Fanların güç tüketimi	2 x 1000 W (3 x 400 V ve 50 Hz'de)

Tablo 2.4 Cer invertör ünitesi teknik özellikleri (devamı)

Özellikler	Değerler
DC tüketicilerin güç tüketimi	2 x 150 W
Ortam sıcaklığı	25 … +40 °C
Kütle	450 kg

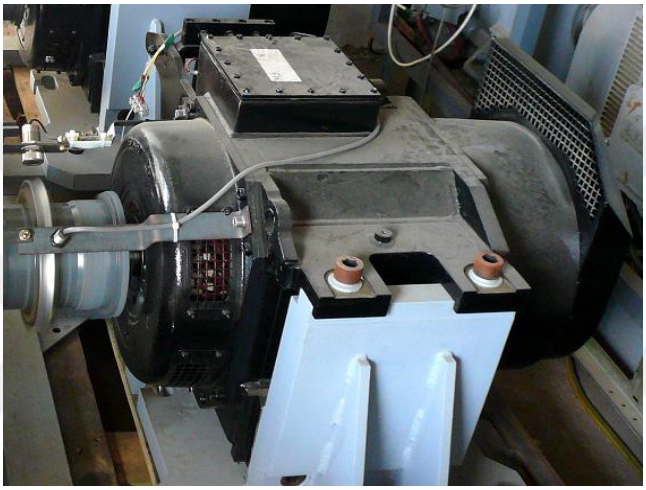
M3 hattı trenlerinin bojilerinde bulunan ve trenin hareketi için tekerleklerine gerekli itme gücünü sağlayan cer (tahrik) motorları, sincap kafesli rotorlu, dört kutuplu, kendinden havalandırmalı asenkron motorlardır. Vagonun tahrik sistemi 4 adet cer motoru içerir. Her cer invertörü paralel bağlı 2 motoru besler. Nominal gücü 150 kW olan asenkron cer motorları 4 kutupludur. M3 metrosunda çalışan trenlerde kullanılan asenkron cer motoruna ait bir görsel Şekil 2.8'de verilmiştir. Daha detaylı teknik bilgiler ise Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 Asenkron cer motoru ana parametreleri

Özellikler	Değerler
Tip	Asenkron
Nominal güç	150 kW
Kutup sayısı	4
Nominal faz-faz gerilimi	3 x 530 V AC
Nominal akım	3 x 195 A AC
Nominal frekans	60 Hz
Nominal servis hızı	1759 RPM

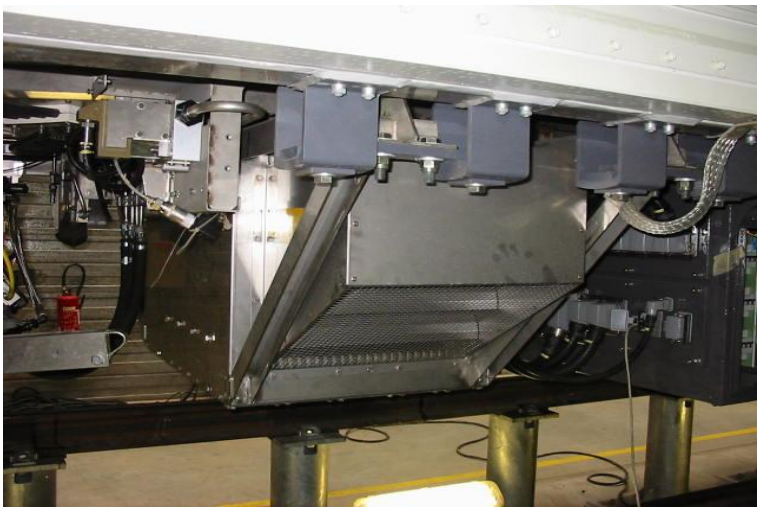
Tablo 2.5 Asenkron cer motoru ana parametreleri (devamı)

Özellikler	Değerler
Maksimum servis hızı	3830 RPM
Soğutma	Kendinden havalandırmalı
Ağırlık	560 kg



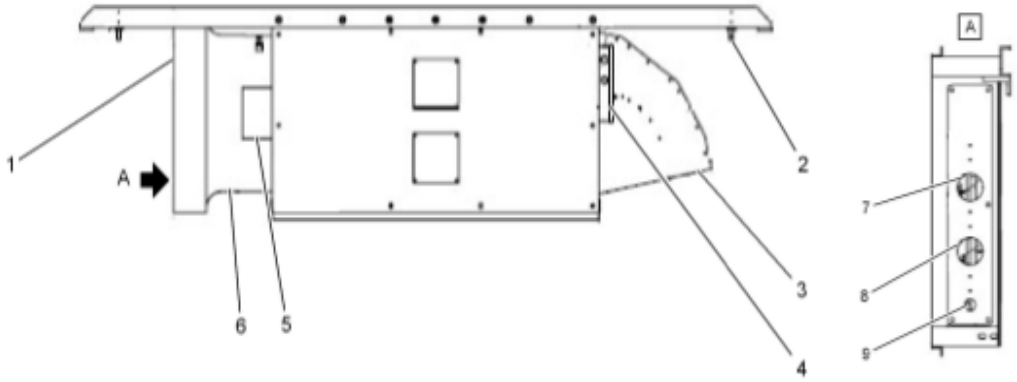
Şekil 2.8 Trene ait asenkron cer motoru

M3 metro hattında çalışan trenler, bir istasyona varırken veya trenlerin belirli bir hız limiti dahilinde frenlenmesi esnasında, motorlar generator modunda çalışarak faydalı frenleme (rejeneratif frenleme) yaparlar. Bu durumda, frenleme hızına bağlı olarak belirli miktarda enerji katener hattına geri verilir. Bu enerji, eğer aynı hat üzerinde ivmelenme hareketi yapan başka bir tren var ise onun tarafından kullanılabilir veya depolama sistemi var ise depolanabilir. Bu iki durumdan hiç biri yok ise, üretilen frenleme enerjisi, devresini tamamlamak üzere tekrardan aynı trene geri döner ve Şekil 2.9'da gösterilen fren dirençlerinde yakılarak ısı olarak açığa çıkar. Bu enerji katener gerilim seviyesini yükselttiği için ya başka bir tren tarafından kullanılması ya depolanması ya da fren sargı dirençlerinde yakılması zorunludur.



Şekil 2.9 M3 metro trenlerinde bulunan fren direnci görseli

Fren direnci teknik çizim görüntüsü Şekil 2.10'da verilmiştir.



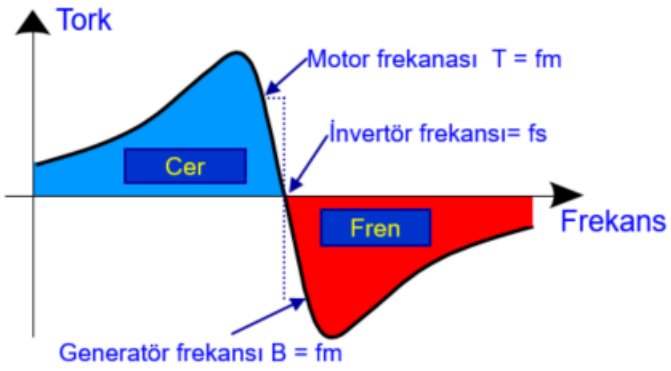
Şekil 2.10 M3 metro trenlerinde bulunan fren direnci görseli

Çizimde 1'den 9'a kadar numaralandırılmış kısımlara ait teknik bilgiler aşağıda açıklanmıştır:

- (1), direnç kutusuna hava girişini sağlayan hava giriş ızgarasıdır.
- (2), fren direnci kutusunun trene toprak bağlantısını sağlayan topraklama şeridir.
- (3), direnç kutusundan hava çıkışını sağlayan hava akış detektörünün bulunduğu hava çıkış kanalıdır.
- (4), izolatörler üzerinde fren direnci bulunan ve klemens kutusunu destekleyen harici hücredir.
- (5), Kabloların sonlandırıldığı bağlantı kutusudur.
- (6), soğutma fanının olduğu kutudur.
- (7), pozitif (+) kablo girişidir.

- (8), negatif (-) kablo girişidir.
- (9), fan besleme kablosunun çıkış ucudur.

Tork ve frekans değerlerine bağlı olarak aracın motor veya generator modunda çalışmasına dair görsel Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Elektriksel frenleme modları

Tren güç talep ettiğinde pozitif yönlü bir tork uygulanmaktadır. Bunun tersi ise tren frenlemeye geçildiğinde meydana gelmektedir. Bu durumda motorlar generator moduna geçer ve frenleme esnasında elektrik üretilir. Elektriksel frenleme modu süreci ile ilgili olarak daha detaylı bilgiler şu şekilde listenebilir:

- - İnvertör frekansı (Fs) mekanik frekansın (Fm) altına düştüğünde, otomatik tahrik cer durumundan fren durumuna geçer.
- İnvertörün serbest döner diyotlarından akan motor akımı, yüksek gerilim (YG) hat şebekesine yeniden üretilen gücü (rejeneratif frenleme enerjisi) aktarır.
- Elektriksel frenlemeye yalnızca tren hızı > 10 km/s olduğunda izin verilir.
- 10 km/s altında, mekanik frenleme aktifleştirilir ve herhangi bir enerji üretimi olmaz.
- Rejeneratif fren gücünün kullanılamayan kısmı, fren dirençlerine dağıtılır (PWM kontrolü ile) ve yakılarak harcanır.
- Elektrikli fren arızası durumunda, mekanik (pnömatik) frene otomatik geçiş yapılır ve bu esnada da enerji üretimi olmaz.

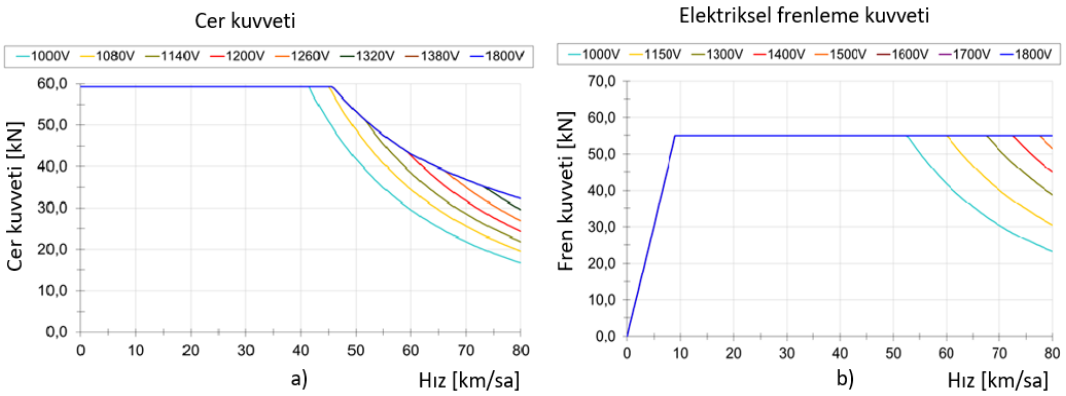
Trenlerin teknik özellikleri ile ilgili en önemli kısımlardan bir diğeri ise cer ve frenleme karakteristiğinin tanıtılmasıdır. Bu karakteristikler tren tipine ve hızına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bununla ilgili olarak bir diğer belirleyici husus

ise trenin kütlesidir. İçinde yolcu veya herhangi bir ağırlık bulunmayan boş tren kütlesi AWO (kg) olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra sırasıyla diğer 4 kademe gelmektedir: AWO 1 (kg), AWO 2 (kg), AWO 3 (kg) ve AWO 4 (kg). Her birinin hangi kütle miktarına karşılık geldiği Tablo 2.6'da detaylı olarak verilmiştir. Tren kütlesi ile ilgili bir diğer bilinmesi gereken kısım ise döner kütle etkisidir. Tren bojilerinde, hareketi esnasında dönen her bir parçanın trene ilave kütle etkisi bulunmakta ve buna da dönen kütle (rotating mass-kg) etkisi denilmektedir. Dönen parçalardan dolayı her bir vagona karşılık gelen ilave kütle artış etkisi Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6 Vagonların detaylı kütle bilgileri

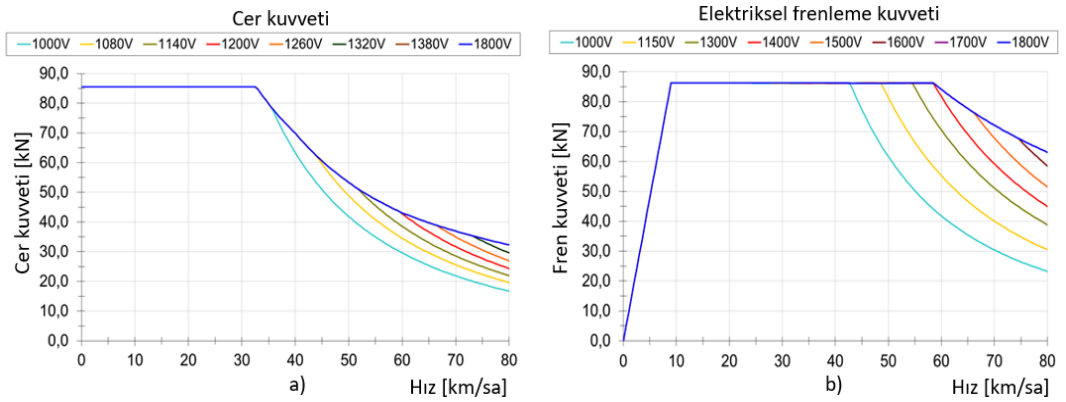
Tren kütle modu	**Mc1-2**	**M**	**T**
AW0 [kg]	34500	33500	31800
AW1 [kg]	37170	36656	34950
AW2 [kg]	46200	46370	44670
AW3 [kg]	5057	51350	49650
AW4 [kg]	55264	55970	54270
Dönen parçaların kütle etkisi [kg]	5200	5200	2000

Trenin hangi yük durumunda hareket ettiğine (örneğin boş tren için AW0) bağlı olarak talep edeceği cer ve frenleme karakteristikleri de farklı olmaktadır. Trenin matematiksel modeli de buna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.12'de AWO yüklü durum için cer ve frenleme karakteristiği verilmiştir.



Şekil 2.12 AW0 yüklü durum için a) cer kuvveti & hız ve b) fren kuvveti & hız grafikleri

M3 metro hattı 1500 V DC gerilim ile çalışmaktadır. Katener hattındaki 1000 V DC'nin altı veya 1800 V DC'nin üzerindeki değerler kritik gerilim seviyesi olarak tanımlanır. Kritik gerilim seviyelerine göre cer ve frenleme kuvvetleri değişkenlik gösterir. Katener hattının gerilim seviyesi bir sebepten dolayı düşerse buna bağlı olarak trenin talep edeceği cer kuvveti de azalacak ve tren düşük hızlarda seyrine devam edecektir. Benzer şekilde frenleme kuvveti de gerilim seviyesi ile birlikte düşecektir. Hatta gerilim dalgalanması yok ise, cer ve frenleme kuvvetlerini, Şekil 2.12'den de görüleceği üzere yalnızca trenin anlık hızı belirler. Şekil 2.13 ise AW3 yüklü durum için cer ve frenleme karakteristiklerini göstermektedir.



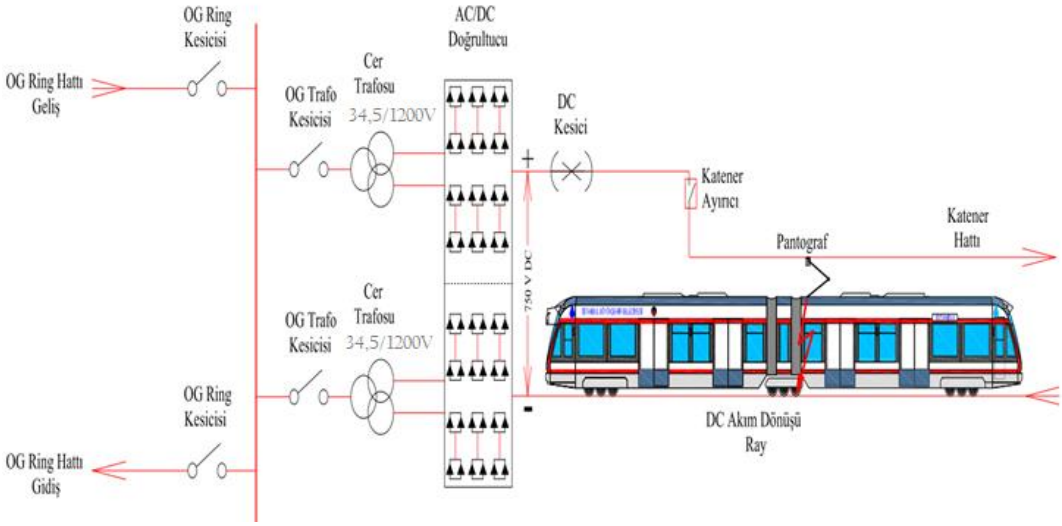
Şekil 2.13 AW3 yüklü durum için a) cer kuvveti & hız ve b) fren kuvveti & hız grafikleri

AW0 yüklü duruma kıyasla cer ve frenleme gücü daha yüksektir. Çünkü, yolcu yükü sebebiyle artan kütleyi karşılayabilmek için cer motorlarının kullanması gereken gücün de artması gerekmektedir. AW0 yüklü duruma benzer şekilde, bu durumda da nominal katener gerilimi dışındaki farklı gerilim seviyeleri için cer ve frenleme kuvvetleri şekilde görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, cer ve

frenleme kuvvetlerinin matematiksel modeli nominal gerilim durumu (1500 V DC) göz önününde bulundurularak yapılmıştır.

2.3 İstanbul M3 Metrosu Elektrifikasyonu

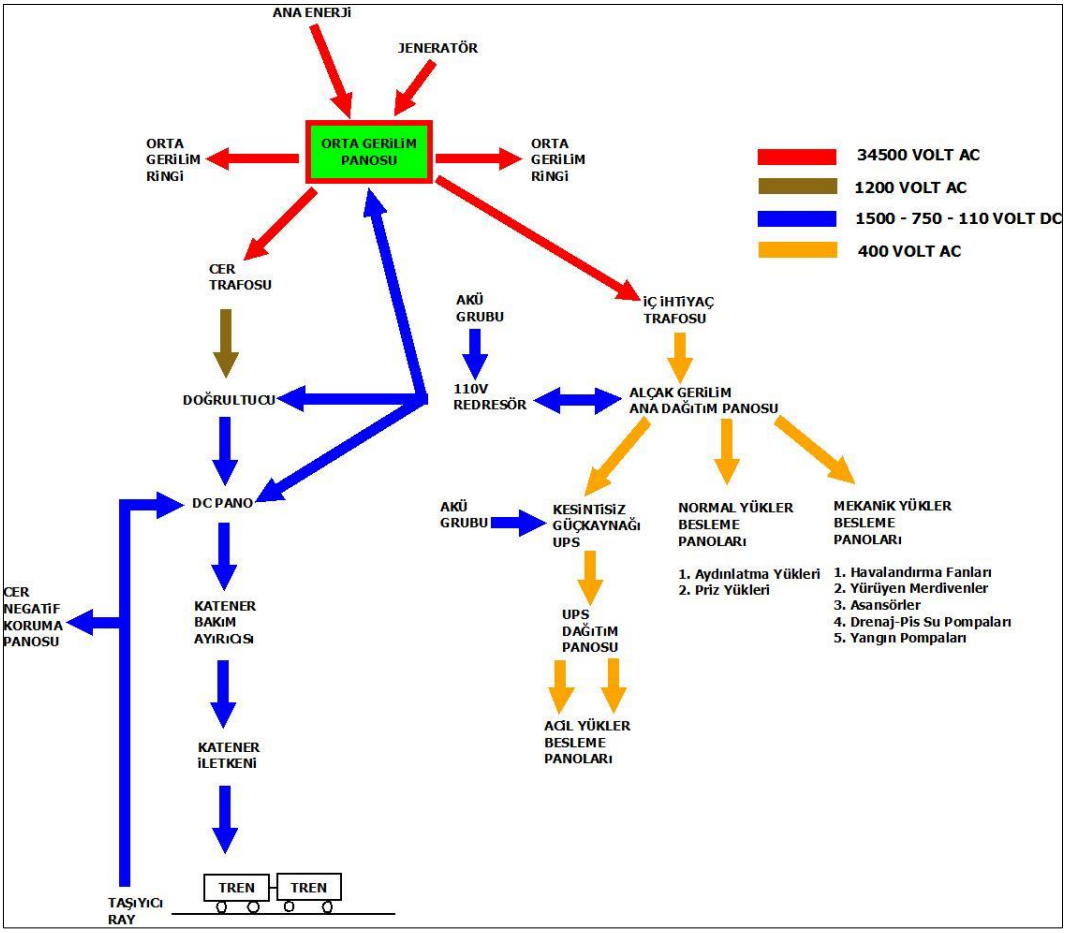
M3 metro hattının orta gerilim (OG) elektrifikasyon sistemini, bu güzergah üzerinde bulunan 14 tane cer transformatörü, 18 tane servis transformatörü ve transformatör merkezleri arasında konumlandıırlmış 20,3/35 kV 3x(1x120 mm2) XLPE orta gerilim kabloları oluşturmaktadır. Şekil 2.14, elektrik sistemini oluşturan transformatör merkezlerinin basit şemasını göstermektedir. Bu diyagrama göre, ana dağıtım merkezine OG hattı üzerinden gelen 34,5 kV seviyesindeki gerilim OG kesicileri üzerinden geçerek cer transformatörüne girer. Cer transformatöründen elde edilen 1,2 kV mertebesindeki AC gerilim, 12 darbeli diyot doğrultucu grubuna girer ve 1500 V DC gerilim seviyesine dönüştürülerek katener hattına verilir. Tren, pantografı aracılığıyla katener hattına temas ederek bu enerjiyi ilgili kısımlarına güç aktarma organları ile aktarır ve böylece çalışmasını sürdürür.



Şekil 2.14 M3 metro hattı elektrifikasyon yapısı [68]

M3 Metrokent-Kirazlı demşryolu hattı, hat boyunca çeşitli noktalara inşa edilen toplam 14 transformatör, 9 istasyonun ve yaklaşık 12 km uzunluğundaki katener hattının elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Transformatör merkezleri 34,5 kV AC orta gerilim baraları ile donatılmış olup, birbirlerine orta gerilim enerji kabloları ile bağlanarak ring ağı oluşturulmaktadır. Kurulan ring ağı sayesinde herhangi bir TEİAŞ 154/34,5 kV giriş beslemesinde elektrik kesintisi durumunda ring kesici

hücre kontrolü yoluyla başka bir düşürme merkezinden enerji sağlanabilmektedir. Şekil 2.15 bu transformatör merkezleri ile metro hattının çeşitli yüklerinin beslenme şemasını göstermektedir.



Şekil 2.15 M3 metro hattı enerji besleme diyagramı

OG ring hücresinin girişi 34,5 kV AC orta gerilim seviyesidir. Bu hücreden cer ve servis transformatörlerine giriş verilerek araç ve istasyon iç ihtiyaç yüklerinin karşılanması için uygun gerilim seviyesine dönüştürülür. Cer transformatörleri sadece araçların asenkron cermotorlarını besler. İç ihtiyaç transformatörleri ise istasyon bünyesinde bulunan diğer tüm yükleri, örneğin kesintisiz güç kaynağı (KGK), yürüyen merdiven, havalandırma, ısıtma, soğutma, priz, aydınlatma, vb. sistemleri, beslemektedir. Tablo 2.7'de Metrokent-Kirazlı istasyonları arasında işletme yapılan M3 metro hattının transformatör kurulu güç bilgileri detaylı olarak her bir istasyon özelinde verilmiştir.

Tablo 2.7 Transformatörlerin kurulu güç bilgileri

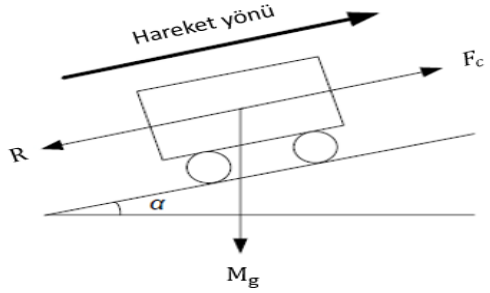
İstasyon adı	**Servis Transformatörü**	**Cer transformatörü**	**Toplam kurulu güç**
Metrokent	2x2500 kVA – 34,5/0,4 kV	1x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	8,3 MVA
Başakkonutları	2x2000 kVA – 34,5/0,4 kV	2x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	10,6 MVA
Siteler	2x2000 kVA – 34,5/0,4 kV	-	4 MVA
Turgut Özal	2x2000 kVA – 34,5/0,4 kV	2x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	10,6 MVA
İkitelli	2x2500 kVA – 34,5/0,4 kV	2x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	11,6 MVA
İstoç	2x2000 kVA – 34,5/0,4 kV	2x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	10,6 MVA
Mahmutbey	2x2500 kVA – 34,5/0,4 kV	2x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	11,6 MVA
Yenimahalle	2x2000 kVA – 34,5/0,4 kV	2x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	10,6 MVA
Kirazlı	2x2000 kVA – 34,5/0,4 kV	1x3,3 MVA – 34,5/1,2 kV	7,3 MVA

3
TREN HAREKET MODELİ OLUŞTURULMASI VE MODELİN GERÇEK BİR METRO HATTI ÜZERİNDE DOĞRULANMASI

Raylı sistemlerde enerjinin büyük bir bölümü treni hareket ettirmek amacıyla cer motorlarında kullanılır. Trenin enerji verimli sürüşünün sağlanması için, zamana ve/veya kat ettiği mesafeye göre enerji kullanımının belirlenmesi ve benzetim yazılımında tanımlanan rotası boyunca testlerinin yapılması gerekir. Bu bölüm altında, temel olarak bir tren hareketinin matematiksel modelinin oluşturulması açıklanmaktadır. Sonrasında tren hareket modları ve enerji tüketimleri hesaplanmaktadır. Son olarak, geliştirilen hareket modelinin doğrulaması, İstanbul M3 Metro hattı üzerinde gerçekleştirilen tren test sürüş sonuçları ile karşılaştırılarak sunulacaktır.

3.1 Tren Hareketinin Matematiksel Modeli

Bir cisme uygulanan kuvvet, kütlesi ve bu kuvvetin yaratacağı ivme arasındaki bağlantı Newton'un ikinci yasasıyla verilmektedir. Şekil 3.1'de, pistin yokuş yukarı bölümünde bulunan bir çekiş aracı üzerindeki kuvvetleri gösterilmektedir. Araca uygulanan çekme kuvveti F_C (kN), trenin kütlesini yokuş yukarı hareket ettirirken sürtünme kuvvetlerine R (kN) ve yerçekimi kuvvetlerine ($Mg\sin(\alpha)$) karşı treni hareket ettirmek için kullanılır [94]. Buna göre, trenin temel hareket modeli matematiksel olarak denklem (3.1) ve (3.2) ile ifade edilebilir:



Şekil 3.1 Bir tren üzerindeki kuvvetler

$$\frac{dx}{dt} = v \tag{3.1}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_c - F_f - F_R \pm F_G - F_V - F_T}{M_e} \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde, v (m/s) ve x (m) sırasıyla trenin hızı ve konumudur. F_c (kN) trenin çekiş kuvveti, F_f (kN) frenleme kuvveti, F_R (kN) temel hareket direnci, F_G (kN) eğim direnci, F_V (kN) viraj direnci, F_T (kN) tünel direnci ve M_e (ton) aracın etkin kütlesidir.

3.1.1 Etkin Kütle

Araç kütlesi, denklem (3.3)'deki dara kütlesi ve yolcu yükünün toplamıdır. Bir tren doğrusal olarak hızlandırıldığında, dönen parçalar da dönme anlamında hızlanır. Etkin tren kütlesini artırarak, tekerleklerin ve motorların dönme etkisi doğrusal tren hareketine eklenmelidir. Bu dönme atalet etkisine, "dönme payı" (β) adı verilir ve trenin dara ağırlığının bir bölümü olarak ifade edilir. Etkili kütle denklem (3.4) ile hesaplanabilir. Dönme payının değeri %5 ila %15 arasında değişir. Bu, az sayıda motorlu dingile sahip tren için daha az ve tüm dingilleri motorlu bir hafif tren için ise daha fazladır [95].

$$M = M_t + M_y \quad (3.3)$$

$$M_e = M_t\, x\, (1 + \lambda) + My \quad (3.4)$$

Burada, M trenin kütlesi (ton), M_t trenin dara kütlesi (ton), My yolcu (ton) yükü ve λ dönen kütle atalet etkisidir.

3.1.2 Cer ve Frenleme Kuvvetleri

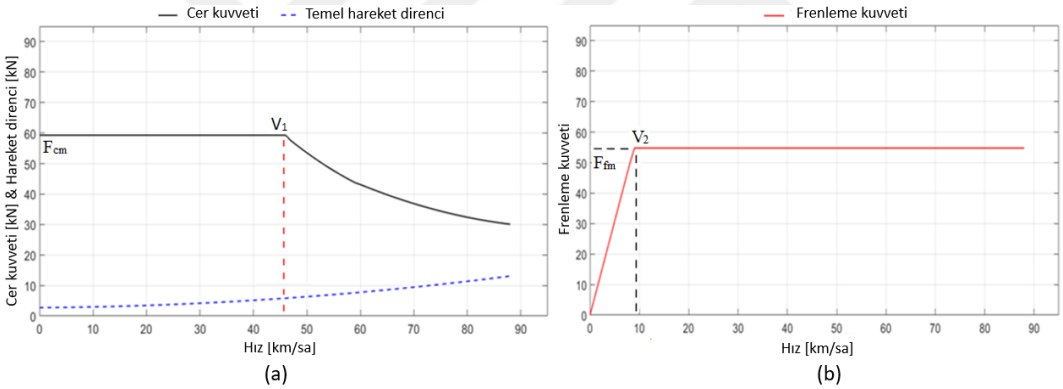
Çekiş motorları tarafından aracın ileri yönlü hareketi için uygulanan tahrik kuvvetine cer kuvveti, tersi yönde aracın hızını azaltmak ve/veya tamamen durdurmak için uygulanan kuvvete ise frenleme kuvveti denilir. Hem frenleme hem de cer kuvveti eğer yüksek değerlerde uygulanacak olursa tekerlerin raylar üzerinde patinaj yapmasına neden olacaktır. Bu nedenle kuvvetler belirli bir maksimum büyüklükle sınırlandırılır. Kullanılabilecek en fazla çekiş ve frenleme kuvvetleri iki parametre ile belirlenir: aracın toplam kütlesi ve raylar ile tekerlek arasındaki yapışma katsayısı. Kütle ve kullanılabilecek her iki kuvvet birbirleri ile doğru orantılıdır. Cer ve freneleme kuvvetlerinin hesaplanması genellikle cer motoru gücü ile trenin anlık hızına bağlıdır. Tren cer kuvveti F_c ve frenleme kuvveti F_f, Şekil

3.2'de verilen trene ait orijinal çekiş ve frenleme grafiğinden faydalanılarak, denklem (3.5) ve (3.6)'da verilen şekilde formüle edilebilir:

$$F_c = \begin{cases} 59.31 & v < 46.11 \\ 0.02048.v^2 - 3.319.v + 168.29 & 46.11 \leq v < 60 \\ 0.00893.v^2 - 1.7867.v + 118.17 & 60 \leq v \leq 80 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$F_f = \begin{cases} 6.0024.v - 0.01 & v \leq 3.33 \\ 6.544.v - 1.813 & 3.33 < v \leq 6.389 \\ 5.9132.v - 2.2204 & 6.389 < v \leq 8.889 \\ 54.783 & 8.889 < v \end{cases} \quad (3.6)$$

Şekil 3.2 trenin çekiş, frenleme ve temel çalışma direnç eğrilerini göstermektedir. Buna göre, V_1 (km/sa) hızına kadar çekişte sabit bir kuvvet, maksimum kuvvet, (F_{cm}) (kN) vardır. Fakat, bu hızdan sonra tren sabit bir güç bölgesine girdiğinden çekiş kuvvetinde azalma olur. Frenleme karakteristiği ise tren hızı V_2 (km/h) hızına düşene kadar sabit bir güç bölgesinde, maksimum frenleme, (F_{fm}) (kN) olup, bundan sonra kuvvet lineer olarak azalmaktadır.



Şekil 3.2 Trene ait çekiş, çalışma direnci ve frenleme eğrileri; a) Tren cer kuvveti, b) Frenleme kuvveti

3.1.3 Cer ve Frenleme Kuvvetleri

Trenin fiziksel özellikleri, güzergahın yapısı, eğimi, virajların uzunluğu ve yarıçapı gibi sabitlerin yanı sıra zamana ve yere göre değişen rüzgar kuvvetleri de trenin hareketini etkiler. Enerji verimliliğini artırmak için direnç modellerini tam olarak tanımlamak çok önemlidir. Böylece doğruluk oranı yüksek bir tren hareket modeli yapılabilir ve ilgili güzergahı boyunca bir trenin hareketi doğru bir şekilde optimize edilebilir.

3.1.3.1 Temel Hareket Direnci (Yuvarlanma Direnci)

Tren, ray-teker arasındaki sürtünme ve aerodinamik sürtünmeye karşı zıt yönde hareket eder. Taşıt direncinin ana bileşenleri, ağırlık, tren gabarisi (şekli) ve hız ile ilgili olan yuvarlanma dirençleridir. Yuvarlanma direncini hesaplama formülü, eşitlik (3.7)'de verilen Davis Denklemi ile ifade edilmektedir [96].

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \tag{3.7}$$

Bu ifadede,

A boji yapısına, aks yüküne ve ayrıca doğal mekanik sürtünmeye bağlı olarak statik ve dinamik direnç [N],

B ray ve tekerlek arasındaki kenar sürtünmesi, süspansiyon sönümlemesi ile 2. dereceden olmayan hava sürtünme direncinin (örneğin hava momentum) [N.s/m],

C Trenin önündeki ve arkasındaki aerodinamik direnç, ek türbülans etkisi [N.s2/m2],

v Trenin hızı [m/s],

olarak tanımlanmaktadır.

A, B ve C terimleri sabit katsayılar olup test yoluyla elde edilebilmekle birlikte treni üreten firmadan da doğrudan talep edilebilir. Bu tez çalışmasında, gerçek bir işletme altında ilgili araçlar ile testler yapılarak elde edilmiştir.

3.1.3.2 Eğimden Kaynaklanan Gradyan Direnci

Eğimin direnci, hareketin yerçekimine karşı koymasından kaynaklanır. Eğer, bir tren yokuş yukarı hareket ediyorsa, burada direnç trenin çekiş kuvvetine karşı olur. Ancak, yokuş aşağı giden bir tren için bu direnç çekiş kuvvetine pozitif katkıda bulunur. Treni yokuş yukarı veya aşağı giderken etkileyen kuvvetin tanımı [96];

$$F_G = M.g.sin\alpha \tag{3.8}$$

olarak verilir. Burada, F_G eğimden kaynaklanan direnci (kN), g yerçekimi ivmesini (m/s^2), α eğim açısını ve M trenin kütlesini (ton) göstermektedir.

3.1.3.3 Virajlardan Kaynaklanan Direnç (Kurp Direnci)

Trenin güzergahındaki virajlı kısımlarda hareket ederken maruz kaldığı dirençtir. Kurp yarıçapı, kurp uzunluğu ve trenin uzunluğu temel belirleyicilerdir. Eğrinin direnci, eğri yarıçapı arttıkça azalır. Kavisli raylarda kayma, sürünme ve sürtünme kaynaklı tekerlek-ray arayüzündeki enerji kaybı nedeniyle oluşan eğim direnci aşağıdaki denklem (3.9) ve (3.10) yardımıyla elde edilir [97]:

$$F_V = 10.5.\left(\frac{a^0}{x_{cr}}\right) \qquad x_{cr} \geq l_t \tag{3.9}$$

$$F_V = 10.5.\left(\frac{a^0}{l_t}\right) \qquad x_{cr} \leq l_t \tag{3.10}$$

Burada, a^0 eğrinin açı uzunluğu (derece), x_{cr} eğrinin doğrusal uzunluğu (m) ve l_t trenin uzunluğunu (m) belirtmektedir.

3.1.3.4 Tünel Direnci

Tünel içindeki sıcaklık, hava hızı ve basınç gibi parametreler trene ilave bir direnç kuvveti uygulamaktadır. Ancak, bu direnç kuvveti diğer kuvvetlerle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir seviyede düşüktür ve genellikle yok sayılabilir. Tren tünel içine girdiğinde gelen ilave direnç kuvveti (3.11)'da verilen formülden elde edilebilir [97]:

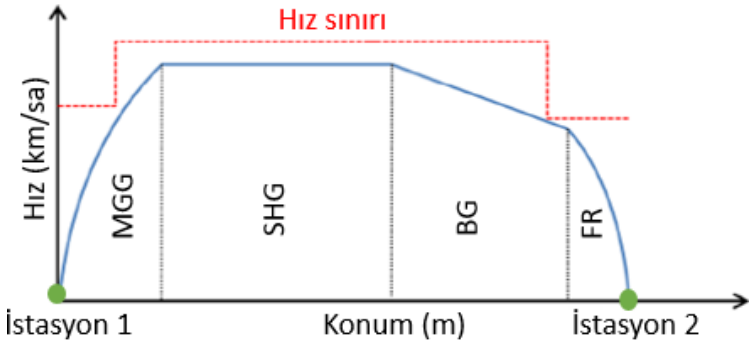
$$F_T = 0{,}00013.\, l_{tu} \tag{3.11}$$

Burada, l_{tu} tünel uzunluğudur (m). Eğer trenin uzunluğu l_t, tünel uzunluğundan büyük ise $F_T = 0{,}00013.\, l_t$ ifadesi ile tünel direnci hesaplanabilir.

3.2 Tren Sürüş Modları

Tren hareketi, demiryolu ağları tarafından kullanılan enerjinin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Bu nedenle demiryolu işletmeciliğinde tren hareketine yönelik çalışmalar enerji verimliliğinin sağlanması açısından daha önemli hale gelmiştir. Tren sürüş stratejisi genel olarak dört hareket moduna ayrıştırılabilinir: Maksimum Güçte Gitme (MGG), Sabit Hızda Gitme (SHG), Boşta Gitme (BG) ve Frenleme (FR)'dir [98]. Örnek bir optimal tren hareket metodunda, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, seyahat MGG moduyla başlar, sonrasında belirli bir konumda hız sabitlenir, daha sonra belirli bir konuma kadar boşta gitme modunda gidilerek ki bu fazda hız

da yavaş yavaş azalır veya artar (yol profiline bağlı olarak) ve nihayetinde fren yapılmasıyla seyahat tamamlanır. Dört hareket modunun da bulunduğu bu hareket stretejisinden belirli modların çıkarılmasıyla (Örneğin: MGG-BG-FR veya MGG-SHG-FR gibi) da optimal işletim sağlanabilir.



Şekil 3.3 Optimal tren hız profiline ait hız-konum örneği

Maksimum güçte gitme modu genellikle yolculuğun başlangıcında aktiftir ve burada aracın belirlenen noktaya kadar hızını artırmak için kullanılır. Bu moddaki çekme kuvveti, normal olarak harekete karşıt olan tüm dirençlerin toplamından daha yüksektir. Burada, (3.12) denkleminde verilen ivme pozitiftir.

$$\begin{cases} F > F_R \pm F_G + F_V + F_T \\ \dfrac{dv}{dt} = a = \dfrac{F - F_R \pm F_G - F_V - F_T}{M_e} \end{cases} \tag{3.12}$$

Sabit hızda gitme moduna, tren istenilen hıza veya işletme tarafından belirlenen bir bölgedeki hız sınırına ulaştığında geçilir. Bu hızı korumak için trene karşı gelen tüm dirençlerin toplamı kadar güç uygulanır. SHG modundaki çekiş kuvveti, denklem (3.13)'de gösterildiği gibi, ilgili tüm direnç kuvvetlerinin toplamına eşittir. Bu modda ivme sıfıra eşittir.

$$\begin{cases} F = F_R \pm F_G + F_V + F_T \\ a = 0 \end{cases} \tag{3.13}$$

Boşta gitme modu uygulandığında, trenin çekiş gücüne ihtiyacı yoktur. Enerji tasarruflu bir sürüş tarzı olan bu mod, sıfır cer gücü tüketir. Hız profili optimizasyon çalışmalarında genellikle bu moddan yararlanılır ve ilgili kısıtlamalar dahilinde mümkün olduğunca uzun olması istenilir. İvme, denklem (3.14)'te gösterildiği gibi, eğim ve dirençler tarafından üretilen kuvvetlerin dengesi tarafından belirlenir. Trenin hızı normalde boşta giderken azalır, ancak tren yokuş aşağı inerken artabilir.

$$\begin{cases} F = 0 \\ a = \dfrac{-F_R \pm F_G - F_V - F_T}{M_e} \end{cases} \quad (3.14)$$

Tren bir durağa veya bir hız sınırına yaklaştığında fren modu uygulanır. Fren modunda, hem çekiş gücü hem de hızlanma denklem (3.15)'deki gibi negatiftir.

$$\begin{cases} F < 0 \\ a = \dfrac{F - F_R \pm F_G - F_V - F_T}{M_e} \end{cases} \quad (3.15)$$

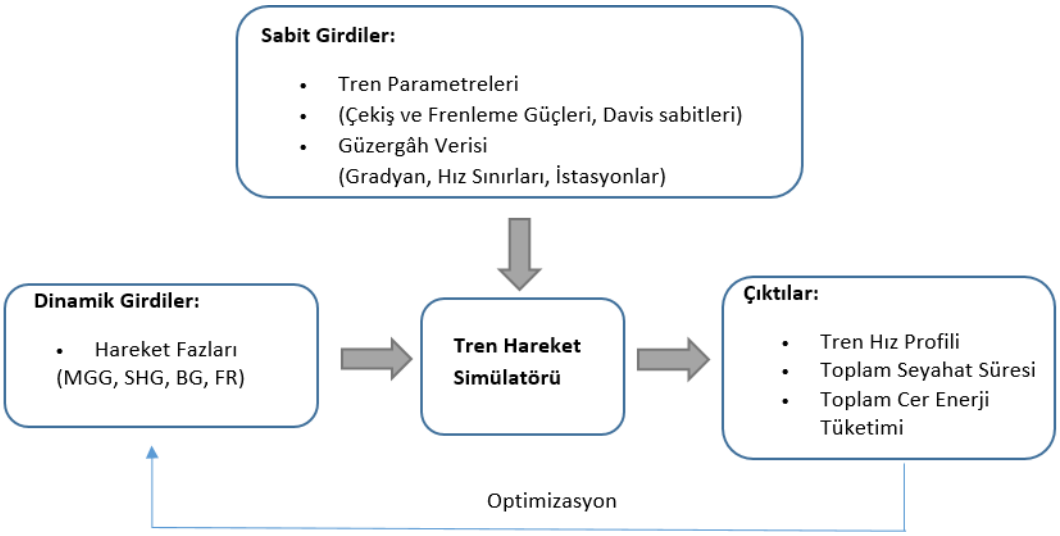
Güvenli durma mesafesi, trenin varış noktasına tam ve güvenli bir şekilde ulaşması için gereken mesafenin ölçümüdür. Anlık olarak, mevcut hız değerine göre denklem (3.16) ile hesaplanır:

$$x_s = \frac{v_{fr}^2}{2a} \quad (3.16)$$

Burada, v_{fr} aracın frenlemeye başlama hızını, a yavaşlama ivmesini, $\mathrm{x_s}$ ise belirli noktada durma mesafesini belirtmektedir. Tren hangi modda hareket ediyorsa, nihai hedefe kalan mesafe anlık olarak durma mesafesi ile karşılaştırılır ve eşit olduğu anda frenleme moduna geçilir.

3.3 Tren Hareket Simülatörü Tasarımı ve Enerji Tüketim Hesabı

Araç karakteristiği ve rota verilerine dayalı olarak tren hareketi modellenir. Araç karakteristiği, araç kütlesini, çekiş gücü parametrelerini ve Davis sabitlerini içerir. Rota verileri, rota boyunca eğimi, hız limitlerini ve istasyon konumlarını içerir. Tren Hareket Simülatörü (THS) sabit ve dinamik olmak üzere iki temel girdiden oluşur. Sabit girdiler, tren ve yol özelliklerini içerir. Sürüş stratejileri, tipik olarak hızlanma, sabit hızda gitme, boşta gitme ve frenlemeyi içeren tren hareket simülatörüne dinamik girdiler olarak işlenir. Temel yapısı Şekil 3.4'te verilen THS, sürüş tekniklerine ve sabit girdilere dayalı olarak tren hız profili çıktısını verir. Dinamik girdiler sürüş yöntemlerini belirler ve çekiş enerjisi sonuçlarına göre enerji tasarrufu için optimize edilebilir.



Şekil 3.4 Tren hareket simülatörü yapısının şeması

Bir raylı sistem operasyonunda enerji kullanımının büyük bir kısmından, araca hareket gücünü ileten cer motorları sorumludur. Denklem (3.17), cer (çekiş) kuvvetini ve aracın hızını dikkate alarak Mekanik Gücü, (P_{mec} [kW]) hesaplamak için kullanılabilir:

$$P_{mec}(t) = F_c(t).v(t) \tag{3.17}$$

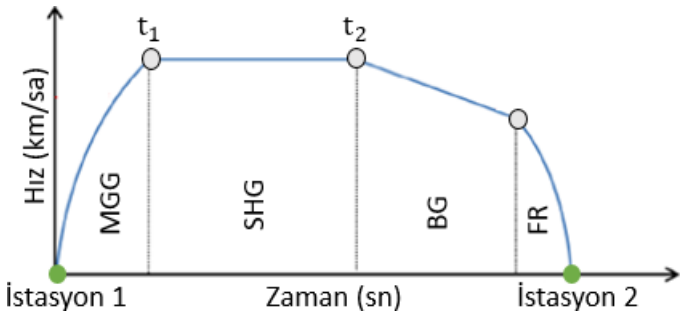
Burada, P_{mec} mekanik gücü ve v ise o anki hızı temsil etmektedir. Denklem (3.17)'nin değerleri göz önüne alındığında, yolculuk boyunca kullanılan toplam enerji gücün zamana göre integralinin alınması ile elde edilir. Bu durumda gereken enerji miktarı E_c (kWh), Denklem (3.18) ile ifade edilir:

$$E_c = \int_0^T P_{mec}(t)dt \tag{3.18}$$

Burada, E_c yolculuk boyunca kullanılan toplam enerjiyi, t (sn) ise toplam yolculuk süresini belirtmektedir.

Denklem (3.18) ile verilen enerji tüketim hesabını, tren hareketinin her fazı için ayrı ayrı uygulamak mümkündür. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bir tren hareketini iki istasyon arasında durağan halden başlatıp yine durağan halde sonlandırır. Optimum bir strateji için, toplam enerji tüketimi hareket aşamalarına bölünebilir. Şekil 3.5'te verilen stratejide, tren t_1 anında MGG fazından SHG fazına geçiş yapmaktadır. SHG fazında hız (V_{SHG}) sabittir ve çekiş kuvveti tren hareketine karşı olan direnç değerlerinin toplamına eşittir. Bu aşama, t_1 ve t_2 noktaları arasında uzanır. t_2

anında ise SHG'den BG fazına geçiş yapmaktadır. Daha sonraki aşamalarda (yani, BG ve FR aşamaları), çekiş kuvveti yoktur, bu nedenle enerji kaybı olmaz.



Şekil 3.5 Hareket fazları için değişim zamanlarını gösteren yapı

Trenin en fazla enerji harcadığı mod olan MGG modunda, trene mümkün olan en büyük çekiş gücü uygulanarak hızlanma sağlanır. Bu moddaki enerji kullanımı aşağıda verilen denklem (3.19) ile hesaplanır:

$$E_{MGG} = \int_0^{t_1} F_c(t).v(t) \tag{3.19}$$

Burada, E_{MGG} MGG fazındaki tüketilen enerjiyi, t_1 MGG fazından SHG fazına geçiş zamanını, F_c uygulanan cer kuvvetini ve v anlık hızı göstermektedir.

Trenin sabit hızını korumak için durum ivmesi sıfırlanmalıdır. SHG aşaması sırasında trene aktarılan çekme kuvveti bu nedenle trene uygulanan zıt kuvvetlere eşittir:

$$E_{SHG} = \int_{t_1}^{t_2} F_c(t).v_{SHG}(t) \tag{3.20}$$

Burada, E_{SHG} SHG fazında harcanan enerji, t_2 SHG fazından FR fazına geçiş anı, v_{SHG} talep edilen sabit hız değeridir.

Boşta gitme ve frenleme aşamalarında cer enerjisi tüketimi sıfır olduğu için herhangi bir denklem yazılmaz. Böylece toplam enerji tüketimi aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$E_{Toplam} = E_{MGG} + E_{SHG} \tag{3.21}$$

$$E_{toplam} = \int_0^{t_1} F_c(t).v(t) + \int_{t_1}^{t_2} F_{tr}(t).v_{SHG}(t) \tag{3.22}$$

3.4 Tren İşletim Optimizasyonuna Ait Genel Matematiksel Yaklaşım

Tren güzergahı boyunca hat profilindeki yapısal revizyonların yapılmasının yanı sıra tren işletim yönteminde yapılacak iyileştirmelerle de araçların enerji verimli yönetimi sağlanabilir. Birbirini izleyen istasyonlar arasında tren hareketi boyunca cer enerjisi tüketimini azaltmak, hız profili optimizasyonu problem olarak ele alınmaktadır. Hareket aşamaları arasındaki geçiş noktalarının bulunması, yolculuğun her aşamasında bulunduğu konuma bağlı olarak trenin hızının hesaplanmasına olanak sağlar. Fazlar arasındaki geçiş noktalarının doğru atanması, enerji tüketimini belirlediğinden, tez çalışmamız için birincil öneme sahiptir. i ve $i + 1$ istasyonları arasındaki yolculuk için en uygun geçiş noktalarını keşfetmek, aşağıdaki (3.23) formülünde gösterildiği gibi bir optimizasyon problemi olarak ele alınır.

$$amaç = \min_{t_1,t_2} \left(\int_0^{t_1} F_c(t).v(t) + \int_{t_1}^{t_2} F_c(t).v_{SHG}(t)\right) \tag{3.23}$$

Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu yukarıda gösterilen ifade ile temsil edilir. Sabit hızda gitme fazının başlangıç zamanı t_1 ile ve boşta gitme fazının başlangıç zamanı ise t_2 ile gösterilmektedir. Optimizasyon probleminde t_1 ve t_2'nin cer enerjisi tüketimini en aza indirecek değerleri aranır.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_c - F_f - F_R \pm F_G - F_V - F_T}{M_e} \qquad 0 \le t \le T_i \tag{3.24}$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t) \qquad 0 \le t \le T_i \tag{3.25}$$

Yukarıda verilen ifadeler durum denklemleridir. Bu denklemler, trenin yolculuğun başından sonuna kadar nasıl ilerleyeceğini belirtir.

$$t(0) = 0 \qquad x(0) = 0 \qquad v(0) = 0 \tag{3.26}$$

$$x(T_i) = X_i \qquad v(T_i) = 0 \tag{3.27}$$

Yukarıda belirtilen ifadeler, durum değişkenleri için başlangıç ve bitiş değerlerini sağlar. Uygulanacak cer gücünün hareket fazlarına göre değerini belirleyen ifadeler aşağıda verilmektedir.

$$F_c(t) = F_{cmax} \qquad 0 \le t \le k_1 \tag{3.28}$$

$$F_c(t) = 9.36 + 0.01756v_{t1} + 0.001764v_{t1}^2 \pm Mgsin\alpha + 10.5\left(\frac{a^0}{x_{cr}}\right) + 0{,}00013l_{tu} \quad k_1 \le t \le k_2 \tag{3.29}$$

$$F_c(t) = 0 \qquad k_2 \le t \le T_i \tag{3.30}$$

MGG fazında trenin cer kuvveti maksimum değerini alır (denklem (3.28)). SHG fazında ise cer kuvveti trene ters yönde etkiyen direnç kuvvetlerine eşittir (denklem (3.29)). BG ve FR fazlarında cer kuvveti uygulanmaz ve sıfırdır (denklem (3.30)).

$$F_f(t) = 0 \qquad 0 \le t \le k_3 \tag{3.31}$$

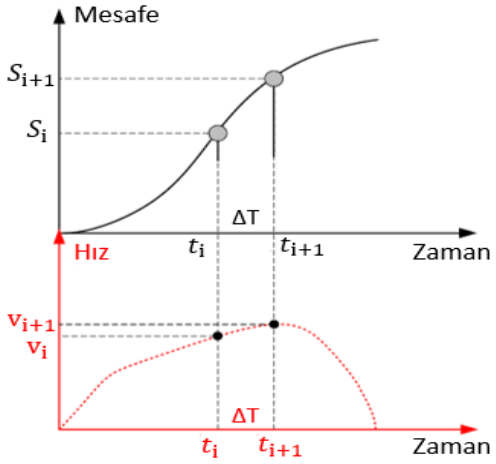
$$F_f(t) = F_{fmax} \qquad k_3 \le t \le T_i \tag{3.32}$$

Yolculuğun sonunda hedef istasyona ulaşılmadan önce tam frenleme gücü ile uygulanan son faz FR fazıdır. Bu sebeple BG fazından sonra frenleme değeri maksimum değerini alır (denklem (3.32)).

$$0 \le F_c \le F_{cmax} \tag{3.33}$$

$$0 \le F_f \le F_{fmax} \tag{3.34}$$

Cer ve frenleme kuvvetleri eksi değer alamazlar ve tanımlanan maksimum değerlerini aşamazlar (denklem (3.33) ve (3.34)). Durum değişkenleri, sistem dinamiklerini sürekli zamanda karakterize eden diferansiyel denklemlerde (3.24) ve (3.25), N adım için [0, T] zaman aralığında, Şekil 3.6'da görüldüğü üzere, ayrık zamana dönüştürülebilir.



Şekil 3.6 Tren hareket modelinde anlık hareketin zamana göre oluşumu

Şekil 3.6, aracın hareketine ilişkin bir örneği açıklamaktadır. Bu şekilde, mesafe-zaman ile hız-zaman arasındaki ilişki bulunabilir. Zaman aralığı ΔT ile ifade edilir. 0,25 saniyelik zaman adımı bu tezde kullanılan enerji değerlendirmesi için uygun görülmüştür. Hızlanma, hız, konum ve güç dahil olmak üzere aracın durumu, her zaman adımında sürüş kontrollerine göre hesaplanabilir. Bir sonraki adımdaki hız ve konum, (3.35) ve (3.36) denklemlerinde verilen ifadeler yardımıyla mevcut durum ve sürüş kontrolü ile hesaplanabilir.

$$v_{i+1} = v_i + a_i \,.\, \Delta T \tag{3.35}$$

$$s_{i+1} = s_i + (v_i \,.\, \Delta T + \frac{1}{2} \,.\, a_i \,.\, \Delta T^2 \tag{3.36}$$

$$\forall i \in \{0, \dots, N\} \tag{3.37}$$

Burada v_i, s_i ve a_i sırasıyla trenin i anındaki hızını, konumunu ve ivmesini belirtmektedir. ΔT adım boyutunu belirtmekte olup aşağıdaki ifade kullanılarak elde edilir:

$$\Delta T = \frac{T}{N} \tag{3.38}$$

i ∈ 0, …, N için (3.39) ile verilen amaç fonksiyonu süreksiz zamanda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\min_{i_1, i_2} (f(x)) = (\sum_{i=0}^{i_1} F_i \,.\, v_i \,.\, \Delta T + \sum_{i_1}^{i_2} F_i \,.\, v_{SHG} \,.\, \Delta T) \tag{3.39}$$

3.5 Geliştirilen Tren Hareket Simülatörünün Gerçek Bir Metro Hattı Üzerinde Doğrulanması

Tren hareketinin matematiksel modeli bölümünde tanıtılan THS'nin gerçek tren hareketleri ile doğrulanması, tez konusu kapsamındaki optimizasyon çalışmaları açısından oldukça önemlidir. Geliştirilen tren hareket simülatörünün doğruluğunu test etmek amacıyla M3 Metro hattında, gece işletmenin olmadığı saat aralığında, daha önceden belirlenen hızlanma profillerinde araç sürüşleri makinist kontrolünde yapılmıştır. Sürüşe ait tüm bilgiler (hızlanma, yavaşlama, mesafe, mekanik ve elektriksel güç talebi, enerji tüketimi vb.) Şekil 3.7'de gösterilen trene ait ölçüm cihazına harici bir bilgisayar ile bağlanılarak alınabilmektedir. Bu doğrultuda

öncelikle tekli istasyonlar arasında farklı sürüş mod bileşimlerine dayanan 3 adet test yapılmıştır. İlk testte MGG + BG + FR, ikinci testte MGG + FR ve üçüncü testte ise MGG + SHG + BG + FR sürüş modları kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Metro aracında bulunan ölçüm cihazı

Tekli istasyonlar arasında THS doğrulanmasının yanı sıra M3 Metro Hattı'nın çoklu ardışık istasyonları arasında ve gidiş-dönüş güzergahı boyunca hareket testi yapılarak simülatördeki tren hareketi ile karşılaştırılmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

3.5.1 M3 Hattı Siteler-Turgut Özal İstasyonları Arası Sürüş Testi-1

M3 Metro hattı ve bu hat üzerinde çalışan tren THS'de tüm gerçek parametreleri ile modellenmiştir. Modelin ne ölçüde doğru çalıştığının gösterilmesi amacıyla bu hat üzerindeki çeşitli istasyonlar arasında farklı hareket modlarında testler gerçekleştirilmiştir. Testler Şekil 3.8'de görülen boş bir tren ile (AW0) bir sürücü eşliğinde yapılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.8 Saha testlerine ait görseller; a)- THS doğrulanması için kullanılan trenin dış görseli, b) boş trenin iç görseli

Siteler-Turgut Özal istasyonları arasında daha önceden belirlenen senaryoda, MGG + BG + FR hareket modu dizisinde, sürücü eşliğinde tren sürülmüştür. İlgili sürüşe ait bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir. Ölçüm cihazından alınan bilgiler doğrultusunda bu sürüşte makinist 90 metre boyunca tam cer kuvveti ile hızlanarak 12,75 saniye içinde 51,9 km/h hıza ulaşmış, ardından 17,5 saniye süresince 254 metre boşta gitme fazında yol almış ve son olarak tam frenleme kuvveti uygulayarak 99 metrede 15 saniye içinde treni durdurmuştur. Test tamamlandığında sürüşe ait çeşitli bilgiler araç bilgisayarına bağlanılarak veriler THS'deki hareket sonuçları ile kıyaslanmak üzere kayıt edilmiştir.

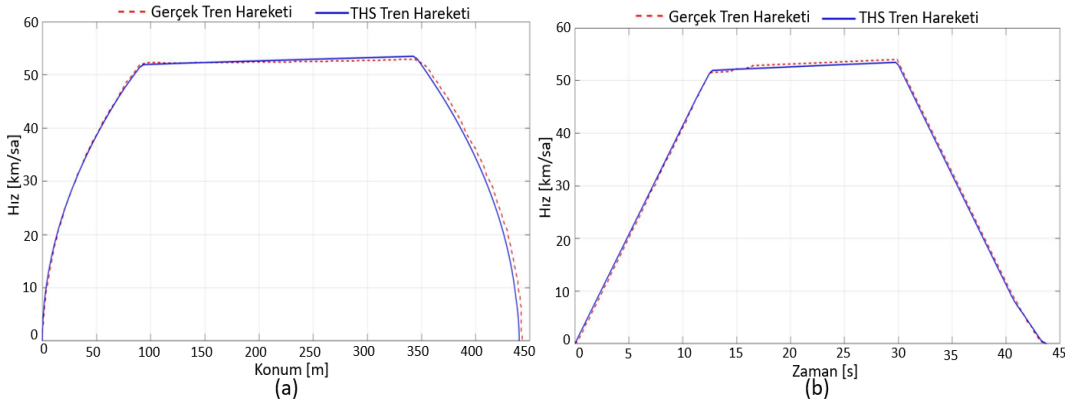
Tablo 3.1 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası test-1

Siteler-Turgut Özal istsayonları arası 52 km/sa hıza çıkılıp ardından 254 metre boşta gidilerek frenleme yapıldı			
Parametreler	**MGG fazı**	**BG fazı**	**FR fazı**
Başlangıç zamanı	02:08:40	02:08:53	02:09:10
Bitiş zamanı	02:08:51	02:09:09	02:09:24

Tablo 3.1 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası test-1 (devamı)

Siteler-Turgut Özal istsayonları arası 52 km/sa hıza çıkılıp ardından 254 metre boşta gidilerek frenleme yapıldı			
Parametreler	**MGG fazı**	**BG fazı**	**FR fazı**
Süre (sn)	12,75	17,50	15,00
Mesafe (m)	90,00	254,00	99,00
Ulaşılan hız (km/sa)	51,90	52,90	0,00

Geliştirilen tren hareket simülatörüne girilen veriler de aynı şekilde: 0-90 metre boyunca maksimum güç ile hızlanma, 90-344 metre arasında boşta gitme fazı ve ardından tam frenleme kuvveti uygulanarak duruş, şeklinde olmuştur. İlgili veriler girildikten sonra simülatör çalıştırılmış ve tren Matlab ortamında geliştirilen THS'de koşturulmuştur. Harekete ait ilgili hız-konum ve hız-zaman grafikleri çizdirilmiştir. Gerçek tren hareketi ile benzetim hareketlerinin karşılaştırılması Şekil 3.9'da verilmiştir. Buna göre modellenen tren, gerçek tren hareketini ihmal edilebilecek kadar küçük sapmalar ile benzetebilmiştir. THS'deki tren ile gerçek trenin, hareketi sırasında aynı konumlarda iken hızları da yaklaşık olarak aynıdır. Benzer şekilde harekete başladıktan sonra herhangi belirli zamandaki karşılık gelen hızları da yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 3.9 THS ve gerçek tren sürüşü karşılaştırmaları test-1; a) hız-konum karşılaştırması, b) hız-zaman karşılaştırması

Tablo 3.2'de gerçek tren ile THS'deki tren hareketi arasında MGG, BG ve FR fazlarındaki hareketlere ait detaylı kıyaslama yapılmıştır.

Tablo 3.2 Model doğruluk kıyaslaması-1

Karşılaştırma parametreleri	**Gerçek tren hareketi**	**Modellenen tren hareketi**
MGG fazında gidilen mesafe (m)	90,00	90,00
MGG fazında hareket süresi (sn)	12,75	12,53
MGG fazında ulaşılan hız (km/sa)	51,90	51,33
FR mesafesi (m)	99,00	96,40
BG süresi (sn)	17,50	17,30
BG sonunda ulaştığı hız (km/sa)	52,90	52,70
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	4,98	4,86
Toplam rejeneratif enerji üretimi (kWsa)	1,83	1,87

Tablo 3.3'te ise geliştirilen THS'nin, bu hareket testine göre, gerçek tren hareketine göre hata oranları verilmiştir.

Tablo 3.3 Model hata oranları-1

Karşılaştırma parametreleri	**Hata miktarı (%)**
MGG fazında hareket süresi	1,72
MGG fazında ulaşılan hız	1,09
FR mesafesi	2,62

Tablo 3.3 Model hata oranları-1 (devamı)

Karşılaştırma parametreleri	Hata miktarı (%)
BG süresi	1,14
BG sonunda ulaştığı hız	0,37
Toplam enerji tüketimi	2,41
Toplam rejeneratif enerji üretimi	-2,18

3.5.2 M3 Hattı İkitelli-İstoç İstasyonları Arası Sürüş Testi-2

M3 Metro hattının farklı iki istasyonu, İkitelli-İstoç, arasında MGG + FR hareket modu dizisinde yeniden tren sürülmüştür. Bu testin amacı maksimum cer gücü uygulanarak treni maksimum hıza ulaştırmak ve ardından maksimum frenleme kuvveti ile treni durdurmaktır. Bu hareket için de treni kaç metrede ve kaçıncı saniyede maksimum hıza ulaştığını bulmak, ne kadar mesafede hızını sıfıra düşürerek durduğunu belirlemek istenmiştir. Elde edilen veriler THS ile kıyaslanarak doğruluğu saptamak amaçlanmıştır. İlgili sürüşe ait detaylı bilgiler aşağıdaki Tablo 3.4'te verilmiştir.

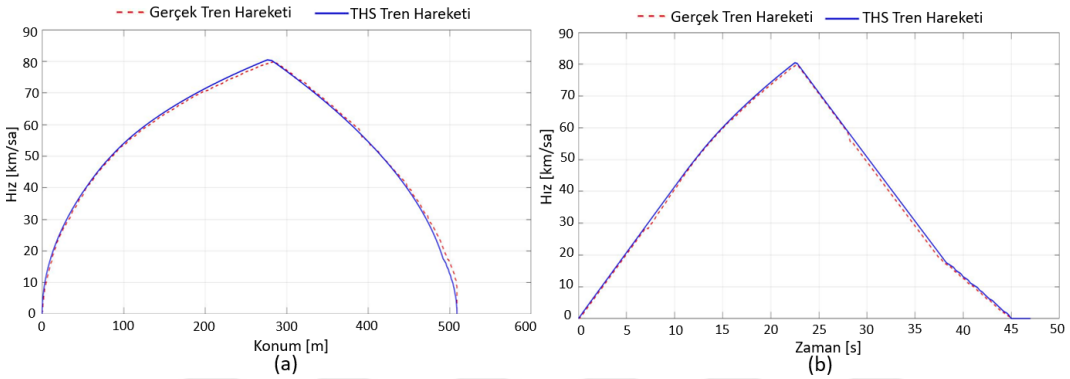
Tablo 3.4 İkitelli-İstoç istasyonları arası test-2

Karşılaştırma parametreleri	MGG fazı	FR fazı
Başlangıç zamanı	01:20:54	01:21:17
Bitiş zamanı	01:21:16	01:21:36
Süre (sn)	22,50	20,25
Mesafe (m)	279,00	230,00

Tablo 3.4 İkitelli-İstoç istasyonları arası test-2 (devamı)

Karşılaştırma parametreleri	MGG fazı	FR fazı
Ulaşılan maksimum hız (km/sa)	80,02	0,00

Bu sürüş profilinde makinist 279 metre boyunca maksimum cer kuvveti ile hızlanarak 80,2 km/h hıza ulaşmış ve ardından maksimum frenleme kuvveti ile durarak hareketini tamamlamıştır. Geliştirilen THS'ye benzer şekilde aynı veriler girilerek çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.10'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.10 THS ve gerçek tren sürüşü karşılaştırmaları test-2; a) hız-konum karşılaştırması, b) hız-zaman karşılaştırması

Gerçek tren hareketi ve THS sonuçları karşılaştırıldığında, geliştirilen modelin gerçek bir tren hareketini yüksek doğruluk oranı ile benzetebildiği bu test sonucu ile de gösterilmiştir. Tablo 3.5'te detaylı kıyaslama paylaşılmıştır.

Tablo 3.5 Model doğruluk kıyaslaması-2

Karşılaştırma parametreleri	Gerçek tren hareketi	Modellenen tren hareketi
MGG fazında gidilen mesafe (m)	279,00	279,00
MGG fazında hareket süresi (sn)	22,50	22,70
MGG fazında ulaşılan hız (km/sa)	80,20	80,14

Tablo 3.5 Model doğruluk kıyaslaması-2 (devamı)

Karşılaştırma parametreleri	Gerçek tren hareketi	Modellenen tren hareketi
FR mesafesi (m)	230,00	230,34
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	10,90	11,19
Toplam rejeneratif enerji üretimi (kWsa)	4,82	4,90

Modellenen tren hareketinin gerçek tren hareketine kıyaslanması sonucu elde edilen yüzdesel hatalar Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Model hata oranları-2

Karşılaştırma parametreleri	Hata miktarı (%)
MGG fazında hareket süresi	0,89
MGG fazında ulaşılan hız	0,08
FR mesafesi	0,14
Toplam enerji tüketimi	2,66
Toplam rejeneratif enerji üretimi	1,66

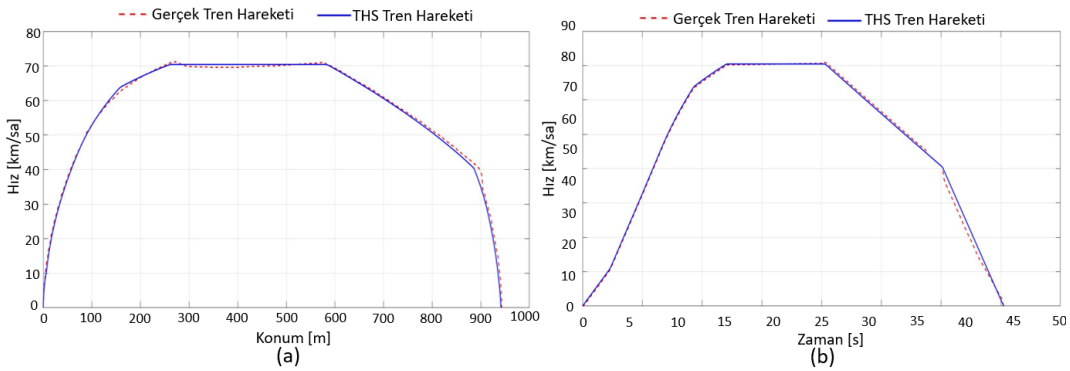
3.5.3 M3 Hattı İstoç-Mahmutbey İstasyonları Arası Sürüş Testi-3

İstoç - Mahmutbey güzergâhı üzerinde MGG + SHG + BG + FR hareket modunda bir kez daha tren sürülmüştür. Bu testte bir tren hareketine ait 4 hareket modunun tamamı kullanılmıştır. Her hareket modunda trenin ulaştığı anlık hız, konum, enerji tüketimi, … vb. açılardan THS başarılı şekilde gerçek tren hareketini benzetebilmiştir. Bu sürüşe ait detaylı bilgiler de Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7 İkitelli-İstoç istasyonları arası test-2

Karşılaştırma parametreleri	MGG fazı	SHG fazı	BG fazı	FR fazı
Başlangıç zamanı	02:36:41	02.37.03	02:37:20	02:37:38
Bitiş zamanı	02:37:03	02:37:19	02:37:38	02:37:50
Süre (sn)	22,5	17	19,25	13
Mesafe (m)	262	321	305	55
Ulaşılan maksimum hız (km/sa)	70,9	71	44,3	0

Bu sürüş profilinde makinist 262 metre boyunca maksimum cer kuvveti ile hızlanarak 70,9 km/h hıza ulaşmış ve ardından sırası ile Tablo 3.7'de görüldüğü üzere 321 metre sabit hızda gitme akabinde, 305 metre boşta gitme fazını uygulayarak hareketini devam ettirmiş ve en sonunda ise maksimum frenleme kuvveti ile 55 metre içinde hareketini tamamlamıştır. Geliştirilen THS'ye benzer şekilde ilgili veriler girilerek çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.11'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.11 THS ve gerçek tren sürüşü karşılaştırmaları test-3; a) hız-konum karşılaştırması, b) hız-zaman karşılaştırması

Şekil 3.11 incelendiğinde, diğer testlerde olduğu gibi aynı şartlarda, THS'de koşturulan tren ile gerçek tren hareketinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Aynı konum ve zaman dilimlerinde yaklaşık olarak aynı hızlarda hareketini sürdürmüştür. Gerçek tren hareketi ve THS sonuçlarının detaylı karşılaştırılması Tablo 3.8'de sunulmuştur.

