




Şehir İçi Raylı Sistem Araçlarında Verimli Dinamik Sürüş Tekniği Modellemesi ve Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması (ACOR) ile Optimizasyonu

Ramazan GÜNGÜNEŞ^{1*}, Volkan ATEŞ², Ertuğrul ÇAM³

Öz

Nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu şehirlerde raylı sistem (RS) taşımacılığına olan talep sürekli artmaktadır. Artan taleple birlikte bu sistemlerde enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesi neredeyse zorunlu hale gelmiştir. Verimli enerji yönetimi hem karbon emisyonlarını hem de işletme maliyetlerini azaltacaktır. Rejeneratif frenleme (RF) ile enerji üretme kabiliyetine sahip RS araçlarda, üretilen RF enerjisinin sisteme en uygun şekilde entegre edilmesi enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Bu amaçla, bu çalışma RF enerjisi ile desteklenen enerji verimli dinamik sürüş tekniği (EVDST) modelini kullanarak raylı sistemlerde enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesini amaçlamaktadır. Modelin optimum tasarımı, RS araçları için yatay kurplu bir hat boyunca boşa çalışma için en uygun hız profillerini ve başlangıç konumlarını seçmeyi ve maksimum enerji verimliliği elde etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen model, minimum yolculuk süresi (MYS), minimum çekiş enerjisi tüketimi (MÇET) ve maksimum rejeneratif frenleme enerjisi üretimi (MRFEÜ) gibi tek amaçlı fonksiyonların optimizasyonunu içermektedir. Ayrıca, önerilen model MÇET/MRFEÜ, MÇET/MYS, MRFEÜ/MYS ve MÇET/MRFEÜ/MYS gibi çok amaçlı fonksiyonların optimizasyonunu da kapsamaktadır. Tek amaçlı ve çok amaçlı fonksiyonlar, operasyonel kısıtlamaları ve optimum çalışma bölgelerini keşfetmek için senaryo tabanlı bir şekilde Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması (ACOR) kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda MRFEÜ/MÇET oranında %53,459'luk bir verimlilik elde edilmiştir. Önerilen senaryo tabanlı modelde MÇET için %32,832'lik bir oran elde edilirken, MRFEÜ için %80,060'lık bir oran elde edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile literatürdeki sürüş modellerine alternatif olarak kurp yapısının sistem dinamiğine etkisi artırılmış ve daha gerçekçi bir sürüş modeli geliştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca kullanılan yapay zeka optimizasyon tekniği ile literatüre sürüş modeli geliştirilmesi noktasında farklı bir bakış açısı sunarak katkıda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması, Enerji Verimli Sürüş Tekniği, Rejeneratif Frenleme Enerjisi, Doğa Esinli Optimizasyon, Raylı Sistem Enerji Verimliliği, Raylı Sistem Dinamik Sürüş Tekniği

Efficient Dynamic Driving Technique Modeling in Urban Rail Vehicles and Optimization with Continuous Time Ant Colony Algorithm (ACOR)

Abstract

The demand for rail systems (RS) transportation is constantly increasing in cities with high population density. Along with the growing demand, the efficient management of energy in these systems has become almost mandatory. Efficient energy management will reduce both carbon emissions and operational costs. In RS vehicles equipped with regenerative braking (RB) energy generation capability, the optimal integration of the produced RB energy into the system contributes to energy efficiency. For this purpose, this study aims to efficiently manage energy in RS using the energy-efficient dynamic driving technique (EEDDT) model supported by RB energy. The optimal design of the model aims to select the most suitable speed profiles and starting positions for coasting running along a horizontally curved track for RS vehicles, achieving maximum energy efficiency. The proposed model includes the optimization of single-objective functions such as minimum travel time (MTT), minimum traction energy consumption (MTEC), and maximum regenerative braking energy production (MRBEP). Additionally, the proposed model also encompasses the optimization of multi-objective functions such as MTEC/MRBEP, MTEC/MTT, MRBEP/MTT, and MTEC/MRBEP/MTT. The single-objective and multi-objective functions were optimized using the Continuous Time Ant Colony Optimization Algorithm (ACOR) in a scenario-based manner to explore the operational constraints and optimum working regions. As a result of the study, an efficiency of 53.459% was achieved in the MRBEP/MTEC ratio. For the proposed scenario-based model, a ratio of 32.832% was obtained for MTEC, and a ratio of 80.060% was achieved for MRBEP. As an alternative to the driving models in the literature, the effect of the curve structure on the system dynamics has been increased and a more realistic driving model has been developed. In addition, with the artificial intelligence optimization technique used, it has contributed to literature by offering a different perspective on driving model development.

Keywords: Continuous Time Ant Colony Algorithm, Energy Efficient Driving Technique, Regenerative Braking Energy, Nature Inspired Optimization, Rail System Energy Efficiency, Rail System Dynamic Driving Technique

¹Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, ramazangungunes@kku.edu.tr

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, volkanates@tarsus.edu.tr

³Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İlkadım/Samsun, ertugrul.cam@samsun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-6722-7275>

²<https://orcid.org/0000-0002-2349-0140>

³<https://orcid.org/0000-0001-6491-9225>

1. Giriş

Dünya genelinde ulaştırma sektörü, üretilen enerjinin yaklaşık %28'ini tüketmektedir (Rodrigue ve ark., 2012). Bu nedenle, ulaşım sektöründe enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesi çok önemlidir. Tüketilen enerjinin yönetilmesi amacı ile farklı çözüm yöntemleri araştırılıp denenmektedir. Bu çözüm yöntemlerinden biri olarak şehir içi toplu ulaşım araç kapasitesinin ve kullanım oranının artırılması ele alınabilir. Şehir içi toplu taşıma sistemlerindeki kapasite artışı sonucunda trafik yoğunluğu, fosil yakıt kullanımı ve karbon emisyonu da düşecektir. Buna karşılık tüketilen enerjinin yönetilmesi gerekliliği daha da önem kazanacaktır.

Yapılan araştırmalarda otomobillerin RS araçlarına oranla yolcu/km başına daha fazla enerji tükettiği görülmüştür (Morea ve ark., 2021). RS taşımacılığı, toplu taşıma sistemleri içerisinde, daha fazla yolcu taşıma kapasitesi ve birim yolcu başına daha uygun maliyetlere sahip olması nedeni ile en popüler ulaşım sistemlerinden biridir (ERRAC, 2017).

Ulaşım talebindeki artış ile birlikte RS araç sayısı ve kapasitesinde de sürekli bir artış olacaktır. Bu durum ise, raylı sistemlerde enerji verimliliğini ve enerji yönetimini önemli bir konu haline getirmektedir. RS taşımacılığında enerji tüketiminin minimize edilmesi amacı ile uygulanan yöntemlerden biri, aracın düşük hızlarda hareket ettirilmesidir. Bu yöntem her ne kadar tüketilen enerji miktarını düşürse de yolculuk süresinin artmasına sebep olur. Yolculuk süresinin artması yolculuk konforu açısından istenmeyen bir durumdur.

RS işletmesinde işletme verimliliğinin artırılması için önerilen bir başka yöntem ise, RF enerjisinin kullanılmasıdır. RF durumunda motorlar, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek jeneratör modunda çalışır. RF ile kazanılan enerji, aracın yerleşik yüklerini beslemek için kullanılabilir. Daha fazla RF enerjisi üretilmesi durumunda üretilen fazla enerji üçüncü raydan bir başka aracın tepe yükünü düşürmek için sisteme verilebilir. Yoğun ulaşımına sahip kısa mesafeli güzergâhlarda ve eğimli yapıya sahip uzun mesafeli güzergâhlarda, hızlanma-frenleme döngüleri sıklıkla tekrarlanır. Bu tekrarlanma sonucunda önemli miktarda RF ile kazanılan yenilenebilir bir enerji ortaya çıkar (Khodaparastan ve ark., 2019).

Literatürde yapılan çalışmalarda, raylı sistemlerde RF enerjisinin yaklaşık %40'a varan bir kısmının geri kazanılabileceği de belirtilmiştir (Bae ve ark., 2007). RF enerjisinden maksimum seviyede faydalanmak için aracın sefer aralıklarının optimize edilmesi de son derece önemlidir. Sefer aralıklarının optimal planlanmadığı bir durumda, kullanılmayan RF enerjisi yakılarak ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Oluşan ısı tünel ve istasyonlarda bulunan havalandırma ve soğutma sistemlerinin daha fazla enerji tüketmesine sebep olmaktadır (González-Gil ve ark., 2014). Bu durum sefer planlamalarının ve rejeneratif enerjinin verimli bir şekilde yönetilememesinden kaynaklanmaktadır. RF enerji verimliliğini artıran bir başka yöntem, RS araç hız eğrilerinin ve hareket sürelerinin

belirlendiği hız profili optimizasyon (HPO) yöntemidir (Fernández ve ark., 2019). Yöntem önceden belirlenmiş bir yolculuk süresi içerisinde optimum enerji tüketimi ile gerçekleştirilen sürüş tekniği olarak özetlenmektedir (Fernández ve ark., 2019). Raylı sistemlerde HPO ve enerji verimliliği 1960'lı yıllardan itibaren dünya genelinde araştırılan bir konudur (Corlu ve ark., 2020; Feng ve ark., 2018; Huang ve ark., 2018; Luan ve ark., 2018; Siefert & Li, 2021; Su ve ark., 2013, 2019). RS aracı belirlenen zamanda başlangıç konumundaki istasyondan hareket etmeli ve belirlenen zamanlarda varış istasyonundaki konumunda durmalıdır. Zira aracın durduğu yerin peron girişinden maksimum 15 cm hata ile örtüşmesi gerekir (Xing ve ark., 2023). Bu sebeple HPO yöntemi aracın istasyondan kalkış, hedef istasyona varış ve istasyonda bekleme sürelerinin sürüş öncesinde belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Yöntem aynı zamanda yolculuk esnasında RS araç sürücüsüne çeşitli önermeler getiren ve enerji verimliliğine katkı sağlayan Sürücü Yardımcı Sistemlerin (SYS) geliştirilmesine de zemin oluşturmaktadır (Zhang ve ark., 2019).

