



## Bir Metro Hattında Araç Kapasitesinin Artırılmasının Orta Gerilim ve Cer Sistemleri Üzerine Etkileri

Zennure YENER<sup>\*1</sup>, Özcan KALENDERLİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*yener21@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 12.05.2023, Kabul/Accepted: 30.05.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

**Özet:** Metro hatları büyük şehirlerin ulaşım ağlarında önemli bir yer tutmaktadır. İnsanların yoğunlukla kullandığı bu hatlarda artan yolcu talebini karşılamak amacıyla yeni hatlar yapılması, mevcut hatların da tren sefer sıklıkları artırılması, daha konforlu ve daha fazla yolcu kapasiteli araçlar kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Araç kapasitesinin ve işletme parametrelerinin değiştirilmesinin orta gerilim ve cer sistemi üzerine etkileri olmaktadır. Bu etkilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, güvenli bir toplu taşıma sisteminin devamlılığı için önemlidir. Bu araştırma yazısında, işletilmekte olan M1A hattının bir bölümünde, mevcutta 4'lü dizi 180 s sefer sıklığı aracın yapılan işletme, Hi-SimuX ve SimuX programı kullanılarak 90 s sefer sıklığı 4'lü ve 5'li dizilerdeki araçlar ile hat kapasitesi artırılarak analiz edilmiştir. Üç farklı araç tipi ile yapılan analizlerde, ilave trafo merkezlerinin gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte literatürde yer alan eko sürüş tekniklerinde yaklaşık %20, yol tasarımının iyileştirmesi ile yapılan analizlerde yaklaşık %10 enerji tasarrufu sağlanırken araç seçimi ile %50'ye varan enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Raylı sistemler, Araç kapasitesi, Entegrasyon, Orta gerilim, Cer gücü sistemi

### The Effects of Increasing Vehicle Capacity on Medium Voltage and Traction Systems in a Metro Line

**Abstract:** Metro Lines have an important place in the transportation networks of big cities. In order to meet the increasing passenger demand on these lines, which are used by people intensively, new lines are being built, train services of existing lines are becoming more frequent, and studies are being carried on using vehicles with more comfortable and more passenger capacities. Changing the vehicle capacity and operating parameters affects the medium voltage and the traction system. An accurate assessment of these impacts is important for the continuity of a safe public transport system. In this research paper, in a section of the M1A line, the current 4-series 180 s flight frequency was analyzed by increasing the line capacity with the vehicles in the 90 s series by using the Hi-SimuX and SimuX program. Analysis of three different vehicle types revealed the need for additional substations. However, it has been seen that approximately 20% energy savings can be achieved in eco driving techniques in the literature, approximately 10% in analyzes made with the improvement of road design, while up to 50% energy savings can be achieved with vehicle selection.

**Keywords:** Railway systems, Vehicle capacity, Integration, Medium voltage, Traction power system

#### 1. Giriş

Ülkemizde raylı sistemlerin en fazla ihtiyaç duyulduğu şehirlerin arasında yaklaşık 16 milyon nüfusu ile İstanbul gelmektedir. Trafik yoğunluğunun artması, karayolu taşımacılığına nazaran çevreye olan olumsuz etkileri dikkate alındığında güvenli ve hızlı bir ulaşım aracı olan raylı sistemlere olan ilgiyi artırmaktadır. İstanbul'da raylı taşımacılık oranı % 41,9'leri bulmaktadır [1]. Raylı sistem yatırımları büyük bütçeler gerektirir.

Atıf için/Cite as: Z. Yener, Ö. Kalenderli, "Bir metro hattında araç kapasitesinin artırılmasının orta gerilim ve cer sistemleri üzerine etkileri," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 86-97, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1296406

Ülkemizde demiryolu tarihi, ilk olarak 1856 yılında 130 km İzmir-Aydın demiryolu hattının açılmasıyla başlamıştır. 1869 yılında İstanbul’da Karaköy Tüneli olarak bilinen ilk tünel çalışması başlatılmıştır. Karaköy Tünelinden sonra 1989 yılında İstanbul hafif metro hattı ve 1992 yılında Konya hafif metro hatları hizmete başlamıştır [2]. 1869 yılında İstanbul’da Karaköy Tüneli olarak bilinen ilk tünel çalışması başlatılmıştır.