Tablo 3.8 Model doğruluk kıyaslaması-3

Karşılaştırma parametreleri	Gerçek tren hareketi	Modellenen tren hareketi
MGG fazında gidilen mesafe (m)	262,00	262,00
MGG fazında hareket süresi (sn)	22,50	22,75
MGG fazında ulaşılan hız (km/sa)	70,90	70,32
BG süresi (sn)	19,25	20,00
BG sonunda ulaştığı hız (km/sa)	44,30	42,58
FR mesafesi (m)	55,00	55,33
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	16,80	17,21
Toplam rejeneratif enerji üretimi (kWsa)	1,21	1,24

Gerçek tren sürüşüne kıyasla önerilen THS modelinin hata oranları bilgileri Tablo 3.9'da paylaşılmıştır.

Tablo 3.9 Model hata oranları-3

Karşılaştırma parametreleri	Hata miktarı (%)
MGG fazında hareket süresi	1,10
MGG fazında ulaşılan hız	0,81
BG süresi	3,89
BG sonunda ulaştığı hız	3,88

Tablo 3.9 Model hata oranları-3 (devamı)

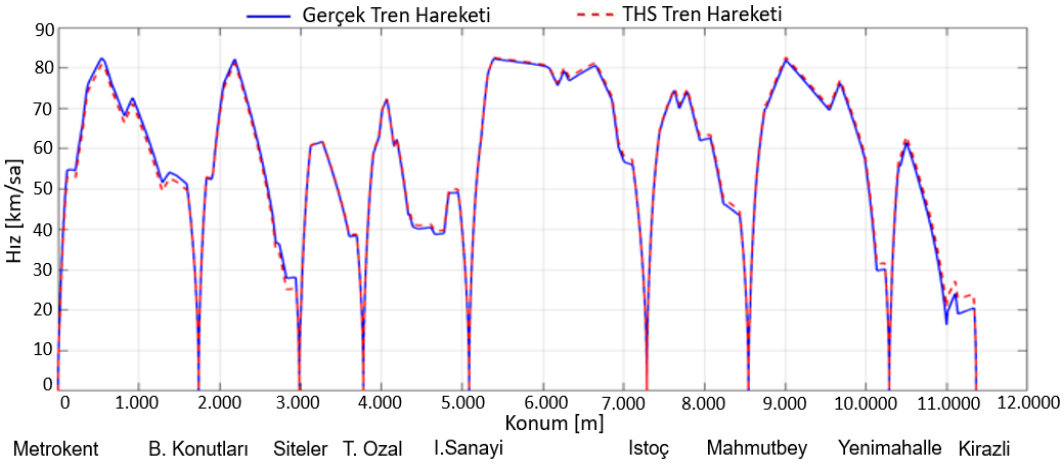
Karşılaştırma parametreleri	Hata miktarı (%)
FR mesafesi	0,60
Toplam enerji tüketimi	2,44
Toplam rejeneratif enerji üretimi	2,48

Tekli istasyonlar arasında çeşitli hareket modu dizilerinde gerçekleştirilen testlerin ardınan M3 Metro hattı gidiş-dönüş parkuru boyunca tüm istasyonlar arasında iki aşamalı bir başka test gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama Metrokent-Kirazlı İstasyonları arasında ikinci aşama ise Kirazlı-Metrokent istasyonları arasındaki sürüş testini içermektedir.

3.5.4 Metrokent-Kirazlı İstasyonları Arasında THS Doğrulama Testi

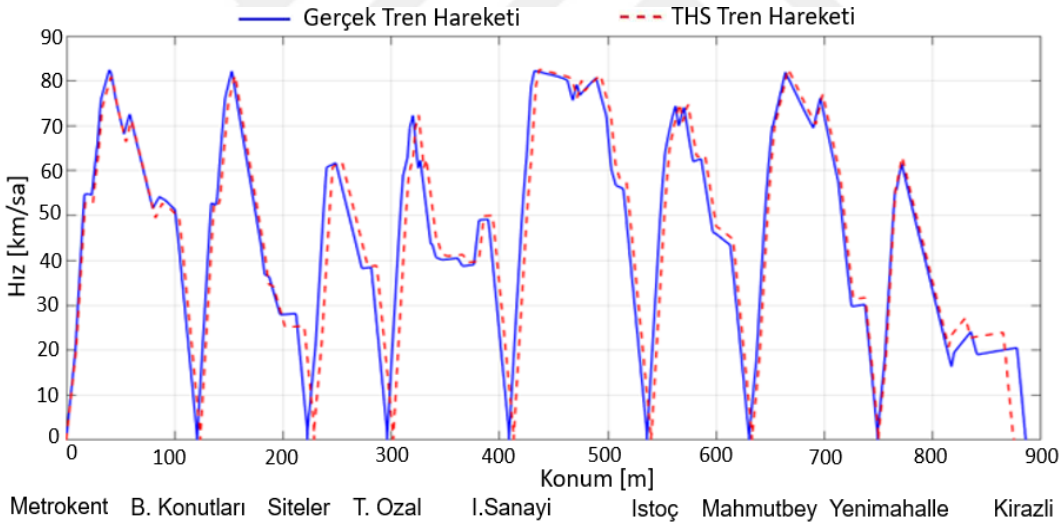
Bu hareket testi için bir tren sürücü eşliğinde Metrokent istasyonundan başlayarak Kirazlı istasyonuna kadar güncel işletmede olduğu gibi sürülmüştür. Sürüş sonunda her bir istasyon arası için dört hareket modunun, MGG, SHG, BG, FR, hangi oranda uygulandığı, istasyonlara varış süresi, enerji tüketimi ve rejeneratif frenleme enerjisi gibi veriler araç bilgisayarından elde edilmiştir. Tekli istasyonlar arasında gerçekleştirilen testlerde olduğu gibi, THS'ye de aynı veriler girilerek sanal ortamda aynı tren aynı şartlarda sürülmüştür. Gerçek tren ve THS sürüşüne ait çakıştırılmış hız-konum grafiği Şekil 3.12 ve hız-zaman grafiği ise Şekil 3.13'te verilmiştir.

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi simülasyon ortamında gerçekleştirilen tren hareketi, gerçek tren hareketine oldukça yakındır. Hemen hemen aynı mesafede aynı hızlarda ilerleyerek yolculuğunu tamamladığı görülmektedir.



Şekil 3.12 THS ve gerçek tren sürüşü Metrokent-Kirazlı istasyonları arası hız-konum karşılaştırması

Şekil 3.13'te verilen hız-zaman grafiğinde görüldüğü gibi simülasyon ortamında hareket eden tren neredeyse gerçek tren ile aynı sürelerde istasyonlara ulaşmıştır. Aynı zaman dilimi içerisindeki hızlanma değişimlerinin de birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13 THS ve gerçek tren sürüşü Metrokent-Kirazlı istasyonları arası hız-zaman karşılaştırması

Tablo 3.10'da, toplam seyahat süresi, enerji tüketimi ve rejeneratif frenleme enerjisi açısından THS ile gerçek tren hareketinin karşılaştırması sunulmuştur.

Tablo 3.10 Çok istsyonlu THS doğruluk karşılaştırması Metrokent-Kirazlı yönü

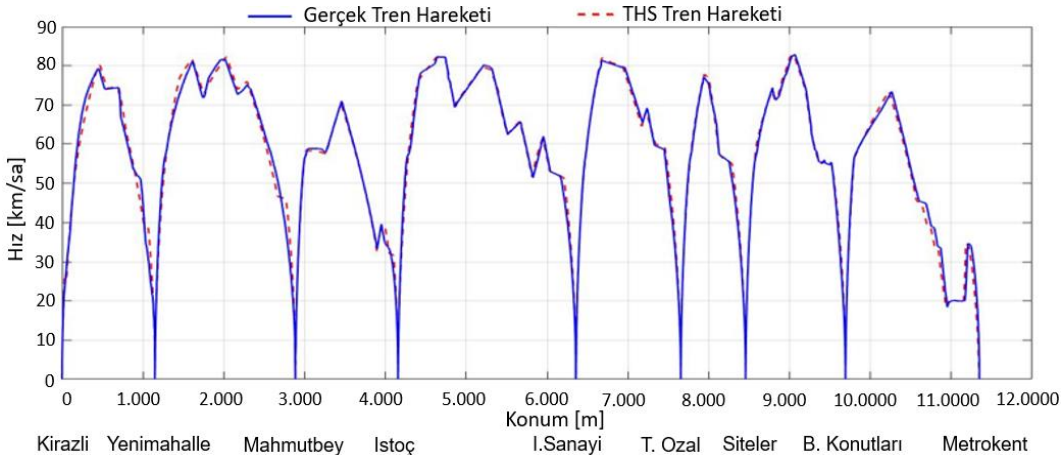
Karşılaştırma	Gerçek tren hareketi	THS	Hata oranı (%)
Toplam hareketi süresi (sn)	886,00	875,00	1,24
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	88,51	90,02	-1,70
Toplam rejeneratif enerji (kWsa)	18,00	18,80	-4,40

Elde edilen sonuçlara göre, geliştirilen THS'nin, Metrokent-Kirazlı yönündeki çoklu istasyonlar arasında gerçekleştirilen hareket testinde gerçek tren hareketini %95'in üzerinde bir doğrulukla benzetebildiği görülmüştür.

3.5.5 Kirazlı-Metrokent İstasyonları Arasında THS Doğrulama Testi

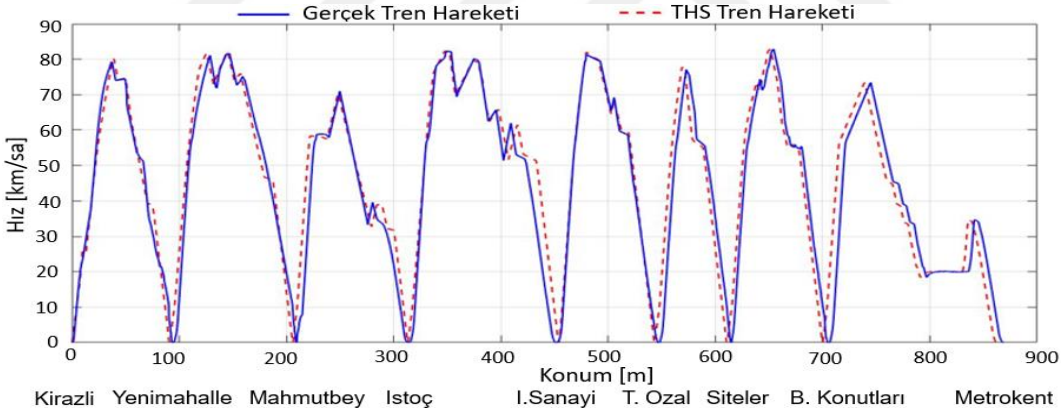
M3 Metro hattının dönüş güzergahı üzerindeki istasyonlar arasında, Kirazlı-Metrokent, benzer şekilde tren sürüş testi gerçekleştirilmiştir. Bir sürücü eşliğinde güncel işletme şartları altında olduğu gibi tren sürülmüştür. Sürüş sonunda her bir istasyon arasındaki hareket modları ve bu modlardaki tren sürüşüne ait bilgiler araç bilgisayarından alınarak, aynı sürüş THS'deki simülasyon ortamında tekrarlanmıştır. Her iki harekete ait hız-konum ve hız-zaman grafikleri üst üste çizdirilmiş ve sırasıyla Şekil 3.14 ve Şekil 13.5'te paylaşılmıştır.

Şekil 3.14'te görüldüğü gibi simülasyon ortamında hareket eden tren gerçek tren hareketine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Hemen hemen aynı konumlarda aynı hızlarda ilerleyerek yolculuğunu tamamladığı görülmektedir.



Şekil 3.14 THS ve gerçek tren sürüşü Kirazlı- Metrokent istasyonları arası hız-konum karşılaştırması

Şekil 3.15'te verilen hız-zaman grafiğinden görüldüğü gibi THS'de simülasyon ortamında hareket eden tren ile gerçek tren yaklaşık olarak aynı sürelerde istasyonlara ulaşmıştır. Aynı zaman dilimi içerisindeki hızlanma değişimlerinin de birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.15 THS ve gerçek tren sürüşü Kirazlı- Metrokent istasyonları arası hız-zaman karşılaştırması

Tablo 3.11, toplam seyahat süresi, enerji tüketimi ve rejeneratif frenleme enerjisi açısından THS ile gerçek tren hareketinin karşılaştırmasını vermektedir. Buna göre geliştirilen THS'nin, Kirazlı-Metrokent doğrultusundaki çoklu istasyonlar arası hareket testinde gerçek tren hareketini %97'nin üzerinde bir doğrulukla benzetebildiği anlaşılmaktadır.

Tablo 3.11 Çok istsyonlu THS doğruluk karşılaştırması Kirazlı- Metrokent yönü

Karşılaştırma	**Gerçek tren hareketi**	**THS**	**Hata oranı (%)**
Toplam hareketi süresi (sn)	869,00	863,25	0,66
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	119,00	116,37	2,21
Toplam rejeneratif enerji (kWsa)	15,70	16,12	-2,67

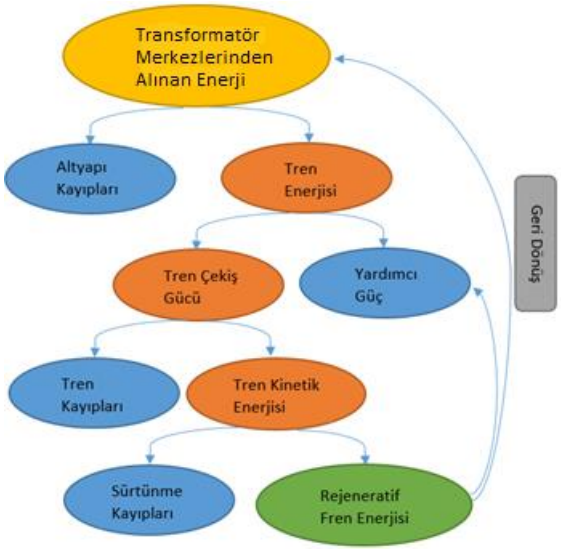
Geliştirilen THS'nin doğruluğu bu tez çalışmasının asıl odak noktası olan hızlanma profili optimizasyonu yöntemi ile cer enerjisi tüketiminin azaltılması probleminin doğru bir şekilde çözülebilmesi açısından oldukça önemlidir. Çalışmanın 5. bölümünde, daha önce de tanıtılan hareket geçiş noktalarının, MGG, SHG, BG ve FR, her bir istasyon arası için optimizasyonu yapılarak güncel sürüş profilindeki cer enerjisi tüketiminin azaltılmasına odaklanılacaktır.

4
RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ENERJİ TASARRUFU TEKNİKLERİ

Bir enerji hizmetinin, hizmet kalitesini düşürmeden, kullanımını azaltma çabası, enerji tasarrufu olarak bilinir. Enerjiyi daha etkili kullanarak ya da daha az tüketerek enerji tasarrufu yapmak mümkündür. Elektrik enerjisinin kullanıldığı her alanda enerji tasarrufu öncelikli araştırma alanlarından biridir. Bu alanda verimlilik çok önemli bir konudur çünkü demiryolu toplu taşıma sistemleri yüksek güç tüketimine sahiptir.

Raylı sistem enerji verimliliği genellikle iki kategoriye ayrılmaktadır: proje aşamasında alınan önlemler ve işletme sırasında alınan önlemler. Bununla birlikte bu konuda net bir farklılık bulunmamaktadır. Çünkü mevcut bir sistem daha sonra çeşitli verimlilik iyileştirmelerini içerecek şekilde genişletilebilir. Adından da anlaşılacağı gibi proje aşamasında yapılacak çalışma, henüz tasarım aşamasında olan ve henüz inşaatı veya işletmesine başlamamış raylı sistemler üzerinde olacaktır. Çoğu sistemde olduğu gibi, bu sistemlerde de başlangıçtan itibaren yapılan planlama, zaman zaman bir miktar maliyet artışına neden olur, ancak bunun getirisi, enerji verimliliğinde ve dolayısıyla çevrede önemli iyileşmeler sağlar.

Raylı sistemlerde tipik bir enerji akış şeması Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Transformatör merkezlerinden sağlanan elektrik enerjisinin bir kısmı iletim esnasında harcanırken, geriye kalan enerji trenler ve yardımcı sistemlerde tüketilmektedir. Trenler tarafından kullanılan enerji miktarı metro ve tramvay hatlarında farklılık göstermektedir. Metro sistemlerde enerjinin %55'i trenlere tahrik gücü sağlayan cer motorlarında kullanılırken geri kalan kısmı istsayonlarda ısıtma, soğutma, aydınlatma vb. sabit tesislerde kullanılmaktadır. Tramvay hatlarında ise enerjinin %95'i cer motorları tarafından kullanılırken kalan kısmı ise istasyonlardaki aydınlatma, reklam panoları vb. kısımlarda tüketilmektedir. Cer motorlarının enerjilenmesiyle harekete başlayan ve hızlanan tren frenleme (rejeneratif frenleme) esnasında generatör moduna geçerek enerji üretir. Yeniden üretilen frenleme enerjisi, doğrudan yardımcı sistem tarafından kullanılabilir veya ağdaki diğer trenleri beslemek için katener hatlarına geri aktarılabilir. Sonuç olarak, transformatör merkezi enerji tüketimi azaltılabilir.



Şekil 4.1 Raylı sistemlerde enerji akış şeması

Demiryolları için enerji tasarrufu çalışmaları ilk olarak 1960'larda başlamıştır [11]. Bu çalışmada trenin düz ve eğimsiz bir güzergahta çalıştırılacağı varsayılmıştır. Tren hareketinin basit bir matematik simülasyonu geliştirilmiştir. Maksimum hızlanma ve boşta gitme dahil olmak üzere enerji açısından verimli sürüş stratejileri önerilmiştir. Sonraki yıllarda, enerji tüketimi ve çevresel faktörler daha fazla ilgi görmüş ve demiryollarında tüketilen enerji üzerine yapılan çalışmalar daha fazla önem kazanmıştır. [99]'da kentiçi raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği ölçümlerine ilişkin iyi bir genel bakış sunulurken, genel raylı sistemler için enerji azaltma teknikleri [100] ve [69]'da gözden geçirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar enerji tüketiminin %20 ila 35 oranında azaltılabileceğini göstermiştir.

Raylı ulaşım sistemlerinde, enerji tasarruflu sürüş, rejeneratif frenleme, cer kayıplarının azaltılması ve akıllı güç yönetimi dahil olmak üzere, enerji verimliliği çalışmaları yapılabilecek çeşitli alanlar bulunmaktadır. Rejeneratif frenleme ve enerji tasarruflu sürüşün, enerji tüketimini azaltmak için diğer yöntemlere göre daha büyük bir potansiyele ve uygunluğa sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu tez çalışmasında, raylı sistemlerde enerji verimliliği çalışmaları aşağıdaki sıra ile incelenmiştir.

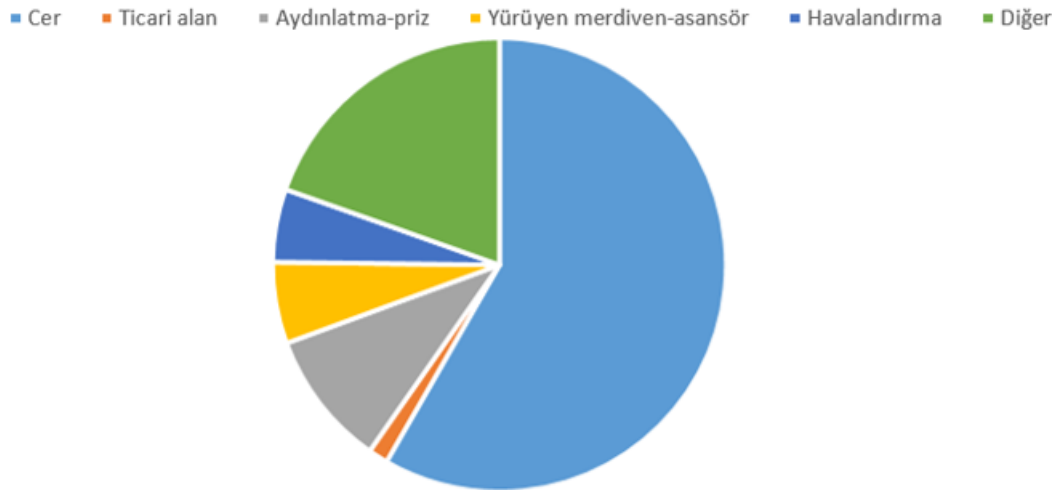
1. Cer enerjisi optimizasyonu
2. Rejeneratif frenleme enerjisi
3. Enerji depolama sistemleri
4. Sistem enerji optimizasyonu

5. İşletmesel enerji optimizasyonu
6. İlave enerji tasarrufu yöntemleri

Bu bölümde raylı sistemlerde enerji kullanımını en aza indirmek için kullanılan metodolojiler sunulmaktadır.

4.1 Çekiş (Cer) Enerjisi Optimizasyonu

Cer enerjisi metro ve tramvay hatlarında farklılık göstermekle birlikte enerjinin en çok tüketildiği kısımdır. Ortalama olarak tren hareketi için tüketilen elektrik enerjisi, toplam demiryolu enerji kullanımının yaklaşık %60 ila %70'ini oluşturmaktadır [101]. Örneğin, İstanbul metrosu için 2021 yılında toplam enerji tüketiminin %58,3'ünü (bkz. Şekil 4.2) çekiş enerjisi oluşturmuştur. Bu nedenle, çekiş enerjisi tüketimini azaltma konusu teorik ve pratik öneme sahiptir. Çekiş enerjisi tüketimi miktarı, aşağıdaki bölümlerde incelenecek olan, temel olarak sürüş tarzları, yol yatay-dikey hizalamaları ve tren parametreleri dahil olmak üzere çeşitli faktörler tarafından belirlenmektedir [53].



Şekil 4.2 İstanbul raylı ulaşım sistemi enerji tüketim dağılımı-2021 yılı

Çekiş enerji kullanımını etkileyen başlıca unsurlar aşağıdaki gibidir:

- Hattın geometrisi; demiryolunun iniş-çıkışlı güzergah tasarımı, istasyonların sıklığı ve konumları, dönemeçler, hız kısıtlamaları, v.b. rotaya bağlı kriterler,
- Tren özellikleri; kontrol mantığı, kütlesi, yapısı, cer motoru tasarımı, araç içi için kullanılacak yardımcı güç ekipmanları, v.b. kriterler,
- Enerji tasarruflu sürüş metotlarının geliştirilmesi,

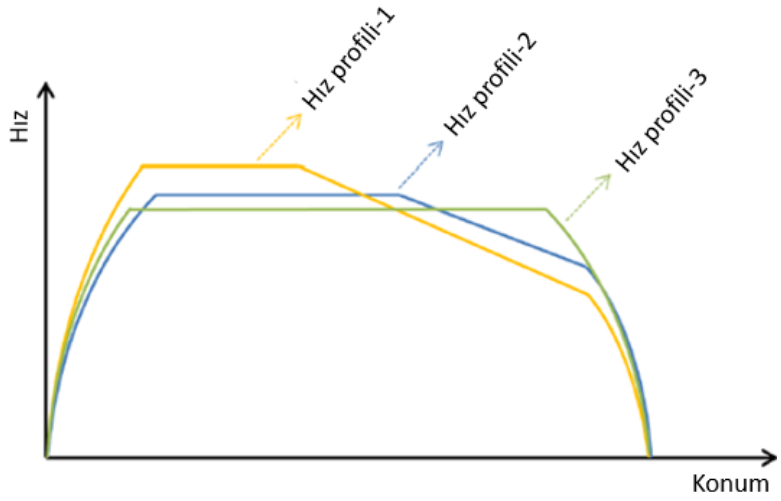
- Cer gücü besleme ve dağıtım sistemi; transformatör merkezleri (TM) miktarı ve konumları, katener veya 3. ray parametreleri, enerji besleme tasarımı, TM ekipmanları türü, vb. kriterler,
- Tren işletimi; trenler arası sefer süresi (TAS), vagon dizilimi, istasyonda bekleme süresi, vb. parametreler,

olarak sıralanabilir.

Mevcut hatlardaki genel enerji kullanımı bu unsurların bazılarının değiştirilmesiyle azaltılabilir. Çekiş enerjisi tüketiminin azaltılabilmesi için en etkili yöntem, trenlerin hız profillerinin optimize edilmesi yöntemi ile enerji verimli sürüşün sağlanmasıdır.

4.1.1 Enerji Verimli Sürüş

Tren hız profili, çekiş enerjisi tüketimini etkileyen önemli bir faktör olan tren sürüş kontrolleri tarafından belirlenir. Farklı sürüş stillerine sahip üç hız profili örneği Şekil 4.3'te verilmiştir. Hız profili 1, başlangıçta maksimum güçte gitme fazını daha uzun tutarak yüksek bir hıza ulaşmış ve bu da diğer iki profile kıyasla boşta gitme fazını daha uzun süre kullanma fırsatı sunmuştur. Hız profili 2, ortalama bir hıza kadar MGG fazını kullanmış ve hız profili 1'e göre daha kısa süre BG fazında hareket etmiştir. Hız profili 3, diğer ikisine kıyasla en düşük hıza kadar çıkmış ve uygun frenleme noktasına kadar SHG fazında gitmiştir. Farklı sürüş tekniklerinin enerji kullanımı üzerindeki etkisini inceleyen çok sayıda literatür çalışması bulunmaktadır. Optimize edilmemiş hareket ile karşılaştırıldığında, hız profili optimize edilmiş hareket, enerji tüketimini yaklaşık %30 oranında azaltabilir [102, 106].



Şekil 4.3 Çeşitli hız profili örnekleri

Enerji tasarruflu sürüş, onlarca yıldır üzerinde çalışılan daha az enerji tüketen sürüş kontrollerini ifade eder. Coasting kontrolüyle başlayan teknikler, senkronize tren işletiminden otomatik tren işletim sistemlerine kadar her şeyi içermektedir. Bir trenin enerji kullanımı, ekipmanına ve rotasına bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Trenin duraklama sayısı ve takip eden hızlanma hareketlerinin yanı sıra ulaşabileceği en yüksek hız miktarı, trenin kullandığı enerji miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Teorik açıdan bakıldığında, arada duraklama olmadan yavaş hızda yapılan bir yolculuk, enerji açısından en verimli rotadır. Trenin hızlanması için hareketine karşı çıkan kuvvetlerin üstesinden gelmek için gereken enerji, trenin hızlanması ve yavaşlaması sebebiyle üretilen enerjiden önemli ölçüde daha azdır. Fren enerjisi kullanılabilir faydalı enerjiye dönüştürülemediğinde, Coasting en etkili stratejidir [107]. Sürücü danışma sistemi gibi çalışan cihazlar da sürücüye nasıl seyahat edeceği ve nasıl zamanında varacağı konusunda talimatlar vererek enerji ekonomisinin artırılmasına yardımcı olabilir. Bir sonraki istasyona ulaşmadaki %10'luk küçük bir gecikme bile, hesaplanan iyi bir hız profili kullanıldığında %25'lik bir enerji kazancıyla sonuçlanabilir. Güzergahın yokuş aşağı bölümlerinde ise %45-50 oranında enerji tasarrufu elde edilebilir [108]. Beklenmedik gecikmeleri hesaba katmak için tarifeler sıklıkla tahmin edilen minimum yolculuk süresine belirli miktarda "rezerv süresi" ekler. Araştırmalar, yolcuların çok yüksek bir yüzdesinin, seyahat süresinin biraz kısaltılmasından ziyade dakikliğe değer verdiğini ve ayrılmış zaman aralıklarının dakikliğin bir başka önemli yönü olduğunu göstermektedir. 1997'de Chang ve arkadaşları enerji tüketimi, gecikme süresi ve sürüş konforunu dikkate alan uygun boşta gitme

kontrolü kullanarak tren hız profillerini optimize etmek için bir Genetik Algoritma optimizasyon yöntemi önermişlerdir [18]. Ön simülasyon sonuçlarından GA metodu, bu değişken boyutlu ve çok amaçlı optimizasyon problemi için güvenilir ve oldukça hızlı çözümler sunmuştur. Sürüş optimizasyonunda enerji tüketimi ve yolculuk süresi cezası dengesi dikkate alınmıştır [109]. Bir metro sistemi için, trenin istasyonlar arasında hareketi sırasında optimal boşta gitme noktalarını belirlemek amacıyla [63]'te hem klasik hem de sezgisel yaklaşımlardan yararlanılmıştır. Sezgisel bir yöntemin, klasik arama yöntemlerine kıyasla çoklu boşta gitme noktaları için daha hızlı ve daha iyi bir çözüm sunduğu ve çoklu boşta gitme noktalarının kontrolünün, uzun istasyonlar arası bir güzergahta tek boşta gitme noktasına göre daha iyi enerji tasarrufu sağladığı belirtilmiştir. Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Genetik Algoritma ve Dinamik Programlama gibi farklı arama algoritmaları [62]'da tekli tren ve çoklu tren yörüngelerini optimize etmede karşılaştırılmıştır. Dinamik Programlamanın, enerji tasarruflu sürüş stilleri aramada GA ve karınca kolonisi optimizasyonundan daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Çalışma kapsamında gecikmeden kaynaklanan enerji ve ceza maliyetlerini azaltmak için çoklu tren simülatörü geliştirilmiştir [61]. Bir başka araştırmada, yeni bir amaç fonksiyonu oluşturulmuş ve optimizasyon için GA ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmaları seçilmiştir. Çalışmanın test edilmesinde Ankaray metro hattı verileri kullanılmıştır. Önerilen optimize edilmiş sürüş, basit sürüş ile karşılaştırıldığında, sürüş için enerji tasarrufunun GA'da %13,79 ve ABC'de %13,45 olduğu sonucuna ulaşılmıştır [66]. Üç sezgisel yaklaşım, Genetik Benzetimli Tavlama (Genetic Simulated Annealing - GSA), Ateş Böceği (Firefly Algorithm - FA) ve Büyük Patlama-Büyük Çöküş (Big Bang-Big Crunch - BB-BC), 2017 yılında Keskin ve Karamancıoğlu tarafından tren hız profili optimizasyonu problemini çözmek amacıyla kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, GBT yöntemi optimale yakın çözümler sağlamada daha etkili olmuştur. AB kısa sürelerde çözüme yakınsasa da vasat çözümler gerçekleştirmiştir. BB-BC en düşük maliyetli çözüme ulaşırken, önemli bir hesaplama süresi gerektirmiştir [65].

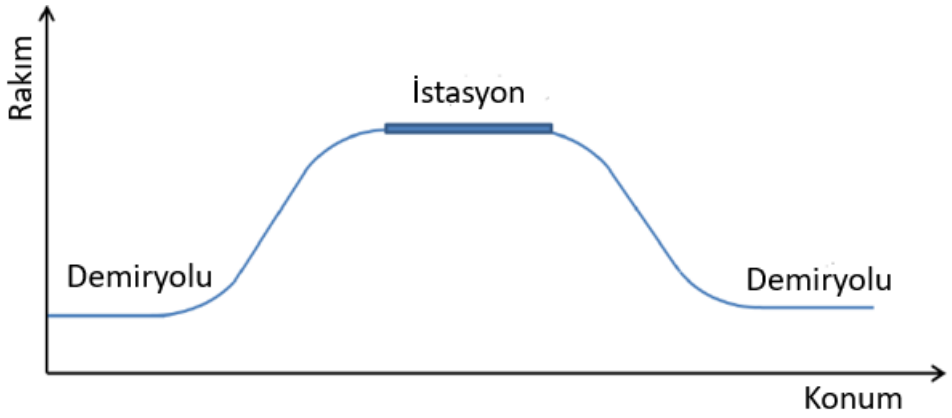
Sürücü Danışma Sistemleri (Driver Advisory Systems-DAS), son yıllarda sürücülere gerçekleştirilebilir enerji tasarrufu sağlayan çalışma bilgileri sağlamak için etkili bir araç haline gelmiştir [106]. Önceden yüklenmiş algoritmalara ve

verilere dayalı olarak yerleşik DAS, mevcut çalışma durumuna göre uygun zaman içinde hareket stratejileri sunabilmektedir. Basit ama etkili bir kabin içi DAS [110]'da tanıtılmıştır. Birleşik Krallık'taki bir tren işletim şirketiyle yapılan denemeler, her 20 milde bir duran tipik bir şehir içi güzergah için enerjiden %20'ye kadar tasarruf edilebileceğini göstermiştir.

Otomatik geçiş sistemlerinin ve iletişim tabanlı tren kontrolünün (communications-based train control - CBTC) geliştirilmesiyle, Otomatik Tren İşletmesi (Automatic Train Operation - ATO), daha güvenli ve daha uygun bütçeli servisler sunmada giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Chang, tren verimliliğini iyileştirmek için ATO sürüş denetleyicilerini optimize etmek amacıyla bir Diferansiyel Evrim (Differential Evolution - DE) algoritması önermiştir [111]. Enerji tüketimini yaklaşık %13 oranında azaltan optimum ATO hız komutları, Madrid'deki metro hatları için oluşturulmuş ve uygulamaya konulmuştur [112]. Gerçek işletme altında uygulanan ATO kontrollerinin ilkesi [113]'te değerlendirilmiş ve açıklanmıştır.

4.1.2 Güzergah Tasarımı

Çekiş enerjisi tüketimi, yolun engebeli kısımlarındaki eğim direnci de dahil olmak üzere bir dizi faktörden etkilenir. Farklı hat hizalamalarının çekiş enerjisi tüketimi üzerinde olumlu veya olumsuz etkisinin olmasının nedeni budur [114]. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi istasyon yüksekliği trenin potansiyel enerjiyi depolayabileceği şekilde (örneğin tepeler üzerinde) planlanabilir. Tren bu potansiyel enerjiyi istasyondan ayrılırken hızlanmak veya istasyona yaklaşırken yavaşlamak için kullanabilir. Sonuç olarak, çekiş enerjisinden tasarruf edilebilir ve yolculuk süresi azaltılabilir [115]. Kim ve Chien, yol hizalamasını, hız sınırını ve programa bağlılığı optimize ederek enerji tüketimini azaltmak için bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemin karar değişkenleri tren hareket fazlarının optimal zamanlamasını içermektedir. Amaç fonksiyonu toplam enerji tüketimini en aza indirmektir. Bunun için SA optimizasyon yöntemini tercih etmişlerdir. Önerilen yöntem Woodlawn, New York ve New Haven arasında çalışan Kuzey Banliyö demiryolunun bir bölümüne uygulanmıştır [43].



Şekil 4.4 Bir tepenin üzerine planlanan istasyon tasarımına bir örnek

[116]'da, aynı tür eğimdeki çeşitli trenler için frenleme ve çekiş enerji tüketimi incelenmiştir. Çalışma, olası her rota kombinasyonu için ideal eğim değeri belirlenmiştir. İstasyonlar arasındaki 1000 m gibi küçük mesafeler için hızlanma veya yavaşlama için enerji tasarrufu eğiminin %18 ile %30 arasında olması gerektiği keşfedilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre optimum gradyanın (eğimin), rota mesafesi arttıkça azaldığı belirtilmiştir. Örneğin, 1500 m istasyonlar arası mesafeye sahip bir rotanın enerji tasarruflu gradyanı %12 ile %20 arasında olması gerektiği sonucuna varılmıştır. İstasyonlardaki dikey hizalamayı optimize ederek enerji verimliliğini artırmak için bir başka çalışma da [117]'de önerilmiştir.

4.1.3 Araç Tasarımı

Araçlar tarafından katener sistemlerinden pantograflar vasıtasıyla alınan enerji, araç içerisinde çeşitli süreçlerde tüketilmektedir. Bu sürecin en önemli aşaması trenin işletme hız limitine ulaşıncaya kadar ivmelenmesidir. Newton'un kinetik enerji denklemine göre trenin ağırlığı ve hızının enerji tüketimi üzerinde direkt etkisi vardır. Kinetik enerjinin ivmelenme yoluyla üretilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte aniden hızlanmak, kinetik enerjinin hızın bir fonksiyonu olarak artması nedeniyle, çok fazla enerji tüketir. Ayrıca araç kütlesindeki %10'luk bir artış, araç enerji kullanımında da %6-8'lik bir artışa neden olur [118]. Alüminyum-paslanmaz çelik teknolojisi, çelik çerçeve yapısı ve sandviç yapı, trenin ağırlığını azaltarak enerji tasarrufu sağlamak için kullanılabilir. Tren hareketi, yüzey sürtünmesi ve aerodinamik sürtünme dahil olmak üzere çeşitli sürtünmeler nedeniyle engellenir. Ağırlık ve yapışkanlık yüzey sürtünmesinin iki özelliğidir. Aerodinamik sürtünmeye benzer şekilde viskoz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir ancak doğrudan hızın küpüyle ilgilidir [108].

Konfor özelliklerinin (ısıtma, havalandırma, soğutma ve aydınlatma) kullandığı enerji, yolcu trenlerinin kullandığı enerjinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Çekiş bileşenlerine göre daha yüksek teorik tasarruf potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu sistemlerin optimizasyonu hala daha az gelişmiş durumdadır. Akıllı iklimlendirme, çekiş bileşenlerinin ürettiği atık ısının kullanılması ve sıcaklık hedef değerlerinin dış ortam koşullarına göre değiştirilmesi bu alanda umut verici stratejiler olarak görünmektedir [108]. Park edilmiş trenler, beklemedeki (stand by) enerji kullanımlarını büyük ölçüde azaltmak için akıllıca kontrol edilebilir. Çekiş ve yardımcı dönüştürücülerin, araç ağırlığından tasarruf sağlaması ve sistem performansını iyileştirmesi beklenen merkezi soğutma sistemleri kullanılarak soğutulması sağlanabilir [119].

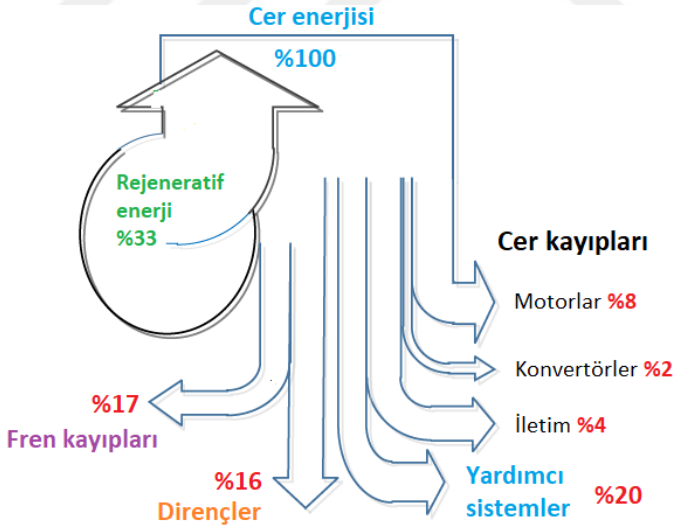
Diğer taraftan tren güç elektroniği cihazlarının tahrik zinciri kayıpları, toplam çekiş enerjisi tüketiminin %10 ila %15'ini oluşturur [100]. Cer motoru verimliliğini artırmaya yönelik teknolojiler [120]'de gözden geçirilmiştir. Düşük kayıplı elektrikli çelik levhalar ve düşük dirençli iletkenler gibi yüksek performanslı malzemeler geniş çapta araştırılmıştır. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların (Permanent Magnet Synchronous Motors-PMSM) uygulanması, çok yüksek bir verimlilik elde edebilen popüler bir teknoloji haline gelmektedir [121]. Kalıcı mıknatıslar nedeniyle çekiş kayıpları azaltılabilmektedir. PMSM'ler daha küçük, daha hafiftir ve daha düşük hızlara kadar rejeneratif frenlemeye izin verir, bu da faydalarını artırmaktadır.

4.2 Rejeneratif Frenleme Enerjisi

Trenlerin üzerinde yol aldıkları demiryolu sisteminin yükseklikleri ve trenlerin hızları arttıkça kinetik ve potansiyel enerji kazanırlar. Tren durduğunda trenin cer motorları jeneratör görevi gördüğü için bu enerji kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Geri besleme sayesinde üretilen bu faydalı elektrik enerjisini katener sistemi alabilmektedir. Bu süreç rejeneratif frenleme olarak bilinir ve çoğunlukla demiryolu sistemlerinde kullanılır.

Rejeneratif frenleme kullanan modenr raylı sistemlerde hızlanan trenler, hem frenleme yapan trenlerden hem de transformatör merkezlerinden enerji çekebilmektedir. Motorlar, tren frenlendiğinde tahrik şaftındaki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüşüm, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi ortalama

olarak bir trenin kullandığı toplam enerjinin %33'ünü temsil eder. Güzergah profiline bağlı olarak daha düşük veya yüksek bir oranda da olabilir. Ardından, geri üretilen elektrik enerjisi, aynı bölge içinde ivmelenme hareketi yapan diğer trenlere güç sağlamak için ağ sistemine geri aktarılır. Normal rejeneratif frenleme için, rejeneratif enerjinin tamamı diğer trenlere güç sağlamak için iletim ağına aktarılabilir. Bununla birlikte, rejeneratif frenleme katener hattının gerilimini artırabileceğinden, güç şebekesinde rejeneratif enerjiyi emen yeterli ivmelenme hareketi yapan tren olmadığında yüksek bir rejenerasyon gerilimi oluşacaktır. Yüksek gerilim tehlikesi durumunda, bir miktar fren enerjisinin katener hatlarına aktarılması engellenir. Frenleme enerjisinin bu kısmı, şebeke gerilimi güvenli değerin altına düşene kadar yerleşik fren reostasında ısı olarak harcanır [98]. Kore'de 1500 V'luk DC bir metro hattında rejeneratif frenleme tabanlı üretilen enerji miktarı incelenmiştir. Katener gerilimi ve akım ölçümleri kullanılarak hesaplanan yeniden kullanılabilir rejeneratif frenleme enerjisi için oran %21-39 aralığı elde edilmiştir [122]. Bu nedenle, raylı sistemlerde kullanılabilir rejeneratif enerji miktarının analiz edilmesi, iyileştirilmesi ve faydalı hale getirilmesi büyük önem arz etmektedir.



Şekil 4.5 Metro sistemlerinde enerji tüketimi dağılımı [97]

Bir raylı sistem işletmesinde, trenler arası sefer süresi uzunluğu veya ivmelenen-frenleyen trenlerin çakışmaması gibi sebeplerden dolayı rejeneratif frenleme enerjisinden fayda sağlanılamıyorsa, bu durumda bu enerjinin boşa gitmesi yerine daha sonra kullanılmak üzere depolanması gerekmektedir. Enerji depolamanın ilk uygulaması Londra Metrosu'nda yapılmış olup, kinetik enerji depolama teknolojisi

üzerine kurulu bir sistemdir. Tamamen statik bir süper kapasitör tabanlı enerji depolama sistemi olarak, bu teknoloji Almanya'nın Köln şehrinde de uygulanmıştır [123]. Şehir içi raylı sistemlerde rejeneratif frenleme enerjisini iyileştirmeye yönelik mevcut stratejiler [124]'te gözden geçirilmiş olup, zaman çizelgesi ve hız profili optimizasyonu ile enerji depolama sistemlerinin (EDS) ve tersinir transformatör merkezlerinin uygulanmasını içermektedir. Konu ile ilgili çalışmaların birinde Bellman-Ford algoritması kullanılarak frenleme hızı profilinin optimizasyonu, geri kazanılan enerji miktarını arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, rejeneratif frenleme enerjisinin %17,23 arttığı tespit edilmiştir. Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı, aynı güç şebekesinde çalışan trenlerin hızlanma fazı ile frenleme fazı senkronize edilerek iyileştirilebilmektedir. Bunu doğrulamak amacıyla elektrik şebekesinin bir güç akış modelinin kullanıldığı [125]'te senkronizasyonu optimize etmek için bir matematiksel programlama optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Optimize edilmiş zaman çizelgesi, mevcut yolcu akışının kalitesi üzerinde herhangi bir etki yaratmadan enerji tasarrufunu %7 oranında arttırmıştır. [77]'de ardışık trenlerin hızlanma ve frenleme hareketlerini senkronize etmek için bir tren işletimi çizelgeleme kuralı önerilmiştir. Pekin Metrosu ile ilgili bir vaka incelemesine dayanarak, GA kullanılarak en uygun zaman çizelgesi tasarlanması ile hızlanma ve frenlemenin çakışan süresi yaklaşık %22 oranında iyileştirilmiştir. Başka bir çalışmada Yang, frenleme hareketi yapan trenlerden üretilen rejeneratif enerjiyi ivmelenme aşamasındaki trenlerin kullanabilecekleri şekilde metro işletme programını optimize etmek için bir çizelgeleme stratejisi önermiştir. Optimal çizelgeyi elde edebilmek için GA tabanlı bir algoritma tasarlamıştır. Pekin Yizhuang metro hattının işletim verilerini kullanan çalışma, rejeneratif frenlemenin enerji kullanımını %22,06 oranında büyük oranda artırabileceğini göstermektedir [126].

4.3 Enerji Depolama Sistemleri

Günümüzde enerji depolama sistemleri (EDS) oldukça fazla ilgi görmeye başlamıştır. Bu sistemler, güç elektroniği ve EDS'deki gelişmeler sayesinde artık şehir içi demiryolu taşımacılığında rejeneratif fren enerjisinin geri dönüştürülmesi olanağını sağlamaktadırlar. EDS'ler yol kenarlarına belirli noktalara veya trenlerin üzerlerine yerleştirilebilir. Araç üzeri EDS yerleştirilmiş demiryolu araçları, fren

enerjilerini geçici olarak araç üzerinde depolayabilir ve daha sonraki hızlanma fazları için kullanabilmektedir. Öte yandan, yol kenarına yerleştirilen EDS'ler yakındaki frenleyen trenlerden enerji toplamakta ve hızlanan diğer trenlerin ihtiyacı olduğunda bu enerjiyi serbest bırakmaktadır.

Bilhassa DC gerilim ile çalışan kentiçi raylı sistemlerde, bir trenin fren enerjisinin diğer trenin ivmelenme enerjisine aktarılmasının koordinasyonu sağlanamadığında, bu enerjinin fren dirençlerinde yakılarak kaybolmaması için, enerjinin daha sonra kullanılmak üzere depolanması çok önemlidir. Yapılan ölçüm ve hesaplamalara göre hatta iletilen fren enerjisinin maksimum %40'ı, bu koordinasyon sağlansa dahi sadece frenleyen trenden 1 km mesafedeki trenin sürüş enerjisi için kullanılabilir [127]. Aksi takdirde aracın fren dirençleri frenleme enerjisini ısı olarak boşa harcamaktadır. Sonuç olarak demiryolu rotası boyunca belirli noktalara veya araç içerisine yerleştirilebilecek DC enerji depolama üniteleri, daha sonra kullanılmak üzere elektrik enerjisini depolamak için kullanılabilmektedir.

Enerji yoğunluğu, enerji verimliliği ve güç yoğunluğu EDS'ler için üç farklı kategoridir. Yararlı olup olmamalarında diğer unsurların da rolü vardır. Çalışma gücü, fiyat, boyut, ağırlık, yük döngüsü kapasitesi ve güvenlik bu hususlardan bazılarıdır [113]. Bataryalar, ultrakapasitörler, volanlar, araç üzeri depolama sistemleri ve yol kenarı depolama sistemleri gibi çeşitli EDS yöntemleri bu alanda kullanılmaktadır. Literatürde çeşitli EDS yöntemlerini temel alarak raylı sistemlerde enerji verimliliğini arttırmayı hedefleyen birçok çalışma mevcuttur. Anthony ve arkadaşlarının çalışmasında, rejeneratif frenleme enerjisinin kullanım oranını artırmak amacıyla yol kenarı volanlı EDS kurulmasını önerilmiştir. Analiz sonuçları, volanlı enerji depolamanın kullanıma girmesi ile %21,6'ya varan potansiyel enerji tasarrufu olduğunu göstermiştir. Volanlı enerji depolamanın katener hattı gerilim düşümünde %29,8'lik iyileştirmesi ve pik transformatör merkezi güç yükünde ise %30,1'lik azalma sağlaması açısından ek faydaları, test senaryolarında gösterilmiştir [128]. Sumpavakup ve arkadaşları, on-board EDS ile DC elektrikli demiryolunda optimum enerji tasarrufu üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Önerilen stratejide, geri kazanılan frenleme enerjisini depolamak ve depolanan enerjiyi her bir transformatör merkezinin tepe gücü azaltılacak şekilde güç şebekesine geri verilmesi için on-board EDS kullanılmaktadır. Tayland'daki Bangkok Toplu Taşıma Sistemi Silom Hattı, önerilen stratejiyi test etmek ve

doğrulamak için kullanılmıştır. Sonuçlar, transformatör tepe gücünün %63,49 oranında azaldığını ve net enerji tüketiminin %15,56 oranında düştüğünü göstermiştir [129]. Bolun Zhang ve arkadaşları Guangzhou Metro Hattı 7'yi modelleyerek simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, uzun süreli tren işletimi göz önüne alındığında, enerji depolama için Li-ion pilin kullanılması ile, %41,57 ile %31,90 arasında değişen bir enerji tasarrufu oranıyla sonuçlanmıştır [130]. Bir başka çalışmada ise Bangkok Hızlı Transit Sisteminin enerji tasarrufunu iyileştirmek için yol kenarı EDS uygulaması önerilmiştir. Önerilen tasarım uygulandığında, enerji tasarrufunun EDS'siz nominal çalışmaya kıyasla %3,6'ya kadar iyileştirilebilir olduğu görülmüştür [131]. Ratniyomchai, enerji depolama cihazlarının gelişmelerini ve uygulamalarını gözden geçirdiği çalışmasında piller, volanlar, elektrikli çift katmanlı kapasitörler ve hibrit enerji depolama cihazlarının bir karşılaştırmasını sunmuştur [132]. Bir başka çalışmada, enerji kayıplarını en aza indirmek için yol kenarı enerji depolama cihazlarının kapasitesi ve konumları optimize edilmiştir [133]. Enerji depolama sistemleri ile ilgili daha detaylı bilgi için demiryolu EDS'lerindeki bazı son gelişmelerin gözden geçirildiği ve çeşitli EDS teknolojileri için kapsamlı karşılaştırmaların sunulduğu çalışmalara bakılabilir. Bu çalışmalarda, demiryolu EDS'lerinin önde gelen işlevleri, akademik alandan önerilen olası çözümler ve demiryolu endüstrisindeki mevcut uygulamalar ile birlikte sunulmuştur. Ek olarak, demiryolu endüstrisindeki EDS uygulamalarının zorlukları ve gelecekteki eğilimleri kısaca tartışılmıştır [134, 135].

4.4 Sistem Enerji Optimizasyonu

Transformatör merkezlerinin elektrik şebekesinden aldığı enerji miktarına demiryolu sisteminde enerji tüketimi denir. Çekiş ve elektrik iletimi için gereken enerjinin yanı sıra yenilenebilir enerjinin geri dönüşü de dahil olmak üzere bu, demiryolu sisteminin net enerji tüketimini temsil eder. Dolayısıyla, sistem bazında enerji tüketiminin optimize edilebilmesi için hem hız profili hem de rejeneratif frenlemenin optimizasyonu eş zamanlı ve entegre olarak yapılmalıdır. Güç şebekesi düzenlemesi, sürüş stilleri, zaman çizelgeleri, … vb. dahil olmak üzere bir dizi parametre tarafından belirlendiği için, çekiş veya yenilenmiş enerji tüketiminin optimizasyonu ile karşılaştırıldığında, sistem enerji optimizasyonu daha karmaşıktır.

Demiryolu enerji optimizasyonuna ilişkin araştırmaların çoğunluğu çizelgeleme optimizasyonuna odaklanmıştır. [136]'da, sefer sürelerini (headway) ve istasyonda bekleme (dwell) sürelerini ve aynı zamanda hızlanma ve yavaşlama aşamalarının senkronizasyonunu maksimuma çıkarmak için stokastik işbirlikçi bir planlama stratejisi ortaya konmuştur. Pekin Yizhuang Metro Hattı ile ilgili bir vaka çalışmasına dayanarak, net enerji tüketimi, mevcut zaman çizelgesindeki işletime kıyasla %15,13 oranında azaltılmıştır. Li ve Lo, GA yöntemini kullanarak zaman çizelgesini ve hız yörüngesini ortaklaşa optimize etmek için entegre bir enerji verimli operasyon modelleme yaklaşımı önermişlerdir. Entegre yöntem kullanılarak net enerji tüketimi yaklaşık %20 oranında azaltılmıştır [80]. Cer enerjisi ile rejeneratif frenleme enerjisi arasındaki farkın amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı bir başka entegre çalışmada ise, trenler arası sefer süresi optimize edilerek enerji tüketiminde yaklaşık %19,2'lik tasarruf sağlandığı açıklanmıştır [137]. Scheepmaker ve Goverde [138], rezerv zamanı optimal bir şekilde ara duraklara dağıtarak, enerji veirmli tren operasyonunu uygulamışlar ve elde edilen programın güvenilirliğini incelemişlerdir. Albrecht ve Oettich [139], ekonomik sürüş sorununa çözüm ışığında enerji verimli seyahat süresini bulmak amacıyla bir DP tekniği önermişlerdir. GA yöntemine dayalı olarak Xiang ve Hong, zaman programlamasını ve hız profilini optimize etmek amacıyla ortak bir tasarım ortaya koymuşlardır. Çıktılar, mümkün olan maksimum enerji verimliliğinin %25 olduğunu göstermektedir [140].

4.5 İşletmesel Enerji Optimizasyonu

İşletmesel bazda tüketim, enerjiyi mümkün olan en az kayıpla son tüketim noktasına iletmekle azaltılabilir. Enerji dönüşüm kayıplarının azalması için güç aktarım organlarının verimliliğinin yükseltilmesi, enerji iletim kayıplarının azalması için yüksek gerilim mertebesinde iletilmesi veya süperiletken kabloların kullanılması, katener hatlarının paralellenerek hatlardaki yük oranının dengelenmesi ve tersinir cer transformatör merkezleri ile frenlemeden geri kazanılan enerjinin (eğer bir depolama sistemi yok ise) tekrar AC'ye dönüştürülerek işletmede kullanılması gibi önlemlerin alınması ile raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliğine katkı sağlanabilir.

4.5.1 Yüksek Gerilim İle Enerji İletimi

Demiryolu hatlarında enerji aktarımı çeşitli gerilim seviyelerinde mümkün olmaktadır. Bunlar 600 V DC, 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC, 15 kV AC 16,7 Hz ve 25 kV AC 50 Hz olarak sıralanabilir. Şehirlerarası uzun mesafeli raylı sistem uygulamalarında AC gerilimli sistemler kullanılırken, dünyadaki şehiriçi toplu taşıma sistemlerinin neredeyse tamamı DC gerilim ile çalışmaktadır. Enerji tedariği sistemi ve güç elektroniğindeki ilerlemeler, inşası yeni yapılan hatlarda 1500 V DC beslemeye olanak sağlamaktadır. $P_k=I^2.R$ eşitliğinde görüldüğü gibi kayıp güç, akımın karesi ile doğru orantılıdır. Sonuç olarak gerilim seviyesinin yükseltilmesi daha az akım çekilmesine neden olacak ve bu da hat kayıplarının düşmesini sağlayacaktır. Kayıpları azaltmak için İstanbul raylı taşıma sistemine ait M4, M5 ve M7 gibi yeni açılan metro hatlarında 1500 V DC besleme sistemi kullanılmaktadır. Transformatör ile tren arasındaki gerilim kaybı tasarım standartlarına göre %30'dan fazla olmamalıdır. 750 V yerine 1500 V kullanıldığında gerilim düşümü teorik olarak yarı yarıya azaltılabilir ve transformatörler arasındaki mesafe dört kat artırılabilir. 750 V için transformatörler arası 1,5 km normal mesafe iken bu mesafe 1500 V sistemlerinde 6 km'ye kadar çıkabilmektedir [119].

İstanbul Anadolu yakasında yapılan Üsküdar-Ümraniye metro hattının çekiş güç besleme sisteminin ön boyutlandırması yapılarak enerji tedariği sisteminin 750 V DC yerine 1500 V DC olarak seçilmesi durumunda, kayıp güç açısından tasarrufun %10 civarında olacağı sonucu elde edilmiştir [141].

Aynı şekilde Kadıköy - Kartal metrosunun verileri ile gerçekleştirilen çalışmada 2025 yılı işletme koşullarında yıllık tasarrufun 12,5 milyon kWh olacağı tespit edilmiştir. Bu değer bugünkü elektrik tarifesi, dağıtım bedeli [142] ve üretim bedeli [143] ile fiyatlandırıldığında ise; yıllık mali tasarruf 25,28 Milyon TL olacağı hesaplanmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar sonucunda İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) yeni metro hatlarında 1500 V DC enerji besleme sisteminin kullanılmasını kararlaştırmıştır ve yeni planlanan metro hatları buna göre projelendirilmektedir.

4.5.2 Katener Hatlarının Paralellenmesi

DC gerilimle beslenen gidiş-dönüş yönlü çift hatlı sistemlerde her iki yola ait katener sistemleri izole kablolarla (jumper) paralel bağlanabilir. Bu, özellikle hemzenin yolları kullanan tramvay hatları gibi geleneksel katener sistemlerinin kullanımının çevresel doku için uygun olmadığı durumlarda geçerlidir. Paralelleme görsel avantajının yanında enerji verimliliği de sağlamaktadır. Paralel bağlanan kabloların sıklığının enerji tüketimi üzerindeki etkisi araştırılmış ve sonuçlar [144]'te verilmiştir. Çalışmada, transformatör merkezleri arasında 1 veya 2 adet jumper ile paralleme yapılması durumunda %2,5 dolaylarında enerji tasarrufu, paralelleme sayılarının arttırılmasıyla da %5'e varan enerji verimliliği sağlanabileceği belirtilmiştir. Paralelleştirmenin başlıca avantajları şunlardır:

- Enerji kayıplarını azaltır.
- Akım bölüşümünü arttırır ve sistemin rahatlamasını sağlar.

Yapılan bir başka çalışmaya göre, sadece transformatör merkezleri arasına, hattın başında ve sonunda jumperlar yerleştirilmesi (2000 metrede bir) durumunda dahi toplam enerji tüketimi yaklaşık %2,5 oranında azaltılabilmektedir [145]. Yoğun tren çalışmasının olduğu sistemlerde, sık paralelleme ile enerji kullanımı %5 civarında düşürülebilmektedir [145].

4.5.3 Tersinir Cer Transformatör Merkezlerinin Kurulumu

Ters çevrilebilir transformatör merkezleri, diyot redresörleri kullanan geleneksel DC transformatör merkezlerinin aksine, çift yönlü güç akışına izin veren invertörlere sahiptir. Bu, mevcut yasalara bağlı olarak, yenilenen ve kullanılmayan enerjinin ya enerji tedarikçisine satılabileceği ya da mevcut AC şebekesine iade edilebileceği ve raylı sistem işletmeci firmasının şebekesinde (aydınlatma, asansörler, ofis ve idari binalar vb.) kullanılabileceği anlamına gelir. EDS'lerle kıyaslandığında, tersinir transformatör merkezleri daha düşük dönüşüm kayıpları ile çalışmaktadır. Ancak transformatör merkezinin bulunduğu yere bağlı olarak hattaki iletim kayıpları önemli boyutlara ulaşabilmektedir. Buna ek olarak, rejeneratif frenleme sırasında üretilen enerjiyi geri kazanma şansı da sunmaktadırlar. Ancak gerilim dengeleme veya tepe güç azaltma gibi görevlerde kullanılamazlar ve katener olmadan çalışmaya izin vermezler. Ayrıca yatırım maliyetleri de oldukça ciddi boyutlardadır. Bazı araştırmalara göre bu teknoloji,

mevcut kentiçi raylı sistemlerin kullandığı cer enerjisi miktarını %7 ila 11 oranında azaltabilmektedir [146,147].

Tersine çevrilebilir cer transformatör merkezlerinin sunduğu faydalar[148]:

- Rejeneratif frenleme enerjisinin geri dönüşüm miktarının arttırılması,
- Araçlar arasında doğal enerji iletiminin sağlanması ile fren direnci kullanımının ortadan kaldırılması ve neticesinde trenin ağırlığının ve sıcaklığının düşürülmesi,
- AC bölgede güç faktörü iyileştirilmesi ve harmonik seviyelerinin düşürülmesi,

olarak sıralanabilir. Bilbao metrosunda tersinir transformatör merkezi tesis edilmesi ile ilgili çalışmanın sonucunda, sistem tarafından kullanılan enerjiden %30 ile %50'si arasında bir geri kazanım sağlanabileceği belirtilmiştir [149].

4.5.4 Süperiletken İle Enerji İletimi

Süperiletken olarak adlandırılan maddeler tipik bir kritik sıcaklığın altındaki seviyelere kadar soğutulduğunda süperiletkenlik olarak bilinen bir olgu ortaya çıkar. Bunun sonucunda malzemenin elektrik direnci sıfıra düşer ve manyetik alanı kaybolur. 8 Nisan 1911'de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes tarafından bulunmuştur [150].

Süperiletken kablolar, aynı uzunluklardaki geleneksel bakır kablolardan 3 ila 5 kat daha fazla enerji taşıyabilmektedirler. Isıdan bağımsız bu kabloların, transformatörler arası geçiş bölgelerine döşenebileceği ve bunun da gelecekteki yerinde genişletmelerin maliyetini ve çevresel etkisini azaltmaya yardımcı olacağı öngörülmektedir. Süperiletken kablolar, konvansiyonel teknoloji ile üretilen iletkenlere göre çok daha az özdirence sahip olduklarından dolayı, enerji şebekelerindeki yükü iletmek ve şebeke sıkışıklığını azaltmak için kullanılabilmektedir [151].

Raylı sistem enerji taşınımı için süper iletken kablonun geliştirilmesi, rejeneratif frenleme enerjisi verimliliğinin yükselmesini, güç kaybının düşürülmesini, transformatör merkezleri arasında yük dengelemesini, daha küçük gerilim düşümü nedeniyle transformatör miktarının azalmasını ve kablo kesitlerinin düşmesini sağlayabilecektir.

4.5.5 Güç Aktarım Organlarında Optimizasyon

Güç kontrolü için tristör dönüştürücüler yerine GTO (Gate Turn Off Thyristor) teknolojisi kullanıldığında %40'a kadar daha az enerji kaybı yaşanmıştır. Bu teknolojideki modern bir gelişme olan IGBT (insulated-gate bipolar transistor) dönüştürücüler, gelişmiş kontrol algoritmalarıyla daha basit dönüştürücü modül paralelleştirmesi sağlamaktadırlar. IGBT teknolojisi yalnızca kayıpları azaltmakla kalmaz, aynı zamanda en iyi darbe genişliği modülasyonunu (PWM) sunmakta ve hattaki harmonik bozulmaları en aza indirebilmektedir [127].

Bununla birlikte, güç kaynağındaki ana kaybın meydana geldiği yer, dönüştürücü sistemi değil, transformatörlerdir. Yüksek elektrik enerjisi akışı göz önüne alındığında, geleneksel transformatörlerden süper iletken transformatörlere geçmek çok etkili bir çözümdür.

Aynı şekilde motor kayıpları da önemli rol oynamaktadır. Modern sabit mıknatıslı senkron motor gelişmeleri, ağırlık ve gürültünün yanı sıra kayıplarda da %50'ye ulaşan azalma sağlamaktadır. Bu motorların doğrudan akslara bağlı olması nedeniyle şanzımana gerek kalmamaktadır [127].

4.6 Diğer Enerji Tasarrufu Yöntemleri

Daha önce belirtilenlere ek olarak enerji tasarrufu sağlamanın birkaç yolu daha vardır. Bunlar arasında özellikle sıcaklık kontrollü tren ön ısıtma sistemleri, insan sayısı ve sıcaklıktaki değişikliklere göre kendini ayarlayabilen uyarlanabilir havalandırma sistemleri, ATO sistemleri, tren kütlesinin azaltılması ve aerodinamik yapının iyileştirilmesi yer almaktadır [107].

Yeraltı metro hatları, yolcu hareketliliğini, ticari hizmetleri ve konfor ile insan faktörlerine güçlü bir vurguyu birleştiren karmaşık sistemlerdir. HVAC (Isıtma, Havalandırma, Klima, Soğutma), aydınlatma, asansörler, yürüyen yollar ve bilgi/reklam vitrinleri genellikle enerji tüketen başlıca tesislerdir. Yaz aylarında, klima ve havalandırma enerji talebi toplam tüketimin üçte ikisini oluşturduğundan, metro istasyonlarında en fazla enerji genellikle HVAC ekipmanları tarafından kullanılmaktadır [43].

Sistem yeraltında olduğundan güvenlikten ödün vermeden bazı maliyet düşürücü teknikler kullanılabilir [152]:

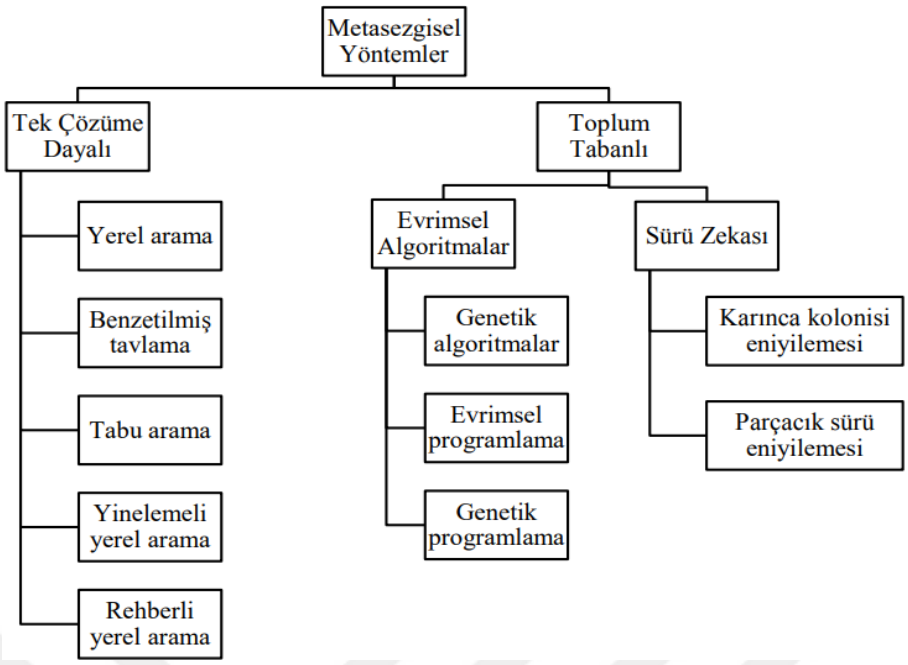
- İstasyonların güneş ışığından mümkün olduğunca yararlanacak şekilde tasarlanması,
- En iyi aydınlatma sistemlerini ve elektronik balast ampullerini mükemmel verimlilikte kullanılması,
- Yürüyen merdivenlerde frekans sürücüsü kullanılması,
- Yürüyen merdiven ve yürüyüş yollarının kullanıcılara duyarlı hale getirilmesi, onların uygun olmayan saatlerde çalışmasının önlenmesi,
- Ofisler ve idari binaların ısı yalıtımının yapılması,
- Planlı bakımların zamanında yapılması,
- Etkili çevre kontrol sistemi,

olarak sıralanabilir.

5
METASEZGİSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK CER ENERJİSİ OPTİMİZASYONU VE UYGULAMASI

Bilgisayar biliminde gerçek dünyadaki sorunları çözmek için çok sayıda algoritma oluşturulmuştur. Bu algoritmaların bir kısmı bilgisayar bilimcileri tarafından geliştirilmiş olsa da birçok farklı alandan başka algoritmalar da literatürde sunulmuştur. Ancak bilgisayarların ve bilgisayar hesaplamalarının yardımıyla bilgisayar bilimi, bu algoritmaların gerçek dünyadaki çeşitli sorunları çözmeye başlamasını sağlamıştır. Akademik topluluk sürekli olarak yeni yaklaşımlar önermekte ve mevcut yöntemleri geliştirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, optimizasyon çalışmalarında sıklıkla tercih edilen Genetik Algoritma, Benzetimli Tavlama Algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyonuna ek olarak 2020 yılında, yeni tanıtılan optimizasyon yöntemlerinden biri olan Deniz Yırtıcıları Algoritması da kullanılmıştır.

Mühendislik, işletme ve endüstri dahil olmak üzere birçok farklı disiplinde, doğadan ilham alınarak geliştirilen meta-sezgisel yöntemler zorlu optimizasyon problemlerini çözmek için başarıyla kullanılmaktadır. Arama sürecinde kaç çözümün kullanıldığına bağlı olarak bu stratejiler kategorize edilir. Topluluk tabanlı metasezgisel yöntemler, algoritmanın her yinelemesinde bir çözüm seti üzerinden ilerlerken, tek çözüm tabanlı metasezgisel yöntemler, arama sürecini tek bir çözüm üzerinden gerçekleştirir. Arama çözümlerinin miktarına göre temel meta-sezgisel yaklaşımlar Şekil 5.1'de kategorize edilmiştir.



Şekil 5.1 Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması [153]

İhtiyaca göre şekillenen çok çeşitli sayıda optimizasyon problemi mevcuttur. Bu problemlere mümkün olan en doğru yanıtı ya da en doğruya yakın bir çözümü aramak için bu tekniklerden faydalanabilinir. Ancak, herbir farklı problem çözümü özelinde algoritmalar birbirlerine göre daha üstün sonuçlar verebilmektedirler. Tablo 5.1'de algoritmaların nispeten daha üstün çözümler sunduğu bazı uygulama alanlar verilmiştir.

