

Araştırma Makalesi

Elektrik tahrikli bir tren hareketinin benzetim ortamında modellenmesi ve modelin gerçek bir hat üzerinde doğrulanması

Ahmet Yıldız^{1,*}, Kemal Keskin²

¹ Metro İstanbul Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, İstanbul, Türkiye

² Elektrik-Elektronik Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

*Correspondence: ahmetyldz91@gmail.com

DOI: 10.51513/jitsa.1099941

Özet: Ulaşım ve taşımacılık günümüz dünyasında önemli bir yere sahiptir. Gelişen teknoloji ile yolculuk sürelerinin kısalması ve büyüyen nüfus kentsel hareketliliğin artmasına sebep olmaktadır. Hareketlilik yaşam kalitesinin anahtarı ve ekonominin ana unsuru olmakla birlikte ulaşımın her geçen gün gelişmesine paralel olarak toplu taşımanın çevreye olan etkileri ve enerji tüketimi de aynı oranda artmaktadır. Bir raylı sistemi oluşturan parçaların enerji tüketim seviyeleri farklıdır. Açıktır ki enerji tüketiminde en büyük pay treni itmek için üretilen cer kuvvetinin sağlanması aşamasına aittir. Cer enerji tüketimini en aza indirmek için çeşitli optimizasyon yöntemleri mevcuttur. Ancak bunu başarabilmek için gerçek bir tren hareketini benzeten bir tren hareket benzetimine (THB) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, bir raylı taşıta ait karakteristik özellikler, raylı sistem ağındaki yol özellikleri ve işleme bağlı kısıtlar göz önünde bulundurularak, taşıta ait model MATLAB benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen THB ile gerçek tren hareketinin ne kadar doğrulukla gerçekleştirildiğinin tespit edilebilmesi için, Metro İstanbul A.Ş. işletmesine bağlı olan M3 Metro hattındaki trenlerde saha testleri yapılmıştır. Saha ve THB verilerinin karşılaştırılması sonucunda, THB'nin enerji tüketiminde %95, sürede %98, maksimum cer kuvveti ile aynı mesafede ulaşılan hızda %99, boşta giderek ulaşılan hızda %94 ve frenleme mesafesinde %97 doğrulukla, gerçek tren hareketlerini benzetebildiği ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Raylı Sistemler, Matematiksel Modelleme, Tren Dinamikleri, Model Doğrulama, Vaka Çalışması

Modeling of an electrically driven train motion in a simulation environment and validation of the model on a real line

Abstract: Transportation and transportation have an important place in today's world. With the developing technology, the shortening of travel times and the growing population cause an increase in urban mobility. Although mobility is the key to the quality of life and the main element of the economy, in parallel with the development of transportation, the environmental effects and energy consumption of public transportation are increasing at the same rate. The energy consumption levels of the parts that make up a rail system are different. It is clear that the largest share in energy consumption belongs to the stage of providing the traction force produced to propel the train. Various optimization methods are available to minimize the traction energy consumption. However, in order to achieve this, a train motion simulation (TMS) that simulates a real train movement is needed. In this study, the model of a rail vehicle is implemented in the MATLAB simulation environment, taking into account the characteristics of a rail vehicle, road characteristics in the rail system network and operational constraints. In order to determine how accurately the real train movement is carried out with the developed THB, field tests were carried out on the trains on the M3 Metro line operated by the Metro İstanbul company. As a result of the comparison of the field and THB data, it has been revealed that THB can simulate real train movements with 95% accuracy in energy consumption, 98% in time, 99% in speed reached at the same distance with maximum traction force, 94% in coasting speed and 99% in stopping point.

Keywords: Rail Systems, Mathematical Modelling, Train Dynamics, Model Validation, Case Study

* Corresponding author.

E-mail address: ahmetyldz91@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6490-6109; 0000-0002-3969-2396 (in hierarchical order)

Received 07.04.2022; accepted 21.11.2022

Peer review under responsibility of Bandirma Onyedi Eylül University.

1. Giriş

Bir demiryolu cer gücü sistemi, trenlerin yolcuları veya yükleri varış yerlerine taşıması için enerji sağlar. Tekerlekler ve raylar arasındaki düşük yuvarlanma direnci nedeniyle, demiryolu sistemi yaygın olarak en verimli kara taşımacılığı biçimlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Hillmansen, 2007). Enerji fiyatlarının ve çevresel kaygıların artması nedeniyle, son yıllarda tren enerji verimli işletme tekniklerine artan bir ilgi gösterilmiştir. Cer enerjisi tüketimi optimizasyonu yapılabilmesi için bilgisayar ortamında geliştirilen ve gerçek bir tren hareketini doğru bir şekilde taklit edebilen bir benzetim geliştirilmesi gereklidir.