Raylı sistemlerde enerji verimliliğine yönelik ilk çalışmalar, 1985 yılında Asnis ve arkadaşları ile başlamıştır (Asnis ve ark., 1985). Gordon ve Lehler yaptıkları çalışmada RS araçlarının koordineli bir şekilde çalışmasının RF enerjisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Gordon & Lehrer, 1998). Yang ve arkadaşları, aynı istasyon üzerindeki zıt yönlü raylı sistem araçları yerine, aynı yönlü araçlar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çalışmada araçların hızlanma ve frenleme zamanlarının örtüşme durumlarını incelemiştir. (X. Yang ve ark., 2013). Yang ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bir başka çalışmada değişken yolcu sayısına bağlı gecikme sürelerini ve toplam yolculuk sürelerini ele almışlardır. Çalışmada Genetik Algoritma (GA) ile zaman çizelgeleme tabloları oluşturulmuş ve yolculuk süresindeki azalmalar ele alınmıştır (L. Yang ve ark., 2008).

Çalışmamız, RS taşımacılığında EVDST modeli üzerine odaklanmaktadır. Minimum çekiş enerjisi tüketimi (MÇET), maksimum rejeneratif frenleme enerjisi üretimi (MRFEÜ) ve minimum yolculuk süresi (MYS) kısıtlamaları dahilinde RS araçlarının hız/konum eğrilerinin optimizasyonu amaçlanmaktadır. Yatay kurptan oluşan bir hatta, hız/konum ve boşta gitme aralıkları belirlenmiştir.

Çalışmamız gerçek sistemlere daha yakın olması açısından yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık, hıza bağlı sürtünme, pozitif eğim ve yatay bir kurp varlığında ele alınmıştır. Bu kapsamda sürüş hızı, kurp giriş hızı ve RF enerji oluşumunu destekleyecek boşta gitme konum aralıklarının optimal seçimi ACOR algoritması ile belirlenmiştir. Belirlenen bu durum ve limit seçimlerinin optimizasyonu sonucu EVDST modeli geliştirilmiştir. Çalışmaya ilave edilen yatay kurp dinamik sürüş tekniği durum sayısının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Kurp varlığı aynı zamanda RF enerjisi oluşumunu destekleyecek boşta gitmeye başlama noktalarının belirlenmesinde de etkilidir. Gerçek sistemlere daha yakın dinamik hesaplamalarının kullanılması ve yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık değişiminin etkisi modele ayırt edici bir özellik kazandırmaktadır. Çalışmamız bu kapsamda değerlendirildiğinde, birden fazla limit sınırlamasının ve özellikle değişken yatay kurp hızlarının

etkisinin ele alındığı yeni bir EVDST özelliği taşımaktadır. Model raylı sistem aracının genel hareket evrelerini kapsayan, kurp öncesi 46 ve kurp sonrası 42 farklı senaryodan oluşmaktadır. Bu senaryo kombinasyonları sonucu toplamda 1932 senaryo tabanlı sürüş tekniği gerçekleştirilmiştir. Belirlenen aralıklar için amaç fonksiyonları tek kararlı ve çok kararlı olarak oluşturulmuştur. Tek kararlı amaç fonksiyonları MYS, MÇET ve MRFEÜ, çok kararlı amaç fonksiyonları MÇET/MYS, MRFEÜ/MYS, MÇET/MRFEÜ ve MÇET/MRFEÜ/MYS karşılaştırmalarından oluşmaktadır.

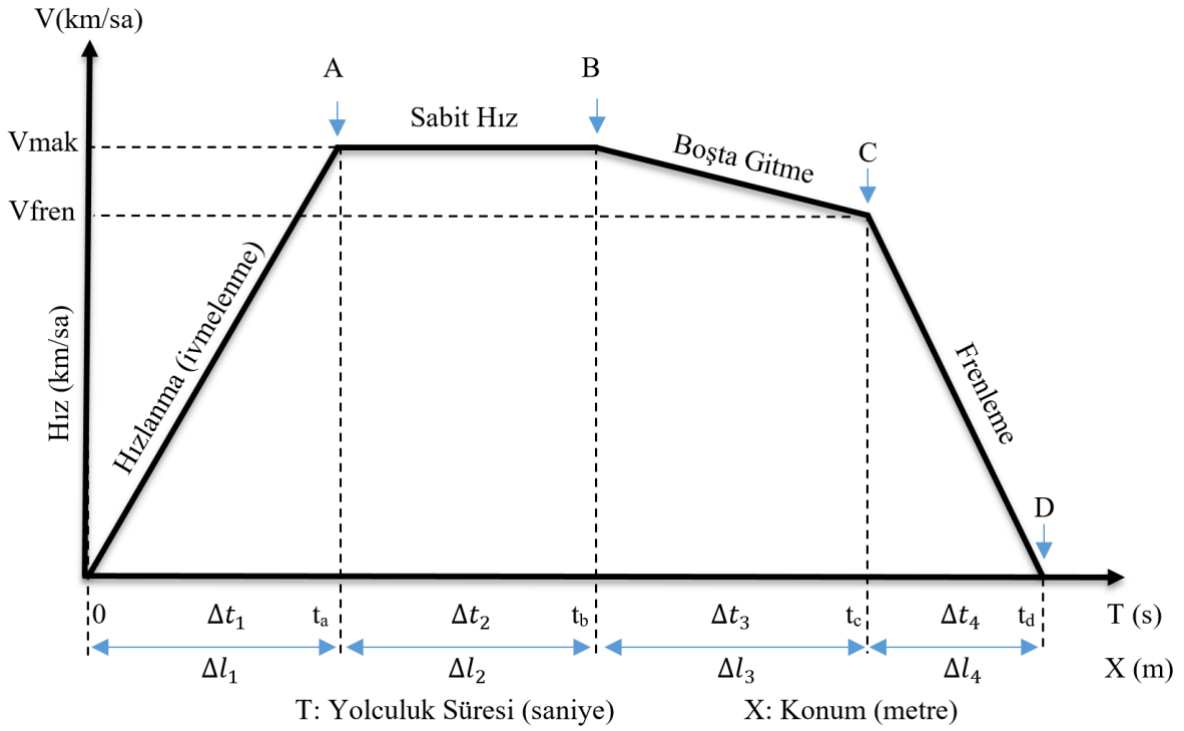
Amaç fonksiyonlarının optimal değerleri ve pareto optimal çalışma sınır koşulları ACOR ile optimize edilmiştir. Önerilen EVDST modeli ile raylı sistemlerde hız/konum kararlılığı, enerji verimli yolculuk seferlerinin oluşturulması, yolculuk süresinin öncesinden tespit edilmesi, kısıtlanan yolculuk süresindeki en verimli sürüş tekniğinin belirlenmesi ve RS aracının varış istasyonunda minimum hata ile durması da sağlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

RS aracı sürüş teknikleri üzerine yapılan çalışmalarda, aracın hız ve yolculuk süresi kısıtlamaları ile başlangıç istasyonundan varış istasyonuna ulaştırılması hedeflenmektedir. Şehir içi RS aracı olan tramvaylar genelde 1.1 m/s^2 gibi bir ivme ve ortalama 20 km/h ile 30 km/h arasında değişen işletme hızlarında kullanılırlar. Güvenli duruş mesafesi ya da kurp bölgesi gibi yavaşlaması gereken bölgelere yaklaştıklarında ise genelde 1.3 m/s^2 gibi bir ivme ile hızlarını azaltmaya başlarlar (Khodaparastan ve ark., 2019). Hızlanma-yavaşlama döngüsü ile birlikte RF yeteneğine sahip araçlar yolculuk sırasında RF enerjisi üretebilir (Scheepmaker ve ark., 2017).

Üretilen bu enerji optimal sürüş teknikleri ile desteklenerek daha verimli hale getirilebilir. Bir RS aracının hareket evreleri genel olarak Şekil-1'de görüldüğü gibidir. Hızlanma evresinde yüksek miktarda enerji tüketilir. Seyir evresinde hızlanma evresinden daha düşük bir enerji tüketimi gerçekleşir. Boşta gitme evresinde RF yeteneğine sahip araçlarda enerji üretilir. Frenleme evresinde enerji tüketimi gerçekleşmez (Chen ve ark., 2005). Bu evreler çerçevesinde farklı sürüş teknikleri ile verim artırılabilir (Scheepmaker ve ark., 2017).



Şekil 1. Raylı sistem aracı hız profili (Scheepmaker ve ark., 2017)

Şekil-1’de görüldüğü gibi RS aracı 0-A arasında “a” ivmesi ile Δt_1 süresince hızlanır. A-B arasında V_{\max} hızında Δt_2 süresince seyrine devam eder. B-C arasında Δt_3 süresince boşta gider. C-D arasında Δt_4 süresince mekanik frenleme yaparak durur. Başlangıç konumundan itibaren hedef istasyona kadar hareket $\Delta t_{\text{toplamlam}}(X) = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4$ süresinde tamamlanır.