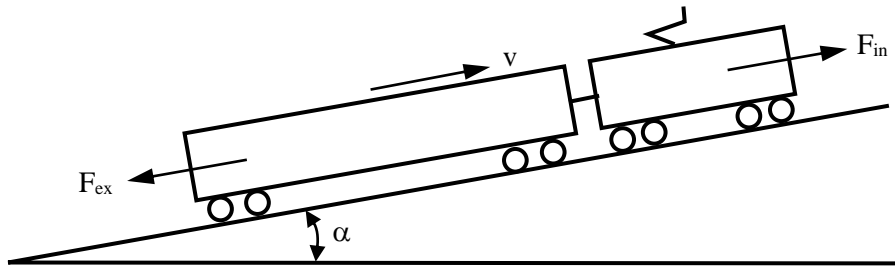
Raylı sistemlerin en temel konusu tren hareketini sağlamaktır. Elektrik enerjisi yerel şebekeden indirici trafo merkezi tarafından gerilim seviyesi ihtiyacına göre ayarlanmaktadır. Daha sonra bir ring şebeke yapısıyla trenin elektrik ihtiyacı kurulan Cer Gücü Trafo Merkezleri ile sağlanmaktadır. Artan yolcu talebinin karşılanması, araç kapasitesinin artırılması veya tren sefer aralığının azaltılmasıyla sağlanabilmektedir. Bu çalışmada işletilmekte olan M1A hattındaki Yenikapı Otogar istasyonu arasında tren sefer sıklığı azaltılarak ve farklı tip araçlar kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmış ve enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Trafo merkezlerinin devrede olduğu durumlar ve tek trafo devre dışı durumları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Aynı zamanda mevcut hattın kapasite ihtiyacının sağlanabilmesi için ilave trafo ihtiyaçları belirlenerek simülasyonlar tekrarlanarak sonuçları paylaşılmıştır. Literatürde mevcut hatların ETAP [3], MATLAB [4] gibi çeşitli simülasyon programlarında tren sabit bir yük kabul edilerek, yük akışı analizleri yapılarak mevcut durumla karşılaştırması yapılmıştır. Enerji optimizasyonu ile ilgili literatür çalışmalarında eko sürüş teknikleri, rejeneratif enerjiden daha fazla yararlanma [5], güzergâh seçimlerine yer verilmiştir [6]. Bu çalışmada literatürden farklı olarak mevcut hattın araç kapasitesi artışı farklı tip araç verileri kullanılarak tren yükü hareketli bir yük olarak Hi-SimuX ve SimuX programında analiz edilmiştir ve enerji tasarrufu yapabilmek için araç verisinin önemi vurgulanmıştır.

## 2. Metot

Bu bölümde tren hareketini hesaplamaya yönelik formüller verilmiştir. Tren hareketi hattın geometrik yapısı ve tren çekiş sistemi karakteristiklerine bağlıdır. Trenin hareketi en basit şekilde Newton’un hareket denklemi (Denklem 1) ile tanımlanabilmektedir.

$$\sum_{i=0}^n F = m * a \quad (1)$$

Bu denklemde F trene etki kuvvet, m trenin kütlesidir, a ise ivmedir.



Şekil 1. Hat üzerinde tren hareketi [7]

- $F_{in}$ : Tren çekiş kuvveti
- $F_{ex}$ : Trene ters yönde etki eden direnimsel kuvveti
- $v$ : Tren hızı
- $\alpha$ : Eğim

Şekil 1’den F kuvveti Denklem 2 ile

$$F = F_{in} - F_{ex} = m \cdot a \quad (2)$$

olur. Trene ters yönde etki eden direnimler Denklem 3'teki gibi yazılırsa

$$F_{cx} = F_r + F_{gr} + F_c \quad (3)$$

denklemini olur. Bu denklemde  $F_r$  trenin direnimi,  $F_{gr}$  eğimlerden kaynaklı direnim ve  $F_c$  kurplardan kaynaklı direnimdir.  $F_r$  trenin direnimi, Denklem 4'teki gibi

$$F_r = A + Bv + C \cdot v^2 \quad (4)$$

olarak yazılır [8]. Burada A katsayısı yüke bağlı bir değişkendir, B katsayısı hat ve tren kararlılığına bağlı bir değişken, C katsayısı ise aerodinamik direnç değişkenidir.  $A + B \cdot v$  genellikle hareket direnimi,  $C \cdot v^2$  ise aerodinamik direnim olarak ifade edilmektedir. Araç imalatçıları  $F_r$  formülünü farklı şekilde verebilmektedir. Örnek bir formül ve katsayılar Denklem 5'te verilmiştir.

$$F_r = 6,4 m + 130 n + 0,14 m V_t + \beta \text{ktünel} [0,046 + 0,0065(N - 1)] A V_t^2 \quad (5)$$

Bu denklemde

$V_t$ : Tren hızı (km/s)

m: Trenin kütlesi

n: Aks sayısı

N: Araç sayısı

A: Trenin ön alanı

$\beta$ ktünel: Katsayı (tren açık hatta ise 1, tünelde ise genel olarak 1,5 alınmaktadır).

$F_{gr}$  eğimlerden kaynaklı direnim, Denklem 6 ile

$$F_{gr} = m g \sin(\alpha) \quad (6)$$

denklemini ile;  $F_c$  kurplardan kaynaklı direnim, Denklem 7 ile

$$F_c = k_e / (r \cdot 10^{-3}) mg \quad (7)$$

denklemini ile verilir. Denklem 7'deki  $k_e$  katsayısı için Tablo 1'deki değerler kullanılmaktadır.

