



## Energy management system for Istanbul urban electric transportation systems: Proposition and evaluation of performance tracking system for traction electric consumption

Sercan İşcan<sup>1\*</sup>, Ümit Ünver<sup>2</sup>, Taylan Güneş<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Boğaziçi University Energy Manager, Bebek, İstanbul, 34342, Turkey

<sup>2</sup>Yalova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, 77200, Yalova, Turkey

<sup>3</sup>Yalova University, Engineering Faculty, Energy Systems Engineering Department, 77200, Yalova, Turkey

### Highlights:

- An example of Energy Management System is recommended for urban railway systems
- The energy consumers of urban railway systems were classified
- A proper energy management system may lead to save energy up to 17% by a simple the time schedule arrangement.

### Keywords:

- Energy Management System
- Urban Railway Systems
- Energy Efficiency
- Traction Energy efficiency
- CER systems

### Article Info:

Research Article

Received: 27.08.2020

Accepted: 23.08.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.786144

### Correspondence:

Author: Ümit Ünver  
e-mail:

umit.unver@yalova.edu.tr

phone: +90 226 815 5396

### Graphical Abstract

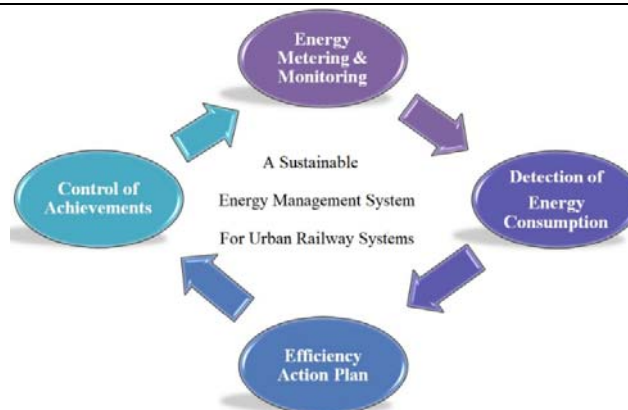


Figure A. Graphical illustration of Energy Management Systems

**Purpose:** In this study, an Energy Management System is recommended for Istanbul urban electric rail transport systems (Metro, Tram and Funicular lines), which has a predominant place in electricity consumption among transportation systems and is the largest urban rail system of Turkey. Examples of data sampling, how data can be evaluated, the measurement stations, the measurements and monitoring system that are set up within the scope of Energy Management System were presented. In the study, Energy Performance Indicators were created to determine and compare the performance of these lines within the scope of Energy Management System. Thus, by the Energy Management System, the improvement in energy efficiency has been aimed to be continuous and maximum. By the created Energy Performance Indicators, the traction performances of the lines have been examined as a case study.

### Theory and Methods:

In the study, the energy consumption of totally 12 lines consisting of 6 metro lines, 3 tram lines, 1 funicular line, 2 ropeway lines belonging to Istanbul urban rail transportation systems, were examined. The energy consumption of lines and level of consumption, on the basis of stationary facilities, station interior lighting, ventilation, socket, elevator and escalator, business offices consumptions have been classified. Traction consumption has been also classified.

### Results:

It has been determined that the rolling stocks are the main consumer due to their 55-60% of total consumption. The remaining energy is consumed in lighting-sockets (14-16%), elevators-escalators (6-8%), ventilation systems (6-8%), commercial areas (4-6%), workshops (3-5%) and administrative offices (2-3%) belonging to stations, which are known as auxiliary facilities. Therefore, these consumers are classified as secondary energy consumers. The consumers with a consumption rate of 5% and above of the total consumption has been considered as main consumer.

### Conclusion:

With a simple the time schedule arrangement, energy savings of up to 17% can be achieved. Further, the studies on traction energy efficiency in the literature were examined and a perspective has been presented for the implementation of these studies both in Istanbul urban rail systems and other urban rail transportation systems in Turkey within the scope of Energy Management System.



## İstanbul kent içi elektrikli ulaşım sistemlerine yönelik enerji yönetim sistemi: Cer tüketim performans takip sistemi öneri ve değerlendirmesi

Sercan İscan<sup>1\*</sup>, Ümit Ünver<sup>2</sup>, Taylan Güneş<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Boğaziçi Üniversitesi Enerji Yöneticisi, 34342, Bebek, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

<sup>3</sup>Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İstanbul kent içi elektrikli ulaşım sistemlerine özel cer performans takip sistemi önerildi
- Yolcu ve mesafe parametrelerini aynı anda göz önüne alan Enerji Performans Göstergesi (EnPG) önerildi
- Önerilen takip sistemi ile mevcut tüketimin %17 ye kadar azaltılabileceği belirlendi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.08.2020

Kabul: 23.08.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.786144

### Anahtar Kelimeler:

Enerji verimliliği,  
raylı taşıma sistemlerinde  
enerji verimliliği,  
CER sistemleri,  
Enerji yönetim sistemi

### ÖZ

Enerji verimliliği çalışmalarında iyileşmenin sürekliliğini sağlamak için Enerji Yönetim Sistemlerinin (EnYS) kurulması ve kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada, ulaşım sistemleri içerisinde elektrik tüketiminde ağırlıklı bir yere sahip olan ve Türkiye'nin en büyük kent içi raylı sistemi olan İstanbul kent içi elektrikli raylı ulaşım sistemleri (Metro, Tramvay ve Füniküler hatları) için önerilen EnYS tanıtılmıştır. Ayrıca EnYS kapsamında kurulan ölçme ve izleme sisteminden alınan ölçümlerle hangi verilerin ne şekilde değerlendirilebileceği ile ilgili örnekler sunulmuş, enerji verimliliği çalışmaları için işleyişle ilgili önerilerde bulunulmuştur. Çalışmada, İstanbul kent içi raylı ulaşım sistemlerine ait 6 metro, 3 tramvay, 1 füniküler, 2 teleferik hattı olmak üzere toplam 12 hattın enerji tüketimi incelenmiştir. Trenlerin teşkil ettiği hareketli sistemlerin (CER) toplam tüketimin %55-60'ını oluşturması sebebi ile ana tüketici olduğu, geri kalan tüketimlerin ise yardımcı tesisler olarak anılan istasyonlarda tüketildiği tespit edilmiştir. EnYS kapsamında hatların performanslarını belirlemek ve kıyaslamak için Enerji Performans Göstergeleri oluşturulmuş ve enerji verimliliğinde ki iyileşmenin sürekli ve maksimum olması hedeflenmiştir. Hatların CER performansları incelenmiş ve sefer süresi düzenlemesi ile ilk etapta %17' ye varan oranlarda enerji tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır.

## Energy management system for Istanbul urban electric transportation systems: Proposition and evaluation of performance tracking system for traction electric consumption

### H I G H L I G H T S

- A specific traction performance tracking system for Istanbul urban electric transportation systems was proposed
- An Energy Performance Indicator (EnPI), which simultaneously considers passenger and distance, is proposed
- It has been determined that the current consumption can be reduced up to 17% with the proposed tracking system

### Article Info

Research Article

Received: 27.08.2020

Accepted: 23.08.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.786144

### Keywords:

Energy efficiency,  
energy efficiency in urban  
railway systems,  
CER systems,  
energy management systems,  
traction energy efficiency

### ABSTRACT

It is recommended to establish and use Energy Management Systems to ensure the continuity of improvement in energy efficiency studies. In this study, we have introduced an Energy Management System proposed for Istanbul urban electric rail transportation systems (Metro, Tram and Funicular lines), which has a major place in electricity consumption among transportation systems and which is the largest urban rail system in Turkey. In addition, examples of which data can be evaluated within the scope of EnYS with the measurements taken from the measurement and monitoring system established are presented and operational suggestions have been made for energy efficiency studies. In the study, the energy consumption of a total of 12 lines of Istanbul urban rail transportation systems, including 6 metro, 3 trams, 1 funicular, 2 cable car lines, were examined. It has been determined that the mobile systems (CER) constituted by the trains are the main consumer since they constitute 55-60% of the total consumption, and the remaining consumption is consumed at the stations referred to as auxiliary facilities. Within the scope of the EnMS, Energy Performance Indicators have been created to determine and compare the performances of the lines, and it is aimed to ensure that the improvement in energy efficiency is continuous and maximum. The CER performances of the lines were examined and it was calculated that up to 17% energy savings could be achieved in the first stage with the voyage time regulation.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*sercan.iscan@boun.edu.tr, umit.unver@yalova.edu.tr, taylan.gunes@yalova.edu.tr / Tel: +90 226 815 5396

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerjiye olan talep artmaktadır [1]. Konvansiyonel enerji kaynakları (petrol, doğalgaz ve kömür) yeryüzüne eşit şekilde dağılmadığından, kaynak bakımından zengin ve fakir ülkeler sınıflandırması meydana gelmektedir. Bu nedenle ülkeler dış politikalarını bu doğrultuda şekillendirmiş ve rekabet edilebilir bir düzeye gelebilmek için metotlar geliştirmiş ve uygulamaya koymuşlardır [2]. Sürdürülebilir kalkınmaya paralel olarak enerji verimliliği ve yönetimine yönelik çalışmalar da giderek önem kazanmaktadır [3]. Bu durum, bütün ülkeleri enerji verimliliği ve yönetimine yöneltmiş ve bu konudaki atılacak adımları hızlandırmıştır.