Tablo 5.1 Bazı metasezgisel yöntemler ve yaygın uygulama alanları [154, 155]

Metasezgisel yöntem	**Uygulama alanı**
Benzetimli tavlama	Finans, parti büyüklüğü belirleme, ürün karışımı belirleme, montaj hattı dengeleme ve çizelgeleme, gezici satıcı problemi, havayolu uçuşları çizelgeleme, araç rotalama, akış tipi çizelgeleme, ikinci dereceden atama problemi, tesis yerleşimi, kümeleme, paketleme problemleri

Tablo 5.1 Bazı metasezgisel yöntemler ve yaygın uygulama alanları (devamı) [154,155]

Metasezgisel yöntem	Uygulama alanı
Tabu arama	Yerleşim düzenlemesi, ikinci dereceden atama problemi, ana dağıtım üssü yer seçimi, konumlandırma ve tahsis, fabrika yer seçimi, hücre belirleme ve tasarım problemi, hücre çizelgeleme, süreç ve parça seçimi, üretim planlama ve çizelgeleme, kenar rotalama, çok depolu araç rotalama, araç yönlendirme, akış tipi planlama, kesme ve paketleme problemleri, gruplandırma ve kümeleme, çizge boyama, çizge bölmeleme,
Genetik algoritma	Karesel atama problemi, tesis planlaması, hücre ve parça oluşturma, hat dengeleme, yükleme ve paketleme, bakım planlaması, üretim ve süreç planlama, güvenilirlik iyileştirme, atama problemleri, kutu paketleme, gruplandırma, sırt çantası problemi, doğrusal programlama, çizge boyama, çizge bölmeleme, okul otobüsü yönlendirme, araç yönlendirme, akış tipi çizelgeleme, üretim atölyesi çizelgeleme, sıralama, zaman çizelgeleme, ekonometrik tahmin, benzetim eniyileme, finansal planlama
Evrimsel programlama	Görüntü işleme, çizelgeleme, rotalama, tasarım
Karınca kolonisi algoritması	Biyoenformatik, kümeleme, rotalama, çizelgeleme, veri madenciliği, atama problemleri, gezgin satıcı problemi, ikinci dereceden atama problemi, akış tipi çizelgeleme, iş çizelgeleme

Tablo 5.1 Bazı metasezgisel yöntemler ve yaygın uygulama alanları (devamı) [154,155]

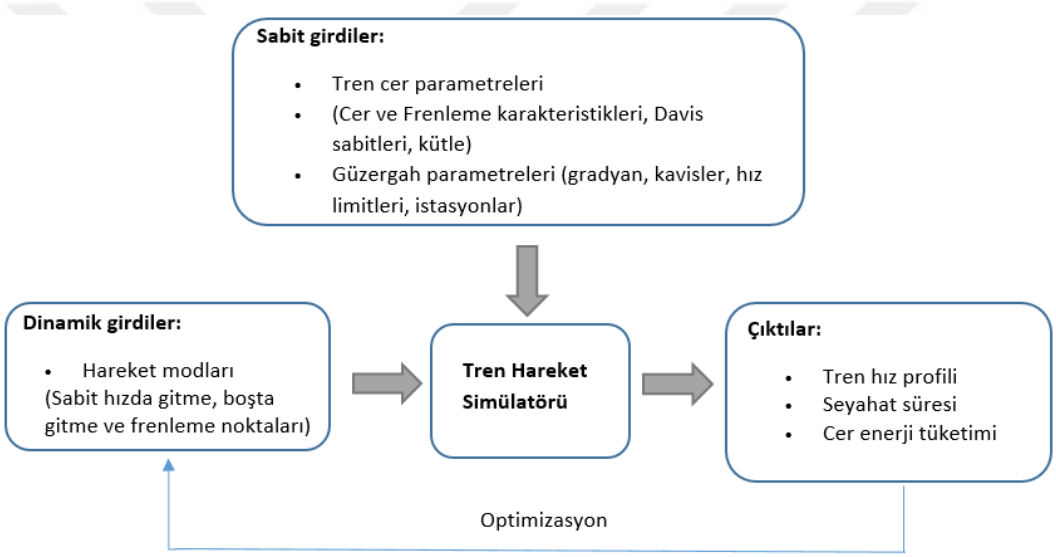
Metasezgisel yöntem	Uygulama alanı
Deniz yırtıcıları algoritması	Basınçlı kap tasarımı, kaynaklı kiriş tasarımı ve çekme/bastırma yayı tasarımı gibi belirli alanlarda kullanılabilir ve çok sayıda uygulamalı mühendislik problemlerine etkili çözümler sunar
Parçacık sürü algoritması	Kümeleme, tasarım, çizelgeleme, atölye tipi çizelgeleme, yapay sinir ağları, veri madenciliği, biyoenformatik

Bu tezin konusu olan enerji verimli tren işletiminin optimizasyon problemini ele alırsak, trenin yolculuğu sırasında, ilgili tüm işletmesel kısıtlamalara tabi olarak, tüketilecek enerjinin en aza indirilmesi arzu edilen durumdur. Enerji tüketiminin azalmasıyla birlikte sistemdeki başka parametrelerin de etkileneceği bellidir. Seyahat süresi, bunlar arasındaki en önemli olanıdır. Seyahat süresini artırarak enerji tüketimini azaltmak mümkündür. Ancak, bu iki parametrenin düşük değerlerde tutulması tren işletmecileri için önemlidir ve istenen bir durumdur. Bu nedenle, ortaya konulacak eniyileme probleminde bu denge korunmalıdır. Ayrıca, aracın gücüne ve hat koşullarına bağlı hız sınırlamalarının varlığı, yoldaki konfor ve kavis gibi faktörler optimizasyon probleminin sınırlarını belirlemektedir. Trenin enerji verimli çalışmasını sağlama problemi, birçok olası muhtemel makul çözümleri içeren bir çözüm uzayına sahiptir. Ancak, en iyi çözüm arayışı nedeniyle problemin niteliği küresel eniyileme olarak belirlenebilir.

5.1 Enerji Verimli Tren Sürüş Modeli

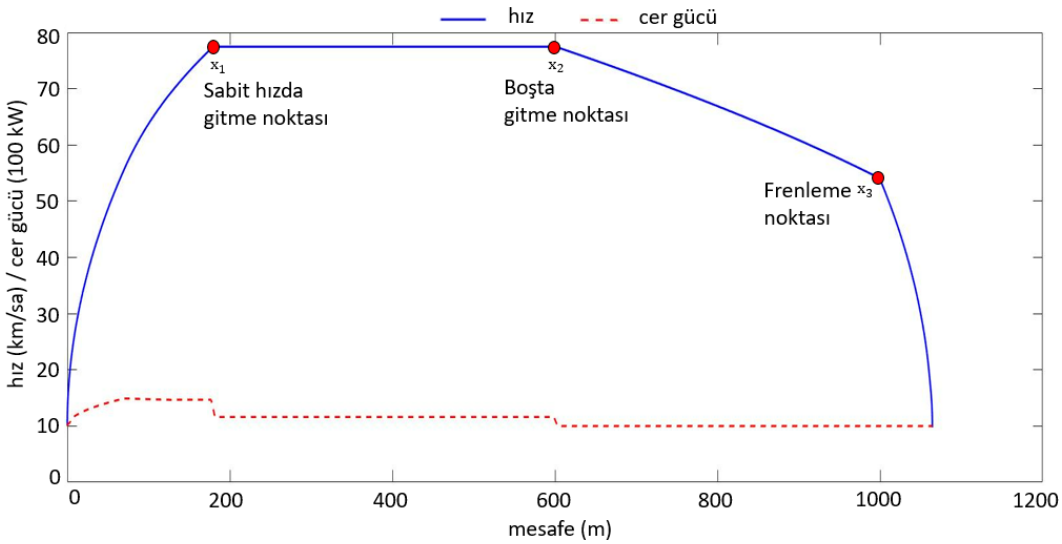
Tren sürüş tarzını ve enerji tüketimini belirleyen hız profili, dinamik girdilerin kontrolu ile sabit güzergah ve tren parametreleri kullanılarak üretilir. Enerji tasarruflu sürüş uzun bir süredir incelenmektedir ve boşta gitme kontrolünün enerji verimli bir çalışma olduğu Pontryagin maksimum ilkesi [156] ile kanıtlanmıştır. Bu

tezdeki tren hareketi operasyonu maksimum güçte gitme (MGG), sabit hızda gitme (SHG), boşta gitme (BG) ve frenlemeyi (FR) içermektedir. Uzun ve karmaşık bir istasyonlar arası mesafe rotası için (örneğin, çoklu hız limitleri veya birçok gradyan ve viraj değişikliği), çoklu SHG ve BG noktalarının uygulanması, tekli SHG ve BG noktalarının uygulanmasına kıyasla daha iyi enerji verimliliği sağlayabilir. Ancak, metro sistemlerinin tipik özellikleri ile bir sonraki istasyona olan mesafe genellikle kısadır. Çoklu BG kontrollerinin uygulanması mümkün olsa da, pratikte tekli SHG ve BG kontrollerinin iyi bir enerji verimliliği sağladığı gösterilmiştir [63]. Bu nedenle, bu tezde optimal tren hız profili, SHG ve BG hızları olmak üzere iki tekli dinamik girdi tarafından üretilmiştir. Şekil 5.2, sabit ve dinamik girdilerle tren hareket simülatörünün yapısını göstermektedir.



Şekil 5.2 Tren hareket simülatörü temel yapısı

SHG hızı, trenin ulaştığı belirli bir hızı koruyarak hareketine devam ettiği hız olarak tanımlanırken, BG hızı, trenin BG aşamasını bitirip frenlemeye geçtiği hız olarak tanımlanır. Bir tren hız profili örneği Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Buna göre, cer gücü eğrisinden, tren ilk kalkış anından MGG aşamasının sonuna kadar cer gücünün maksimuma yükseldiği görülebilir. Tren SHG halindeyken ise tren hareketine karşı olan direnç kuvvetlerini yenecek kadar bir cer gücü uygulanır. Tren BG veya FR aşamasında iken hiçbir cer gücüne gerek yoktur.



Şekil 5.3 Sürüş kontrollerine sahip bir hız yörüngesi örneği

5.1.1 Amaç Fonksiyonu

Bu tezde, tren hareket optimizasyonunun amacı, denklem 5.1'de verilen tren enerji tüketimini en aza indirmek için en uygun sürüş kontrollerini (MGG, SHG, BG ve FR) araştırmaktır.

Optimum bir strateji için, toplam enerji tüketimi hareket aşamalarına bölünebilir. Enerjinin en çok harcandığı MGG fazının bitiş noktası x_1 ile gösterilir. SHG fazında hız (V_{SHG}) sabittir ve cer kuvveti tren hareketine karşı olan direnç değerlerine (gradyan direnci, kurp direnci, ve tünel direnci) eşittir. Bu aşama, x_1 ve x_2 noktaları arasında uzanır. Daha sonraki aşamalarda (yani yavaşlama ve frenleme aşamaları), cer kuvveti yoktur, böylece enerji kaybı yaşanmaz.

$$E_{TOTAL} = E_{MGG} + E_{SHG} \tag{5.1}$$

Burada, E_{MGG} (kWh) ve E_{SHG} (kWh), maksimum hızda gitme ve sabit hızda gitme modları esnasında harcanan enerjileri göstermektedir. Duraklar arasında enerji verimli bir tren hareketi talep edilmektedir. Hareket modları arasındaki geçiş noktalarının doğru atanması, elektrik kullanımını belirlediğinden, ele alınan konu için birincil öneme sahiptir. i ve $i+1$ istasyonları arasındaki bir seyahat için en ideal geçiş noktalarının bulunması, denklem 5.2'de gösterildiği gibi bu çalışmanın amaç fonksiyonudur:

$$amaç = \min_{x_1,x_2} \int_0^{x_1} F_c(t).v(t) + \int_{x_1}^{x_2} F_c(t).v_{SHG}(t) \tag{5.2}$$

Burada, F_c (kN), trenin anlık $v(t)$ (m/sn) hızına karşılık gelen cer kuvvetidir.

5.1.2 Kısıtlamalar

Bir raylı taşıt hareketi için en büyük kısıtlama ray ile tekerlek arasındaki sürtünme (adezyon) kuvvetidir. Cer kuvveti ne kadar büyük olursa olsun maksimum net etkisi sürtünme kuvveti kadar olacaktır. Bu durumda, cer kuvveti de adezyon kuvveti ile sınırlandırılmış olur. Denklem 5.3'te bunu ifade eden eşitlik verilmiştir:

$$F_{max} = mg\eta \tag{5.3}$$

Burada, m (ton) trenin kütlesi, g (m/s^2) yerçekimi ivmesi ve η sürtünme sabitidir.

Cer kuvveti aynı zamanda trenin motor karakteristiğine bağlı olarak uygulanabilecek maksimum cer kuvveti ile sınırlandırılmış ve denklem 5.4 ile ifade edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi cer kuvveti MGG aşamasında maksimum seviyede uygulanır. SHG aşamasında tren hareketine karşı gelen direnç kuvvetlerini yenecek kadar uygulanır. BG ve FR aşamalarında ise sıfırdır.

$$0 \leq F_c \leq F_{cmax} \tag{5.4}$$

Benzer şekilde frenleme kuvveti de motor karakteristiğine bağlı olarak izin verilen maksimum frenleme gücü ile sınırlandırılmış ve denklem 5.5 ile ifade edilmiştir. Frenleme kuvveti FR aşamasında maksimum seviyede, tren tamamen durana kadar, uygulanmaktadır. Bunun haricinde hattın belirli noktalarında daha önceden tanımlanmış hız limitlerinde de maksimum seviyede veya kısmı olarak uygulanmaktadır.

$$0 \leq F_{fr} \leq F_{frmax} \tag{5.5}$$

Raylı sistem işletmeciliğinde zaman en önemli kısıtlamalardan bir tanesidir. Gerçek bir tren işletimi sağlayabilmek adına her bir istasyon aralığı için belirtilen seyahat süresi ve toplam seyahat süresine tabii olunmalıdır. Bunun için harekete başlama konumu, hareketin tamamlandığı konum, harekete başlama ve bitiş hızları ile seyahat süresi kısıtlamaları denklem 5.6'da tanımlanmıştır.

$$t(0) = 0; x(0) = 0; v(0) = 0; x(T_i) = X_i;\ v(T_i) = 0 \tag{5.6}$$

Burada, belirli bir istasyon aralığı için tanımlanan T_i (sn) süresi sonunda trenin ulaştığı konum X_i (m) ile ve bu süre sonunda da trenin ulaştığı son hız $v(T_i)$ (m/sn)

ile gösterilmiştir. Harekete başlangıç süresi başlangıç konumu ve başlangıç hızı 0 olarak tanımlanmıştır.

Eğer daha fazla enerji verimliliği sağlayabilmek adına daha önceden tanımlanan belirli seyahat süresine esneklik sağlanacaksa bu kısıtlama denklem 5.7 ile ifade edilebilir.

$$T_f = |T - T_{bs}| \tag{5.7}$$

Burada, T_{f} (sn) trenin yeni seyahat süresi ile daha önceden belirlenmiş seyahat süresi arasındaki farktır. T_{bs} (sn) ise belirlenmiş seyahat süresidir. Bu farkın belirli bir aralıkta tutulması istenir. Sehayat süresinin çok aşırı uzatılması da işletme açısından arzu edilen bir durum değildir. Bu sebeple, fark denklem 5.8'de verilen ifade ile kısıtlandırılmıştır.

$$T_f \leq T_{to} \tag{5.8}$$

Burada, T_{to} (sn) yeni seyahat süresi ile belirlenmiş seyahat süresi arasındaki toleranstır.

5.2 Genetik Algoritma (GA) ve GA İle Tren Hız Profili Optimizasyonu

Çalışmanın bu bölümünde odaklanılan optimizasyon problemi konusu, trenlerin hareketi sırasında meydana gelen cer enerjisi tüketimini en aza indirecek şekilde, her istasyon arası için enerji verimli bir tren hız profili üretmektir. Bu başlık altında öncelikle GA arama yöntemi tanıtılacaktır. Ardından bu yöntem ile, İstanbul M3 metro hattı işletme şartları dikkate alınarak, bu hat üzerinde çalışan trenin hız profili optimize edilerek mevcut makinist sürüşü ile kıyaslanacak ve bulgular tartışılacaktır.

5.2.1 Genetik Algoritma (GA)

Yapay zekanın en hızlı genişleyen dallarından biri, genetik algoritmalar adı verilen bir alt alanı içeren evrimsel hesaplamadır. GA, Darwin'in evrim teorisinden esinlenen metasezigel bir yöntemdir. I. Rechenberg, 1960'lı yıllarda Evrim Stratejileri adlı kitabında evrimsel hesaplama fikrini ortaya atmıştır. John Holand

1970'li yıllarda genetik algoritmaları geliştirmiş ve 1975 yılında bulgularını "Adaptation in Natural and Artificial Systems" kitabında sunmuştur [157].

Genetik algoritmaları diğer konvensiyonel optimizasyon tekniklerinden ayıran özellik, optimali aramaya "popülasyon" adı verilen bir dizi rasgele çözüm ile başlamasıdır. Popülasyondaki her bireye "kromozom" denir ve problemin olası muhtemel çözümünü temsil eder. Bir kromozom bir dizi sembolden oluşur. Genellikle bu semboller ikili bit (0,1) dizileridir. Yinelemeler sonucunda evrimleşen kromozomlara "nesil" denir. Her nesilde kromozomlar belirli bir kritere (uygunluk) göre değerlendirilir. Bir sonraki nesil, yeni kromozomlar (yavrular), ya mevcut nesilde iki kromozomun çaprazlanmasıyla ya da mutasyon operatörü kullanılarak bir kromozomun mutasyona uğratılmasıyla sağlanır. Bazı ebeveynler ve kromozomlar uygunluk değerlerine göre seçilerek veya elenerek yeni nesilsin devamı sağlanır. Değerlendirme kriterlerine göre değeri daha iyi olan kromozomların seçilme ihtimali diğer kromozomlara kıyasla daha yüksektir [158]. Birkaç nesil sonra algoritma, probleme optimal veya optimale yakın bir çözüm olması beklenen en iyi kromozoma yakınsar.

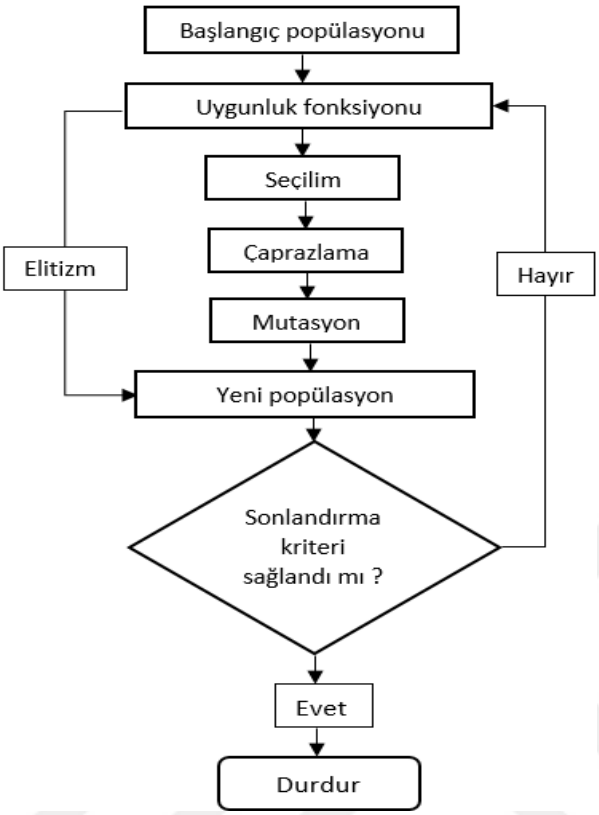
GA'nın genel yapısı Tablo 5.2 ile verilen kaba kod ile ifade edilir. Burada, n, nesil sayacıdır; Sn, maksimum nesil sayısıdır; Pn, n neslindeki popülasyondur; CMn ve CCn, sırasıyla mutasyon ve çaprazlama operatörleri tarafından elde edilen çocuk popülasyonlarıdır; Cn, çocuk popülasyonudur; ve Gn, mevcut nüfus ve onların çocukları tarafından oluşturulan genişletilmiş nüfustur.

Tablo 5.2 Genetik algoritma kaba kodu

n==1;
P_n'yi başlat;
P_n'yi değerlendir;
While durdurma kriteri sağlanmadı **do**
P_n'yi mutasyona uğrat ve CM_n'yi üret;
P_n'yi çaprazla ve CC_n'yi üret;
$C_g == CM_n \times CC_n$;
C_g'yi değerlendir;
$G_n == P_n \times C_g$;
G_n'den P_{n+1}'i seç;
n'yi artır;
End while

GA'lar mutasyon, çaprazlama ve seçilim gibi biyolojiden ilham alınmış operatörler üzerine inşa edilmişlerdir. Bir sonraki neslin yavrularını oluşturmak için üremeye

en uygun bireyler, doğal seleksiyon olarak bilinen bir süreçle seçilir. Buna göre, GA optimizasyon tekniğinin akış şeması Şekil 5.4'teki gibi gösterilir.



Şekil 5.4 Genetik algoritma akış şeması

5.2.1.1 Genetik Operatörler

GA'nın temel yapı taşları, algoritma kullanımdayken mevcut popülasyon üzerinde gerçekleştirilen işlemler olan genetik operatörlerdir. Bu operatörlere çaprazlama operatörleri (crossover), mutasyon operatörleri (mutation) veya seçme (selection) ya da yeniden üreme (reproduction) operatörleri denilebilir [159]. Genetik operatörler, gelişmiş özelliklere sahip nesiller yaratarak problem alanının boyutunu artırır. Tipik olarak üç farklı operatör kullanılır [160].

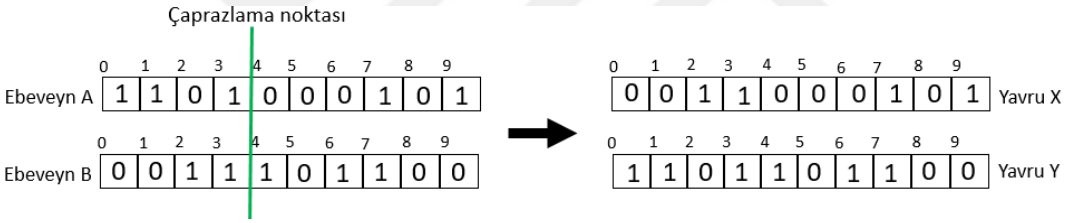
- **Çaprazlama (Crossover)**

İki farklı bireyin yapılarının rastgele bir araya getirilerek yeni bireyler üretilmesi sürecidir. Prosedürü tamamlamak için ikili dizi parçaları karşılıklı değiştirilir. Çaprazlama olasılığı, daha iyi özelliklere sahip kromozomlar üretmek için mevcut en iyi kromozomların özelliklerini birleştirmek için kullanılan çaprazlama operatörünün temel değişkenidir. Çaprazlama olasılığı değişkeni çaprazlamanın sıklığını belirler [161]. Üreme havuzuna giren kromozomların sayısı çaprazlama

olasılığına göre belirlenir. Bu oran yüksek olduğunda, yeni popülasyonda arzu edilen özelliklere sahip kişilerin belirlenmesi olasılığı azalır. Çok düşükse yeterli sayıda yeni birey oluşamaz [162]. GA'nın mükemmel performansı başarılı bir çaprazlama tekniğinin kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Aşağıdaki alt bölümlerde sıklıkla kullanılan çaprazlama teknikleri listelenmektedir.

- **Bir Noktalı Çaprazlama**

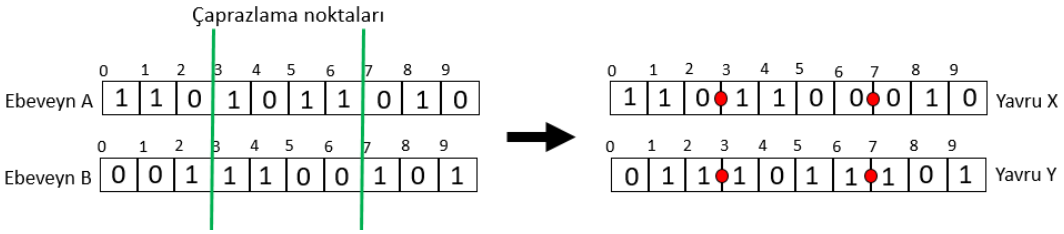
Bir noktalı çaprazlama operatöründe rastgele bir nokta seçilirSeçilen noktaya kadar olan genler alınır ve her iki kromozomdaki ilk genden başlanarak kromozomlar arasında değiştirilir. Tek noktalı çaprazlamanın bir örneği Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Bu durumda çaprazlama referans noktası 4 tercih edilmiştir. Ebeveyn A'dan alınan Da = {1,1,0,1} gen dizilimleri Yavru Y'ye ve Ebeveyn B'den alınan Db = {0,0,1,1} gen dizilimleri Yavru X'e aynı sırada ve çapraz olarak aktarılmıştır. Her bir yavru için geriye kalan genler sırasıyla Ebeveyn A'dan Yavru X'e ve Ebeveyn B'den Yavru Y'ye transfer edilir.



Şekil 5.5 Tek noktalı çaprazlama örneği

- **İki Noktalı Çaprazlama**

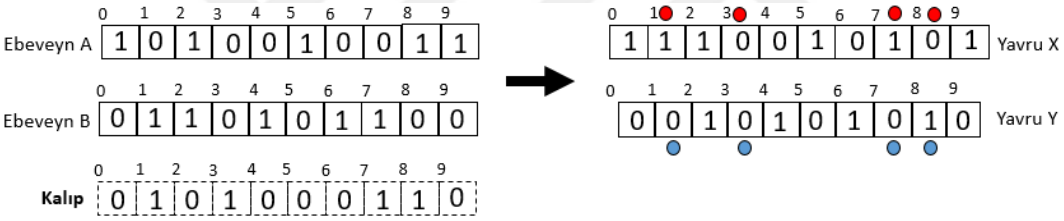
Tek nokta geçiş yöntemi her zaman yeterli olmayabilir ve büyük blokların bozulması performansı etkileyebilir. Sonuç olarak çift noktalı çaprazlama yaklaşımı tercih edilebilir. Rastgele seçilen iki konum arasındaki genler, bu prosedürde çaprazlanacak kromozomlar arasında değiştirilir. Şekil 5.6'da bu yöntemin daha iyi anlaşılması için bir örnek verilmiştir. Burada, Ebeveyn A'dan alınan Da = {1,0,1,1} gen dizilimleri Yavru Y'ye ve Ebeveyn B'den alınan Db = {1,1,0,0} gen dizilimleri Yavru X'e aynı sırada ve çapraz olarak aktarılmıştır. Her bir yavru için geriye kalan genler sırasıyla Ebeveyn A'dan Yavru X'e ve Ebeveyn B'den Yavru Y'ye transfer edilir. Çaprazlama konumlarının dışındaki genleri aktarırken ebeveynlerdeki aynı dizinin korunduğu unutulmamalıdır.



Şekil 5.6 Çift noktalı çaprazlama örneği

- **Uniform Çaprazlama**

Syswerda tarafından önerilen bir başka operatör de uniform çaprazlamadır. Bu yaklaşımda rastgele oluşturulmuş bir bit dizisi (kalıp), kromozomal gen uzunluğunda (g) belirlenir. Bu dizi üzerinde "0" bit değerine sahip alanlar çaprazlama için ihtiyaç duyulan geni A ebeveyninden, "1" bit değerine sahip alanlar ise B ebeveyninden alınarak çaprazlama yapılır. Bu işlemin tersi de diğer yavru kromozom için geçerlidir [163]. Şekil 5.7'de Uniform çaprazlama yöntemine bir örnek verilmiştir.



Şekil 5.7 Uniform çaprazlama örneği

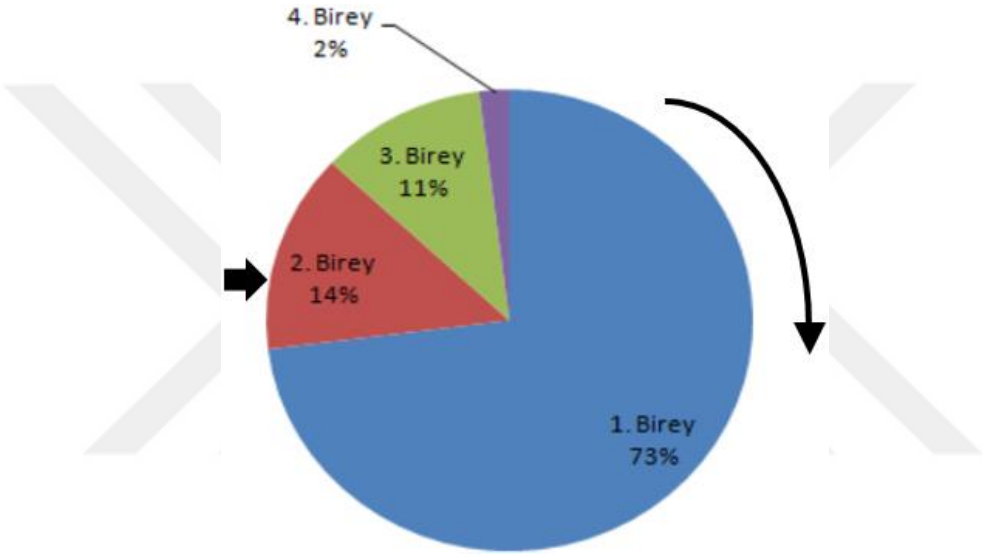
Burada, Ebeveyn A'dan alınmış (kırmızı nokta ile gösterilenler) Da = {0,0,0,1} gen dizilimi Yavru Y'ye ve Ebeveyn B'den alınmış (mavi nokta ile gösterilenler) Db = {1,0,1,0} gen dizilimi ise Yavru X'e aynı sıra düzeninde ve çapraz olarak aktarılmıştır. Her bir yavru için geriye kalan genler sırasıyla Ebeveyn A'dan Yavru X'e ve Ebeveyn B'den Yavru Y'ye transfer edilmiştir.

- **Seçilim (Selection)**

Seçim operatörü, algoritmanın sonraki nesiller için ebeveynleri nasıl seçeceğini belirler. Toplam nüfus içinde kötü olanların elenerek sürekli en iyiye gitme yönelimi, problemin en doğru veya doğruya yakın bir çözüme kavuşması açısından önemlidir. Seçim operatörünü uygulamanın farklı yolları vardır, popüler olanları aşağıda listelenmiştir.

- **Rulet Tekerleği Yöntemi Kullanarak Seçme**

Bu seçim yaklaşımını kullanan bireylerin seçilim olasılıkları uygunluk fonksiyonlarıyla ilişkilidir. Her bir aday çözümün uygunluk değeri hesaplanır ve toplam uygunluk değeri içerisindeki yüzdesi belirlenerek Şekil 5.8'de görüldüğü üzere bir daire dilimi içerisinde gösterilir. Dairesel çarkın etrafında sabit bir nokta belirlenerek çark döndürülür. Tekerleğin sabit noktanın önündeki alanı esas olarak seçilir. Böylece rulet çarkı seçilmek istenen sayı kadar döndürülerek işlem devam ettirilir. Bu tekerleğin amacı, daha yüksek kalite değerlerine daha fazla kopya oluşturma ihtimali vermektir [164].



Şekil 5.8 Rulet tekerleği yöntemi örneği [164]

Rulet çarkında en ideal olma olasılığı en yüksek olan değerler daha büyük pasta dilimleri üretir. Rulet çarkının döndürülmesi sabit noktaya yaklaşma olasılığını artırır. Sonuç olarak birey seçilme potansiyeli onun uygunluk değeriyle yakından ilişkilidir. Bu metodda, bir bireyin (j) geliştirilmek üzere seçilmesinin olasılığı (p_j), bu bireyin uygunluk değeri (f_j) ile doğru orantılıdır. Bu oran Eşitlik 5.9 ile hesaplanmaktadır:

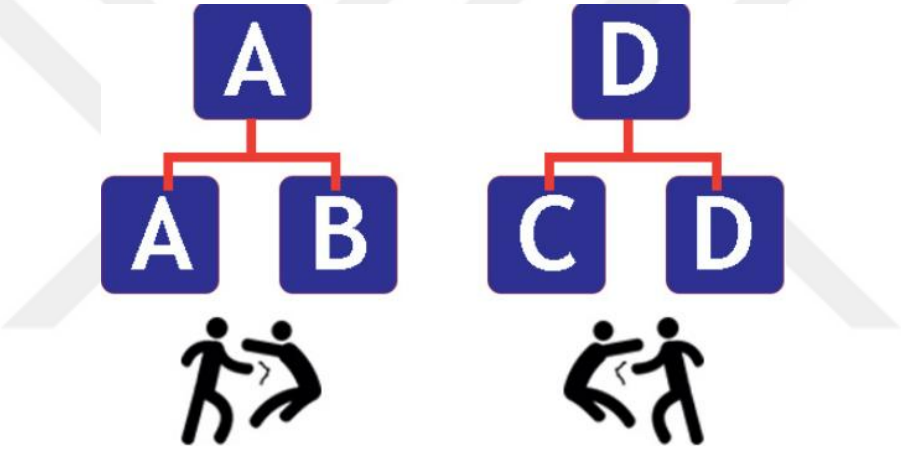
$$p_j = \frac{f_j}{\sum_{i=1}^{N} (f_j)} \tag{5.9}$$

Bu seçim yöntemi ile uygunluk değeri en iyi olan bireyler seçilirken, uygunluk değeri kötü olan bireyler de seçilebilmekte ve bu da popülasyonun çeşitliliğini sağlamaktadır. Diğer bireylere göre çok daha değerli olan bir süper bireyin varlığı,

iyi bireylerin toplumda hızla hakimiyet kurmasını sağlar. Algoritma olgunlaşmamış çözümlerde sıkışıp kaldığı için bu genellikle kötü bir durumdur. Bu problem uygunluk değerlerinden bağımsız bir strateji kullanılarak çözülebilir.

- **Turnuva Seçim Yöntemi**

Bu yaklaşımda, popülasyondan önceden belirlenmiş sayıda birey rastgele seçilir ve uygunluk değerlerine göre bir turnuvaya dahil edilir. Her turnuva için seçilenler arasından en yüksek uygunluk değerine sahip olan birey çaprazlama için seçilir. Şekil 5.9'da gösterildiği gibi popülasyondan keyfi olarak seçilen kişileri A, B, C ve D olarak adlandıralım. Önce A ile B karşılaştırılır. Uygunluk değeri daha büyük olan birey seçilir. C ve D karşılaştırıldıktan sonra uygunluk değeri en yüksek olan birey seçilir. Böylece uygunluk derecesi yüksek olan iki birey belirlenmiş olur.



Şekil 5.9 Turnuva yöntemi temsili [165]

Turnuvanın büyüklüğü seçim sonucunu etkileyebilir. Turnuva boyutu büyük olursa, daha güçlü bireylerin seçilme olasılığı artar. Bu seçim işleminin en büyük avantajı ise uygunluk değeri ile oransal olarak değişmiyor olmasıdır. Turnuva boyutu g olan bir seçme sürecinin tamamlanma sırası aşağıdaki gibi yapılır [166]:

- Turnuva karşılaşmasından en iyi birey p olasılığı ile seçilir,
- İkinci en iyi birey px$(1-p)$ olasılığı ile seçilir,
- Üçüncü en iyi birey px$(1-p)$2 olasılığı ile seçilir,
- …

- **Sıralamalı Seçme Yöntemi**

Bu stratejide adaylar, uygunluk derecelerine göre en iyiden en kötüye doğru sıralandıktan sonra Stokastik Evrensel Örnekleme yoluyla seçilir. Denklem 5.10 kullanılarak bu işlemin olasılığı hesaplanır [166]:

$$p_i = \frac{1}{|P|}\left[\eta^- + (\eta^+ - \eta^-)\frac{i-1}{|P|-1}\right] \tag{5.10}$$

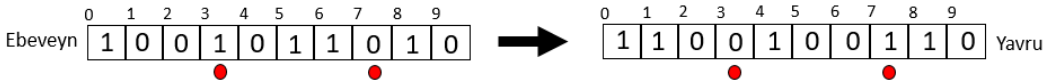
Burada, p_i, i ninci en iyi bireyin seçilme olasılığını gösterir.

- **Mutasyon**

Mevcut bir bireyden bir veya daha fazla geninin konumlarının değiştirilmesi ile mutasyon işlemi gerçekleştirilir. Kromozomda ne kadar değişiklik olacağını gösteren mutasyon olasılığı, önemli bir mutasyon parametresidir. Bu ihtimal sıfır olduğunda yeni bireyin oluşumu sırasında herhangi bir mutasyon meydana gelmez, %100 olduğunda ise kromozom yapısı tamamen değişir [167]. Şekil 5.10'da verilen örnekte kromozomun dördüncü geni mutasyon işlemine uğratılarak değiştirilmiş ve sağdaki yeni birey meydana getirilmiştir. Şekil 5.11'de verilen örnekte ise kromozomun 4. ve 8. geni mutasyona uğratılarak yeni Yavru elde edilmiştir.



Şekil 5.10 Tek gen mutasyon örneği



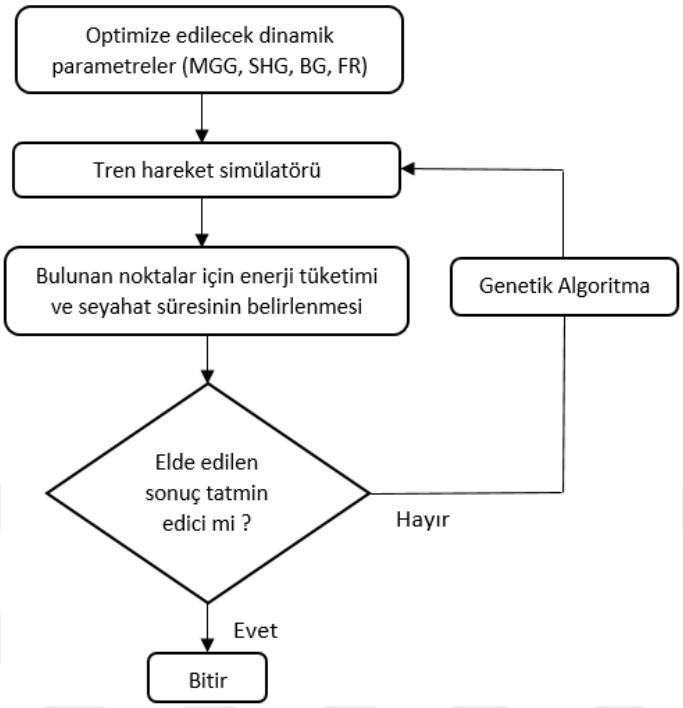
Şekil 5.11 İki gen mutasyon örneği

Genetik algoritmada mutasyon, seçilim süreçleri nedeniyle yok olan türlerin geri getirilmesi sürecinde ve soyu tükenmiş türlerin popülasyonlarının karıştırılması yoluyla tür çeşitliliğinin sağlanmasında çok önemli bir rol oynar.

5.2.2 GA İle Tren Hız Profili Optimizasyonu

Çok değişkenli ve çok bilinmeyenli bu tür problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılan Genetik Algoritma, her bir istasyon arasında en uygun tren hız profilini elde etmek için probleme uygulanmıştır. İki istasyon arasındaki yolculuk esnasında hareket modlarının geçiş konumları kontrol edilmek istenmiştir. Optimizasyon süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, Şekil 5.12'deki blok

şemasında görüldüğü üzere tren hareket simülatörü (THS) ve optimizasyon algoritmasıdır.



Şekil 5.12 GA tabanlı optimum geçiş noktalarının bulunması

5.2.2.1 Genetik Algoritma Parametreleri

Arzu edilen en iyi sonuçlara ulaşmak için GA parametrelerinin iyi tanımlanması gerekir. Bu süreç genellikle tekrarlanan denemelere ve hatalardan elde edilen çıkarımlara dayanır. Gerçekleştirilen çalışmada, Tablo 5.3'te verilen GA parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 5.3 Kullanılan genetic algoritma parametreleri

Parametre	**Değeri**
Popülasyon büyüklüğü	200
Seçme yöntemi	Rulet tekerleği yöntemi
Çaprazlama yöntemi	Çift noktalı çaprazlama
Mutasyon yöntemi	Tek gen

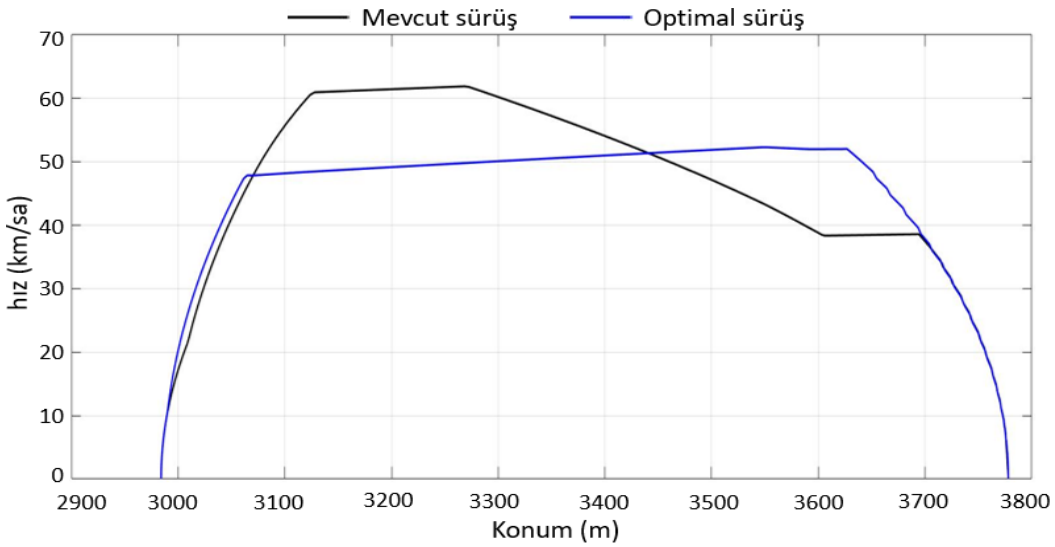
Tablo 5.3 Kullanılan genetic algoritma parametreleri (devamı)

Parametre	Değeri
Çaprazlama oranı	0,85
Mutasyon oranı	0,01

5.2.2.2 M3 Metro Hattı Tekli İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

Optimizasyon problemini çözecek sistemin birinci kısmı trenin hareketini gerçeğe en yakın şekilde benzetecek bir yazılım (THS) ve ikinci kısım ise amaç fonksiyonunun optimizasyonu için genetik algoritmadır. THS yazılımı, Matlab programında geliştirilmiştir. THS'nin görevi, sisteme başlangıçta girilen MGG, SHG, BG ve FR konumlarına göre aracın hareketini sağlamak ve bu hareket sonunda oluşan hız - zaman, hız - konum, yolculuk süresi ve enerji tüketimi bilgilerini elde etmektir. Genetik algoritma bu bilgileri alır. Sistem, amaç fonksiyonun değeri belirli sayıda (bu tez çalışmasında 100 kez) tekrarlanana kadar bir döngü içerisinde çalışmaktadır.

Bu tez çalışmasında, "Sistem Tanıtımı" başlığı altında tanıtılan M3 metro hattı ve bu hat üzerinde çalışan trenler dikkate alınarak analiz, simülasyon ve saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. M3 metro hattının mevcut hız profili, istasyonlar arası seyahat süresi ve enerji tüketimi refarans seçilerek GA'nın sunduğu optimal hız profili ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.13 Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüşün üst üste bindirilmiş çıktısını göstermektedir. Mevcut sürüş profilinde araç 60 km/sa'nın biraz daha üzerine çıkana kadar MGG fazını kullanmıştır. Optimal sürüşte ise yaklaşık 48 km/sa'ya kadar MGG fazını kullanmış ardından FR noktasına kadar BG fazında giderek hattın yokuş aşağı eğiminden faydalanmıştır. Dikkat edilirse bu iki istasyon arasında algoritma SHG fazını hiç kullanmamıştır. Bunun sebebi Siteler-Turgut Özal istasyonları arası mesafenin düşük ve hat profilinin de yokuş aşağı eğimli olmasıdır.



Şekil 5.13 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası GA ile optimize edilmiş sürüş

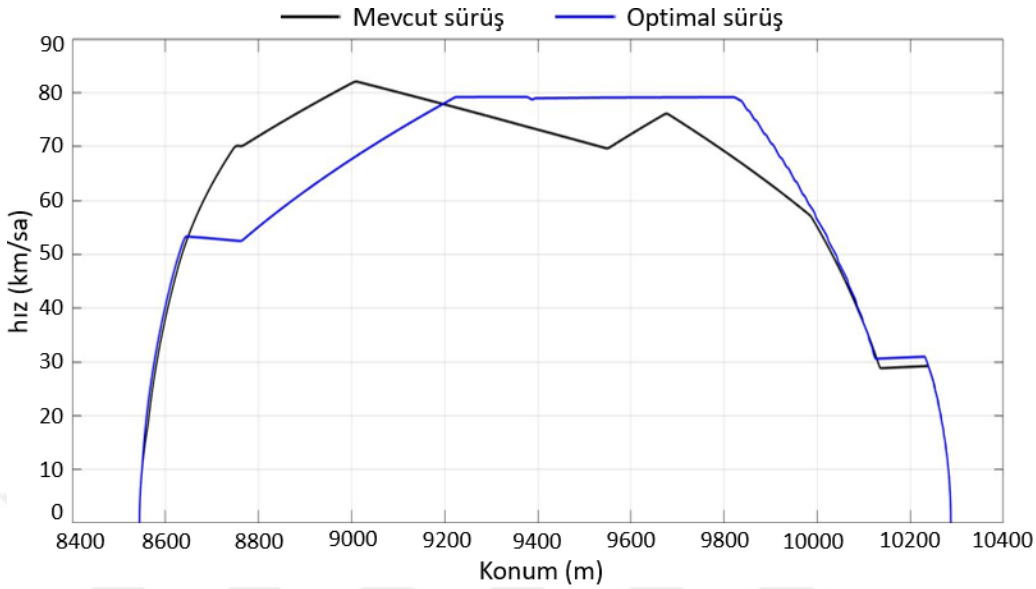
Tablo 5.4, Siteler-Turgut Özal istayonları arası sürüş simülasyonuna ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgilerini içermektedir. Bu tez çalışmasında, M3 metro hattının gerçek işletme şartları tamamen uygulanmıştır. Bu sebeple, algoritmaya optimizasyon sürecinde zaman açısından herhangi bir esneklik tanınmamıştır. Aşağıdaki tabloda da görüldüğü üzere her iki sürüş modelinde de 73 saniye içerisinde, gerçek işletme altında olması gerektiği gibi, seyahat başlamış ve tamamlanmıştır. Bu durumda mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüş profilinde 2.6881 kWh yani %39.52 enerji verimliliği sağlanmıştır.

Tablo 5.4 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası karşılaştırma tablosu

Parametre	**Mevcut Sürüş Profili**	**Optimal Sürüş Profili**
Seyahat süresi (sn)	73,00	73,00
Enerji tüketimi (kWh)	6,8022	4,1141

Benzer şekilde Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arasında durağan halden hareketine başlayarak tekrar durma noktasına kadar hareketini sürdüren treninin hız profili GA tekniği ile optimize edilmiştir. Bu harekete ait hız-konum grafiği çıktısı Şekil 5.14'te görüşmektedir. Optimal sürüşte 50 km/sa'nın biraz üzerine kadar MGG fazı uygulanarak trene hız kazandırılmıştır. Ardından SHG noktasına kadar BG fazı uygulanmış ve yolun aşağı iniş eğiminden faydalanılarak tren neredeyse

izin verilen maksimum hıza kadar (hemen hemen 80 km/sa) hızlanmıştır. Bu noktadan itibaren ise FR fazı uygulanmıştır.



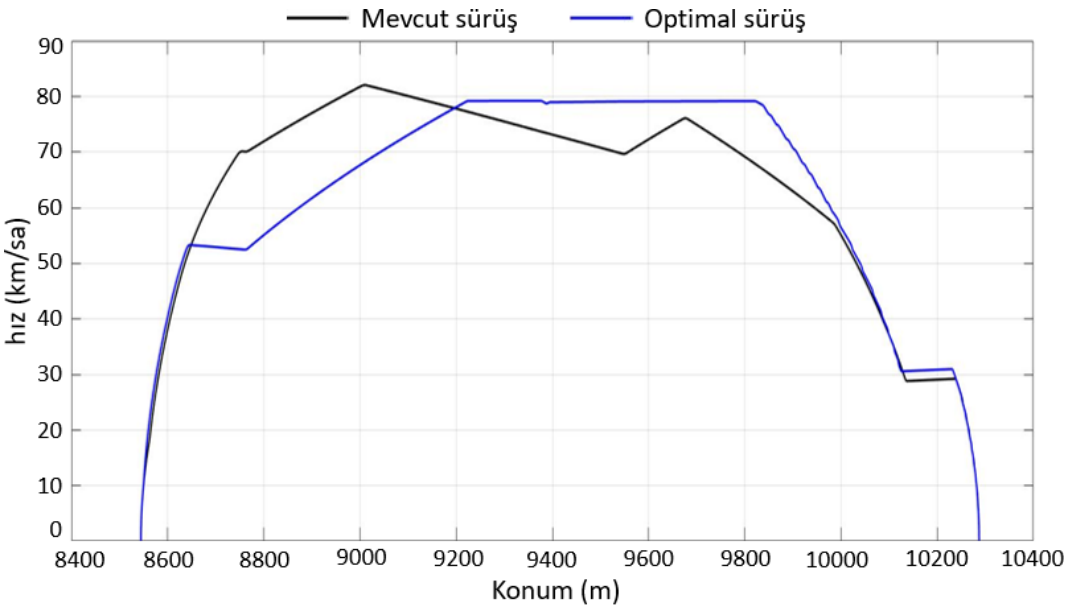
Şekil 5.14 Mahmutbey-Yenimahalle istasyonları arası GA ile optimize edilmiş sürüş

Tablo 5.5'te, Mahmutbey-Yenimahalle istayonları arasında gerçekleştirilen hareket simülasyonuna ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgileri paylaşılmıştır. Benzer şekilde, bu sürüş simülasyonunda da GA'ya zaman açısından esneklik tanınmamıştır. Tablo 5.5'te görüldüğü üzere her iki sürüş modelinde de seyahat 117.50 saniye sürmüştür. Sonuç olarak mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüş profilinde 4.0926 kWh yani %44.34 enerji verimliliği sağlanmıştır. Siteler-Turgut Özal istasyonları arasındaki simülasyona kıyasla GA Mahmutbey-Yenimahalle istasyonları arası için daha etkin çözüm sunmuştur. Bunun sebebi, Mahbutbey-Yenimahalle istasyonları arasında daha dik bir yokuş iniş eğiminin bulunması ve GA'nın bu avantajı iyi kullanmış olmasındandır. Yol profilinin potansiyel enerjisinden etkin şekilde faydalanılmıştır.

Tablo 5.5 Mahmutbey-Yenimahalle istasyonları arası karşılaştırma tablosu

Parametre	**Mevcut Sürüş Profili**	**Optimal Sürüş Profili**
Seyahat süresi (sn)	117,50	117,50
Enerji tüketimi (kWh)	9,2306	5,1380

Tekli istasyonlar arasında son bir simülasyon çalışması da İstoç – İkitelli istasyonları arasında yapılmıştır. Mevcut sürüş profilinde Şekil 5.15'te görüldüğü üzere fazla sayıda gereksiz frenleme ve ardından da MGG fazı uygulanmıştır. Önerilen optimize edilmiş sürüş profilinde ise belirli bir hıza kadar MGG fazı uygulanmıştır. Ardından algoritmanın belirlediği uygun BG noktasına kadar SHG fazı uygulanarak FR aşaması ile hareket sona erdirilmiştir. Hareket fazları arasındaki geçişlerin sık olmaması konforun bozulmaması açısından da arzu edilen bir durumdur.



Şekil 5.15 İstoç-İkitelli istasyonları arası GA ile optimize edilmiş sürüş

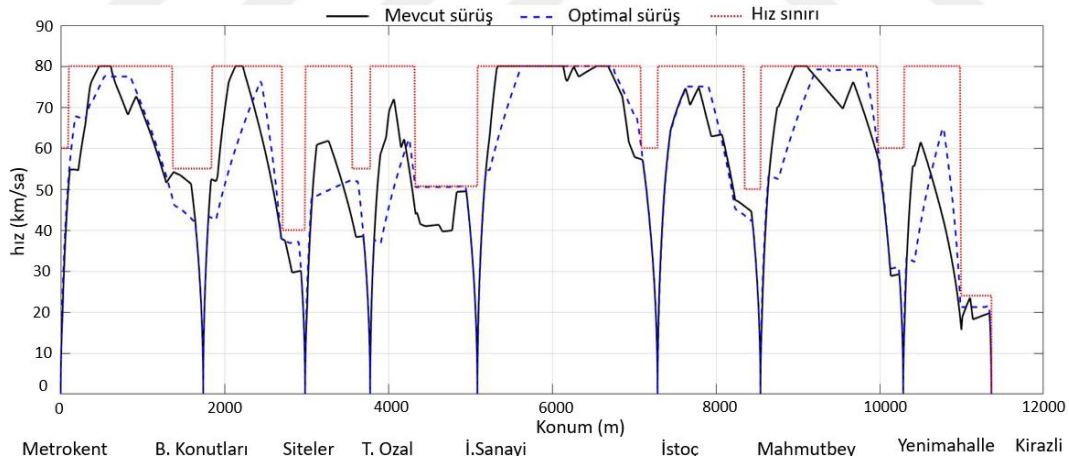
Bu iki istasyon arasında gerçekleştirilen tren hareket simülasyonuna göre mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüş profilinde hareket 4.9842 kWh'lik %28.63 enerji tasarruflu bir şekilde gerçekleştmiştir.

Tablo 5.6 İstoç-İkitelli istasyonları arası karşılaştırma tablosu

Parametre	**Mevcut Sürüş Profili**	**Optimal Sürüş Profili**
Seyahat süresi (sn)	140,00	140,00
Enerji tüketimi (kWh)	17,4112	12,4270

5.2.2.3 M3 Metro Hattı Çoklu İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

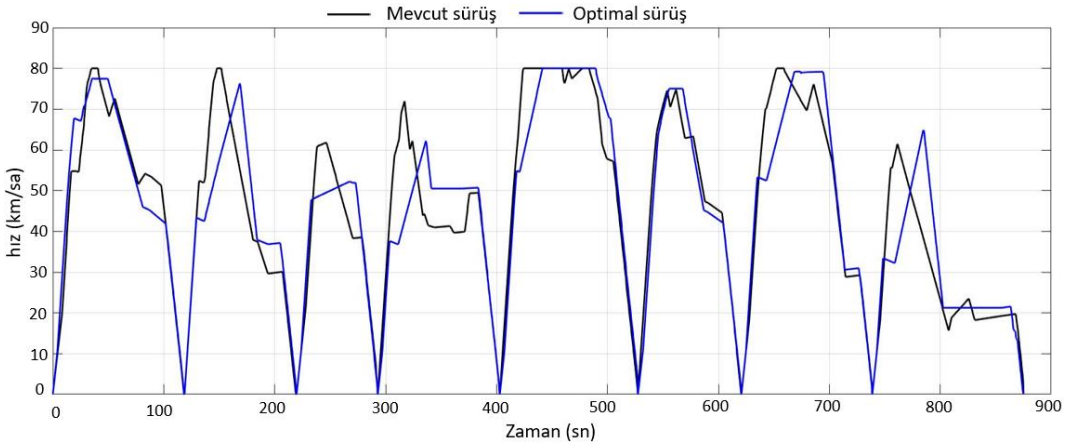
Gerçek uygulamada, ATO (Automatic Train Operation-Otomatik Tren İşlemi) işlemi yoksa, trenin hız yörüngesi, sürücünün içgüdüleriyle belirlenir. Genel olarak, bu yörüngeler gereksiz frenleme eylemlerine dayanır ve bu nedenle minimum enerji tüketimi açısından optimal değildir. Bu kapsamda, yukarıdaki bölümlerde tanıtılan M3 Metro Hattı üzerinde hareket eden bir trenin hız profili optimizasyonu GA yöntemi ile yapılmıştır. Optimizasyon sürecinde hız sınırları, seyahat süresi, toplam seyahat süresi, harekete başlangıç ve bitiş noktaları gibi işletmesel kısıtlamalar dikkate alınmıştır. M3 Metro Metrokent – Kirazlı (M-K) ve Kirazlı – Metrokent (K-M) olmak üzere çift yönlü olarak hizmet sağlamaktadır. Çalışmada önce M-K doğrultusunda optimizasyon yapılmıştır. Şekil 5.16'da görüldüğü üzere bu doğrultu Metrokent istasyonundan başlayarak Kirazlı istayonunda sonlanmaktadır. Toplam 9 istasyon dolayısı ile 8 istasyon arasından oluşmaktadır. Algoritma trenin harekete başlama noktasından bitiş noktasına kadar hız sınırlarına da dikkat ederek her bir istasyon arası için uyması gereken yeni hız profilini bulmuştur. Mevcut sürüşe kıyasla önerilen yeni optimize edilmiş sürüş üst üste bindirilerek çizdirilmiş ve hız-konum grafiği olarak paylaşılmıştır.



Şekil 5.16 Metrokent-Kirazlı yönü hız-konum grafiği

Çalışmada istasyonlar arası tren hareketinin optimize edilerek cer enerjisi tüketiminin azaltılması istenmektedir. Ancak, daha önceden de belirtildiği üzere enerji tassarrufu temel amaç olsa da zamansal açıdan herhangi bir gecikme istenmemektedir. Dolayısı ile algoritmaya zamanı 1 saniye bile geciktirme toleransı tanınmamıştır. Şekil 5.17 M-K doğrultusundaki harekete ait hız-zaman grafiği çıktısını göstermektedir. Optimize edilmiş hız profili ile harekette trenin, mevcut

sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.17 Metrokent-Kirazlı yönü hız-zaman grafiği

Matlab programı kullanılarak geliştirilen THS'de, M-K doğrultusunda yapılan simülasyon sonuçlarına göre, optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda önemli miktarda enerji verimliliği sağlamıştır. Her bir istasyon arası için mevcut sürüş profilinde ve optimize edilmiş profil ile sürüş için tüketilen enerji miktarları ve seyahat süresi bilgileri Tablo 5.7'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 5.7 Metrokent-Kirazlı yönü mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**GA ile optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Metrokent-Başakkonutlari	119.50	14.6179	119.50	12.0212
Başakkonutlari-Siteler	100.00	8.5903	100.00	3.4264
Siteler-Turgut Ozal	73.00	6.8022	73.00	4.1141

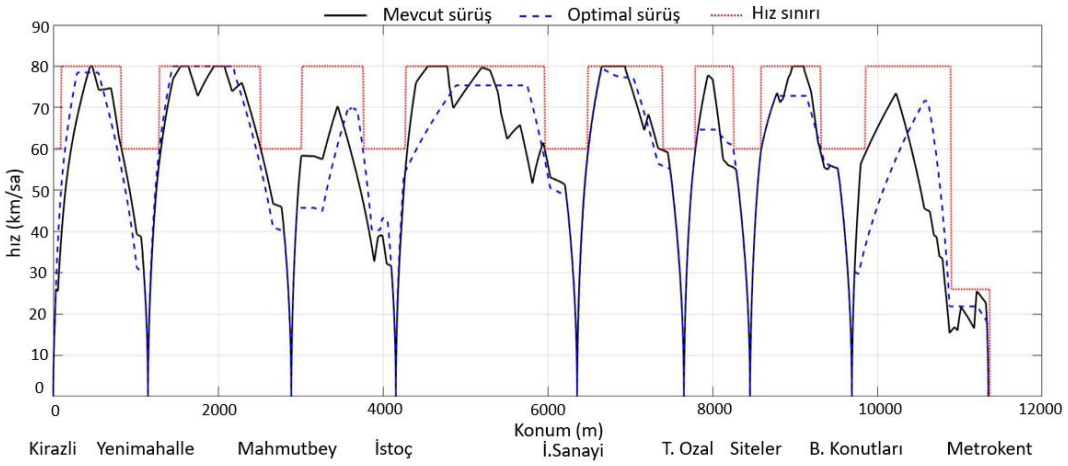
Tablo 5.7 Metrokent-Kirazlı yönü mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları (devamı)

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**GA ile optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Turgut Özal-Ikitelli Sanayi	110.50	8.9039	110.50	2.5455
Ikitelli Sanayi-Istoç	125.00	16.8861	125.00	12.8814
Istoç-Mahmutbey	91.50	20.2384	91.50	19.5139
Mahmutbey-Yenimahalle	117.50	9.2306	117.50	5.1380
Yenimahalle-Kirazli	138.00	4.7506	138.00	2.0091
Toplam	875	90.02	875	61.65

Özetle mevcut sürüş profilinde, tren Metrokent istasyonundan harekete başlayarak Kirazlı istasyonunda 875 saniye'de 90.02 kWh'lik bir enerji tüketimi ile hareketini sonlandırmıştır. Optimize edilmiş sürüş profili ile hareket eden bir tren ise aynı istasyondan başlayarak yine aynı son istasyonda hareketini 875 saniye içinde 61.65 kWh'lik bir enerji tüketimi ile tamamlamıştır. Hareket süresinde herhangi bir artış olmaksızın, 28.37 kWh daha az enerji tüketimi ile hareketini tamamlmıştır. M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %31.51 olarak elde edilmiştir.

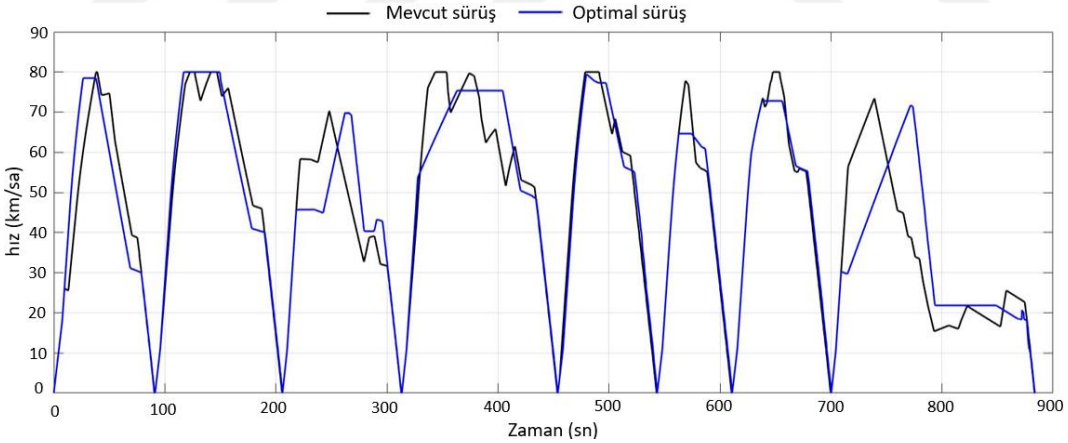
Tam bir turu tamamlamak için gidiş-dönüş hattı boyunca trenin harekete başladığı ilk istasyona geri dönmesi gerekmektedir. Dolayısı ile trenin Kirazlı istasyonundan tekrar Metrokent istasyonuna geri dönüş hareketi de optimize edilmiştir. Şekil 5.18'de bu harekete ait mevcut sürüş profili ile optimize edilmiş sürüş profilinin hız-konum grafiği paylaşılmıştır. Görüldüğü üzere bu yöndeki hareket Kirazlı

istasyonundan başlayarak Metrokent istasyonunda sonlanır. Böylece tam bir parkur hareketi tamamlanmış olur.



Şekil 5.18 Kirazlı-Metrokent yönü hız-konum grafiği

Bu doğrultuda gerçekleştirilen simülasyon için de aynı şekilde algoritmaya zamanı artırma toleransı tanınmamıştır. Şekil 5.19 K-M yönündeki harekete ait hız-zaman grafiği sonucunu göstermektedir. Bir önceki M-K yönündeki harekette olduğu gibi burada da optimize edilmiş hız profili ile hareket eden trenin, mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.19 Kirazlı-Metrokent yönü hız-zaman grafiği

K-M yönünde yapılan simülasyon sonuçlarına göre, optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda bu yön için de kayda değer enerji tasarrufu sağlandığı Tablo 5.8'den görülmektedir. Bu doğrultu için tersi yöndeki kadar verimlilik sağlanamamasının sebebi güzergah geometrisi ile ilgilidir. M-K yönünde daha çok yokuş inişi vardır ve algoritma buradaki potansiyel enerjiyi çok iyi kullanarak BG fazını daha uzun süre tercih etmiştir. K-M doğrultusunda ise tersi bir geometri vardır ve yokuş çıkışlı

bir yoldur. Buna ragmen algoritma mevcut sürüş profiline göre daha etkili bir sürüş stratejisin önererek enerji verimli bir profil elde etmiştir.

Kirazlı istasyonundan hareketine başlayan bir tren Metrokent istasyonuna toplamda 884 saniyede 116.37 kWh'lik enerji tüketimi ile ulaşmıştır. GA'nın önerdiği optimal sürüş stratejisinde ise yine aynı sürede ancak 96.14 kWh'lik bir enerji tüketimi ile ulaşarak bu yön için 20.23 kWh'lik bir tasasrruf sağlanmıştır. Sonuç olarak M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %17.38 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.8 Kirazlı-Metrokent yönü mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**GA ile optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Kirazlı-Yenimahalle	91.00	17.8181	91.00	13.9458
Yenimahalle-Mahmutbey	114.75	24.9994	114.75	24.3850
Mahmutbey-İstoç	107.75	5.7354	107.75	3.5958
İstoç-Ikitelli Sanayi	140.50	17.1515	140.50	12.3615
Ikitelli Sanayi-Turgut Özal	89.50	13.7833	89.50	13.6760
Turgut Özal-Siteler	67.50	11.6079	67.50	8.8591
Siteler-Başakkonutları	89.00	18.5274	89.00	17.2077

Tablo 5.8 Kirazlı-Metrokent yönü mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları (devamı)

İstasyonlar	Mevcut sürüş profili		GA ile optimize edilmiş sürüş profili	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Başakkonutları-Metrokent	184.00	6.7470	184.00	2.1091
Toplam	884	116.37	884	96.14

Simülasyon sonuçları tüm parkur hareketi dikkate alınarak değerlendirildiğinde ise Tablo 5.9'da görüldüğü üzere toplam hareket 1759 saniye sürmüştür. Bu durumda mevcut sürüş stratejisi ile hareket eden bir tren 206,39 kWh'lik bir enerji tüketimi ile rotasını tamamladığı görülmektedir. GA'nın önerdiği optimal sürüş profili ile hareket eden bir tren ise yine aynı toplam seyahat süresi sonunda 157.79 kWh'lik enerji tüketimi ile hareketini sonlandırmıştır. Bir parkur hareketi sonunda %23.55 ile 48,60 kWh enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Tablo 5.9 Tüm parkur boyunca mevcut ve GA ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları

Mevcut hız profili		GA ile optimize edilmiş hız profili	
Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi	Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi
1759,00	206,39	1759,00	157,79

5.2.2.4 Konfor Kısıtlaması Dikkate Alınan Hız Profili Optimizasyonu

Raylı sistemlerde konfor denilince bir çok parametre (istasyonlarda bekleme süresi, tren iç aydınlatması, klima vb.) bu adlandırmaya dahil edilebilir. Bu çalışmada dikkate alınan konfor parametresi, sürüşün güvenli ve kabul edilebilir bir sarsıntı

ile olmasıdır. Bunun içinde ani ivmelenmelerden ve frenlemelerden kaçınılmalıdır. Özellikle kalkış anında ivme değişim oranının (Jerk) belirli bir değerde sınırlandırılması gerekmektedir. Konfor değerlendirme standardı Tablo 5.10'da belirtildiği gibi uluslararası standart ISO2631 tarafından sağlanmaktadır [168]. Buna göre sarsıntı değeri 1 m/s^3'ü geçer geçmez tren içerisindeki yolcular rahatsızlık yaşayacak ve sarsıntı değeri arttıkça da rahatsızlık seviyesi daha da kötüleşecektir.

Tablo 5.10 Konfor değerlendirme standardı [168]

Konfor seviyesi	**Jerk (m/s^3)**	**Değerlendirme**
Seviye 1	< 0,315	Çok konforlu
Seviye 2	0,315 ~ 0,630	Konforlu
Seviye 3	0,630 ~ 1,000	Kısmen konforlu
Seviye 4	1,000 ~ 1,600	Konforsuz
Seviye 5	1,600 ~ 2,500	Çok konforsuz
Seviye 6	> 2,500	Aşırı konforsuz

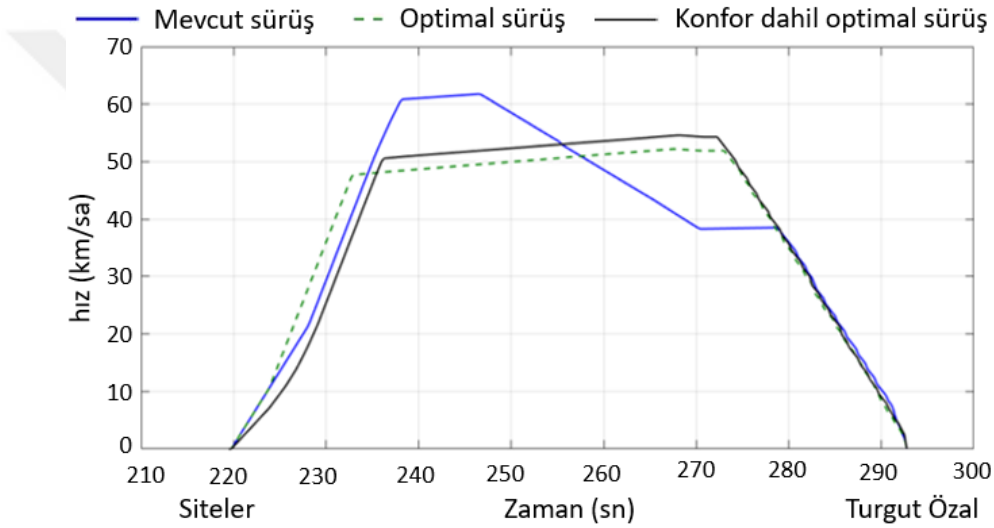
M3 metro hattında Jerk parametresi 1.12 m/s^3 olarak olarak işletme yapılmaktadır. Bu çalışmada, Jerk parametresi 0.5 m/s^3 olarak alınmıştır. Trenin ivme değişimi için 1 saniye içinde maksimum 0.5 m/s^3'e izin verilerek daha az sarsıntılı sürüş sağlanmaya çalışılmıştır. Literatürde farklı Jerk limitlerini kullanan çalışmalar da mevcuttur [169, 170]. Jerk parametresi, Denklem 5.11 [171] ile THS'ye dahil edilmiştir:

$$J = \frac{\int \left|\frac{da}{dt}\right| dt}{T} \tag{5.11}$$

Burada J, 1 saniye içinde ivmelenme oranındaki değişim ve T, seyahat süresidir. Bu kısıtlama GA'ya tanıtılmış ve optimizasyon sürecinde bu durumu dikkate alması sağlanmıştır. Verilen kısıt ile, daha az sarsıntılı bir sürüş profili sunmak için kalkış

anında maksimum cer gücü kullanarak hızlı bir hareket sunulmayacaktır. Ancak, seyahat süresi kısıtlamasına da tabii olması istenmiştir. Bu sebeple algoritmanın, hem mevcut sürüş profiline hem de optimize edilmiş ancak konfor parametresini dikkate almayan sürüş profiline göre, MGG veya SHG fazını daha uzun süre tercih etmesi beklenen bir durumdur. Böylece, zaman gecikmesi yaşamadan istasyonlara ulaşım sağlayabilir.

Konfor parametresi eklendiği durum ile eklenmediği durum arasındaki farkın daha açık anlaşılabilir olması için öncelikle Siteler- Turgut Özal istasyonları arası için THS'de bir simülayon çalışması yapılmış ve sonuç görseli Şekil 5.20'de paylaşılmıştır.



Şekil 5.20 Mevcut sürüş ve GA ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği

Şekil 5.20'de (siyah çizgi) görüldüğü gibi konforu hesaba katan optimum sürüş profili, daha yumuşak bir hareket başlangıcına sahiptir ve maksimum 0.5 m/s^3 sarsıntı limiti ile hızlanmıştır. Ancak, trenin önceden belirlenen sürede istasyona varabilmesi için konfora dikkat etmeyen optimum sürüş moduna göre MGG fazını daha uzun süre kullanmıştır. Bu nedenle de konforu dikkate almayan optimum sürüşe kıyasla enerji tüketiminin daha fazla olacağı aşikardır. Tablo 5.11'de enerji tüketimi ile ilgili bilgi verilmiştir. Buna göre, üç sürüş stratejisinde de hareket süresi sabit ve 73 saniyedir. Mevcut sürüşe kıyasla optimal sürüş 2,6881 kWh daha az enerji tüketimi ile hareketini sonlandırırken, konfor parametresi dahil edildiğinde ise 2,2416 kWh daha az enerji tüketerek hareketini sonlandırmıştır. Konforu dikkate almayan optimal sürüş profili ile harekete kıyasla konfor dahil edildiği

durumda 0,4465 kWh, %10.85, daha fazla enerji tüketimi meydana gelmiştir. Buna karşın araç sürüş konforu 1.12 m/s^3 iken 0.5 m/s^3 olarak %55.35 oranında artırılmıştır.