**Tablo 1.** Ray genişliğine bağlı  $k_e$  katsayısı [7]

Ray Genişliği (mm)	$k_e$ (m)
1435	750
1000	530
750	400
600	325

## 2.1 Kullanılan standartlar

Raylı sistemlerin tarihi boyunca cer motorlarındaki teknolojik gelişmeler ile farklı gerilim seviyelerinde ve frekanslarda enerji sistemleri kullanılmıştır. 15 kV AC 16 2/3 Hz İsviçre ve Almanya'da, 25 kV AC 50 Hz hızlı tren hatlarında, 2 x 25 kV AC 50 Hz Fransa'da kullanılmıştır. Metrolarda genelde 750 V DC, 1500 V DC gerilim seviyeleri daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte Almanya, İngiltere, Fransa, Japonya gibi ülkelerde 600 V DC, Moskova'da 825 V DC gibi farklı gerilim seviyeleri de kullanılmaktadır [9], [10], [11]. EN 50163 ve IEC 60850'e göre izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** EN 50163 ve IEC 60850 standartlarına göre izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri [12], [13], [14]

Gerilim Türü	$U_n$ (V)	$U_{nmin2}$ (V)	$U_{nmin1}$ (V)	$U_{max1}$ (V)	$U_{max2}$ (V)	$U_{max3}$ (V)
DC 600 V	600	-	400	720	800	1015
DC 750 V	750	-	500	900	1000	1270
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2540
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15 kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24300
AC 25 kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38759

$U_n$ : Anma (nominal) gerilim

$U_{nmin1}$ : En düşük sürekli gerilim

$U_{nmax1}$ : En yüksek sürekli gerilim

$U_{min2}$ : En düşük geçici gerilim (maksimum 2 dakika)

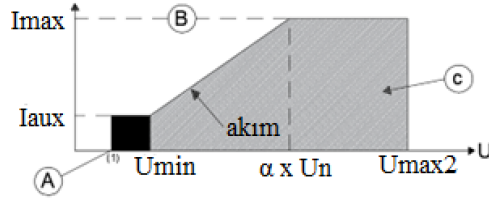
$U_{max2}$ : En yüksek geçici gerilim (maksimum 5 dakika)

$U_{max3}$ : Aşırı gerilim (20 ms'den uzun)

EN 50329 standardına göre çalışma sınıfı VI olan trafoların % 150 yüke 2 saat, % 300 yüke 1 dakika sınıfı V olan trafoların ise % 150 yüke 2 saat, % 200 yüke 1 dakika sınır kapasiteleri belirtilmiştir [14].

EN 50122-1 standardına göre ray gerilimin alabileceği değer 300 saniyeden büyük değerler için 120 V, 1 saniye için 160 V'dur [15].

Araçlarda gerilime bağlı cer akımı sınırlaması için kullanılan grafik Şekil 2'de verilmiştir. 750 V DC için 600 V DC de cer akımı maksimum değerini almakta ve bu gerilim seviyesinden sonra cer akımı sınırlandırılmaktadır.



- (A) Cer yok                      750 V DC için  $\alpha = 0,8$   
 (B) Akım seviyesi aşıldı  
 (C) İzin verilen akım seviyeleri

**Şekil 2.** EN 50388'e göre katener hat gerilimine karşı tren akımının izin verilen çalışma aralıkları [16]

## 2.2. Simülasyon verileri

Hem tren hareketlerinin hem de demiryolu güç kaynağı şebekesinin aynı anda hesaplanmasına olanak sağlayan, güçlü bir kullanıcı ara yüzüne sahip İTÜ Teknokent'te yerleşik HI-SIM Teknoloji Mühendislik firması tarafından geliştirilen Hi-SimuX ve SimuX yerli yazılımları kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında araç verileri, hat verileri, işletme verileri, güzergâh boyunca eğimler, kurplar, hız kısıtlamaları, işletme hızı veri olarak girilmiştir. M1A hattında



Normal katener sistemi km direnci 44,4 miliOhm olarak alınmıştır. Proje kapsamında kullanılan S49 tek hat normal ray direnci km 20,5 miliOhm olarak alınmıştır. İki hatta ait 4 ray 250 m'de bir paralelleme olduğu katener hattında paralelleme bulunmadığı kabul edilmiştir.