Tren hareketlerinin ve güç kaynağı koşullarının bilgisayar tabanlı benzetimi üzerine araştırmalar birkaç on yıldır devam etmektedir. İlk çalışmalardan birinde, 1978'de, hızlı trenlerin performans özelliklerini incelemek için bilgisayar tabanlı bir benzetim geliştirilmiştir (Mellitt, 1978). 1993'te Cheng ve Howlett (Cheng ve Howlett, 1993), bir demiryolu aracının enerji tüketimini hesaplamak amacıyla ayrık kontrol model (Discrete control model) tabanlı bir tren hareket benzetimi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelde enerji tüketim hesaplama yöntemi olarak, deneysel formül ve sayısal bütünleşme kullanmışlardır. 1996'da Howlett ve arkadaşları (Howlett, 1996), sürekli kontrol model (Continuous control model) tabanlı benzer bir çalışma daha yapmışlardır. 2016'daki bir başka çalışmada Howlett ve arkadaşları (Albrecht vd. 2015), sürekli kontrole sahip genel bir tren hareket modeli sunmuşlardır. Burada ayrık kontrollü model dikkate alınmamıştır. Modele çeşitli güzergâh ve araç parametrelerinin yanı sıra hattın belirli bölgelerindeki hız kısıtlamaları da dâhil edilmiştir. Yağmur ve arkadaşları (Arıkan, 2020), raylı sistemlerde enerjinin verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla tek bir tren hareketinin modeli geliştirmişlerdir. Bu modele eğim, kurp vb. gibi güzergâh ve araca ait çeşitli parametrelerin dâhil edilmesinin yanı sıra bir konfor parametresi de eklenmiştir. Ignacio Villalba ve arkadaşları (Sanchis ve Zuriaga, 2016) tek tren hareketine ait bir model geliştirmişlerdir. Sunulan araç, mekanik ve elektrikli bir modele dayanmaktadır. Mekanik model, her benzetim adımında tren hızını ve konumunu yeniden hesaplar. Hızlanma parametresi, cer kuvveti, aerodinamik direnç, hat eğimi ve eğrilik direnci, fren kuvveti ve dinamik tren kütlesi aracılığıyla elde edilir. Tüm benzetim adımlarında çekiş kuvveti ve hız bilinerek enerji tüketimi hesaplanır. Frenleme işlemi sırasında trende geri kazanılan enerjinin belirlenmesi de mümkündür. Weiyang ve arkadaşları (Wang vd. 2018), çoğunluğun dikkate aldığı tek kütle noktası yerine çok parçalı tren modelini temel alarak bir tren hareket modeli önermişlerdir. Bu model hattın iniş ve çıkışlı yollarında hareket eden bir treni gerçeğe çok daha yakın temsil edebilmektedir. Peng Hu ve arkadaşları (Hu vd. 2012), daha önce verilen çalışmalardaki tüm parametrelere ek olarak rejeneratif frenleme enerjisinin de hesaplamalara dâhil edildiği bir tren hareket modeli önermişlerdir. Keskin ve Karamancıoğlu (Keskin, 2017), örnek olay olarak Eskişehir hafif raylı sistem ağının bir bölümünden gerçeğe yakın bir tren ve test yolu modellemişlerdir. Hız sınırlamaları, çeşitli hat hizalamaları, izin verilen maksimum yolculuk süresi ve tren kütlesindeki değişiklikler dikkate alınmış ve dakiklik ceza faktörü olarak modele dahil edilmiştir.

Son yıllarda, rejeneratif frenlemeli trenler yaygın olarak benimsenmiştir. Bunlar, trenlerdeki net enerji tüketimini azaltmak için frenlemeleri esnasında sahip oldukları kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilir. Rejeneratif enerji kullanımının verimliliği araştırılmış ve sonuçlar, hem frenleme yörüngesinin hem de zaman çizelgesinin, frenleme enerjisinin etkin kullanımına katkıda bulunabileceğini göstermiştir (Lu vd. 2014). Bu sebeple tekli tren çalışmaları dışında çoklu tren benzetimleri de incelenmiştir. Erchao Chen ve arkadaşları (Chen vd. 2015), rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum seviyede yararlanmak ve optimal çözümü sunmak amacıyla çoklu tren benzetimi geliştirmişlerdir. Bu model tekli tren hareketlerinde dikkate alınan tüm hat ve araç parametrelerini içermekte ve ayrıca hem hız profili hem de zaman çizelgesi optimizasyonu yapabilmek için yeterli donanımdadır. Shuai Su ve arkadaşları (Su vd. 2013) da benzer şekilde, ilgili tüm parametreleri dikkate alarak, ardışık istasyonlar arasında çalışan çoklu tren hareket modeli geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, bir raylı taşıtın hareketi, anlık hız, konum, ivme bilgileri ile cer gücü talebi, elektrikselsel güç talebi ve nihai enerji tüketimi gibi bilgilerin elde edilmesine olanak sağlayan, böylelikle gerçek bir raylı taşıtın hareketinin bilgisayar ortamında benzetilebildiği bir THB yazılımı geliştirilmiştir.

Çalışmalar sırasında İstanbul'daki raylı sistem ağına ait bir bölgeden gerçeğe uygun güzergâh ve yol karakteristik bilgileri alınmıştır. Bu bilgilerin benzetim modelinde uygulanması ile elde edilen test ortamı sayesinde benzetim ortamında koşturulan raylı taşıt ile gerçek ortamda koşturulan raylı taşıtın hız, konum, zaman ve enerji tüketimi bilgileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen veriler THB modelinin gerçeğe çok yakın bir performans gösterdiğini doğrulamaktadır.

2. Hareketin modellenmesi

Newton'un ikinci yarasını kullanarak trenin hareket denklemleri aşağıdaki biçimde yazılabilir (Keskin, 2016):

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_{tr} - F_{br} - F_R \pm F_G - F_C - F_T}{M(1 + \beta)} \quad (2)$$

burada x ve v sırasıyla trenin konumu ve hızıdır. F_{tr} cer (taction effort) kuvveti, F_{br} fren (braking effort) kuvveti, F_R temel hareket direnci, F_G seviye değişikliğinin neden olduğu direnç (gradyan direnci), F_C kavisli raylarda kayma, sürünme ve sürtünmeye bağlı olarak tekerlek-ray arayüzünde enerji kaybı nedeniyle eğri direncini, F_T tünel direnci, M trenin kütesini ve β kütle düzeltme faktörü (rotating mass) ifade eder.