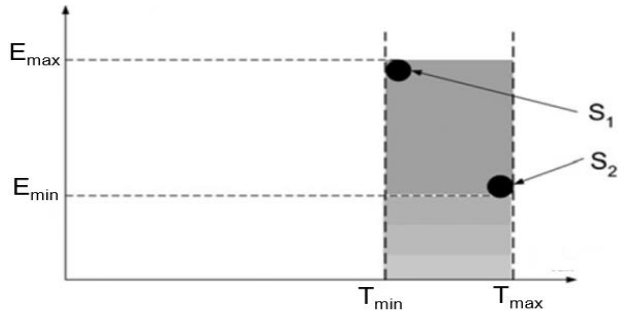
Tablo 5.11 Üç farklı sürüş stratejisi karşılaştırma tablosu

İstasyon	Mevcut sürüş		Optimal sürüş		Konfor dahil optimal sürüş	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Siteler-Turgut Özal	73,00	6,8022	73,00	4,1141	73,00	4,5606

Metro işletmecileri açısından konfor ve enerji tüketimi arasındaki denge tartışılarak uygun bir limit ile sınırlandırılabilinir. Belirli bir miktarda enerji tüketimi artışı göze alınarak Jerk parametresi ayarlanabilir ve yolcu güvenlik ve konforu artırılabilinir.

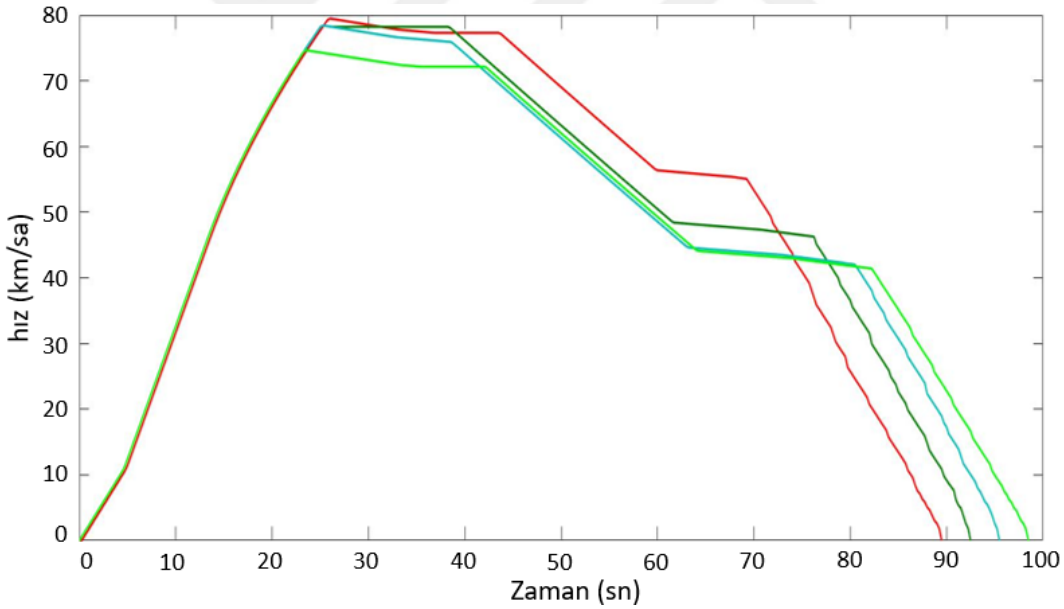
5.2.2.5 Hız Profili Optimizasyonunda Zaman Artışının Enerji Tüketimine Etkisinin İncelenmesi

Raylı sistemlerde enerji tüketimi seyahat süresine doğrudan bağlıdır. Daha uzun seyahat süresi daha az enerji tüketimi ile sonuçlanır. Şekil 5.21'de görüldüğü üzere enerji tüketimi ile yolculuk süresi bir ödünleşme içindedir. Tüketimin azaltılması daha önemli ise süre bir miktar aşılabilir, eğer süre daha önemli ise de enerji tüketiminden bir miktar fedakarlık yapılabilir. Şekil 5.21'de verilen gölgeli alan uygun ilgili seyahat sürelerine karşın olası enerji tüketimi kombinasyonlarını temsil eder. S_1 ve S_2 uç noktaları ise, yolculuk süresini veya enerji tüketimini en aza indirmeye önem verildiğinde teorik olarak en iyi çözümlere karşılık gelir.



Şekil 5.21 Enerji tüketimi E'nin T seyahat süresine bağlılığı [172]

Seyahat süresinin enerji tüketimine olan etkisinin daha anlaşılır olması açısından M3 metro hattı istasyonlarından İkitelli-Turgut Özal arasında bir simülasyon testi yapılmıştır. Bu iki istasyon arası seyahat süresi mevcutta 89.5 saniyedir. 3'er saniye zaman artırımına izin verilerek, 92.5, 95.5 ve 98.5 saniyelik seyahat süresi ile bu yol üzerinde bir tren hareketi optimize edildiği durumda karşılık gelen enerji tüketimleri incelenmiştir. Simülasyon çıktısının hız-zaman grafiği Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22 İkitelli-Turgut Özal istasyonları arası hız-seyahat süresi grafiği

Seyahat süresinde esneklik tanınması daha az enerji tüketimi ile trenin varış noktasına ulaşmasını sağlamıştır. Bu teste ait detaylı sonuçlar Tablo 5.12'de verilmiştir. Buna göre, referans süre (mevcut zaman çizelgesine göre olan hareket süresi) 3 saniye yani % 3,35 oranında arttırıldığında enerji tüketimi bu iki istayon aralığı için 1.3864 kWh, %10,13, azalmıştır. Benzer şekilde referans süreye kıyasla

seyahat süresi 9 saniye yani %10.05 oranında arttırılmasına izin verildiğinde enerji tüketimi 2.6070 kWh yani % 19.06 oranında azaldığı görülmüştür.

Tablo 5.12 Seyahat süresine karşın enerji tüketimi tablosu

Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
89,5 (referans süre)	13,6770
92,50	12,2906
95,50	11,6561
98,50	11,0700

Metro işletmecileri açısından bu durum oldukça önemlidir. İşletmenin yoğun olmayan saatleri için belirli miktarda seyaaht süresinin aşımına izin verilmesi büyük bir enerji tasarrufa ile sonuçlanmaktadır.

5.3 Benzetimli Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm-SA) ve SA ile Tren Hız Profili Optimizasyonu

Trenlerin hareketi sırasında meydana gelen cer enerjisi tüketimini en aza indirecek amacıyla, SA algoritmasından faydalanılarak her bir istayon aralığı için enerji verimli sürüş profilleri elde edilecektir. Bu sebeple öncelikle SA arama yöntemi tanıtılacaktır. Ardından bu yöntem ile, İstanbul M3 metro hattı işletme şartları dikkate alınarak, bu hat üzerinde çalışan trenin hız profili optimize edilerek mevcut makinist sürüşü ile kıyaslanacak ve bulgular tartışılacaktır.

5.3.1 Benzetimli Tavlama Algoritması

Benzetimli Tavlama algoritması Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından doğadan esinlenerek ortaya konulmuş olasılıksal bir algoritmadır. Algoritma, metalürji ve malzeme bilimlerindeki, bir malzemenin sertlik veya mukavemet gibi niteliklerinin ısıl işlem yoluyla değiştirilmesine dayanan tavlama prosedürü ile optimizasyon problemleri arasında bir benzerlik kurarak, bu problemleri çözmeyi amaçlamaktadır. Malzeme fiziğindeki tavlama tanımına göre, bir katının ısı

banyosunda düşük enerjili haller elde etmesini sağlayan termal bir işlemdir. Prosedür iki adımdan oluşur: ısı banyosunun sıcaklığını katının eriyeceği noktaya kadar dikkatli bir şekilde yükseltmek, ardından parçacıkların en düşük enerjiye sahip olduğu noktaya indirmektir [173]. Benzetimli tavlama algoritmasında sıcaklığı kontrollü bir şekilde düşürerek global en iyiyi bulmak mümkündür. SA, başlangıç çözümünün sıcaklığının belirlenmesiyle başlayan ve ek çözümlerin geliştirilmesi ve analiz edilmesinin yanı sıra sıcaklığın ayarlanmasını da içerecek şekilde ilerleyen bir süreçtir [174].

SA'da yeni çözümlerin üretilmesi rastgele veya önceden belirlenmiş bir kurala göre gerçekleştirilebilir. Mevcut çözüm ile yeni geliştirilen çözüm her iterasyondan sonra karşılaştırılır. Genel en iyiyi bulmak için sadece mevcut çözümü geliştiren yeni çözümler değil, mevcut çözümü geliştirmeyen bazı yeni çözümler de kabul edilmektedir. Sıcaklık parametresi mevcut çözümü iyileştirmeyen yeni çözümlerin kabul edilme olasılığını etkiler [175].

Benzetilmiş tavlama tekniğinde olasılığa dayalı kabul fonksiyonunu kullanmak, aday çözümü kabul etmek için, amaç fonksiyonundaki küçük değişikliklerin büyük değişikliklerden daha fazla kabul edilmesine sebep olur. Ayrıca amaç fonksiyonunu yükselten hareketlerin önemli bir kısmı sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda kabul edilir, sıcaklığın sıfıra düştüğü durumlarda ise reddedilir. Yerel optimuma takılıp kalmamak için benzetilmiş tavlama yöntemine makul derecede yüksek bir sıcaklık ayarıyla başlanmalıdır [176].

SA yönteminde Boltzmann olasılık dağılımı en önemli parametredir. Bu olasılık fonksiyonuna göre algoritma daha iyiye giderek optimum çözüme yakınsar. Aşağıdaki denklem 5.12, x'in herhangi bir gerçek durumunun olasılığını verir.

$$p(x) = e^{\frac{-\Delta f(x)}{kT}} \tag{5.12}$$

Burada, $f(x)$ enerjinin konfigürasyonu, k Boltzmann sabiti ve T (°C) sıcaklıktır [177]. SA'nın standart optimizasyon prosedürü aşağıdaki adımlarla verilir:

1. Başlangıç çözüm vektörünün oluşturulması: Optimize edilecek sistem için rastgele bir $x0$ başlangıç çözümü seçilir ve ardından amaç fonksiyonu hesaplanır.
2. Başlangıç sıcaklığının belirlenmesi: T sıcaklığının başlangıç değeri, SA'nın başarılı bir şekilde uygulanması için önemli bir parametredir. Değer çok

yüksekse, yakınsamak için daha fazla indirgeme gerekir. Çok küçükse, arama süreci mükemmelden daha az olabilir ve noktalar potansiyel olarak global optimumu aşabilir.

3. Mevcut çözümün komşuluğunda yeni bir çözümün seçilmesi: Yeni bir $x0 + \Delta x$ çözümü T'ye bağlı yeni bir çözüm olarak kabul edilir. $x0 + \Delta x$ ve $x0$ için amaç fonksiyonu sırasıyla $f(x0 + \Delta x)$ ve $f(x0)$ ile temsil edilir.
4. Yeni bir çözümün değerlendirilmesi: $f(x0 + \Delta x) \leq f(x0)$ ise, $x0 + \Delta x$ kabul edilir ve $x0$'ın yerine geçer, mevcut optimal çözüm güncellenir ve 5. adıma geçilir.
5. Sıcaklığın periyodik olarak düşürülmesi: Arama süresi boyunca sıcaklık T azalır, sonuç olarak aramanın başında kötüleştirici hamleleri kabul etme olasılığı yüksektir ve bu giderek azalarak optimal sonuca yakınsar.
6. Durdurma kriteri sağlanana kadar adım 2 – 6'nın tekrarlanması: Sonlandırma kriteri karşılandığında hesaplama sonlandırılır. Aksi takdirde, 2'den 6'ya kadar olan adımlar tekrarlanır.

Yukarıda açıklanan adımlara göre oluşturulan SA algoritmasının kaba kodu Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13 Benzetimli tavlama algoritması kaba kodu

Optimize edilecek en iyi çözüm vektörü x_0'ı seçin;
Parametreleri belirleyin: sıcaklık T, Boltzmann sabiti k, sıcaklık azaltma faktörü c
While durdurma kriteri sağlanmadı **do**
  For yeni çözüm sayısı
    Yeni bir çözüm seçin: $x_0 + \Delta x$
    İf $f(x_0 + \Delta x) > f(x_0)$ **then**
      $f_{new} = f(x_0 + \Delta x)$; $x_0 = x_0 + \Delta x$
    Else
      Δf $f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$
      random r (0,1)
      if $r > e^{\frac{-\Delta f}{kT}}$ **then**
        $f_{new} = f(x_0 + \Delta x)$, $x_0 = x_0 + \Delta x$
      Else
        $f_{new} = f(x_0)$,
      End if
    End if
  $f = f_{new}$

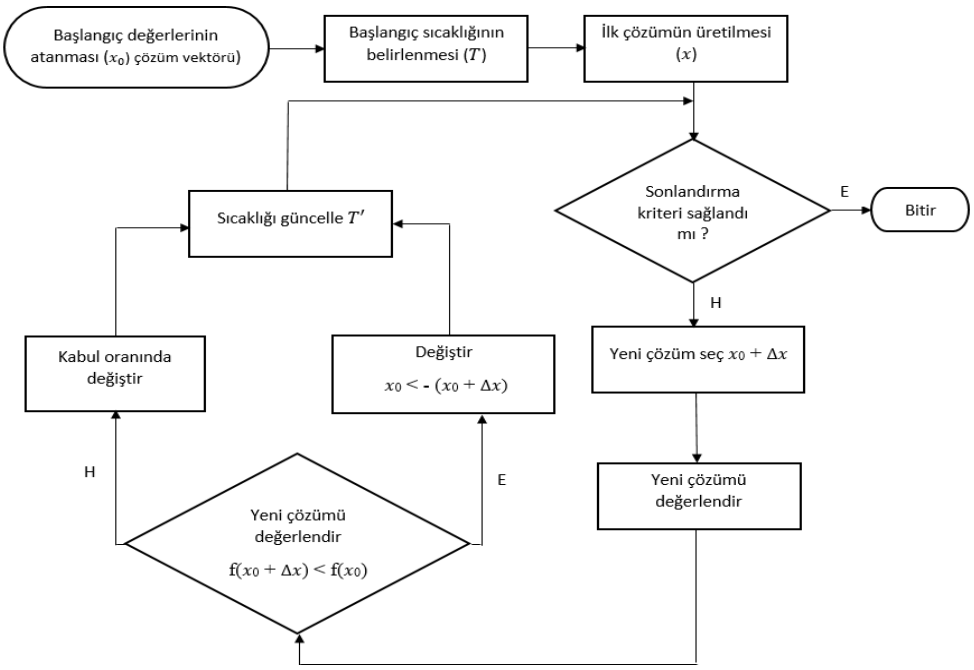
Tablo 5.13 Benzetimli tavlama algoritması kaba kodu (devamı)

Sıcaklığı periyodik olarak azaltın: T = c x T
End for
End while

Eğer $x0 + \Delta x$ durumuna ait çözüm f($x0 + \Delta x$), $x0$ durumuna ait çözümden f($x0$) daha küçükse, $x0$ durumu $x0 + \Delta x$ durumu ile değiştirilir. Ya da f($x0$), f($x0 + \Delta x$) ve T değerlerine göre olasılıksal olarak belirlenen bir kabul oranıyla $x0$ değeri $x0 + \Delta x$ değeri ile değiştirilir. Kabul etme kriteri çözümün başka noktalara sıçramasının önünü açacağından yerel minimumlara yakalanmayı da engeller ve denklem (5.13) ifade ile hesaplanır:

$$p(T, x_0, x_0 + \Delta x\ ) = e^{\frac{-\Delta}{T}} \tag{5.13}$$

Burada, Δ = f($x0 + \Delta x$) - f($x0$) e eşittir. Arama sırasında sıcaklık değeri (T) genellikle azalan bir şekilde güncellenir. Sonuç olarak, yeni çözümlerin benimsenme oranı başlangıçta yüksek olsa da sonraki adımlarda giderek azalmaktadır. Bu, bir tavlama programına (annealing schedule) uygun olarak gerçekleştirilir. Algoritma, bir döngü içerisinde mevcut x değerini belirtilen durumlarla güncelleyerek çözüme kavuşur ve durur. Şekil 5.23 algoritmanın akış şemasını içermektedir.



Şekil 5.23 SA algoritması akış şeması

5.3.1.1 Benzetimli Tavlama Algoritması Parametreleri

Benzetimli tavlama algoritması gelişigüzel bir deneme noktası oluşturur. Daha sonra mevcut sıcaklığa bağlı olarak deneme noktası ile başka bir nokta arasındaki mesafeyi seçer. Bu mesafe tavlama fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Tavlama fonksiyonu için iki seçenek mevcuttur. İlki hızlı tavlamadır (fast annealing). Bu tavlama fonksiyonundaki adım uzunluğu sıcaklık boyutuna göre belirlenirken, yönelim rastgele belirlenir. Boltzman tavlaması da diğer ikinci tavlama işlemidir. Mevcut sıcaklığın karekökü, bu tavlama fonksiyonundaki adım uzunluğunu belirler ve yönelim de yine rassaldır.

Algoritma, sıcaklığı kademeli olarak düşürürken optimum sonucu korur. Sıcaklık fonksiyonu, kaba algoritmik kodda da belirtilen sıcaklığı güncellemek amacıyla kullanılır. Bir k tavlama parametresi seçelim (bu değer, yeniden tavlamaya kadar iterayon sayısı ile aynı olacaktır). Bu durumda sıcaklık fonksiyonları ve değerleri aşağıdaki gibidir:

- Üstel sıcaklık fonksiyonu

$$T = T_0 * 0.95^k$$

- Boltzman sıcaklık fonksiyonu

$$T = \frac{T_0}{\log(k)}$$

- Hızlı sıcaklık fonksiyonu

$$T = \frac{T_0}{k}$$

Bu çalışmada kullanılan benzetimli tavlama algoritmasının parametreleri ise Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.14 SA algoritması parametreleri

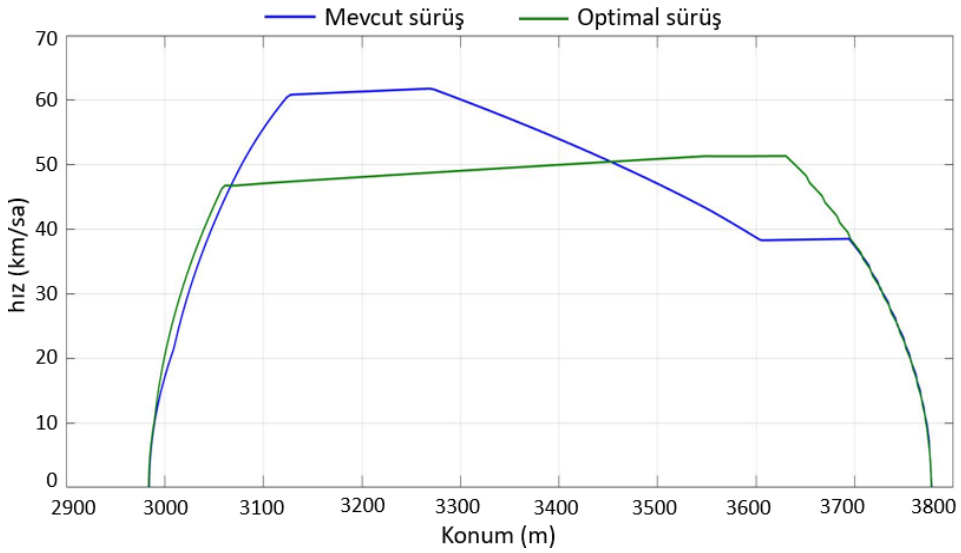
Parametre	Değer
Başlangıç sıcaklığı	100
Sıcaklık güncelleme fonksiyonu	Üstel sıcaklık güncellemesi

Tablo 5.14 SA algoritması parametreleri (devamı)

Parametre	Değer
Yeniden tavlama aralığı	100
Tavlama fonksiyonu	Boltzman sıcaklık fonksiyonu

5.3.2 SA ile M3 Metro Hattı Tekli İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

SA algoritmasının etkinliğini değerlendirmek ve tren hareketi tarafından kullanılan enerji miktarını azaltmak için çeşitli tekli istasyonlar arasında simülasyonlar çalıştırılmıştır. Algoritmanın tavlama fonksiyonu Boltzman tavlama fonksiyonu ve sıcaklık, üstel fonksiyon olarak belirlenmiştir. M3 metro hattının mevcut hız profili, istasyonlar arası seyahat süresi ve enerji tüketimi refarans alınarak SA'nın sunduğu optimal hız profili ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.24, Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında mevcut sürüş profiline kıyasla SA ile optimize edilmiş sürüşün üst üste bindirilmiş çıktısını göstermektedir. Bu iki istasyon arasındaki hareket fazlarının optimizasyonunda SA algoritması da GA gibi SHG fazını kullanmayı tercih etmemiştir. Bunun temeli yine benzer sebebe, Siteler-Turgut Özal istasyonları arası mesafenin düşük ve hat profilinin de yokuş aşağı eğimli olmasına, dayanmaktadır.



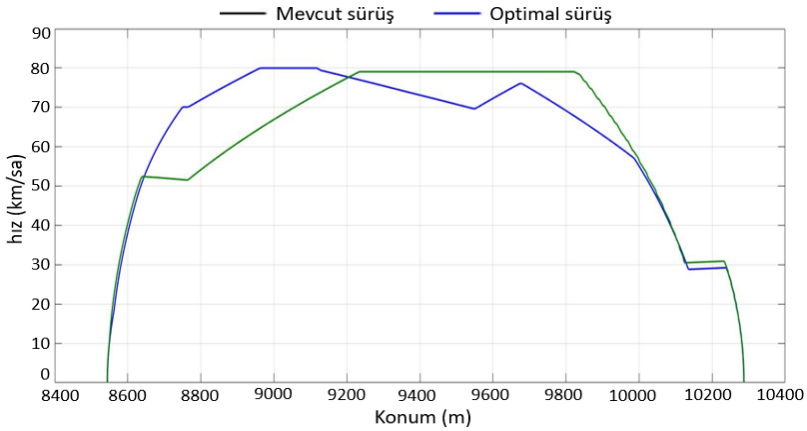
Şekil 5.24 Siteler – Turgut Özal istasyonları arası SA ile optimize edilmiş sürüş

Tablo 5.15, Siteler-Turgut Özal istayonları arası sürüş simülasyonuna ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgilerini içermektedir. SA algoritmasına optimizasyon sürecinde zaman açısından herhangi bir esneklik tanınmamıştır. Aşağıdaki tabloda da görüldüğü üzere her iki sürüş modelinde de iki istasyon arası hareket, gerçek işletmede olduğu gibi, 73 saniye sürmüştür. Bu durumda mevcut sürüş profiline kıyasla SA tekniği ile optimize edilmiş sürüş profilinde 2.7816 kWh yani %40.89 enerji verimliliği sağlanmıştır.

Tablo 5.15 Siteler-Turgut Özal istasyonları arası mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Seyahat süresi (sn)	73,00	73,00
Enerji tüketimi (kWh)	6,8022	4,0206

Benzer şekilde, Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arasında mevcut hızlanma profili ile hareket eden bir trenin faz geçiş noktaları SA tekniği ile optimize edilmiştir. Bu harekete ait hız-konum grafiği çıktısı Şekil 5.25'te paylaşılmıştır. Görüldüğü üzere, SA algoritması bu iki istasyonlar arası sürüş profilinde 4 hareket modunun (MGG, SHG, BG ve FR) tamamını kullanmayı tercih etmiştir. Hareket modları arası geçiş noktalarının optimum konumlarına göre tren sürüşü simüle edilmiştir.



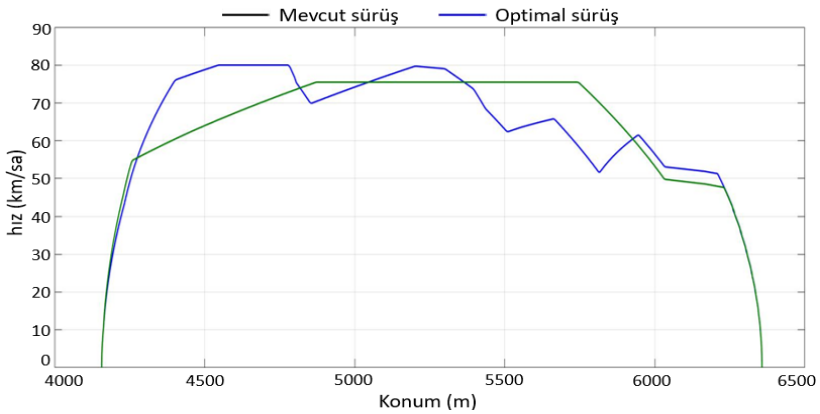
Şekil 5.25 Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arası SA ile optimize edilmiş sürüş

Tablo 5.16'da, Mahmutbey-Yenimahalle istayonları arasında gerçekleştirilen hareket simülasyona ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgileri verilmiştir. Her iki hareket modunda da seyahat süresi aynı ve 117.50 saniyedir. Enerji tüketimi açısından ise mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüş profilinde 4.2320 kWh yani %45.85 enerji verimliliği elde edilmiştir.

Tablo 5.16 Mahmutbey -Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Seyahat süresi (sn)	117,50	117,50
Enerji tüketimi (kWh)	9,2306	4,9986

Tekli istasyonlar arasında son bir simülasyon çalışması da İstoç – İkitelli istasyonları arasında yapılmıştır. Mevcut sürüş profilinde Şekil 5.26'da görüldüğü üzere fazla sayıda gereksiz frenleme ve ardından da MGG fazı uygulanmasına karşın SA'nın önerdiği sürüş profilinde belirli bir hıza kadar MGG fazı uygulanmıştır. Ardından BG fazı uygulanarak hattın yokuş iniş profilinden faydalanılarak trenin hızının belirli bir değere kadar yükselmesi sağlanmıştır. Daha sonrasında SHG fazı ile hız BG fazında ulaşılan değerde sabit tutularak hareket devam ettirilmiş ve algoritmanın belirlediği uygun FR noktasından frene girilerek hareket sona erdirilmiştir.



Şekil 5.26 İstoç – İkitelli istasyonları arası SA ile optimize edilmiş sürüş

İstoç-İkitelli istasyonları arasında gerçekleştirilen tren hareket simülasyonuna göre mevcut sürüş profiline kıyasla SA ile optimize edilmiş sürüş profilinde hareket

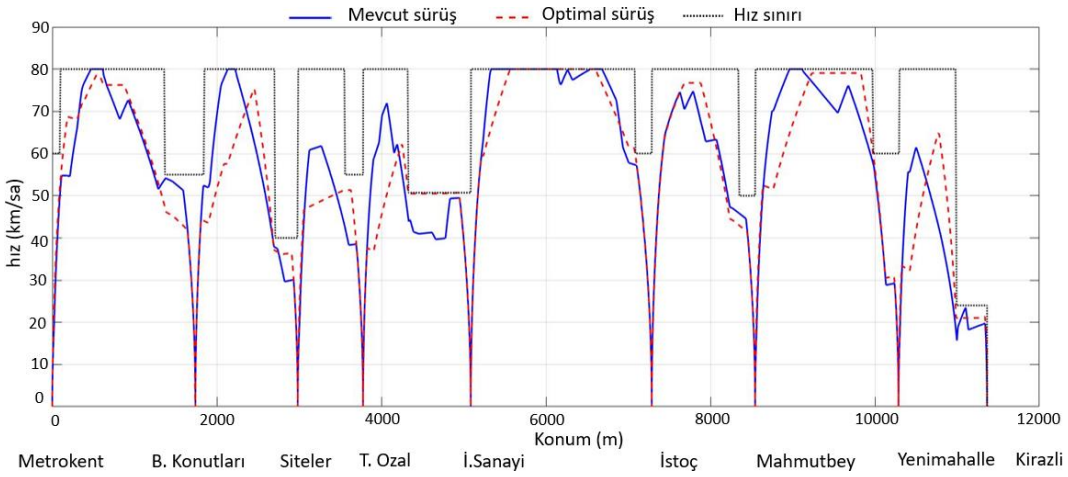
5.0330 kWh'lik yani %29.34 enerji tasarruflu bir şekilde gerçekleşmiştir. Detaylı bilgi Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17 İstoç - İkitelli istasyonları arası mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Seyahat süresi (sn)	140,50	140,50
Enerji tüketimi (kWh)	17,1515	12,1185

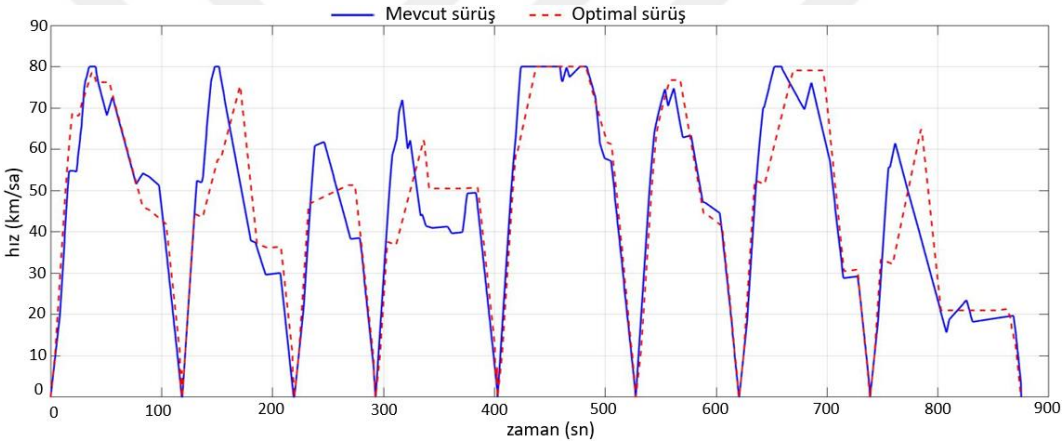
5.3.3 SA ile M3 Metro Hattı Çoklu İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

M3 Metro Hattı üzerinde hareket eden bir trenin hız profili optimizasyonu SA tekniği kullanılarak yapılmıştır. Optimizasyon sürecinde hız sınırları, seyahat süresi, toplam seyahat süresi, harekete başlangıç ve bitiş noktaları gibi işletmesel kısıtlamalar dikkate alınmıştır. Çalışmada önce GA yönteminde olduğu gibi M-K doğrultusunda optimizasyon yapılmıştır. Şekil 5.27'de görüldüğü üzere bu doğrultu 9 istasyondan (8 istasyon arası) oluşmaktadır. Algoritma trenin harekete başlama noktasından bitiş noktasına kadar hız sınırlarına da dikkat ederek her bir istasyon arası için yeni hız profilini bulmuştur. Mevcut sürüşe kıyasla SA tarafından önerilen yeni optimize edilmiş sürüş üst üste bindirilerek çizdirilmiş ve hız-konum grafiği olarak paylaşılmıştır.



Şekil 5.27 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği

Çalışmada istasyonlar arası tren hareketinin optimize edilerek cer enerjisi tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. Ancak, daha önceden de belirtildiği üzere enerji tassarrufu temel amaç olsa da zamansal açıdan herhangi bir gecikme istenmemektedir. Algoritma daha önceden belirlenen istasyonlar arası seyahat süresini aşan bir çözüm sunduğunda, yüksek bir ceza puanı (100000) ile karşılaşmaktadır. Böylece, seyahat süresini aşan bu çözümün optimal olarak değerlendirilmesinin önüne geçilmekte ve algoritma, tanımlı istasyonlar arası seyahat süreleri içerisinde kalan olası çözümlerden en az enerji tüketimini veren hız profili sonucunu sunmaktadır. Şekil 5.28 M-K doğrultusundaki harekete ait hız-zaman grafiği çıktısını göstermektedir. Optimize edilmiş hız profili ile harekette trenin, mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.28 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği

Matlab programı kullanılarak geliştirilen THS'de, M-K doğrultusunda yapılan simülasyon sonuçlarına göre, SA tekniği kullanılarak optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda önemli miktarda enerji verimliliği elde edilmiştir. Her bir istasyon arası için mevcut sürüş profilinde ve optimize edilmiş profil ile sürüş için tüketilen enerji miktarları ve seyahat süresi bilgileri Tablo 5.18'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

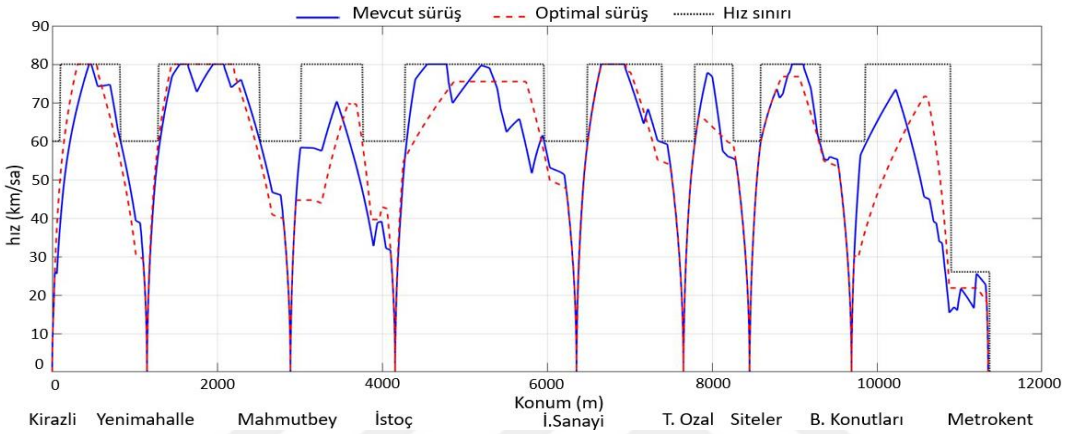
Tablo 5.18 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	Mevcut sürüş profili		Optimize edilmiş sürüş profili	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Metrokent-Başakkonutlari	119.50	14.6179	119.50	11.6791
Başakkonutlari-Siteler	100.00	8.5903	100.00	3.4252
Siteler-Turgut Ozal	73.00	6.8022	73.00	4.0206
Turgut Ozal-Ikitelli Sanayi	110.50	8.9039	110.50	2.5726
Ikitelli Sanayi-Istoç	125.00	16.8861	125.00	12.2761
Istoç-Mahmutbey	91.50	20.2384	91.50	19.4887
Mahmutbey-Yenimahalle	117.50	9.2306	117.50	4.9986
Yenimahalle-Kirazli	138.00	4.7506	138.00	2.0091
Toplam	875	90.02	875	60.47

Sonuç olarak, mevcut sürüş profilinde, tren Metrokent istasyonundan harekete başlayarak Kirazlı istasyonunda 875 saniye'de 90.02 kWh'lik bir enerji tüketimi ile hareketini tamamlamıştır. SA ile optimize edilmiş sürüş profilini kullanarak hareket eden bir tren ise aynı güzergahı 875 saniye içinde 60.47 kWh'lik bir enerji tüketimi ile tamamlamıştır. Hareket süresinde herhangi bir artış olmaksızın, 29.55 kWh daha

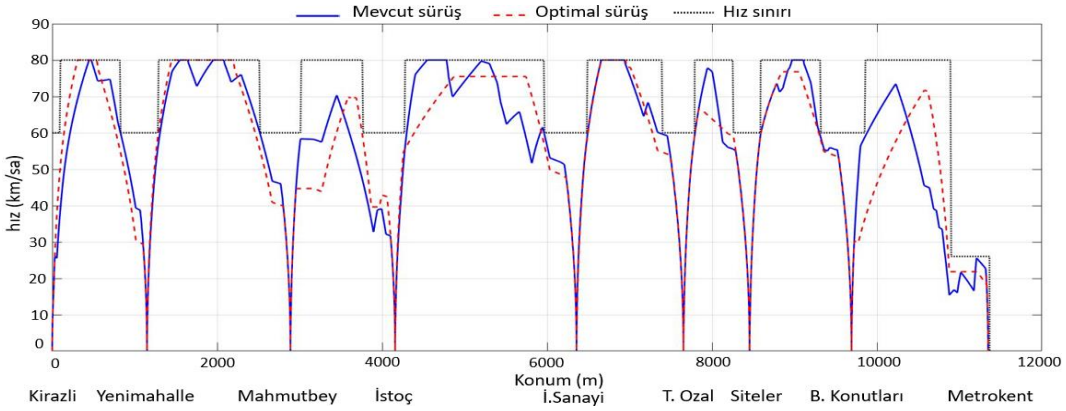
az enerji tüketimi ile hareketini tamamlmıştır. M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %32.83 olarak elde edilmiştir.

Trenin Kirazlı istasyonundan tekrar Metrokent istasyonuna geri dönüş hareketi de benzer şekilde optimize edilmiştir. Şekil 5.29'da, K-M yönü için mevcut sürüş profili ve SA ile optimize edilmiş sürüş profilinin hız-konum grafiği paylaşılmıştır. Görüldüğü üzere bu yöndeki hareket Kirazlı istasyonundan başlayarak Metrokent istasyonunda sonlanır. Böylece tam bir parkur hareketi tamamlanmış olur.



Şekil 5.29 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği

Bu yönde gerçekleştirilen simülasyon çalışması için de benzer şekilde algoritmaya zaman toleransı tanınmamıştır. Şekil 5.30 K-M yönündeki harekete ait hız-zaman grafiği sonucunu göstermektedir. Bir önceki M-K yönündeki harekette olduğu gibi burada da optimize edilmiş hız profili ile hareket eden trenin, mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.30 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği

K-M yönünde yapılan simülasyon sonuçlarına göre, optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda bu yön için de kayda değer enerji tasarrufu sağlandığı Tablo 5.19'dan görülmektedir. K-M doğrultusu çoğunlukla yokuş yukarı tırmanan istasyonlar arasından oluşmakta ve bu durum da enerji veirmli sürüş stilinin bulunmasını zorlayıcı kılmaktadır. Çünkü, enerji verimli sürüş profilinde amaç BG fazını uzun sure kullanmaktır. Ancak, yokuş tırmanan bir tren için bu durum, hızının kısa süre içerisinde düşmesi ve MGG fazını tekrar kullanmak zorunda olması demektir. Buna rağmen algoritma mevcut sürüş profiline kıyasla daha etkili bir sürüş stratejisini bularak enerji verimli bir hız profil elde etmiştir.

Kirazlı istasyonundan, mevcut hız profili ile hareketine başlayan bir tren Metrokent istasyonuna toplamda 884 saniyede 116.37 kWh'lik enerji tüketimi ile ulaşmıştır. SA'nın önerdiği optimal sürüş stratejisinde ise yine aynı sürede ancak 94.76 kWh'lik bir enerji tüketimi ile ulaşarak bu yön için 21.61 kWh'lik bir tasasrruf sağlanmıştır. Sonuç olarak M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %18.57 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.19 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**Optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Kirazlı-Yenimahalle	91.00	17.8181	91.00	13.8369
Yenimahalle-Mahmutbey	114.75	24.9994	114.75	24.2026
Mahmutbey-İstoç	107.75	5.7354	107.75	3.4930

Tablo 5.19 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları (devamı)

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**Optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
İstoç-Ikitelli Sanayi	140.50	17.1515	140.50	12.1185
Ikitelli Sanayi-Turgut Özal	89.50	13.7833	89.50	13.5185
Turgut Özal-Siteler	67.50	11.6079	67.50	8.6191
Siteler-Başakkonutları	89.00	18.5274	89.00	16.8623
Başakkonutları-Metrokent	184.00	6.7470	184.00	2.1091
Toplam	884	116.37	884	94.76

Simülasyon sonuçları tüm parkur hareketi dikkate alınarak değerlendirildiğinde ise Tablo 5.20'de görüldüğü üzere toplam hareket 1759 saniye sürmüştür. Bu durumda, mevcut sürüş stratejisi ile hareket eden bir trenin 206,39 kWh'lik bir enerji tüketimi ile parkuru tamamladığı görülmektedir. SA'nın önerdiği optimal sürüş profili ile hareket eden bir tren ise yine aynı toplam seyahat süresi sonunda 155.23 kWh'lik enerji tüketimi ile hareketini tamamlamıştır. M3 metro hattı üzerinde bir tam tur hareketi sonunda %24.79 ile 51.16 kWh enerji tasarrufu elde edilmiştir.

Tablo 5.20 Tüm parkur boyunca mevcut ve SA ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları

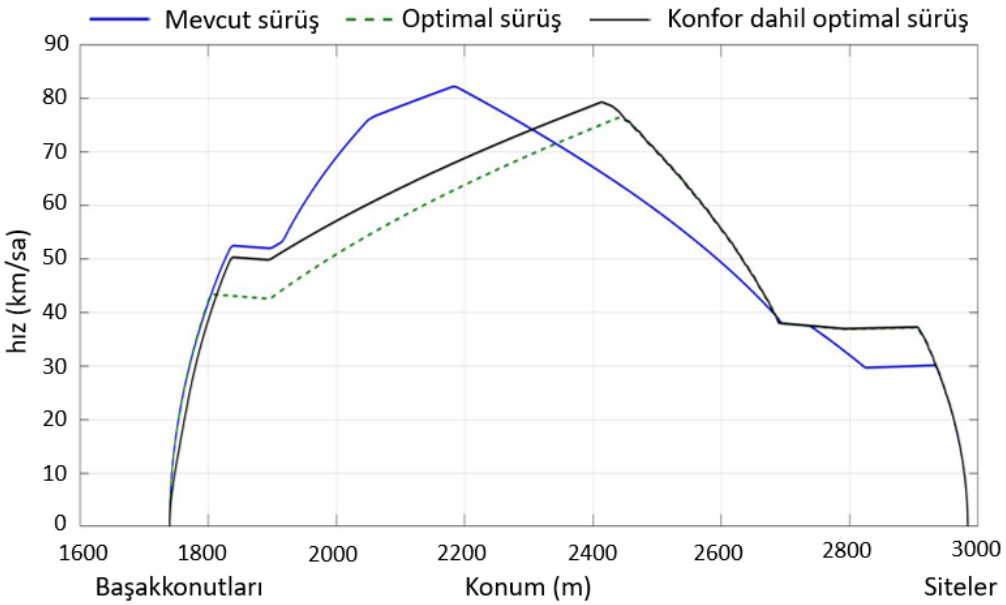
Mevcut hız profili		**SA ile optimize edilmiş hız profili**	
Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi	Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi
1759,00	206,39	1759,00	155,23

5.3.4 Konfor Kısıtlaması Dikkate Alınarak SA ile Hız Profili Optimizasyonu

Bu çalışmada dikkate alınan konfor parametresi, uluslararası standart ISO2631 standartı tarafından belirlenen, bir tren hareketinin kabul edilebilir bir sarsıntı ile sağlanmasıdır. İlgili standartın 2. seviyesinde beliritlen konforlu sürüş aralığı, Jerk (sarsıntı) değerinin 0.315~0.63 m/s^3 aralığı içerisinde kalmasıdır. ISO2631 standardına göre sarsıntı değeri 1 m/s^3'ü geçer geçmez tren içerisindeki yolcular rahatsızlık yaşayacak ve sarsıntı değeri arttıkça da rahatsızlık seviyesi daha da kötüleşecektir.

M3 metro hattında Jerk parametresi 1.12 m/s^3 olarak olarak işletme yapılmaktadır. Bu çalışmada Jerk parametresi 0.5 m/s^3 olarak alınmıştır. Trenin ivme değişimi için 1 saniye içinde maksimum 0.5 m/s^3'e izin verilerek daha az sarsıntılı sürüş sağlanmaya çalışılmıştır. Bu durum SA algoritmasına tanıtılarak trenin ani kalkış yapmasının önüne geçilmiştir. Daha yavaş bir kalkış, mevcut durumdaki kalkış Jerk değerine göre daha uzun bir seyahat süresi ile sonuçlanır. Bu durumda SA algoritması belirlenen seyahat süresini de aşmayacağı için MGG veya SHG fazını daha uzun süre kullanacaktır. Bu da mevcut duruma göre kısmen daha fazla enerji tüketimi demektir. Enerji tüketiminden bir miktar ödün verilerek yolcu konfor ve güvenliğinin artırılması da bir çok işletme açısından kabul edilebilir bir durumdur.

Konfor parametresi dahil edildiği durum ile edilmediği durum arasındaki farkın daha anlaşılabilir olması amacıyla geliştirilen THS'de Başakkonutları-Siteler istasyonları arasında bir simülayon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaya ait sonuç görseli Şekil 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.31 Mevcut sürüş ve SA ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği

Şekil 5.31'de görüldüğü gibi konforu dikkate alan optimum sürüş profili, daha yumuşak bir hareket başlangıcına sahiptir ve maksimum 0.5 m/s^3 Jerk limiti ile hızlanarak hareketine başlamıştır. Ancak, trenin önceden belirlenen sürede istasyona varabilmesi için konfora dikkat etmeyen optimum sürüş moduna göre MGG fazını daha uzun süre kullanarak daha yüksek bir hıza çıkmıştır. Bu nedenle de konforu dikkate almayan optimum sürüşe kıyasla enerji tüketiminin daha fazla olacağı anlaşılmaktadır. Tablo 5.21'de enerji tüketimi ile ilgili bilgi verilmiştir. Buna göre, üç sürüş stratejisinde de hareket süresi sabit ve 100 saniyedir. Mevcut sürüşe kıyasla optimal sürüş 5.1651 kWh daha az enerji tüketimi ile hareketini sonlandırırken konfor parametresi dahil edildiğinde ise 4.8449 kWh daha az enerji tüketerek hareketini sonlandırmıştır. Konforu dikkate almayan optimal sürüş profili ile harekete kıyasla konfor dahil edildiği durumda 0,3202 kWh, %9.35, daha fazla enerji tüketimi meydana gelmiştir. Buna karşın araç sürüş konforu 1.12 m/s^3 iken 0.5 m/s^3 olarak %55.35 oranında artırılmıştır.

Tablo 5.21 Başakkonutları-Siteler istayonları arası farklı sürüş stratejilerinin karşılaştırılması

İstasyon	Mevcut sürüş		Optimal sürüş		Konfor dahil optimal sürüş	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
B.konutları-Siteler	100.00	8.5903	100.00	3.4252	100.00	3.7454

Metro işletmecileri açısından konfor ve enerji tüketimi arasındaki denge tartışılarak uygun bir limit ile sınırlandırılabilinir. Belirli bir miktarda enerji tüketimi artışı göze alınarak Jerk parametresi ayarlanabilir ve yolcu güvenliği ile konforu artırılabilir.

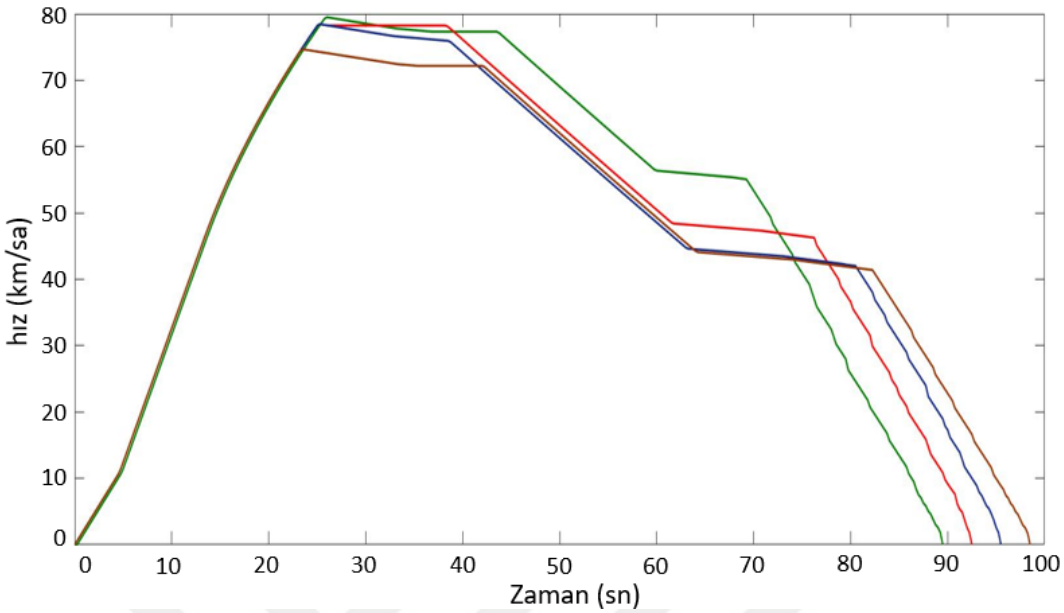
5.3.5 Hız Profili Optimizasyonunda Zaman Artışı Etkisinin SA ile İncelenmesi

Raylı sistemlerde enerji tüketimi seyahat süresine doğrudan bağlıdır. Daha uzun seyahat süresi daha az MGG ve SHG fazı gerektirirken daha uzun süre boyunca BG fazı kullanımına olanak tanır. Bu da daha az enerji tüketimi ile sonuçlanır.

Metro işletmecileri için pik olmayan saatler arasında mevcut duruma kıyasla nispeten daha uzun süreli istasyonlar arası yolculuk yapılarak enerjiden tasarruf sağlanabilir. Bu tamamen enerji tüektimi ile seyahat süresi arasındaki ödünleşmedir. Yani enerji tüketimin azaltılması daha önemli ise belirli seyahat süresi bir miktar aşılabilir eğer zaman daha önemli ise de enerji tüketiminden bir miktar fedakarlık yapılabilir.

Seyahat süresinin enerji tüketimine olan etkisinin gösterilmesi amacıyla İkitelli-Turgut Özal istasyonları arasında THS'de bir simülasyon testi yapılmıştır. Bu iki istasyon arası seyahat süresi mevcut durumda 89.5 saniyedir. Üçer saniye zaman artırımına izin verilerek, 92.5, 95.5 ve 98.5 saniyelik seyahat süresi ile bu yol üzerinde bir tren hareketi optimize edildiği durumda karşılık gelen enerji

tüketimleri incelenmiştir. Simülasyon testi çıktısının hız-zaman grafiği Şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.32 Seyahat süresi artışı dikkate alınarak SA ile optimize edilmiş hız profili

Seyahat süresinin artırılması daha az enerji tüketimi ile trenin varış noktasına ulaşmasını sağlamıştır. Bu çalışmaya ait detaylı sonuçlar Tablo 5.22'de verilmiştir. Elde edilen verilere göre, referans süre 3 saniye yani % 3,35 oranında arttırıldığında enerji tüketimi bu iki istayon aralığı için 1.6200 kWh, %11.98, azalmıştır. Benzer şekilde referans süreye kıyasla seyahat süresi 9 saniye yani %10.05 oranında arttırılmasına izin verildiğinde enerji tüketimi 2.8316 kWh yani % 20.95 oranında azaldığı görülmüştür.

Tablo 5.22 Seyahat süresi esnekliğinin SA ile incelenmesi

Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**
89,50 (referans süre)	13,5185
92,50	11.8985
95,50	11.4231
98,50	10.6869

Sonuçların gösterdiği üzere seyahat süresini tolere edilebilir şekilde artırmanın karşılığında önemli miktarda enerji tasarrufu elde edilmiştir. Her raylı sistem işletmeci firmalarının, trenin her turu için rezerv süresi vardır. İşletmede yaşanan olumsuzluklardan kaynaklı gecikmelerde bu rezerv süreden kullanılarak gecikme önlenmeye çalışılır. Böyle gecikmelerin yaşanmadığı zamanlarda ise bu rezerv süre enerji verimliliği için seyahat süresi artışında değerlendirilebilinir. Ayrıca, pik olmayan saatlerde, trenlerin istasyonlarda bekleme süreleri 1'er saniye azaltılarak, 8 ara istasyonlu M3 metro hattı için 8 saniye, gidiş-dönüş hattı düşünüldüğünde ise 16 saniye kazandırır. Raylı system işletmeci firmaları bu ek süreleri enerji tasarrufu için kullanarak tren işletim maliyetinden tasarruf yapabilir.

5.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve PSO ile Tren Hız Profili Optimizasyonu

GA ve SA algoritmalarından sonra Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) yöntemi ile de aynı tren hareketi probleminin çözümü incelenmiştir. Bu başlık altında öncelikle PSO arama tekniği tanıtılacaktır. Ardından, İstanbul M3 metro hattı işletme şartları dikkate alınarak, bu hat üzerinde çalışan trenin hız profili optimize edilerek mevcut sürüş ile kıyaslanacak ve bulgular tartışılacaktır.

5.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu

R.C. Eberhart ve J. Kennedy, kuş sürüleri üzerinde yaptıkları gözlemler sonucunda 1995 yılında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) olarak bilinen popülasyona dayalı optimizasyon tekniğini geliştirmişlerdir [178]. Kuşlar ve balıklar da dahil olmak üzere çok sayıda hayvan sürüsü arasındaki, bol miktarda yiyecek bulmak ve yırtıcı hayvanlardan kaçınmak gibi çeşitli çevresel uyum süreçleri boyunca iletişim, gerçeği keşfetme olasılığını hızlandırır ve artırır.

Sürü ve sürünün her bir üyesini oluşturan parçacıklar bu yöntemin omurgasını oluşturur. Her parçacık, önceki bilgi ve tecrübesini kullanarak sürü içindeki mümkün olan en iyi konuma kendi konumunu ayarlar. O anda en iyi konumdaki sürünün üyesi, diğer parçacıkların hareketlerini nasıl güncellemesi gerektiğini belirler. Yaklaşma hızı rastgele gelişen bir senaryo olduğundan, parçacıklar

genellikle yeni hareketlerinde önceki hareketlerine göre daha iyi bir konuma ulaşır. Hedefe ulaşılıncaya kadar bu işleme devam edilir.

Parçacık sürü optimizasyonunda hız ve konum güncellemesi olmak üzere iki önemli durum söz konusudur. Algoritma optimal çözüme, bu ikisini her aşamada güncelleyerek ulaşır. PSO'nun parçacığın hız ve konumunu belirlemek için kullandığı ifadeler aşağıda denklem 5.14 ve 5.15'te verilmiştir [179]:

$$V_i^d = wV_i^d + c_1 r_1 \left(p_i^d - x_i^d\right) + c_2 r_2 (p_g^d - x_g^d) \tag{5.14}$$

$$x_i^d = x_i^d + \mu V_i^d \tag{5.15}$$

Burada, p_i parçacığın en iyi konumunu, v_i parçacığın hızını ve p_g tüm komşu parçacıklar için en iyi konumları temsil eder. i = 1, 2 ,..., m; d =1, 2 ,..., D; x_i^d, d'nin boyut içindeki i'ninci için hızı temsil eder. w, negatif olmayan atalet faktörünü temsil eder. c_1 ve c_2 ivme sabitleri olup yakınsama oranını temsil eder. Düşük değerlerin seçilmesiyle parçacıklar hedef bölgeye çekilmeden daha uzaklara dağılabilirler. Ancak bu durum hedefe ulaşmak için daha fazla zaman gerektirir. Öte yandan yüksek değerlerin seçilmesi hedefe ulaşmayı hızlandırabileceği gibi öngörülemeyen hareketlere ve hedef alanının atlanmasına da neden olabilir. Genellikle c_1 ve c_2'yi 2 olarak almanın iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir [180]. p_i^d, i'ninci iterasyon için en uygun konumu temsil eder. p_g^d, küresel en iyi konum anlamına gelir. r_1 ve r_2 ise, 0 ile 1 arasındaki rastgele sayılardır. μ, yakınsamaya bağlı olarak ağırlığı değiştirebilen kısıtlamayı ifade eder.

Yukarıda anlatılan işlemler şu şekilde sıra ile sürece girer ve süreci tamamlar;

1. Rassal olarak üretilen başlangıç konumu ve hızı ile başlangıç sürüsü elde edilir.
2. Bütün parçacıkların fitness değerleri hesaplanır.
3. Tüm parçacıklar için optimal yaklaşım elde edilir.
4. İçerisinden global optimal seçilir.
5. Hız ve konum yeniden hesaplanır.
6. Sonuca yeterince yaklaşıldı ise süreç sona erer; değilse, 2. adımdan itibaren tekrarlanır.

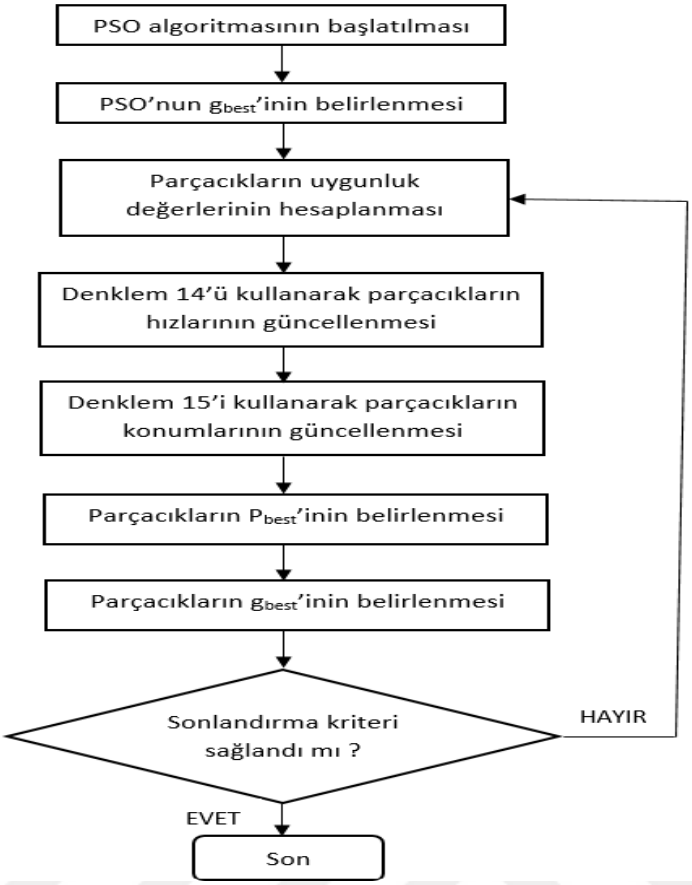
Yukarıda açıklanan adımlara göre oluşturulan PSO algoritmasının kaba kodu Tablo 5.23'te verilmiştir.

Tablo 5.23 Parçacık sürü optimizasyonu kaba kodu

```
        For her bir parçacık için
    Parçacık başlangıç pozisyonuna getirilir
End
Do
    For her bir parçacık için
        Fitness değeri hesaplanır
        İf  Fitness değer Pbest'ten daha iyi ise
            Şimdiki değer yeni Pbest olarak ayarlanır
    End
    Bütün parçacıkların bulduğu Pbest değerlerinin en ideali, tüm parçacıkların gbest'i
olarak ayarlanır
    For  her bir parçacık için
        Denklem (5.14)'e göre parçacık hızı hesaplanır
        Denklem (5.15)'ye göre parçacık konumunu güncelle
    End
  While  Maksimum yineleme sayısına ulaşılana kadar devam et
```

Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması bir başlangıç popülasyonuyla başlar, çalıştıkça çözümleri günceller ve en iyi çözümü bulmaya çalışır. En iyi iki değer (best), her döngü sırasında parçacık konumlarını güncellemek için kullanılır. Parçacığın şu ana kadar bulduğu en iyi sonucu veren noktanın koordinatları bu değerlerden ilki olan Pbest ile temsil edilir. İkinci değer ise popülasyonun en iyi cevabını sunan coğrafi koordinatlardır. İkinci değer yerel en iyi (best) olarak kabul edilirse, ikinci değer küresel en iyi (gbest) olarak kabul edilir.

Şekil 5.33'te PSO algoritmasının çalışmasına ait akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.33 PSO algoritması akış şeması

5.4.1.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması Parametreleri

Çoğu optimizasyon tekniklerinde olduğu gibi PSO parametrelerinin seçimi de, optimizasyon performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. İyi performans sağlayan PSO parametrelerinin seçilmesi bu nedenle birçok araştırmanın konusu olmuştur [181, 182].

PSO algoritması, atalet aralığı, parçacık sayısı, hızlanma sabiti c_1 ve c_2, ve maksimum iterasyon sayısı T_{max} gibi bazı ayarlama parametreleri içerir. Bu çalışmada tercih edilen PSO parametreleri Tablo 5.24'te verilmiştir.

Tablo 5.24 PSO algoritması parametreleri

Parametre	Değer
Atalet aralığı	[0.1, 1.1]

Tablo 5.24 PSO algoritması parametreleri (devamı)

Parametre	Değer
T_{max}	400
c_1 ve c_2	2
Parçacık sayısı	100

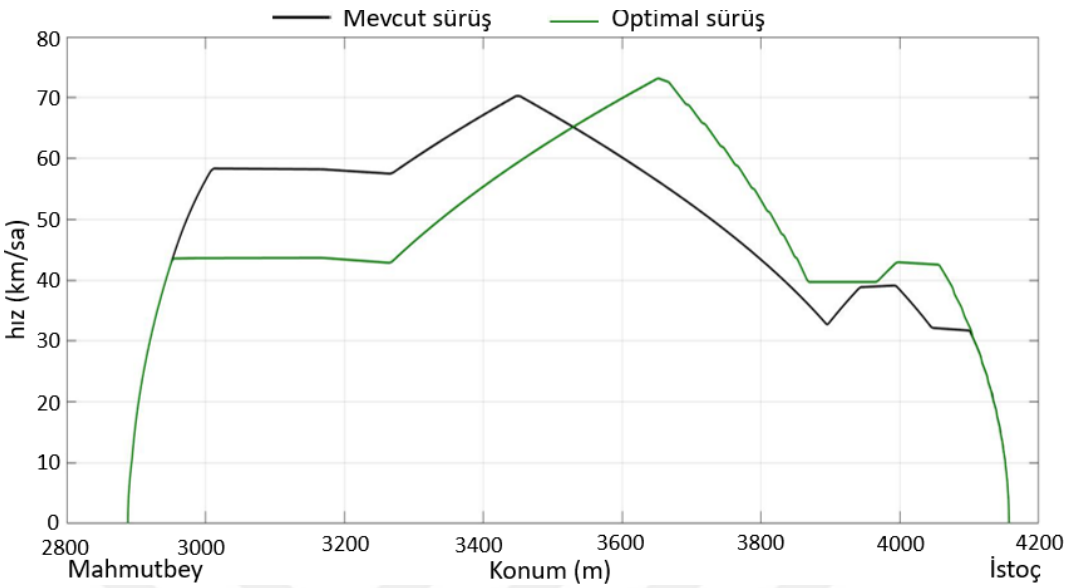
Parçacık sayısının genellikle 20 ile 40 arasında alınması yeterli gelmektedir. Ancak bazı zor veya özgün problemler için 100 veya 200 parçacık kullanılması daha doğru çözümler getirmektedir. Bu çalışmada 100 parçacık tercih edilmiştir. Ögrenme faktörleri c_1 ve c_2 genellikle 2 olarak seçilmektedir. Genellikle c_1, c_2'ye eşit ve [0, 4] aralığında tercih edilir. Durdurma koşulu maksimum sayıda tekrarlandığında veya uygunluk fonksiyonu istenilen seviyeye ulaştığında algoritma sonlandırılabilir.

Görüldüğü gibi PSO sadece birkaç parametreye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca PSO gerçek sayıları kullanır. Genetik algoritmaların aksine, hesaplamaları tamamlamak için hiçbir özel operatöre veya ikili kodlamadan dönüşüme gerek yoktur.

5.4.2 PSO ile M3 Metro Hattı Tekli İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

PSO algoritmasının tren hareketi optimizasyonu problemine karşı etkinliğinin incelenmesi için üç farklı istasyon arasında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. M3 metro hattının mevcut hız profili, istasyonlar arası seyahat süresi ve enerji tüketimi refarans alınarak PSO'nun sunduğu optimal hız profili ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.34 Mahmutbey - İstoç istasyonları arasında mevcut sürüş profiline kıyasla PSO ile optimize edilmiş sürüşün üst üste bindirilmiş çıktısını göstermektedir. Buna göre mevcut sürüş profilinde yaklaşık 58 km/sa'lik hıza kadar MGG modu uygulanmış ardından çeşitli hareket modları ile bitiş noktasına ulaşılmıştır. Optimize edilmiş sürüş profilinde ise yaklaşık 44 km/sa'lik hıza kadar MGG modu tercih edilmiştir. Ardından, BG fazı kullanılarak bir müddet tren hızı hissedilmeyecek kadar ardından da yolun dik iniş kısmına gelindiğinde trenin hızı 70 km/sa'in üzerine çıkacak kadar artmıştır. 3869-3965 metreler arasında 40 km/sa'lik hız sınırında tren FR fazı

uygularak bu limite uymuş ardından da uygun noktada duruş yapmak üzere hızını sıfıra indirmiştir.



Şekil 5.34 Mahmutbey – İstoç istasyonları arası PSO ile optimize edilmiş sürüş

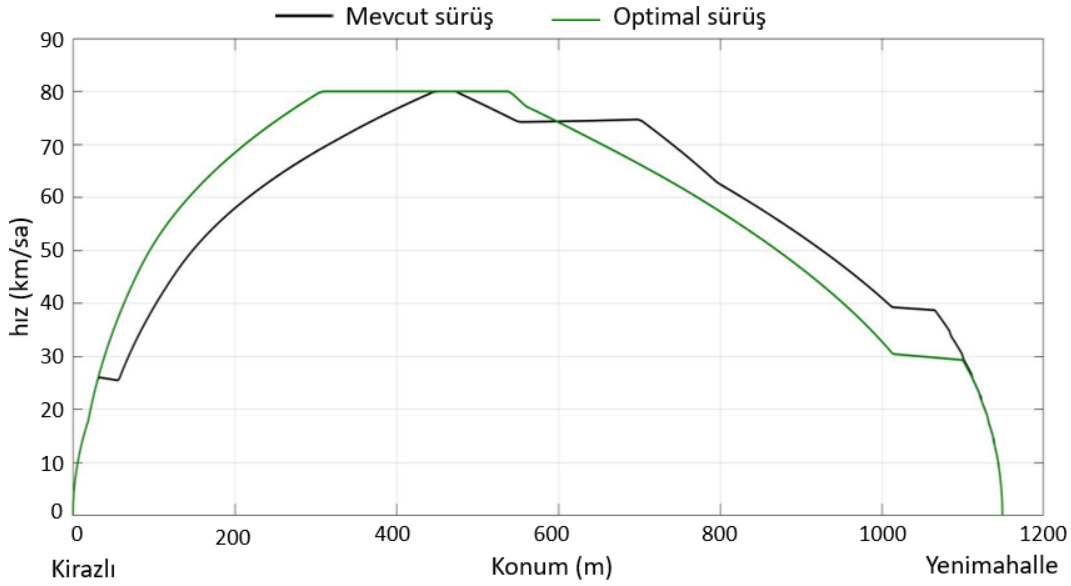
Tablo 5.25, Mahmutbey-İstoç istayonları arası sürüş simülasyonuna ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgilerini içermektedir. Görüldüğü üzere her iki sürüş modelinde de iki istasyon arası hareket, 107.75 saniye sürmüştür. Bu durumda, mevcut sürüş profiline kıyasla PSO tekniği ile optimize edilmiş sürüş profilinde 2.2424 kWh yani %39.09 enerji verimliliği elde edilmiştir.

Tablo 5.25 Mahmutbey – İstoç istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	**Mevcut sürüş profili**	**Optimal sürüş profili**
Seyahat süresi (sn)	107,75	107,75
Enerji tüketimi (kWh)	5,7354	3,4930

Benzer şekilde, Kirazlı – Yenimahalle istasyonları arasında mevcut hızlanma profili ile hareket eden bir trenin faz geçiş noktaları PSO metodu ile optimize edilmiştir. Bu harekete ait hız-konum grafiği çıktısı Şekil 5.35'te paylaşılmıştır. Görüldüğü üzere, PSO algoritması bu iki istasyon arası sürüş profilinde 4 hareket modunun (MGG, SHG, BG ve FR) tamamını kullanmayı tercih etmiştir. Optimize edilmiş

sürüş modunda 304. metreye kadar MGG modu kullanılarak maksimum hıza ulaşılmış ve ardından bu hız ile yaklaşık 540.metreye kadar SHG modunda harekete devam edilmiştir. Bu noktadan itibaren BG modu kullanılmış ve uygun frenlene noktasında da FR modu uygulanarak tren hareketi sonlandırılmıştır. Mevcut sürüş profilinde ise 2 farklı konumda MGG fazı uygulanmış ardından maksimum hıza ulaşıldığında kısa bir süre SHG fazına geçildiği bu noktadan da kısmi FR uygulandığı görülmektedir. Daha sonrasında çeşitli hareket modları tekrarlanarak tren varış noktasında durdurulmuştur.



Şekil 5.35 Kirazlı – Yenimahalle istasyonları arası PSO ile optimize edilmiş sürüş

Tablo 5.26'da, Kirazlı-Yenimahalle istayonları arasında gerçekleştirilen hareket simülasyona ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgileri paylaşılmıştır. Her iki hareket modunda da seyahat süresi aynı ve 91.00 saniyedir. Enerji tüketimi açısından ise mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüş profilinde 3.9971 kWh yani %22.43 enerji verimliliği elde edilmiştir.

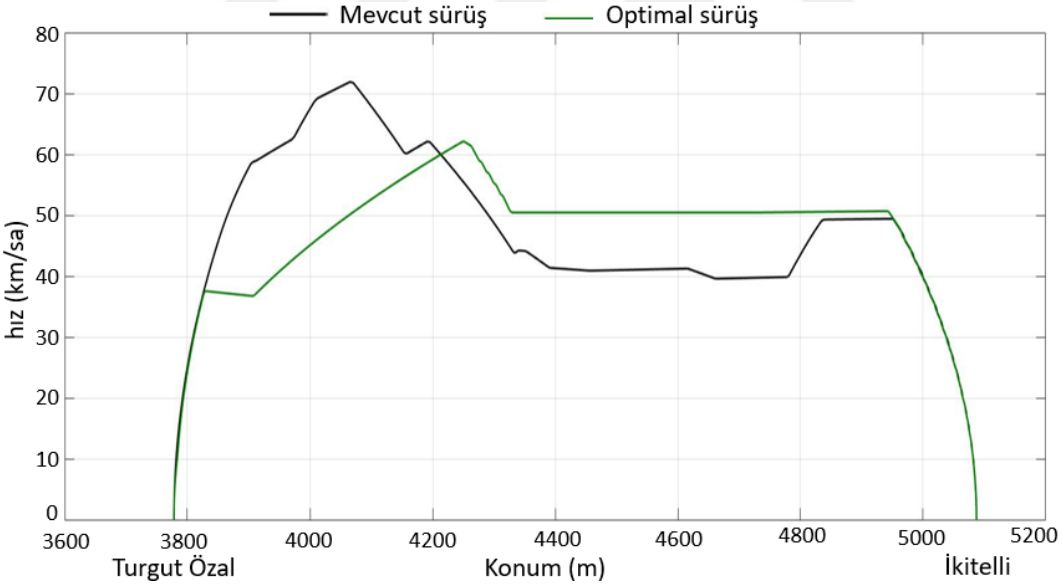
Tablo 5.26 Kirazlı – Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	**Mevcut sürüş profili**	**Optimal sürüş profili**
Seyahat süresi (sn)	91,00	91,00

Tablo 5.26 Kirazlı – Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu (devamı)

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Enerji tüketimi (kWh)	17,8181	13,8210

Tekli istasyonlar arasında son bir simülasyon çalışması da Turgut Özal – İkitelli istasyonları arasında yapılmıştır. Mevcut sürüş profilinde, Şekil 5.36'da görüldüğü üzere 70 km/sa hıza kadar MGG fazı uygulanmıştır. Ardından FR fazı uygulanarak hız bir miktar düşürülmüş ve tekrar MGG fazı ile kısmen yükseltilmiştir. Daha sonra sırasıyla BG, MGG, SHG ve FR fazları uygunlarak tren varış noktasına ulaştırılmıştır. PSO'nun önerdiği sürüş profilinde ise 38 km/sa'e kadar MGG fazı kullanılmış ve bundan sonra SHG fazının başlangıç noktasına kadar BG fazı uygulanmıştır. Son olarak da algoritmanın belirlediği uygun FR noktasından frene girilerek hareket sona erdirilmiştir.