Nüfus artışı, hizmet sektörünün güçlenmesi ve sanayileşme gibi nedenlerden dolayı Türkiye'nin enerji kullanımı gelişmiş ülkelere göre daha hızlı artmaktadır. Birincil enerji tüketimi 2018 yılında sektörel bazda 108,77 MTEP olarak gerçekleşerek 2005 yılından 2018 yılına kadar %55,5 oranında artış göstermiştir. 2018 yılının birincil enerji verilerine göre, ithal enerji oranı %76'ya (27 milyar\$) ulaşan ülkemiz, enerjide dışa bağımlılığı yüksek olan ülkeler arasında yer almaktadır [4]. Birincil enerji tüketimindeki talep artışının yıllık ortalama %4 mertebelerinde gerçekleşmesi ve önümüzdeki 15 yıllık dönem içerisinde bu talebin yılda yaklaşık %6 oranına yükselmesi beklentisi enerji verimliliği ve yönetim sistemlerinin önemini vurgulamaktadır. 2017-2023 yılları arasında uygulanacak Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı kapsamında ise bina ve hizmetler, enerji, ulaştırma, sanayi ve teknoloji, tarım ve yatay konular olmak üzere toplam 6 kategoride tanımlanan 55 eylem ile 2023 yılında Türkiye'nin birincil enerji tüketiminin %14 azaltılması hedeflenmektedir [4]. Ülkemizde nihai enerji tüketiminin kullanıldığı alanlar 2018 yılı itibarı ile sanayi grubu (%33,23), konut ve hizmetler grubu (%30,61), tarım ve hayvancılık grubu (%4,21), enerji dışı tüketim grubu (%5,79) ve ulaştırma grubudur (%26,16) [4]. Bu oranlar göz önüne alındığında enerji kullanımı için geliştirilen yaklaşımlar içerisinde ulaşımda enerji verimliliği ve enerji yönetimi önemli bir yere sahiptir [5]. Dünyaca kabul görmüş enerji verimliliği standartlarının organizasyon yapısına benzer şekilde, ulaşım sektöründe de enerji yönetiminin hem ulaşımda kalite hem de çevre konularında yönetilmesi gerekir. Ulaşım sektöründe etkin enerji yönetimi, tasarruf ve verimlilik çalışmaları gibi teknik konular kadar önemli birtakım faaliyetler içermektedir [6].

Kent içi ulaşım sistemlerinin vazgeçilmez bir parçası olan elektrikli raylı ulaşım sistemlerine gösterilen talep bilhassa metropollerde artmaktadır [7]. Yolcu taşıma kapasitesinin yüksek, ulaşımın hızlı olması ve temiz enerji olarak adlandırılan elektrik enerjisi ile çalışması kent içi elektrikli raylı ulaşım sistemlerini cazip hale getirmektedir [8]. Bununla birlikte, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere çevresel etkilerini iyileştiren diğer taşımacılık sistemleri arasındaki rekabet göz önüne alındığında enerji maliyetlerinin giderek artması karşısında, cazip olarak

nitelendirilen kent içi raylı sistemlerin hizmet kalitesini artırırken enerji kullanımını azaltması çok önemlidir [9, 10]. Aksi takdirde, kentiçi raylı sistemler metropoller için ekonomik ve sürdürülebilir çözümlerin ön saflarında rekabetçi konumunu kaybetme riskiyle karşı karşıya kalabilir [11]. Bu sebeple, ilk yatırım maliyetleri yüksek olan bu sistemlerde sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde işletme açısından en önemli gider kalemi olan enerji tüketiminin yönetilmesi ise bilhassa önem arz etmektedir [12]. Raylı sistemlerde enerji tüketimi ve güç talebi zamana, yolcu sayısına, hat topolojisine, sistem içerisinde çalışan trenlere ve iletişim sistemlerine bağlı olarak sürekli değişmekte olup sabit değildir. Raylı sistemleri oluşturan tüm alt bileşenlerin etkileşimleri karmaşık olduğundan enerji tüketimlerini öngörmek ve değerlendirmek zordur. Bu sebeple, enerji verimliliğinin iyileştirilmesi, detaylı enerji yönetim sistemi (EnYS) çalışmalarının yapılması, uygun yöntemlerin kullanılması ancak elde edilen verilerin hassas analizlerinin gerçekleştirilmesi ile mümkün olabilmektedir [13]. Çünkü büyük güç gerektiren raylı ulaşım sistemlerinde EnYS kapsamında yapılacak küçük bir verimlilik çalışmasının bile maddi karşılığının yansımaları kısa sürede azımsanmayacak seviyede olacağından büyük önem arz etmektedir.

Ulaşım sektörü, günümüzde gelişen ve gelişmekte olan ülkelerde enerjiyi en çok tüketen ve çevreyi en çok kirleten sektörlerden biridir. Dünyada toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %24,7'sine, Avrupa Birliğinde ise %28,3'üne neden olmaktadır [14]. Avrupa Birliği büyükşehirlerinde taşımacılık sektörü CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %25'inden sorumludur [15]. Kent içi raylı ulaşım sistemlerinde ise elektrik enerjisinin kullanılmasından dolayı yerel emisyonların olmaması ve metropol ulaşımında trafik etkisini azaltma potansiyelinin yüksek olması sebebiyle giderek daha fazla tercih edilmektedir [16, 17]. Ülkemizde de "Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi, Hedef 2023" ile demiryolu yük taşımacılığındaki payının %15'in ve yolcu taşımacılığındaki payının ise %10'un üzerine çıkarılması hedefi ile eylem planına dâhil edilmiştir [3]. Bahsedilen hedefler kapsamında enerji verimliliği ve EnYS planlaması sadece enerji tüketiminin azaltılması için değil, CO<sub>2</sub> emisyon hedeflerine ulaşılması için de ayrıca gereklidir.

Ülkemizde son yıllarda yapılan yatırımlar ile birlikte kent içi ulaşım sektöründe raylı sistemlerin kullanımı artmaktadır. Ülkemizde on büyükşehirde kent içi elektrikli raylı sistemler mevcuttur. Tablo 1'de ülkemizde işletmede olan kent içi raylı ulaşım hatlarına ilişkin bilgiler özetlenmiştir. İstanbul, tüm bu büyükşehirler içerisinde nüfus, kent içi ulaşım sistemi büyüklüğü ve enerji tüketimi açısından önemli bir merkez olarak karşımıza çıkmaktadır. 154,25 km uzunluğa sahip İstanbul raylı toplu taşıma sistemi, 2018 yılında gerçekleşen Türkiye'deki demiryolları toplam elektrik enerjisi tüketiminde yaklaşık %31 gibi önemli bir paya sahiptir.

Enerji verimliliği konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar, kent içi raylı ulaşım sistemlerinde genellikle

**Tablo 1.** Ülkemizde işletmede olan kent içi raylı sistemler. (Urban rail systems in operation in Turkey)

Raylı Sistem Tipi	Toplam Hat Uzunluğu (km)
İstanbul Metro, Hafif Metro, Tramvay, Füniküler, Teleferik.	154,25 [18]
Ankara Metro	64,61 [19-20]
İzmir Hafif Metro+Tramvay	22 [21]
Adana Hafif Metro	13,5 [22]
Antalya Hafif Raylı Sistem, Tramvay	30 [23]
Kayseri Tramvay	34 [24]
Konya Tramvay	18,5 [25]
Samsun Hafif Raylı Sistem	29 [26]
Eskişehir Tramvay	37 [27]
Bursa Hafif Metro	47,2 [28-29]
Gaziantep Hafif Raylı Sistem	22 [30]

enerji depolama sistemleri, verimli sürüş teknikleri, enerji verimli CER sistemleri, trenler arası optimum süre, faydalı frenlemeden maksimum yararlanılması için sinyalizasyon sisteminin optimize edilmesi, hız ayarlaması, araç konfor fonksiyonlarının iyileştirilmesi, çekiş kayıplarının azaltılması gibi hususlar üzerine yoğunlaşmaktadır [31, 32]. Yapılan bu çalışmalardan literatürde CER tüketimlerinden, tren seferlerinin [33, 34] ve sinyalizasyonun iyi şekilde optimize edilmesi ile faydalı frenlemeden kaynaklı %14-%29 oranında enerji tasarruf edilebileceği [35-37], birden fazla enerji depolama sisteminin (süperkapasitör [38], batarya [39], volan vb.) kombinasyonu ile %30'a kadar ek enerji tasarrufunun sağlanabileceği [40-42], optimum süzülme noktalarının ve hız profillerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar işletmede %20-30 arasında enerji tasarrufu sağlanabileceği [43], verimli sürüş teknikleri ile %15-%20 arasında enerji tasarrufu sağlanabileceği [44-46], verimli CER sistemleri ile yaklaşık %10 enerji tasarrufu yapılabileceği [47] raporlanmıştır. İlave istasyonlardaki aydınlatma sistemlerinin led dönüşümü ile aydınlatma tüketiminden %40 enerji tasarrufu yapılabileceği [44] ve HVAC, aydınlatma ve yolcu konveyör sistemlerine adaptif kontrol stratejileri toplu olarak uygulandığında metro istasyonlarının enerji tüketiminde %5-10'luk bir azalma gerçekleştirilebileceği [48, 49] raporlanmıştır.