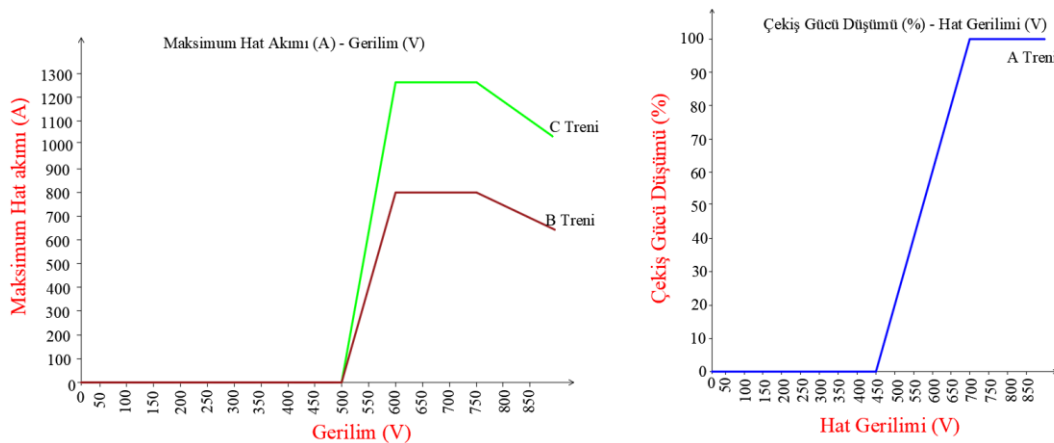
Simülasyonda kullanılan araç tipleri sembolik olarak adlandırılmıştır. A treni 5'li dizi, B treni 5'li dizi ve C treni 4'lü dizi kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan araçlardan birisi mevcut hatta 4'lü dizi olarak 180 s sefer sıklığı ile işletilmektedir. Her bir parametre ve eğri tek bir araç için verilmiştir. Trenlerin yardımcı güç sistemi sürekli %50'si yüklenecek şekilde hesaba katılmıştır.

Tüm trenlerde 70 kg ağırlığında 1250 yolcu bulunduğu kabul edilmiştir. B ve C trenlerinin gerilime bağlı cer akımı sınırlama eğrisinin, EN 50388 standardına uygun olduğu kabul edilmiştir [16]. A trenlerinde gerilime bağlı akım sınırlamasından farklı olarak gerilime bağlı cer kuvveti sınırlaması bulunmaktadır.

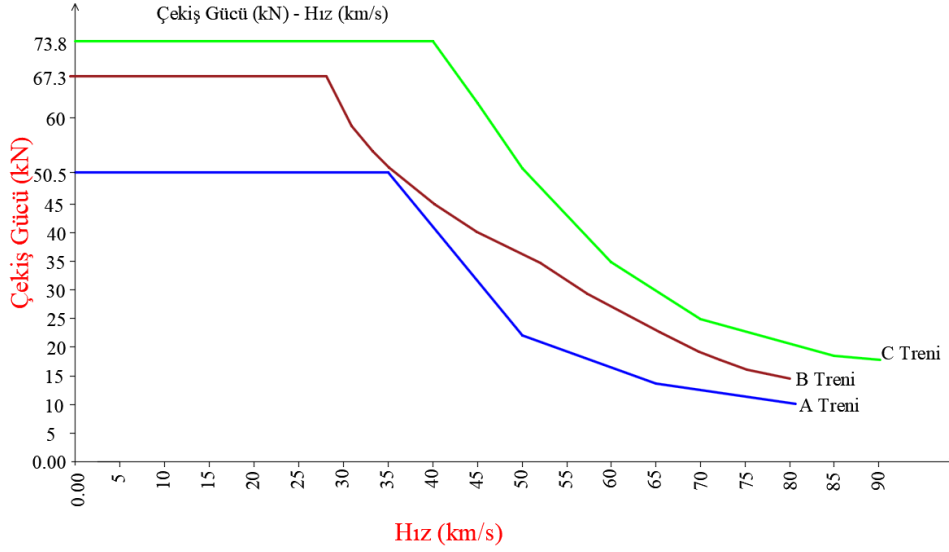
Simülasyonda kullanılan trenlere ait veriler Tablo 5'te ve Şekil 4'te cer kuvveti [kN]- hız [km/h] diyagramı, Şekil 5'te rejeneratif fren kuvveti [kN]- hız [km/h] diyagramı ve Şekil 6'da verim [%]- hız [km/h] diyagramı sunulmuştur.