Şekil 5.36 Turgut Özal – İkitelli istasyonları arası PSO ile optimize edilmiş sürüş

Tablo 5.27'de Turgut Özal-İkitelli istasyonları arasında gerçekleştirilen tren hareket simülasyonuna ait bilgiler paylaşılmıştır. Buna göre mevcut sürüş profiline kıyasla PSO ile optimize edilmiş sürüş profilinde hareket 6.3584 kWh'lik yani %71.41 enerji tasarruflu bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu iki istasyon arası tamamen yokuş inişli bir yol profiline sahiptir. Algoritma gereksiz frenleme yapmadan ve MGG fazını mümkün mertebe az kullanıp BG fazını uzatarak yolun bu iniş

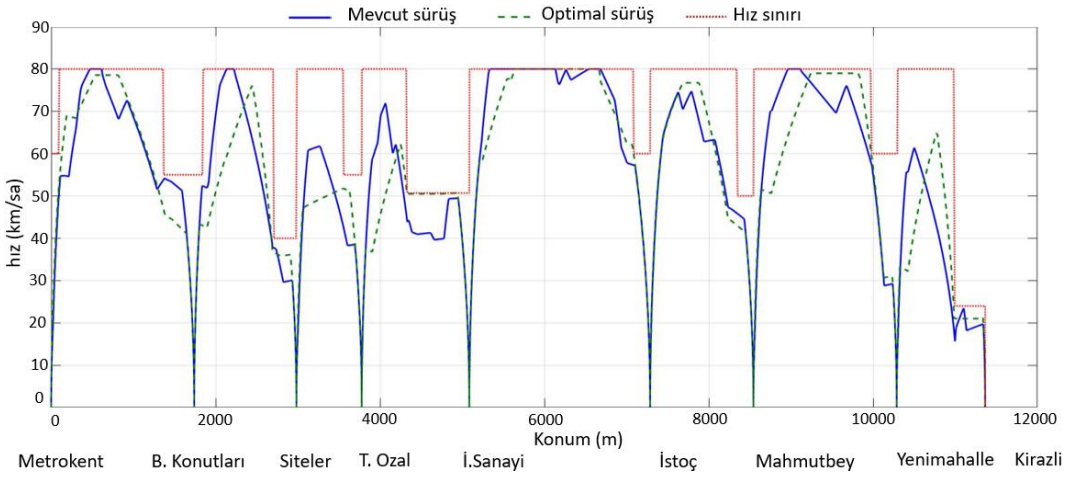
profilindeki potansiyel enerjiden mümkün olduğunda fazla yararlanmayı başarmıştır. Mevcut sürüşte ise MGG fazı gereksiz yere fazla kullanılmakta ve bu da frenlemeyi zorunlu kılmaktadır. Frenleme ardından düşen hızı artırmak için tekrardan MGG fazı kullanılmaktadır. Bu sebeple, hattın iniş kısmındaki potansiyel enerjiden faydalanamamakla birlikte enerji tüketimi de artmaktadır.

Tablo 5.27 Turgut Özal – İkitelli istasyonları arası mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Seyahat süresi (sn)	110,50	110,50
Enerji tüketimi (kWh)	8,9039	2,5455

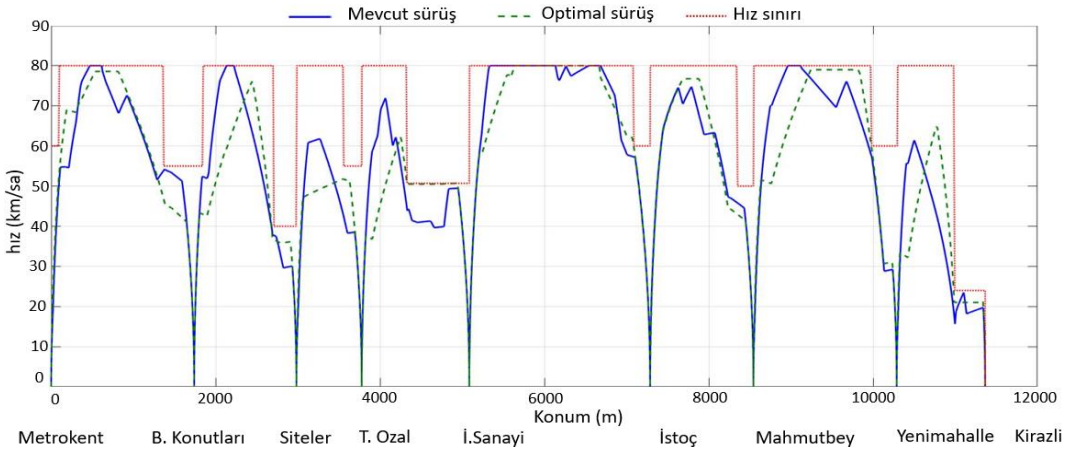
5.4.3 PSO ile M3 Metro Hattı Çoklu İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

M3 Metro hattının gidiş-dönüş istasyonları arasında, bu hat üzerinde çalışan trenin hız profili PSO yöntemi ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde hız sınırları, seyahat süresi, toplam seyahat süresi, harekete başlangıç ve bitiş noktaları gibi işletmesel kısıtlamalar dikkate alınmıştır. Çalışmada önce diğer optimizasyon yöntemlerinde yapıldığı gibi M-K doğrultusunda optimizasyon yapılmıştır. Şekil 5.37'de görüldüğü üzere PSO algoritması trenin harekete başlama noktasından bitiş noktasına kadar hız sınırlarına da dikkat ederek her bir istasyon arası için yeni hız profilini bulmuştur. Mevcut sürüşe kıyasla PSO tarafından önerilen yeni optimize edilmiş sürüş üst üste bindirilerek çizdirilmiş ve hız-konum grafiği olarak paylaşılmıştır.



Şekil 5.37 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği

Bu optimizasyon çalışmasında M3 hattında çalışan trenlerin hareket modlarının optimize edilmesi ile cer enerjisi tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. Ancak, daha önceden de belirtildiği üzere enerji tassarrufu temel amaç olsa da seyahat süresi açıdan herhangi bir gecikme istenmemektedir. PSO algoritması, daha önceden belirlenen istasyonlar arası seyahat süresini aşan bir çözüm bulduğunda, yüksek bir ceza puanı ile karşılaşmakta ve bu çözümü elemektedir. Bu sebeple, arzu edilen istasyonlar arası seyahat süreleri içerisinde kalan olası çözümlerden en az enerji tüketimini veren hız profili sonucunu optimal çözüm olarak sunmaktadır. Şekil 5.38 M-K doğrultusundaki harekete ait hız-zaman grafiği çıktısını göstermektedir. Optimize edilmiş hız profili ile harekette trenin, mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.38 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği

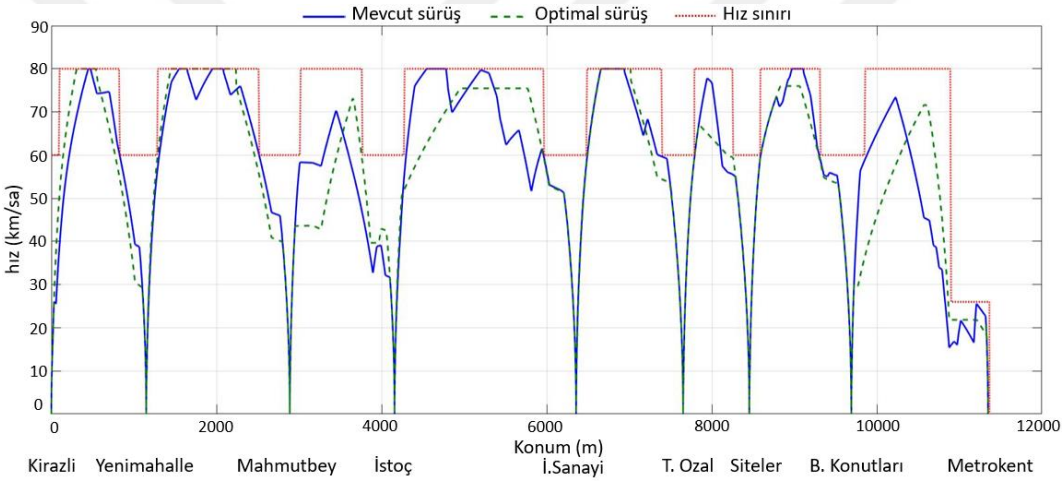
Matlab programı kullanılarak geliştirilen THS'de, M-K doğrultusunda yapılan simülasyon sonuçlarına göre, PSO metodu kullanılarak optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda önemli miktarda enerji verimliliği elde edilmiştir. Her bir istasyon arası için mevcut sürüş profilinde ve optimize edilmiş profil ile sürüş için tüketilen enerji miktarları ve seyahat süresi bilgileri Tablo 5.28'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.28 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**Optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
Metrokent-Başakkonutlari	119.50	14.6179	119.50	11.6791
Başakkonutlari-Siteler	100.00	8.5903	100.00	3.4264
Siteler-Turgut Ozal	73.00	6.8022	73.00	3.9442
Turgut Ozal-Ikitelli Sanayi	110.50	8.9039	110.50	2.5455
Ikitelli Sanayi-Istoç	125.00	16.8861	125.00	12.0863
Istoç-Mahmutbey	91.50	20.2384	91.50	19.4616
Mahmutbey-Yenimahalle	117.50	9.2306	117.50	4.8278
Yenimahalle-Kirazli	138.00	4.7506	138.00	2.0091
Toplam	875	90.02	875	59.98

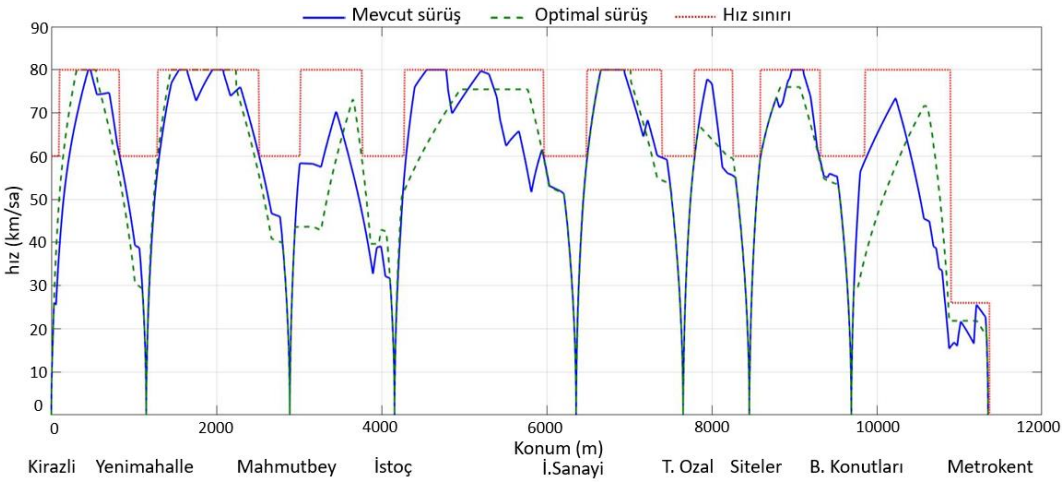
Tablo 5.28'e göre mevcut sürüş profilinde, tren Metrokent istasyonundan harekete başlayarak Kirazlı istasyonuna 875 saniye'de 90.02 kWh'lik bir enerji tüketimi ile varmıştır. PSO yöntemi ile optimize edilmiş sürüş profilini kullanarak hareket eden bir tren ise aynı aynı güzergahı 875 saniye içinde 59.98 kWh'lik bir enerji tüketimi ile tamamlamıştır. Hareket süresinde herhangi bir artış olmaksızın, 30.04 kWh daha az enerji tüketimi ile yolculuğunu tamamlamıştır. Sonuç olarak, M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %33.37 olarak elde edilmiştir.

Trenin Kirazlı istasyonundan tekrar Metrokent istasyonuna geri dönüş hareketi de benzer şekilde optimize edilmiştir. Şekil 5.39'da, K-M yönü için mevcut sürüş profili ve PSO ile optimize edilmiş sürüş profilinin hız-konum grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 5.39 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği

Bu yönde gerçekleştirilen simülasyon çalışması için de benzer şekilde PSO algoritmasına seyahat süresi toleransı tanınmamıştır. Şekil 5.40 K-M yönündeki harekete ait hız-zaman grafiği sonucunu göstermektedir. Bir önceki M-K yönündeki harekette olduğu gibi burada da optimize edilmiş hız profili ile hareket eden trenin, mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.40 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği

K-M yönünde yapılan simülasyon sonuçlarına göre, PSO algoritması ile optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda bu yön için de önemli miktarda enerji tasarrufu sağlandığı Tablo 5.29'dan görülmektedir. K-M doğrultusu çoğunlukla yokuş yukarı parkuru olan istasyonlardan oluşmakta ve bu durum da enerji verimli hız profilinin bulunmasını zorlayıcı kılmaktadır. Buna rağmen, PSO algoritması mevcut sürüş profiline kıyasla daha etkili bir sürüş stratejisini bularak enerji verimli bir hız profil elde etmeyi başarmıştır.

Kirazlı istasyonundan, mevcut hız profili ile hareketine başlayan bir tren Metrokent istasyonuna toplamda 884 saniyede 116.37 kWh'lik enerji tüketimi ile ulaşmıştır.PSO'nun önerdiği optimal sürüş stratejisinde ise yine aynı sürede ancak 94.59 kWh'lik bir enerji tüketimi ile ulaşarak bu yön için 21.78 kWh'lik bir tasasrruf sağlanmıştır. Sonuç olarak M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %18.72 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.29 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve PSO ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	Mevcut sürüş profili		Optimize edilmiş sürüş profili	
	Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
Kirazlı-Yenimahalle	91.00	17.8181	91.00	13.8210
Yenimahalle-Mahmutbey	114.75	24.9994	114.75	24.1990
Mahmutbey-İstoç	107.75	5.7354	107.75	3.4930
İstoç-Ikitelli Sanayi	140.50	17.1515	140.50	12.1010
Ikitelli Sanayi-Turgut Özal	89.50	13.7833	89.50	13.4980
Turgut Özal-Siteler	67.50	11.6079	67.50	8.5780
Siteler-Başakkonutları	89.00	18.5274	89.00	16.7909
Başakkonutları-Metrokent	184.00	6.7470	184.00	2.1091
Toplam	884	116.37	884	94.59

Simülasyon sonuçları tüm parkur hareketi dikkate alınarak değerlendirildiğinde Tablo 5.30'da görüldüğü üzere toplam hareket 1759 saniye sürmüştür. Bu durumda, mevcut sürüş stratejisi ile hareket eden bir trenin 206,39 kWh'lik bir enerji tüketimi ile parkuru tamamladığı görülmektedir. PSO'nun önerdiği optimal sürüş profili ile hareket eden bir tren ise yine aynı toplam seyahat süresi sonunda 154.57 kWh'lik

enerji tüketimi ile hareketini tamamlamıştır. M3 metro hattı üzerinde bir tam tur hareketi sonunda %25.11 ile 51.82 kWh enerji tasarrufu elde edilmiştir.

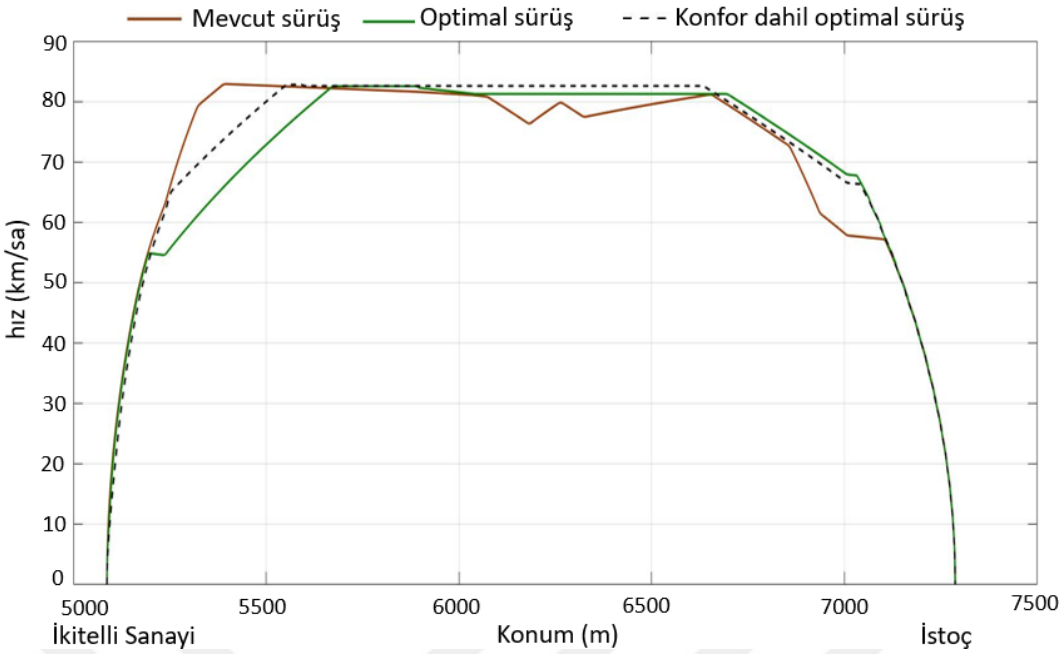
Tablo 5.30 Tüm parkur boyunca mevcut ve PSO ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları

Mevcut hız profili		**PSO ile optimize edilmiş hız profili**	
Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi (kWh)	Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi (kWh)
1759,00	206,39	1759,00	154,57

5.4.4 Konfor Kısıtlaması Dikkate Alınarak PSO ile Hız Profili Optimizasyonu

Raylı ulaşım sistemlerinde seyahat anındaki ani kalkış ve frenlemeden kaynaklı sarsıntı değer aralıkları ile tanımlanan konfor parametresi uluslararası ISO2631 standartı tarafından belirlenir. Sürüş anında yolcuların rahatsızlık yaşamayacağı Jerk parametresi ilgili standart gereği 0.5 m/s^3 olarak seçilmiş ve PSO algoritmasına tanıtılarak bu değeri aşmayacak şekilde ivmelenme hareketi yapması sağlanmıştır.

Konfor parametresi dahil edildiği durum ile edilmediği durum arasındaki farkın daha anlaşılabilir olması amacıyla geliştirilen THS'de İkitelli Sanayi-İstoç istasyonları arasında bir simülayon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaya ait görsel Şekil 5.41'de, mevcut sürüş, optimal sürüş ve konfor parametresi dahil olan optimal sürüş profili üst üste çizdirilmiş olarak verilmiştir.



Şekil 5.41 Mevcut sürüş ve PSO ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği

Şekil 5.41'de görüldüğü gibi konforu dikkate alan optimum sürüş profili, daha yumuşak bir hareket başlangıcına sahiptir. Mevcut hız profilinde olduğu gibi 1.12 m/s^3 jerk değeri yerine maksimum 0.5 m/s^3 jerk limiti ile hızlanarak hareketine başladığı için nispeten yavaş kalkış yapmıştır. Ancak, trenin önceden belirlenen sürede istasyona varabilmesi için konfora dikkat etmeyen optimum sürüş moduna göre MGG fazını daha uzun süre kullanarak daha yüksek bir hıza çıkmıştır. Bu hızı daha uzun süre SHG fazını kullanarak korumuştur. Bu nedenle, konforu dikkate almayan optimum sürüşe kıyasla enerji tüketiminin daha fazla olacağı beklenen bir durumdur. Tablo 5.31'de enerji tüketimi ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır. Buna göre, üç sürüş stratejisinde de hareket süresi sabit ve 125 saniyedir. Mevcut sürüşe kıyasla optimal sürüş 4.7998 kWh daha az enerji tüketimi ile hareketini sonlandırırken konfor parametresi dahil edildiğinde ise 3.0004 kWh daha az enerji tüketerek hareketini sonlandırmıştır. Konforu dikkate almayan optimal sürüş profili ile harekete kıyasla konfor dahil edildiği durumda 1.7994 kWh, %14.88 daha fazla enerji tüketimi meydana gelmiştir. Buna karşın araç sürüş konforu 1.12 m/s3 iken 0.5 m/s^3 olarak %55.35 oranında artırılmıştır.

Tablo 5.31 İkitelli Sanayi – İstoç istasyonları arası farklı sürüş stratejilerinin karşılaştırılması

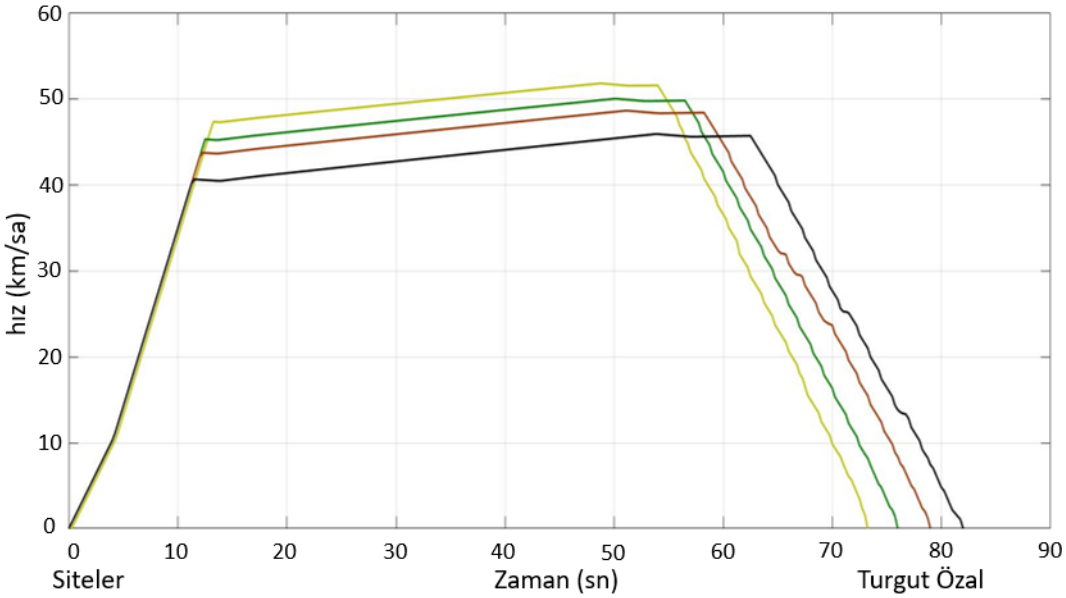
İstasyon	Mevcut sürüş		Optimal sürüş		Konfor dahil optimal sürüş	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
İkitelli S. - İstoç	125.00	16.8861	125.00	12.0863	125.00	13.8857

Belirli bir miktarda enerji tüketimi artışı (bu iki istasyon aralığı için %14.88) göze alınarak Jerk parametresi ayarlanabilir ve yolcu güvenlik ve konforu artırılabilinir. Bu tamamen metro işletmecisi firmanın vereceği karara bağlıdır.

5.4.5 Hız Profili Optimizasyonunda Zaman Artışı Etkisinin PSO ile İncelenmesi

Metro işletmecileri için pik olmayan saatler arasında mevcut duruma kıyasla nispeten daha uzun süreli istasyonlar arası yolculuk yapılması daha uzun süre boyunca BG fazı kullanımına olanak verir. Bu da tren hareketi sırasında daha az enerji tüketimi ile sonuçlanır.

Seyahat süresinin enerji tüketimine olan etkisinin gösterilmesi amacıyla Siteler-Turgut Özal istasyonları arasında THS'de bir simülasyon testi yapılmıştır. Bu iki istasyon arası seyahat süresi mevcut durumda 73 saniyedir. Üçer saniye zaman artırımına izin verilerek, 76, 79 ve 82 saniyelik seyahat süresi ile bu yol üzerinde bir tren hareketi optimize edildiği durumda karşılık gelen enerji tüketimleri incelenmiştir. Simülasyon çalışması sonucu elde edilen hız-zaman grafiği Şekil 5.42'de verilmiştir.



Şekil 5.42 Seyahat süresi artışı dikkate alınarak PSO ile optimize edilmiş hız profili

Seyahat süresinin artırılması daha az enerji tüketimi ile trenin varış noktasına ulaşmasını sağlamıştır. Bunun genel sebebi, Şekil 5.42'de görüldüğü üzere, seyahat süresi arttıkça algoritma daha kısa süre MGG fazı kullanmış ve cer enerjisinin kullanılmadığı BG süresini ise uzatmıştır. En uzun süreli seyahat (siyah çizgi) en kısa süreli MGG fazının kullanıldığı harekettir. Bu çalışmaya ait sonuçlar Tablo 5.32'de verilmiştir. Buna göre, referans süre 3 saniye yani % 4.11 oranında arttırıldığında enerji tüketimi bu iki istayon aralığı için 0.3393 kWh, %8.60, azalmıştır. Benzer şekilde referans süreye kıyasla seyahat süresi 9 saniye yani %12.33 oranında arttırılmasına izin verildiğinde enerji tüketimi 0.9764 kWh yani % 24.75 oranında azaldığı görülmüştür.

Tablo 5.32 Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında seyahat süresi artışına karşın enerji tüketimi

Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**
73,00 (referans süre)	3,9442
76,00	3,6049
79,00	3,4399

Tablo 5.32 Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında seyahat süresi artışına karşın enerji tüketimi (devamı)

Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
82,00	2,9678

Çalışma sonuçlarından görüldüğü üzere, seyahat süresini tolere edilebilir şekilde artırmanın önemli miktarda enerji tasarrufu potansiyeli sunduğu anlaşılmıştır. İşletmenin pik olmayan saatlerinde veya istasyonlarda bekleyen yolcu yoğunluğunun az olduğu aralıklar için seyahat süresinden bir miktar ödün verilerek enerji tasarruflu sürüş modu kullanılabilir.

5.5 Deniz Yırtıcıları Algoritması (Marine Predators Algorithm - MPA) ve MPA ile Tren Hız Profili Optimizasyonu

Bu tezin konusu olan hız profili optimizasyonu yöntemi ile enerji tasarruflu tren sürüş probleminin çözümü için tercih edilen son yöntem Deniz Yırtıcıları Algoritması (Marine Predators Algorithm-MPA)'dır. Bu başlık altında öncelikle MPA optimizasyon tekniği tanıtılacaktır. Ardından bu yöntem ile, İstanbul M3 metro hattı işletme şartları dikkate alınarak, hat üzerinde çalışan trenin hız profili optimize edilerek mevcut sürüş ile kıyaslanacak ve bulgular tartışılacaktır.

5.5.1 Deniz Yırtıcıları Algoritması

Faramarzi ve arkadaşları tarafından 2020 yılında geliştirilen Deniz Yırtıcıları Algoritması (Marine Predators Algorithm - MPA), deniz avcıları ve avları arasındaki avcı-av sosyal ilişkisinden esinlenilierek geliştirilmiştir [155]. MPA, deniz avcıları ve avlarının karşılaşma oranlarına dayalı olarak geliştirilmiş sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. MPA'nın ana ilham kaynağı, avcı ve av arasındaki biyolojik etkileşimde optimal karşılaşma oranı politikası ile birlikte deniz avcılarında Lévy ve Brownian hareketleri olarak adlandırılan yaygın yiyecek arama stratejisidir. MPA, optimal yiyecek arama stratejisinde, deniz ekosistemlerinde avcı ve av arasındaki geçerli olan doğal kuralları takip eder.

MPA algoritmasında, "en güçlü olanın hayatta kalması" teorisine dayalı olarak, avcılar, doğal ortamlarda avlarıyla karşılaşma oranlarını en üst düzeye çıkarmak

için en uygun stratejiyi seçmelidir [183]. Genel olarak, doğadaki birçok hayvanın yiyecek arama modeli, etkili bir şekilde rastgele bir yürüyüş stratejisidir. Bir sonraki konumun mevcut duruma bağlı olduğu ve matematiksel olarak modellenebilen bir sonraki konuma geçiş olasılığının olduğu stokastik bir süreçtir [184]. Bu hareket sürecinin matematiksel modeli Lévy veya Brownian hareket modeli ile gerçekleşmektedir.

Deniz canlıları arasında köpek balıkları, ton balıkları, marlinler, güneş balıkları ve kılıç balıkları gibi pek çok tür av ararken Lévy benzeri davranış sergilemektedirler [185]. Temel araştırmalar, Lévy stratejisinin düzensiz av dağılımına yanıt olarak avcılar arasında optimal bir arama politikası olarak geliştiğini göstermek için deniz avcılarının davranış verilerini toplamıştır [186, 187]. Diğer araştırmalar, avcı ve av arasındaki maksimum karşılaşma oranının hangi oranda gerçekleşeceğini bulmak için avcının avına boyut ve hız oranının etkisini simüle etmişlerdir [188]. Avın avcıya hız oranının farklı stratejileri önemli ölçüde etkilediğini göstermişlerdir. Lévy ile Brownian hareket arasındaki denge, bir optimizasyon yöntemi için en uygun stratejiyi bulma fırsatı sunmaktadır. Bu nedenle, bu bölümün devamında bu iki yöntem arasındaki ana farklar ve benzerlikler özetlenerek hareketin matematiksel modeli tanıtılacaktır.

Aşağıdaki önemli maddeler, MPA'da optimum yiyecek arama, etkileşimler ve sürü hafızası için yönetim süreçlerini özetlemektedir:

- Deniz yırtıcıları, düşük av yoğunluğuna sahip çevre için Lévy stratejisini kullanırken, avın bol olduğu alanlar için Brownian hareketini kullanır;
- Doğal (girdap oluşumu-eddy formation) veya insan kaynaklı (Fish Aggregating Devices - FAD'ler) çevresel etkileşimler nedeniyle, farklı bir av dağılımına sahip meydanlar bulma ümidiyle davranışlarını değiştirirler;
- Düşük hız oranında (v=0.1), bir avcı için en iyi yönelim Lévy'dir. Av ise Brownian veya Lévy'de hareket eder (rastgele olarak seçilir).
- Birim hız oranında (v=1), eğer av Lévy'de hareket ediyorsa, bir avcı için en ideal yönelim Brown stratejisidir.
- Yüksek hız oranında (v≥10) bir avcı için en ideal durum hareketsiz kalmaktır. Bu durumda, av Brownian veya Lévy'de hareket eder.
- Arkadaşlarını ve başarılı yiyecek aramanın yerini hatırlamak için iyi hafızadan yararlanırlar.

Genel olarak, deniz yırtıcılarının yiyecek arama politikası kurallarına dayalı olarak, bu kısımda, Deniz Yırtıcı Algoritması (MPA) adı verilen yeni bir optimizasyon algoritmasının matematiksel modeli tanıtılmıştır. Algoritmanın adımlarını tanıtmadan önce, Brownian ve Lévy hareketi olmak üzere iki ana rasgele yürüyüş için, matematiksel modelin bilinmesine ihtiyaç vardır.

5.5.1.1 Brownian Hareketi

Standart Brownian hareketi, adım uzunluklarının sıfır ortalama (μ=0) ve birim varyans (σ^2=1) ile Normal (Gaussian) dağılım tarafından tanımlanan olasılık fonksiyonundan çekildiği stokastik bir süreçtir. Bu hareket için x noktasındaki geçerli Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probably Density Function-PDF) denklem (5.16)'da verilmiştir [189]:

$$f_B(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} exp(-\frac{x^2}{2}) \tag{5.16}$$

Özetle, Brownian hareket modeline göre hareket edecek olan bir av veya avcının adım miktarı denklem (5.16) kullanılarak hesaplanır ve hareket buna göre gerçekleşir.

5.5.1.2 Lévy Hareketi

Lévy hareketi, adım boyutlarının Lévy dağılımı (power-law tail-güç yasası kuyruğu) tarafından tanımlanan bir olasılık fonksiyonundan belirlendiği bir tür rastgele yürüyüştür:

$$L(x_j) \approx |x_j|^{1-\alpha} \tag{5.17}$$

Burada, x_j hareket uzunluğu ve 1< α≤2 kuvvet yasası üssüdür [185]. İntegral formdaki Lévy kararlı sürecinin olasılık yoğunluğu ise şu şekilde tanımlanır [190]:

$$f_L(x; \alpha, \Upsilon) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty exp(-\Upsilon q^\alpha) \cos(qx)\, dq \tag{5.18}$$

Burada, α dağılım indeksini tanımlar ve işlemin ölçek özelliklerini kontrol ederken ϒ ölçek birimini seçer. Denklem (5.18)'deki integralin sadece birkaç durumda analitik bir çözümü vardır. α 2'ye eşit olduğunda Gauss dağılımını, 1'e eşit olduğunda ise Cauchy dağılımını gösterir [191].

Mantegna [190], 0.3 ve 1.99 arasında değişen keyfi bir indeks dağılımı değeri (α) için bir Lévy kararlı süreci oluşturmak amacıyla doğru ve hızlı bir yöntem

önermiştir. Bu çalışmada, aşağıdaki gibi Lévy dağılımına dayalı rasgele sayılar üretmek için Magneta yöntemi kullanılmıştır:

$$Levy(\alpha) = 0.05\ \frac{x}{|y|^{\frac{1}{\alpha}}} \tag{5.19}$$

Burada, x ve y, standart sapmaları σx ve σy olan iki normal dağılım değişkenidir:

$$x = Normal(0, \sigma_x^2) \tag{5.20}$$

$$y = Normal(0, \sigma_y^2) \tag{5.21}$$

Denklem 20'deki σ_x şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_x = \left[\frac{\Gamma(1+\alpha)sin(\frac{\pi\alpha}{2})}{\Gamma(\frac{(1+\alpha)}{2})\alpha\ 2^{\frac{(\alpha-1)}{2}}}\right] \quad ve \quad \sigma_y = 1\ ve\ \alpha = 1.5 \tag{5.22}$$

Burada Γ, α tam sayılarının kullanıldığı Gamma fonksiyonunu ifade eder, $\Gamma(1+\alpha)$ ise $\alpha!$'e eşittir.

Brownian ve Lévy hareket modellerinin tanıtılmasının ardından MPA algoritması formülasyonu, adımları, kaba kodu ve akış şeması tanıtılacaktır.

5.5.1.3 MPA Formülasyonu

Metasezgisel yöntemlerin çoğuna benzer şekilde, MPA, ilk çözümün, ilk deneme olarak arama uzayı üzerinde düzgün bir şekilde dağıldığı popülasyon tabanlı bir yöntemdir:

$$X_0 = X_{min} + rand(X_{max} - X_{min}) \tag{5.23}$$

Burada, X_{min} ve X_{max}, değişkenler için alt ve üst limittir ve $rand$, 0 ila 1 aralığında uniform bir rassal vektördür.

En uygun teorinin hayatta kalmasına dayanarak, doğadaki en iyi yırtıcıların yiyecek arama konusunda daha yetenekli olduğu söylenmektedir. Böylece, en uygun çözüm, $Elit$ olarak adlandırılan bir matris oluşturmak amacıyla en iyi yırtıcı olarak aday gösterilir. Bu matrisin dizileri, avın konumları ile ilgili bilgilere dayanarak avın aranmasını ve bulunmasını denetler.

$$Elite = \begin{bmatrix} X_{1,1}^{I} & X_{1,2}^{I} & \dots & X_{1,d}^{I} \\ X_{2,1}^{I} & X_{2,2}^{I} & \dots & X_{2,d}^{I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n,1}^{I} & X_{n,2}^{I} & \dots & X_{n,d}^{I} \end{bmatrix}_{nxd} \quad (5.24)$$

Burada $\vec{X}^{I}$, $Elit$ matrisi oluşturmak amacıyla n kez çoğaltılan en iyi yırtıcı vektörünü temsil eder. n, arama faktörlerinin sayısı, d ise boyutların sayısıdır. Burada, hem avcı hem de av arama faktörü gibi kabul edilmektedir. Çünkü, bir yırtıcı hayvan avını bulamya çalışırken, av da kendi yiyeceğini bulmaya çalışmaktadır. Her iterasyonun sonunda, en iyi yırtıcı daha iyi bir yırtıcı ile değiştirilerek $Elit$ matrisi güncellenmektedir.

$Elit$ ile aynı boyuta sahip başka bir matrise $Prey$ (av) adı verilir ve yırtıcılar buna göre konumlarını günceller. Basit bir ifadeyle, başlatma, en uygun olanın (yırtıcı) $Elit$ 'i oluşturduğu ilk $Prey$ 'i (avı) oluşturur. $Prey$ matrisi şu şekilde gösterilir:

$$Prey = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,d} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \dots & X_{n,d} \end{bmatrix}_{nxd} \quad (5.25)$$

Denklem 5.25'te $X_{i,j}$, i'ninci avın j'ninci boyutunu sunar. MPA optimizasyon sürecinin tamamı temel olarak ve doğrudan bu iki matrisle ilgilidir.

Çeşitli hız oranlarını hesaba katmak ve avcı ile avın tüm yaşamını simüle etmek için MPA optimizasyon süreci üç ana aşamaya bölünmüştür:

1. Büyük hız oranında yani av, avcıdan daha hızlı hareket ettiğinde,
2. Birim hız oranında, yani hem avcı hem de av hemen hemen aynı hızda hareket ettiğinde ve
3. Düşük hız oranında yani, avcı, avdan daha hızlı hareket ettiğinde.

Tanımlanan her faz için belirli bir iterasyon periyodu belirlenir ve atanır. Bu adımlar, doğadaki avcı ve avın hareketini taklit ederken, avcı ve av hareketinin doğasına bağlı kurallara göre tanımlanmaktadır. Bu üç aşama şunları içerir:

Faz 1: Bu senaryo, keşfin önemli olduğu ilk optimizasyon iterasyonlarında gerçekleşir. Büyük hız oranında (v≥10), avcı için en iyi yaklaşım hiç hareket etmemektir. Bu kuralın matematiksel modeli şu şekilde uygulanır:

$$\text{While Iter} < \frac{1}{3}\ \text{Max_Iter} \tag{5.26}$$

$$\overrightarrow{\text{stepsize}_i} = \overrightarrow{R_B} \otimes (\overrightarrow{\text{Elite}_i} - (\overrightarrow{R_B} \otimes \overrightarrow{\text{Prey}_i})) \quad i= 1, \ldots n \tag{5.27}$$

$$\overrightarrow{\text{Prey}_i} = \overrightarrow{\text{Prey}_i} + (P.\vec{R} \otimes \overrightarrow{\text{stepsize}_i}) \tag{5.28}$$

Burada, R_B, Brownian hareketini simüle eden ve normal dağılım kullanılarak oluşturulan rassal değerleri içeren bir vektördür. ⊗ gösterimi ise giriş bazında çarpmaları gösterir. R_B'nin avla çarpılması avın hareketini simüle eder. P = 0.5 sabit bir değerdir ve R, [0,1]'de uniform rassal sayıların bir vektörüdür. Bu senaryo, adım boyutunun veya hareket hızının yüksek keşif yeteneği için uygun olduğu iterasyonların ilk üçte birinde gerçekleşir. $Iter$ geçerli iterasyon iken Max_Iter ise maksimum iterasyondur.

Faz 2: Av ve avcının aynı hızda hareket ettiği aşamadır. Faz 2, hem av hem de avcı için avlarını aradıklarını taklit eder. Bu bölüm, optimizasyonun ara aşamasında, keşfin (avcının av arayışı) geçici olarak kullanıma dönüştürülmeye çalışıldığı sırada gerçekleşir. Böylece nüfusun yarısı keşif için ayrılırken, diğer yarısı da sömürü (av olma) için kullanılır. Bu fazda avcı keşiften, av ise sömürüden sorumludur. Kurala göre, birim hız oranında (v≈1), av Lévy'de hareket ediyorsa, avcı için en iyi tercih Brownian'dır. Bu nedenle, bu çalışma Lévy'de av hareketlerini, Brownian'da avcı hareketlerini dikkate almıştır.

$$\text{While } \frac{1}{3}\ \text{Max_Iter} < \text{Iter} < \frac{2}{3}\ \text{Max_Iter} \tag{5.29}$$

Nüfusun ilk yarısı için;

$$\overrightarrow{Stepsize_i} = \overrightarrow{R_L} \otimes (\overrightarrow{Elite_i} - (\overrightarrow{R_L} \otimes \overrightarrow{Prey_i})) \quad i= 1, \ldots, n/2 \tag{5.30}$$

$$\overrightarrow{Prey_i} = \overrightarrow{Prey_i} + (P.\vec{R} \otimes \overrightarrow{Stepsize_i}) \tag{5.31}$$

Burada, $\overrightarrow{R_L}$, Lévy hareketini temsil eden Lévy dağılımına dayalı rassal sayıların bir vektörüdür. $\overrightarrow{R_L}$ ve Av'ın çarpımı, Lévy tarzında avın hareketini taklit ederken, av konumuna adım boyutunun eklenmesi avın hareketini taklit eder. Levy dağılımı adım boyutunun çoğunluğu küçük adımlarla bağlantılandırıldığından, bu faz

sömürüye yardımcı olmaktadır. Nüfusun ikinci yarısı için bu çalışma şunları varsayar:

$$\overrightarrow{\text{Stepsıze}_\text{ı}} = \overrightarrow{\text{R}_\text{B}} \otimes (\overrightarrow{\text{R}_\text{B}} \otimes \overrightarrow{\text{Elıte}_\text{ı}}) - \overrightarrow{\text{Prey}_\text{ı}}) \text{ i=n/2, ..., n} \quad (5.32)$$

$$\overrightarrow{\text{Prey}_\text{ı}} = \overrightarrow{\text{Elıte}_\text{ı}} + (\text{P. CF} \otimes \overrightarrow{\text{Stepsıze}_\text{ı}}) \quad (5.33)$$

$$\text{CF} = [1 - \left(\frac{\text{Iter}}{\text{Max_Iter}}\right)]^{(2.\frac{\text{Iter}}{\text{Max_Iter}})} \quad (5.34)$$

Burada, CF, avcı hareketi için adım boyutunu kontrol etmek amacıyla uyarlanabilir bir parametre olarak kabul edilmektedir. $\overrightarrow{\text{R}_\text{B}}$ ve Elit'in çarpımı, avcının hareketini Brownian tarzında taklit ederken, av, avcıların Brownian hareketindeki hareketine göre pozisyonunu günceller.

Faz 3: Küçük hız oranında yani avcı avdan daha hızlı hareket ettiğindeki fazdır. Bu durum, genellikle güçlü sömürme yetenekleriyle bağlantılı olan optimizasyon sürecinin son adımında meydana gelir. Küçük hız oranında (v=0.1) avcı için en iyi yönelim Lévy'dir. Bu faz şu şekilde sunulur:

$$\text{While Iter} > \frac{2}{3}\ \text{Max_Iter} \quad (5.35)$$

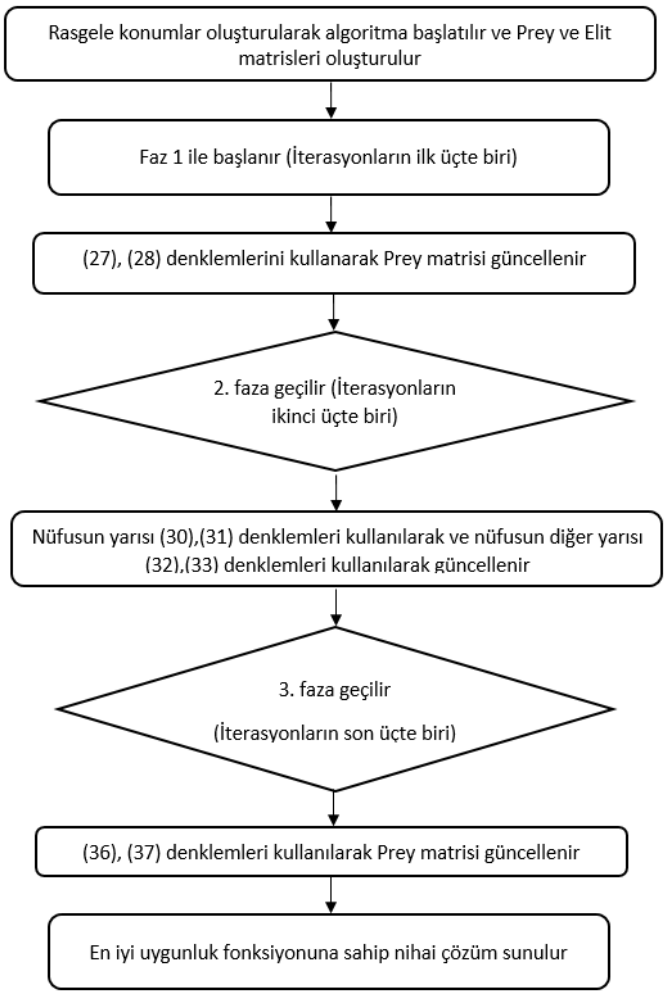
$$\overrightarrow{\text{Step}_\text{ı}} = \overrightarrow{\text{R}_\text{L}} \otimes (\overrightarrow{\text{R}_\text{L}} \otimes \overrightarrow{\text{Elıte}_\text{ı}}) - \overrightarrow{\text{Prey}_\text{ı}})) \quad \text{i= 1, ..., n} \quad (5.36)$$

$$\overrightarrow{\text{Prey}_\text{ı}} = \overrightarrow{\text{Elıt}_\text{ı}} + (\text{P. CF} \otimes \overrightarrow{\text{Stepsıze}_\text{ı}}) \quad (5.37)$$

$\overrightarrow{R_L}$ ve $Elit$'in çarpılması, Lévy stratejisinde yırtıcı hayvanın hareketini simüle ederken, $Elit$ konumuna adım boyutunun eklenmesi, av konumunun güncellenmesine yardımcı olmak için avcının hareketini simüle etmektedir.

Bu algoritmada, farklı literatürden çıkarılan kural ve noktalara dayanılarak avcıların ve avların doğada olup bitenlere göre hareketi simüle edilmiştir. Bu, bir avcının avını yakalamak için attığı adım boyutunun simüle edilmesiyle yapılmıştır. Bu adım boyutları da, yırtıcı hayvanlar için, algoritma kurallarına göre, Lévy ve Brownian hareketleridir. Agloritmanın ilk aşamasında avcı hiç hareket etmezken, ikinci aşamada Brownian'da hareket eder ve son olarak üçüncü aşamada Lévy stratejisini gösterir. Bu hareket tercihlerine göre avcı avını yakalamaya, bir diğer deyişle de ilgili problemin çözümünde optimale yaklaşmaya çalışarak sonuca ulaşır.

MPA algoritmasının yukarıda anlatılanları özetleyecek akış şeması 5.43'te verilmiştir.



Şekil 5.43 MPA algoritması akış şeması

Deniz avcılarında davranış değişikliğine sebep olan bir diğer husu da girdap oluşumu veya Balık Toplama Cihazları (Fish Aggregating Devices-FADs) etkileri gibi çevresel sorunlardır. Filmalter ve arkadaşlarının araştırmasına göre, köpek balıkları zamanlarının %80'inden fazlasını balık toplama cihazlarının yakın çevrelerinde geçirmekte ve geri kalan zamanlarını da başka bir av dağılımına sahip çevre bulmak amacıyla başka boyutlarda daha uzun bir atlama yapmaktadırlar [193]. FAD'lar yerel optimumlar olarak kabul edilmekte ve etkileri arama boşluğunda bu noktalarda yakalama olarak kabul edilmektedir. Simülasyon esnasında bu daha uzun sıçramaların hesaba katılması yerel optimuma takılmanın önüne geçmektedir. Böylece, FAD'larin etkisi matematiksel olarak şu şekilde sunulmuştur:

$$\overrightarrow{Prey_i} = \overrightarrow{Prey_i} + CF[\overrightarrow{X_{min}} + \vec{R} \otimes (\overrightarrow{X_{max}} - \overrightarrow{X_{min}})] \otimes \vec{U} \quad if r \leq FADs \qquad (5.38)$$

$$\overrightarrow{Prey_i} = \overrightarrow{Prey_i} + [FADs(1-r) + r](\overrightarrow{Prey_{r1}} - \overrightarrow{Prey_{r2}}) \quad if r > FADs \qquad (5.39)$$

Burada, $FADs$ =0.2 FAD'larin eniyileme süreci üzerindeki etkisinin olasılığıdır. $\vec{U}$, 0 ve 1 içeren dizilere sahip ikili vektördür. Bu vektör, [0,1] aralığında rasgele bir vektör üretilerek ve dizisi 0.2'den küçükse 0'a ve 0.2'den büyükse 1'e ayarlanarak elde edilmektedir. r, [0,1] içindeki uniform rasgele sayıdır. X_{min} ve X_{max} boyutların alt ve üst sınırlarını içeren vektördür. r_1 ve r_2 indisleri, $prey$ matrisinin rasgele indekslerini belirtir.

Son olarak, çalışmada kullanılan MPA'nın kaba kodu Tablo 5.33'te sunulmuştur.

Tablo 5.33 MPA algoritması kaba kodu

Arama popülasyonlarını başlat i=1,…,n
While sonlandırma kriterleri karşılanana kadar
Uygunluk hesaplanır ve Elite matrisi oluşturulur
If Iter<Max_Iter/3
Denklem 27 ve 28'i temel alarak av (prey) matrisi güncellenir
Else if Max_Iter/3<Iter<2*Max_Iter/3
Popülasyonların ilk yarısı için (i=1,…,n/2)
Denklem 30 ve 31'i temel alarak Prey matrisi güncellenir
Popülasyonun diğer yarısı için (i=n/2,…,n)
Denklem 32 ve 33'ü temel alarak Prey güncellenir
Else if Iter > 2*Max_Iter/3
Denklem 36 ve 37'yi temel alarak Prey matrisi güncellenir
End if
Elit matrisinin güncellemesini tamamlanır
Denklem 38 ve 39'a dayalı olarak FADs'ın uygulanması ve güncellemesi
End
End While

5.5.1.4 Deniz Yırtıcıları Algoritması Parametreleri

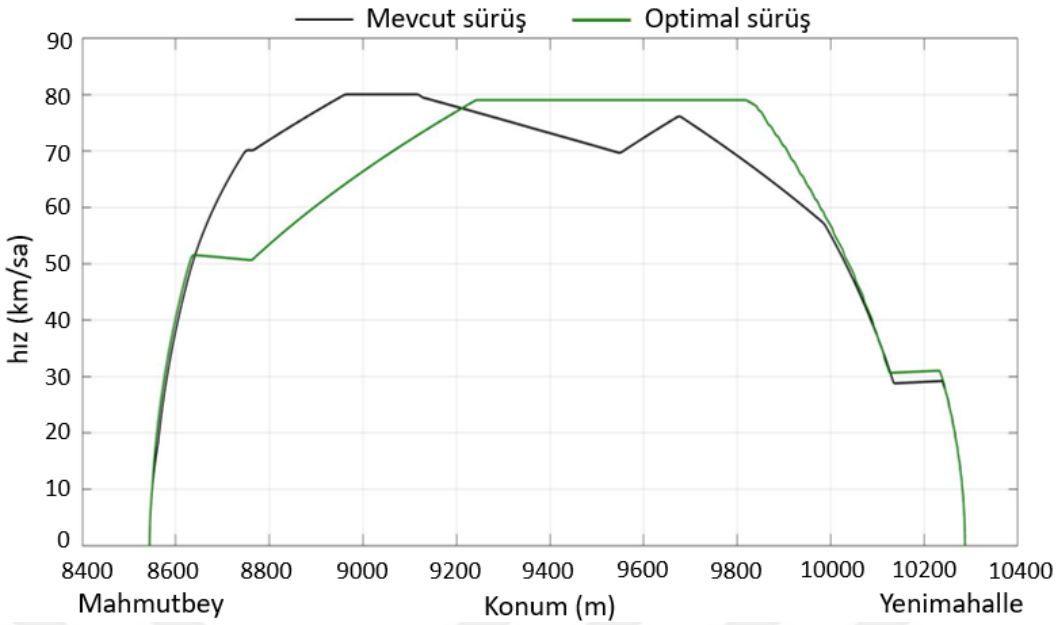
MPA algoritmasında sadece 3 parametre mevcuttur. Bunlardan bir tanesi deniz avcılarında davranış değişikliğine neden olan FADs etkisidir. Diğeri avcı hareketi için adım miktarını kontrol etmek amacıyla uyarlanabilir bir parametre olan CF'dir. Sonuncusu ise sabit bir sayıyı temsil eden P'dir. P değeri 0.1-0.5 arasında seçilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan MPA parametreleri Tablo 5.34'te verilmiştir.

Tablo 5.34 MPA algoritması parametreleri

Parametre	Değer
FADs	0,2
CF	0,5
P	0,5

5.5.2 MPA ile M3 Metro Hattı Tekli İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

Literatüre yeni kazandırılan MPA algoritması çok çeşitli problem çözümlerinde kullanılarak etkinliği kanıtlanmıştır. Bu tez çalışmasında, tren hız profili optimizasyonu yönteminde, sıklıkla kullanılan GA, SA ve PSO algoritmalarına ilave olarak, kullanılarak etkinliği gösterilmiştir. MPA algoritmasının tren hareketi optimizasyonu problemine karşı etkinliğinin incelenmesi için üç farklı istasyon arasında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle, Mahmutbey-Yenimahalle istasyonları arasında, bu iki istasyon arasındaki mevcut işletme şartları dikkate alınarak THS'de bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.44 Mahmutbey - Yenimahalle istasyonları arasında mevcut sürüş profiline kıyasla MPA ile optimize edilmiş sürüşün üst üste bindirilmiş çıktısını göstermektedir. Buna göre mevcut sürüş profilinde maksimum hıza (80 km/sa) kadar MGG modu uygulanmış ardından kısa bir süre SHG fazında hareket etmiştir. Daha sonrasında kısmi fren ve tekrar MGG modu uygulanarak bitiş noktasında hareketini tamamlamıştır. Optimize edilmiş sürüş profilinde ise, algoritma 50 km/sa'in biraz üzerinde bir hıza kadar MGG modunu ardından da yaklaşık 80 km/sa'lik bir hıza ulaşana kadar BG modunu tercih etmiştir. Bu iki istasyon arasında 8800-10082'nci metreler arasında dik bir (-3.39) yokuş iniş yolu vardır. Algoritma, mevcut sürüş profiline kıyasla bu yokuş aşağı yolun potansiyelini kullanarak MGG fazını kısa tutmuş ve BG fazında treninin hızını neredeyse maksimuma kadar çıkarak bu noktada SHG fazında hareketine devam etmeyi tercih etmiştir. Ardından uygun frenleme noktasından frene girerek hareketini sona erdirmiştir.



Şekil 5.44 Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arası MPA ile optimize edilmiş sürüş

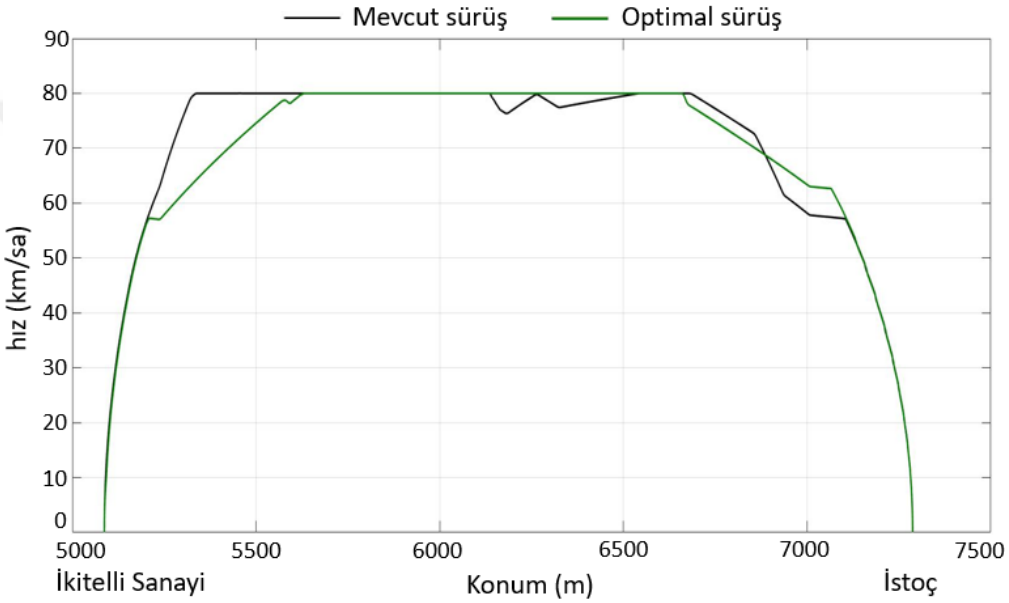
Tablo 5.35, Mahmutbey-Yenimahalle istayonları arası sürüş simülasyonuna ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgilerini içermektedir. Görüldüğü üzere her iki sürüş modelinde de iki istasyon arası hareket, 117.50 saniye sürmüştür. Bu durumda mevcut sürüş profiline kıyasla MPA tekniği ile optimize edilmiş sürüş profilinde 4.4261 kWh yani %47.95 enerji verimliliği elde edilmiştir.

Tablo 5.35 Mahmutbey – Yenimahalle istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	**Mevcut sürüş profili**	**Optimal sürüş profili**
Seyahat süresi (sn)	117,50	117,50
Enerji tüketimi (kWh)	9,2306	4,8045

Benzer şekilde İkitelli Sanayi – İstoç istasyonları arasında mevcut hızlanma profili ile sürülen bir trenin hareketi MPA algoritması ile optimize edilmiştir. Bu harekete ait hız-konum grafiği çıktısı Şekil 5.45'te paylaşılmıştır. Bu iki istasyon arası, başlangıcından yaklaşık 6000'nci metreye kadar yokuş aşağı, bu noktadan itibaren duruş noktasına kadar da yokuş yukarı bir güzergah profiline sahiptir. MPA algoritması yol profilini de dikakte alarak enerjiyi en az tüketecek şekilde sürüş

profili önermiştir. Buna göre yaklaşık 55 km/sa'e kadar MGG modu ile treni hızlandırmış ardından BG moduna geçerek yolun iniş kısmındaki potansiyel enerjiden faydalanarak treni maksimum hıza ulaştırmıştır. Bu hız ile SHG modunda hareketine devam ederek uygun frenleme noktasından duruşa geçerek hareketini tamamlamıştır. Mevcut sürüş profilinde ise maksimum hıza ulaşılana kadar MGG fazı uygulanmış ve ardından belirli bir noktaya kadar SHG fazında gidilmiştir. Daha sonrasında, Şekil 45 (siyah çizgi)'te görüldüğü üzere gereksiz frenleme ve ardından tekrar MGG modu uygulanarak harekete devam edilmiş ve uygun noktadan FR modu ile tren duruşa geçerek hareketini sonlandırmıştır.



Şekil 5.45 İkitelli – İstoç istasyonları arası MPA ile optimize edilmiş sürüş

Tablo 5.36'da, İkitelli Sanayi-İstoç istayonları arasında gerçekleştirilen hareket simülasyona ait seyahat süresi ve enerji tüketimi bilgileri paylaşılmıştır. Her iki hareket modunda da seyahat süresi aynı ve 125.00 saniyedir. Enerji tüketimi açısından ise mevcut sürüş profiline kıyasla optimize edilmiş sürüş profilinde 4.7493 kWh yani %28.12 enerji verimliliği elde edilmiştir.

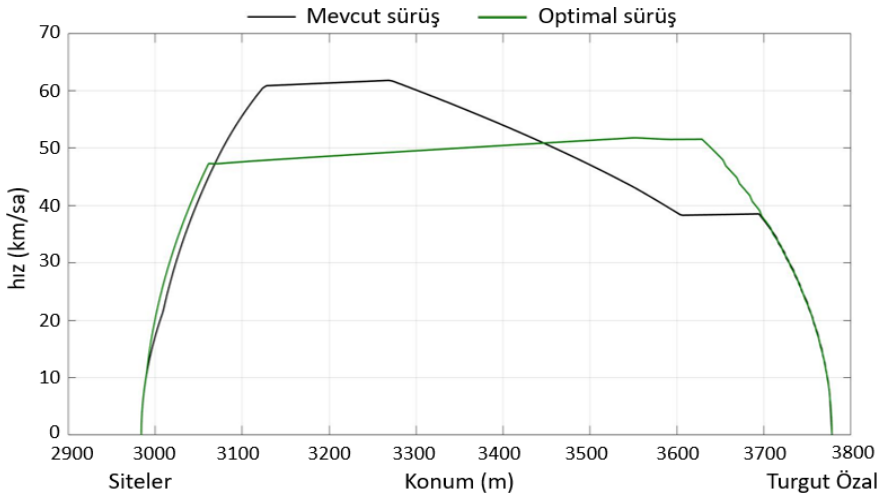
Tablo 5.36 İkitelli – İstoç istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Seyahat süresi (sn)	125,00	125,00

Tablo 5.36 İkitelli – İstoç istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu (devamı)

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Enerji tüketimi (kWh)	16,8861	12,1368

Tekli istasyonlar arasında son bir simülasyon çalışması da Siteler – Turgut Özal istasyonları arasında yapılmıştır. Bu iki istasyon arası hafif eğimli yokuş inişli bir yol profiline sahiptir. Optimal sürüş profilinde, Şekil 5.46'da görüldüğü üzere, 45 km/sa'in biraz üzerine kadar MGG fazı uygulanmıştır. Ardından uygun frenleme noktasına kadar BG fazı kullanılarak hareket tamamlanmıştır. Bu iki istasyon arası, M3 metro hattının en kısa istasyonlar arası mesafesi olmakla birlikte 794 metredir. Bu sebeple algoritma SHG fazını kullanmayı tercih etmemiştir. Mevcut sürüş profilinde ise 60 km/sa'in biraz üzerine kadar MGG fazı uygulanmıştır. Ardından kısa bir BG fazı ve sonrasında uygun noktadan frenleme ile hareket sona erdirilmiştir. Mevcut sürüş profilinde daha yüksek hıza kadar MGG fazı uygulandığından, optimize edilmiş sürüş profiline kıyasla daha kısa süre BG fazı uygulanmıştır.



Şekil 5.46 Siteler – Turgut Özal istasyonları arası MPA ile optimize edilmiş sürüş

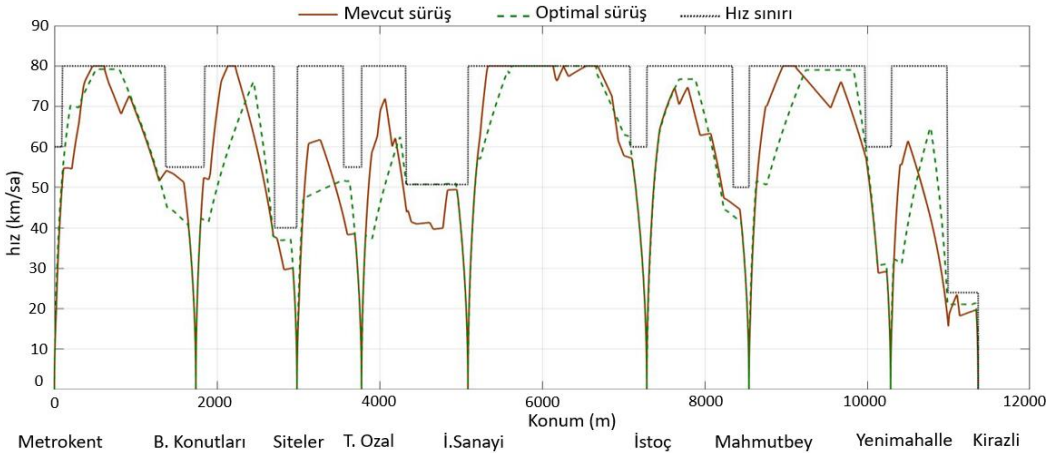
Tablo 5.37'de Siteler-Turgut Özal istasyonları arasında gerçekleştirilen tren hareket simülasyonuna ait bilgiler paylaşılmıştır. Buna göre mevcut sürüş profiline kıyasla MPA ile optimize edilmiş sürüş profilinde hareket 2.8580 kWh'lik yani %42.01 enerji tasarruflu bir şekilde gerçekleşmiştir.

Tablo 5.37 Siteler – Turgut Özal istasyonları arası mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş sürüş karşılaştırma tablosu

Parametre	Mevcut sürüş profili	Optimal sürüş profili
Seyahat süresi (sn)	73,00	73,00
Enerji tüketimi (kWh)	6,8022	3,9442

5.5.3 MPA ile M3 Metro Hattı Çoklu İstasyonlar Arası Hız Profili Optimizasyonu

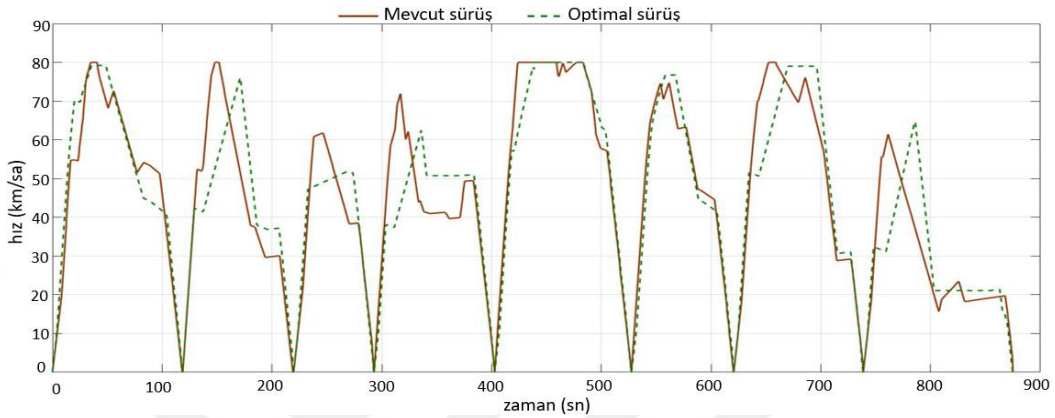
Bu tez çalışması kapsamında, M3 Metro hattının gidiş-dönüş istasyonları arasında, bu hat üzerinde çalışan trenin hız profili son ve dördüncü yöntem olarak MPA metodu ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde, diğer üç yöntemde de olduğu gibi, hız sınırları, seyahat süresi, toplam seyahat süresi, harekete başlangıç ve bitiş noktaları gibi işletmesel kısıtlamalar dikkate alınmıştır. Çalışmada önce M-K doğrultusunda optimizasyon yapılmıştır. Şekil 5.47'de görüldüğü üzere MPA algoritması trenin harekete başlama noktasından bitiş noktasına kadar hız sınırlarına da dikkat ederek her bir istasyon arası için yeni hız profilini bulmuştur. Mevcut sürüşe kıyasla MPA tarafından önerilen optimize edilmiş sürüş üst üste bindirilerek çizdirilmiş ve hız-konum grafiği olarak paylaşılmıştır.



Şekil 5.47 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği

Tren hız profili optimizasyonu çalışmasının amacı, M3 metro hattında çalışan trenlerin hareket modlarının optimize edilmesi ile cer enerjisi tüketiminin azaltılmasıdır. Diğer üç yöntemin kullanıldığı çalışmalarda olduğu gibi enerji

tassarrufu temel amaç olsa da seyahat süresi açısından herhangi bir gecikme istenmemektedir. MPA algoritması, daha önceden tanımlanan istasyonlar arası seyahat süresi dahilinde optimal hız profilini bulmuştur. Şekil 5.48, M-K doğrultusundaki harekete ait hız-zaman grafiği çıktısını göstermektedir. Optimize edilmiş hız profili ile harekette, trenin mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.48 Metrokent – Kirazlı yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği

Matlab'de geliştirilen THS'de, M-K doğrultusunda yapılan simülasyon sonuçlarına göre, MPA yöntemi kullanılarak optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda kayda değer enerji verimliliği elde edilmiştir. Her bir istasyon arası için mevcut sürüş profilinde ve optimize edilmiş profil ile sürüş için tüketilen enerji miktarları ve seyahat süresi bilgileri Tablo 5.38'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 5.38 Metrokent – Kirazlı yönü mevut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

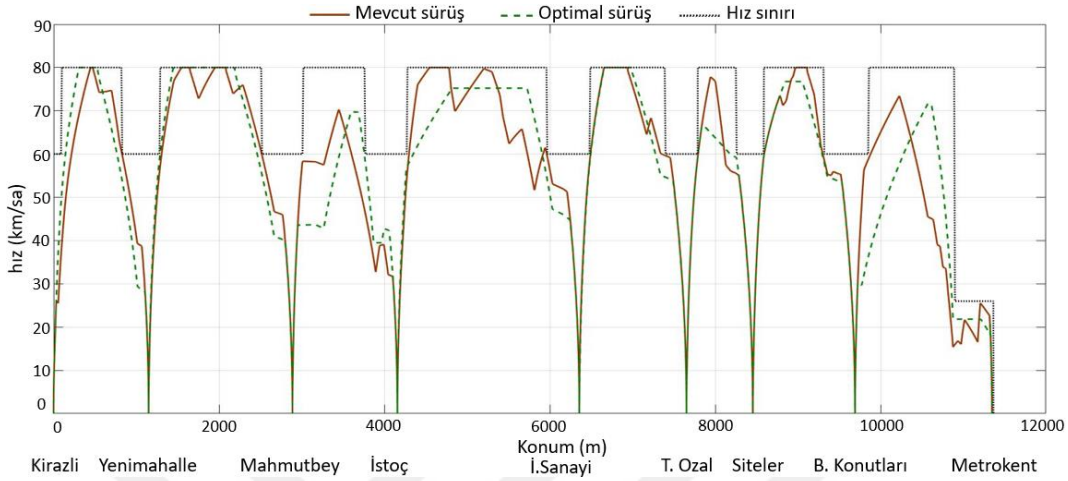
İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**Optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
Metrokent-Başakkonutlari	119.50	14.6179	119.50	11.6565

Tablo 5.38 Metrokent – Kirazlı yönü mevut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları (devamı)

İstasyonlar	Mevcut sürüş profili		Optimize edilmiş sürüş profili	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Başakkonutlari-Siteler	100.00	8.5903	100.00	3.4264
Siteler-Turgut Ozal	73.00	6.8022	73.00	3.9305
Turgut Ozal-Ikitelli Sanayi	110.50	8.9039	110.50	2.5455
Ikitelli Sanayi-Istoç	125.00	16.8861	125.00	12.0763
Istoç-Mahmutbey	91.50	20.2384	91.50	19.4512
Mahmutbey-Yenimahalle	117.50	9.2306	117.50	4.8045
Yenimahalle-Kirazli	138.00	4.7506	138.00	2.0091
Toplam	875	90.02	875	59.90

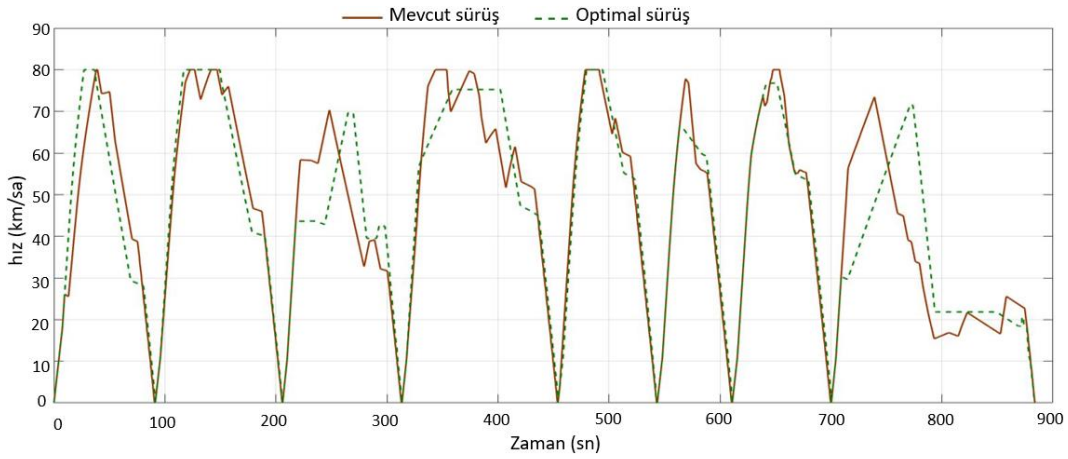
Tablo 5.38'e göre mevcut sürüş profilinde, tren Metrokent istasyonundan harekete başlayarak Kirazlı istasyonuna 875 saniye'de 90.02 kWh'lik bir enerji tüketimi ile varmıştır. MPA metodu tarafından önerilen hız profili ile hareket eden bir tren ise aynı süre içinde 59.90 kWh'lik bir enerji tüketimi ile güzergahı tamamlamıştır. Hareket süresinde herhangi bir artış olmaksızın, 30.12 kWh daha az enerji tüketimi ile yolculuk tamamlanmıştır. Sonuç olarak M-K doğrultusu için enerji verimlilik oranı %33.46 olarak elde edilmiştir.