Metro İstanbul AŞ'nin işletmeciliğini yaptığı hatlarda bahsedilen hususlardan bugüne kadar enerji verimliliği stratejileri doğrultusunda birçok çalışma ve uygulama yapılmıştır. Bu çalışmalar başlıca enerji kayıplarını azaltıcı önlemler, enerji depolama sistemleri, verimli sürüş teknikleri, faydalı frenlemeden maksimum yararlanılması için sinyalizasyon sisteminin optimize edilmesi, sabit tesisler olarak adlandırılan istasyonlarda ki aydınlatmalarda enerji verimliliği gibi uygulamalardır [50]. Yapılan bu çalışmalar enerji verimliliği sağlayabilir ancak bir EnYS sistemi planlanmamıştır. Proje kapsamında, Metro İstanbul gibi, enerji tüketimini etkileyen farklı parametreleri içeren büyük çaplı işletmelerde, uygulanması gereken en uygun enerji yönetim sisteminin tanıtılması hedeflendi. Çalışmada, planlama, uygulama, kontrol etme ve önlem alma gibi birbirinden bağımsız olduklarında etkisiz kalabilecek işlevlerin bir araya gelerek bir bütünü oluşturduğu ISO 50001 standardının referans alındığı [51] enerji yönetim

sistemi önerilmiştir. Böylelikle enerji verimliliği fırsatlarının en uygun şekilde faaliyet planına alınması ve uygulanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada senelik ortalama elektrik enerjisi tüketimi yaklaşık 318.000 MWh (2016-2018 yıllarının ortalaması) olan Metro İstanbul hatlarının enerji yönetiminin yapılabilmesi için, 2015 yılında enerji tüketimlerini alt bileşenleri ile birlikte ölçmek üzere enerji kalitesi ölçme-izleme sistemi kurulmuştur. Enerji yönetiminin en önemli adımı olan ölçme ve izleme sistemi ile raylı sistemlerin tipleri ve alt bileşenlerinin tükettikleri enerjinin sürekli incelenmesi ve analiz edilmesi hedeflenmiştir. Kurulan sistem ile ölçülen bileşenler sırasıyla; hareketli sistemlere ait CER tüketimleri, İstasyonlara ait aydınlatma-priz, ticari alan, havalandırma, yürüyen merdiven/asansör tüketimleri ile yerleşkelere ait atölye, idari binalara ait enerji tüketimleridir.

Metro İstanbul A.Ş. için, EnYS kapsamında kurulan ölçme ve izleme sisteminden elde edilen verilerin nasıl değerlendirilebileceği, yorumlanabileceği vaka analizi olarak sunulmuştur. Raylı sistemlerde enerji verimliliği çalışmaları literatürde mevcuttur, ancak bu çalışma, bir EnYS önerisi olarak literatürde ilkler arasında olduğundan son derece önemlidir. Ayrıca Metro İstanbul A.Ş. ye yönelik olarak da konuyla ilgili gerçekleştirilen ilk çalışma olduğundan literatürde çok önemli bir yeri doldurmaktadır ve bundan sonra diğer raylı sistemlere sahip bölgelerde yapılacak olan bundan sonraki çalışmalara öncü niteliğindedir.

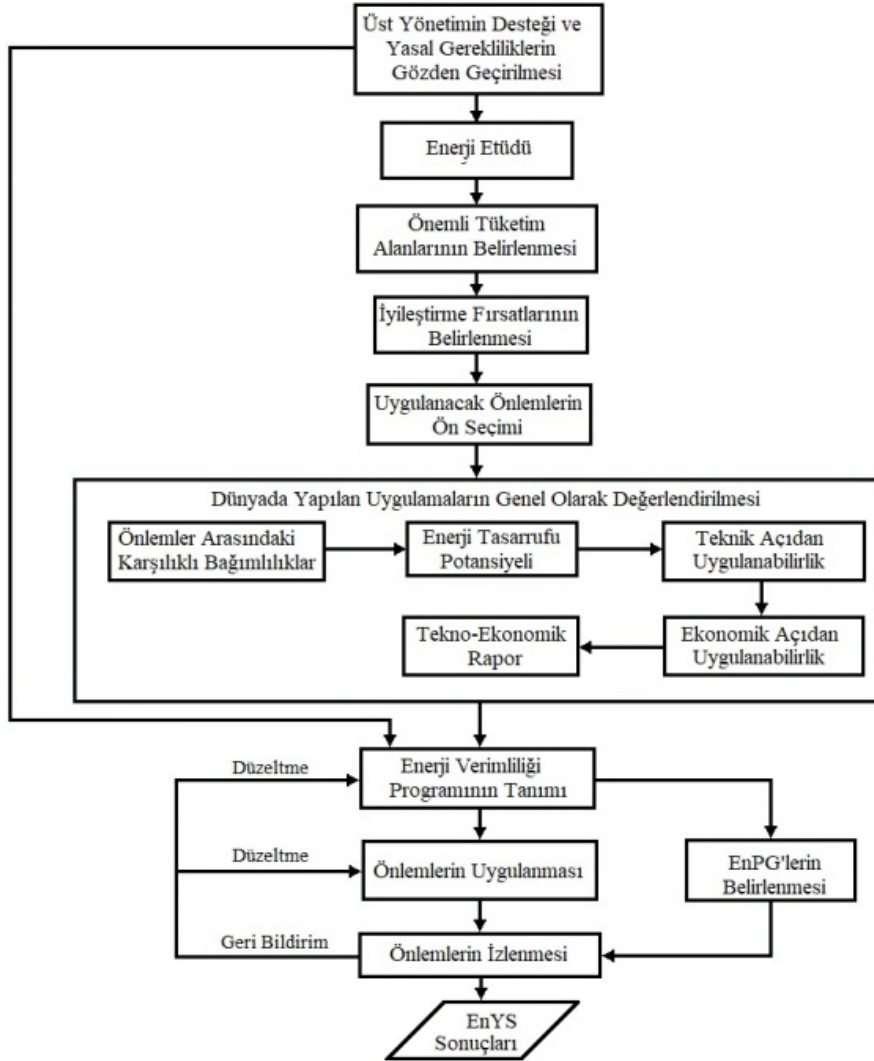
Çalışmada öncelikle, 2018 yılı itibari ile 6 metro hattı, 3 tramvay hattı, 1 füniküler hattı, 2 teleferik hattı bulunan [52] Metro İstanbul'un işletmeciliğini yaptığı hatların genel enerji tüketim karakteristikleri incelenerek, EnYS kapsamında ölçme ve izleme sistemi kurulmuştur. Yasal ve diğer gereklilikler gözden geçirilmiş ve 2016 - 2017 yıllarındaki tüketimler incelenmiş, yönetilmesi gereken öncelikli hatlar ve alt bileşenleri belirlenmiştir. Trenlerin teşkil ettiği hareketli sistemlerin (CER) toplam tüketimin %55-60'sını oluşturması sebebi ile ana tüketici olduğu, geri kalan tüketimlerin ise yardımcı tesisler olarak anılan istasyonlara ait aydınlatma-priz (%14-16), asansör-yürüyen merdiven (%6-8), havalandırma sistemleri (%6-8), ticari

alanlar (%4-6) ile atölyeler (%3-5) ve idari ofislerde (%2-3) tüketildiği ve bu sebeple bu tüketicilerin ise ikincil enerji tüketicileri olduğu tespit edilmiştir [53]. ISO 50001 standardı doğrultusunda modellenmiş olan EnYS için ana tüketici niteliğine sahip CER tüketimleri durum çalışması olarak incelenmiştir. EnYS kapsamında izleme sisteminden bulguların ne şekilde tespit edilebileceği değerlendirilmiş ve çözüm önerileri örnekleri sunulmuştur.

## 2. KAPSAM, AMAÇ VE YÖNTEM (SCOPE, PURPOSE AND METHOD)

Bu çalışmada öncelikle enerji verimliliği mevzuatı incelenmiştir. Ülkemiz enerji verimliliği ile yasal olarak 2007 yılında yürürlüğe giren 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ile tanışmıştır. Kanun ile enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılması amaçlanmıştır. 2011 yılında yürürlüğe giren Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin

Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik ile enerji verimliliğine ilişkin usul ve esaslar düzenlenmiş ve enerjinin üretiminden tüketimine varıncaya kadar her aşamada verimliliğin sağlanmasına yönelik tedbirler tanımlanmıştır. Aynı yıl ISO 50001 standardı aracılığıyla enerji yönetim sistemi detaylı olarak tarif edilmiştir. Çalışmada ISO 50001 enerji yönetim sisteminin enerji gözden geçirilmesi maddesi kapsamında işletmenin enerji taraması yapılmıştır. Böylelikle, verilere dayalı enerji tüketimi analiz edilmiş ve önemli alanlar belirlenmiştir. Önemli tüketim alanlarından en büyük payı oluşturan hareketli sistemlere ait CER enerji tüketimleri için, performans göstergeleri belirlenip spesifik tüketimler hesaplanmış, çözüm önerileri sunulmuştur. Enerji tüketim analizi ile sürdürülebilir EnYS kapsamında Şekil 1'de optimum enerji tüketimine yönelik adımları içeren sistematik bir prosedür oluşturulmuş ve stratejilerin belirlenmesi için farkındalık oluşturulması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan yöntem, enerji izleme ve ölçme sistemiyle ilgili her türlü detay bilgi [54] numaralı referansta bulunabilir.