**Tablo 5.** Araç parametreleri

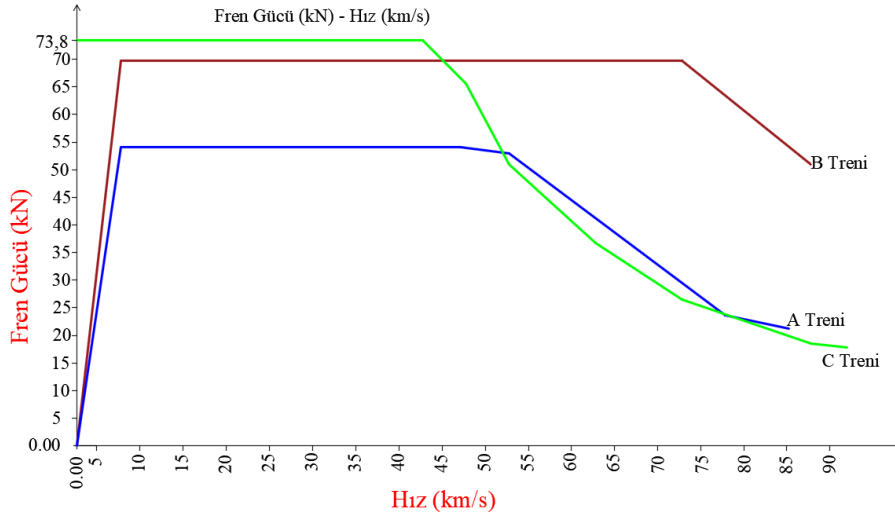
Parametre	A Treni 5'li Dizi	B Treni 5'li Dizi	C Treni 4'lü Dizi
Maksimum İşletme Hızı [km/h]	80	80	80
Maksimum İvmelenme [m/s <sup>2</sup> ]	1	0.7	1.1
Maksimum Frenleme İvmesi [m/s <sup>2</sup> ]	1.1	1.1	1.1
Jerk Limit [m/s <sup>3</sup> ]	0.8	1	1
Boş Ağırlık – AW0 [kg]	199500	145000	157676
Döner Kütle Oranı [%]	10	10	8.5
Uzunluk [m]	118	115	114
Yardımcı Güç [kW]	300	135	240
Maksimum İşletme Gerilimi (EN 50163) [V]	900	900	900
Minimum İşletme Gerilimi (EN 50163) [V]	500	500	500



**Şekil 4.** Araçlara ait gerilime bağlı akım (sola) ve cer gücü gerilim sınırlama (sağda) grafikleri



Şekil 5. Araçlara ait Çer Gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları



Şekil 6. Araçlara ait Fren Gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları

### 3. Bulgular

Simülasyon sonuçları üç farklı grup simülasyonları şeklinde aşağıda verilmiştir Birinci Grup simülasyonlar 5 adet trafo merkezli mevcut hatta 90 s sefer sıklığına göre yapılmıştır. İkinci Grup simülasyonlar 5 adet trafo merkezli mevcut hatta tek trafo merkezinin devre dışı kalma durumu için 120 s sefer sıklığına göre yapılmıştır. Üçüncü Grup simülasyonlar ise hatta ilave 3 adet yeni trafo merkezi eklenerek (Şekil 8) tek trafo merkezinin devre dışı kalma durumu 120 s sefer sıklığına göre tekrar yapılmıştır.

#### 3.1. Birinci grup simülasyonlar: 5 TM'li durum, tüm trafolar devrede, sefer sıklığı 90 s

**Tablo 6.** Trafo yüklenmeleri

Trafo Merkezi	Maksimum Güç [kW]	Maksimum Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
TM01	3699	176	1805	86	1412	67
TM02	8053	192	4456	106	3532	84

TM03	7976	190	5153	123	4268	102
TM04	8372	199	5471	130	4643	111
TM05	4681	223	2973	142	2393	114

**Tablo 7.** Normal durum simülasyon sonuçları

Araç	Enerji Talebi [kWh]	Maksimum Güç [kW]	Maksimum RMS Güç [kW]	Minimum Tren Gerilimi [V]	Maksimum Ray Gerilimi [V]	Minimum Ray Gerilimi [V]
A Treni 5'li dizi	9396	15268	9523	626	42	-44
B Treni 5'li dizi	13701	26857	14411	508	77	-47
C Treni 4'lü dizi	12943	26385	13554	503	70	-48

Tablo 6'da verilen trafo yüklenmeleri EN 50329'da belirtilen sınır değerlerdedir. Tablo 7'de verilen A trenleri ile minimum tren gerilim değerinde bir sıkıntı görünmemektedir. Ancak diğer iki tren ile sınır değere çok yaklaşılmaktadır. Senaryo sonuçlarına göre ray gerilimi EN 50122-1 standardına göre istenen aralıktadır.

### 3.2. İkinci grup simülasyonlar 5 trafo merkezli durum, tek trafo devre dışı, sefer sıklığı 120 s

Tablo 8'de verilen trafo yüklenmeleri incelendiğinde yüklenme değerlerinin çok yüksek olduğu ve bazı senaryolarda tanımlı sınır değerlerin aşıldığı görülmektedir.