Daha sonrasında, i ve $i + 1$ istasyonları arasındaki mesafe X_i ile izin verilen seyahat süresi T_i ile ve izin verilen maksimum hız T ile ifade edilmiştir. Bu nedenle i ve $i + 1$ istasyonları arasında bu parametreler aşağıdaki limitlerle sınırlandırılmıştır:

$$\begin{aligned} 0 &\leq x \leq X_i \\ 0 &\leq t \leq T_i \\ 0 &\leq v \leq V \end{aligned} \quad (3)$$

Trenin temel hareket direnci, F_R , Davis denklemi kullanılarak hesaplanabilir (Rangelov, 2012):

$$F_R = A + BV + CV^2 \quad (4)$$

- 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 sönümlenmesi, ayrıca 2.dereceden olmayan hava sürtünme direncinin ve sürtünmesinin bir kısmı, örneğin hava momentumu $\left[N \cdot \frac{s}{m}\right]$
- C Trenin önündeki ve arkasındaki aerodinamik direnç, ek türbülans etkisi $\left[N \cdot \frac{s^2}{m^2}\right]$
- V Trenin hızı $\left[\frac{m}{s}\right]$

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

İniş ve çıkışlardan kaynaklı gradyan direnci ise aşağıdaki formülden elde edilir (Rangelov, 2012):

$$F_G = M(1 + \beta)g \sin \alpha \quad (5)$$

g yerçekimi ivmesi ve M trenin boş kütesidir. Eğer aracın dönme ataletinden kaynaklı kütle artışı bilinmiyorsa, kütle $(1 + \beta)$ katsayısı ile çarpılarak aracın hareket halindeki boş kütesine yaklaşım sağlanabilir. β değeri genellikle trenin tipine ve cer sistemine bağlı olarak 0.06 – 0.11 arasında değer alır. Burada dönme kütesindeki ilave artış araç üretici firmasından temin edilerek boş kütleyle ilave edilmiştir. Kavisli raylarda kayma, sürünme ve sürtünme tekerlek-ray arayüzündeki enerji kaybı nedeniyle oluşan eğim direnci aşağıdaki formülden elde edilir (Su vd. 2016):

$$\begin{aligned} F_C &= 12,2 \cdot \left(\frac{a^0}{x_{cr}}\right) & x_{cr} &\geq l_t \\ F_C &= 12,2 \cdot \left(\frac{a^0}{l_t}\right) & x_{cr} &\leq l_t \end{aligned} \quad (6)$$

a^0 eğrinin açısı uzunluğu (derece), x_{cr} eğrinin doğrusal uzunluğu m ve l_t trenin uzunluğunu belirtmektedir. Tren tünel içine girdiğinde gelen ilave direnç kuvveti ise aşağıda verilen formülden elde edilebilir (Su vd. 2016):

$$F_T = 0,00013 \cdot l_{tu} \quad (7)$$

l_{tu} tünel uzunluğudur. Eğer trenin uzunluğu l_t tünel uzunluğundan büyük ise $F_T = 0,00013 \cdot l_t$ olarak tünel direnci hesaplanabilir.

Cer ve frenleme kuvvetleri tren üretici firmasından temin edilen orijinal eğriler temel alınarak modellenmelidir. Şekil 1, modellenen trenin orijinal cer ve frenleme eğrilerini göstermektedir. Hat boyunca düşük gerilim durumu olmadığı düşünülerek nominal gerilim aralığı altında cer ve frenleme kuvvetleri (mavi çizgili) formüle edilmiştir:

$$F_T = \begin{cases} 59,31 & v < 46,11 \\ 0,02048 \cdot v^2 - 3,319 \cdot v + 168,29 & 46,11 \leq v < 60 \\ 0,00893 \cdot v^2 - 1,7867 \cdot v + 118,17 & 60 \leq v \leq 80 \end{cases} \quad (8)$$

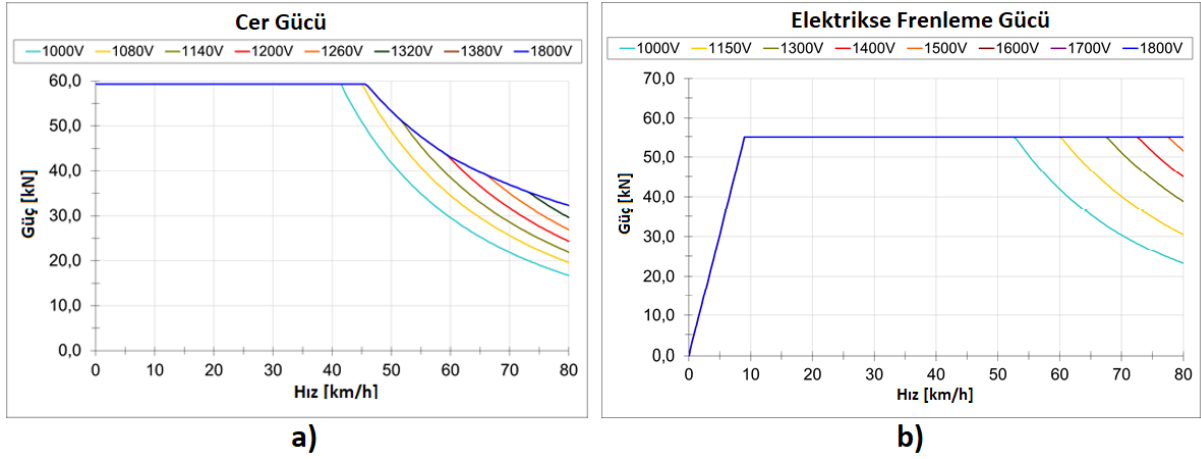
$$F_B = \begin{cases} 6,0024 \cdot v - 0,01 & v \leq 3,33 \\ 6,544 \cdot v - 1,813 & 3,33 < v \leq 6,389 \\ 5,9132 \cdot v - 2,2204 & 6,389 < v \leq 8,889 \\ 54,783 & 8,889 < v \end{cases} \quad (9)$$