Şekil 1. Kent içi demiryolunda enerji verimliliği önlemlerinin başarılı bir şekilde uygulanması için EnYS algoritması  
(EnYS algorithm for the successful implementation of energy efficiency measures in urban railways)

Çalışmada EnYS'nin ilk adımı olan enerji izleme ve ölçme sistemi için üç katmandan oluşan bir ölçme mimarisini oluşturulmuştur. Bu katmanlar sırasıyla, saha katmanı, iletişim katmanı ve yönetim katmanıdır. Saha katmanında analizörler ile ölçümler ve izlemeler yapılmıştır. İletişim katmanında ise saha katmanında alınan veriler yönetim katmanına iletilmiştir. Yönetim katmanında ise veriler istenilen şekilde raporlar üretilebilir bir yazılım ve ara yüz ile kullanıcıya sunulmuştur. Sistemin bileşenleri başlıca: Enerji Kalite Analizörleri (Ana Giriş) Tip A, Enerji Analizörleri (CER Giriş) Tip B, Standart Enerji Analizörü (Yardımcı Tesisler Girişleri) Tip C, Enerji İzleme ve Yönetimi Yazılımı, İletişim Alt Sistemleri, Server Bilgisayarlarıdır.

Saha katmanında izleme ve ölçümler üç farklı tip analizör ile yapılmıştır. Ana giriş hücre ölçümleri için 30 adet Tip A, CER (Tren) tüketimlerini ölçmek için 132 adet Tip B ve sabit tesisler ve bu tesislere ait havalandırma, aydınlatma, priz, ticari alanlar, yürüyen merdiven, asansör, idari ofisler, atölyeler vb. alanların ölçümü için 1420 adet DIN raya montaj ve 230 adet panoya montaj olmak üzere toplam 1650 adet Tip C analizörü kullanılmıştır. Saha katmanı mimarisi Şekil 2'de gösterilmektedir. Tip A analizörü olarak Schneider Electric ION7650 enerji kalite analizörü, Tip B analizörü olarak Schneider Electric PowerLogic PM820 enerji kalite analizörü ve Tip C analizörü olarak raya montaj modeli için Schneider Electric PowerLogic PM3255 ve panoya montaj modeli için ise PM5330 standart enerji analizörü kullanılmıştır.

Sistemin ikinci katmanı olan ağ iletişim katmanı ise Metro İstanbul AŞ'nin alt yapısına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sebeple sistem, Modbus RTU protokolünü kullanarak RS-485/RS-232 ağında doğrudan seri iletişim yeteneğine sahip Modbus TCP protokolünü kullanan yazılım, ethernet-seri ağ geçidi üzerinden ağ geçidi tarafından desteklenen herhangi bir protokolü kullanan ve modbus TCP'ye dönüştüren cihazlara Ethernet/TCP bağlantılarını yapabilen, OPC DA 2.x spesifikasyonu ile uyumlu dış OPC sunucularına bağlantı kurabilecek ayrıca aralarında farklı fiziksel iletişim kanalları bulunanlarda olmak üzere birden çok cihazla aynı anda iletişim kurabilme yeteneğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. İletişim mimarisi Şekil 3'te gösterilmektedir.

Sistemin en son katmanı olan yönetim katmanı ise enerji izleme ve yönetimi yazılımı ile sunucu bilgisayarından oluşması tasarlanmıştır. Enerji izleme ve yönetimi yazılımının O.G şebeke beslemelerinden başlayıp A.G dağıtım noktalarına kadar tüm sistemin dağıtım altyapısını izlemesi amaçlanan web tabanlı bir izleme sistemi olarak tasarlanmıştır. Sistem ister tek bir tesis, ister bir tesisler ağı olsun enerji kullanımı ve verimliliğini yönetmek ve ölçmek için kurumun toplamındaki ve alt sistemlerinde ki enerji kalitesi ve tüketimini izlemek ve yönetmek amacı doğrultusunda tasarlanmıştır. Yazılım katmanının kendisinden önce gelen katmanlar ile uyumlu olması esas alınmıştır. Katmanın diğer bileşeni olan sunucu bilgisayarlar ise Anadolu yakası uygulama sunucusu (Esentepe), Avrupa

yakası uygulama sunucusu (Seyrantepe) ve merkez sunucusu (Esenler) olmak üzere üç kısımda tasarlanmıştır.

Çalışmamız, Metro İstanbul A.Ş işletmeciliğinde olan İstanbul kent içi elektrikli raylı sistemlerinin 2016 ve 2017 yıllarına ait CER elektrik enerjisi tüketimlerini hat bazında ölçmek ve önemli CER tüketicilerinin belirlenmesini, performanslarının karşılaştırılmasını, EnYS kapsamında değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu bağlamda kuruluşa ait 2016 yılında M1, M2, M3, M4, M6, T1, T3, T4, F1, TF hatlarının ve 2017 yılında ise bu hatlara ilaveten işletmeye yeni giren M5 hattının toplam ve alt bileşen ölçümleri yapılmıştır. Tüketim oranı toplam tüketimin %5 ve üzerinde olan hatlara ait CER tüketimlerini önemli tüketici kapsamında değerlendirilmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3'te sırası ile 2016 ve 2017 yılları için hatların ve CER tüketimlerinin toplam tüketim oranları verilmiştir. Toplam tüketim oranı %5'in altında kalan hatlara ilişkin veriler ise boş bırakılmıştır. Çünkü bu hatlar toplam tüketimler bazında bile %5'in üzerinde kalmamaktadır.

ISO 50001 standardı madde 4.4.5 doğrultusunda her bir hatta ait spesifik CER tüketimlerinin belirlenmesi için gerekli olan enerji performans göstergesi (EnPG) olarak yolcu başına enerji tüketimi ve kilometre başına enerji tüketimi ortalaması [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] baz alınmıştır. Böylelikle CER enerji tüketimini etkileyen en temel iki bileşen ile spesifik tüketim belirlenmesi yapılmış Tablo 4'te gösterilmiştir. ISO 50001 standardı madde 4.4.4 doğrultusunda sırasıyla 2016 ve 2017 yıllarında gerçekleşen CER enerji tüketimleri enerji referans noktaları olarak belirlenmiş ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

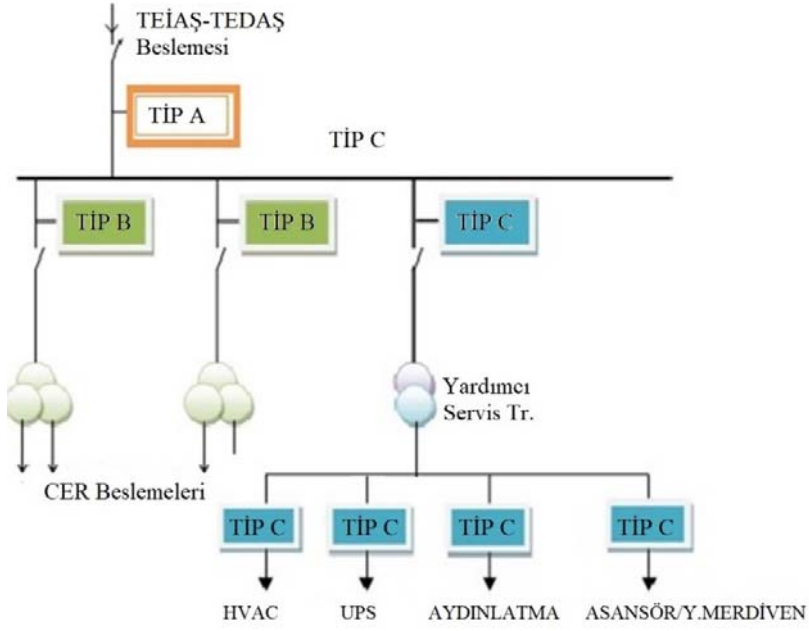
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

CER performans değerlendirmesi, hatlarda harcanan yıllık enerji miktarının o hatta taşınan yıllık yolcu sayısına oranı ile kat edilen mesafe bazında hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Hatların CER performansları Tablo 3'te gösterilmiştir. Şekil 4'te 2016 ve 2017 yıllarındaki enerji referans değerleri verilmektedir.