Trenin Kirazlı istasyonundan tekrar Metrokent istasyonuna geri dönüş hareketi de benzer şekilde optimize edilmiştir. Şekil 5.49'da, K-M yönü için mevcut sürüş profili ve MPA ile optimize edilmiş sürüş profilinin hız-konum grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 5.49 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-konum grafiği

Bu yönde gerçekleştirilen simülasyon çalışması için de benzer şekilde MPA algoritmasına seyahat süresi toleransı tanınmamıştır. Şekil 5.50 K-M yönündeki harekete ait hız-zaman grafiği sonucunu göstermektedir. Bir önceki M-K yönündeki harekette olduğu gibi burada da optimize edilmiş hız profili ile hareket eden trenin, mevcut sürüş profili ile aynı anlarda istasyonlara ulaşarak hareketini tamamladığı zamanda herhangi bir gecikme yaşanmadığı görülmektedir.



Şekil 5.50 Kirazlı – Metrokent yönü mevcut ve MPA ile optimize edilmiş sürüş hız-zaman grafiği

K-M yönünde yapılan simülasyon sonuçlarına göre, MPA algoritması ile optimize edilmiş hız profili ile sürüş sonunda bu yön için de önemli miktarda enerji tasarrufu sağlandığı Tablo 5.39'da görülmektedir. K-M doğrultusu çoğunlukla yokuş yukarı parkuru olan istasyonlardan oluştuğu için bu tür hat profillerinde enerji verimliliği çalışmaları zorlayıcıdır. Bu sebeple bu doğrultuda başarılan verimlilik yüzdesi M-K doğrultusundaki kadar yüksek değildir. Yine de, MPA algoritması mevcut sürüş profiline kıyasla daha etkili bir sürüş stratejisini bularak enerji verimli bir hız profil elde etmeyi başarmıştır.

Kirazlı istasyonundan, mevcut hız profili ile hareketine başlayan bir tren Metrokent istasyonuna toplamda 884 saniyede 116.37 kWh'lik enerji tüketimi ile ulaşmıştır. MPA'nın önerdiği optimal sürüş stratejisinde ise yine aynı sürede, 94.48 kWh'lik bir enerji tüketimi ile ulaşarak bu yön için 21.89 kWh'lik bir tasasrruf sağlanmıştır. Sonuç olarak, K-M doğrultusu için enerji verimlilik oranı %18.81 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.39 Kirazlı – Metrokent yönü mevut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**Optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
Kirazlı-Yenimahalle	91.00	17.8181	91.00	13.8100
Yenimahalle-Mahmutbey	114.75	24.9994	114.75	24.1880
Mahmutbey-İstoç	107.75	5.7354	107.75	3.4930

Tablo 5.39 Kirazlı – Metrokent yönü mevut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle sürüş sonuçları (devamı)

İstasyonlar	**Mevcut sürüş profili**		**Optimize edilmiş sürüş profili**	
	Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
İstoç-Ikitelli Sanayi	140.50	17.1515	140.50	12.1010
Ikitelli Sanayi-Turgut Özal	89.50	13.7833	89.50	13.4850
Turgut Özal-Siteler	67.50	11.6079	67.50	8.5650
Siteler-Başakkonutları	89.00	18.5274	89.00	16.7289
Başakkonutları-Metrokent	184.00	6.7470	184.00	2.1091
Toplam	884	116.37	884	94.48

THS'de yapılan simülasyon sonuçları tüm parkur hareketi dikkate alınarak değerlendirildiğinde Tablo 5.40'da görüldüğü üzere toplam hareket 1759 saniye sürmüştür. Bu durumda, mevcut sürüş stratejisi ile hareket eden bir trenin 206,39 kWh'lik bir enerji tüketimi ile parkuru tamamladığı görülmektedir. MPA'nın önerdiği optimal sürüş profili ile hareket eden bir tren ise yine aynı toplam seyahat süresi sonunda 154.38 kWh'lik enerji tüketimi ile hareketini tamamlamıştır. M3 metro hattı üzerinde bir tam tur hareketi sonunda %25.20 ile 52.01 kWh enerji tasarrufu elde edilmiştir.

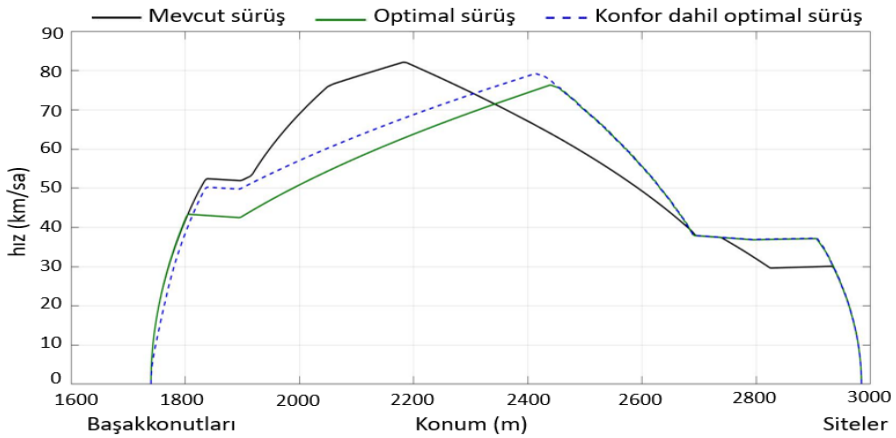
Tablo 5.40 Tüm parkur boyunca mevcut ve MPA ile optimize edilmiş hız profiliyle harekete ait genel simülasyon sonuçları

Mevcut hız profili		**MPA ile optimize edilmiş hız profili**	
Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi (kWh)	Toplam seyahat süresi (sn)	Toplam enerji tüketimi (kWh)
1759,00	206,39	1759,00	154,38

5.5.4 Konfor Kısıtlaması Dikkate Alınarak MPA ile Hız Profili Optimizasyonu

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, raylı sistemlerdeki tren sürüşü için konfor parametresi uluslararası ISO2631 standartı tarafından belirlenmektedir. Sürüş anında yolcuların rahatsızlık yaşamayacağı şekilde bir kalkış için, ilgili standart gereği Jerk parametresi bu çalışmada 0.5 m/s^3 olarak seçilmiştir. MPA algoritmasına bu kısıtlama tanıtılarak, trenin kalkışı anında bu değeri aşmayacak şekilde ivmelenme hareketi yapması sağlanmıştır.

Konfor parametresi dahil edildiği durum ile edilmediği durum arasındaki farkın daha anlaşılabilir olması amacıyla geliştirilen THS'de Başakkonutları-Siteler istasyonları arasında bir simülayon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaya ait görsel Şekil 5.51'de, mevcut sürüş, optimal sürüş ve konfor parametresi dahil olan optimal sürüş profili üst üste çizdirilmiş olarak verilmiştir.



Şekil 5.51 Mevcut sürüş ve MPA ile optimize edilmiş (konfor parametresi dahil olan ve olmayan) sürüş profilleri hız-zaman grafiği

Şekil 5.51'de (kesikli mavi çizgi) görüldüğü gibi konforu dikkate alan optimum sürüş profili, daha yumuşak bir hareket başlangıcına sahiptir. Mevcut hız profilinde olduğu gibi 1.12 m/s^3 jerk değeri yerine maksimum 0.5 m/s^3 jerk limiti ile hızlanarak hareketine başladığı için nispeten gecikmeli kalkış yapmıştır. Ancak, trenin önceden belirlenen sürede istasyona varabilmesi için konfora dikkat etmeyen optimum sürüş moduna göre MGG fazını daha uzun süre kullanarak daha yüksek bir hıza çıkmıştır. Bu nedenle de konforu dikkate almayan optimum sürüşe kıyasla enerji tüketiminin daha fazla olacaktır. Tablo 5.41'de enerji tüketimi ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır. Buna göre, üç sürüş stratejisinde de hareket süresi sabit ve 100 saniyedir. Mevcut sürüşe kıyasla optimal sürüş 5.1639 kWh daha az enerji tüketimi ile hareketini sonlandırırken konfor parametresi dahil edildiğinde ise 4.8641 kWh daha az enerji tüketerek hareketini sonlandırmıştır. Konforu dikkate almayan optimal sürüş profiline kıyasla konfor dahil edildiği durumda 0.2998 kWh, %8.75 daha fazla enerji tüketimi meydana gelmiştir. Buna karşın araç sürüş konforu 1.12 m/s^3 iken 0.5 m/s^3 olarak %55.35 oranında artırılmıştır.

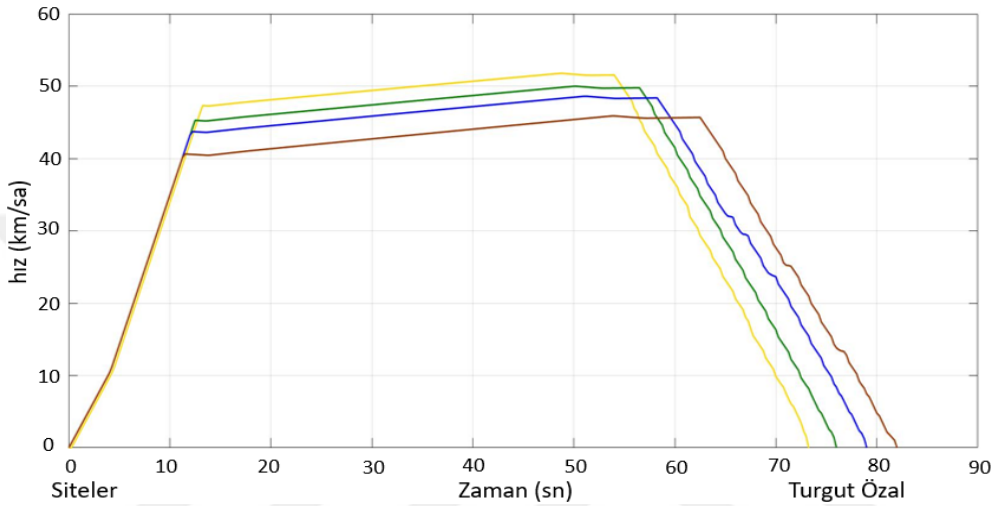
Tablo 5.41 Başakkonutları - Siteler istasyonları arası farklı sürüş stratejilerinin karşılaştırılması

İstasyon	Mevcut sürüş		Optimal sürüş		Konfor dahil optimal sürüş	
	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)	Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
Başakkonutları - Siteler	100,00	8,5903	100,00	3,4264	100,00	3,7262

5.5.5 Hız Profili Optimizasyonunda Zaman Artışı Etkisinin MPA ile İncelenmesi

Daha önceden de belirtildiği üzere, mevcut duruma kıyasla nispeten daha uzun süreli yolculuk yapılması daha az enerji tüketimi ile sonuçlanır. Çünkü, bu daha kısa süre MGG modu veya daha uzun süre BG modunda gitmeye olanak sağlar.

Seyahat süresinin enerji tüketimine olan etkisinin gösterilmesi amacıyla Siteler-Turgut Özal istasyonları arasında THS'de bir simülasyon yapılmıştır. Bu iki istasyon arası seyahat süresi mevcut durumda 73 saniyedir. Üçer saniye zaman artırımına izin verilerek, 76, 79 ve 82 saniyelik seyahat süresi ile bu yol üzerinde bir tren hareketi optimize edildiği durumda karşılık gelen enerji tüketimleri incelenmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen hız-zaman grafiği Şekil 5.52'de verilmiştir.



Şekil 5.52 Seyahat süresi artışı dikkate alınarak MPA ile optimize edilmiş hız profili

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonrasında, seyahat süresinin artırılması daha az enerji tüketimi ile trenin varış noktasına ulaşmasını sağlamıştır. Bunun sebebi, Şekil 5.52'de görüldüğü üzere, seyahat süresi uzadıkça MPA algoritması daha kısa süre MGG modunu kullanmış ve cer enerjisinin kullanılmadığı BG modunda gitme süresini ise uzatmıştır. En uzun süreli seyahat en kısa süreli MGG modunun kullanıldığı harekettir. Tam tersi olarak da en kısa süreli seyahat için de en uzun süre MGG modu kullanılmıştır. Bu teste ait detaylı sonuçlar Tablo 5.42'de verilmiştir. Buna göre, referans süre 3 saniye yani %4.11 oranında arttırıldığında enerji tüketimi bu iki istayon aralığı için 0.3610 kWh yani %9.18 azalmıştır. Benzer şekilde referans süreye kıyasla seyahat süresi 9 saniye yani %12.33 oranında arttırılmasına izin verildiğinde ise enerji tüketimi 1.0777 kWh yani % 27.42 oranında azaldığı görülmüştür.

Tablo 5.42 Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında seyahat süresi artışına karşın enerji tüketimi

Seyahat süresi (sn)	Enerji tüketimi (kWh)
73,00 (referans süre)	3,9305
76,00	3,5695
79,00	3,2960
82,00	2,8528

Çalışma sonuçlarından görüldüğü üzere, seyahat süresini tolere edilebilir şekilde artırmanın önemli miktarda enerji tasarrufu potansiyeli sunduğu görülmüştür. Metro işletmeci firmaları için en azından pik olmayan saatlerde veya istasyonlarda bekleyen yolcu yoğunluğunun az olduğu saat aralıkları için seyahat süresinden bir miktar ödün verilerek enerji tasarruflu sürüş modu kullanılabilir.

5.6 Saha Uygulaması

Bu bölüm, THS'de gerçekleştirilen simülasyon çalışması sonuçlarının gerçek hayatta uygulanabilirliğini ve uygulandıktan sonra enerji tüketimi ve seyahat süresinin THS ile ne kadar uyumlu olduğunu göstermeyi amaçlamaktadır. THS'de modellenen M3 metro hattı ve bu hat üzerinde çalışan trenler ile saha testleri yapılmıştır. Öncelikle Metro İstanbul A.Ş. işletmesi kumanda merkezi ile görüşmeler yapılarak gerekli izinler alınmıştır. Gece işletmenin olmadığı 01:00-05:00 saatleri arasında, bir tren ve bir tren sürücü tahsis edilmiştir. Sürücüye, sürüş testi öncesinde, treni algoritmanın önerdiği optimal hız profili talimatlarına göre nasıl sürmesi gerektiği konusunda bilgilendirmeler yapılmıştır.

Saha testleri, simülasyon ortamında yapıldığı gibi, öncelikle Metrokent-Kirazlı ve akabinde Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında gerçekleştirilerek tam bir tur hareketi sağlanmıştır. Bu sebeple, gece işletme sonrasında Metrokent istasyonuna gidilerek Şekil 5.53'te görülen test için kullanılan trenin kontrolleri yapılmıştır. Bu, tren içerisinde bulunan kayıt cihazı (istasyonlar arası seyahat süresi, enerji tüketimi

vb. bilgilerin alındığı), hız ve mesafe göstergelerinin çalışıp çalışmadığı ile ilgili pratik kontrolleri kapsamaktadır.



Şekil 5.53 Gerçek saha testleri için kullanılan tren

Araç içi ekipmanların kontrollerleri yapıldıktan sonra kumanda merkezi ile iletişime geçilerek sinyalizayon sisteminin, M-K ve K-M doğrultusundaki istasyonlar arası tüm yolların tren sürüşüne açık hale getirilmesi talep edilmiştir. Şekil 5.54'te görüldüğü gibi saha testleri için biri tren sürücüsü olmak üzere üç kişi vardır. Bu iki kişiden birisi hız göstergesini diğeri de kilometre göstergesini takip ederek, sürücüye, algoritmanın her bir istasyon arası için önerdiği optimal hız profilini, mümkün olduğunca doğru uygulatmaya çalışmışlardır.

Tren, sürücü tarafından bir ivme kolu ile hareket ettirilmektedir. Bu ivme kolu maksimum cer kuvvetine kadar treni hızlandırabilirken tersi yönde uygulandığında maksimum frenleme kuvveti ile treni durdurabilmektedir. Hızlandırma ve yavaşlatma yönünde ivme kolu 10 kademeye ayrılmaktadır. Gerçek uygulamada hızlanma veya yavaşlama maksimum cer veya frenleme kuvveti uygulanarak yapıldığı için, (THS'de de bu şekilde modellenmiştir) testler sırasında sürücü ivme kolunu bu şekilde kullanmıştır. Hızlanma esnasında MGG modu, frenleme esnasında FR modu, boşta gitme esnasında BG modunu uygulamak için ivme kolunu tam orta noktaya getirerek treni boşa almıştır. SHG modunu

uygulayabilmek için ise ivme kolunun ayarını kullanarak hızı istenilen değerde sabit tutmuştur.

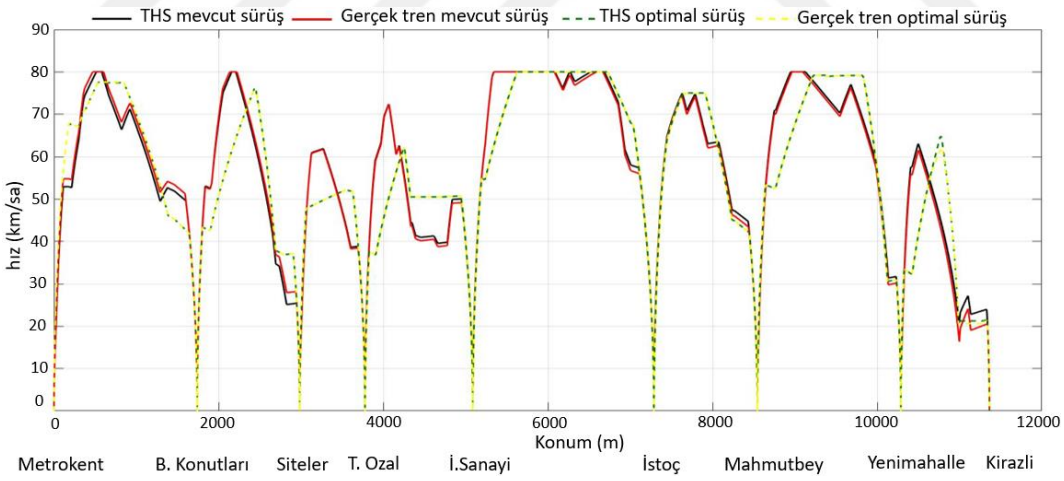


Şekil 5.54 Tren içerisinde test öncesi bilgilendirme ve kontrollerin yapılması

Saha uygulaması iki ana bölüm içermektedir. Bunlardan birincisi, dört optimizasyon yönteminden herhangi birisinin sonuçları ile M3 metro hattı üzerinde, M-K, K-M arasında tam bir tur boyunca boş bir treni sürücü eşliğinde sürdürmektir. THS'de gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonuçlarına göre, dört farklı optimizasyon yöntemi de cer enerjisi tüketimini en aza indirecek enerji verimli hız profilini bulmada başarılı olmuştur. Optimize edilmiş hız profili ile gerçek bir treninin sürülmesi durumunda, istasyonlar arası seyahat süresi ve enerji tüketimlerinin nasıl olacağı, bunların simülasyon sonuçları ile ne ölçüde tutarlı olacağının gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda GA'nın önerdiği hız profili ile trenin sürülmesi tercih edilmiştir. İkinicisi ise, dört yöntemden en iyi sonucu veren MPA algoritması ile ilk olarak boş bir tren sürülerek sahadaki performansı incelenmiştir. Ardından, MPA algoritması ile yüklü tren durumu analizi THS'de simüle edilmiş ve elde edilen hız profili sonuçları ile bir tren işletme altında ve içinde yolcular var iken sürülmüştür. Böylece, hem boş hem de yüklü bir trenin simülasyonu ve saha testleri gerçekleştirilerek karşılaştırmalı olarak sonuçları yorumlanmıştır.

5.6.1 GA Yönteminin Sahada Uygulanması

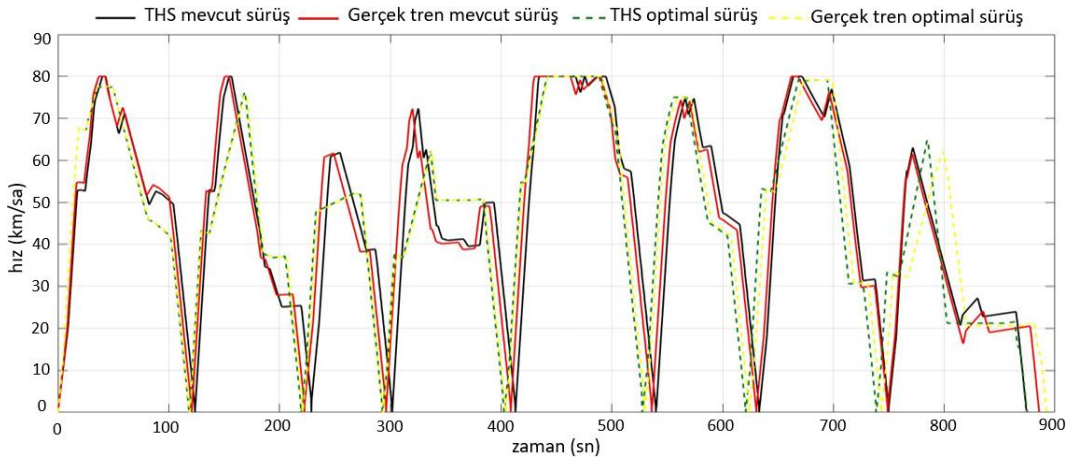
Genetik algoritma yöntemi ile Metrokent-Kirazlı doğrultusunda bulunan istasyonlar arası için trenin hız profili elde edilmişti. Bu veriler bir tren sürücüsüne talimatlar şeklinde aktarılmıştır. Örneğin, Metrokent istasyonundan kalkış yapan bir tren Başakkonutları istasyonuna ulaşıncaya kadar olan GA'nın hareket önerisi şu şekildedir: 0-185'inci metreler arasında MGG modu, 185-564'üncü metreler arasında BG modu, 564-823'üncü metreler arasında SHG modu ve ardından uygun frenleme noktasına kadar (1646'ncı metre) tekrar BG modu uygulanmıştır. Son olarak 1646'ncı metrede FR moduna geçilerek araç istasyonda durdurulmuştur. Böylece, bu iki istayon arası hareket tamamlanmıştır. Bu iki istasyon arasındaki örnekte olduğu gibi, optimal hız profili her bir istasyon arası için sürücüye talimatlar verilerek gerçekleştirilmiş ve M-K doğrultusundaki nihayete erdirilmiştir. Tren Kirazlı istasyonuna ulaşarak bu yöndeki rotasını tamamladığında araç kabininde bulunan bilgisaraya başka bir laptop ile bağlanılarak ilgili harekete ait bilgiler alınmıştır. THS'de gerçekleştirilen mevcut sürüş ile optimal sürüş simülasyon sonuçları ve gerçek tren hareketindeki mevcut sürüş ile optimal sürüş verileri kullanılarak Şekil 5.55'te hız-konum grafiği olarak çizdirilmiştir.



Şekil 5.55 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler M – K doğrultusu hız-konum grafiği

Simülasyon ve gerçek trenin mevcut durumundaki hareketleri (sırası ile siyah ve kırmızı çizgi) ile optimize edildikten sonraki simülasyon ve gerçek tren hareketlerinin (sırası ile kesikli yeşil ve sarı çizgi) birbirlerine oldukça yakın olduğu hız-konum grafiğinden anlaşılmaktadır. Zamansal açıdan nasıl bir tutarlılık

olduğunu görmek amacıyla aynı hareketlere ait hız-zaman grafiği de Şekil 5.56'da verilmiştir.



Şekil 5.56 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler M – K doğrultusu hız-zaman grafiği

Şekil 5.56'ya bakıldığında simülasyon ve gerçek tren hareketlerinde tolere edilebilecek kadar küçük sapmalar ile hareketlerin gerçekleştiği görülmektedir. Neredeyse aynı zamanlarda her bir istasyona ulaşılmıştır. THS'de yapılan simülasyonlar ve bunlar sahaya uygulandığı durumdaki sonuçların daha anlaşılır yorumlanabilmesi için Tablo 5.43'te toplam seyahat süreleri ve enerji tüketim bilgileri verilmiştir.

Tablo 5.43 M – K doğrultusunda gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi

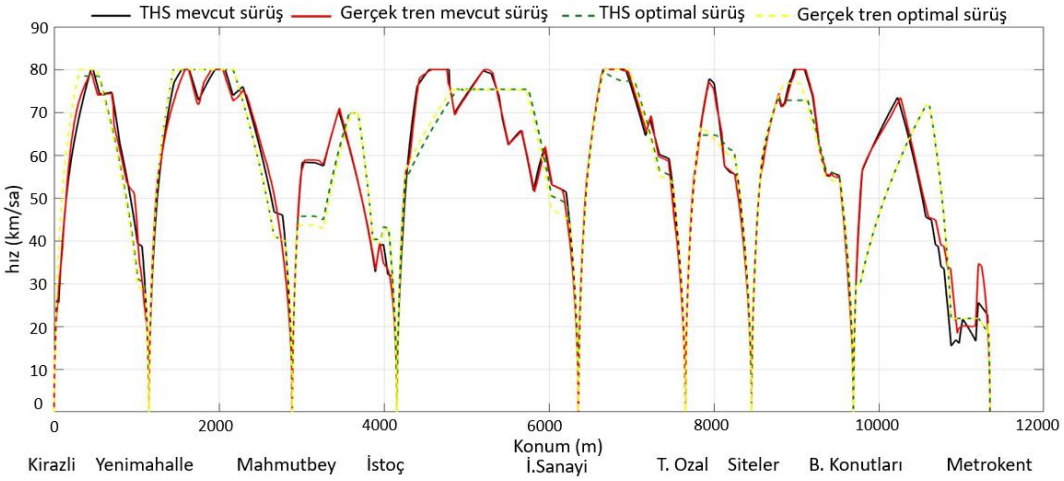
Kıyaslama	**THS mevcut sürüş**	**Gerçek tren mevcut sürüş**	**THS optimal sürüş**	**Gerçek tren optimal sürüş**
Toplam seyahat süresi (sn)	875,00	886,00	875,00	892,75
Toplam enerji tüketimi (kWh)	90,02	88,51	61,65	61,95

Tablo 5.43'e göre, simülasyon ortamında bir tren M-K doğrultusunda koşturulduğunda 875 saniyede 90.02 kWh'lik bir enerji tüketimi ile hareketini tamamlarken aynı hareket modları gerçek trene uygulandığında ise 886 saniyede

88.51 kWh ile hareketini tamamlamıştır. Bu durumda THS'de, seyahat süresi açısından sadece 11 saniye, yani %1.24'lük bir sapma olmuştur. Enerji tüketimi açısından ise 1.51 kWh, %1.70 oranında bir sapma ile sağlanmıştır. Optimize edilmiş hız profili ile gerçek bir tren hareket ettirildiğinde 892.75 saniyede 61.95 kWh'lik bir enerji tüketimi ile rota tamamlanırken bu hareket THS'de 875 saniyede 61.65 kWh'lik bir enerji tüketimi ile tamamlanmıştır. Bu durumda ise seyahat süresi açısından 17.75 saniye yani %2.02'lik bir sapma meydana gelmiştir. Enerji tüketimi açısından ise sadece 0.3 kWh yani %0.48'lik bir sapma olmuştur. Sonuç olarak anlaşılmaktadır ki, THS'de gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile gerçek tren hareketi, seyahat süresi ve enerji tüketimleri açısından birbirine oldukça yakındır. Bu, hem THS'nin hem de saha testlerinin başarısını ortaya koymuştur.

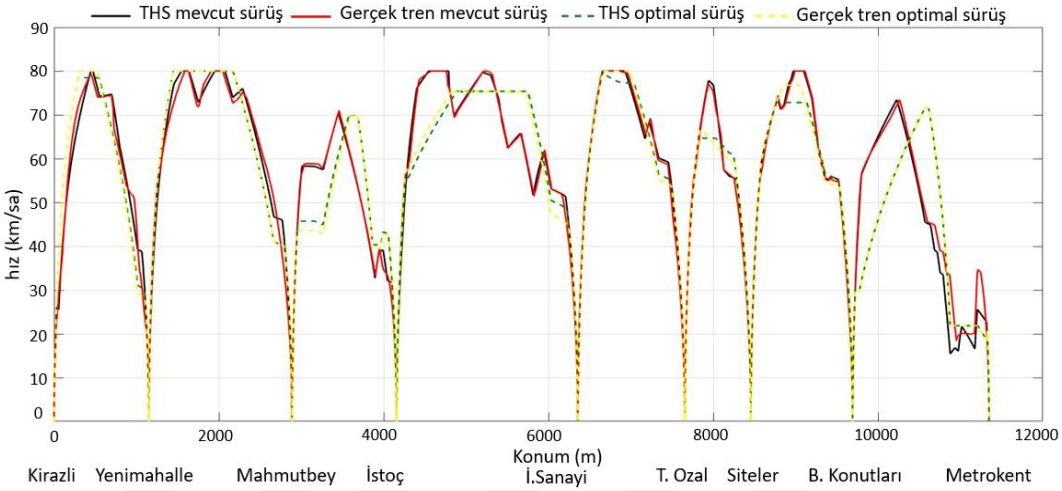
THS'de optimal hız profili ile koşturulan bir tren mevcut sürüşe göre 28.37 kWh yani %31.51 oranında enerji tasarrufu sağlarken gerçek bir trenin optimal hız profili ile sürülmesi durumunda 26.56 kWh yani %30 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Enerji tasarruf oranları açısından da THS ve gerçek saha testi karşılaştırıldığında birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tren sürüş testinin devamı olarak Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında da aynı M-K doğrultusunda tarif edildiği şekilde bir sürüş testi gerçekleştirilmiştir. Bu teste ait hız-konum grafiği de Şekil 5.57'de paylaşılmıştır. Simülasyon ortamında ve gerçek sahada koşturulan trenin, bu doğrultudaki istayonlar arası hareketleri incelendiğinde, birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.57 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler K – M doğrultusu hız-konum grafiği

Seyahat süresi açısından simülasyon ortamı ve gerçek tren hareketinin değerlendirilebilmesi için hız-zaman grafiği de Şekil 5.58'de verilmiştir. Bir önceki M-K doğrultusunda olduğu gibi K-M doğrultusunda da ihmal edilebilecek kadar küçük sapmalar istasyonlar arası hareket sağlanmıştır.



Şekil 5.58 Gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu mevcut ve optimize edilmiş sürüşler K – M doğrultusu hız-zaman grafiği

Kirazlı-Metrokent doğrultusu boyunca THS ve gerçek tren hareket sonuçları Tablo 5.44'te özetlenmiştir.

Tablo 5.44 K – M doğrultusunda gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi

Kıyaslama	**THS mevcut sürüş**	**Gerçek tren mevcut sürüş**	**THS optimal sürüş**	**Gerçek tren optimal sürüş**
Toplam seyahat süresi (sn)	884,00	869,00	884,00	873,50
Toplam enerji tüketimi (kWh)	116,37	119,00	96,14	97,65

Tabloya göre, THS'de mevcut hız profili ile hareket eden bir tren seyahatini 884 saniyede 116.37 kWh enerji tüketimi ile tamamlarken bu durum gerçek tren sürüşünde 869 saniyede 119 kWh'lik bir enerji tüketimi ile sağlanmıştır. Bu durumda, seyahat süresi açısından 15 saniye, %1.73'lük bir fark oluşmuştur. Enerji

tüketimi hesaplaması açısından ise 2.63 kWh'lik bir sapma ile gerçek bir trenin enerji tüketimi benzetilebilmiştir.

Her iki yönde de, M-K ve K-M, yapılan simülasyon ve gerçek saha testleri ortak değerlendirildiğinde, THS ve saha testleri birbirlerine oldukça yakın ve tutarlı olduğu görülmüştür. Tüm kıyaslamalar açısından THS, gerçek bir treni %98 oranında doğru benzetebilmeyi başarmıştır.

5.6.2 MPA Yönteminin Yüklü Tren Testlerinde Sahada Uygulanması

Boş bir tren hareketi dört farklı sezgisel tabanlı algoritma ile optimize edilmişti. Dördü arasından diğerlerine kıyasla en iyi hız profili çözümünü MPA algoritması bulmuştur. Bu sebeple yüklü/dolu tren testleri için MPA algoritması tercih edilmiştir.

Tren içerisindeki toplam yük, her bir istasyonda kaç yolcunun inip kaçının bindiğine göre değişecektedir. Bu da önceden kesin olarak bilinebilecek bir durum olmadığı için istatistiksel veriler ile tren içerisindeki yük belirlenmiştir. Bunun için öncelikle bir zaman aralığı tayin edilmiştir (saat 10:00-12:00 arası). Sonrasında bu zaman aralığı içerisinde Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istsyonları arasında, hangi istasyonda kaç yolcu inmekte ve kaçı binmekte olduğu belirlenerek nihai durumda her bir istasyonda tren içindeki toplam yolcu sayıları belirlenmiştir. Bir yolcu 75 kg alınarak tren içerisindeki toplam kütle hesaplanmıştır.

Metro İstanbul A.Ş. firmasından, saat 10:00-12:00 aralığı için, M-K ile K-M doğrultusunda bulunan her bir istasyon için, son 6 aylık ortalama yolcu sayıları alınmış ve bu veriler her iki yön için ayrı ayrı Tablo 5.45 ve 5.46'da paylaşılmıştır.

Tablo 5.45 Metrokent-Kirazlı yönü istasyon bazlı yolcu sayıları

Bilgiler	**Doluluk oranı (%)**	**Yolcu sayısı**	**İlave kütle artışı (ton)**
Metrokent - Başakkonutları	5,00	62,00	4,65
Başakkonutları - Siteler	9,00	110,00	8,40

Tablo 5.45 Metrokent-Kirazlı yönü istasyon bazlı yolcu sayıları (devamı)

Bilgiler	Doluluk oranı (%)	Yolcu sayısı	İlave kütle artışı (ton)
Siteler - Turgut Özal	12,00	148,00	11,10
Turgut Özal - İkitelli	15,00	185,00	13,90
İkitelli - İstoç	30,00	370,00	27,75
İstoç - Mahmutbey	30,00	370,00	27,75
Mahmutbey - Yenimahalle	25,00	309,00	23,17
Yenimahalle - Kirazlı	25,00	309,00	23,17

Tablo 5.46 Kirazlı-Metrokent yönü istasyon bazlı yolcu sayıları

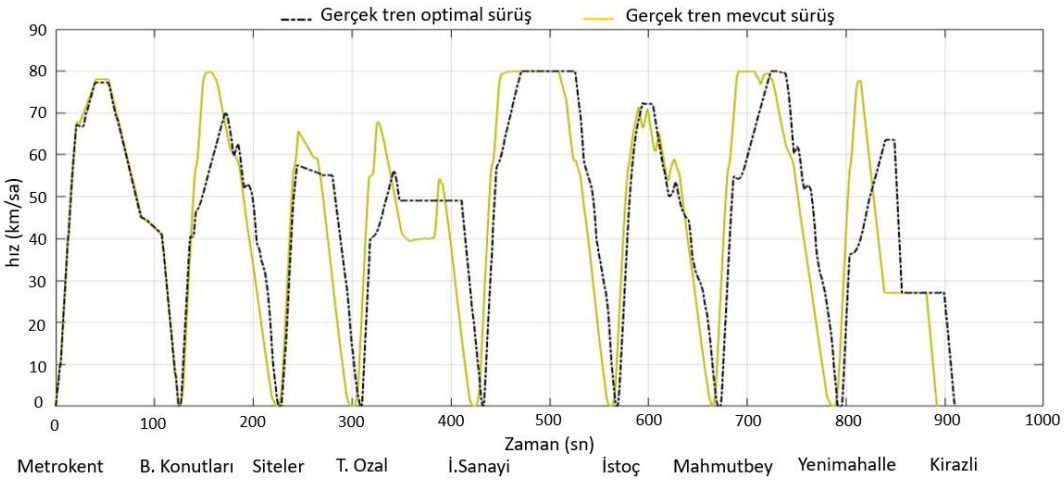
Bilgiler	Doluluk oranı (%)	Yolcu sayısı	İlave kütle artışı (ton)
Kirazlı - Yenimahalle	30,00	370,00	27,75
Yenimahalle - Mahmutbey	32,00	395,00	29,60
Mahmutbey - İstoç	32,00	395,00	29,60

Tablo 5.46 Kirazlı-Metrokent yönü istasyon bazlı yolcu sayıları (devamı)

Bilgiler	Doluluk oranı (%)	Yolcu sayısı	İlave kütle artışı (ton)
İstoç - İkitelli	32,00	395,00	29,60
İkitelli – Turgut Özal	17,00	210,00	15,75
Turgut Özal - Siteler	15,00	185,00	13,90
Siteler - Başakkonutları	13,00	160,00	12,00
Başakkonutları - Metrokent	11,00	136,00	10,20

Yolcu yüklü durum senaryosu bu veriler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle THS ortamında, her bir istasyonda değişen yolcu yükü dikkate alınarak, mevcut hız profili ile bir tren M-K ve K-M arasında koşturulmuştur. Ardından MPA algoritması ile, değişken yolcu yüklü durum dikkate alınarak, M-K ve K-M arasında yeniden hız profili optimizasyonu yapılmıştır.

13.10.2022 tarihinde, M3 metrosunda Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında 10:00 -12:00 saatleri arasında, güncel işletme altında, tren içerisinde yolcular var iken tren sürüş testi yapılmıştır. Tren önce mevcut hız profili ile harekete başlayarak M-K ve K-M istasyonları arasındaki yolculuğunu tamamlamıştır. Daha sonra MPA algoritmasının önerdiği optimum hız profili ile bir tren sürücü tarafından, önceki bölümde anlatıldığı şekilde, sürülerek M-K ve K-M istasyonları arasındaki seyahatini tamamlamıştır. Şekil 5.59, bunun Metrokent'ten Kirazlı istikametine gidişinin hız-zaman grafiği olarak sonuçlarını göstermektedir.



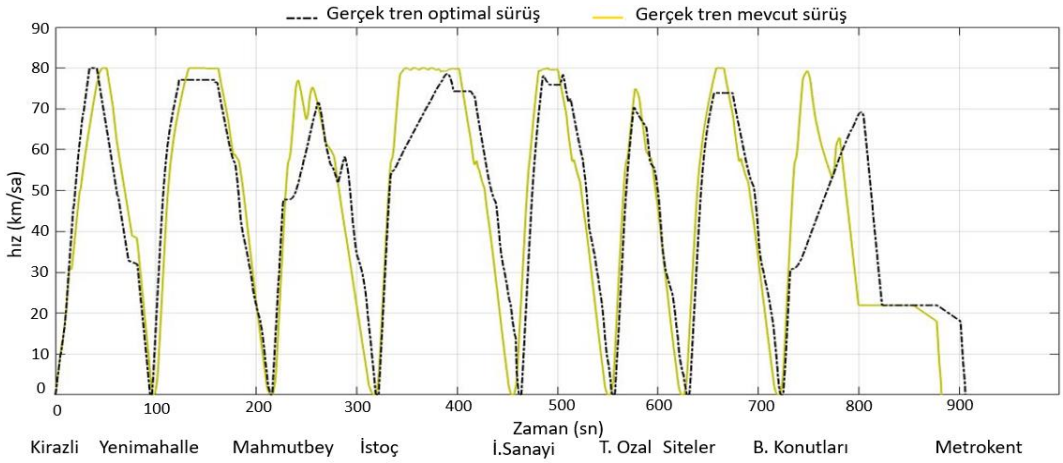
Şekil 5.59 Gerçek tren mevcut ve optimize edilmiş sürüşler M-K doğrultusu hız-zaman grafiği

İçinde yolcular ile hareket eden gerçek bir tren, MPA algoritması tarafından elde edilen hız profiline göre, sürücüye talimatlar verilerek sürdürülmüştür. Metrokent istasyonundan hareketine başlayarak, önemsenmeyecek bir seyahat süresi uzaması ile, Kirazlı istasyonuna ulaşmıştır. Şekil 5.59'dan görülebileceği gibi, gerçek bir tren optimal hız profiline göre sürüldüğünde, mevcut sürüş profili gibi neredeyse aynı zamanlarda istasyonlara ulaşarak seyahatini tamamlamıştır. Bu durumda optimal strateji, yolculuğunu mevcut hız profiliyle sürüşe göre 27 kWh, %28,42 daha fazla enerji verimliliğiyle tamamlamıştır. Optimal hız profili ile sürüş son istasyona mevcut profil ile sürüşten 18 saniye, yaklaşık %2 daha geç ulaşmıştır. İlgili sonuçlar Tablo 5.47'de verilmiştir.

Tablo 5.47 M-K doğrultusunda mevcut ve optimal hız profillerine göre gerçek tren sürüşünün saha sonuçları

Mevcut hız profili		**Optimal hız profili**	
Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
892,00	95,00	910,00	68,00

Dönüş yolu olan Kirazlı-Metrokent yönü için de benzer şekilde sürüş test yapılmıştır. Şekil 5.60 bu hareketin hız-zaman grafiğini göstermektedir.



Şekil 5.60 Gerçek tren mevcut ve optimize edilmiş sürüşler K-M doğrultusu hız-zaman grafiği

Bu yöndeki hareket sonucunda, Tablo 5.48'de görüldüğü gibi, mevcut hız profili ile seyahat eden tren 126 kwh enerji tüketimi ile yolculuğunu 882,25 saniyede tamamlarken, optimal hız profili ile sürüldüğünde 106 kwh enerji tüketimi ile yolculuğunu 906 saniyede tamamlamıştır. Yani 23,75 saniyelik, %2,69'luk zaman gecikmesi ile %15,87'lik enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Tablo 5.48 K-M doğrultusunda mevcut ve optimal hız profillerine göre gerçek tren sürüşünün saha sonuçları

Mevcut hız profili		**Optimal hız profili**	
Seyahat süresi (sn)	**Enerji tüketimi (kWh)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Enerji tüketimi (kWh)**
882,25	126,00	906,00	106,00

Saha çalışmaları sonuçları göstermiştir ki, bu tez çalışmasının odaklandığı konulardan biri olan cer enerjisi tüketiminin azaltılması konusu sadece teorik hesaplamalarla sınırlı kalmamış, gerçek sahaya uygulanabilmiştir. Simülasyon ortamında elde edilen enerji verimliliğine, saha uygulaması sonucunda da ulaşılmıştır. Böylece, önerilen hız profili optimizasyonu yönteminin, başarısı ile raylı sistem işletmeci firmaları için, enerji verimliliği açısından büyük avantajlar vaad etmekte olduğu ortaya konulmuştur.

6
ZAMAN ÇİZELGESİNİN YENİDEN DÜZENLENMESİ İLE ENTEGRE ENERJİ OPTİMİZASYONU

Rejeneratif frenleme yapan trenler, birçok DC beslemeli demiryolu sisteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlanan trenin kazandığı kinetik enerji, fren yapıldığında kısmen tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu enerji yol kenarı veya araç üzeri depolama sistemlerinde depolanarak trenlerin kalkışı esnasında kullanılabilir. Eğer depolama sistemi yok ise tersinir cer transformatör merkezleri kurularak, frenleyen trenlerin ürettiği DC enerji önce bu merkezlerde tekrardan AC gerilime dönüştürülür ve ardından farklı bir transformatör merkezine aktarılarak o bölgedeki trenlerde DC gerilime dönüştürüldükten sonra kullanılabilir. En etkili ve maliyetsiz yolu ise, rejeneratif enerjinin aynı elektrik bölgesinde bulunan diğer hızlanan trenlerde yeniden kullanılmasıdır. Böylece, rejeneratif enerji aktarımı aktif olduğunda enerji maliyeti tasarrufları yapılabilir. Geri kazanılan fren enerjisinin kullanımı, güç şebekesinin alıcılığına bağlıdır. Alıcılığın artırılması zaman çizelgesinin optimize edilmesi ile sağlanmaktadır.

6.1 Zaman Çizelgesi Düzenlemesi (Sefer Planlaması)

Rejeneratif frenleme, daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, raylı ulaşım sistemlerinde enerji tasarrufu sağlamak için kullanılan tekniklerden bir diğeridir. Raylı sistem araçlarının frenleme sırasında ürettiği kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesine rejeneratif frenleme enerji adı verilmektedir ve demiryolu sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Rejeneratif frenleme enerjisi (RFE), frenleyen treninin ürettiği enerjiden yararlanılması ve bu enerjinin hat üzerindeki hızlanan başka bir trene aktarılması işlemidir.

Çalışan trenler arasındaki sefer süreleri, miktarı ve konumu, RFE'nin nasıl kullanıldığını etkilemektedir. Frenleme sırasında açığa çıkan enerji, başka bir tren tarafından kullanılmaması veya depolanmaması durumunda fren dirençlerinde tüketilir ve ısı olarak kaybolur.

Tren tarifeleri yolcuların ihtiyaçları dikkate alınarak oluşturulmalıdır. Sefer aralıkları yolcu talebi ve yoğunluğuna göre belirlense de operatörün buna uyum

sağlamasına dikkat edilmelidir. Tren tarifelerinin amacı, hangi trenin nerede olacağını, ne zaman olacağını, her istasyonda ne kadar beklemesi gerektiğini belirlemek ve olası gecikmeleri karşılamak için zaman aralıkları ayırmaktır.

Zamanlama tarifesinde iyileştirme amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır. Bu araştırmalardan ilki 1956 yılında yük trenlerinin hareketlerini dinamik programlama yaklaşımı kullanarak planlayan Charnes ve Miller tarafından başlatılmıştır [2]. Farklı bir çalışmada Lee ve Chen, 2003 yılında Tayvan demiryolunun tren çizelgeleme problemi için bir genetik algoritma çözüm stratejisi oluşturdular [3]. Ramos ve diğerleri, trenlerin hızlanma ve frenleme süreleri arasındaki örtüşmeyi en üst düzeye çıkarmak amacıyla araştırmalarında zaman çizelgesini optimize etmişlerdir. Araştırmalarında genetik algoritmalardan yararlanmışlardır [4]. Benzer şekilde Nasri ve arkadaşları yaptıkları çalışmada durakta bulunan iki farklı treni koordine etmek amacıyla en uygun yedek (rezerv) zaman aralığını bulmak istemiş ve bunun için araştırmalarında genetik algoritmayı tercih etmişlerdir [5]. Albrecht ise çalışmasında, enerji kullanımını düşürmek amacıyla frenleyen ve hızlanan trenlerin zaman çizelgelerini incelemiş, trenlerin duraklarda bekleme sürelerini (dwell time) artırarak, trenlerin zaman çizelgelerini optimize etmişlerdir. Böylece, trenlerin çalışma zamanlarını en uygun şekilde planlayarak, optimal kombinasyonun bulunmasını sağlamıştır [6]. Aynı hat üzerinde aynı yöne giden trenler, Yang ve diğerleri tarafından yürütülen bir tarife optimizasyonu araştırmasının konusu olmuştur. Bu çalışmayı simüle etmek için Pekin Yizhuang metro hattı verileri kullanılmış ve trenlerin aynı anda hızlanıp fren yapması nedeniyle rejeneratif frenlemeden elde edilen enerjinin yoğun saatlerde %22, yoğun olmayan saatlerde ise %15,2 arttığı tespit edilmiştir [7].

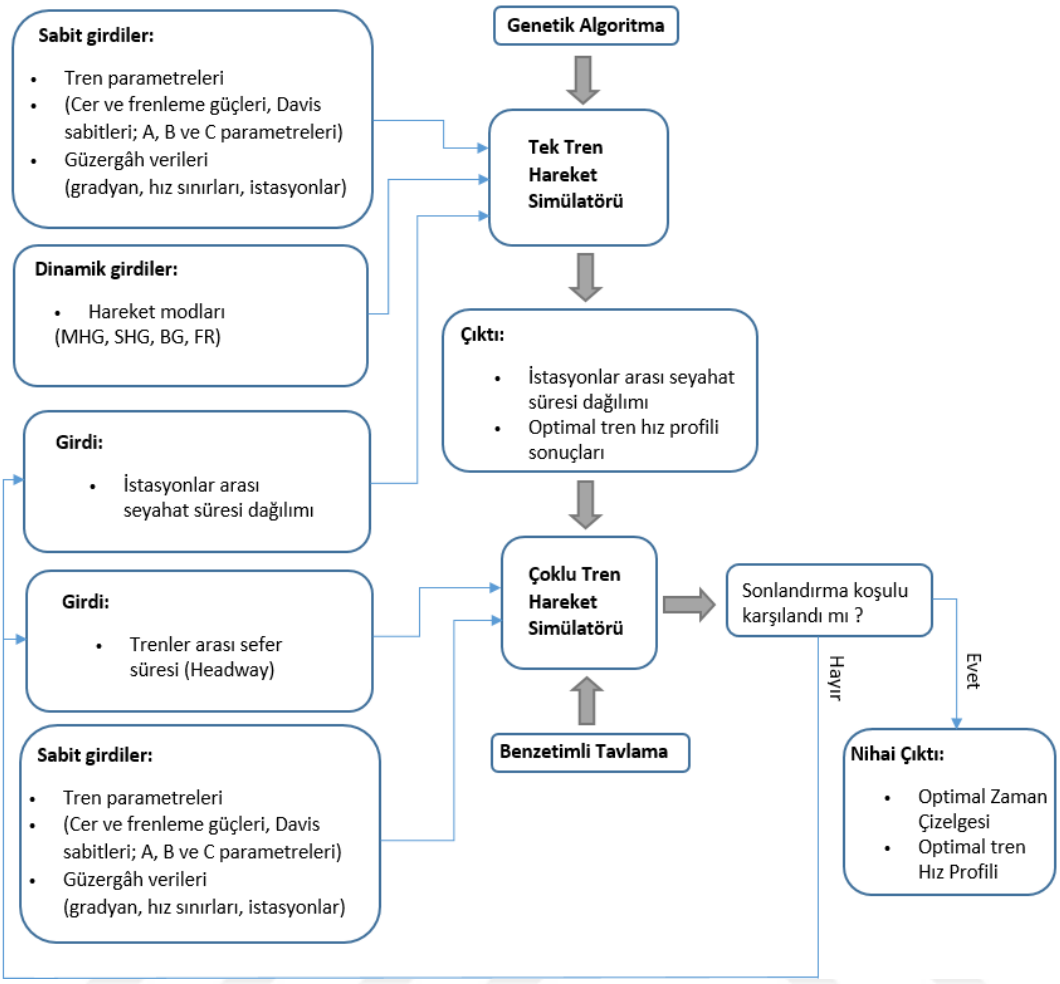
Literatürde de görüldüğü gibi raylı sistemlerde üretilen yenilenebilir enerjiden yararlanmak için çok sayıda araştırma yapılmıştır. RFE ile zaman tarifeleri birbirleri ile yakın ilişki içerisindedir. Fren yapan ve hızlanan trenlerin zaman aralıklarının örtüşmesini arttırmak için tarife optimizasyonu zorunludur. İki tren arasındaki mesafenin üç dakikadan kısa olması durumunda frenleme sırasında üretilen enerjinin %85 ila %95'i diğer hızlanan trenler tarafından etkili bir şekilde kullanılabilmektedir [8]. Araştırmalara göre trenler arasındaki sefer zaman aralıklarının fazla olduğu işletme durumlarında RFE'nin büyük bir kısmı fren sargı dirençleri boşa harcanmaktadır [9].

Rejeneratif frenleme tarafından üretilen enerjinin kullanımını maksimuma çıkarmak amacıyla tren hızlanma ve frenleme süreleri koordine edilmelidir. Bunu yapmanın en iyi yöntemlerinden biri trenler arasındaki sefer aralığını, trenlerin hızlanma ve frenleme sürelerini maksimuma çıkaracak şekilde ayarlamaktır.

Bu tez çalışmasında, bir hat üzerindeki tüm trenlerin hareketlerini simüle edebilen bir Çoklu Tren Hareket Simülatörü (ÇTHS) geliştirilmiştir. Ardından, ÇTHS'de Genetik Algoritma ve Benzetimli Tavlama Algoritması kullanılarak, ivmelenen ve frenleyen trenlerin örtüşme zamanlarının çakıştırılması esasına dayanan ve böylece RFE'den maksimum fayda sağlayan bir zaman çizelgesi optimizasyonu yapılmıştır.

6.2 Çoklu Tren Hareket Simülatörü Yapısı

Sistem bazında bütünleşik enerji optimizasyonu için hız profili optimize edilirken aynı zamanda rejeneratif frenleme enerjisinin de etkin kullanımının sağlanması gerekmektedir. Bunun başarılabilmesi için de bir metro hattında günlük tren işletim sürecinin modellenmesine ihtiyaç vardır. Gün boyu enerji tüketimini en aza indirebilecek model, trenlere optimal hız profili atarken, ivmelenen ve frenleyen trenlerin zaman örtüşmelerini maksimumuma çıkararak RFE kullanımını artırmayı da amaçlamaktadır. Bu sebeple, Bölüm 3'te gösterilen tren hareketinin matematiksel modelleme yöntemlerine dayanarak, raylı sistemdeki enerji akışını değerlendirmek için bir Çoklu Tren Hareket Simülatörü geliştirilmiştir. ÇTHS'nin yapısı Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 ÇTHS yapısının şeması

Bu simülatör, tek tren hareket simülasyonunu ile çoklu tren güç ağı simülasyonunu birleştirmektedir. Geliştirilen ÇTHS'nin çalışması şu şekilde gerçekleşir: öncelikle sabit girdiler (tren ve güzergah parametreleri) THS'ye gönderilir. Ardından dinamik girdilere (dört hareket modu, MGG, SHG, BG ve FR) Genetik Algoritma tarafından rastgele bir başlangıç değeri atanır ve bunlar da THS'ye gönderilir. Son olarak bir diğer girdi olan istasyonlar arası seyahat süreleri başlangıçta ilk tanımlandığı hali ile (M3 metro hattının mevcut zaman çizelgesine göre) THS'ye gönderilir ve tek tren hareket simülatörü çalışır. THS çıktı olarak GA tarafından optimize edilmiş istasyonlar arası seyahat süresi dağılımını ve tren hız profilini ÇTHS'ye girdi olarak gönderir. ÇTHS'nin bir diğer girdisi ise trenler arası sefer süresidir (headway). Başlangıçta headway M3 hattının mevcut zaman çizelgesinde tanımlandığı gibi ÇTHS'ye girdi olarak verilir. ÇTHS'nin son girdisi ise, THS'de olduğu gibi sabit olan tren ve güzergah parametreleridir. Böylece ÇTHS'de çalışır ve çıktı olarak Benzetimli Tavlama Algortiması tarafından optimize edilmiş nihai

zaman çizelgesi ve tren hız profili elde edilir. Bu döngü sonlandırma şartı sağlanıncaya dek devam eder. Bu tez çalışmasında, sonlandırma şartı olarak yineleme sayısı referans alınmıştır. ÇTHS 100 yineleme sayısı kadar çalışır ve bu döngü içerisindeki en iyi sonucu çıktı olarak sunar. Çalışma sırasında, ÇTHS yapısının genelde 20. itersayona kadar en iyi sonucu bulduğu görülmüştür. Bu sebeple, sonlandırma kriterinin 100 iterasyon ile sınırlandırılmasının yeterli olacağına karar verilmiştir.

ÇTHS'de, hız profili optimizasyonu tarafında, bu tür problemlerin çözümünde birçok literatürde sıklıkla tercih edilmiş ve başarılı çözümler elde ettiği kanıtlanmıştır. Ayrıca çok değişkenli ve çok parametreli bu çoklu tren optimizasyonu problemine uygulaması da kolaydır. ÇTHS'nin ikinci aşaması olan zaman çizelgesi optimizasyonu tarafında ise SA algoritması tercih edilmiştir. SA algoritması da benzer şekilde literatürde birçok çalışmada tercih edilmiştir. İyi bir başlangıç değeri ile çok iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca GA yöntemi gibi uygulanması da kolaydır.

Çoklu tren hareketinin modellenmesindeki amaç, hız profili optimizasyonu yöntemi ile cer enerjisi tüketimini azaltmanın yanı sıra, RFE'den maksimum seviyede yararlanmaktır. Bu sebeple, RFE'nin doğru hesaplanması çalışma sonuçlarınının doğruluğu ve çalışmanın verimi açısından oldukça önemlidir.

6.3 Rejeneratif Frenleme Enerjisi Modelinin Geliştirilmesi

Bu tez çalışmasında, İstanbul M3 metro hattının verileri kullanılarak, hattın mevcut zaman çizelgesi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu sebeple, hatta çalışan trenlerin frenleme karakteristiklerinin simülasyon ortamında en doğru şekilde benzetilmesi önemlidir. Benzetimin gerçeğe en yakın şekilde yapılabilmesi için, gerçek trenlerle yapılan frenleme testlerinden yararlanılmıştır. Tren işletmesinin yapılmadığı gece 01:00-03:00 saatleri arasında sürücü eşliğinde, belirlenen sabit bir güzergah arasında çeşitli hızlardan, tren durana kadar tam frenleme gücü uygulanmıştır. Her bir hızdan sonra tam duruşa kadar treninin ne kadar enerji ürettiği bilgisi böylece elde edilmiştir.

M3 metro hattında çalışan trenlerin vagonunda Şekil 6.2'deki gibi bir enerji ölçüm cihazı bulunmaktadır. Bu cihaz, trenin sürüşü sırasında tüketilen enerji miktarının

yanı sıra frenleme esnasında ortaya çıkan RFE'yi de kayıt etmektedir. Sürüş sırasında bu cihazı bir dizüstü bilgisayara bağlayarak, her bir frenleme sonrasındaki RFE'nin kayıt altında tutulması sağlanmıştır.



Şekil 6.2 Tren vagonunda bulunan enerji ölçüm cihazı

Rejeneratif frenleme enerjisi hesaplama modeli için İstanbul M3 metro hattı üzerinde gerçek trenler ile aynı iki istasyon (Siteler – Turgut Özal) arasında 11 farklı hızda fren testleri gerçekleştirilmiştir. Tren makinistinden, trenin hızını önceden belirlenmiş bir hıza çıkarması ve ardından frene basarak treni durdurması istenmiştir. Tren frenlemeden sonra durduğunda, üretilen rejeneratif enerji miktarı, Şekil 6.2'de görülen cihazdan okunarak not edilmiş ve Tablo 6.1'de paylaşılmıştır. Bu 11 farklı frenleme örneği sonucu kullanılarak, bu tez çalışması için özgün bir rejeneratif frenleme enerjisi benzetim modeli geliştirilmiştir.

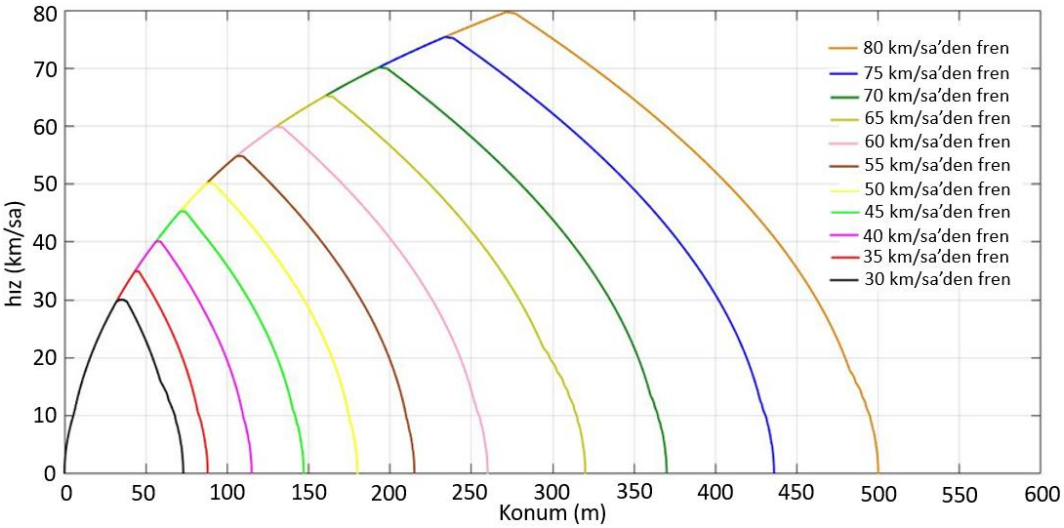
Tablo 6.1 RFE sonuç tablosu

Frene giriş hızı (km/h)	**Frenleme sonunda üretilen RFE (Kwh)**
80,00	7,8740
75,00	6,8690
70,00	5,9981
65,00	5,1829

Tablo 6.1 RFE sonuç tablosu (devamı)

Frene giriş hızı (km/h)	Frenleme sonunda üretilen RFE (Kwh)
60,00	4,4013
55,00	3,6755
50,00	2,9721
45,00	2,2854
40,00	1,6210
35,00	1,0069
30,00	0,6161

M3 metro hattında Siteler - Turgut Özal istasyonları arasında sürücü eşliğinde tren kullanılmıştır. Tren durana kadar belirlenen hızlardan maksimum fren kuvveti uygulanarak trenin durması sağlanmıştır. İlk fren testinin ardından tren, fren testinin başlangıç noktasına geri götürülmüştür. Ardından, bir sonraki önceden belirlenmiş hızda frene girmek amacıyla ikinci test için tekrar yola çıkılmıştır. Aynı şekilde süreç son fren testine kadar devam ettirilmiştir. Gerçek dünya testlerine ait trenin fren yapma hızları ve durma noktaları Şekil 6.3'te verilmiştir.

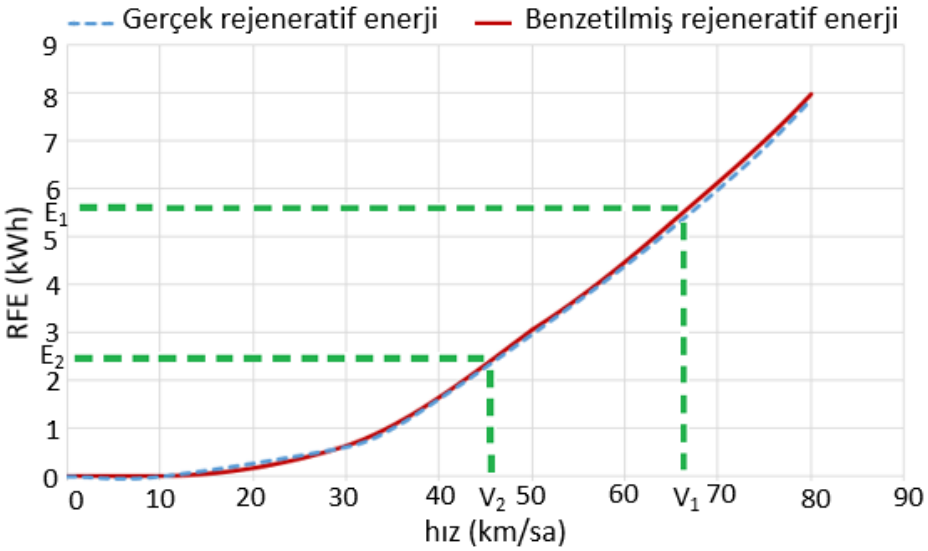


Şekil 6.3 Gerçek tren ile frenleme test grafiği

Geliştirilen RFE modeli gerçek tren testlerine dayanmaktadır. Saha testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda, rejeneratif frenlemeden elde edilen enerji üretimi, bunu olabildiğince yüksek doğrulukla temsil etmek için oluşturulan 5 farklı denklemle yaklaşık olarak hesaplanmıştır. 0-80 [km/sa] hız aralığındaki frenleme sırasında üretilen RFE, denklem (6.1)'de görüldüğü gibi 5 parçaya bölünmüştür. Her hız aralığında oluşturulan formülasyon, frenleme sırasında üretilen rejeneratif enerji miktarını hesaplamaktadır. Bu parçaları entegre ederek, frenlemenin başlama hızı ile bitme hızı arasında üretilen toplam RFE miktarı belirlenmektedir. Trenin frenleme karakteristiğinden dolayı, tren hızı 10 km/sa'nın üzerinde olduğunda elektrikli frenleme devreye girmekte ve rejeneratif frenleme modeli dikkate alınırarak RFE hesaplanmaktadır. Hız 10 km/sa'nın altında ise sadece mekanik frenleme devreye girmekte ve bu durumda RFE üretimi sıfır olmaktadır.

$$E_{RFE} = \begin{cases} 0, & 0 < v \leq 10 \\ 0.0030805v - 0.030805, & 10 < v \leq 30 \\ -0.00024v^2 + 0.0234v - 0.425422, & 30 < v \leq 50 \\ -0.00009v^2 + 0.01364v - 0.337412, & 50 < v \leq 65 \\ 0.00024v^2 - 0.03239v + 1.260261, & 65 < v \leq 80 \end{cases} \quad (6.1)$$

Frenleme sırasında trenden alınan gerçek enerji verileri ile geliştirilen denklem (6.1) kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanan RFE ile gerçek RFE verilerinin karşılaştırılması Şekil 6.4'te verilmiştir. Maksimum sapma miktarı 40 km/s'den fren yapıldığında meydana gelmiş ve %1,8 olarak elde edilmiştir. Bu da sahadan elde edilen gerçek RFE'nin oluşturulan rejeneratif frenleme modeli ile %98'in üzerinde bir doğrulukla simüle edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 6.4 Gerçek ve benzetilmiş RFE eğrisi

Tren hızı v_1'den v_2'ye düştüğünde üretilecek rejeneratif enerji miktarı, denklem (6.1)'deki eşitlikler kullanılarak, v_1 km/sa ile v_2 km/sa arasındaki bölgenin integrali alınarak hesaplanan $E_1 - E_2$'dir.

6.4 Mevcut Durum Tanıtımı

Çalışmada İstanbul ulaşım ağının bir parçası olan M3 metrosu ve bu hat üzerinde hareket eden trenler ele alınmıştır. M3 hattında 8'i istasyonlar arası olmak üzere bir yönde (Metrokent-Kirazlı veya Kirazlı-Metrokent) toplam 9 istasyon bulunmaktadır. Parkurun tek yön için toplam uzunluğu 11.211,00 metredir. Toplam 19 adet istasyonu ile M3 Metrosu, yolcularına belirli bir zaman çizelgesi ile işletme yaparak hizmet vermektedir.

M3 metro hattındaki seferler için, gün boyunca değişken yolcu taleplerini karşılamak amacıyla birkaç farklı headway kullanılmaktadır. Örneğin, yoğun saatlerde (07:00 - 09:00 ve 17:00 - 20:00) trenler her 300 saniyede bir kalkmaktadır. Yoğun olmayan saatlerde hizmet verildiğinde ise trenler arası sefer süresi 600 sn olarak hizmet verilmektedir. Mevcut zaman çizelgesine göre, K-M ve M-K istasyonları arasında 1 gidiş-dönüş 1 tam tur olarak değerlendirildiğinde 18 saatlik işletmede toplam 139 tur yapılmaktadır. K-M ve M-K olmak üzere sırasıyla her iki yön için de detaylı sefer tarifesi bilgileri Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.2 M3 metrosu optimize edilecek zaman çizelgesi (M-K yönü)

Sıra	İstasyon adı	Mevcut yolculuk süresi (sn)	Mesafe (m)	Bekleme süresi (sn)
01	Metrokent	0,00	0,00	20,00
02	Başakkonutları	119,50	1740,00	20,00
03	Siteler	100,00	2984,00	20,00
04	Turgut Özal	73,00	3778,00	20,00
05	İkitelli Sanayi	110,50	5087,00	20,00
06	İstoç	125,00	7287,00	20,00
07	Mahmutbey	91,50	8544,00	20,00
08	Yenimahalle	117,50	10287,00	20,00
09	Kirazlı	138,00	11211,00	20,00

Tablo 6.3 M3 metrosu optimize edilecek zaman çizelgesi (K-M yönü)

Sıra	İstasyon adı	Mevcut yolculuk süresi (sn)	Mesafe (m)	Bekleme süresi (sn)
01	Kirazlı	0,00	0,00	20,00
02	Yenimahalle	91,00	1076,00	20,00
03	Mahmutbey	114,75	2819,00	20,00
04	İstoç	107,75	4076,00	20,00
05	İkitelli Sanayi	140,50	6276,00	20,00

Tablo 6.3 M3 metrosu optimize edilecek zaman çizelgesi (K-M yönü) (devamı)

Sıra	İstasyon adı	Mevcut yolculuk süresi (sn)	Mesafe (m)	Bekleme süresi (sn)
06	Turgut Özal	89,50	7585,00	20,00
07	Siteler	67,50	8379,00	20,00
08	Başakkonutları	89,00	9623,00	20,00
09	Metrokent	184,00	11211,00	20,00

Tablo 6.2'de verilen Metrokent-Kirazlı yönü için mevcut zaman çizelgesine göre tek sefer 875 sn seyahat süresi ve 180 sn toplam bekleme süresi dahil olmak üzere 1055 sn'dir. Kirazlı-Metrokent yönü için mevcut çizelgeye göre tek sefer süresi, Tablo 6.3'te gösterildiği gibi 884 sn hareket süresi ve 180 sn toplam bekleme süresi ile 1064 sn'dir.