Cer ve frenleme kuvvet eğrilerine göre F_T ve F_B kuvvetleri Denklem 8 ve 9'daki gibi elde edilmiştir. Cer kuvveti ve trenin hızı göz önüne alındığında, mekanik güç, F_{mec} , aşağıdaki denklemden belirlenir:

$$P_{mec}(t) = F_t(t) \cdot v(t) \quad (10)$$

Mekanik güç Denklem 10 değerleri dikkate alındığında, bir yolculuğu gerçekleştirmek için gerekli olan enerji miktarı, E_c :

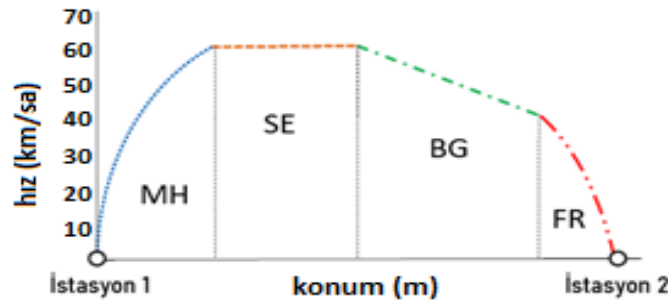
$$E_c = \int_0^T P_{mec}(t) dt \quad (11)$$



a) b)
Şekil 1. a) Cer ve b) fren kuvvetlerine karşı tren hızı

2.1. Tren hareket aşamaları

Bir trenin enerji tüketimi büyük ölçüde trenin hareketine bağlıdır. Düz bir hat için optimal bir tren işletimi sırasıyla aşağıdaki hareket aşamalarından oluşmalıdır: maksimum hızlanma (MH), seyir (SE), boşta gitme (BG) ve frenleme (FR).



Şekil 2. Örnek bir optimal tren hız profili

Birbirini takip eden iki istasyon arasında örnek bir sürüş senaryosu Şekil 2'de gösterilmektedir.

Sürekli zamanda sistem dinamiğini temsil eden diferansiyel Denklem 1'de, durum değişkenleri N adım için $[0, T]$ zaman aralığında ayrık zamana dönüştürülebilir (Keskin, 2016):

$$\begin{aligned} V_{k+1} &= V_k + a_k \cdot \Delta t \\ X_{k+1} &= X_k + \left(\frac{V_k + V_{k+1}}{2} \right) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (12)$$

$$\forall k \in \{0, \dots, N\}$$

burada v_k , x_k , a_k sırasıyla k adımında trenin hızını, konumunu ve ivmesini gösterir. Δt adım boyutunu temsil eder:

$$\Delta t = \frac{T}{N} \quad (13)$$

$k \in \{0, \dots, N\}$ için, F_k ve v_k miktarları k -inci adımdaki anlık gücü belirler ve yolculuk boyunca toplam enerji tüketimi, her adımdaki tüketimlerin toplamıdır.

2.2. Maksimum hızlanma (MH)

Yolculuğun başlangıcından seyir aşamasının başlangıcına kadar trenin, yapışma (adezyon) limiti sınırı içinde maksimum ivmelenme ile hızlanması sağlanır. Buradaki anlık ivme değeri Denklem 2'den elde edilir.

2.3. Seyir (SE)

Bu aşamada tren yolculuğuna sabit bir hızla devam eder. Hızı sabit bir değerde tutmak için uygulanan cer kuvveti, tren hareketine karşıt kuvvetlere eşit olmalıdır. Güzergâhın yokuş yukarı ve yokuş aşağı bölümleri, cer gücü miktarına ya katkıda bulunur ya da ondan uzaklaşır. Dolayısı ile bu hareket aşamasında ivme değeri sıfırdır.

2.4. Boşta gitme (BG)

Boşta gitme aşamasında tren, hâlihazırda elde edilmiş momentum altında bir hat boyunca hareket eder ve hiçbir cer enerjisi tüketilmez. Bu aşama, tren güvenli durma mesafesine ulaşana kadar devam eder. Güvenli durma mesafesi, kalan mesafenin ve mevcut tren hızının bir fonksiyonudur. Güvenli durma mesafesi:

$$x_{ss}(t) = F_t(t).v(t) \quad (14)$$

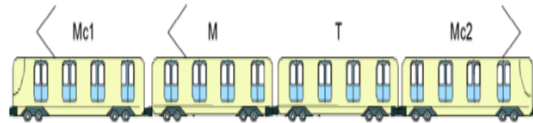
burada V_{br} , frenlemeye bağlı mevcut hızdır, a yavaşlama ivmesi ve x_{ss} , güvenli durma mesafesidir.

2.5. Frenleme

Bu aşamada trene hareket yönünün tersine sabit bir kuvvet uygulanır. Frenleme kuvvetinin büyüklüğü trenin özelliklerine bağlıdır. Enerji tüketiminin hesaplanmasında sadece cer gücünü dikkate aldığımız için frenleme aşamasında toplam enerji tüketimine katkısının olmadığı varsayılır.

3. Araç ve hat parametreleri

Geliştirilen modelin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, Metro İstanbul A.Ş. işletmesinde bulunan M3 Hattı ve bu hatta çalışan trenler gerçek parametreleriyle modellenmiştir. Şekil 3, bu hat üzerinde çalışan tren dizisini göstermektedir.