**Tablo 8.** Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri

Araç	Trafo Merkezi	Maks. Güç [kW]	Maks. Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
A Treni (5'li dizi)	TM01	4862	232	2971	141	2193	104
	TM02	5833	139	3747	89	2804	67
	TM03	7424	177	5813	138	4132	98
	TM04	8339	199	6751	161	4700	112
	TM05	5058	241	3714	177	2759	131
B Treni (5'li dizi)	TM01	7202	343	4547	217	3262	155
	TM02	8847	211	5626	134	4032	96
	TM03	12182	290	7816	186	5544	132
	TM04	11240	268	8111	193	4385	104
	TM05	6738	321	5004	238	3466	165
C Treni (4'lü dizi)	TM01	7367	351	4090	195	2926	139
	TM02	7827	186	4976	118	3551	85
	TM03	11912	284	7779	185	5478	130
	TM04	10208	243	5316	127	3258	78
	TM05	7323	349	4243	202	3161	151

Tablo 9'da verilen ray gerilimi değerleri EN50122-1 standardında istenen aralıktadır. Ancak tek trafo devre dışı durumu sonuçları incelendiğinde minimum tren gerilimi değerlerinin her üç araçta da 500 V'un altına düştüğü ve mevcut trafo merkezlerinin yeterli olmadığı görülmektedir.

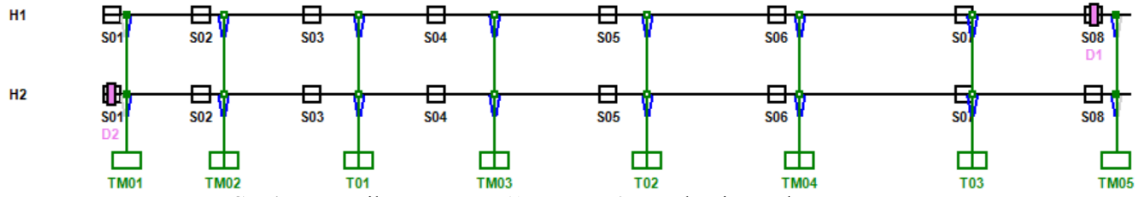


**Tablo 9.** Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları

Araç	Devre Dışı Trafo Merkezleri	Enerji Talebi [kWh]	Maks. Güç [kW]	Maks. RMS Güç [kW]	Min. Tren Gerilimi [V]	Maks. Ray Gerilimi [V]	Min. Ray Gerilimi [V]
A Treni (5'li dizi)	TM01	7766	19543	9792	600	39	-32
	TM02	8112	19770	10464	603	47	-33
	TM03	8277	16748	9105	509	53	-63
	TM04	7849	15430	8376	504	59	-58
	TM05	8548	20446	11184	491	77	-54
B Treni (5'li dizi)	TM01	10866	28193	13346	519	58	-43
	TM02	11877	30460	15478	453	71	-50
	TM03	5743	25514	12706	385	79	-70
	TM04	9314	24091	11314	394	85	-77
	TM05	2979	23292	11637	300	86	-50
C Treni (4'lü dizi)	TM01	9557	19052	10455	518	56	-45
	TM02	10073	25260	12103	450	78	-54
	TM03	94	12293	1633	456	49	-38
	TM04	9398	20100	10216	382	85	-79
	TM05	707	20582	5587	414	72	-50

### 3.3. Üçüncü grup simülasyonlar sefer sıklığı 120 s, 1 trafo devre dışı, 3 adet yeni trafo merkezi ilaveli

2. Grup simülasyonlarda sağlanamayan koşulları iyileştirmek amacıyla 3 adet trafo merkezi (T01, T02, T03) ilave edilmiştir. Yeni durum yerleşimi Şekil 7'de verilmiştir.

**Şekil 7.** Yenikapı Otogar ilave 3 trafo merkezi genel görünümü

Yeni TM yerleşimi ile tek trafo devre dışı senaryolarına ait simülasyonları tekrarlanmıştır. Her bir araca ait trafo yüklenmeleri Tablo 10'da verilmiştir. İlave 3 adet trafo merkezinin eklenmesi ile birlikte tek trafo devre dışı kalma durumundaki trafo yüklenmelerinin EN50329 standardına göre uygun hale geldiği görülmektedir. Tablo 11'de verilen bilgilere göre ray gerilimi standartta istenen aralıktadır.

**Tablo 10.** Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri

Araç	Trafo Merkezi	Maks. Güç [kW]	Maks. Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 min) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
A Treni (5'li dizi)	TM01	3579	170	2294	109	1744	83
	TM02	4825	115	3018	72	2305	55
	TM03	3722	89	2212	53	1620	39
	TM04	5522	131	4000	95	2687	64
	TM05	4452	212	2845	135	2015	96
	T01	3087	73	2096	50	1556	37
	T02	3892	93	2673	64	1728	41
	T03	3039	72	2029	48	1406	33
B	TM01	6105	291	3369	160	2409	115

Treni (5'li dizi)	TM02	7266	173	4434	106	3178	76
	TM03	5069	121	3446	82	2533	60
	TM04	7433	177	4046	96	3310	79
	TM05	4822	230	2901	138	2306	110
	T01	5586	133	3525	84	2523	60
	T02	5551	132	3539	84	2612	62
	T03	3643	87	2068	49	1805	43
C Treni (4'lü dizi)	TM01	5690	271	3071	146	2197	105
	TM02	6881	164	3917	93	2812	67
	TM03	4986	119	3311	79	2453	58
	TM04	5599	133	2978	71	2399	57
	TM05	4333	206	2317	110	1831	87
	T01	5871	140	3487	83	2483	59
	T02	4503	107	2583	62	2046	49
T03	4991	119	3230	77	2570	61	