Elektrikli bir raylı sistem aracı, harekete başladığı ilk andan itibaren çekiş gücü için enerji talep etmeye başlar. Talep edilen bu enerji ile birlikte hızlanarak kazandığı kinetik enerjiyi, yuvarlanma direnci, aerodinamik sürtünme ve fren sistemi gibi karşı kuvvetlerin üstesinden gelmek için tekrardan kullanır (Guo ve ark., 2017). Talep edilen enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için yuvarlanma direnci, maksimum seyir hızı, frenleme hızı ve yol eğimi gibi değişkenlerin analiz edilmesi gerekmektedir (Bae ve ark., 2007; Scheepmaker ve ark., 2017).

Bu kapsamda yapılan çalışmada, aracın EVDST modeli geliştirilirken, literatürde en çok kullanılan parametreler seçilmiştir. Modelde kullanılan araç teknik özellikleri Tablo-1’de, dinamik sürüş tekniği tanım ve değerleri Tablo-2’de verilmiştir.

Tablo-1: Raylı sistem aracı teknik özellikleri

RS Araç Teknik Özellikleri	Değer	RS Araç Teknik Özellikleri	Değer
Koltuk Kapasitesi	50 Adet	Boş RS Araç Ağırlığı	45.452 kg
Ayakta Yolcu Kapasitesi (8 Kişi/m ²)	240 Yolcu	Tam Kapasite (70kg/yolcu)	65.752 kg
Toplam Yolcu Kapasitesi	290 Yolcu	Hızlanma İvmesi	1.2 m/s ²
Maksimum Hız	70 km/sa	Frenleme İvmesi	2.8 m/s ²
Ortalama İşletme Hızı	25 km/sa	RS Araç Çekiş Gücü	544 kW

Tablo-2. Dinamik sürüş tekniği tanımları ve değerleri

Model Tanımlamaları	Açıklama	Değer aralıkları	
		Maksimum	Minimum
V_{mak_1}	Kurp öncesi maksimum seyir hızı	70 km/h	15 km/h
V_{mak_2}	Kurp sonrası maksimum seyir hızı	70 km/h	15 km/h
V_{fren_1}	Kurp öncesi güvenli duruş frenleme hızı	15 km/h	
V_{fren_2}	Kurp sonrası güvenli duruş frenleme hızı	15 km/h	
R_{kurp}	Kurp çapı	270 m	
k_c giriş	Kurp giriş mesafesi	137 m	
k_c çıkış	Kurp çıkış mesafesi	237 m	
$k_{istasyon}$	İstasyon mesafesi	660 m	
s	Yüzde eğim	4.046	
a_h	Hızlanma ivmesi	1 m/s ²	1.2 m/s ²
a_g	Geçiş hızı hızlanma ivmesi	1 m/s ²	1.2 m/s ²
a_f	Frenleme ivmesi	1 m/s ²	1.4 m/s ²

2.2. Metot

Aşağıda, bu çalışmada kullanılan ve karşılaştırma amaçlı olarak sunulan farklı metotlar sırasıyla açıklanmıştır. Ancak öncesinde önerilen EVDST modelinin oluşturulmasına temel teşkil eden raylı sistem hareket dinamik hesaplamaları verilmiştir.

2.2.1. Raylı Sistem Aracı Hareket Dinamikleri Hesaplamaları

Bir RS aracının enerji verimliliğinin araştırılmasında, aracın hareketini sağlayan ve hareketine karşı koyan kuvvetlerin doğru modellenmesi önemlidir.

Aracın hareket denklemi Newton'un ikinci yasasından faydalanılarak elde edilebilir. Bu hesaplama göre net kuvvet Denklem-1'de verildiği şekliyle yazılabilir.

$$\sum F = Z - W = M \cdot a = M \frac{dv}{dt} \quad (N) \quad (1)$$

Denklem-1'de, " $\sum F$ " (N) araca etki eden net kuvvet, " M " (kg) aracın kütlesi, " a " (m/s²) hızlanma ivmesi, " Z " (N) aracı hızlandıran çekim kuvveti, " W " (N), aracın hareketini zorlaştıran direnimsel kuvvettir.

Aracın iç mekanizmasında sabit olmayan yapılar bulunmaktadır. Bu yapılar nedeniyle, sabit halden pozitif ivme ile hızlanma hareketine geçen aracın kütlesi artarak değişir. Kütle artışı, " ξ " şeklinde gösterilen bir katsayı ile belirtilir. Bu ifadeye göre yeni kütle, " $(1 + \xi) \cdot M$ " olur. Burada, $(1 + \xi)$ kütle artış katsayısıdır. Raylı sistem hareket hesaplamalarında birim ağırlık başına çekim ve direnimsel kuvvetleri kullanıldığından kütle " M " yerine ağırlık " G " kullanılmıştır. Direnimsel kuvvetleri her evrede araç hareketinde etkilidir. Çekim kuvveti ise, aracın ilk hareket, hızlanma ve sabit hızla yol alma evrelerinde etkili olmaktadır. Aracın hız düşürmeye gerek duyduğu anlarda çekim kuvveti

uygulanmamaktadır. Fren evresinde duruş için fren direnimi uygulanır. Fren direnimi Denklem-2'de verildiği şekli ile yazılabilir.

$$w_b = (\alpha\beta/\gamma)\mu_b \text{ (N/kN)} \quad (2)$$

Denklem-2'de " w_b " (N/kN) fren direnimi, $\alpha \cong 0.70$, $\beta \cong 0.80 - 0.90$ ve $\gamma \cong 0.80 - 0.85$ olmak üzere; aracın fren türüne ve fren elemanlarına bağlı katsayılarıdır. " μ_b " tekerlek ile fren pabucu arasındaki sürtünme direnidir. Araca ait hareket hesaplarında, aracın birim ağırlığı başına çekim " z " (N/kN), ve birim ağırlığı başına direnimsel kuvveti " w " (N/kN) kullanılır. Direnimsel kuvvetleri " w_0 " seyir direnimi ve " w_h " hat direnimsel kuvvetlerinin toplamından oluşmaktadır. Gerekli dönüşümler yapılarak birim ağırlık türünden kuvvet hesaplaması Denklem-3'te verildiği şekliyle yazılabilir.

$$z - w = \frac{1}{\rho} \frac{dv}{dt} \text{ (N/kN)} \quad (3)$$

Denklem-3 te verilen $\frac{1}{\rho} = (1 + \xi) \frac{1000}{g}$ ifadesi dönüşüm işlemini göstermektedir.

Denklem-3'te " $z - w$ " (N/kN), aracın birim ağırlığı başına etkiyen net kuvvettir.

Aracın demeraj evresinde belirli bir ilk hızdan, son hıza ulaşması için geçen süre ve bu süre sonunda aldığı yol sırası ile Denklem-4 ve Denklem-5'te görüldüğü şekliyle yazılabilir.

$$\Delta t_d = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta V}{3.6(z - w)} \text{ (s)}, t_d = \sum \Delta t_d \quad (4)$$

$$\Delta l_d = \Delta t \frac{V_0}{3.6} \text{ (m)}, l_d = \sum \Delta l_d \quad (5)$$

Demeraj evresinden sonra araç, sabit hız ile yoluna devam ettiği rejim hızına geçmektedir. Rejim hızında çekim kuvveti, direnimsel kuvvetlerinin toplamına eşittir.

RS aracının bir başka evresi frenlemeye hazırlık veya frenleme evresidir. Frenleme evresinde çekim kuvveti yoktur. Frenleme evresi için direnimsel kuvveti Denklem-6'da verilmiştir.

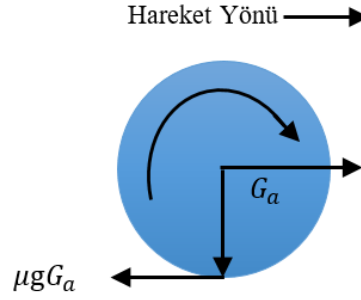
$$-w - w_b = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ (N/kN)} \quad (6)$$

Araç hareketi, çekici taşıtın yürütücü dingiline bağlı tekerleklerin yuvarlanmaya başlaması ile gerçekleştirir. Bir tekerleğin patinaj yapmadan hareket etmesi için, bir kuvvet çifti gereklidir. Bu kuvvetlerden biri tekerleğin dingil milinde etkinken, diğeri tekerleğin raya temas noktasında etkindir.

Kuvvetlerin zıt yönde uygulanması ile araç harekete başlar. Tekerleğin dingil mili seviyesinde etkin olan kuvvet, çekici araç motorundan dingil miline aktarılan kuvvettir. Tekerleğin raya temas noktasında etkin olan kuvvet, tekerlek ile ray arasındaki sürtünme (aderans) kuvvetidir. Sürtünme katsayısı, Denklem-7’de verildiği şekliyle hıza bağlı olarak hesaplanabilir.

$$\mu = 160 + [750/(V + 44)] \text{ (N/kN)} \quad (7)$$

Sürtünme ağırlığı G_a (ton- f) olan bir yürütücü tekerleğin hareketiyle ilgili olarak şekil-2’deki koşullar geçerlidir.



Şekil 2. Çekici taşıtın yürütücü tekerleğinde kuvvet çiftinin oluşumu (çekim ve sürtünme kuvveti)

Şekil-2’deki kuvvetlerle ilgili olarak aşağıdaki eşitsizlikler yazılabilir.