Tablo 6.4'te M3 metro hattı zaman çizelgesi optimizasyonunda referans alınarak optimize edilecek mevcut durumun özet bilgileri verilmiştir.

Tablo 6.4 Mevcut zaman çizelgesi genel bilgileri

Bilgiler	Değerler
Metrokent-Kirazlı yönü tek sefer için yolculuk süresi (sn)	875,00
Kirazlı-Metrokent yönü tek sefer için yolculuk süresi (sn)	884,00
Tek sefer için istasyonda bekleme süresi (sn)	180,00
Headway (06:00-07:00)	600,00

Tablo 6.4 Mevcut zaman çizelgesi genel bilgileri (devamı)

Bilgiler	Değerler
Headway (07:00-09:00)	300,00
Headway (09:00-17:00)	600,00
Headway (17:00-20:00)	300,00
Headway (20:00-00:00)	600,00
Günlük işletmedeki tren sayısı (adet)	139,00

6.5 Entegre Enerji Optimizasyonu

Bütünleşik demiryolu simülasyonunun, Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, tekli ve çoklu tren operasyonları olmak üzere birbirine bağlı iki bileşeni vardır. Bu entegre yapının ilk kısmında, belirli bir istasyonlar arası seyahatin sürüş tarzı ve enerji kullanımı belirlenmekte ve Genetik Algoritma kullanılarak belirli bir seyahat süresi ile optimum hız profili elde edilmektedir. Daha sonra, sistemin transformatör merkezi tabanlı enerji kullanımını azaltmak için en iyi hız profili problemi çözümüne dayalı olarak istayonlar arası seyahat süreleri ve trenler arası sefer sürelerini belirlemek için Benzetimli Tavlama Algoritması kullanılmaktadır.

Hem tek tren hem de çoklu tren hareketinin çıktıları birbirini etkilemektedir. Sonuç olarak, bu çalışmadaki optimizasyon, sırasıyla Bölüm 6.5.1 ve 6.5.2'de ele alınan hız profili ve zaman çizelgesi optimizasyonlarınının entegrasyonunu sunmaktadır.

6.5.1 Tek Tren Hız Profili Optimizasyon Algoritması

Çalışmadaki hız profili optimizasyonunun amacı, belirli bir seyahat süresi içinde tren cer enerji tüketimini azaltmak amacıyla, her bir istasyon arası için en uygun hareket modu sırasını (MGG-SHG-BG-FR) belirlemektir. Cer elektriği talebi, ideal bir strateji için hareket aşamalarına bölünmüştür. Enerjinin en büyük bölümünün kullanıldığı aşama, hareket başlangıç anından MGG fazının bitimine kadar olan kısımdır. Ardından gelen SHG fazındaki cer kuvveti, tren hareketine karşı olan

direnç değerlerine eşittir ve hız (V_{SHG}) sabittir. Bu aşama, MGG fazının bitiminden başlamakta ve BG fazının başlangıcına kadar uzanmaktadır. Bundan sonraki aşamalarda (BG ve FR) cer kuvveti yoktur. Bu nedenle, cer gücü kaybı olmamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, cer enerjisi kullanımını azaltmak amacıyla her bir istasyon aralığı için en iyi tren hareket faz sırası (HFS = [HFS_1, HFS_2, …, HFS_{si}]) belirlenmiştir. Örneğin, iki istasyon arasındaki HFS, HFS = (MGG, SHG, BG, FR) olmak üzere trenin hangi hareket modunu, hangi sırayla kullanacağı bilgilerini içermektedir. Bu nedenle, birbirini izleyen istasyonlar arasında optimal bir strateji için tek bir trenin genel enerji kullanımını belirlemek amacıyla denklem (6.2) oluşturulmuştur:

$$\begin{cases} E_{opt} = E_{SJ} = \sum_{i=1}^{sn} E_{MHG} + \sum_{i=1}^{sn} E_{SHG} \qquad if\ T_{sj} = T_{stt} \\ [IT, E_{it}] \ = \ \ g(HFS\ (MHG, SHG, BG, FR)) \end{cases} \tag{6.2}$$

E_{opt} (kWh), tek bir yolculuk için en aza indirilmesi gereken cer enerjisi kullanımını belirtmektedir. E_{MHG} (kWh) ve E_{SHG} (kWh), MGG ve SHG aşamalarında kullanılan enerjileri ve T_{sj} (sn), tek bir seyahatin süresini temsil etmektedir. IT (sn), istasyonlar arasındaki yolculuk süresini, E_{it} (kWh), istasyonlar arasındaki enerji kullanımını ve sn ise istasyon sayısını göstermektedir. Planlanan seyahat süresi (T_{stt}) (sn) ne kadar enerji kullanıldığını doğrudan etkilediğinden, fazlar arasındaki geçiş noktalarını doğru bir şekilde belirlemek çok önemlidir. i, i + 1, …, sn istasyonları arasında yolculuk yapan bir tren için en iyi hareket faz sırasını bulmak bir optimizasyon konusu olarak belirlenmiş ve amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\begin{cases} Obj_{min} = E_{SJ} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{sn}} \left(\int_0^{\mathrm{IT_i}} \mathrm{F_c(t).\, v(t)} + \int_0^{\mathrm{IT_i}} \mathrm{F_c(t).\, v_{shg}(t)} \right) dt \\ T_{sj} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{sn}} (\mathrm{IT_i}), \ \ if\ |\mathrm{IT_i} - \mathrm{IT_{si}}| \in [0, \mathrm{IT}_r] \end{cases} \tag{6.3}$$

Burada, F_c (kN), anlık tren hızı v(t) (m/sn)'deki cer kuvveti, sn istasyon sayısı, IT_s (sn) istasyonlar arasında planlanmış seyahat süresi ve IT_r (sn), planlanan seyahat süresi ile optimum seyahat süresi arasındaki en büyük farkı temsil etmektedir.

Optimizasyon çalışması ile ilgili tren hareketine ilişkin dikkate alınan kısıtlamalar Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.5 Tren hareketi optimizasyonu kısıtlamaları

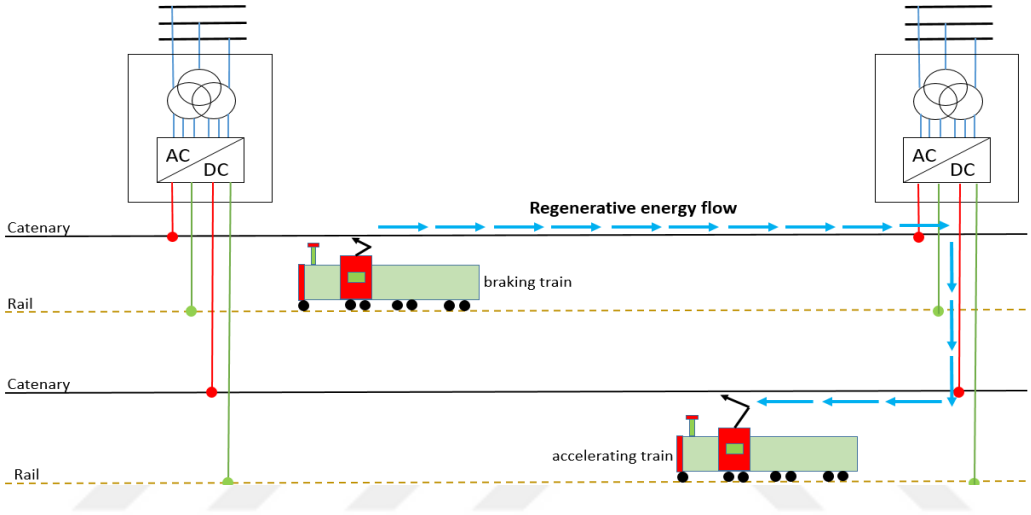
$\mathbf{\frac{dx(t)}{dt} = v(t)}$	$\mathbf{0 \leq t \leq T_i}$
$\mathbf{F_c(t) = F_{cmax}}$	$\mathbf{0 \leq t \leq x_1}$
$\mathbf{F_c(t) = 0}$	$\mathbf{x_2 \leq t \leq T_i}$
$\mathbf{F_{fr}(t) = 0}$	$\mathbf{0 \leq t \leq x_3}$
$\mathbf{F_{fr}(t) = F_{frmax}}$	$\mathbf{x_3 \leq t \leq T_i}$
$\mathbf{0 \leq F_c \leq F_{cmax}}$	
$\mathbf{0 \leq F_{fr} \leq F_{frmax}}$	
$\mathbf{t(0)}=0, \boldsymbol{x}(0)=0, \boldsymbol{v}(0)=0$	
$\mathbf{x(T_i) = X_i, v(T_i) = 0}$	

Tablo 6.5'te paylaşılan tren hareketine ait kısıtlamalar şu şekilde özetlenebilir: hareketin başlangıç anında, tren durgun halde, konum, zaman ve hız sıfırdır. Tren harekete başlayıp i istasyonuna ulaştığında ise, hız sıfır, süre T_i ve konum X_i'dir. İlk kalkış anından MGG'nin sonuna kadar (x_1 noktası) trene uygulanan cer kuvveti maksimum seviyededir. BG modunda uygulanan cer ve frenleme kuvveti sıfırdır. Uygun durma noktasına ulaşıldığında ise uygulanan frenleme kuvveti maksimumdur. Cer ve frenleme kuvvetleri, 0 ile maksimum arasında sınırlandırılmıştır.

Böylece, tek bir treninin istasyonlar arasındaki hareketinin enerji tüketimi hesaplanmış ve optimizasyon denklemleri oluşturulmuştur. Zaman çizelgesi optimizasyonu için günlük işletmedeki tüm trenlerin enerji tüketimleri değerlendirilmeli ve optimize edilmelidir.

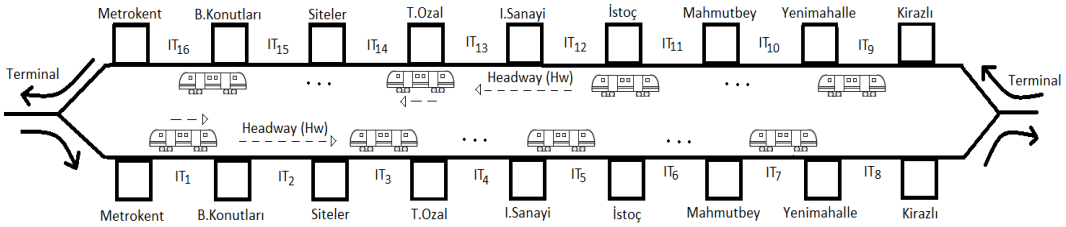
6.5.2 Tek Tren Hız Profili Optimizasyon Algoritması

Raylı sistemlerde transformatör merkezi düzeyinde enerji tüketimini hesaplarken, günlük işletme altındaki tüm trenlerin etkileşimi dikkate alınmalıdır [10]. Şekil 6.5, rejeneratif frenlemenin raylı sistemdeki trenler tarafından nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Aynı elektrik bölgesindeki diğer komşu ivmelenen trenler, RFE'yi kullanabilmektedir. Eğer, aynı hat üzerinde RFE'yi kullanacak bir başka tren yoksa, bu enerji depolanabilir (örneğin süper kapasitörde) ve daha sonra diğer trenler tarafından kullanılabilir.



Şekil 6.5 RFE'nin yeniden kullanımına ilişkin örnek bir gösterim

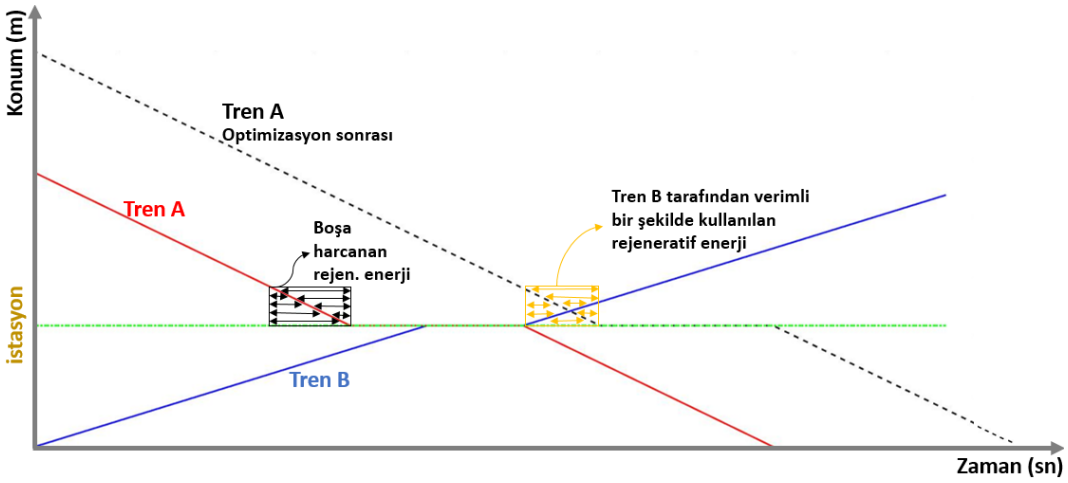
Bir metro sisteminde, trenler Şekil 6.6'da gösterildiği gibi döngü içerisinde çalışmaktadırlar. Bu döngü içerisinde, RFE'nin verimli kullanımı için trenlerin birbiri ile etkin koordine edilmelidirler. Bu nedenle, öncelikle, bir tren fren yaparken ortaya çıkan RFE'yi kullanabilecek hiçbir hızlanan tren yoksa, frenleme direncinde RFE yakılarak kaybolacaktır. Etkili RFE kullanımı ayrıca, iki tren arasındaki koordinasyon bir t zamanında etkinleştirildiğinde, fren yapan ve ivmelenen trenlerin (aynı elektrik bölgesinde olmalıdır) mesafesinden de etkilenmektedir.



Şekil 6.6 İstanbul M3 metro hattı çevrim zamanı unsurları

Sonuç olarak, enerji tasarruflu tren işletimi, bir tren için verimli sürüş tekniklerine ek olarak, metro sistemlerindeki zaman çizelgesinin de iyileştirilmesini içermektedir. Bu nedenle, tez çalışmasındaki algoritma, RFE'yi maksimum seviyede kullanabilmek için en uygun zaman çizelgesini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çizelge, aşağıdaki kriterlere uygun olarak tanımlanmıştır:

- Frenleme-Hızlanma Senkronizasyonu: Şekil 6.7'de gösterildiği gibi, aynı güç kaynağı ağındaki iki trenden birisi fren yaparken diğeri hızlanıyorsa, hızlanan tren, frenleyen tren tarafından sağlanan RFE'yi hemen kullanabilmekte ve bu da toplam enerji tüketimini azaltmaktadır. Frenleyen ve hızlanan tren seti, frenleme-hızlanma senkronize grubu (FHsG) olarak tanımlanmıştır. Frenleme ve hızlanmanın örtüşme süresi, frenleme-hızlanma senkronize süresi (FHsS) olarak tanımlanmıştır.
- Hızlanma-Hızlanma Senkronizasyonu: Aynı elektrik bölgesindeki iki tren aynı anda hızlandığında, transformatör merkezi yükü artmakta ve katener gerilimi düşmektedir. Bu senkronizasyon arzu edilmeyen durumdur ve amaç fonksiyonu buna göre tasarlanmıştır. Hızlanan trenlerin seti, hızlanma-hızlanma senkronize grup (HHsG) olarak tanımlanmıştır. Bu tren grubunun birbiri ile etkileşim süresi ise, hızlanma-hızlanma senkronize süresi (HHsS) olarak tanımlanmıştır.
- Frenleme-Frenleme Senkronizasyonu: Aynı elektrik bölgesinde hızlanan herhangi bir tren yoksa iki trenin aynı anda frenleme fazında olmaması istenmiştir. Bunun sebebi, frenleme nedeniyle katener hattına rejeneratif enerji verilmekte ve bu enerji de hızlanan bir tren olmadığı için kullanılmadığından, katener voltajı yükselmekte ve devre kesiciyi açtırmaktadır. Bu durum, frenleme-frenleme senkronize grubu (FFsG) olarak tanımlanmıştır. Etkileşim süresi ise frenleme-frenleme senkronize süresi (FFsS) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.7 RFE kullanımının artırılması

Önerilen zaman çizelgesi optimizasyonu, sistem bazında genel bir enerji tasarrufu elde etmek için FHsG ve FHsS'yi arttırmayı, transformatör yükünü azaltmak için HHsG ve HHsS'yi ise en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Diğer bir amaç ise katener geriliminin aşırı yükselmemesi için FFsG ve FFsS'yi en aza indirmektir.

Bu çalışmada, optimum zaman çizelgesi, frenleme ve hızlanma senkronizasyonu arasında bir uzlaşma elde etmek için sabit bir toplam seyahat süresi ve istasyonlarda bekleme süresi ile en iyi istasyonlar arası seyahat süresi (IT) ve trenler arası sefer süresini (headway-Hw) bulmayı amaçlamıştır. İstenilen senkronize süreyi (HHsS) maksimize etmeyi hedefleyen amaç fonksiyonu denklem (6.4)'teki gibi tanımlanmıştır.

$$
\begin{cases}
\max \quad \mathrm{TSS_{opt}} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{FHsGn}} (\mathrm{FHsS}_i \, x \, \omega_{\mathrm{FHsS}}) - \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{HHsGn}} (\mathrm{HHsS_j} \, x \, \omega_{\mathrm{HHsS}}) \\
\qquad\qquad - \sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{FFsGn}} (\mathrm{FFsS}_k \, x \, \omega_{\mathrm{FFsS}}) \\
[\mathrm{FHsGn}, \mathrm{FHsS}_{set}, HHsGn, \mathrm{HHsS}_{set}, FFsGn, \mathrm{FFsS}_{set}] = f(IT_{set}, TSS_{set}) \\
\omega_{\mathrm{FHsS}} = \left(\frac{\mathrm{sn}}{|\mathrm{sn}_{T1} - \mathrm{sn}_{T2}|}\right) \quad Tren\ T1\ fren\ yaparken \\
\qquad\qquad ve\ Tren\ T2\ hızlanırken \\
\omega_{\mathrm{HHsS}} = \left(\frac{\mathrm{sn}}{|\mathrm{sn}_{T1} - \mathrm{sn}_{T2}|}\right) \quad Tren\ T1\ ve\ Tren\ T2'nin\ her\ ikisi\ de \\
\qquad\qquad hızlanırken \\
\omega_{\mathrm{FFsS}} = \left(\frac{\mathrm{sn}}{|\mathrm{sn}_{T1} - \mathrm{sn}_{T2}|}\right) \quad Tren\ T1\ ve\ Tren\ T2'nin\ her\ ikisi\ de \\
\qquad\qquad frenlerken
\end{cases}
\tag{6.4}
$$

Burada, $\mathrm{TSS_{opt}}$ maksimum olması gereken toplam senkronize edilmiş süreyi belirtmektedir. FHsGn, HHsGn ve FFsGn sırasıyla frenleme-hızlanma, hızlanma-hızlanma ve frenleme-frenleme senkronize tren gruplarının miktarını temsil etmektedir. sn_{T1} ve sn_{T2}, sırasıyla Tren T1 ve Tren T2'nin yaklaştığı ve kalktığı istasyonu tanımlamaktadır. ω_{FHsS}, ω_{HHsS} ve ω_{FFsS} ise FHsS, HHsS ve FFsS ile ilgili ağırlıklandırmaları göstermektedir. Algoritma tarafından her sete atanan ağırlıklar, senkronize trenlerin birbirinden ne kadar uzakta olduğuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, trenler arası mesafe fazla ise daha küçük bir ağırlık belirlenecektir. Ancak, tüm bu hesaplamalar, trenlerin aynı elektrik bölgesinde olması durumunda geçerli olacaktır. Eğer, trenler aynı elektrik bölgesinde değilse hiç bir tren arasında etkileşim olmayacak ve RFE kullanımı sıfır olarak hesaplanacaktır. Bu çalışma için, iki tren arasındaki mesafe maksimum 700 metre ise, bu iki tren mevcut hareket modlarına göre birbirleriyle etkileşime girebilmektedir. Dolayısıyla, birbirine 700 metreden fazla mesafede olan iki tren için RFE paylaşımı söz konusu değildir.

Denklem 6.5'te yolculuk süresi ve kısıtlamalar gösterilmiştir:

$$\begin{cases} T_{sj} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{sn}} (\mathrm{IT_i}), \;\; if\ |\mathrm{IT_i} - \mathrm{IT_{si}}| \in [0, \mathrm{IT}_r] \\ T_D = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{tn}} (\mathrm{T}_{sj} + \mathrm{Hw_i}), if\ |\mathrm{Hw_i} - \mathrm{Hw_{si}}| \in [0, \mathrm{Hw}_r] \\ \quad where\ T_D = T_{SD}, \qquad \mathrm{Hw} \geq Hw_{min} \end{cases} \tag{6.5}$$

Burada, tn, M3 metro hattında 18 saatlik çalışma periyodunda tam gün sefer yapan tren sayısını belirtmektedir. T_D ve T_{SD} sırasıyla simüle edilmiş günlük yolculuk süresini ve planlanan günlük yolculuk süresini temsil etmektedir. T_{sj} bir trenin istasyonlar arasındaki yolculuk süresini göstermektedir. $\mathrm{Hw_s}$ planlanmış trenler arası sefer süresi (headway), Hw_r önceden planlanmış headway ile optimal headway zamanı arasındaki izin verilen en büyük fark ve Hw_{min} ise iki tren arasındaki en düşük headway süresine karşılık gelmektedir.

Denklem (6.5)'te verildiği gibi, zaman çizelgesinin yeniden programlanmasının etkilerini azaltmak (günlük sefere çıkan tren sayısının artması/azalması, toplam seyahat süresinin artması/azalması vb. gibi) amacıyla, istasyonlar arasındaki seyahat süreleri ve trenler arası sefer süreleri sırasıyla IT_r ve Hw_r varyasyonları ile

sınırlandırılmıştır. Yani bu varyasyonlar, istayonlar arası seyahat sürelerinin ve headway sürelerinin belirli limitler dahilinde değişimine izin verir. Bu çalışmada, IT_r ± 5 sn ile Hw_r'de pik olan saatlerde ±30 sn, pik olmayan saatlerde ise ±40 sn aralığında değişiklik ile (toplam seyahat süresi ve işletme altındaki tren sayısı sabit kalmak şartıyla) zaman çizelgesinin yeniden programlanmasına (optimize edilmesine) olanak sağlanmıştır.

6.5.3 Entegre Optimizasyon Süreci

Hem hız profili hem de zaman çizelgesi optimizasyonunun büyük ölçüde istasyonlar arası seyahat süresine bağlı olduğunu vurgulamak önem arz etmektedir. Bu nedenle, bu iki optimizasyon hedefinin entegre bir optimizasyon olarak eşzamanlı bir şekilde yürütülmesi sağlanmıştır. Bu tez çalışmasındaki entegre optimizasyon, cer transformatörü merkezindeki günük enerji kullanımını en aza indirmek için optimal istasyonlar arası yolculuk sürelerini, trenler arası sefer sürelerini ve hareket modu sırasını bulmayı hedeflemiştir. Toplam yolculuk süresi ile istasyonlarda bekleme süreleri, mevcut zaman çizelgesinde olduğu gibi alınmış ve sabit kabul edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen uygunluk fonksiyonlarının formülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$\begin{cases} \min \quad \mathrm{E}_D = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{tn}} (\mathrm{E}_{SJi} - \mathrm{E}_{Reg}) \\ T_D = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{tn}} (\mathrm{T}_{sj} + \mathrm{Hw_i}), if\ |\mathrm{Hw_i} - \mathrm{Hw_{si}}| \in [0, \mathrm{Hw}_r] \\ \qquad where\ T_D = T_{SD}, \qquad \mathrm{Hw} \geq Hw_{min} \\ [\mathrm{IT}, E_{it}] = g(MHG, SHG, BG, FR) \rightarrow OPThızprofili \\ [\mathrm{FHsGn}, \mathrm{FHsS}_{set}, HHsGn, \mathrm{HHsS}_{set}, FFsGn, \mathrm{FFsS}_{set}] = \\ \qquad f'\left(IT_{set}, TSS_{set}, \mathrm{E}_{SJ}, HFS\right), IT \in OPTD_{profil}) \end{cases} \tag{6.6}$$

Burada, E_{Reg}, tek bir trenin etkili (diğer hızlanan trenler tarafından kullanılabilen) rejeneratif frenleme enerjisini temsil etmektedir. Zaman çizelgesi ve tren hız profili optimizasyonu süreçleri sırasıyla g ve f' fonksiyonlarıyla temsil edilmiştir. Kısıtlamalar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$
\begin{cases}
\mathrm{E_{SJ}} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{sn}} \left(\int_{0}^{\mathrm{IT_i}} \mathrm{F_c(t).v(t)} + \int_{0}^{\mathrm{IT_i}} \mathrm{F_c(t).v_{SHG}(t)} \right) dt \\
T_{sj} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{sn}} (\mathrm{IT_i}), \;\; if \; |\mathrm{IT_i} - \mathrm{IT_{si}}| \in [0, \mathrm{IT}_r], IT \in OPTD_{profil} \\
E_{reg} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{FHsGn}} \left(\int_{0}^{\mathrm{FHsS_i}} E_{RFE} \mathrm{dt} \right) \\
\mathrm{TSS} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{FHsGn}} (\mathrm{FHsS}_i \; x \; \mathrm{w_{FHsS}}) - \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{HHsGn}} (\mathrm{HHsS_j} \; x \; \mathrm{w_{HHsS}}) \\
\qquad\qquad - \sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{FFsGn}} (\mathrm{FFsS}_k \; x \; \mathrm{w_{FFsS}})
\end{cases}
\tag{6.7}
$$

Burada $OPTD_{profil}$ tren hız profili optimizasyonu işlemi tarafından geliştirilen bir veri kümesidir. Veri kümesi (D-Data), istasyonlar arasındaki her uygulanabilir seyahat süresi için (toplam seyahat süresinin değişmemesi şartıyla, istasyonlar arasında belirlenen seyahat süresinden ± 5 sn aralığında) her bir istasyon aralığındaki en iyi hız profili sonuçlarını içermektedir (M3 metro hattında 9 istasyon vardır, yani yukarı yön için 8 istasyon arası, aşağı yön için de aynı şekilde).

Çalışmada optimum tren hız profilini, istasyonlar arası seyahat süresini (IT) ve trenler arası sefer süresini (Hw) bulmak için tren hız profili ile zaman çizelgesi optimizasyonu entegre bir şekilde ele alınmıştır. Ancak, iki optimizasyon arasındaki güçlü ilişki nedeniyle, tren hız profili optimizasyonunun, daha sonra zaman çizelgesi optimizasyonunda kullanılmak üzere, tüm uygulanabilir hız profili çıktılarını ürettiğinden emin olmak önemlidir. Bu sebeple ilk olarak, istasyonlar arasındaki her yolculuk için en iyi hız profili sonucu belirlenmiş ve olası her istasyonlar arası seyahat süresi için hız profili çıktıları bir veri setinde tutulmuştur. İkinci olarak, trenlerin zamanlama örtüşmesinin etkinliği ve oluşturulan Veri Kümesi'nden elde edilen bulgular dikkate alınarak optimum bir zaman çizelgesi oluşturulmuştur. Son olarak, ilişkili en iyi hız profili ve optimal zaman çizelgesi, trenin günlük hareketini ve sistem enerji kullanımını belirlemek için kullanılmıştır.

Bu entegre amaca ulaşmak için, öncelikle hız profili optimizasyonunda bir GA yaklaşımı kullanılmıştır. Optimizasyon süreci ile ilgili bilgiler şu şekilde sunulmuştur:

1. Denklem (6), mümkün olan tüm çözümleri (HFS) kullanarak trenin cer enerjisi kullanımını ve seyahat süresini hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuçlar, hareket modu sıralarıyla birlikte veritabanında ($OPTD_{profil}$) tutulmuştur,
2. Bu aşamada, her potansiyel istasyonlar arası yolculuk süresi ile seyahat eden bir tren için, her istasyonlar arasındaki en iyi hareket fazı sırası (HFS) aranmıştır. Veritabanının çözümleri önce seyahat süresine göre, ardından enerji kullanımına göre sıralanmıştır. Aşağıdaki durumlarda $OPTD_{profil}$'ın σ kadar çözümü olduğunu varsayalım:

$$\mathrm{E_{it\Upsilon}} \geq \mathrm{E_{it\Upsilon-1}} \text{ and } \mathrm{IT_{\Upsilon}} = \mathrm{IT_{\Upsilon-1}},\ \Upsilon \in \sigma \tag{6.8}$$

Burada Υ bir olası çözümü temsil etmektedir. Denkelem 6.8'ye göre Υ çözümü, $\mathrm{IT_{\Upsilon}}$ istasyonları arasındaki seyahat süresi ve enerji tüketimi açısından en iyisi olmadığından dolayı reddedilecektir. Çünkü, Υ çözümündeki enerji tüketimi, bir önceki $(\Upsilon - 1)$ çözümde elde edilen tüketimden büyük veya eşittir.

3. İstasyonlar arasındaki her olası seyahat süresi için önceki adımdan sonra yalnızca en iyi seçenek tutulmuştur. Entegre optimizasyon sürecinin ikinci aşaması olan zaman çizelgesi optimizasyonu, veritabanının uygulanmasını içerecektir.

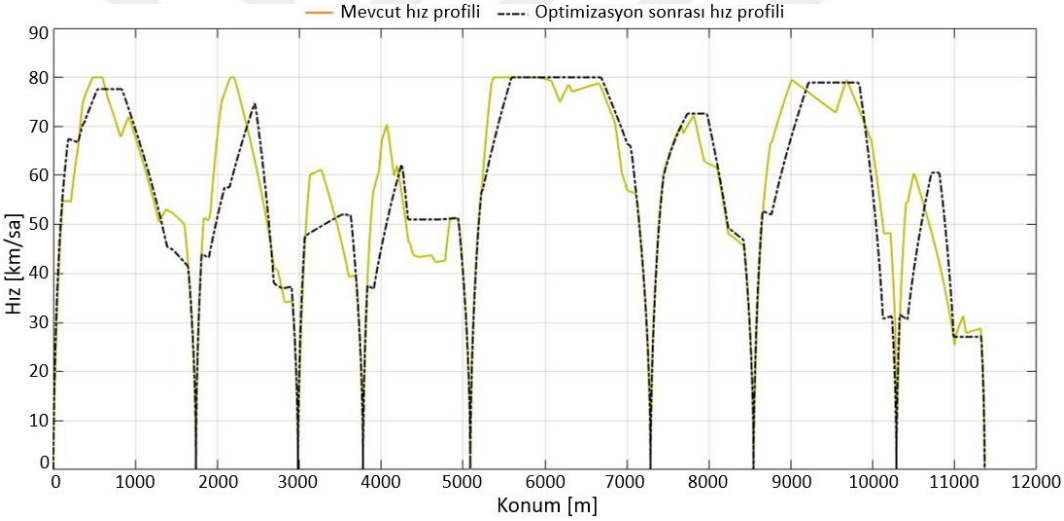
SA algoritması, en iyi çözümleri elde ederek zaman çizelgesini iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır. Algoritma aşağıda belirtildiği gibi çalışmaktadır:

1. İstasyonlar arasındaki seyahat süresi seti (IT) ve trenler arası sefer süresi (Hw) kullanılarak çoklu tren simülasyonu için tam günlük bir zaman çizelgesi oluşturulmuştur.
2. İstasyonlar arasındaki seyahat süresi, $OPTD_{profil}$'inden ilgili en iyi hareket fazı sırasını (HFS) ve enerji kullanımını ($\mathrm{E_{SJ}}$) aramak için eşzamanlı olarak kullanılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi arama çıktıları çoklu tren hareket simülatörüne (ÇTHS) girilmiştir.
3. Çoklu tren hareket simülatörü her bir seçenek için FHsG, FHsS, HHsG HHsS, FFsG FFsS ve RFE'yi hesaplamıştır. Daha sonra Denklem (6.6) bir uygunluk fonksiyonu olarak kullanarak cer transformatör merkezinin günlük enerji tüketimi ($\mathrm{E_D}$) belirlenmiştir.

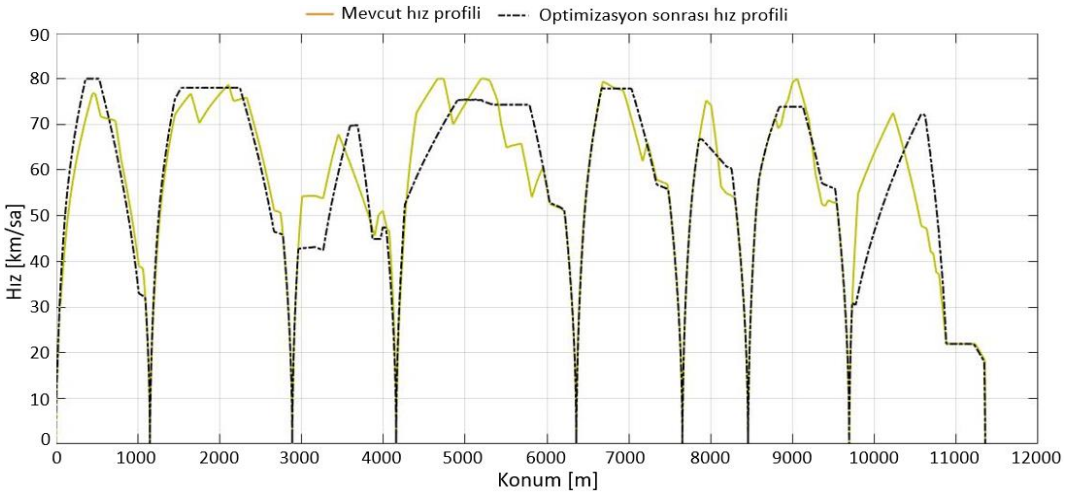
6.5.4 Optimize Edilmiş Zaman Çizelgesi Çıktıları

Zaman çizelgesi optimizasyonu bir vaka çalışması olarak M3 metro hattının verileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde çift yön (M-K ve K-M) olmak üzere geliş-gidiş doğrultuları dikkate alınmıştır.

Bir önceki bölümde açıklanan ve bu tez çalışması kapsamında geliştirilen entegre optimizasyon yöntemi kullanılarak, optimize edilmiş yeni tren hız profili ve zaman çizelgesi üretilmiştir. Optimal tren hız profili, enerji kullanımını azaltmak için BG modundan yararlanmış ve BG mesafesini mümkün olduğu kadar uzatmıştır. Optimizasyonunda, toplam seyahat süresinin sabit kalması şartıyla, maksimum istasyonlar arası seyahat süresi değişimi (IT_r) olarak ± 5 sn olarak alınmıştır. Her iki yön olan Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent için, mevcut ve optimal yeni hız profilleri, Şekil 6.8 ve 6.9'da hız-konum olarak paylaşılmıştır.



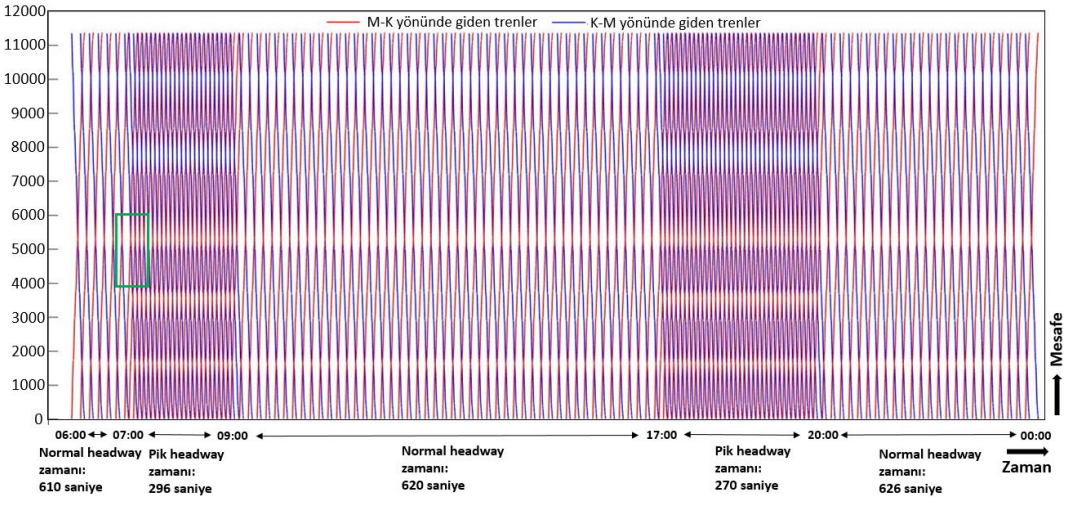
Şekil 6.8 Metrokent-Kirazlı istasyonları arasında mevcut hız profili ve optimum hız profili hız-konum grafiği



Şekil 6.9 Kirazlı- Metrokent istasyonları arasında mevcut hız profili ve optimum hız profili hız-konum grafiği

Şekil 6.8 ve 6.9, toplam seyahat süresi sabit kalmak şartıyla (istasyonda bekleme süreleri hariç, Metroken-Kirazlı yönü için 875 sn ve Kirazlı Metrokent yönü için 884 sn), rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum faydalanma durumunu dikkate alarak, istasyonlar arası toplam seyahat süresinin optimal bir şekilde dağıtılmasıyla elde edilen yeni hız profili bilgilerini göstermektedir.

Şekil 6.10'da entegre optimizasyon süreci sonunda ulaşılan optimum zaman çizelgesi gösterilmiştir. Bu çizelge üzerinde kırmızı çizgiler ile Metrokent-Kirazlı yönünde hareket eden trenler ve mavi çizgi ile de Kirazlı-Metrokent yönünde hareket eden trenler temsil edilmiştir. Çizelgede gösterildiği gibi, tek yön yolculuk süresi, istasyonlarda bekleme süresi ve işletme altında çalışan toplam tren sayısı, işletme kısıtlamaları, aşılmamış olup aynı kalmıştır.



Şekil 6.10 M3 metro hattının optimize edilmiş zaman çizelgesi

Tablo 6.6'da, mevcut ve optimum zaman çizelgeleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu vaka incelemesinde, headway'in maksimum değişimi (Hwr), yoğun saatler için 30 saniye ve yoğun olmayan saatler için 40 saniye olarak ayarlanmıştır.

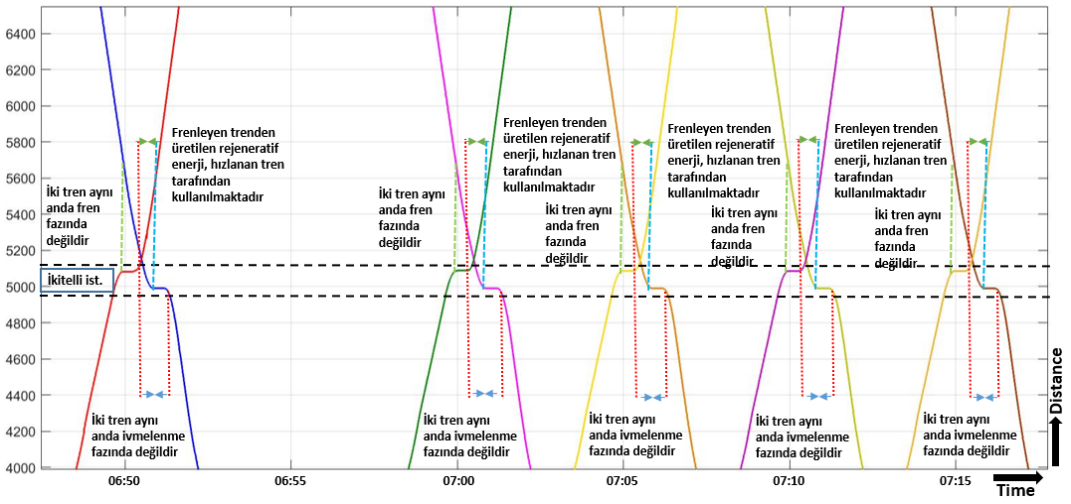
Tablo 6.6 Mevcut zaman çizelgesi genel bilgileri

Istasyon adı	**Mevcut seyahat süresi (sn)**	**Optimizasyon sonrası sehayat süresi (sn)**
Metrokent-Başakkonutları	119.50	121.50
Başakkonutları-Siteler	100.00	98.25
Siteler-Turgut Özal	73.00	72.75
Turgut Özal-İkitelli Sanayi	110.50	109.50
İkitelli Sanayi-İstoç	125.00	125.00
İstoç-Mahmutbey	91.50	93.50
Mahmutbey-Yenimahalle	117.50	116.50
Yenimahalle-Kirazlı	138.00	138.00
Kirazlı-Yenimahalle	91.00	92.00
Yenimahalle-Mahmutbey	114.75	117.50
Mahmutbey-İstoç	107.75	105.75
İstoç-İkitelli Sanayi	140.50	139.75
İkitelli Sanayi-Turgut Özal	89.50	89.75

Tablo 6.6 Mevcut zaman çizelgesi genel bilgileri (devamı)

Istasyon adı	**Mevcut seyahat süresi (sn)**	**Optimizasyon sonrası sehayat süresi (sn)**
Turgut Özal-Siteler	67.50	67.50
Siteler-Başakkonutları	89.00	90.25
Başakkonutları-Metrokent	184.00	181.50
Metrokent-Kirazlı yönü yolculuk süresi	876	876
Kirazlı- Metrokent yönü yolculuk süresi	886	886
Bekleme süresi (dwell time)	180	180
Headway (06:00 to 07:00)	600	610
Headway (07:00 to 09:00)	300	296
Headway (09:00 to 17:00)	600	620
Headway (17:00 to 20:00)	300	270
Headway (20:00 to 00:00)	600	626
Günlük işletmedeki toplam tren sayısı	139	139

Şekil 6.11’de, Şekil 6.10'daki yeşil dikdörtgen içine alınmış parça daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu alanda, optimize edilmiş zaman çizelgesiyle, 06:50 - 07:15 saatleri arasında İkitelli Sanayi istasyonu yakınındaki tren hareketleri gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Optimize edilmiş zaman çizelgesi detay gösterimi

Tanımlanan amaç fonksiyonları, Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, zaman çizelgesi optimizasyonu ile karşılanmıştır. Zaman çizelgesi optimizasyonu hedeflerinden Frenleyen-Hızlanan trenlerin senkronize süresi artarken, Hızlanma-Hızlanma senkronizasyonu ise amaçlandığı gibi azalmıştır. Algoritma amaç fonksiyonu gereksinimlerini karşılamaya çalışırken, önem ağırlığı diğerlerine göre daha az olan Frenleme-Frenleme süresini çok az bir miktar artırmıştır.

Tablo 6.7'ye göre, optimum zaman çizelgesinin kullanılması, frenleme-hızlanma tren gruplarının miktarını 393'ten 427'ye yükseltmiş ve genel frenleme-hızlanma senkronize süresini %81,8 artırmıştır. Toplam hızlanma-hızlanma senkronize süresi %47,62 oranında düşürülmüştür. Ayrıca hızlanma-hızlanma tren grubu sayısı da 14'ten 11'e azaltılmıştır. Öte yandan, frenleme-frenleme senkron grupları 18'den 21'e çıkarak senkronizasyon süresini -%6,06 artırmıştır.

Tablo 6.7 Optimize edilmiş zaman çizelgesi sonuçları

Senkronize grup ve süreler	**Mevcut (optimize edilmemiş) zaman çizelgesi**	**Optimal Zaman çizelgesi**
Toplam frenleme-hızlanma senkronize süresi (sn) (FHsS)	1302,00	2367,00

Tablo 6.7 Optimize edilmiş zaman çizelgesi sonuçları (devamı)

Senkronize grup ve süreler	Mevcut (optimize edilmemiş) zaman çizelgesi	Optimal Zaman çizelgesi
Toplam frenleme-hızlanma senkronize grup sayısı (FHsG)	393,00	427,00
Toplam hızlanma - hızlanma senkronize zamanı (sn) (HHsS)	52,50	27,50
Toplam hızlanma-hızlanma senkronize grup sayısı (HHsG)	14,00	11,00
Toplam frenleme-frenleme senkronize zamanı (sn) (FFsS)	49,50	52,50
Toplam frenleme-frenleme senkronize grup sayısı (FFsG)	18,00	21,00

6.6 Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, İstanbul metro işletmesinin toplam cer elektrik enerjisi kullanımını azaltmak için M3 metro hattı gerçek parametreleri alınarak entegre bir zaman çizelgesi optimizasyon tekniği geliştirilmiştir. Önerilen prosedürün ilk aşamasında, M3 metro hattının gerçek çalışma koşulları dikkate alınarak tek bir trenin hız profili optimize edilmiştir. İkinci aşamada, birinci aşamada elde edilen hız profili ile hareket eden çoklu trenler dikkate alınarak zaman çizelgesi optimizasyonu yapılmıştır. Rejeneratif frenleme enerjisinin etkin kullanımının artırılmasına ek olarak çeşitli amaç fonksiyonları tanımlanmış ve entegre bir operasyonel iyileştirme yapılmıştır.

Tablo 6.8, vaka çalışmasından elde edilen genel sonuçları göstermektedir.

Tablo 6.8 Optimizasyonlu ve optimizasyonsuz tren işletim sonuçları

Karşılaştırma	Toplam günlük cer enerjisi tüketimi (kWh)	Günlük işletmede üretilen toplam RFE (kWh)	Günlük işletmede hızlanan trenler tarafından etkin bir şekilde kullanılabilen toplam RFE (kWh)	Günlük işletmede nihai toplam enerji tüketimi (kWh)
Mevcut işletme durumu	28.688,21	6.021,48	824.27	27.863,94
Sadece hız profili optimizasyonlu durum	21.835,51	5.846,34	795.08	21.040,43 (-%24.49)
Entegre (zaman çizelgesi+hız profili) optimizasyonlu durum	21.881,38	5.956,15	1.344,13	20.537,25 (-%26.29)

Tablo 6.8'de gösterildiği gibi, mevcut işletme durumuna kıyasla hız profili optimize edilmiş durumda %24,49'luk enerji verimliliği elde edilmiştir. Entegre optimizasyonlu durumda, frenleyen trenlerden üretilen RFE'nin hızlanan trenler tarafından kullanım oranı arttıkça verimlilik oranı da artarak %26,29'a yükselmiştir. Hız profili optimize edilmiş durumla karşılaştırıldığında, entegre optimize edilmiş durumda, hızlanan trenler tarafından etkin bir şekilde kullanılabilen RFE, %69,06 artarak 795,08 kWh'den 1344,13 kWh'ye yükselmiş ve genel enerji verimliliği %1,8 artmıştır.

Zaman çizelgesi optimizasyonu sonrasında elde edilen verilerle bir raylı sistemin işletilebilmesi için günlük tren sayısının aynı kalması gerekmektedir. Bu çalışmada, mevcut durum korunmuştur. İşletme altında çalışan tren sayılarına ilişkin detaylı bilgi Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9 Headwayl'lere göre işletme altındaki tren sayısı

Zaman aralığı	**Mevcut (optimizasyon olmadan) zaman çizelgesi**	**Optimize edilmiş zaman çizelgesi**
06:00-07:00	7.00	7.00
07:00-09:00	24.00	25.00
09:00-17:00	48.00	47.00
17:00-20:00	36.00	38.00
20:00-00:00	24.00	22.00
Toplam tren sayısı	139.00	139.00

Tablo 6.9'da günlük işletmede çeşitli zaman aralıklarındaki servis sayıları verilmiştir. Buna bağlı olarak optimum sefer tarifesi ile pik saatlerde (07:00-09:00 ve 17:00-20:00) sefer sayısı artırılarak yolcuların istasyonlarda bekleme süreleri kısalmış ve yolcu konforu bu bağlamda artırılmıştır.

7
TARTIŞMA

Ulaşımda önemli bir rol oynayan raylı sistemler, yüksek hacim, güvenlik ve enerji verimliliği açısından diğer ulaşım türlerine göre daha üstün bir performans sergilemektedir. Enerji tasarrufu sağlayan bir model olmasına rağmen demiryolu taşımacılığı her gün çok fazla enerji harcamaktadır. Raylı sistemlerde kullanılan enerji dağılımı metro ve tramvay hatlarında farklılık göstermekle birlikte en yüksek tüketim, trenleri hareket ettirmek için çekiş motorlarında kullanılan cer enerjisidir.

Bu tez çalışmasında, cer enerjisi tüketimini en aza indirmek amacıyla, hız profili optimizasyonu yöntemi benimsenmiş ve trenlerin belirli güzergahı boyunca uyacakları optimal hareket modu sırası ve konumları belirlenmiştir. Ayrıca, sistem bazında enerji verimliliği sağlamak amacıyla entegre bir optimizasyon yaklaşımı ile istasyonlar arası hız profili ve zaman çizelgesi eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Böylece, hem trenlerin sürüşü sırasındaki enerji tüketimi minimize edilirken aynı zamanda frenleyen trenlerden üretilen rejeneratif enerji de etkin bir şekilde değerlendirilmiş ve genel enerji tüketimi büyük ölçüde azaltılmıştır.

Tren hareketinin enerji verimliliği optimizasyonu problemini çözebilmek için, öncelikle gerçek bir trenin hareketini yüksek doğruluk oranı ile benzetebilen bir simülatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında öncelikle, tren hareketinin dinamik modeline dayanan bir benzetim yazılımı (THS) geliştirilmiş ve saha testleri yoluyla doğrulanmıştır. Geliştirilen THS, tren hareketine ait anlık ivme, hız, konum, elektriksel güç, mekanik güç, seyahat süresi ve seyahat süresi boyunca tüketilen enerji gibi çeşitli çıktıları sunmaktadır. Geliştirilen THS'den yararlanılarak cer enerjisi tüketiminin en aza indirgenmesi problemi, farklı optimizasyon yöntemlerinden faydalanılarak çözülmüştür. Trenin enerji tasarruflu sürüşü amacıyla en ideal stratejiye ait hareket modları (maksimum hızda gitme, sabit hızda gitme, boşta gitme ve frenleme fazları) tanımlanmış ve bu fazların sırası ile optimal geçiş noktaları 4 farklı optimizasyon yöntemi, GA, SA, PSO ve MPA, kullanılarak bulunmuştur. Ardından, THS ortamında elde edilen optimal hız profilleri ile M3 metro hattında bir tren sürülmüştür. Gerçek saha testlerinin sonuçları, algoritmaların ve THS'nin etkinliğini doğrulamıştır. Son olarak, sistem bazında entegre bir enerji verimliliği elde edebilmek için rejeneratif frenleme

enerjisinden de maksimum fayda elde etmeyi amaçlayan bir model geliştirilmiştir. Bu amaçla, bir hat üzerindeki çok sayıda trenin koordinasyonunu sağlayabilecek, hareket sürelerini ve enerji tüketimlerini değerlendirebilecek bir benzetim yazılımı (ÇTHS) geliştirilmiştir. Entegre optimizasyon modeli birbirine bağlı iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, trenin hız profili ve istasyonlar arası sefer süreleri GA yöntemi ile optimize edilmiştir. Çalışmada GA yönteminin tercih edilmesinin sebebi, hız profili optimizasyonu konusunda birçok literatür tarafından tercih edilmesi ve başarılı sonuçlar elde ettiğinin kanıtlanmış olmasıdır. Ayrıca, GA yönteminin bu tür optimizasyon problemlerine çözüm arama noktasında uygulaması da kolaydır. İkinci aşamada ise, birinci aşamanın çıktıları kullanılarak, SA algoritması ile trenler arası sefer süreleri optimize edilmiştir. SA yöntemi de, zaman çizelgesi optimizasyonu konusunda birçok çalışmada tercih edilerek etkinliği kanıtlanmıştır. Buna ek olarak, iyi bir başlangıç değeriyle optimale yakın sonuçlar verdiği bilinmektedir. Entegre optimizasyon probleminin çözüm sürecinde GA'nın çıktıları SA'da girdi olarak kullanıldığı için birbirliye tam uyumlu iki yöntem olarak çalışmaktadır. Böylece, hızlanan ve frenleyen trenlerin örtüşme süreleri artırılmış ve rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum seviyede fayda elde edilmiştir. M3 metro hattının verilerine dayanan bu vaka çalışmasının simülasyon sonuçları, geliştirilen entegre optimizasyon modelinin etkinliğini doğrulamıştır.

Bu bölümün devamında öncelikle tek bir tren hareketi için geliştirilen benzetim yazılımına özgün bilgiler sunulmuştur. Bu yazılım tez çalışmasının devamında gerçekleştirilen hız profili optimizasyonu için zorunludur ve mümkün olduğu kadar gerçek tren hareketlerini doğru benzetebilmesi önemlidir. Ardından GA, SA, MPA ve PSO algoritmaları ile istasyonlar arası hız profilleri optimizasyonu sonuçları karşılaştırılarak tartışılmıştır. Son olarak, tez çalışması kapsamında geliştirilen çoklu tren hareketlerinin analizine olanak sağlayan benzetim yazılımına özgün bilgiler sunulmuştur. Bu yazılım kullanılarak gerçekleştirilen entegre enerji optimizasyonu sonuçları hakkında tartışılmıştır.

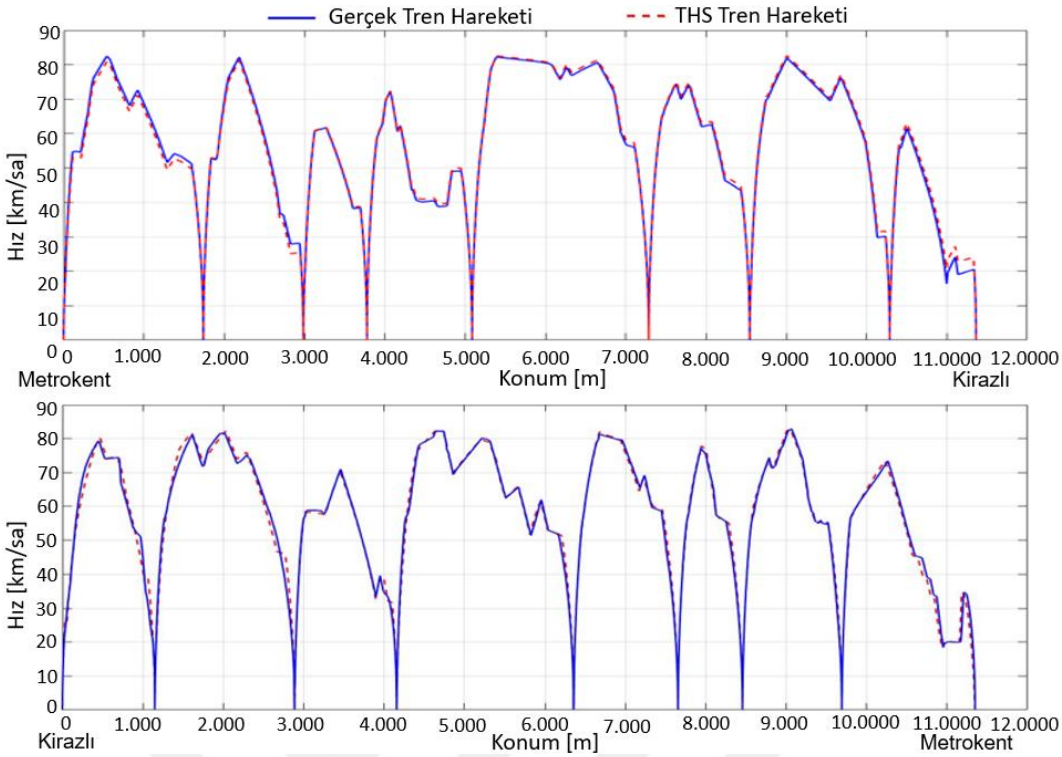
7.1 Tren Hareket Simülatörü

Tren hareketinin gerçeğe en yakın simülasyonunu gerçekleştirebilmek için öncelikle demiryolu güzergahının iniş-çıkışlı bölgeleri, virajlı kısımları, tünel

bölgeleri ve hattaki hız limiti bilgilerinin en doğru şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Ardından, bu hat üzerinde hareket eden trenin cer kuvveti eğrisi, frenleme kuvveti eğrisi, elektriksel güç bilgisi, ağırlığı, temel hareket direnci bilgileri (A, B, C parametreleri) gibi trene özgü temel özellikler belirlenmelidir. Bu tez çalışmasında geliştirilen THS için ilgili veriler Metro İstanbul şirketinden temin edilmiştir. Gerçek raylı sisteme ait verilerin kullanılması, hem doğru modelleme yapabilme hem de saha testleri yoluyla simülatörün kalibrasyonunun yapılmasına ve doğruluğunun ölçülmesine imkan tanımıştır.

Geliştirilen tren hareket simülatörü gradyan direnci, kavis direnci, tünel direnci, temel hareket direnci ve hattaki hız kısıtlamalarını dikkate almaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada kavis direnci ve tünel direnci, yeterli veri olmaması veya önemsenmemesi sebebi ile, dikkate alınmamıştır. Ayrıca, önerilen modellerin doğruluğu bir çok çalışmada, gerçek trenler ile test imkanı olmaması sebebi ile yapılmamıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen THS'nin en önemli katkısı ve özgünlüğü, modelin gerçek bir metro hattı üzerinde doğrulanması ile ilgili tüm işletmesel kısıtlamaları ve direnç değerlerini dikkate almasıdır. Ayrıca sahada gerçek trenler kullanılarak, hızlanma, frenleme ve boşta gitme testleri yoluyla, temel hareket direncinin temel bileşenleri olan A, B ve C parametrelerinin ideal değerlerini belirleyerek THS'nin kalibrasyonunu yapma imkanı elde edilmiştir.

M3 metro hattında, gece işletmenin yapılmadığı saat aralığında, makinist eşliğinde bir tren, güncel işletme altında olduğu gibi Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istasyonları arsında sürülmüştür. Sürüş sonunda, her bir istasyon aralığındaki hareket modları (MGG, SHG, BG ve FR) ve bu modların kaçar metre boyunca uygulandığı bilgileri araç bilgisayarına bir dizüstü bilgisayar ile bağlanılarak alınmıştır. Aynı hareket modu dizisi ile THS ortamında da bir tren sürüş simülasyonu yapılmıştır. Şekil 7.1'de Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında THS ve gerçek hat üzerinde hareket eden trenin hız-konum grafiği verilmiştir.



Şekil 7.1 M3 metrosu gidiş-dönüş hattı üzerinde THS ve gerçek tren hareketi karşılaştırılması

THS ortamında hareket eden tren ile gerçek tren hareketi, Şekil 7.1 hız-konum grafiğinde görüldüğü gibi birbirine oldukça yakındır. Simülasyon ve gerçek tren karşılaştırılması sadece hız-konum mukayesesi ile kalmamış olup diğer önemli parametreler açısından da (hareket süresi, enerji tüketimi ve rejeneratif frenleme enerjisi) değerlendirilmiştir. Tablo 7.1'de, geliştirilen tren hareket simülatörünün gerçek tren hareketini ne ölçüde benzetebildiğinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Tablo 7.1 Tam bir rota için THS ve gerçek tren hareketi karşılaştırması

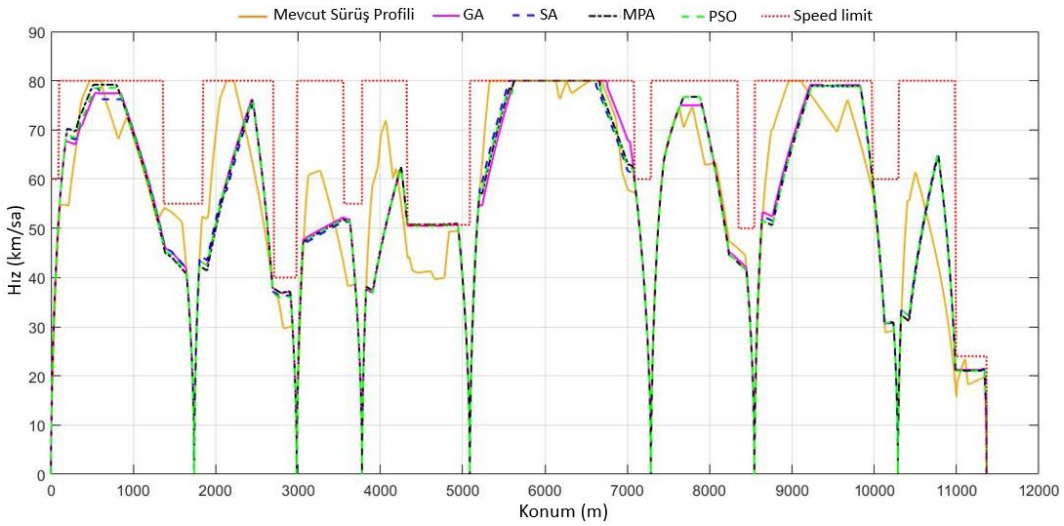
Gidiş-dönüş yolculuğu karşılaştırması	**Gerçek tren hareketi**	**THS**	**Hata oranı (%)**
Toplam hareket süresi (sn)	1755,00	1738,25	0,95
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	207,51	206,39	0,54
Toplam rejeneratif enerji (kWsa)	33,70	34,92	-3,62

Geliştirilen THS, gerçek bir treni seyahat süresi açısından %99,05, enerji tüketimi açısından %99,46 ve rejeneratif frenleme enerjisi açısından ise %96,38 oranında doğru benzetebilmiştir. Literatürdeki çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, geliştirilen tren hareketi simülatörlerinin gerçek saha ile karşılaştırılarak ne ölçüde doğru benzetim yapabildikleri paylaşılmamıştır. THS doğruluğunun saha testleri yoluyla yapıldığı ve incelenen literatürde görülen en iyi sonuçlu çalışmada hareket süresi açısından %99,50 ve enerji tüketimi açısından ise %97,50 oranında başarı sağlandığı belirtilmiştir [1]. Bu çalışmada rejeneratif frenleme enerjisi açısından bir değerlendirme yapılmamıştır.

Yeni raylı sistem hatlarının tasarımı aşamasında, trenlerin hareketi sırasındaki anlık güç talepleri, enerji tüketimleri, seyahat süreleri, rejeneratif frenleme enerjisi değerleri gibi bilgilerin simülasyon ortamında elde edilmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, enerji verimliliği için gerçekleştirilecek çeşitli optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesi için, doğru sonuçlar veren THS'ye ihtiyaç duyulmaktadır.

7.2 Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak Tren Hız Profili Optimizasyonu

Matlab yazılımında geliştirilen THS'de, M3 metro hattının tüm işletmesel veri ve kısıtlamaları altında, mevcut hız profili ile tren hareketi gerçekleştirilmiştir. Hareket sonunda, Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında her bir istasyon aralığı için enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Aynı şartlar altında 4 farklı optimizasyon yöntemi (GA, SA, PSO ve MPA) kullanılarak her bir istasyon aralığı için optimal hız profilleri bulunmuştur. Her bir algoritmanın kendi dinamikleri doğrultusunda elde ettiği hız profili eğrileri, mevcut hız profili ile birlikte çizdirilmiş ve Şekil 7.2'de paylaşılmıştır.



Şekil 7.2 GA, SA, MPA ve PSO algoritmalarına göre Metrokent-Kirazlı istasyonları arasındaki hız profilleri

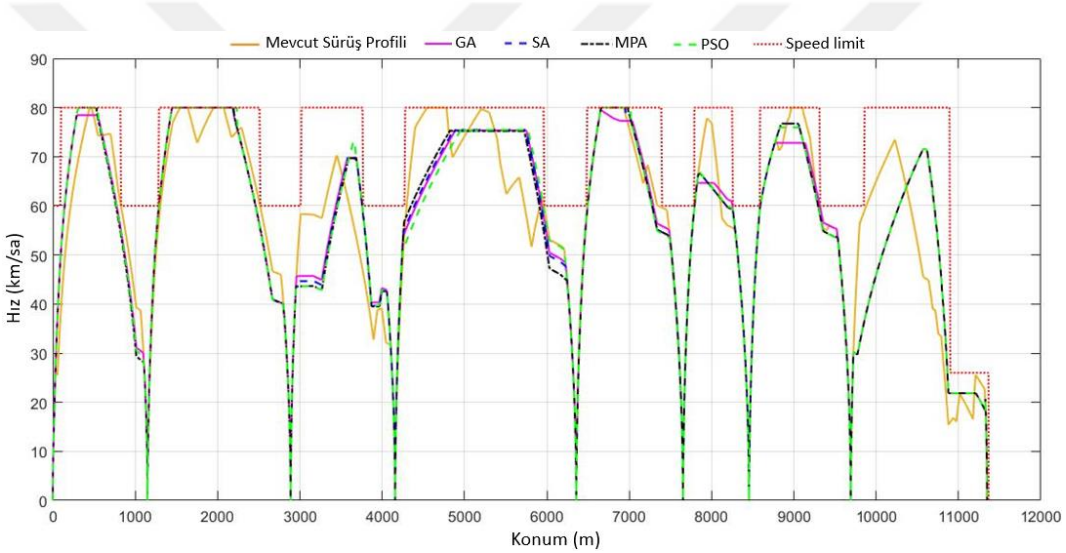
Metrokent-Kirazlı istasyonları arasında her bir algoritma tarafından bulunan optimal hız profilleri ile tren THS'de sürülmüştür. Sürüş sonundaki toplam enerji tüketimleri, seyahat süreleri ve algoritmaların optimal çözüme kavuşma süreleri elde edilmiştir. Tablo 7.2'de mevcut hız profiline kıyasla algoritmaların bulduğu çözümler kıyaslanmıştır.

Tablo 7.2 Simülasyon sonuçlarının Metrokent-Kirazlı yönüne göre karşılaştırılması

Strateji	**Enerji tüketimi (kWsa)**	**Seyahat süresi (sn)**	**Hesaplama süresi (sn)**	**Enerji verimlilik oranı (%)**
Mevcut hız profili	90,02	875,00	-	Referans
GA	61,65	875,00	1020,19	31,51
SA	60,47	875,00	1435,49	32,83
MPA	59,90	875,00	1452,91	33,46
PSO	59,98	875,00	1420,25	33,37

Tablo 7.2 incelendiğinde, her bir algoritma da mevcut hız profili ile sürüş stratejisine göre oldukça iyi sonuçlar bulduğu görülmektedir. Ancak, enerji verimli tren hareketi problemine en iyi çözümü, bu tür problemlerin çözümünde daha önce bilinen bir çalışmada kullanılmamış, MPA algoritması vermiştir. MPA algoritması, mevcut hız profili ile sürüşe kıyasla, %33,46 daha enerji verimli hız profili çözümü önermiştir. Algoritmalar, kendi en iyi çözümlerine yakınsama süreleri açısından kıyaslandığında ise, en hızlı çözüme yakınsayan algoritma GA yöntemidir.

Benzer şekilde THS'de Kirazlı-Metrokent istasyonları arasındaki mevcut hız profili de aynı şartlar altında optimize edilmiştir. THS'de her bir algoritma tarafından optimizasyon soncu elde edilen hız profilleri ile mevcut hız profili çıktıları Şekil 7.3'te paylaşılmıştır.



Şekil 7.3 GA, SA, MPA ve PSO algoritmalarına göre Kirazlı-Metrokent istasyonları arasındaki hız profilleri

Geliştirilen tren hareket simülatöründe, algoritmalar tarafından önerilen hız profilleri ile tren sürüşü gerçekleştirildiği durumdaki seyahat süreleri ve enerji tüketim miktarları Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3 Simülasyon sonuçlarının Kirazlı-Metrokent yönüne göre karşılaştırılması

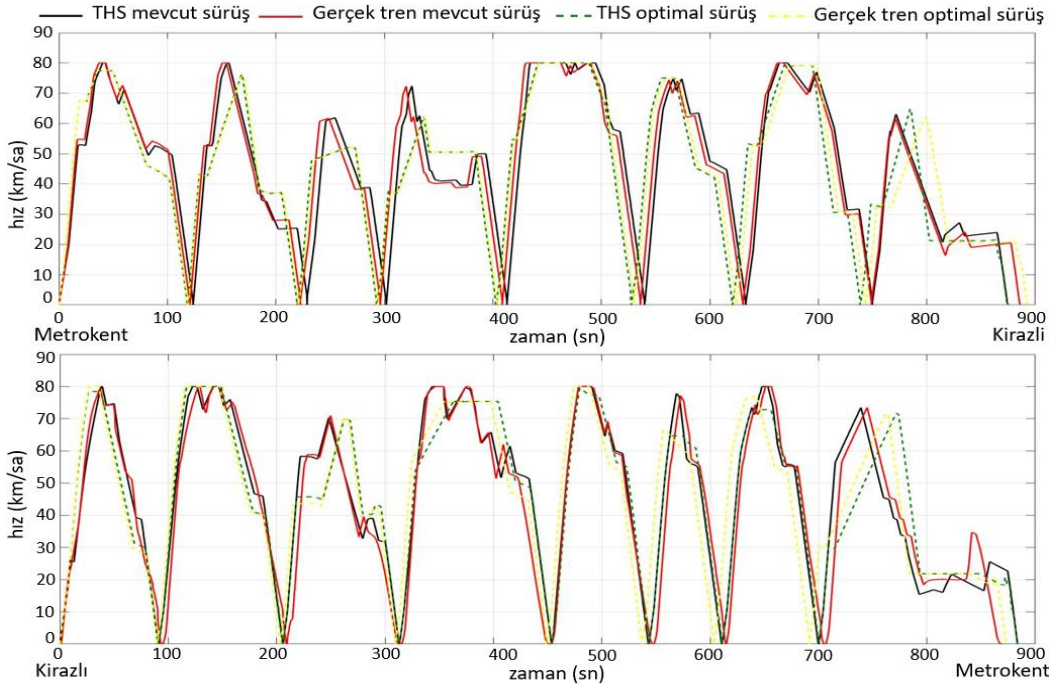
Strateji	Enerji tüketimi (kWsa)	Seyahat süresi (sn)	Hesaplama süresi (sn)	Enerji verimlilik oranı (%)
Mevcut hız profili	116,37	884,00	-	Referans
GA	96,14	884,00	1294,51	17,38
SA	94,76	884,00	1199,70	18,57
MPA	94,48	884,00	1329,95	18,81
PSO	94,59	884,00	1301,10	18,72

Tablo 7.3'ten görüldüğü üzere, Kirazlı-Metrokent doğrultusunda enerji verimli tren hareketi problemine en iyi çözüm yine MPA algoritması tarafından bulunmuştur. Mevcut hız profili ile süürşe kıyasla, MPA'nın önerdiği hız profili ile sürüşte %18,81 daha az enerji tüketerek trenin seyahatini tamamladığı görülmektedir.

MPA yönteminin tren hareketi problemlerine karşı uygulanan bilinen bir örneği yoktur. Gerçekleştirilen çalışma ile tren sürüşüne bağlı olarak problem MPA algoritması kullanılarak en iyilenmiştir. Bu tür problemlerin çözümünde sıklıkla tercih edilen ve iyi sonuçlar veren GA, SA ve PSO algoritmalarına kıyasla MPA daha üstün bir çözüm bulmuştur. Tezin bu bölümünün en büyük katkısı, MPA algoritmasının enerji verimli tren hareketi problemlerinde rahatlıkla kullanılabileceğinin ve algoritmanın kısıtlarının ve problemin iyi tanımlanması halinde optimal çözümü vereceğinin gösterilmiş olmasıdır.