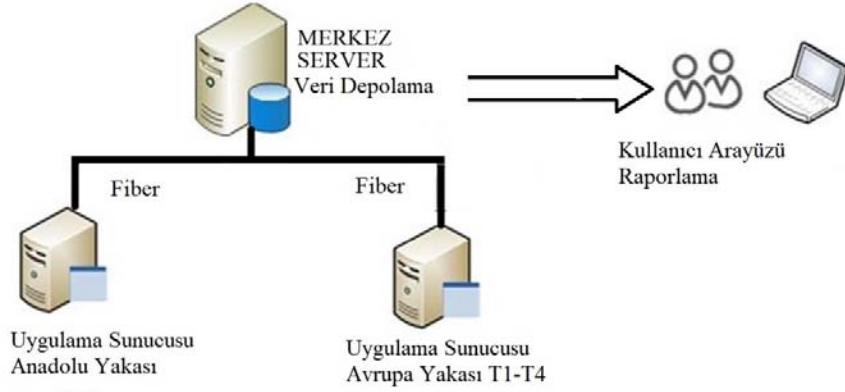
Tablo 4 ve Şekil 5'ten anlaşıldığı üzere, CER performansı en düşük hat ortalama 3,10 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile M3 hattıdır. Metro hatlarındaki performansı en iyi hat ise ortalama 2,07 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile M4 hattıdır. M3 hattının CER performans değerlerinin diğer metro hatları performanslarına göre 1.5 kat daha kötü olduğu tespit edilmiştir.

Saha çalışmalarında M3 hattının tüm istasyonları incelenmiştir. M3 hattının sefer sayısı yolcu sayısına oranla çok siktir Hattın pik saatlerde; sabah işe ve okula gidiş ile akşam iş ve okuldan eve dönüş saatlerinde, tam kapasitede sefer sıklığı 3 dk., bu saatler dışında sefer sıklığı 8 dk.'dır. Pik saatler dışında hattın daha az yolcuya hizmet verdiği görülmüştür. Bu sebeple M3 hattının diğer metro hatlarına oranla genel performansının daha kötü olduğu belirlenmiştir.





Şekil 2. Üç katmanlı enerji izleme ve ölçme sistemi (Three layer energy monitoring and measurement system)



Şekil 3. İletişim katman mimarisi (Communication layer architecture)

Tablo 2. 2016 yılı CER tüketimlerinin toplam tüketime oranları ve önemli CER tüketimleri. (Ratios of traction consumption to total consumption in 2016 and significant traction consumption)

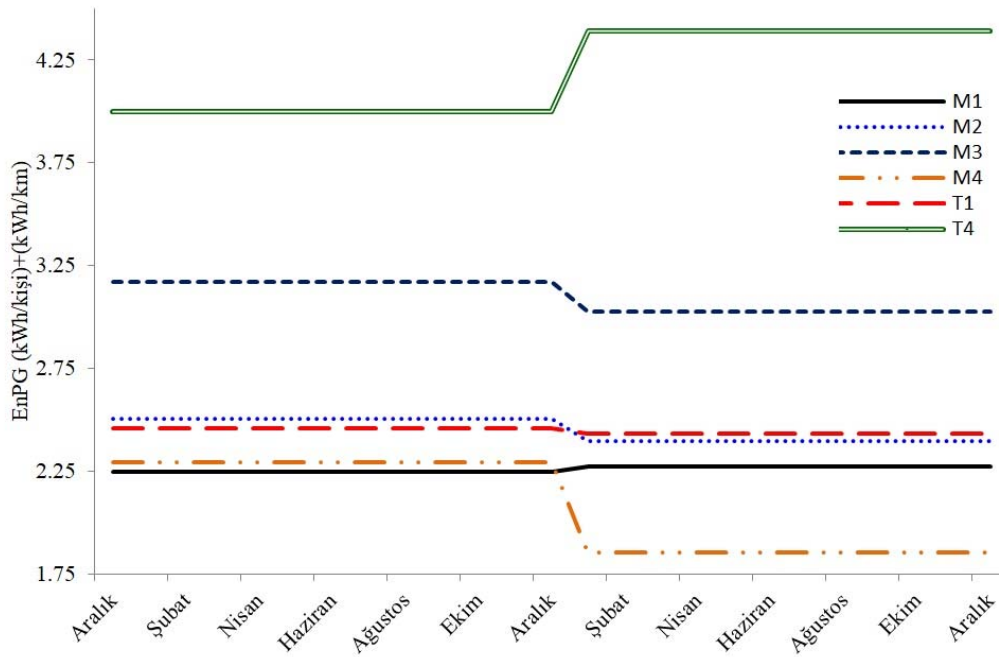
Sıra No	Enerji Kullanıcı	Enerji Türünde Toplam Tüketime Oranı %	CER
1	M1	21,36%	11,68%
2	M2	23,35%	11,04%
3	M3	10,59%	5,29%
4	M4	24,53%	10,40%
5	M5	Devrede değil	x
6	M6	1,92%	x
7	T1	7,89%	7,65%
8	T3	0,07%	x
9	T4	9,74%	8,08%
10	TF-E	0,05%	x
11	TF-M	0,03%	x
12	FÜNİKÜLER	0,48%	x

**Tablo 3.** 2017 yılı CER tüketimlerinin toplam tüketime oranları ve önemli CER tüketimleri. (Ratios of traction consumption to total consumption in 2017 and significant traction consumption)

Sıra No	Enerji Kullanıcı	Enerji Türünde Tüketime Oranı %	Toplam CER
1	M1	19,93%	11,31%
2	M2	23,11%	10,51%
3	M3	10,63%	5,20%
4	M4	26,70%	9,83%
5	M5	0,40%	x
6	M6	1,92%	x
7	T1	7,52%	7,21%
8	T3	0,07%	x
9	T4	9,35%	7,71%
10	TF-E	0,07%	x
11	TF-M	0,00%	x
12	FÜNİKÜLER	0,29%	x

**Tablo 4.** 2016 ve 2017 yılları birim CER tüketimleri. (Traction consumptions in year 2016 and 2017)

Hat No	Dönem	Toplam (kWh/yolcu)	Cer (kWh/yolcu+kWhkm)	Cer ort. (kWh/yolcu+kWh/km)
M1	2016	0,42	2,25	2,26
	2017	0,41	2,27	
M2	2016	0,51	2,50	2,45
	2017	0,51	2,39	
M3	2016	1,47	3,17	3,10
	2017	1,50	3,03	
M4	2016	0,84	2,29	2,07
	2017	0,84	1,85	
T1	2016	0,20	3,54	3,53
	2017	0,19	3,51	
T4	2016	0,61	4,47	4,43
	2017	0,58	4,39	



**Şekil 4.** 2016 ve 2017 yılları birim CER tüketimlerine ait enerji referans çizgileri. (Energy reference lines in 2016 and 2017)



M3 hattı pik saatler dışındaki sefer sıklığı süresinin 10 dk. olması halinde şu an ki duruma göre %7,87 oranında iyileştirme yapılabileceği hesaplanmıştır (Tablo 5). Hesaplama % iyileştirme bulunacağı için kolaylık olması açısından harcanan enerji miktarı 100 birim miktar olarak alınmıştır. Yeni düzenleme ile günlük 178 olan toplam sefer sayısı 164 sefere indirilmiştir. Hizmet kalitesi açısından müşteri memnuniyeti göz önüne alınarak sefer sıklığı 10 dk. olacak şekilde düzenleme yapılması uygun görülmüştür.

Tablo 4 ve Şekil 5'ten anlaşıldığı üzere, CER performansı açısından tramvay hatları arasında en verimsiz hat ortalama 4,43 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile T4 hattıdır. Tramvay hatlarında performansı en iyi olan hat ise ortalama 3,53 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile T1 hattıdır. T4 hattının CER performans değerlerinin T1 hattı CER performanslarına göre 1.25 kat daha kötü olduğu hesaplanmıştır.

Saha çalışmalarında T4 hattının tüm istasyonları incelenmiş ve sefer sayısının yolcu sayısına oranla çok sık olduğu görülmüştür. Pik saatlerde, sefer sıklığı 4 dk. olan hattın bu saatler dışında sefer sıklığı 6 dk.'dır. Hafta içi pik saatlerde hattın tam kapasite çalıştığı görülmüştür. Ancak, M3 hattına

benzer şekilde, pik saatler dışındaki zaman diliminde az yolcuya hizmet verdiği için T4 hattının genel performansının T1 hattına oranla daha kötü olduğu anlaşılmıştır.

Hizmet kalitesi ve müşteri memnuniyeti göz önüne alınarak, T4 hattı pik saatler dışındaki sefer sıklığı süresinin 8 dk. olması halinde mevcut duruma göre %17 oranında iyileştirme yapılabileceği hesaplanmıştır (Tablo 6). Hesaplama % iyileştirme oranı bulunacağı için kolaylık olması açısından harcanan enerji miktarı 100 birim miktar olarak alınmıştır. Yeni düzenleme ile günlük 200 olan toplam sefer sayısının 166 sefere indirilmesi önerilmektedir.