$Z_a < W < \mu g G_a, (V = 0)$; Hareket gerçekleşmez
$W < Z_a < \mu g G_a, (V > 0)$; Yuvarlanma hareketi
$W < \mu g G_a < Z_a$; Patinajlayarak ilerleme
$\mu g G_a < W < Z_a$; Yerde patinajlama

Eşitsizliklerde bulunan " Z_a " aderans çekim kuvveti (N), " G_a " aderans ağırlığı (ton-f), " $\mu g G_a$ " sürtünme kuvveti (N) olarak verilmiştir. Seyir direnimi genel olarak açık hava ve düzlükteki direnim olarak tanımlanabilmektedir. Seyir direniminin genel ifadesi Denklem-8’de verildiği şekliyle yazılabilir.

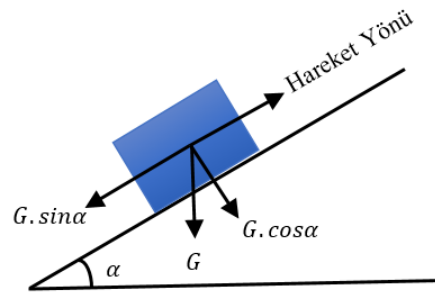
$$w_0 = a + bV^2 \text{ (N/kN)} \quad (8)$$

Seyir direniminde, a ve b sabitler, "V" ise demiryolu aracının km/h cinsinden hızıdır. Hat direnimi, demiryolu hattının geometrik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Hat direnimleri; karp

direnimi (w_r), tünel direnimi (w_t) ve eğim direniminden (w_s ya da s) oluşur. Kurp direnimi Denklem-9'da görülmektedir.

$$w_r = 700/R \text{ (N/kN)} \quad (9)$$

Tünel direniminin aldığı değerler, 0.5- 6 N/kN arasında değişebilir. Şekil- 3'te görüldüğü gibi eğim direnimi, katar ağırlığının yuvarlanma yüzeyine paralel bileşeninden oluşur ve rampa çıkış yönünde etkisini gösterir. Bu bileşen iniş yönünde çekim kuvvetine ya da aracın hareketine katkı sağlar. Eğim direnimi hesabı $W_s = G \cdot \sin\alpha$ şeklinde verilmiştir.



Şekil 3. Eğim direnimi

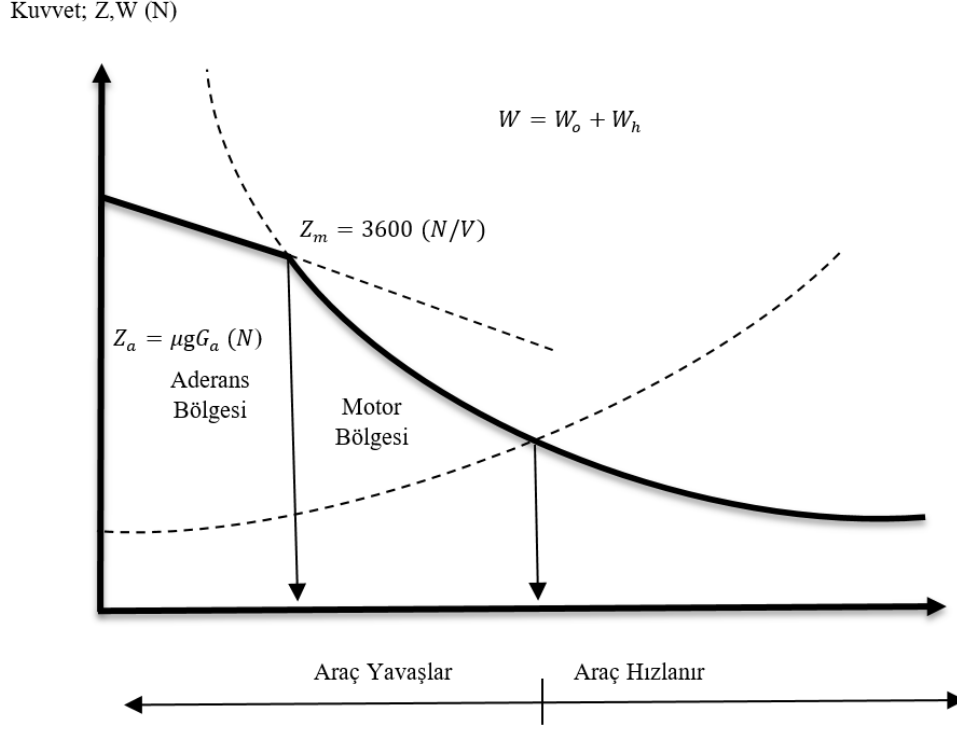
Demiryollarında boyuna eğim çok küçük olduğundan, $\sin\alpha \cong \tan\alpha$ olur. Böylece eğim direnimi Denklem-10'da görüldüğü şekliyle yazılabilir.

$$w_s = W_s/G = G \tan\alpha / G = s = \tan\alpha \quad (10)$$

Çekim hesaplarında, rampa çıkışta araç hareketi zorlaştığı için eğim direniminin işareti pozitif, inişte ise araç hareketi kolaylaştığı için negatif alınır. Bu hesaplamalar ile araca etkiyen net direnim kuvveti Denklem-11'de gösterilmiştir.

$$w = w_0 + w_r + w_t \pm s \text{ (N/kN)} \quad (11)$$

Aderans ağırlığı ve gücü belirli bir lokomotif için elde edilen çekim kuvveti ifadeleri (Z_a ve Z_m), hızın bir fonksiyonu olarak Şekil-4'te görülmektedir. Bu grafikten hız ve çekim kuvvetine ilişkin bazı sınır değerleri de elde edilebilir.



Şekil 4. Çekim kuvvetleri (Z_a ve Z_m) toplam direnim (W) ve (V) ilişki grafiği

Denklem-12 ve Denklem-13'te, V_t geçiş hızı olup $Z_a = Z_m$ eşitliğinden elde edilir.

$$Z = Z_a = \mu g G_a (N) \quad ; V \leq V_t \text{ (Aderans bölgesi ise)} \quad (12)$$

$$Z = Z_m = (3600P)/V (N) \quad ; V \geq V_t \text{ (Motor bölgesi ise)} \quad (13)$$

Raylı sistem aracına uygulanan kuvvetler doğrultusunda enerji ve güç ifadeleri Denklem-14, Denklem-15 ve Denklem-16'da verilmektedir.

$$\text{İş (enerji): } E = Z_m l \text{ (Joule = Nm)} \quad (14)$$

$$\text{Güç: } P = E/t \text{ (Watt = Nm/s)} \quad (15)$$

$$P = (Z_m l)/t = Z_m v^{m/s} = Z_m V^{\text{km/sa}}/3.6 \quad (16)$$

Genel hareket denkleminde tüketilen enerji ve üretilen RF enerjisi Denklem-17 ve Denklem-18'de verildiği şekli ile yazılabilir.

$$E_{tük_{i+1}}(l) = Z_{i+1} * \Delta l_i \quad (17)$$

$$E_{rej_{i+1}}(l) = W_{i+1} * \Delta l_i \quad (18)$$

Toplam hat boyunca tüketilen toplam enerji, üretilen toplam RF enerjisi ve toplam yolculuk süresi sırası ile Denklem-19, Denklem-20 ve Denklem-21’de verildiği şekliyle yazılabilir.

$$E_{tük_{toplam}}(X) = \sum_{i=1}^{iterasyon} (E_{tük_i} + (Z_{i+1} * \Delta l_i)) \quad (19)$$

$$E_{rej_{toplam}}(X) = \sum_{i=1}^{iterasyon} (E_{rej_i} + (W_{i+1} * \Delta l_i)) \quad (20)$$

$$\Delta t_{toplam}(X) = \sum_{i=1}^{iterasyon} (\Delta t_i + \Delta t_{i+1}) \quad (21)$$

Tek kararlı amaç fonksiyonları sırası ile Denklem-22, Denklem-23 ve Denklem-24, çok kararlı amaç fonksiyonları sırası ile Denklem-25, Denklem-26, Denklem-27 ve Denklem-28’de verilmiştir.

$$OF1 = \min \left(\sum_{n=1}^{iterasyon} E_{tük_n}(X) \right) \quad (22)$$

$$OF2 = \max \left(\sum_{n=1}^{iterasyon} E_{rej_n}(X) \right) \quad (23)$$

$$OF3 = \min \left(\sum_{n=1}^{iterasyon} \Delta t_n(X) \right) \quad (24)$$

$$OF4 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF1 - E_{tük_n}(X))^2 + (OF3 - \Delta t_n(X))^2} \right) \quad (25)$$

$$OF5 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF2 - E_{rej_n}(X))^2 + (OF3 - \Delta t_n(X))^2} \right) \quad (26)$$

$$OF6 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF1 - E_{tük_n}(X))^2 + (OF2 - E_{rej_n}(X))^2} \right) \quad (27)$$

$$OF7 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF1 - E_{tük_n}(X))^2 + (OF2 - E_{rej_n}(X))^2 + (OF3 - \Delta t_n(X))^2} \right) \quad (28)$$

2.3. Optimizasyon Kriterlerinin Seçimi

Matematiksel modeli net bir şekilde ortaya konamayan ya da en uygun çözümün bulunması için geçen sürenin çok fazla olduğu problemler, zor optimizasyon problemleri olarak sınıflandırılabilir

(Mohamed ve ark., 2020). Bu durumlarda, son yıllarda literatürde çokça karşılaşılan stokastik tabanlı meta-heuristic (sezgisel) yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada da problemin birden fazla boyutu olması ve çeşitli avantajları nedeniyle sezgisel yöntemlerden biri olan ACOR kullanılmıştır.