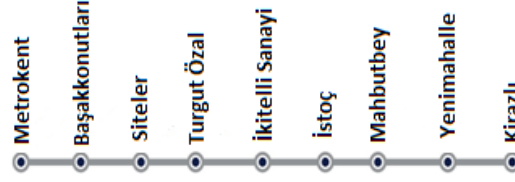
Şekil 3. M3 metro hattında çalışan alstom araç dizisi

Her biri 1 enerji tedarik sistemi (Tahrik Ünitesi) bulunan 2 adet sürücü vagon (Mc1 + Mc2), 1 adet motorlu ve 1 adet de taşıma (T) vagonundan oluşmaktadır. Trene ait diğer parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Her bir motorlu vagonunda 4 adet nominal değeri 150 kW olan asenkron cer motoru bulunmaktadır.

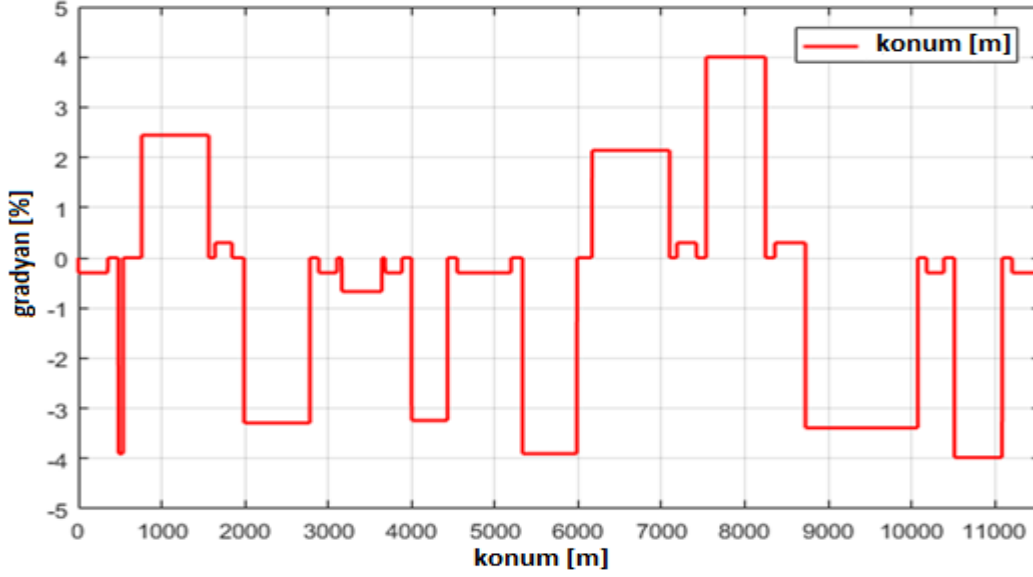
Tablo 1. Alstom aracı nominal performans değerleri

Maksimum Adezyon	%0,16
Maksimum Hız	88 km/h
Maksimum İşletme Hızı	80 km/h
Başlangıç İvmesi (0-40 km/h)	1,10 m/s ²
Ortalama İvme (0-80 km/h)	0,89 m/s ²
Maksimum Frenleme İvmesi	1,04 m/s ²

M3 Hattı Şekil 4'te görüldüğü üzere 9 adet istasyondan oluşmakta olup hat ile ilgili gradyan bilgileri Şekil 5'te ve kurp bilgileri ise Tablo 2'de paylaşılmıştır.



Şekil 4. M3 metro hattı istasyon bilgileri



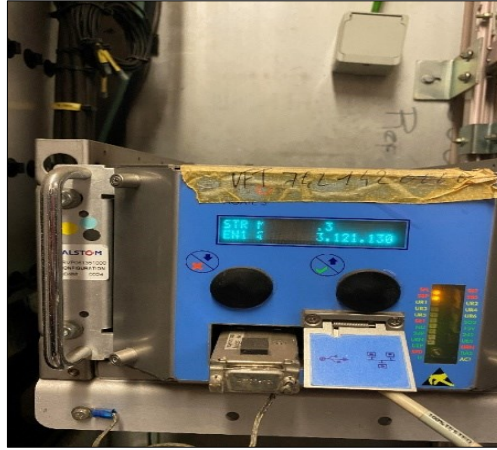
Şekil 5. M3 metro hattı gradyan (inişli-çıkışlı yol) bilgileri

Tablo 2. M3 metro hattı kurp bilgileri (güzergah boyunca dönemeçler)

Mesafe Aralığı (m)	Kurp Yarıçapı (m)	Kurp uzunluğu (m)	Açı (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
5202-5804	420	600	81,85
5871-6902	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

4. THB modelinin doğrulanması

Geliştirilen tren hareket benzetimi modelinin doğruluğunu ölçmek amacıyla M3 hattında, gece işletmenin olmadığı saat aralığında, daha önceden belirlenen hızlanma profillerinde araç sürüşleri makinist kontrolünde yapılmıştır. Sürüşe ait tüm bilgiler (hızlanma, yavaşlama, mesafe, enerji tüketimi vb.) Şekil 6'da verilen Alstom aracına ait ölçüm cihazından bilgisayar ile bağlanılarak alınabilmektedir. Bu doğrultuda farklı sürüş mod bileşimlerine dayanan 3 adet test yapılmıştır. İlk testte MH + BG + FR, ikinci testte MH + FR ve üçüncü testte ise MH + SE + BG + FR kullanılarak testler yapılmıştır.