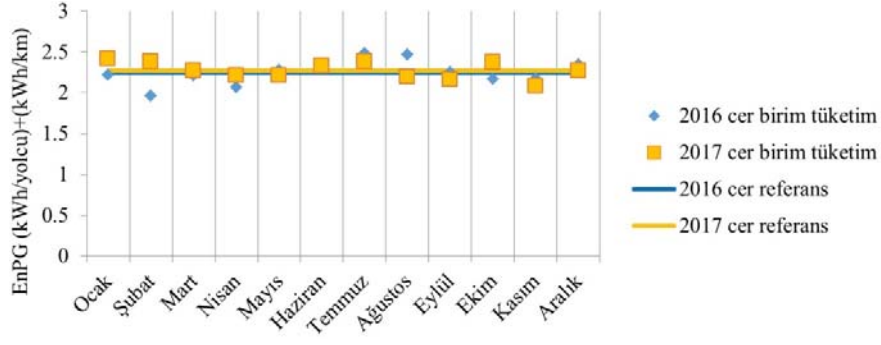
Tablo 4 ve Şekil 4'ün birlikte değerlendirilmesiyle metro hatlarına ait CER performanslarının tramvay hatlarına ait CER performanslarından daha iyi olduğu anlaşılmıştır. En kötü CER performansına sahip M3 hattının bile en iyi CER performansına sahip T4 hattından daha iyi olduğu görülmektedir. Bu husus değerlendirildiğinde, tramvay hatlarındaki CER performansının metro hatlarına oranla daha kötü olmasının en büyük sebebi; istasyon sayılarına ve trafike bağlı olarak durma ve kalkma frekansının yüksek olmasıdır. Bu değerlendirme sadece CER performanslarının

**Tablo 5.** M3 hattı sefer sıklığı düzenlemesi yapılarak elde edilecek iyileştirme hesabı.  
(Energy efficiency improvement calculations on M3 line by arranging the voyage frequency)

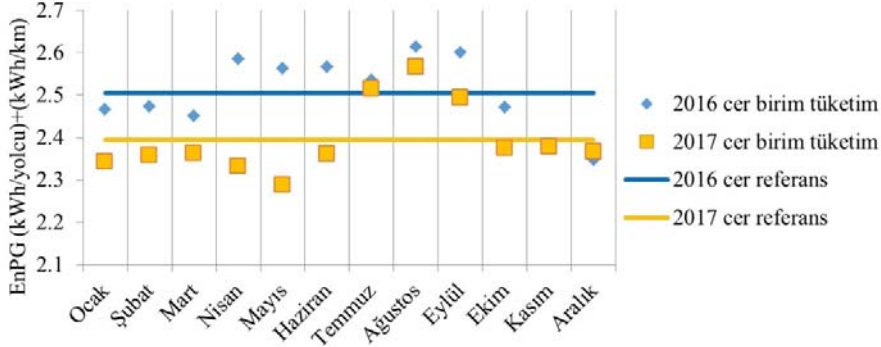
Saat Dilimi	Mevcut Hal			Düzenlenmiş Hal			
	Süre (Saat)	Sefer Sıklığı	Saatteki Sefer Sayısı	Toplam Sefer Sayısı	Sefer Sıklığı	Saatteki Sefer Sayısı	Toplam Sefer Sayısı
06:00-07:00	1	8 dk.	7	7	10 dk.	6	6
07:00-09:00	2(Pik)	3 dk.	20	40	3 dk.	20	40
09:00-17:00	8	8 dk.	7	56	10 dk.	6	48
17:00-19:00	2(Pik)	3 dk.	20	40	3 dk.	20	40
19:00-00.00	5	8 dk.	7	35	10 dk.	6	30
Günlük Toplam Sefer Sayısı				178	164		
Günlük Harcanan Enerji (birim)				100	92,13		
<i>Yapılacak İyileştirme Oranı</i>					<i>%7,87</i>		

**Tablo 6.** T4 hattı sefer sıklığı düzenlemesi yapılarak elde edilecek iyileştirme hesabı.  
(Energy efficiency improvement calculations on T4 line by arranging the voyage frequency)

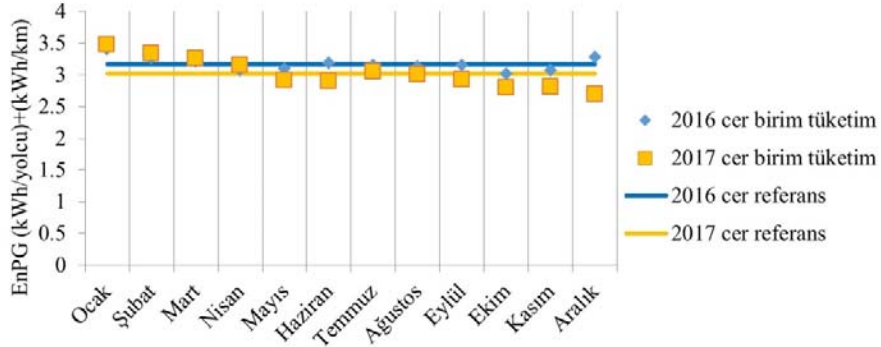
Saat Dilimi	Mevcut Hal			Düzenlenmiş Hal			
	Süre (Saat)	Sefer Sıklığı	Saatteki Sefer Sayısı	Toplam Sefer Sayısı	Sefer Sıklığı	Saatteki Sefer Sayısı	Toplam Sefer Sayısı
06:00-07:00	1	6 dk.	10	10	8 dk.	7	7
07:00-09:00	2(Pik)	4 dk.	15	30	4 dk.	15	30
09:00-17:00	8	6 dk.	10	80	8 dk.	8	64
17:00-19:00	2(Pik)	4 dk.	15	30	4 dk.	15	30
19:00-00.00	5	6 dk.	10	50	8 dk.	7	35
Günlük Toplam Sefer Sayısı				200	166		
Günlük Harcanan Enerji (birim)				100	83,00		
<i>Yapılacak İyileştirme Oranı</i>					<i>%17,00</i>		



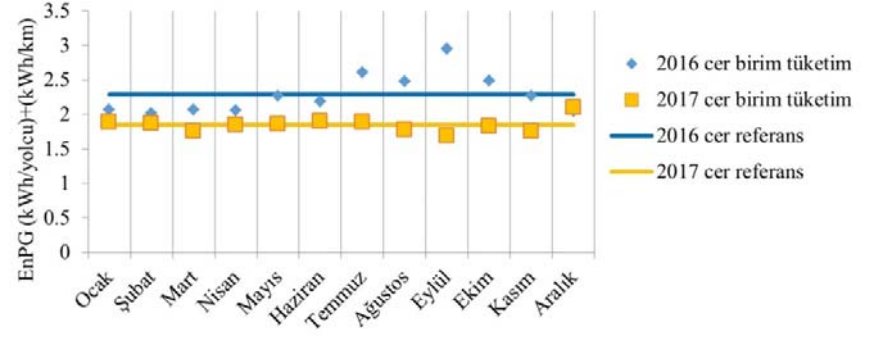
Şekil 5. M1 hattı CER performans değişimleri. (Variations of traction performance on M1 line)



Şekil 6. M2 hattı CER performans değişimleri. (Variations of traction performance on M2 line)



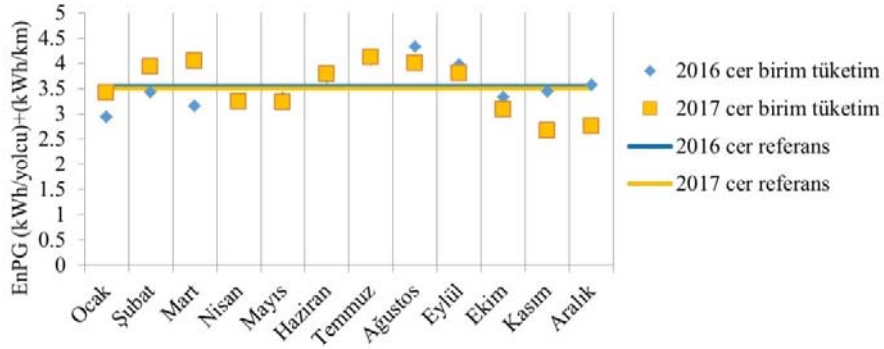
Şekil 7. M3 hattı CER performans değişimleri. (Variations of traction performance on M3 line)



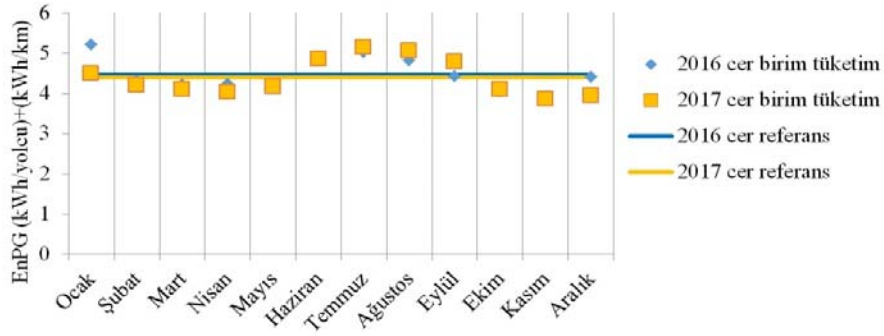
Şekil 8. M4 hattı CER performans değişimleri. (Variations of traction performance on M4 line)

metro ve tramvaylar için karşılaştırılması amacıyla yapılmıştır. Bu sebeple bu tespit için herhangi bir çözüm önerisi yapılmamıştır.