2.3.1. Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması (Acor-Ant Colony Optimization Algorithm For Continuous Optimization)

Karınca kolonisi algoritması 1990'lı yılların başlarında Dorigo tarafından karmaşık mühendislik problemlerine çözüm üretmek için geliştirilmiştir (Dorigo, 1992; Dorigo ve ark., 1996). Literatür incelendiğinde ACO'nun ilk olarak gezgin satıcı problemine uygulandığı görülmektedir (Dorigo & Gambardella, 1997). ACO yöntemi temel anlamda karıncaların hedef odaklı hareketlerini yön bulmak ve görece haberleşmek için kullandıkları feromon maddesinin yoğunluğu üzerinden modellemektedir (Liu ve ark., 2022). Genel olarak ACO algoritmasında 3 ana adım bulunmaktadır. Bunlar; Karınca Temelli Çözüm Yapısı, Feromon Güncelleme Mekanizması ve Yerel Arama Stratejisidir. ACO genel yaklaşımı aşağıda gösterildiği şekliyle açıklanabilir.

While (Tekrar Limiti Aşılmadı)

Çözüm Yapısını Oluştur,
Aday Çözüm Uygunluk Değerini Hesapla,
Feromon Güncellemesi Yap,
Yerel Arama Stratejisi Uygula,

End

Çözüm Yapısı (Ant Based Construction)

Çalışmaya başlamadan önce m adet karınca ile sonlu sayıda uygun çözüm uzayı oluşturulur. Bir çözüm adayının yapısı, boş bir çözüm uzayı üzerinde rastgele şekilde biçimlenir. Çözüm adaylarının başarıları yine çözüm yapısına uygun şekilde belirlenmiş olan uygunluk fonksiyonu ile ölçülür.

$$w_j = \frac{1}{\sigma NP \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\text{rank}(j)-1)^2}{2\sigma^2 NP^2}} \quad (29)$$

Her bir çözümün seçim ihtimali hesaplanan ağırlık ya da uygunluk değerine göre belirlenmektedir. Bu formülde rank(j) mevcut çözümün en iyi çözüme göre sırasını, NP çözüm

sayısını, σ ise önem değerini vermektedir. Çözümün seçim olasılığı p_j Denklem-30'da verildiği şekli ile hesaplanır ve mevcut çözüm ağırlığının tüm çözümlerin ağırlıkları toplamına oranıdır.

$$p_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^{NP} w_i} \quad (30)$$

Çözümler seçilirken karıncaların ürettiği değişken değerleri Gauss dağılımı kullanılarak belirlenir. Bu formülde, d çözüm boyutunu ifade eder.

$$g(x^d, \mu^d, \delta^d) = \frac{1}{\delta^d \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x^d - \mu^d)^2}{2(\delta^d)^2}} \quad (31)$$

Yeni aday çözümler Denklem-32'de verildiği şekli ile üretilir. Bu Denklemden ξ katsayısı yakınsama katsayısıdır. Bu katsayının büyük seçilmesi en iyi çözüme gidişi yavaşlatırken çözüm hassasiyetini artırır.

$$\delta^d = \xi \sum_{NP}^{i=1} \frac{|x_i^d - x_j^d|}{NP - 1} \quad (32)$$

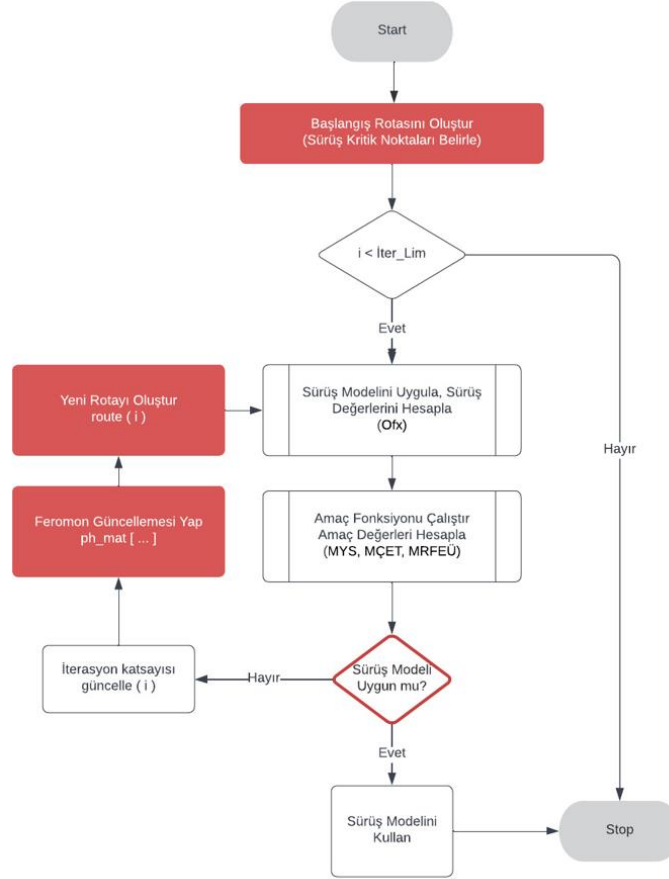
Genel Arama Stratejisi (Pheromone Update)

Feromon güncellemesinin amacı, iyi çözümlerle ilişkili feromon değerlerini artırmak ve kötü çözümlerle ilişkili olanları azaltmaktır. Bu genellikle feromon buharlaşması yoluyla tüm feromon değerlerini azaltarak ve seçilen bir dizi iyi çözümle ilişkili feromon seviyelerini artırarak gerçekleştirilir. Feromon buharlaşması, arama uzayında yeni alanların keşfedilmesini destekleyen faydalı bir unutma biçimi uygular.

Yerel Arama Stratejisi (Daemon Action)

Çözümler oluşturulduktan sonra ve feromon değerleri güncellenmeden önce, genellikle probleme özel bazı eylemler gerekebilir. Bunlar genellikle daemon eylemleri olarak adlandırılır ve tek karıncalar tarafından gerçekleştirilemeyen probleme özel ve/veya merkezi eylemleri uygulamak için kullanılabilir. En çok kullanılan daemon eylemi, inşa edilen çözümlere yerel arama uygulanmasından oluşur: yerel olarak optimize edilmiş çözümler daha sonra hangi feromon değerlerinin güncelleneceğine karar vermek için kullanılır.

Mühendislik problemlerini sürekli zamanda çözüm sunan ACO_R ACO'dan konsept olarak çok da farklı değildir (Socha & Dorigo, 2008; Wu ve ark., 2019). İki yaklaşım arasındaki temel fark ACO_R 'da ayrık olasılık dağılım yerine sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonun (OYF) kullanılmasıdır. Yeni yaklaşımda kullanılan OYF Gauss fonksiyonu kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait ACOR akış diyagramı Şekil-5'te gösterilmiştir.

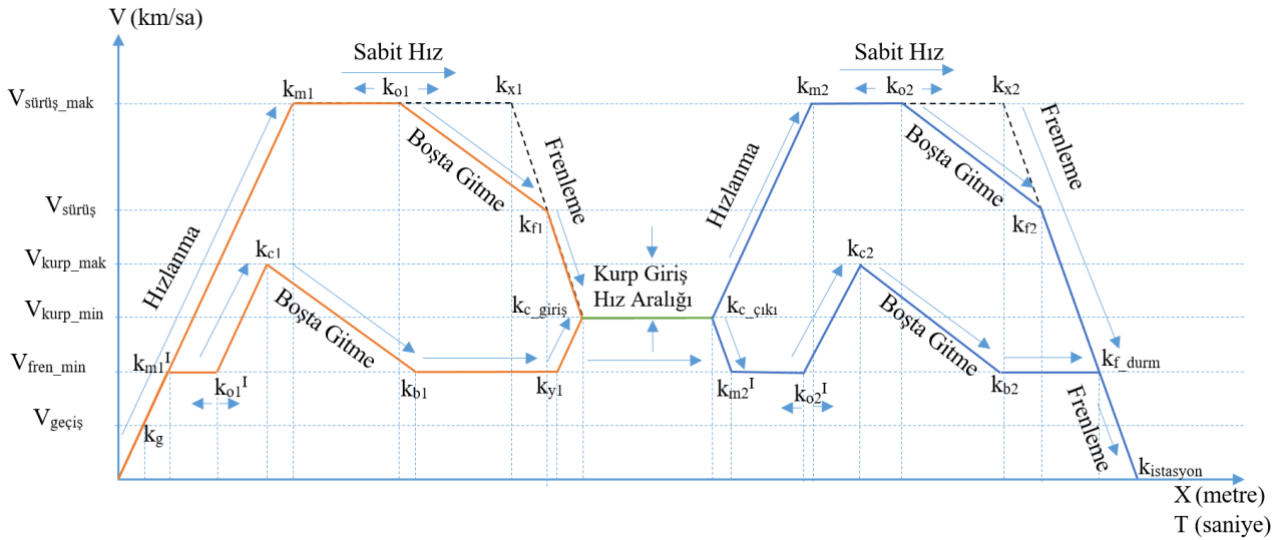


Şekil 5. Geliştirilen modele ait ACOR akış diyagramı

3. Simülasyon, Tartışma ve Sonuçlar

3.1. Simülasyon

Çalışmada kullanılan RS aracı Tablo-1 de teknik özellikleri verilen bir tramvay olarak belirlenmiştir. Her bir senaryo, RS aracının hareketini ele alan ve Şekil-6'da görülen aşamalardan oluşmaktadır. Bu kapsamda sürüş dinamiği hız profilleri, hızlanma, sabit hızda gitme, RF enerji oluşumu için boşa gitme ve frenleme evrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 6. Enerji verimli dinamik sürüş tekniği modeli

Modelde maksimum sürüş hızı ve boşta gitmeye başlama noktalarının seçimi öncelikli olarak ele alınmaktadır. Önerilen modelde sürüş dinamiği seçimi için $V_{sürüş}$, V_{kurp} , ve $V_{frenleme}$ hız limit değerlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Hız limit değerleri karşılaştırması sonucunda hangi senaryonun seçileceği tespit edilmektedir. Bu karşılaştırma kurp öncesi 6 ve kurp sonrası 6 farklı senaryo durumuna uygun olarak Tablo-3'te verilmiştir. Kurp öncesi ve kurp sonrası farklı senaryoların oluşması ile birlikte sürüş tekniği sayısı artırılmakta ve mümkün olan en verimli senaryonun seçilmesi sağlanmaktadır. Aynı zamanda rejeneratif frenleme enerjisi oluşumu destekleyecek boşta gitmeye başlama noktalarının oluşumuna ve optimizasyon aralığı seçimine de katkı sağlamaktadır.