THS'de elde edilen sonuçların gerçek tren hareketine ne kadar yakın olduğunun görülmesi için saha testleri yapılmıştır. Testler M3 metro hattında Kirazlı-Metrokent ve Metrokent Kirazlı istasyonları arasında iki farklı şekilde yapılmıştır. Birincisi, GA'nın önerdiği hız profili ile (test maliyetinden dolayı rastgele olarak dört algoritmadan birisi seçilmiştir) bir trenin makinist eşliğinde sürülmesidir. İkincisi ise, dört algoritma arasından en iyi sonucu veren MPA algoritmasının, tren

içerisindeki her bir istayonda değişen yolcu yükü etkisini dikkate alarak önerdiği hız profili ile trenin sürülmesidir. Bu test, tren içerisinde yolcuların olduğu güncel işletme altında, saat 10:00-12:00 aralığında yapılmıştır. Teste ait detaylar Bölüm 5.6.2'de açıklanmıştır. Şekil 7.4 birinci duruma ait M-K ve K-M istasyonları arasındaki gerçek tren sürüşü ve THS ortamındaki tren sürüşüne ait hız-zaman grafiğini göstermektedir.



Şekil 7.4 Saha – THS mevcut ve optimize edilmiş sürüşler hız-zaman grafiği

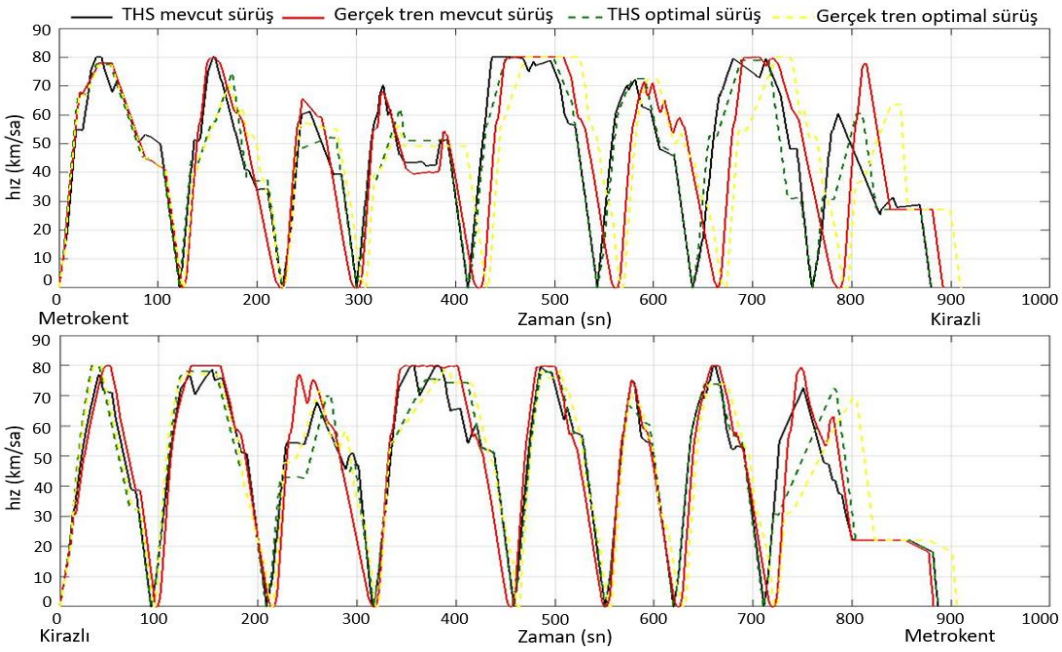
Mevcut ve GA yöntemiyle optimize edilmiş hız profilleri ile tren sürüşü sonundaki harekete ait toplam seyahat süresi ile enerji tüketimi değerleri Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.4 Gerçek tren sürüşü – THS sonuçlarının değerlendirilmesi

Kıyaslama	**THS mevcut sürüş**	**Gerçek tren mevcut sürüş**	**THS optimal sürüş**	**Gerçek tren optimal sürüş**
Toplam seyahat süresi (sn)	1759,00	1755,00	1759,00	1766,25
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	206,39	207,51	157,79	159,60

THS ortamında optimize edilmiş hız profili ile tren sürüşü gerçekleştirildiğinde, tüm rotası boyunca seyahatini 1759 saniyede tamamlamaktadır. Simülasyon ortamında elde edilen hız profilleri gerçek bir trene makinist eşliğinde uygulandığında ise rotasını 1766,25 saniyede tamamladığı görülmektedir. THS ile gerçek ortam arasında, seyahat süresi açısından sadece %0,41 (7,25 saniye) kadar bir fark olmuştur. THS seyahat süresi açısından, %99'un üzerinde bir doğruluk payı ile gerçek bir tren sürüşünü benzetebilmiştir. Enerji tüketimi açısından simülasyon ortamında, optimal hız profili ile hareket eden bir tren rotasını 157,79 kWh enerji tüketimi ile tamamlarken, saha gerçek bir tren sürüldüğünde ise 159,60 kWh enerji tüketimi ile tamamlamıştır. Enerji tüketimi açısından ise 1.81 kWh yani %1,13 kadar küçük bir fark olmuştur. Enerji tüketimi açısından ise THS, gerçek trenin enerji tüketimini %98'in üzerinde doğru benzetebilmiştir.

Saha testlerinin ikinci kısmında, istasyonlarda inen ve binen yolculardan kaynaklanan tren içerisindeki değişken kütle etkisi de dikkate alınarak, MPA algoritması ile THS'de optimizasyon yapılarak yeni hız profili elde edilmiştir. Detay bilgiler 5. Bölüm'de açıklanmıştır. Saha testi, MPA'nın önerdiği hız profili ile makinist eşliğinde, tren içerisinde yolcular var iken (bu test Metro İstanbul kumanda merkezi ile iletişim halinde kalınarak yapılmıştır) gerçekleştirilmiştir. THS ve saha testi sonuçları Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5 Saha – THS mevcut ve optimize edilmiş sürüşler hız-zaman grafiği

İstasyonlarda trene binen ve trenden inen yolcuların yükü dikkate alınarak THS'de MPA algoritması ile mevcut hız profili optimize edilmiştir. 13.10.2022 tarihinde M3 metrosu Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında, sabah 10:00 - 12:00 saatleri arasında normal işletme altında testler yapılmıştır. Tren yolculuğunu ilk olarak mevcut hız profiliyle tamamlamıştır. Daha sonra, MPA algoritmasının önerdiği optimum hız profili ile tren bir makinist tarafından sürülerek hareketini tamamlamıştır.

Mevcut ve MPA yöntemiyle optimize edilmiş hız profilleri ile tren sürüşü sonundaki harekete ait toplam seyahat süresi ile enerji tüketimi değerleri Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5 Değişken yüklü durum için gerçek tren sürüşü – THS simülasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi

Kıyaslama	**THS mevcut sürüş**	**Gerçek tren mevcut sürüş**	**THS optimal sürüş**	**Gerçek tren optimal sürüş**
Toplam seyahat süresi (sn)	1767,00	1774,00	1767,00	1816,00
Toplam enerji tüketimi (kWsa)	219,90	221,00	178,66	174,00

THS ile gerçek durum mevcut hız profili ile sürüş açısından karşılaştırıldığında, THS hareket süresi açısından sadece 7 saniyelik fark ile %99'ün üzerinde doğruluk sağlamıştır. Enerji tüketimi açısından ise 1,1 kWh'lik bir fark ile %99'ün üzerinde doğruluk payı ile gerçek trenin enerji tüketimini benzetmeyi başarmıştır. Optimize edilmiş hız profili ile sürüşte, seyahat süresi ve enerji tüketimi açısından THS'nin %97'nin üzerinde doğruluk oranı ile gerçek tren hareketini benzetebildiği ortaya koyulmuştur.

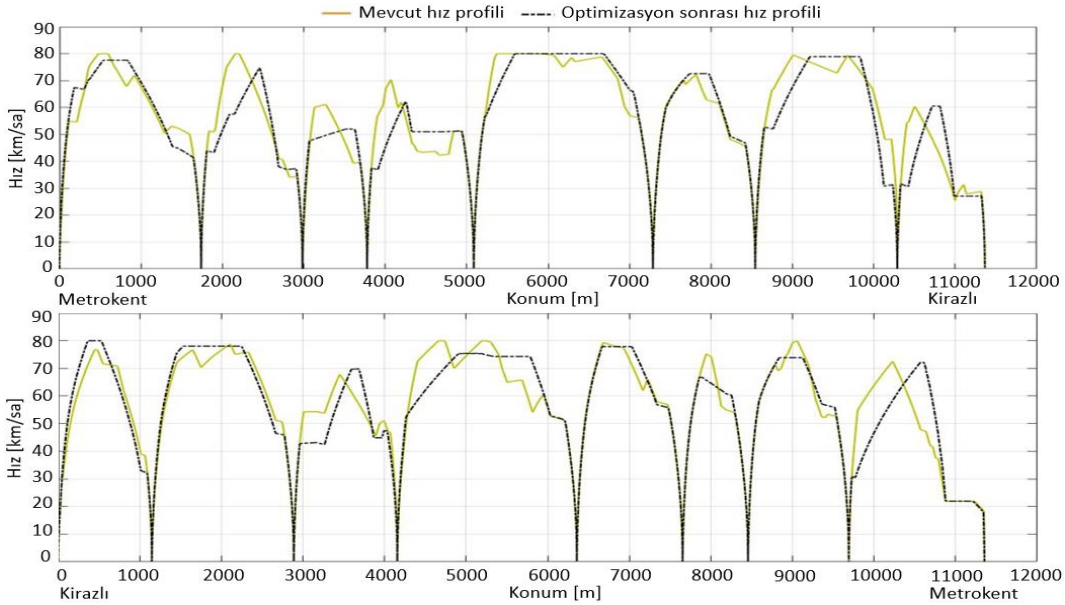
Bu bölümün en önemli katkısı, simülasyon ortamında yapılan optimizasyon çalışmalarının gerçek sahada yüksek doğruluk oranı ile uygulanabilirliğinin gösterilmiş olmasıdır. Böylece, raylı sistem işletmeci kuruluşları için, enerji verimliliği açısından hız profili optimizasyonunun büyük fırsatlar sunduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen tren hareket simülatörü ve hız profilini optimize etmeye yönelik algoritmalar sadece M3 metro hattında değil, tüm raylı taşımacılık sistemlerinde kullanılabileceği unutulmamalıdır. AC veya DC gerilim ile çalışan tüm araçların hareketleri analiz edilebilir ve bahsedilen optimizasyonlar yapılarak enerji verimliliği sağlanabilir.

7.3 Entegre Enerji Optimizasyonu

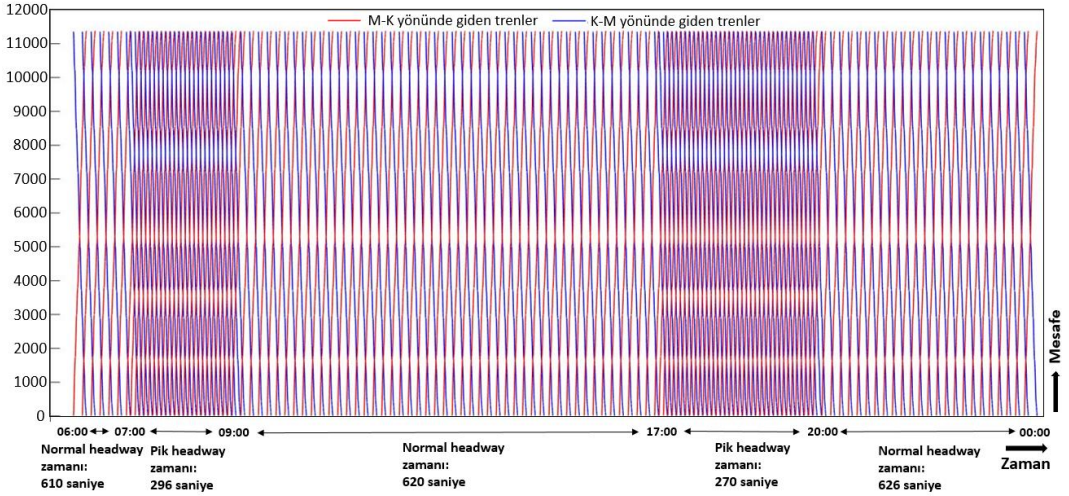
Hız profili ve zaman çizelgesi optimizasyonunu birleştiren entegre bir yöntem geliştirilmiştir. M3 metro hattı işletmesel verileri ve bu hat üzerinde 18 saatlik işletme dilimindeki 139 tren seferi göz önünde bulundurularak, trenler arası sefer süresi, istasyonlar arası sefer süresi ve istasyonlar arası tren hız profilleri eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Buradaki amaç, bir yandan hız profili optimizasyonu ile cer enerjisi tüketimi azaltılırken öte yandan frenleyen trenlerin ürettiği rejeneratif enerjiden mümkün olduğunca çok fayda sağlayarak sistem bazında tasarruf elde etmektir.

Entegre optimizasyon için, çok sayıdaki trenlerin hareketlerini analiz edebilmek amacıyla özgün bir çoklu tren hareket simülatörü (ÇTHS) geliştirilmiştir. ÇTHS'de, açıklanan algoritma seçim kriterlerine dayanarak, hız profili kısmı GA yöntemi ile zaman çizelgesi kısmı da SA yöntemi ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sonrası mevcut ve yeni hız profili çıktıları Şekil 7.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 7.6 Mevcut ve entegre optimizasyon sonrası elde edilen hız profili karşılaştırması

Entegre optimizasyon sonrası elde edilen zaman çizelgesi ise Şekil 7.7'de verilmiştir. İşletme başlangıç ve bitiş saati ile toplam sefer yapan tren sayıları aynı kalmak şartı ile trenler arası sefer süreleri optimize edilmiştir.



Şekil 7.7 Optimal zaman çizelgesi

Mevcut durum ve entegre optimizasyon sonrası trenler arası sefer sürelerinin değişimi Tablo 7.6'da paylaşılmıştır. Bu çalışmada, yeniden planlanan zaman çizelgesinde trenler arası sefer süresi maksimum değişiminin, yoğun saatler için ± 30 saniye ve yoğun olmayan saatler için ± 40 saniye ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca, gün içerisinde gerçekleşen toplam sefer sayısının sabit kalması da optimizasyon kısıtı olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 7.6 Mevcut ve optimal zaman çizelgesinde trenler arası sefer süreleri karşılaştırması

Saat aralığı	**Mevcut durum (sn)**	**Optimizasyon sonrası sefer süresi (sn)**
06:00 – 07:00	600,00	610,00
07:00 – 09:00	300,00	296,00
09:00 – 17:00	600,00	620,00
17:00 – 20:00	300,00	270,00

Tablo 7.6 Mevcut ve optimal zaman çizelgesinde trenler arası sefer süreleri karşılaştırılması (devamı)

Saat aralığı	Mevcut durum (sn)	Optimizasyon sonrası sefer süresi (sn)
20:00 – 00:00	600,00	626,00

Entegre optimizasyon sonrası elde edilen veriler ile ÇTHS'de tren işletimi gerçekleştirildiğinde ulaşılan simülayon sonuçları Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.7 Mevcut ve entegre optimizasyon sonrası tren işletim sonuçları

Karşılaştırma	Günlük cer enerjisi tüketimi (kWsa)	Günlük üretilen RFE (kWsa)	Günlük etkin değerlendirilen RFE (kWsa)	Günlük toplam enerji tüketimi (kWsa)
Mevcut işletme durumu	28.688,21	6.021,48	824,27	27.863,94
Entegre optimizasyon sonrası	21.881,38	5.956,15	1.344,13	20.537,25 (-%26,29)

Buna göre, etkin olarak faydalanılan rejeneratif frenleme enerjisi optimizasyon sonrasında %63,06 oranında (519,86 kWh) artırılmıştır. Günlük işletmedeki enerji tüketimi ise optimizasyon sonrasında %26,29 oranında (7326,69 kWh) azaltılarak büyük bir tasarruf elde edilmiştir.

Bu bölümün en önemli katkısı, rejeneratif frenleme enerjisinin hesaplanmasının gerçek saha testlerine dayanması ve %98'in üzerinde doğru bir şekilde frenleme enerjisini hesaplayan özgün matematiksel model geliştirilmesidir. Ayrıca, bir hat içerisinde çok sayıdaki trenlerin simülasyonuna olanak sağlayan özgün bir Çoklu Tren Hareket Simülatörü geliştirilmesidir.

8
SONUÇLAR

Şehiriçi ulaşım için elektrikli raylı sistemler, yüksek taşıma hacmi, güvenliği, dakikliği, çevre dostu olması ve trafik sıkışıklığı gibi bir sorunu olmaması açısından vazgeçilmez ulaşım sistemleri arasında yerini sağlamlaştırmıştır. Dünya'nın her yerinde, trafiğe takılmadan güvenli ve konforlu ulaştırma için raylı sistem hatlarının kurulumları veya mevcut hatlara entegrasyonlar devam etmektedir. Bununla birlikte, raylı sistemler her ne kadar diğer ulaşım türlerine göre enerji verimli olsa da büyük güçler tüketmektedirler. Bu sebeple, bu alanda enerji verimliliği adına yapılacak küçük iyileştirmelerin bile ekonomik olarak karşılığı büyük olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği çalışmaları teorik ve pratik olarak yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Bir raylı taşıtın yolculuğu sırasında, trene hareket gücünü aktaran cer motorları, enerjinin en çok tüketildiği organlardır. Tez çalışmasının ana odak noktası cer enerjisi tüketiminin azaltılmasıdır. Bu bağlamda öncelikle, tren hareketlerini gerçeğe mümkün olduğu kadar doğru benzetebilen bir THS geliştirilmiştir. Ardından, dört farklı sezgisel tabanlı algoritmalar (GA, SA, PSO ve MPA) kullanılarak trenlerin istasyonlar arasındaki hız profilleri, M3 metro hattının tüm işletmesel kısıtlamaları dikkate alınarak, THS ortamında optimize edilmiştir. Konforun artırılması için bir kısıtlama ve belirli miktarda seyahat süresine esneklik tanınmasının etkileri de bu çalışma altında incelenmiştir. Ek olarak, tren içerisindeki kütle değişimin sürüş profiline ve enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. Bunun için belirli bir saat aralığı referans alınmış ve son 6 ayın ortalaması alınarak her istasyonda bu zaman aralığında trenden inen ve trene binen yolcu sayıları belirlenmiştir. Bu durum THS'ye tanıtılarak MPA algoritması ile her bir istasyon aralığı için yeniden optimal hız profili elde edilmiştir.

THS ortamında elde edilen optimal hız profili ile gerçek bir tren sürüldüğünde mevcut hız profiline göre etkisinin ne olacağını görmek ve aynı zamanda THS ile gerçek ortamın ne ölçüde tutarlı olduğunu anlamak amacıyla saha testleri gerçekleştirilmiştir. Saha testleri iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, boş trenin hız profilini optimize eden dört farklı algoritmadan GA yönteminin sonucu seçilmiştir. GA'nın önerdiği hız profili tren sürücüsüne öğretilmiş ve gece

işletmenin yapılmadığı saat aralığında tren, M3 metrosu Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı metrokent istasyonları arasında sürülmüştür. Mevcut hız profili ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla, tren bir kez de Metrokent-Kirazlı ve Kirazlı-Metrokent istasyonları arasında mevcut hız profili ile sürülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise, tren içerisindeki değişken kütle etkisini dikkate alarak MPA yöntemi tarafından optimize edilen hız profili ile bir tren sürülmüştür. Bu test işletme altında, tren içerisindeki yolcularla birlikte belirlenen referans saat aralığı içerisinde yapılmıştır. Optimal hız profiline göre, daha önceden eğitim verilen sürücü treni M3 metrosu istasyonları arasında sürmüştür. Parkuru optimal hız profiline göre tamamlayarak başlangıç noktasına dönen sürücü, yeni turunda treni yine yolcularla birlikte bu sefer de mevcut sürüş profiline göre sürerek parkuru tamamlamış ve her iki sürüşe ait sonuçlar kayıt edilmiştir.

Cer enerjisi tüketimini azaltmanın etkili bir diğer yolu da zaman çizelgesi optimizasyonu yöntemi ile rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum seviyede fayda sağlamaktır. Bu tez çalışmasında, sadece zaman çizelgesini optimize etmek yerine, cer enerjisi tüketimine doğrudan etkisi olan istasyonlar arası sefer süreleri ve hız profilleri optimizasyonunu da dahil eden entegre bir model geliştirilmiştir. Ayrıca, hat içerisindeki tüm trenlerin hareketlerini dikkate alan bir benzetim yazılımı, ÇTHS, geliştirilerek trenlerin hareketleri ve birbirleri ile olan etkileşimlerinin simülasyonu yapılmıştır. Aynı elektrik bölgesindeki frenleyen ve hızlanan trenlerin senkronize süreleri artırılarak rejeneratif frenleme enerjisinden etkin fayda sağlanılmıştır. Ayrıca, aynı elektrik bölgesinde iki treninin eş zamanlı hızlanma ve frenleme senkronize sürelerinin azaltılması amaçlanmıştır.

Tek bir tren hareketinin simülasyonu ve hız profili optimizasyonu amacıyla geliştirilen THS'nin doğruluğu gerçek saha testleri yoluyla yapılmıştır. Buna göre geliştirilen THS yazılımı, hareket süresi ve enerji tüketimi açısından %99'un üzerinde ve rejeneratif frenleme enerjisi açısından ise %96'nın üzerinde gerçek bir tren hareketini benzetebilmiştir.

THS'de dört farklı sezgisel tabanlı algoritmalar ile yapılan hız profili optimizasyonu sonuçları, tüm parkur için (M-K ve K-M arası gidiş-dönüş) mevcut hız profili ile karşılaştırıldığında, cer enerjisi tüketimini GA'da %23,55, SA'da %24,79, PSO'da %25,11 ve MPA'da %25,20 oranında azalttığını göstermiştir. Bu sonuçlara dayalı olarak İstanbul M3 Metro hattında bir saha testi yapılmıştır. GA

tarafından optimize edilmiş hız profili ile makinist eşliğinde tren sürüldüğünde, 7,25 saniye (%0.41) seyahat süresi uzaması ile cer enerjisi tüketiminin %23.08 oranında azaldığı sonucu elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bir diğer saha testi ise, MPA algoritmasının değişken yolcu yükü etkisini dikkate alarak önerdiği istasyonlar arası tren hız profili çıktısıdır. Bir tren içerisinde yolcularla beraber gerçek bir işletme altında MPA'nın önerdiği optimal hız profili talimatlarına göre sürüldüğünde, mevcut duruma kıyasla %2.35'lik bir zaman gecikmesi ile %21.27 oranında daha az enerji tüketimi ile seyahatini tamamlamıştır.

ÇTHS'de, istasyonlar arası seyahat süreleri, hız profili ve trenler arası sefer sürelerini birleştiren entegre optimizasyon sonucu elde edilen veriler mevcut işletim ile karşılaştırıldığında, optimize edilmiş operasyon, toplam enerji tüketimi %26,29 oranında azaltmıştır. Entegre optimize edilmiş stratejide, hızlanan trenler tarafından etkin bir şekilde kullanılabilen rejeneratif frenleme enerjisi, %69,06 artarak 795,08 kWh'den 1344,13 kWh'e çıkmıştır. Optimum zaman çizelgesinin kullanılması, frenleme-hızlanma tren gruplarının miktarını 393'ten 427'ye yükseltmiş ve genel frenleme-hızlanma senkronize süresini %81,80 artırmıştır. Toplam hızlanma-hızlanma senkronize süresi %47,62 oranında düşürülmüştür. Ayrıca hızlanma-hızlanma tren grubu sayısı da 14'ten 11'e azaltılmıştır. Öte yandan, frenleme-frenleme senkronize grupları 18'den 21'e çıkarak senkronizasyon süresini -%6,06 artırmıştır.

Sistemin enerji tüketiminin, demiryolu enerji sistemlerinin küresel anlayışına dayanan entegre bir yaklaşım (hız profili ve zaman çizelgesi) kullanılarak optimize edilebileceği ve önemli miktarlarda enerji tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir.

Bu tezin ana katkılarından birisi, gerçek bir tren hareketini yüksek doğruluk oranı ile benzetebilen özgün bir tren hareket simülatörü geliştirilmesidir. Geliştirilen THS, tren hareketinin ve cer gücü ağlarının enerji performansını değerlendirme yeteneğine sahiptir. Bu simülatör, sürüş ve zaman çizelgesi işlemlerine göre mevcutta bulunan hatlar için enerji tüketimini değerlendirmek amacıyla kullanılabilir. Ayrıca demiryolu işletmesi bu simülatöre dayalı olarak enerji tasarrufu sağlayacak şekilde tasarlanabilir. Bu simülatör İstanbul M3 Metro hattı için yapılan araştırma projesine uygulanmış ve bir çok çalışmanın aksine gerçek saha çalışmaları ile etkinliği kanıtlanmıştır.

Cer enerjisi tasarrufu için sürüş kontrollerini optimize etmek amacıyla bir yöntem önerilmiş ve optimizasyon için GA, SA ve PSO gibi sıklıkla kullanılan algoritmaların yanı sıra bu çalışmada ilk defa uygulandığı bilinen MPA algoritması kullanılmıştır. Tezin katkılarından biri olan MPA yönteminin hız profili optimizasyonu problemine uygulanarak sıklıkla tercih edilen yöntemlere kıyasla üstün sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir. Teorik optimal sürüş stratejileri simülasyonla üretilmiştir. Daha da önemlisi, insan sürücülere enerji tasarruflu sürüş kontrolleri ile trenlerin sürülmesi durumunda cer enerjisi tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği gösterilerek farkındalık oluşturulmuştur. Bu tezin bir diğer katkısı ise, İstanbul M3 Metro hattında optimize edilmiş hız profillerinin sahada uygulanarak simülasyon ortamında elde edilen başarının ispatlanmasıdır. Hız profili optimizasyonu yöntemin uygulanması ucuz ve etkilidir. Ayrıca, çeşitli metro güzergahları için de geniş çapta geliştirilebilir ve uygulanabilir.

Bu çalışmanın katkılarından bir diğeri de, rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum seviyede faydalanmak için verimli bir sürüş profili ve zaman çizelgesi sonuçları elde etmek amacıyla entegre bir enerji optimizasyonu yaklaşımı geliştirilmesidir. Bu konudaki önceki literatürün çoğu, karar değişkenlerini basitleştirmiş, tren hareketi benzetiminde bazı parametrelerin (tünel direnci, kavis direnci vb.) etkisini göz ardı etmiş ve hareket benzetim modelinin gerçek saha testleri ile doğrulamasını yapmamışlardır. Bu da optimum çıktılar ile ilgili belirsizliğe yol açmaktadır. Buna ek olarak bu çalışmada, sürüş kontrolleri ve zaman çizelgeleri, ortaklaşa optimize edilmiştir. Enerji tasarrufu performansı, gerçek bir metro hattı simülasyonuna dayalı olarak sunulmuş ve etkinliği gösterilmiştir.

Raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği konularında çalışmalar yapmaya istekli araştırmacılar için, gelecekte yapılabilecek ve bu çalışmayı daha ileri noktalara taşıyacak bazı tavsiyelerde bulunulmuştur. Cer enerjisi tasarrufu için sürüş stratejileri, İstanbul M3 Metro Hattı'ndaki saha testlerinde doğrulanmıştır. Gelecekteki çalışmalar, enerji tasarruflu sürüş stratejilerinin pratik uygulamasına odaklanabilir. Stratejilerin günlük operasyonda kullanılabilmesi için bir sürücü danışma sistemi (Driver Advisory System-DAS) olarak çalışacak ve tren sürücüsüne optimal hız profillerini online olarak anlık aktaracak paket bir ürün haline gelebilir. Geliştirilecek bu DAS'ın kullanıcı arayüzü, kullanımı daha kolay

ve net olacak şekilde geliştirilebilir. MGG, SHG, BG ve FR optimal hareket modları sürücülere talimat vermek amacıyla rota boyunca bilgilendirme tabelaları şeklinde de uygulanabilir. Bu hedeflere ulaşmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Zaman çizelgesi optimizasyonu çalışması, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen raylı sistem simülasyonuna (ÇTHS) dayanmaktadır. Sonuçlar, sistem bazında enerji azaltma performansını teorik olarak sunmuştur. Bu çalışmanın sağladığı sonuçları doğrulamak için bir saha testi yapılmalıdır. Simülasyon çalışmasından elde edilen optimum operasyonlar, rejeneratif frenleme özelliğine sahip çok trenli bir ağda uygulanabilir. Enerji tüketimi trafo merkezlerinden ölçülebilir.

Bu tezdeki çalışmalara dayanarak, aşağıdaki araştırma konularını dikkate almanın ve incelemenin faydalı olacağı düşünülmektedir.

- İstasyonlarda bekleme süreleri (dwell), bu tezde zaman çizelgesi optimizasyonu çalışmasında bir sabit olarak kabul edilmiştir. Sistem enerji tüketimi ile çeşitli dwell'ler arasındaki ilişki incelenebilir. Dwell, daha sonraki optimizasyon çalışmalarında bir karar değişkeni olarak kabul edilebilir.
- Entegre optimizasyon yapısında, raylı sistem güç ağının da modele dahil edilerek transformatör merkezlerindeki akım-gerilim değerlerinin izlenmesi çalışmaya bir yenilik katacaktır.
- Optimum çalışma stratejilerinin güvenilirliği, farklı türdeki enerji verimli işletimler ile kıyaslanarak incelenebilir. Farklı algoritmalar ile kıyaslanarak daha enerji verimli tren işletim stilleri geliştirilebilir. Ayrıca enerji verimliliği performansı ile rahatsızlık (örneğin, sarsıntı, tren gecikmeleri veya kazalar) arasındaki ilişki daha fazla incelenebilir.

KAYNAKÇA

[1] Transport, https://www.iea.org/topics/transport, 21.07.2023.

[2] Congressional budget office, https://www.cbo.gov/publication/58861#_idTextAnchor000, 21.07.2023.

[3] Energy statistics - an overview, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#:~:text=An%20analysis%20of%20the%20final,%25)%20(Figure%2010), 21.07.2023.

[4] Transportation & Logistics https://www.statista.com/statistics/1239722/railway-emissions-eu/, 21.07.2023.

[5] Çevresel göstergeler, https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790, 21.07.2023.

[6] P.C.M. Leung ve E.W.M. Lee, "Estimation of electrical power consumption in subway station design by intelligent approach," *Applied Energy*, vol. 101, pp. 634–643, 2012. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.07.017.

[7] Metro İstanbul, https://www.metro.istanbul, 21.07.2023.

[8] S. Hillmansen, C. Roberts, "Energy storage devices in hybrid railway vehicles: A kinematic analysis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 221, pp. 135-143, 2007. https://doi.org/10.1243/09544097JRRT99

[9] N. Zhao, C. Roberts, S. Hillmansen, Z. Tian, P. Weston, L. Chen, "An integrated metro operation optimization to minimize energy consumption," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 75, pp. 168-182, 2017. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.013

[10] Tian, Z. (2017). *System Energy Optimisation Strategies for DC Railway Traction Power Networks*. http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7779.

[11] K. Ichikawa, "Application of Optimization Theory for Bounded State Variable Problems to the Operation of Train," *Bulletin of JSME*, vol.11, 11.47, 1968 pp. 857–865. https://doi.org/10.1299/jsme1958.11.857.

[12] H. Hoang, M. Polis ve A. Haurie, "Reducing energy consumption through trajectory optimization for a metro network," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 20, no. 5, October 1975 pp. 590-595, doi: 10.1109/TAC.1975.1101058.

[13] H. Phil, "An optimal strategy for the control of a train," İn: T*he Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*, vol.32, 31.04, 1996, p.p. 519-532. DOI: 10 . 1017 / s0334270000006780.

[14] H. Phil, "Optimal strategies for the control of a train," İn: *Automatica*, vol. 32 no. 4, 1996, pp. 519–532. DOI: 10.1016/0005-1098(95)00184-0.

[15] E. Khmelnitsky, "On an optimal control problem of train operation," İn *IEEE Transactions on Automatic Control* vol. 45, no. 7, 2000, pp. 1257–1266. DOI: 10.1109/9.867018.

[16] H. Phill, "The Optimal Control of a Train, " *Annals of Operations Research* 98, 65–87, 2000, https://doi.org/10.1023/A:1019235819716.

[17] P.M. Fernández, I.V. Sanchís, V. Yepes, R.I. Franco, "A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption, " *J. Clean. Prod.* vol. 222, 2019, pp. 153–162. https://doi.org/10.1016/j.jclepro. 2019.03.037.

[18] C.S. Chang ve S.S. Sim, "Optimising train movements through coast control using genetic algorithms," İn: *IEE Proceedings - Electric Power Applications* vol. 144.1, 1997 p.p. 65. DOI: 10.1049/ip-epa:19970797.

[19] K. K. Wong ve T. K. Ho, "Dynamic coast control of train movement with genetic algorithm," İn: *International Journal of Systems Science* vol. 35.13-14, 2004, pp. 835–846. DOI: 10 . 1080 / 00207720412331203633.

[20] S. H. Han, Y. S. Byen, J. H. Baek, T. K. An, S. G. Lee ve H. J. Park, "An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA)," *Proceedings of IEEE Region 10 Conference TENCON 99 Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure*, vol. 1, 1999, pp. 360-362, doi: 10.1109/TENCON.1999.818425.

[21] A. Süleyman ve M.T. Söylemez, "Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms," İn: *IET Electric Power Applications*, vol. 2.3, pp. 172–182. DOI: 10 . 1049 / iet - epa : 20070381.

[22] A. Amrani, A. B. Hamida, T. Liu, O. Langlois, "Train speed profiles optimization using a genetic algorithm based on a random-forest model to estimate energy consumption," *Transport Research Arena (TRA)*, 2018, Apr 2018, vienne, Austria.

[23] C. Lin, X. Fang, X. Zhao, Q. Zhang ve X. Liu, "Study on energy-saving optimization of train coasting control based on multi-population Genetic Algorithm," *3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 2017, pp. 627-632, doi: 10.1109/ICCAR.2017.7942773.

[24] Y. Huang, X. Ma, S. Su ve T. Tang, "Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm," *Energies*, vol. 8, 2015, p.p. 14311–14329. https://doi.org/10.3390/en81212433.

[25] N. Zhao, Z. Tian, L. Chen, C. Roberts ve S. Hillmansen, "Driving strategy optimization and field test on an urban rail transit system," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* vol. 13, 2021, p.p. 34–44. https://doi.org/10.1109/MITS.2019. 2926369.

[26] L. Allen ve S. Chien, "Application of regenerative braking with optimized speed profiles for sustainable train operation," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, 2021, p.p. 12. https://doi.org/10.1155/2021/ 8555372.

[27] C. Sicre, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, "Real time regulation of efficient driving of high speed trains based on a genetic algorithm and a fuzzy model of manual driving," *Eng. Appl. Artif. Intell*, vol. 29, 2014, p.p. 79–92. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.07.015.

[28] C. Ma, Y. Ding, P. Du, B.H. Mao, “Study on coast control of train movement for saving energy based-on genetic algorithm,” *Railw. Comput. Appl.* vol. 19, 2010, p.p. 4–8. DOI:10.1109/ICCAR.2017.7942773

[29] M. Blanco-Castillo, A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, “Eco-Driving in Railway Lines Considering the Uncertainty Associated with Climatological Conditions,” *Sustainability*, vol. 14, p.p. 8645. https://doi.org/10.3390/su14148645.

[30] R. Zhang, S. Yin, M. Ye, Z. Yang, S. He, “A Timetable Optimization Model for Urban Rail Transit with Express/Local Mode,” *J. Adv. Transp.* vol. 2021, 2021, p.p. 1–15. https://doi.org/10.1155/2021/5589185.

[31] D. He, Y. Yang, Y. Chen, J. Deng, S. Shan, J. Liu, X. Li, “An integrated optimization model of metro energy consumption based on regenerative energy and passenger transfer,” *Appl. Energy*, vol. 264, 2020, p.p. 114770. https://doi.org/10.1016/J.apenergy.2020.114770.

[32] R. Chevrier, P. Pellegrini, J. “Rodriguez, Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times,” *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.* vol. 37, 2013, p.p. 20–41. https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.09.007

[33] C. Lin, X. Fang, X. Zhao, Q. Zhang, X. Liu, “Study on energy-saving optimization of train coasting control based on multi-population Genetic Algorithm,” In *Proceedings of the 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), IEEE*, Nagoya, Japan, 24–26 April 2017; pp. 627–632.

[34] L. Fan, F. Cao, B. Ke and T. Tang, “Speed profile optimization for train operation based on ant colony algorithm,” *2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China, 2015, pp. 48-53, doi: 10.1109/IAEAC.2015.7428516.

[35] B. R. Ke, M. C. Chen, C. L. Lin. “Block-layout design using MAX– MIN ant system for saving energy on mass rapid transit systems,” *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions*, 2009, 10(2): 226-235.

[36] B. Ke, C. Lin, C. Yang, “Optimisation of train energy-efficient operation for mass rapid transit systems,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 58–66, Mar. 2012.

[37]Y. Huang, C. Yang, S. Gong, “Energy Optimization for Train Operation Based on an Improved Ant Colony Optimization Methodology,” *Energies* vol. 9, 2016, p.p. 626. https://doi.org/10.3390/en9080626

[38] S. MA, A. MR, “Optimal speed control of a multiple-mass train for minimum energy consumption using ant colony and genetic algorithms,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* vol. 231, no. 3, 2017 p.p. 280-294. https://doi.org/10.1177/ 0954409715627182.

[39] C. Paraphantakul, E. Miller-Hooks, S. Opasanon, “Scheduling deliveries with backhauls in Thailand’s cement industry,” *Transp. Res. Rec.* vol. 2269, 2012, p.p. 73–82. https://doi.org/10.3141/2269-09.

[40] K. Androutsopoulos, K. Zografos, “An integrated modelling approach for the bicriterion vehicle routing and scheduling problem with environmental considerations,” *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol*, vol. 82, 2017, p.p. 180–209. https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.013

[41] F. Naldini, P. Pellegrini, J. Rodriguez, “Ant colony optimization for energy-efficient train operations,” *GECCO '21: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, 2021, p.p. 75-76, https://doi.org/10.1145/3449726.3459436.

[42] A. Rocha, A. Araújo, A. Carvalho, J.A. Sepulveda, “New approach for real time train energy efficiency optimization,” *Energies* vol. 11, 2018, p.p. 2660. https://doi.org/10.3390/en11102660.

[43] K. Kim, S.I.-J. Chen, “Optimal train operation for minimum energy consumption considering track alignment, speed limit, and schedule adherence,” *J. Transp. Eng.* vol. 137, 2011, p.p. 9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000246.

[44] D. C. Cismaru, “Energy Efficient Train Operation using Simulated Annealing Algorithm and SIMULINK model,” *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICATE.2018.8551415.

[45] T. Xie, S. Wang, X. Zhao, Q. Zhang, “Optimization of Train Energy-Efficient Operation Using Simulated Annealing Algorithm,” In: *Li, K., Li, S., Li, D., Niu, Q. (eds) Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment ICSEE Communications in Computer and Information Science*, vol 355. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37105-9_39.

[46] L. Wei, X. Jiaxuan, W. Peipei, L. Ruilong, T. Jingkun, “Train Energy Saving Operation Based on Simulated Annealing Algorithm,” *Journal of System Simulation*, vol. 30, no.6, 2018, p.p. 2320-2327. doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806040.

[47] S. Su, X. Wang, Y. Cao, J. Yin, “An Energy-Efficient Train Operation Approach by Integrating the Metro Timetabling and Eco-Driving,” in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 10, 2020, pp. 4252-4268, doi: 10.1109/TITS.2019.2939358.

[48] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, T. Gonsalves, A. Fernández, “Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines,” *Eng. Appl. Artif. Intell*, vol. 29, 2014, p.p. 43–53. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.12.015.

[49] A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, M. Domínguez, T. Gonsalves, “Design of robust and energy-efficient ATO speed profiles of metropolitan lines considering train load variations and delays,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, 2015, p.p. 2061–2071.

[50] Y. N. Huang, S.F. Gong, Y. Cao, L. Chen, “Optimization model of energy-efficient driving for train in urban rail transit based on particle swarm algorithm,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 16, p.p. 118-124 and 142.

[51] X.C. Ran, S.K. Chen, L. Chen, et al. “An energy-efficient timetable optimization method for metro operation considering spatial distribution of passenger flow,” *J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol*, vol. 20, 2020, no. 3, pp. 103– 110 .

[52] J.D. Valladolid, D. Patino, G. Gruosso C.A. Correa-Flórez, J. Vuelvas, F. Espinoza, “A Novel Energy-Efficiency Optimization Approach Based on Driving Patterns Styles and Experimental Tests for Electric Vehicles,” *Electronics*, vol. 10, no. 10, 2021; p.p. 1199. https://doi.org/10.3390/electronics10101199.

[53] S. Acikbas, (2008). *Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü*, (Doktora tezi). https://polen.itu.edu.tr/items/e5c552d0-9fc5-4a57-9a17-9ef3d193a945.

[54] J.P. Jaramillo, R. Insa, P.M. Fernández, “Modeling the energy consumption of trains by applying neural networks,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232, p.p. 816-823, doi: 10.1177/0954409717694522.

[55] A. A. Komyakov, M. M. Nikiforov, V. V. Erbes, V. T. Cheremisin, V. I. Ivanchenko, “Construction of electricity consumption mathematical models on railway transport used artificial neural network and fuzzy neural network,” *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555450.

[56] H.J. Chuang, C.S. Chen, C.H. Lin, C.H. Hsieh, C.Y. Ho, “Design of optimal coasting speed for saving social cost in mass rapid transit systems,” In *Proceedings of the IEEE Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China, 6–9 April 2008; pp. 2833–2839.

[57] M. Domínguez, A. Fernández, A. Cucala, P. Lukaszewicz, “Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit*, vol. 225, 2011, p.p. 463–474.

[58] S. Liu, F. Cao, J. Xun, Y. Wang, “Energy-efficient operation of single train based on the control strategy of ATO,” In P*roceedings of the IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, IEEE*, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 15–18 September 2015; pp. 2580–2586.

[59] H. Ko, T. Koseki, M. Miyatake, “Application of dynamic programming to optimization of running profile of a train,” In *Proceedings of the Computers in Railways IX*, Dresden, Germany, 17–19 May 2004.

[60] Z. Wu, C. Gao, T. Tang, “An Optimal Train Speed Profile Planning Method for Induction Motor Traction System,” *Energies*, vol. 14, 2021, p.p. 5153. https://doi.org/10.3390/en14165153.

[61] N. Zhao, C. Roberts, S. Hillmansen, G. Nicholson, “A Multiple Train Trajectory Optimization to Minimize Energy Consumption and Delay,” in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 2363-2372, Oct. 2015, doi: 10.1109/TITS.2014.2388356.

[62] S. Lu, S. Hillmansen, T. K. Ho, and C. Roberts, “Single-train trajectory optimization,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 14, no. 2, pp. 743–750, Jun. 2013.

[63] K. K. Wong, T. K. Ho, “Coast control for mass rapid transit railways with searching methods,” *IEE Proc.-Electr. Power Appl*., vol. 151, no. 3, May 2004, pp. 365–376.

[64] K. K. Wong, T. K. Ho, “Coast control of train movement with genetic algorithms,” in *Proc. Congr. Evol. Comput. (CEC)*, vol. 3, 2003, pp. 1280–1287.

[65] K. Keskin, A. Karamancioglu, “Energy-Efficient Train Operation Using Nature-Inspired Algorithms,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, Article ID 6173795, 12 pages, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/6173795

[66] Y. Arikan, T. Sen, E. Cam, “Energy efficiency in rail systems with coasting control method using GA and ABC optimizations,” *Tech. Gaz.* vol. 28, 2021, p.p. 1127–1135. https://doi.org/10.17559/TV-20200511115919.

[67] M.Miyatake, H. Ko, “Optimization of train speed profile for minimum energy consumption,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 263–269, 2010.

[68] A. Yıldız, (2018). *Raylı ulaşım sistemlerinde elektriksel enerji verimliliğinin artırılması*, (Yüksek Lisans tezi). https://tez.yok.gov.tr/Ulusal TezMerkezi/tez SorguSonucYeni.jsp.

[69] G.M. Scheepmaker, R.M. Goverde, L.G. Kroon, “Review of energy-efficient train control and timetabling,” *Eur. J. Oper. Res*, vol. 257, 2017, p.p. 355–376.

[70] X. Yang, X. Li, B. Ning, T. Tang, “A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst*, vol. 17, 2015, p.p. 2–13.

[71] T. Albrecht, “Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control,” *WIT Trans. State Sci. Eng*, vol. 39, 2010, doi:10.2495/978-1-84564-498-7/01

[72] J.F. Chen, R.L. Lin, Y.C. Liu, “Optimization of an MRT train schedule: Reducing maximum traction power by using genetic algorithms,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 20, 2005, p.p. 1366–1372.

[73] A. Nasri, M.F. Moghadam, H. Mokhtari, “Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems,” In P*roceedings of the SPEEDAM 2010, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, IEEE*, Pisa, Italy, 14–16 June 2010; pp. 1218–1221.

[74] D. Fournier, D. Mulard, F. Fages, “Energy optimization of metro timetables: A hybrid approach,” In *Proceedings of the 18th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, Quebec City, QC, Canada, 8–12 October 2012; pp. 7–12.

[75] L. D. A. Pimentel, R. Chevrier, S. Hanafi, J. Rodriguez, “Solving the Train Timetabling Problem, a mathematical model and a genetic algorithm solution approach,” *6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, Mar 2015, Tokyo, Japan.

[76] O. Gholami, Y. N. Sotskov, “Train routing and timetabling via a genetic algorithm,” *IFAC Proceedings*, vol. 45, no. 6, 2012, https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00294.

[77] X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning, T. Tang, “An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy formetro systems,” *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.* vol. 57, 2015, p.p. 13–29. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.05.002

[78] X. Yang, J. Wu, H. Sun, Z. Gao, H. Yin, Y. Qu, “Performance improvement of energy consumption, passenger time and robustness in metro systems: A multi-objective timetable optimization approach,” *Comput. Ind. Eng*, vol. 137 2019, p.p. 106076. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106076

[79] R. Zhang, S. Yin, M. Ye, Z. Yang, S. He, “A Timetable Optimization Model for Urban Rail Transit with Express/Local Mode,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, p.p. 15, 2021, https://doi.org/10.1155/2021/5589185.

[80] X. Li, H. K. Lo, “An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations,” *Transp. Res. B, Methodol.*, vol. 64, pp. 73–89, Jun. 2014.

[81] X. Li, H. K. Lo, “Energy minimization in dynamic train scheduling and control for metro rail operations,” *Transp. Res. B, Methodol*., vol. 70, pp. 269–284, Dec. 2014.

[82] L. Zhao, K. Li, S. Su, “A multi-objective timetable optimization model for subway systems,” In *Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation*, vol. 287, 2014, pp. 557–565. doi:10.1007/978-3-642-53778-3_55

[83] Z. Le, K. Li, J. Ye, X. Xu, “Optimizing the train timetable for a subway system,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit*, vol. 229, 2015, p.p. 852–862.

[84] L. Allen, S. Chien, “Application of regenerative braking with optimized speed profiles for sustainable train operation,” *J. Adv. Transp*, vol. 2021, 2021, p.p. 12. https://doi.org/10.1155/2021/8555372.

[85] S. Rastegarzadeh, M. Mahzoon, H. Mohammadi, “A novel modular designing for multi-ring flywheel rotor to optimize energy consumption in light metro trains,” *Energy*, vol. 206, 2020, p.p. 2020. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118092.

[86] Y. Huang, L. Yang, T. Tang, Z. Gao, F. Cao, K. Li, “Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: A dynamic programming based approach. Comput,” *Ind. Eng*, vol. 126, 2018, p.p. 149–164. https://doi.org/10.1016/J.cie.2018.09.024.

[87] I. Radaš, I. Župan, V. Šunde, Ž. Ban, “Route Profile Dependent Tram Regenerative Braking Algorithm with Reduced Impact on the Supply Network,” *Energies* vol. 14, 2021, p.p. 2411. https://doi.org/10.3390/en14092411.

[88] Z. Xiao, H. Chen, J. Guo, Q. Wang, P. Sun, X. Feng, "Joint optimization of speed and voltage trajectories for hybrid electric trams," *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 57, 2021, p.p. 6427–6439. https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3102881.

[89] D. He, Y. Yang, Y. Chen, J. Deng, S. Shan, J. Liu, X. Li, "An integrated optimization model of metro energy consumption based on regenerative energy and passenger transfer," *Appl. Energy*, vol. 264, 2020, p.p. 114770. https://doi.org/10.1016/J.apenergy.2020.114770.

[90] D. Roumpekas, C. Iliopoulou, K. Kepaptsoglou, "Metro Speed Profile Optimization Considering Passenger Comfort: Model and Application," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2676, 2022, p.p. 6015-626, https://doi.org/10.117/03611981221096443.

[91] Y. Huang, H. Yu, J. Yin, H. Hu, S. Bai, X. Meng, M. Wang, "An integrated approach for the energy-efficient driving strategy optimization of multiple trains by considering regenerative braking," *Comput. Ind. Eng.* Vol. 126, 2018, p.p. 399–409. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.041

[92] Y. Yue, S. Wang, L. Zhou, L. Tong, M.R. Saat, "Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol*, vol. 63, 2016, p.p. 126–146. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.007

[93] X. Zhou, M. Zhong, "Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds," *Transp. Res. Part B Methodol*, vol. 41, 2007, p.p. 320–341. https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.05.003.

[94] R. J. Hill, "Electric railway traction. I. Electric traction and DC traction motor drives," in *Power Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 47-56, Feb. 1994, doi: 10.1049/pe:19940105.

[95] C. Goodman, "Overview of electric railway systems and the calculation of train performance," *IET Professional Development course on Electric Traction Systems*, Manchester, 2008, pp. 1-24, doi: 10.1049/ic:20080503.

[96] V.N. Rangelov, "Gradient modelling with calibrated train performance models," *Thirteenth International Conference on Design and Operation in Railway Engineering (COMPRAIL 2012)*, New Forest, United Kingdom, 11-13 September 2012.

[97] S. Su, T. Tang, Y. Wang, "Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model," *Energies* vol. 9,2016, p.p. 105. https://doi.org/10.3390/en9020105.

[98] Z. Tian, S. Hillmansen, C. Roberts, P. Weston, N. Zhao, L. Chen, et al., "Energy evaluation of the power network of a DC railway system with regenerating trains," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 6, pp. 41-49, 2016. https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0025.

[99] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, 2014, pp. 509-524. https://doi.org/10.1016/j.enconman. 2014.01.060.

[100] H. Douglas, C. Roberts, S. Hillmansen, F. Schmid, "An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, 2015, pp. 1149-1165. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.053.

[101] Q. Gu, T. Tang, and Y.-D. Song, "A Survey on Energy-Saving Operation of Railway Transportation Systems," *Measurement and Control*, vol. 43, 2010, pp. 209-211. https://doi.org/10.1177/002029401004300704.

[102] R. D. White, "DC electrification supply system design," in *Railway Electrification Infrastructure and Systems, 4th IET professional Development Course* on, 2009, pp. 44-69. Doi:10.1049/ic.2015.0330

[103] S. Hillmansen, "Sustainable traction drives," in *5th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS 2011)*, London, 2011, pp. 199-209, doi: 10.1049/ic.2011.0188.

[104] R. J. Hill, "Electric railway traction. II. Traction drives with three-phase induction motors," *Power Engineering Journal*, vol. 8, 1994, pp. 143-152.

[105] S. Lu, (2011). *Optimising power management strategies for railway traction systems*. (Doktora tezi), University of Birmingham. References 178.

[106] H. Douglas, C. Roberts, S. Hillmansen, F. Schmid, "An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, 2015, pp. 1149-1165. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.053.

[107] W. Gunselmann, "Technologies for increased energy efficiency in railway systems," *European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 2005, pp. 10 pp.-P.10, doi: 10.1109/EPE.2005.219712.

[108] M. Sertsöz, (2020). *Raylı sistemlerde enerji verimliliği yöntemleri*. Ankara: Pegem Akademi.

[109] Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen, C. J. Goodman, "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways," *Electric Power Applications, IET*, vol. 1, 2007, pp. 675-682.

[110] P. Johnson and S. Brown, "A simple in-cab schedule advisory system to save energy and improve on-time performance," *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, Birmingham, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1049/ic.2010.0021.

[111] C. S. Chang, D. Y. Xu, "Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 147, 2000, pp. 206-212.

[112] W. Carvajal-Carreño, A. P. Cucala, A. Fernández-Cardador, "Fuzzy train tracking algorithm for the energy efficient operation of CBTC equipped metro lines," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 53, 2016, pp. 19-31.

[113] S. Su, T. Tao, L. Chen, B. Liu, "Energy-efficient train control in urban rail transit systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 229 no. 4, 2015, p.p. 446-454. doi:10.1177/0954409713515648.

[114] X. Feng, H. Zhang, Y. Ding, Z. Liu, H. Peng, B. Xu, "A Review Study on Traction Energy Saving of Rail Transport," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2013, 2013, p.p. 1-9. Doi:10.1155/2013/156548

[115] H. Liu, B. Mao, Y. Ding, W. Jia, S. Lai, "Train Energy-saving Scheme with Evaluation in Urban Mass Transit Systems," *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 7, 2007, pp. 68-73.

[116] X. Hu, J. Zhang, "Research on Optimal Scheme for Energy - saving Slope of Urban Rail Transit," *Journal of Railway Engineering Society*, vol. 30, 2013, pp. 27-30,.

[117] T. Xin et al., "Railway vertical alignment optimisation at stations to minimise energy," *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, 2014, pp. 2119-2124, doi: 10.1109/ITSC.2014.6958016.

[118] ATOC, Energy Efficiency for Railway Managers, Editors: Bontinck W., Cox H., Process, Power, People, 1nd edition, UIC, Paris, 20-56, 2008.

[119] V. Arlı, (2010). *Kent içi Raylı Sistemler*, İstanbul, İstanbul Ulaşım A.Ş. Teknik, 2010, 2, 15-18.

[120] M. Kondo, M. Miyabe, S. Manabe, "Development of a high efficiency induction motor and the estimation of energy conservation effect," *Quarterly Report of RTRI*, vol. 55, 2014, pp. 138-143.

[121] H. Douglas, F. Schmid, C. Roberts, S. Hillmansen, "Evaluation of Permanent Magnet Motor energy saving technology for different types of railways," in *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 2016, pp. 123-129.

[122] B. Chang-han, J. Dong-uk, K. Yong-gi, C. Se-ky, M. Jai-kyun, "Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations," in *7th Internatonal Conference on Power Electronics*, 2007, pp. 801-805.

[123] A. Rufer, P. Barrade, D. Hotellier, "Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks," *EPE Journal (European Power Electronics and Drives Journal)*, vol.14, 2003, doi: 10.1080/09398368.2004.11463573.

[124] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, "Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 75, 2013, pp. 374-388.

[125] M. Peña-Alcaraz, A. Fernández, A. Cucala, Paloma., A. Ramos, R. Pecharromán, "Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 226, 2012, pp. 397-408.

[126] Y. Xin, L. Xiang, G. Ziyou, W. Hongwei, T. Tao, "A cooperative scheduling model for timetable optimization in subway systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst*., vol. 14 no., 2013, pp. 438–447.

[127] M. Dalyan, (2011). *Raylı Sistemlerde Enerji Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar*, (Yüksek Lisans Tezi) YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[128] A. M. Gee, R. W. Dunn, “Analysis of Trackside Flywheel Energy Storage in Light Rail Systems,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 9, pp. 3858-3869, Sept. 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2361865.

[129] C. Sumpavakup, T. Ratniyomchai, T. Kulworawanichpong, “Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy,” *J. Mod. Transport*. vol. 25, 2017, pp. 223–235. https://doi.org/10.1007/s40534-017-0146-6

[130] B. Zhang, S. Lu, Y. Peng, C. Wu, G. Meng, M. Feng, B. Liu, “Impact of On-Board Hybrid Energy Storage Devices on Energy-Saving Operation for Electric Trains in DC Railway Systems,” *Batteries*, vol. 8, no. 10, 2022, pp. 167. https://doi.org/10.3390/batteries8100167

[131] W. Kampeerawat, T.Koseki, “A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system,” *Energy Procedia*, vol. 138, 2017, pp.795-800, ISSN 1876-6102, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.070.

[132] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, P. Tricoli, “Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways,” *Electrical Systems in Transportation, IET*, vol. 4, 2014, pp. 9-20.

[133] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, P. Tricoli, “Energy loss minimisation by optimal design of stationary supercapacitors for light railways,” in *Clean Electrical Power (ICCEP), International Conference* on, 2015, pp. 511-517.

[134] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin, E. Dahlquist, “Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation,” *Energy Procedia*, vol. 105, 2017, pp. 4561-4568, ISSN 1876-6102, https://doi.org/10.1016/j.egypro. 2017.03.980.

[135] X. Liu, K. Li, “Energy storage devices in electrified railway systems: A review, Transportation Safety and Environment,” vol. 2, no. 3, 2020, pp. 183–201, https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016.

[136] X. Li, X. Yang, “A stochastic timetable optimization model in subway systems,” *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 21, 2013, pp. 1-15.

[137] S. Su, T. Tang, C. Roberts, “A Cooperative Train Control Model for Energy Saving," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 2, 2015, pp. 622-631, doi: 10.1109/TITS.2014.2334061.

[138] G. Scheepmaker, R. M. P. Goverde, “The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements,” *J. Rail Transp. Planning Manage*., vol. 5, no. 4, 2015, pp. 225–239.

[139] T. Albrecht, S. Oettich, “A new integrated approach to dynamic schedule synchronization and energy-saving train control,” *WIT Trans. Built Environ*., vol. 61, 2002, no. 318.

[140] X. Xu, K. Li, X. Li, “A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption,” *J. Adv. Transp.* vol. 50 no. 1, 2015, pp. 69–95.

[141] S. Açıkbaş M.T. Söylemez, "Energy loss comparison between 750 V DC and 1500 V DC power supply systems using rail power simulation," *Int. Conf. on Comp. Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Transit Systems (COMPRAIL 2004)*, 2004, Dresden, Almanya.

[142] EPİAŞ, https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/piyasalar/gop/ptf.xhtml, 26.04.2023.

[143] EPDK, https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari, 26.04.2023.

[144] S. Açıkbaş, M.T. Söylemez, "Raylı toplu taşımda enerji verimliliği ve katener sistemlerinin paralellenmesi," *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 2005.

[145] T. Suzuki, "DC Power Supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes," *IEE Proc*, vol. 129, 1982, pp. 18-26.

[146]A. Romo, H. Ibaiondo, "Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid," *9th World congress on railway research*, 6-8 September 2010, Ohrid.

[147] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation," *9th World congress on railway research*, 19-21 October 2010, Bologna.

[148] J. Jyh-Cherng, C. En-Fu, "models for estımatıng energy consumptıon of electrıc traıns," *Journal of Society of Transportation Studies*, vol. 6, 2005, pp. 278-291.

[149] A. Gonzalez-Gil, R. Palacin, P. Batty, J.P. Powell, J.P., "A system aproach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, 2014, pp. 509-524.

[150] Süperiletkenlik, https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCperiletkenlik, 26.04.2023.

[151] S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh, Y. Noguchi, T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, M. Ikeuchi, H. Yaguchi, ve T. Hara, "Status of superconducting cable demonstration project in Japan," *IEEE Trans. Appl. Supercond*, vol. 21, pp. 967-971.

[152] W. Zhang, J. Wei, "The experimental research on Beijing subway air-conditioning system energy-saving," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 170, 2012, pp. 2494–2498.

[153] A. Onan, (2013). *Kümeleme analizinde melez evrimsel algoritmalar üzerine bir çalışma*, (Yüksek Lisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

[154] A. Onan, "Metasezgisel Yöntemler ve Uygulama Alanları," *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 17, no. 2, pp. 113-128.

[155] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, A.H. Gandomi, "Marine predator algorithm, a nature-inspired metaheuristic," *Int J Expert Syst App*l, vol. 52, 2020, pp. 113377. https,//doi.org/10.1016/j.eswa.2020.11337.

[156] P. G. Howlett, P. J. Pudney, and V. Xuan, "Brief paper: Local energy minimization in optimal train control," *Automatica*, vol. 45, 2009, pp. 2692-2698.

[157] Introduction to Genetic Algorithms with Java Applets, http://www.pi.zarz.agh.e du.pl/tematy/EA/teksty/ga.pdf, 11.09.2013.

[158] G. Mitsuo ve R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design (Engineering Design and Automation)," *Wiley-Interscience*. 1997, ISBN: 0471127418.

[159] D. Akbulut, "Evrimsel tasarım yöntemi ve yaratıcılığın süreç içerisindeki yeri," *Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, vol. 2, 2008, pp. 21-33.

[160] S. Biroğul, ve U. Güvenç, "Genetik algoritma ile çözümü gerçekleştirilen atölye çizelgeleme probleminde ürün sayısının etkisi," *Akademik Bilişim*, Kütahya, pp. 1-10, 2007.

[161] S.N. Sivanandam, S.N. Deepa, "Introduction to Genetic Algorithm," Berlin: SpringerVerlag.

[162] R.L. Haupt, S.E. Haupt, "Practical genetic algorithms," *Second Edition, Wiley-Interscience*, New Jersey, 2003, Doi:10.1002/0471671746.

[163] G. Syswerda, "Uniform crossover in genetic algorithms," In *proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, U.S.A., pp. 2-9, 1989.

[164] J.E. Baker, "Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms," *Proc.1st Int. Conf. Genetic Algorithms and their Applications*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, pp.100-101, 1985.

[165] GA- Genetic Algorithm, https://bilalsaim.com/yapay-zeka/genetik-algoritmasi-ga-genetic, 11.05.2023.

[166] K. Keskin, (2016). *Tren dinamiğinin enerji-optimal denetimi*, (Doktora tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Kontrol ve Kumanda Bilim Dalı. https://avesis.ogu.edu.tr/yonetilen-tez/34824699-2474-488b-a760-bb0d4e73f4dc/tren-dinamiginin-enerji-optimal-denetimi

[167] A. Elen, E. Avuçlu, "Genetik Algoritmada Çaprazlama Yöntemleri," *Geleceğin Dünyasında Bilimsel Ve Mesleki Çalışmalar*, pp.1-18, 2019.

[168] Q. Pu et al., "Integrated Optimal Design of Speed Profile and Fuzzy PID Controller for Train With Multifactor Consideration," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 152146-152160, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3017193.

[169] V.D. Martinis, M. Gallo, "Models and methods to optimise train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case," *Procedia Soc*. vol. 87, 2013, pp. 222-233. https://doi.org/10.1016/J.sbspro.2013.10.606.

[170] S. Acikbas, M.T. Soylemez, "Comparison of main energy efficiency strategies implemented in a communication based train control system,"

Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA, Helsinki, Finland, 27-30 Apr 2020.

[171] J. Ning, F. Long, "Studies on the optimization of train using improved genetic algorithm," *IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China, 25-26 March 2017.

[172] Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias ve C. Roberts, "Reduction of train and net energy consumption using genetic algorithms for Trajectory Optimisation," *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, Birmingham, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1049/ic.2010.0038.

[173] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatti, M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," In *Science is currently published by American association for the advancement of science*, vol 220, no. 4598, 1983, pp. 671–680.

[174] Simulated Annealing Overview, https://www.researchgate.net/publication /238690391_Simulated_annealing_overview, 11.09.2013.

[175] D. Henderson, S.H. Jacobson, ve A.W. Johson, "The Theory and Practice of Simulated Annealing," *Handbook of Metaheuristics*, 2006, pp. 287-319, doi: 10.1007/0-306-48056-5_10.

[176] R.W. Eglese, "Simulated Anneling: A Tool for Operational Research," *European Journal of Operational Research*, vol. 46, 1990, pp. 271-281. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90001-R.

[177] L.M. Rasdi Rere, M. Ivan Fanany ve A. Murni, "Application of metaheuristic algorithms for optimal smartphone-photo enhancement," In: *The 3th Global Conference of Consumer Electronic (GCCE)*, Japan, 2014, pp.542 – 546. doi: 10.1109/GCCE.2014.7031307.

[178] R. C. Eberhart, ve J. Kennedy, "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory," *in Symposium on Micro Machine and Human Science*. Japan: Nagoya, Piscataway, NJ, 1995.

[179] Ren, X., Huang Y., ve Zhang, M. "Train timetable optimization research based on PSO energy-efficient operation strategy," *Proceedings 2014 International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICCSS)*, pp. 134-138, 2014, doi: 10.1109/ICCSS.2014.6961830.

[180] Particle Swarm Optimization, http://www.yazilimmutfagi.com/index.php/ 2009/06/20/parcacik-suru-optimizasyonu-particle-swarm-optimization/, 15.07.2023.

[181] M., Taherkhani, ve R. Safabakhsh, "A novel stability-based adaptive inertia weight for particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*. vol. 38, 2016, pp. 281–295. doi:10.1016/j.asoc.2015.10.004

[182] Evers, G. (2009). *An Automatic Regrouping Mechanism to Deal with Stagnation in Particle Swarm Optimization*, (Yüksek lisans tezi) The University of Texas - Pan American, Department of Electrical Engineering.

[155] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, ve A.H. Gandomi, "Marine predator algorithm, a nature-inspired metaheuristic," *Int J Expert Syst Appl*, vol. 52, 2020, pp. 113377. https,//doi.org/10.1016/j.eswa.2020.11337

[183] G.M. Viswanathan, S.V. Buldyrev, S. Havlin, M.G. da Luz, E.P. Raposo, ve H.E. Stanley, H. E. "Optimizing the success of random searches," *Nature*, vol. 401, 1999, pp. 911–914. https://doi.org/10.1038/44831

[184]F. Bartumeus, M.G.E. da Luz,G.M. Viswanathan, ve J. Catalan, J. "Animal Search Strategies: A Quantitative Random-Walk Analysis," *Ecology*, vol. 86, 2005, no. 11, pp. 3078–3087. https://doi.org/10.1890/04-1806.

[185] N.E. Humphries, et al. "Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators," *Nature*, vol. 465, no. 7301, 2010, pp. 1066. https://doi.org/10.1038/nature09116.

[186] G.M. Viswanathan, E.P. Raposo ve M.G.E. da Luz, "Lévy flights and superdiffusion in the context of biological encounters and random searches," *Physics of Life Reviews*, vol. 5, no. 3, 2008, pp. 133–150. https://doi.org/10.1016/j.plrev.2008.03.002.

[187] D.W. Sims, et al. "Scaling laws of marine predator search behaviour," *Nature*, vol. 451, no. 7182, 2008, pp. 1098. https://doi.org/10.1038/nature06518

[188] F. Bartumeus, J. Catalan, U.L. Fulco, M.L. Lyra, ve G.M. Viswanathan, "Optimizing the encounter rate in biological interactions: Lévy versus Brownian strategies," *Physical Review Letters*, vol. 88, no. 9, 2002, pp. 097901. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.097901

[189] A. Einstein, "Investigations on the Theory of the Brownian Movement," *Dover*, 1956.

[185] Humphries, N. E., Queiroz, N., Dyer, J. R. M., Pade, N. G., Musyl, M. K., Schaefer, K. M., Fuller, D. W., Brunnschweiler, J. M., Doyle, T. K., Houghton, J. D. R., Hays, G. C., Jones, C. S., Noble, L. R., Wearmouth, V. J., Southall, E. J., & Sims, D. W. (2010). Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators. Nature, 465(7301), 1066. https://doi.org/10.1038/nature09116

[190] R.N. Mantegna, "Fast, accurate algorithm for numerical simulation of L\'evy stable stochastic processes," *Physical Review E*, vol. 49, no. 5, 1994, pp. 4677–4683. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.4677

[191] X. Yang, "Engineering optimisation: an introduction with metaheuristic applications," *John Wiley and Sons*, 2010.

[193] J.D. Filmalter, L. Dagorn, P.D. Cowley, ve M. Taquet, "First Descriptions of the Behavior of Silky Sharks, Carcharhinus Falciformis, Around Drifting Fish Aggregating Devices in the Indian Ocean," *Bulletin of Marine Science*, vol. 87, no. 3, 2011, pp. 325–337. https://doi.org/10.5343/bms.2010.1057

[194] Charnes, A., Miller, M. H. "A model for the optimal programming of railway freight train movements*," Management Science*, vol. 3, no. 1, 1956, pp. 74 - 92.

[195] Lee, C. K., Chen, C. H. "Scheduling of train driver for Taiwan railway administration," *Journal of Eastern Asia Society of Transportation Studies*, vol. 5, 2003, pp. 292 -306.

[196] Ramos, A., Pena, M. T., Fernández, A., & Cucala, P. "Mathematical programming approach to underground timetabling problem for maximizing time synchronization," *Dirección y Organización*, vol. 35, 2008, pp. 88-95.

[197] Dündar, S., Şahin, İ. “Train re -scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single - track railways,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 27, 2013, pp. 1 -15.

[198] Martin, P. “Train performance and simulation,” *Winter Simulation Conference Proceedings. 'Simulation - A Bridge to the Future' (Cat. No.99CH37038)*, Phoenix, AZ, USA, 1999, pp. 1287-1294 vol.2, doi: 10.1109/WSC.1999.816855.

[199] Sanchis, I.V., Zuriaga, P.S. “An Energy-efficient Metro Speed Profiles for Energy Savings: Application to the Valencia Metro,” *Transportation Research Procedia*, vol.18, 2016, pp. 226-233. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.031.

A
EK

METRO İSTANBUL A.Ş.
Yavuz Selim Mah. Metro Sok. No: 3 34220 ESENLER/İSTANBUL
T: 0 (212) 568 99 70 F: 0 (212) 568 89 00
www.metro.istanbul

Sayı : 28016334.2022.230-15/E.01107 22.03.2022
Konu : Doktora Projesi Destek Hakkında

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜNE

Metro İstanbul A.Ş.'de görevli Ahmet YILDIZ, kurumumuz Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü bünyesinde devam eden; YT210003 Tren Hız Profillerinin Optimizasyonu Projesi kapsamında görevlidir.

Kurum olarak Yüksek Lisans ve Doktora çalışmalarında vermiş olduğumuz desteği kendisine ait Doktora ve bilimsel yayın çalışmalarında da sağlayacağımızı, proje kapsamında elde ettiği bilgi ile verileri çalışmalarında kullanmasına müsaade edeceğimizi bilgilerinize arz ederiz.

e-imza *e-imza*

Arge Merkezi Müdürü Genel Müdür Yardımcısı

Bu belge, 5070 sayılı Elektronik İmza Kanununun 5. maddesi gereğince güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır. Bu belgenin içeriğindeki imza bilgilerine erişebilmek ve doğrulamak için https://yazilim.kamusm.gov.tr/?q=node/143 adresindeki uygulamayı kullanabilirsiniz.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. A. Yildiz, O. Arikan and K. Keskin, "Validation of The Single Train Simulation Model With a Real-World Case Study," *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Prague, Czech Republic, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9873067.

Makaleler

1. A. Yildiz, O. Arikan and K. Keskin, "Traction energy optimization considering comfort parameter: A case study in Istanbul metro line," Electric Power Systems Research, vol. 218, 2023, pp. 109196. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109196.

2. Yildiz, A., ARIKAN, O., & KESKİN, K., (2023). Energy-Efficient Train Operation Optimization in Istanbul Metro Network Considering Variable Passenger Numbers. Transportation Research Record.