**Tablo 11.** Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları

Araç	Devre Dışı Trafo Merkezleri	Enerji Talebi [kWh]	Maksimum Güç [kW]	Maksimum RMS Güç [kW]	Minimum Tren Gerilimi [V]	Maksimum Ray Gerilimi [V]	Minimum Ray Gerilimi [V]
A Treni (5'li dizi)	TM01	7491	19750	9730	617	80	-62
	TM02	7548	18753	9796	631	79	-65
	T01	7477	19384	9689	635	85	-58
	TM03	7505	19431	9682	636	81	-60
	T02	7601	19292	9781	631	81	-57
	TM04	7251	18386	8689	565	100	-87
	T03	7263	19087	9282	610	44	-40
B Treni (5'li dizi)	TM05	6950	17235	8262	527	124	-77
	TM01	9529	26641	11902	520	69	-72
	TM02	9654	27546	12098	527	74	-81
	T01	9568	26796	11898	576	70	-60
	TM03	9646	26698	11905	580	65	-65
	T02	9738	27150	12064	528	58	-56
	TM04	10122	24665	11833	467	127	-120
C Treni (4'lü dizi)	T03	9659	26396	11897	523	48	-54
	TM05	9520	24587	11041	491	134	-92
	TM01	8340	16607	9146	519	72	-59
	TM02	8516	16554	9418	515	97	-59
	T01	8442	15936	9237	532	64	-61
	TM03	8490	16064	9233	559	64	-66
	T02	8563	16393	9331	526	65	-44
C Treni (4'lü dizi)	TM04	8687	17997	9415	522	87	-81
	T03	8589	16627	9294	519	53	-60
	TM05	8368	18809	8923	512	120	-78

#### 4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında M1A hattı Yenikapı- Otogar bölgesinde bulunan 5 trafo merkezinde hattın kapasite artışına 3 farklı araç ile etkisi, Hi-SimuX ve SimuX programında yapılan simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre maksimum ray gerilimi, minimum tren gerilimi ve trafo yüklenmelerinin standartlara uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir.

90 s sefer sıklığı ile yapılan analizlerde Sağmalcılar ve Otogar trafo merkezlerinin daha fazla yükledikleri ancak EN 50329 standardında belirtilen sınır değerlerinin altına kaldığı görülmüştür. Mevcut hatta 120 s ile tek trafo arıza durumu değerlendirmeleri yapıldığında her üç araçta da gerilim düşümünün 500 Voltun altına düştüğü ve ilave trafo merkezlerine gereksinim olduğu görülmüştür. Mevcut hat üzerine 3 adet yeni trafo merkezi ilavesi yapılarak tek trafo devre dışı senaryoları tekrarlanmıştır.

Sefer sıklığı değerlendirmeleri yapılırken trafoların maksimum yüklenmelerinin uç istasyonlarda daha fazla olduğu görülmüştür. Bu uç istasyonlarda mevcut trafoların çalışma sınıfının VI olması sebebiyle trafo yüklenmelerinin standartta istenen aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir. Trafo seçimlerinde çalışma sınıflarının, mutlaka simülasyon sonuçlarına göre seçilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda mevcut hatta tek trafo arızası simülasyonlarında ilave trafo merkezi yapılması ihtiyacı olduğu görülmüştür. Bu nedenle istasyon planlamaları yapılırken ilerde doğabilecek kapasite ihtiyaçları da dikkate alarak istasyonlar arasındaki mesafeler, ilk yatırım aşamasında iyi planlanırsa %50'lere varan oranlarda enerji tasarrufu yapmak mümkün olacaktır.

Her bir araca ait km başına enerji tüketimleri Tablo 12'de verilmiştir. Araçların hem çekiş gücü hem de rejeneratif frenleme eğrilerinin iyi analiz edilmesi gerekliliği görülmüştür. Örneğin B treni daha fazla çekiş gücüne sahip olmasına rağmen rejeneratif frenlemesi daha iyi olduğu için km başına enerji ihtiyacı C trenine göre daha düşük çıkmıştır. Yatırım aşamasında doğru bir analiz ile araç seçimi yapıldığında, %50 oranında enerji tasarrufu yapılabileceği görülmektedir.