Tablo-3. Hız limit değerler karşılaştırmalarına göre senaryo seçimi

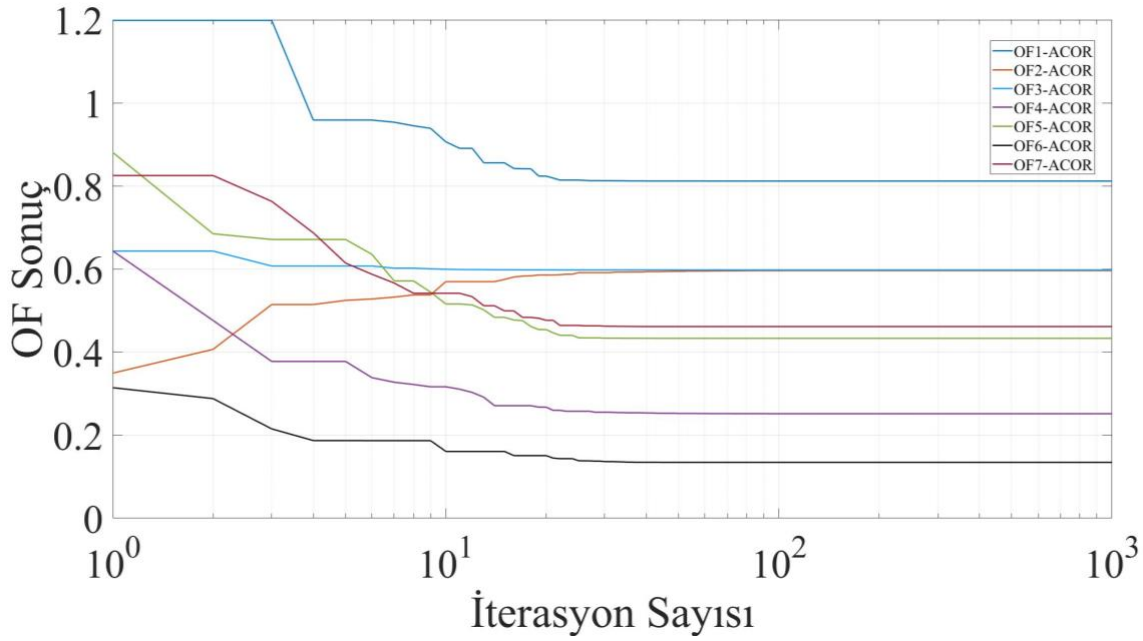
Senaryo	Kurp Öncesi	Kurp Sonrası
Sürüş Tekniği Senaryosu-1	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-2	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-3	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-4	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-5	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{sürüş} > V_{fren}$	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{sürüş} > V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-6	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{sürüş} = V_{fren}$

Önerilen modelde optimizasyon algoritması öncelikli olarak araç sürüş özellikleri, değişken hız ve yolcu sayısı limitlerini belirlemektedir. Bu limitler dâhilinde belirlenen istasyon mesafesinin en kısa süre ve en uzun sürede tamamlanacağı durumlar tespit edilmektedir. Şekil-6'da belirtilen k_{m1} ,

$k_{m1}, k_{x1}, k_{y1}, k_{m2}, k_{m2'}, k_{x2}$ ve k_{f_durma} noktaları bu durumları göstermektedir. Bu durumlar aynı zamanda belirlenen hat için hız/konum bilgisini ve sürelerini de tespit etmektedir. Şekil-6'da yer alan k_o , RF enerjisinin oluşumunu sağlayacak boşta gitme başlangıç konumunu göstermektedir. k_o konum tespiti optimizasyon algoritmaları ile gerçekleştirilmektedir. Tablo-3 te belirtilen kurp öncesi sürüş tekniği senaryolarında $V_{sürüş}$ hızının V_{fren} hızından büyük olduğu her olasılık için hızlanma, sabit hızda gitme ve boşta gitme durumlarının gerçekleşmesi istenmektedir. Boşta gitme sonucunda düşülen hızın V_{kurp} hızından büyük olması durumunda V_{kurp} 'a kadar mekanik frenleme, küçük olması durumunda ise V_{kurp} 'a kadar hızlanma gerçekleşmektedir. V_{fren}, V_{kurp} ve $V_{sürüş}$ hızları birbirine eşitse RF enerji oluşumu öncelikli olduğu için V_{kurp} hızına kadar araç hızlanır. Hızlanma sonunda RF enerjisi oluşturmak için boşta gitme durumu gerçekleştirilir. Bu sayede hem kurp bölgesine güvenli bir şekilde girilmekte hem de RF enerjisi oluşumu desteklenmektedir.

Modelde kurp sonrası olası bir frenleme durumu da eklenmiştir. Kurp çıkışında mekanik frenleme gerçekleşmesi ile birlikte optimizasyon algoritması ile belirlenen k_{o2} ' noktasına kadar sabit hızda gitme gerçekleşir. Sonrasında tekrar güvenli duruşun sağlanacağı kurp hızına kadar hızlanma ve boşta gitme olayı ile devam edilir. Boşta gitmenin sonlandığı konum k_{b2} gibi bir noktada ise güvenli frenlemenin başlayacağı k_{f_durma} konumuna kadar sabit hızda gitme gerçekleşir. Modelde k_o konumu, k_m ve k_x konumları arasında herhangi bir yerde olabilir. Bu sayede istenilen amaç fonksiyonu kapsamında en uygun sürüş tekniği gerçekleştirilmiş olur. Modelde hem $V_{sürüş}, V_{kurp}, V_{fren}$ hız değerleri ile birlikte, $k_{o1}=k_{m1}, k_{o1}>k_{m1}\&k_{o1}<k_{x1}$ ve $k_{m1}=k_{x1}$ koşul karşılaştırılmaları da yapılmaktadır. Bu karşılaştırmalar neticesinde kurp öncesi 46, kurp sonrası 42 olasılıklı sürüş tekniği oluşmaktadır. Bu olasılık durumlarının kombinasyonu sonucunda toplamda 1932 farklı sürüş tekniği gerçekleştirilmektedir.

En uygun çözümün görece birden fazla olduğu ve şartların değişkenliğine uygun olarak bir davranış ya da tepkinin belirlenmesinde pareto yönteminin mühendislik problemlerine uygulanması oldukça yaygındır (Certa ve ark., 2011). Çalışmada da bu durum göz önünde bulundurulmuş, ACOR ile pareto optimal sınır değerleri oluşturulmuştur. Bu sınır değerler kullanılarak etkili operasyon bölgesinin tespitinde yine aynı algoritma kullanılarak pareto frontier belirlenmesi amaçlanmıştır. Modelde tek kararlı amaç fonksiyonları ACOR ile optimize edilmiştir. Belirlenen amaç fonksiyonlarına ait amaç fonksiyonu/iterasyon sayısı karşılaştırması Şekil-7'de, iterasyonlar sonucunda elde edilen değerler Tablo-4'te verilmiştir.