Şekil 5'ten Şekil 10'a kadar, hatların 2016 ve 2017 yıllarındaki CER performanslarının aylık değişim grafikleri verilmiştir. CER performanslarının, M3 hattı hariç,



Şekil 9. T1 hattı CER performans değişimleri. (Variations of traction performance on T1 line)



Şekil 10. T4 hattı CER performans değişimleri. (Variations of traction performance on T4 line)

genellikle Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında referans değerinin üzerinde seyrettiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi, soğutma yüklerine olan talebin artmasıdır. M3 hattında ise diğer hatların aksine CER performansları ocak, şubat ve mart dönemlerinde referans değerinin üzerinde olup haziran, temmuz, ağustos ve eylül dönemlerinde ortalamanın referans altındadır. Ancak M1 ve T4 hatlarına ait ocak ayındaki artışlar ile M3 hattındaki kış dönemi kötü performansların sebebinin EnYS kapsamında detaylı enerji taraması ile tespit edilmelidir. Bu hatların CER enerji tüketimlerinde meydana gelen anormal seyrin belirlenmesi, çalışma kapsamında devreye alınan enerji izleme sistemi sayesinde belirlenmiştir. Bu da, EnYS kapsamında önerilen izleme sisteminin isabetli olduğuna işaret etmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmamızda ISO 50001 enerji yönetim standardının 4.4.2 maddesi referans alınarak işletmeye ait CER tüketimleri “enerji gözden geçirmesi” yapılmıştır. CER tüketim oranlarından toplam tüketime oranı %5’in üzerinde olan tüketimler önemli tüketici olarak belirlenmiştir. Her bir hatta ait spesifik CER tüketimlerinin belirlenmesi için gerekli olan enerji performans göstergesi (EnPG) [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] olarak belirlenmiştir. Böylelikle CER enerji tüketimi etkileyen en temel iki bileşen ile spesifik tüketim belirlemesi yapılmış olup gösterge bazında metro ile tramvay hatları değerlendirilmiştir. Değerlendirmede 2016 ve 2017 yıllarına ait CER enerji tüketimleri baz alınmıştır. Bu esaslar doğrultusunda önemli tüketici olarak belirlenen hatlardaki

CER tüketimleri sırasıyla metro hatları için; M1, M2, M3 ve M4, tramvay hatları için ise T1 ve T4 hatlarıdır.

CER tüketiminde, metro hatlarından en verimsiz hattın ortalama 3,10 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile M3 hattı olduğu en verimli hattın ise ortalama 2,07 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile M4 hattı olduğu tespit edilmiştir. En verimsiz metro hattı olarak belirlenen M3 hattı için saha incelemesi yapılmış ve M3 hattının sefer sayısının yolcu sayısına oranla çok sık olduğu görülmüştür. Bu sebeple M3 hattının CER performansının diğer metro hatlarına oranla daha kötü olduğu anlaşılmıştır. Bu husus için pik saatler dışındaki sefer sıklığının 8 dk.’dan 10 dk.’ya çıkartılarak düzenleme yapılmasının EnYS eylem planına dahil edilmesi önerilmiştir. Tablo 5’te verilen M3 hattı sefer sıklığı düzenlemesi yapılarak elde edilecek iyileştirme hesabı ile %7.87 oranında enerji tasarrufu yapılacağı belirlenmiş olup hesaplamada hizmet kalitesi açısından müşteri memnuniyeti göz önüne alınmıştır.

Ayrıca tramvay hatları arasında kıyaslama yapılmış ve en verimsiz hattın ortalama 4,43 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile T4 hattı, en verimli hattın ise ortalama 3,53 [(kWh/yolcu) + (kWh/km)] ile T1 hattı olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde sefer sıklığı düzenlemesi T4 hattı için de yapılmış ve Tablo 6’da gösterildiği üzere pik saatler dışındaki sefer sıklığının 6 dk.’dan 8 dk.’ya çıkartılarak düzenleme yapılmasının EnYS eylem planına dahil edilmesi ile %17 oranında enerji tasarrufu yapılacağı belirlenmiştir. Metro ve tramvay sistemlerinin CER performansı açısından

**Tablo 7.** Kent içi raylı sistemlerde CER enerji verimliliği önlemlerinin genel değerlendirilmesi.  
(General evaluation of energy efficiency actions for tracking in urban railway systems)

Önlemler			Enerji Tasarrufu Potansiyeli (%)	Mevcut Sistemler için Uygunluk	Yatırım Maliyeti	Referans
Grup	Kategori	Çözüm				
Faydalı Frenleme		Sefer Süresi Optimizasyonu	1-10	Yüksek	Düşük	[34-37, 55, 56]
		Enerji Depolama Sistemleri	5-30	Orta	Yüksek	[41-42, 57-76]
		Çift Taraflı Trafo kullanımı	5-20	Yüksek	Yüksek	[77-79]
Enerji Verimli Sürüş		Verimli Sürüş Teknikleri	5-10	Yüksek	Düşük	[44-46, 80-90]
		Verimli Sürüş Araçları	5-15 5-15	Yüksek Orta	Orta Yüksek	[91-92] [93-94]
CER verimliliği	CER Ekipmanları	sabit mıknatıslı senkron motor kullanımı	5-10	Yüksek	Yüksek	[97-104]
		Yazılım optimizasyonu	1-5	Yüksek	Düşük	[90, 105]
	Kütle Azaltımı	Malzeme değişimi	1-10	Yüksek	Orta	[106-111]
Konfor Fonksiyonları	Araç içi	Isı yalıtımı	1-5	Orta	Yüksek	
		Led dönüşümü	1-5	Yüksek	Orta	
		HVAC ve aydınlatma kontrolü (hareket halinde)	1-5	Yüksek	Düşük	[90, 105, 112-119]
		HVAC ve aydınlatma kontrolü (park halinde)	1-5	Yüksek	Düşük	

karşılaştırılması ise ileride yapılacak raylı ulaşım yatırımları için hangi sistemin daha uygun olduğunu belirlenmesi açısından fikir vermektir.

CER tüketimlerinin dönemsel değişimlerinin değerlendirilmesiyle, EnYS kapsamına alınan hatlardaki CER tüketimlerinin dönemsel tüketim trendleri belirlenmiştir. Çalışmada önemli bir çıkarım da, yaz dönemlerindeki artışlara ilave olarak M1 ve T4 hatlarındaki tüketimin ocak ayında artış göstermesi ile M3 hattında yaz döneminin zıttı olarak kış döneminde de kötü performans sergilemesidir. Böylece çalışmada EnYS ile enerji takibi yapıldığı takdirde, kullanım anında fark edilmeyen enerji tüketim anomalileri tespit edilebilmiştir. Burada önemle belirtmek gerekir ki, çalışma kapsamında tanıtılan EnYS teşhis koymak için önerilen bir tahlil yöntemidir. Kesin sonuçların alınması için daha detaylı tahliller gerekebilir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde belirtilen bulgu ve değerlendirmelere ilave olarak kent içi raylı sistemlerde CER enerji verimliliği önlemlerinin genel değerlendirilmesi için yapılan çalışmaların özeti niteliğinde olan ve Tablo 7’de belirtilen hususların Şekil 1’de oluşturulan algoritma bağlamında öncelikle bu çalışma kapsamında önemli tüketici olarak belirlenen M1, M2, M3, M4, T1 ve T4 hatlarında EnYS programına alınmasını önermekteyiz. Burada özellikle Tablo 7 EnYS kapsamına alınması muhtemel ana önlemler için sistem düzeyinde enerji tasarrufu potansiyelinin açıklayıcı şekillerini göstermektedir ve sadece CER ile ilgili olan ticari olarak mevcut ve test edilmiş çözümler listeye eklenmiştir. Tablo 7’de verilen değerlerin

aralığı, literatürde bulunan ortalama rakamların standart bir raylı sisteme uygulanmasının sonucudur. Standart bir raylı sistemden kast edilen husus ise sistemde tüketilen toplam enerjinin %80’lik kısmının hareketli sistem, geri kalan %20’lik kısmının ise yardımcı tesisler tarafından tüketildiği sistemlerdir. Bu nedenle, bu değerler raylı sistemlerdeki CER tüketimlerine ait enerji tasarrufu potansiyelleri hakkında daha bir fikre sahip olunması için yaklaşık rakamlardır. Ancak, EnYS kapsamında çalışmamızın konusu olan hatlarda detaylı bir araştırma ve çalışma ile tabloda yatırım maliyeti düşük mevcut sisteme uygulanabilirliği yüksek olan uygulamaların eylem planına dâhil edilmesi önerilmektedir.