Şekil 6. Alstom aracında bulunan ölçüm cihazı

4.1. M3 hattı Siteler-Turgut Özal istasyonları arası sürüş testi-1

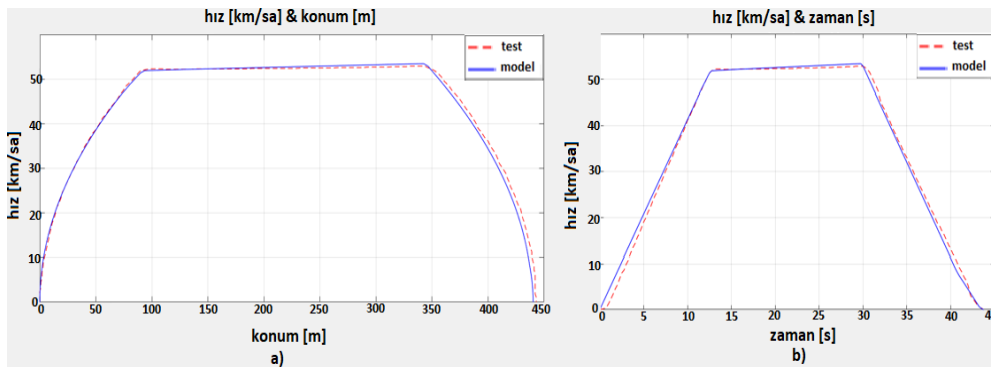
İlgili sürüşe ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir. Ölçüm cihazından alınan bilgiler doğrultusunda bu sürüşte makinist 90 metre boyunca tam cer kuvveti ile hızlanarak 12,75 saniye içinde 51,9 km/h hıza ulaşmış ardından 17,5 saniye boyunca 254 metre yol alarak boşta gitme fazına geçmiş ve ardından tam frenleme kuvveti ile 99 metre sonra 15 saniye içinde durmuştur.

Geliştirilen tren hareket benzetim modeline girilen veriler şu şekildedir: 0-90 metre boyunca maksimum cer kuvveti ile hızlan, 90-344 metre arasında boşta gitme fazı ardından tam frenleme kuvveti uygulanarak duruş. Gerçek tren hareketi ile benzetim hareketlerinin karşılaştırılması Şekil 7'de sunulmuştur.

Tablo 3. Siteler-Turgut Özal istasyonları arası test -1

Parametreler	MH 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
Süre (sn)	12,75	17,5	15
Mesafe (m)	90	254	99
Ulaşılan Hız (km/h)	51,9	52,9	0

Şekil 7'de görüldüğü üzere modellenen tren, gerçek tren hareketini küçük sapmalar ile benzetebilmiştir. Tablo 4'te gerçek tren ile modellenen tren hareketi arasında detaylı kıyaslama yapılmıştır. Tablo 5'te ise modelin gerçek tren hareketine göre hata oranları verilmiştir.



Şekil 7. a) Model & Gerçek hız-konum karşılaştırması test-1 b) Model & Gerçek hız-zaman karşılaştırması test-1

Tablo 4. Model doğruluk kıyaslaması -1

	Gerçek Tren Hareketi	Modellenen Tren Hareketi
Maks. cer gücü ile gidilen mesafe (<i>m</i>)	90,00	90,00
Maks. cer gücü ile hareket süresi (<i>sn</i>)	12,75	12,53
Maks. cer gücü ile ulaşılan hız (<i>km/sa</i>)	51,90	51,33
Frenleme mesafesi (<i>m</i>)	99,00	96,4
Boşta gitme süresi (<i>sn</i>)	17,5	17,3
Boşta gitme sonunda ulaştığı hız (<i>km/sa</i>)	52,9	52,7
Toplam enerji tüketimi (<i>kWsa</i>)	4,98	4,76

Tablo 5. Model hata oranları -1

	Hata miktarı (%)
Maks. cer gücü ile hareket süresi	1,72
Maks. cer gücü ile ulaşılan hız	1,09
Frenleme mesafesi	2,62
Boşta gitme süresi	1,14
Boşta gitme sonunda ulaştığı hız	0,37
Toplam enerji tüketimi	4,42

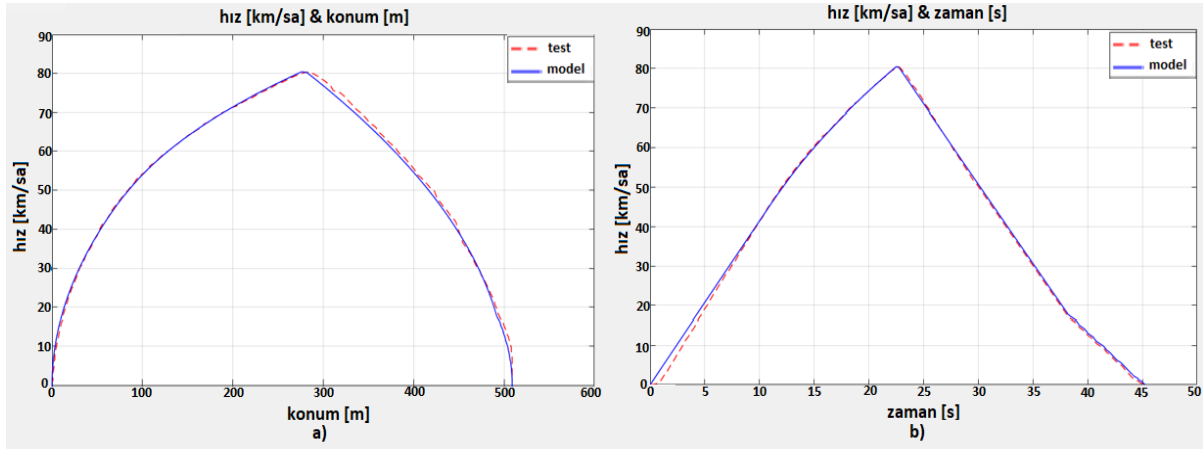
4.2. M3 hattı Siteler-Turgut Özal istasyonları arası sürüş testi -2

Aynı güzergâh üzerinde farklı bir hareket modunda yeniden tren sürülmüştür. Bu sürüşe ait bilgiler aşağıdaki Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Siteler-Turgut Özal istasyonları arası test -2

Parametreler	MH Fazı	FR Fazı
Başlangıç Zamanı	01:20:54	01:21:17
Bitiş Zamanı	01:21:16	01:21:36
Süre (<i>sn</i>)	22,5	20,25
Mesafe (<i>m</i>)	279	230
Ulaşılan Maksimum Hız (<i>km/h</i>)	80,2	0

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 modele benzer şekilde aynı veriler girilerek çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 8’de paylaşılmıştır.