Şekil 7. Optimizasyon algoritması iterasyon sayısı / OF Sonuç değerleri

Tablo-4. Tek Kararlı ve Çok Kararlı Amaç Fonksiyonu Sürüş Teknikleri Sonuç Değerleri

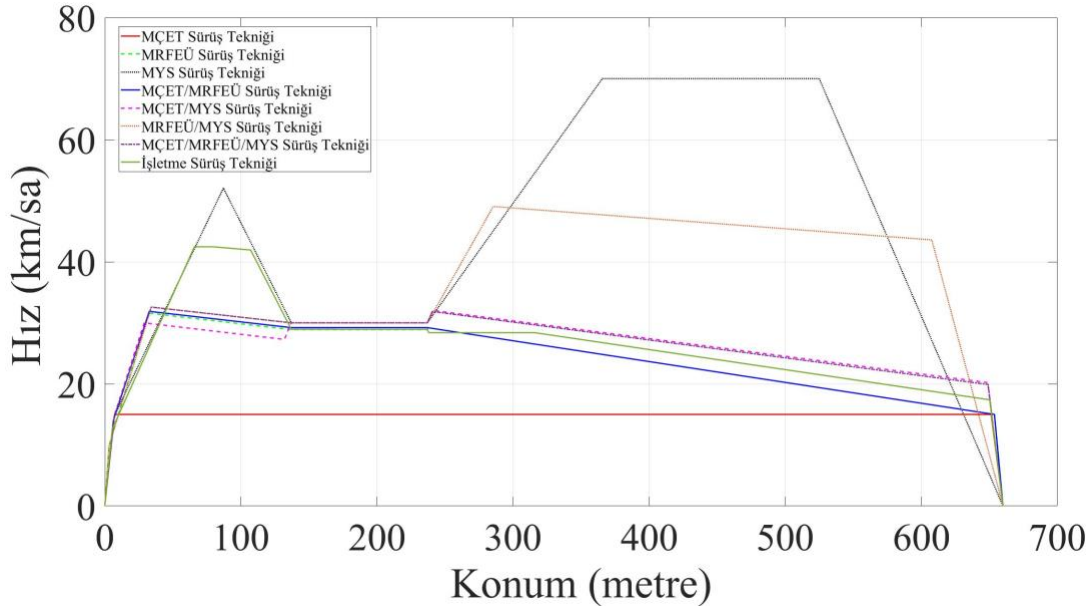
Sürüş Teknikleri	Çekiş Enerji Tük. (kWh)	Rejeneratif Frenleme Enerji Üretimi (kWh)	Yolculuk Süresi (s)	Peron Duruş Mesafesi (m)	Ort. Sürüş Hızı (km/sa)	Üretim Tük. Verimi (%)
İşletme Sürüşü	1.660	0.331	96.636	660.000	24.588	19.914
OF1(MÇET)	0.812	1.585E ⁻⁰⁵	162.220	659.993	14.647	0.002
OF2(MRFEÜ)	1.115	0.596	103.108	660.020	23.044	53.459
OF3(MYS)	3.263	5.801E ⁻⁰⁵	59.768	660.000	39.754	0.002
OF4(MÇET/MRFEÜ)	1.004	0.434	102.882	660.011	23.095	43.233
OF5(MÇET/MYS)	1.087	0.404	93.190	660.000	25.496	37.191
OF6(MRFEÜ/MYS)	1.806	0.503	69.479	660.056	34.200	27.863
OF7(MÇET/MRFEÜ/MYS)	1.076	0.408	92.564	659.997	25.669	37.893

Raylı sistemlerde tek kararlı amaç fonksiyonları ile ele alınan durumlar verimlilik karşılaştırmalarında yeterli olmamaktadır. Zira yalnız başına MÇET veya MRFEÜ amacı taşıyan kısıtlı yolculuk sürelerine sahip bir raylı sistem işletmesi yapılamamaktadır. Bu amaçla önerilen model üzerinde tek kararlı amaç fonksiyonları ile birlikte çok kararlı amaç fonksiyonlarının da optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çok kararlı amaç fonksiyonlarının ACOR ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo-4'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

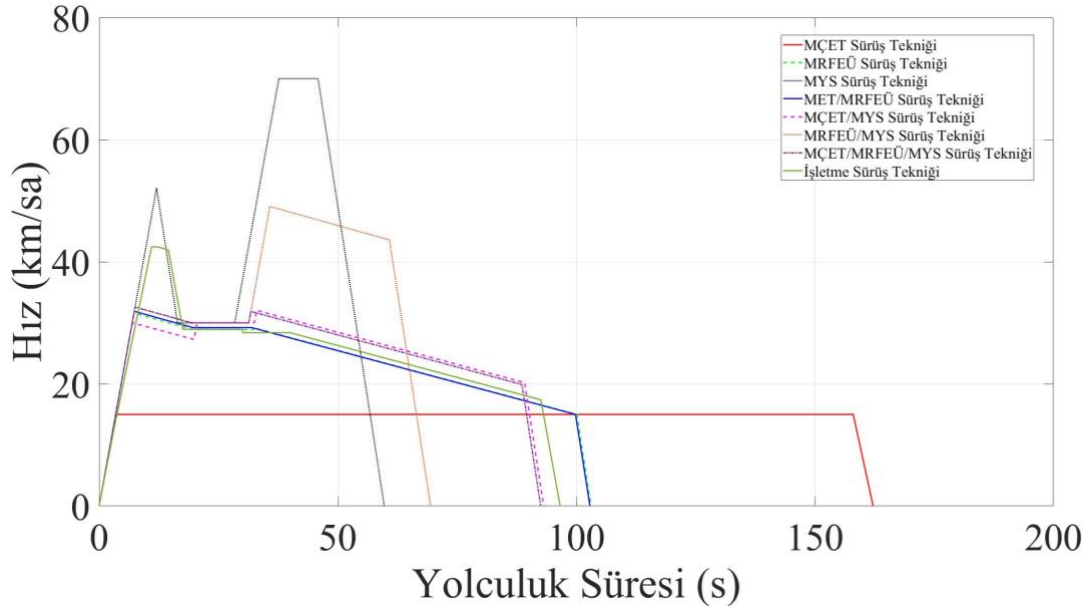
Tablo-4'te elde edilen değerler, tek kararlı ve çok kararlı amaç fonksiyonlarının MÇET, MRFEÜ ve MYS kapsamında, belirlenen kısıt değerlerine uygun olarak, sürüşlerin başarılı bir şekilde

tamamlandığını göstermektedir. Bu kapsamda peron duruş aralığı literatürde belirtilen yaklaşık 15 cm içerisinde kalmaktadır. MÇET beklendiği gibi yolculuk süresinin en uzun olduğu durumdur. MYS sonucunda en hızlı sürüşün gerçekleştiği dolayısı ile en yüksek tüketimin olduğu görülmektedir.

Mevcut senaryo içerisinde RS aracı işletme sürüş tekniği ile 660 metrelik bir hattı ortalama 24.588 km/sa hız ile 96.363 saniyede tamamlamaktadır. Bu sürüş sonucunda 1.660 kWh çekiş enerjisi kullanmakta ve 0.331 kWh RF enerjisi üretmektedir. Üretilen RF enerji ve tüketilen çekiş enerjisi oranı sonucunda yaklaşık %19.914 lük bir verim elde edilmektedir. İşletme sürüş rejiminde elde edilen bu sonuçların iyileştirilmesi amacı ile gerçekleştirilen EVDST modeli sonucunda yaklaşık 7 saniyelik bir gecikme ile mevcut hat üzerinde %53.459 luk verim elde edilmiştir. Bu sonuç yalnızca MRFEÜ/MÇET ile de sınırlı kalmamaktadır. İşletme sürüş tekniği ile gerçekleştirilen yolculuk sonucunda 1.660 kWh lik çekiş enerji tüketimi 1.115 kWh'e düşürülmüş, 0.331 kWh'lik RF enerji üretimi ise 0.596 kWh'e yükseltilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde %32.832 oranında bir enerji tüketim verimine ve %80.060 oranında bir RF enerjisi üretim verimine ulaşılmıştır. Önerilen EVDST modeli kapsamında uygulanan OF5, OF6 ve OF7 amaç fonksiyonları ile elde edilen sonuç değerleri, mevcut işletme sürüş tekniği yolculuk süresi içerisinde kalınarak verimli bir sürüşün gerçekleştirildiğini göstermektedir. Tablo-4'te de verilen sonuçlar ile OF4, OF5, OF6 ve OF7 amaç fonksiyonları kapsamında belirlenen kısıtlara uygun verimli sürüşlerin gerçekleştirilebileceği de görülmektedir.

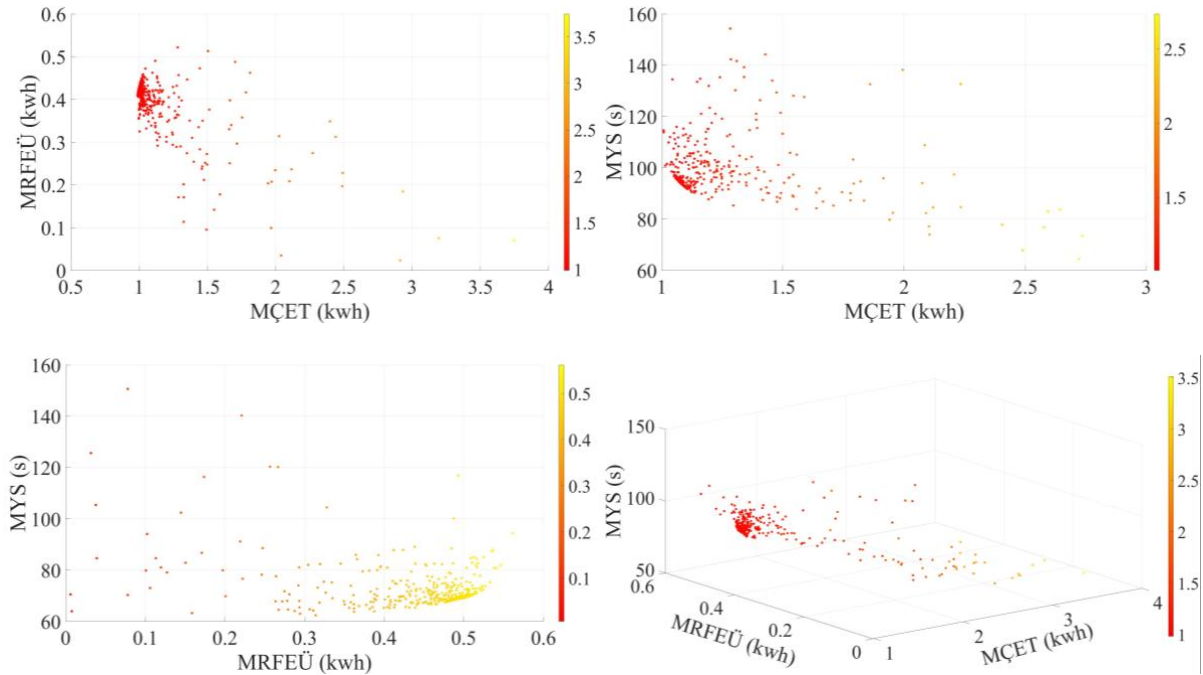


Şekil 8. Dinamik sürüş tekniği hız/konum grafiği



Şekil 9. Dinamik sürüş tekniği hız/seyahat süresi grafiği

Şekil-8 ve Şekil-9 incelendiğinde, Tablo-4'te verilen tüm amaç fonksiyonlarına uygun sürüş tekniklerinin, belirtilen Hız/Konum ve Hız/Yolculuk süresi profillerine uygun olarak, sürüşlerini verimli bir şekilde tamamladığı görülmektedir. Bu sonuçlar önerilen modelde, araç ve yol teknik özelliklerine uygun olarak farklı sürüş tekniklerinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Şekil-10, verilen MÇET, MRFEÜ ve MYS kısıt değerleri kapsamında çok kararl ar amaç fonksiyonlarına ait pareto frontier çalışma sınır değerlerini ve verimli çalışma bölgelerini göstermektedir.