**Tablo 12.** Kilometre başına her bir araca ait enerji tüketimleri

Senaryolar	A Treni (5'li dizi)	B Treni (5'li dizi)	C Treni (4'lü dizi)
TM01	2,62	3,31	3,62
TM02	2,64	3,36	3,69
T01	2,62	3,33	3,66
TM03	2,63	3,36	3,68
T02	2,66	3,39	3,71
TM04	2,54	3,52	3,77
T03	2,54	3,36	3,72
TM05	2,43	3,32	3,63

Metro sistemlerinde, enerji tasarrufu üzerine bir çok araştırma yapılmaktadır. Eko sürüş teknikleri [19], hat güzergah eğimlerinin azaltılması [6], rejeneratif frenleme depolama sistemlerinin kurulması bunlardan birkaçıdır. Kapasite artırımına yönelik yeni araç alımlarında, cer simülasyon analiz sonuçlarının da dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Bir sonraki çalışmada komşu olan ve komşu olmayan iki trafo devre dışı analizleri, değişken yük profili analizleri yapılabilir.

## Kaynakça

- [1] İBB Ulaşım Yönetim Merkezi, <https://uym.ibb.gov.tr>
- [2] E. Abbasgil, "İstanbul'daki toplu taşımacılık kapsamında raylı sistemlerin değerlendirilmesi (esenler-aksaray hızlı tramvay örneği)," Yüksek Lisans Tezi, SBE, Yöneylem Araştırması Ana Bilim Dalı, İÜ, İstanbul, 1994
- [3] F. Karakuş, R. Yumurtacı, "Raylı sistemlerde orta gerilim elektrifikasyon sisteminin modellenmesi ve besleme senaryolarının belirlenmesi," *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 8, Sayı 1, 41- 48, 2018
- [4] U. Cihangir, "Çok istasyonlu ve çoklu tren setli bir metro hattının matematiksel modellemesi ve işletim senaryolarının karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, FBE, İTÜ, İstanbul, 2018
- [5] Z. Tian, "System energy optimisation strategies for dc railway traction power networks," Doktora Tezi, ECSE, BCU, UK, 2017

- [6] İ. Keskin, " Raylı sistemlerde yol tasarımının enerji tüketimine olan etkilerinin belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, EBT, BAU, İstanbul, 2013
- [7] W.J. Davis, The tractive resistance of electric locomotives and cars
- [8] H.E. Beni, "Lokomotif çekerleri hesaplama yöntemi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 122-133, Jan. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.826780 122
- [9] S. Akkaşı, S. Açıkbaş, "Şhiriçi raylı ulaşımında gerilim seviyeleri ve enerji iletim sistemleri," *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu*, 13-15 Eylül 2006
- [10] M. Gökaşan, "Raylı sistemler mühendisliği ders notları: demiryolu araçları"
- [11] *Railway Applications- Supply Voltages of Traction Systems*, EN 50163:2004/A3, 2022
- [12] *Railway Applications- Supply Voltages of Traction Systems*, IEC 60850, 2014
- [13] S. Frey, *Railway electrification systems & engineering*. Delhi: White Word Publications, 2012
- [14] *Railway Applications- Fixed Installations - Traction Transformers*, EN 50329, 2003
- [15] *Railway Applications- Fixed Installations - Electrical Safety, Earthing and the Return Circuit - Part 1: Protective Provisions Against Electric Shock*, EN 50122-1, 2022
- [16] *Railway Applications. Power Supply and Rolling Stock. Technical Criteria for the Coordination Between Power Supply (Substation) and Rolling Stock to Achieve Interoperability*, BS EN 50388, 2012
- [17] S. Açıkbaş, M. T. Söylemez, "M1A ve M1B hattı cer gücü simülasyonu veri kontrol dosyası," 2022
- [18] 14.04.2023 Tarihli ve 28016334.2023.200-07/E.01564 Sayılı Metro İstanbul Yazısı
- [19] S. Boynukalın, S. Açıkbaş, M. Turan Söylemez, "CBTC sistemlerinde tolere edilebilir seyahat süre artışı için enerji verimliliği stratejilerinin karşılaştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 154-166, July. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.941405

## Teşekkür

Simülasyon çalışmaları kapsamında desteğini esirgemeyen HI-SIM Teknoloji Mühendislik San ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerine ve M1A hattı Yenikapı – Otogar Bölgesi metro hattının verilerinin kullanılmasına izin veren Metro İstanbul A.Ş. yönetimine teşekkür ederiz.

## Özgeçmiş



### Zennure YENER

1979 yılında Çankırı’da doğdu. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde tamamlamıştır. Yüksek lisans öğrenimine İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Programı’nda devam etmektedir. Rina Consulting Firmasında Uzman Teknik Müdür/Raylı Sistemler Müdürü olarak çalışmaktadır.

E-Posta: yener21@itu.edu.tr



### Özcan KALENDERLİ

1956 yılında İstanbul’da doğdu. Lisans öğrenimini İstanbul Teknik Üniversitesi’nde tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Aynı zamanda İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı’na raylı ulaşım sistem elektroteknigi konusunda ders vermektedir.

E-Posta: kalenderli@itu.edu.tr

## Beyanlar

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Zennure YENER: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Özcan KALENDERLİ: Görselleştirme, İnceleme. Kontrol. Gözden geçirme ve düzenleme.