Şekil 8. a) Model & Gerçek hız-konum karşılaştırması test-2 b) Model & Gerçek hız-zaman karşılaştırması test-2

Gerçek ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında, geliştirilen modelin gerçek bir tren hareketini yüksek doğruluk oranı ile benzetebildiği görülmektedir. Tablo 7’de detaylı kıyaslama paylaşılmıştır.

Tablo 7. Model doğruluk kıyaslaması -2

	Gerçek Tren Hareketi	Modellenen Tren Hareketi
Maks. cer gücü ile gidilen mesafe (<i>m</i>)	279,00	279,00
Maks. cer gücü ile hareket süresi (<i>sn</i>)	22,50	22,70
Maks. cer gücü ile ulaşılan hız (<i>km/sa</i>)	80,20	80,14
Frenleme mesafesi (<i>m</i>)	230,00	230,34
Toplam enerji tüketimi (<i>kWsa</i>)	10,90	11,39

Modellenen tren hareketinin gerçek tren hareketine kıyaslanması sonucu elde edilen yüzdesel hatalar Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Model hata oranları -2

	Hata miktarı (%)
Maks. cer gücü ile hareket süresi	0,89
Maks. cer gücü ile ulaşılan hız	0,08
Frenleme mesafesi	0,14
Toplam enerji tüketimi	4,49

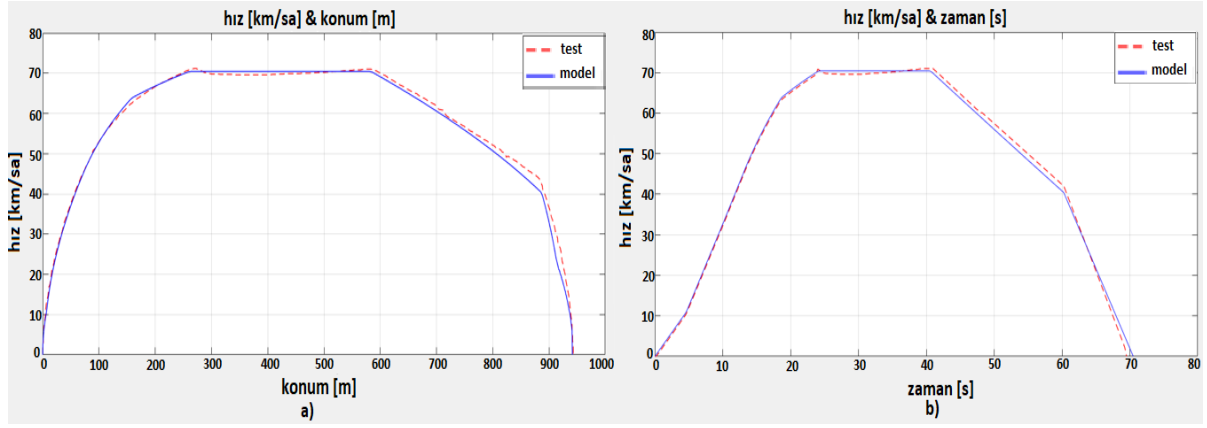
4.3. M3 hattı İstoç-Mahmutbey istasyonları arası sürüş testi -3

İstoç - Mahmutbey güzergâhı üzerinde farklı bir hareket modunda yeniden tren sürülmüştür. Bu sürüşe ait bilgiler de Tablo 9’da verilmiştir.

Bu sürüş profilinde makinist 262 metre boyunca maksimum cer kuvveti ile hızlanarak 70,9 km/h hıza ulaşmış ve ardından sırası ile yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere 321 metre sabit hızda gitme akabinde 305 metre boşta gitme fazlarını uygulayarak hareketini devam ettirmiş en sonunda ise maksimum frenleme kuvveti ile 55 metre içinde hareketini tamamlamıştır. Geliştirilen modele benzer şekilde ilgili veriler girilerek çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 9’da paylaşılmıştır.

Tablo 9. İstoç-Mahmutbey istasyonları arası test -3

Parametreler	MA Fazı	CR Fazı	CO Fazı	BR 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 (<i>sn</i>)	22,5	17	19,25	13
Mesafe (<i>m</i>)	262	321	305	55
Ulaşılan Maksimum Hız (<i>km/h</i>)	70,9	71	44,3	0



Şekil 9. a) Model & Gerçek hız-konum karşılaştırması test-3 b) Model & Gerçek hız-zaman karşılaştırması test-3

Gerçek ve benzetim sonuçları karşılaştırılması Tablo 10 ve gerçek tren sürüşüne kıyasla önerilen THB modelinin hata oranları da Tablo 11’de sunulmuştur.