Şekil 10. Pareto frontier sınır değerleri ve verimli çalışma bölgeleri

Şekil-10'da görüldüğü üzere çok kararlı amaç fonksiyonlarının ACOR ile optimizasyonun sonucunda arama uzayı çok kısa sürelerde lokal optimum değere yakınsamaktadır. Aynı zamanda Şekil-10, Şekil-7'de görülen iterasyon sonuçları ve Tablo-4'te verilen değerler ile birlikte yorumlandığında geliştirilen model üzerinde her bir amaç fonksiyonu için uygulanan ACOR'un optimizasyon işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği görülmektedir.

3.2. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada şehir içi toplu taşıma sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılan elektrikli raylı sistem araçlarının, enerji verimli dinamik sürüş tekniği üzerine yeni bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen senaryo tabanlı model için Tablo 1'de verilen kapasite değerlerine uygun bir araç ve Tablo-2'de verilen kısıt değerlerine sahip bir güzergâh seçilmiştir. Önerilen modelde yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık, hıza bağlı sürtünme, pozitif eğim, değişken kurp giriş hızı ve değişken boşta gitme noktaları için optimizasyon seçim aralıkları oluşturulmuştur. Çalışmaya dahil edilen yatay kurp, hem dinamik sürüş tekniği sayısının artırılmasında hem de RF enerjisi oluşumunu destekleyerek modele ayırt edici bir özellik katmaktadır. Aynı zamanda yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık değişiminin etkisi ve hıza bağlı sürtünme etkisi de göz önünde bulundurulmuştur.

Geliştirilen modelde, RS aracına ait veriler, raylı sistem aracı dinamik sürüş denklemleri ve raylı sistem hareket evreleri kullanılarak senaryo tabanlı 1932 farklı dinamik sürüş tekniği test edilmiştir. Elde edilen amaç fonksiyonları tek kararlı ve çok kararlı olmak üzere, ACOR ile optimize edilmiş ve optimal pareto çalışma sınır koşulları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Verimli yolculuk seferlerin oluşturulması, yolculuk süresinin öncesinden tespit edilmesi ve seferler arasında yaşanan gecikmelerin önlenmesi ile birlikte sefer planlamasındaki başarımın artırılabilceği gösterilmiştir.
- 660 metre istasyon arası mesafe için istasyon duruş mesafe hatasının 5 cm den daha az olduğu görülmüştür. Bu başarı oranı literatürde verilen 15 santimetrelik peron duruş aralığının çok altındadır.
- Rejeneratif frenleme enerjisi üretimi/çekiş enerjisi tüketimi oranında %58.08'lik bir iyileştirme sağlanmıştır. Enerji verimliliği bakımından literatürde farklı sürüş ve istasyonlar arası mesafeleri için enerji verimi yönünden yaklaşık %40 düzeyinde bir iyileştirme olduğu görülmektedir. Bu oran ile çalışma sonucu elde edilen %53.459 iyileştirme oranı karşılaştırıldığında modelin başarılı olduğu görülmektedir.

- Çekiş enerjisi tüketimi ve RF enerjisi üretimi bakımından ele alındığında, %32.832 oranında bir enerji tüketim verimine ve %80.060 oranında bir RF enerjisi üretim verimine ulaşılmıştır.

Geliştirilen senaryo tabanlı sürüş rejimleri ile test edilen EVDST modeli, yolculuk sürelerinin önceden belirlenmesi, verimli sürüş dinamiklerinin oluşturulması ve yolculuk sürelerinin planlanması ile birlikte raylı sistemlerde enerji verimliliğinin artırılması ve optimum sürüş planlarının yapılmasına da katkıda bulunmaktadır.

Teşekkür

Bu makale Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD'nda gerçekleştirilen Doktora tezinden türetilmiştir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Asnis, I. A., Dmitruk, A. V., & Osmolovskii, N. P. (1985). Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 25(6), 37–44.
- Bae, C., Jang, D., Kim, Y., Chang, S., & Mok, J. (2007). Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations. *2007 7th International Conference on Power Electronics*, 801–805.
- Certa, A., Galante, G., Lupo, T., & Passannanti, G. (2011). Determination of Pareto frontier in multi-objective maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(7), 861–867.
- Chen, J.-F., Lin, R.-L., & Liu, Y.-C. (2005). Optimization of an MRT train schedule: reducing maximum traction power by using genetic algorithms. *IEEE Transactions on power systems*, 20(3), 1366–1372.
- Corlu, C. G., de la Torre, R., Serrano-Hernandez, A., Juan, A. A., & Faulin, J. (2020). Optimizing energy consumption in transportation: Literature review, insights, and research opportunities. *Energies*, 13(5), 1115.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano*.

- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1), 53–66.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41.
- ERRAC. (2017). Rail 2050 Vision. *Uic*, 27.
- Feng, J., Ye, Z., Wang, C., Xu, M., & Labi, S. (2018). An integrated optimization model for energy saving in metro operations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(8), 3059–3069.
- Fernández, P. M., Sanchís, I. V., Yepes, V., & Franco, R. I. (2019). A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 222, 153–162.
- González-Gil, A., Palacin, R., Batty, P., & Powell, J. P. (2014). A systems approach to reduce urban rail energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 80, 509–524.
- Gordon, S. P., & Lehrer, D. G. (1998). Coordinated train control and energy management control strategies. *Proceedings of the 1998 ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, 165–176.
- Guo, J., Dong, H., Sheng, W., TU, C., & YE, M. (2017). Research of the influence of braking conditions on regenerative braking energy recovery for electric vehicles. *Proceedings of the International conference on Energy, Ecology and Environment (ICEEE), Stockholm, Sweden*, 26–29.
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., Cao, F., & Li, K. (2018). Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: A dynamic programming based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 149–164.
- Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(8), 2831–2847.
- Liu, J., Anavatti, S., Garratt, M., & Abbass, H. A. (2022). Multi-operator continuous ant colony optimisation for real world problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 69, 100984.
- Luan, X., Wang, Y., De Schutter, B., Meng, L., Lodewijks, G., & Corman, F. (2018). Integration of real-time traffic management and train control for rail networks-part 1: Optimization problems and solution approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 41–71.
- Mohamed, A., Awad, S., Mohamed, A. A., Alkhalaf, S., Mohamed, M., Senjyu, T., & El-din, A. B. (2020). Nature-inspired algorithms for feed-forward neural network classifiers: A survey of one decade of research. *Ain Shams Engineering Journal*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.01.007>
- Morea, D., Elia, S., Boccaletti, C., & Buonadonna, P. (2021). Improvement of Energy Savings in Electric Railways Using Coasting Technique. *Energies*, 14(23), 8120.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2012). *The geography of transport systems*. Langara College.
- Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355–376. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>
- Siefert, J., & Li, P. Y. (2021). Optimal control of the energy-saving hybrid hydraulic-electric architecture (HHEA) for off-highway mobile machines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30(5), 2018–2029.
- Socha, K., & Dorigo, M. (2008). Ant colony optimization for continuous domains. *European journal of operational research*, 185(3), 1155–1173.
- Su, S., Li, X., Tang, T., & Gao, Z. (2013). A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 883–893.
- Su, S., Wang, X., Cao, Y., & Yin, J. (2019). An energy-efficient train operation approach by integrating the metro timetabling and eco-driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(10), 4252–4268.
- Wu, Y., Ma, W., Miao, Q., & Wang, S. (2019). Multimodal continuous ant colony optimization for multisensor remote sensing image registration with local search. *Swarm and Evolutionary Computation*, 47, 89–95.
- Xing, Z., Zhang, Z., Guo, J., Qin, Y., & Jia, L. (2023). Rail train operation energy-saving optimization based on improved brute-force search. *Applied Energy*, 330(PA), 120345. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120345>
- Yang, L., Li, K., & Gao, Z. (2008). Train timetable problem on a single-line railway with fuzzy passenger demand. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 17(3), 617–629.
- Yang, X., Ning, B., Li, X., Tang, T., & Song, X. (2013). A Subway Timetable Optimization Model for Maximizing the Utilization of Recovery Energy. *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, 55300, V001T07A002.
- Zhang, H., Jia, L., Wang, L., & Xu, X. (2019). Energy consumption optimization of train operation for railway

systems: Algorithm development and real-world case study. *Journal of Cleaner Production*, 214, 1024–1037.