Tablo 10. Model doğruluk kıyaslaması -3

	Gerçek Tren Hareketi	Modellenen Tren Hareketi
Maks. cer gücü ile gidilen mesafe (<i>m</i>)	262,00	262,00
Maks. cer gücü ile hareket süresi (<i>sn</i>)	22,50	22,75
Maks. cer gücü ile ulaşılan hız (<i>km/sa</i>)	70,90	70,32
Boşta gitme süresi (<i>sn</i>)	19,25	20,00
Boşta gitme sonunda ulaştığı hız (<i>km/sa</i>)	44,30	41,58
Frenleme mesafesi (<i>m</i>)	55,00	55,33
Toplam enerji tüketimi (<i>kWsa</i>)	16,80	17,63

Tablo 11. Model hata oranları -3

	Hata miktarı (%)
Maks. cer gücü ile hareket süresi	1,10
Maks. cer gücü ile ulaşılan hız	0,81
Boşta gitme süresi	3,89
Boşta gitme sonunda ulaştığı hız	6,14
Frenleme mesafesi	0,6
Toplam enerji tüketimi	4,94

5. Sonuç

Enerji tüketiminin yüksek olduğu raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği çalışmaları hem ekonomiye hem de çevreye sunduğu katkıdan dolayı önemini korumaktadır. Hızlanma profili optimizasyonu gibi çalışmalar ile cer enerjisi tüketiminin azaltılması mümkün olmaktadır. Bu çalışmada enerji verimliliği optimizasyonu ve/veya benzer raylı taşıt optimizasyon problemlerinde kullanılacak, gerçek bir raylı taşıt hareketini yüksek hassasiyet ile bilgisayar ortamında gerçekleştirebilecek bir benzetim modeli sunulmuştur. Önerilen model ile raylı taşıta ait hız, konum ve zaman verileri tutulmaktadır. Çalışmalar sırasında Metro İstanbul A.Ş. işletmesine bağlı M3 metro hattında yer alan gerçek trenler kullanılarak farklı sürüş stratejileri altında testler yapılmıştır. Aynı test güzergâhlarının benzetim modelinde işlenmesi ile elde edilen veriler ile gerçek sürüş sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Toplam enerji tüketimi açısından bakıldığında benzetim ortamında yapılan test verileri ile gerçek ortamda yapılan test verileri yaklaşık olarak %96 hassasiyet ile örtüşmektedir. Bu sonuç önerilen modelin performansının yüksek olduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak raylı taşıt optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik çalışmalarda, önerilen model büyük kolaylık sağlayacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Metro İstanbul AŞ. tarafından YT210003 nolu “*Tren Hız Profillerinin Optimizasyonu ve Regeneratif Frenleme Enerjisinin Geri Kazanımı*” projesi kapsamında desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X. and Zhou, P. (2015). The key principles of optimal train control—Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 94, pp. 482–508, 2016, doi: 10.1016/j.trb.2015.07.023

Arıkan, Y., Şen, T., ve Çam, E. (2020). A study of energy efficiency in rail vehicles. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol.7, no. 1, (223-235), 2020, doi: 10.31202/ecjse.622358

Cheng, J.X., and Howlett, P. (1993). A note on the calculation of optimal strategies for the minimization of fuel consumption in the control of trains. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 38, no. 11, pp. 1730–1734, Nov, 1993 doi: 10.1109/9.262051

Chen, E., Bu, B., ve Sun, W. (2015). An energy-efficient operation approach based on the utilization of regenerative braking energy among trains. *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015*, doi:10.1109/ITSC.2015.419

- Hillmansen, S., and Roberts, C.** (2007). 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, Jan, 2007, doi:10.1243/09544097JRRT99
- Howlett, P.** (1996). Optimal strategies for the control of a train. *Automatica*, vol. 32, no. 4, pp. 519–532, 1996,doi: 10.1016/0005-1098(95)00184-0
- Hu, P., Chen, R. ve Li, H.** (2012). Train operation traction energy calculation and saving in urban rail transit system. *Second International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control, 2012*, doi: 10.1109/IMCCC.2012.125
- Keskin K. ve Karamancıoğlu, A.** (2016). Energy efficient motion control for a light rail vehicle using the big bang big crunch algorithm. *14-th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, Istanbul,2016*, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.824
- Keskin, K. ve Karamancıoğlu, A.** (2017). Energy-efficient train operation using nature-inspired algorithms. *IFAC (International Federation of Automatic Control), 2017*, doi: org/10.1155/2017/6173795
- Lu, S., Weston, P., Hillmansen, S., Gooi, H. B. and Roberts, C.** (2014). Increasing the Regenerative Braking Energy for Railway Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, pp. 2506-2515, 2014, doi:10.1109/TITS.2014.2319233
- Mellitt, B., Goodman, C.J., and R. I. M. Arthurton, R.I.M.** (1978). Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 125, pp. 298-303, Apr, 1978, doi: 10.1049/piee.1978.0075
- Sanchis, I.V. ve Zuriaga, P.S.** (2016). An energy-efficient metro speed profiles for energy savings: application to the Valencia metro. *XII Conference on Transport Engineering, CIT 2016, 7-9 Jun. 2016, Valencia, Spain*, pp 226-233
- Rangelov, V.N.,** (2012). Gradient modelling with calibrated train performance models. *COMPRAIL*,vol: 127, 10.2495/CR120111, September 2012.
- Su, S., Li, X., Tang, T. ve Gao, Z.** (2013). A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 14, no. 2, june 2013, doi:10.1109/TITS.2013.2244885
- Su, S., Tang, T., ve Wang, Y.** (2016). Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model. *Article in Energies*, February 2016, doi: org/10.3390/en9020105
- Wang, W., Zeng, X., Shen, T. ve Liu, L.** (2018). Energy-efficient speed profile optimization for urban rail transit with considerations on train length. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, Hawaii, USA, Nov.4-7, 2018*