Yapılan EnYS CER tüketimi çalışması her ne kadar İstanbul kent içi elektrikli raylı ulaşım sistemleri için yapılmış olsa da diğer tüm kentlerde (Tablo 1) faaliyet gösteren kent içi elektrikli raylı ulaşım sistemleri içinde önerilebilir. Ayrıca bu kapsamda yapılan çalışmalarda sistemin yıl içindeki toplam taşınan yolcu, yapılan km, bilanço vb. bilgilerin tek tek tablolandığı sektör raporlarına ilave olarak; enerji tüketim miktarları, gerçek spesifik enerji tüketim miktarları, bu gerçek spesifik enerji tüketim miktarlarının hedeflenen enerji tüketim performanslarından ne kadar saptığı ve verimlilik değerlerinin de yer aldığı yıllık raporların yayımlanıp kamuoyuyla paylaşılması sağlanmalıdır. Bu analizlerin sadece bu tür kuruluşların teknik bürolarında yer alan birkaç mühendisin bilgisi dahilinde kalması ülkemizde kent içi elektrikli raylı ulaşım sistemleri için bütünlüklü bir müdahaleyi olanaksız kılmaktadır. Bu sebeple Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın ve Enerji İşleri Genel

Müdürlüğü (EİGM) gibi paydaşların öncülüğünde bir bilgi havuzu oluşturulup, kent içi elektrikli raylı ulaşım hizmetleri yapan kuruluşların kullandıkları enerji tiplerine ve kullanım alanlarına göre kategorize edilmesi sağlanmalı ve aynı kulvardaki kuruluşlar kendi aralarında verimlilik, hedeflenen tüketim performansı, hedeflenen spesifik enerji tüketimi ve gerçek enerji performansları gibi alanlarda aylara ve yıllara göre kıyaslanmalıdır. Öyle ki aynı enerji tipini kullanan kent içi elektrikli raylı ulaşım işletmelerinde verimlilik artışı sağlanan veya spesifik enerji tüketim miktarı bir önceki periyoda göre düşen kuruluşlara tüzel kurum bazında vergilendirme diliminde avantaj sağlama, çalışan personel için ise teşvik primi ödenmesi ve düşük enerji birim fiyatı üzerinden faturalandırma yapılması gibi ödüllendirme sistemleri kurulmalıdır. Diğer bir deyişle, bu tür işletmeler için, spor branşlarında olduğu gibi, kategorilerine göre bir verimlilik ve enerji tüketim performansı ligi oluşturulabilir. Böylelikle enerjinin tüketildiği alanlar (CER, aydınlatma, yürüyen merdiven vb.) sürekli bir verimlilik ve performans rekabeti sağlanabilir.

Enerji Yönetiminde sürekli iyileştirilebilen sistematik bir yaklaşım geliştirilebilmesi için ülkemizde faaliyette olan diğer kent içi elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde de, bu çalışma kapsamında önerilen örnekte olduğu gibi, ISO 50001 standardına uygun şekilde, EnYS kurulmalı ve enerji gözden geçirmesi işlemi için enerji kullanım verileri sürekli takip ve analiz edilmelidir. Böylelikle benzer çalışmaların benzer kuruluşlar tarafından yapılması ve uygulamaya geçirilmesi ile Enerji Verimliliği Strateji Belgesinde belirtilen temel hedef olan 2023 yılında Türkiye'nin gayri safi yurtiçi hâsıla (GSYİH) başına tüketilen enerji miktarının yani enerji yoğunluğunun 2011 değerine göre %20 azaltılması hedefine katkı sağlanacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Koç E., Şenel M.C., Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makine Dergisi, 54 (639), 32-34, 2013.
- Koç E., Kaplan E. Dünyada ve Türkiye'de Genel Enerji Durumu-I Dünya Değerlendirmesi, Termodinamik Dergisi, 187, 70-80, 2008.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023, Ankara.
- EİGM., 2018 Yılı Ulusal Enerji Denge Tablosu, T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2017.
- TMMOB, Dünyada ve Türkiye'de Enerji Verimliliği, Oda Raporu, MMO (589), 130, 2012.
- Çınar T., Tekstil Sanayisinde Enerji Yönetimi ve Enerji Verimlilik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2008.
- Çubuk K.M., Türkmen M., Ankara'da Raylı Ulaşım, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18 (1), 1-2, 2003.
- Vuchic V.R., Urban Transit Systems And Technology, John Wiley & Sons, Hoboken. 2007.
- Chan C.C., The State Of The Art Of Electric, Hybrid, And Fuel Cell Vehicles, P. IEEE. 95, 704-718, 2007.
- Koseki T., Technologies For Saving Energy In Railway Operation: General Discussion On Energy Issues Concerning Railway Technology, IEEJ T. Electr. Electr. 5, 285-290, 2010.
- Nicola D.A. Rosen M.A. Bulucea C.A. Brandusa C., Some Sustainability Aspects Of Energy Conversion In Urban Electric Trains, Sustainability 2, 1389-1407, 2010.
- Ocak İ., Manisalı E., Kentsel Raylı Taşıma Üzerine Bir İnceleme (İstanbul Örneği), SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10 (2), 51-59, 2006.
- Yıldız A., Arıkan O., DC Elektrikli Raylı Sistemler İçin Teknik ve Ekonomik Açından Verimlilik Analizi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 16, 729-739, 2019.
- IEA and UIC, Railway handbook - Energy Consumption And CO<sub>2</sub> Emissions, International Energy Agency, 2012.
- Gonzales-Gil A., Palacin R., Batty, P. Powell, J.P., A System Approach To Reduce Urban Rail Energy Consumption, Energy Conversation and Management, 80, 509-524, 2014.
- Official Journal of the European Union, Decision No 406/2009/EC on the effort of Member States to Reduce Their Greenhouse Gas Emissions to Meet the Community's Greenhouse Gas Emission Reduction Commitments up to 2020, 136-141, 2009.
- European Commission, A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050-Ref. com (2011) 112, 2011. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri= com:2011:0112:fin:en:pdf>
- Url-1 <<https://www.metro.istanbul/icerik/hakkimizda>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-3 <<http://www.ankarametrosu. com.tr /geneltnt.aspx>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-4 <<http://www .ankaray. com.tr/ankaray-bilgileri/genel -tanitim>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-5 <<https://www. izmirmetro. com.tr/Sayfa/ 131 /tarihce>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-7 <<https:// adanaulasim. com.tr /rayli- sistem-hizmeti/>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-8 <<http://www.antalyaulasim.com.tr/icerik/antray-hakkinda>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-9 <<https://www. kayseriulasim .com/tr /kayseriulasim/ yeni-rayli-sistem-hatları>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-10 <<http://atus.konya. bel.tr/ tranvaytarıhce.php? langCode=tr>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-11 <[http://samulas.com.tr/ hizmetler \\_hafif-rayli-sistem/](http://samulas.com.tr/ hizmetler _hafif-rayli-sistem/)>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-12 <<http://www2.estram.com.tr/Cntnt/15>>, alındığı tarih: 24.04.2019.
- Url-13 <<https://www. burulas.com. tr/bursaray -hat-ozellikleri.aspx>>, alındığı tarih: 24.04.2019
- Url-14 <<https://www. burulas. com.tr/ tramvay- bilgiler.aspx?VehicleType=218&ResultType=HatOzellikleri>>, alındığı tarih: 24.04.2019.

30. Url-15 <http://gaziulas.com/Icerik.aspx?ID=19>, alındığı tarih: 24.04.2019.
31. Tian Z., Zhao N., Hillmansen S., Roberts C., SmartDrive: Traction Energy Optimization and Applications in Rail Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20 (7), 2764-2773, 2019.
32. Razik L., Berr N., Khayyam S., Ponci F. Monti A., REM-S-Railway Energy Management in Real Rail Operation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68, (2), 1266 - 1277, 2019.
33. Yang X., Li X., Ning B., Tang T., A Survey on Energy-Efficient Train Operation For Urban Rail Transit, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 17 (1), 2-13, 2016.
34. Nasri A., Fekri Moghadam M., Mokhtari H., Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy Of Braking İn Electrical Railway Systems, In: *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion - SPEEDAM 2010*, Pisa, Italy, 1218-1221, 2010.
35. Peña-Alcaraz M., Fernandez A., Cucala A.P., Ramos A., Pecharroman R.R., Optimal Underground Timetable Design Based On Power Flow For Maximizing The Use Of Regenerative-Braking Energy, *P. I. Mech. Eng. F-J Rai*. 226, 397-408, 2011.
36. Boizumeau J.R., Leguay P., Navarro E., Braking Energy Recovery at the Rennes Metro, In: *Workshop on Braking Energy Recovery Systems - Ticket to Kyoto Project*, Bielefeld, Germany, (2011).
37. K.M. Kim, K.T. Kim, M.S. Han, A Model and Approaches for Synchronized Energy Saving in Timetabling, In: *9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011*, Lille, France, 1-8, 2011.
38. Ciccarella F., Del Pizzo A., Iannuzzi D., Improvement of Energy Efficiency in Light Railway Vehicles Based on Power Management Control of Wayside Lithium-ion Capacitor Storage, *IEEE Trans. Power Electron.*, 29 (1), 275-286, 2014.
39. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P., Recent Developments and Applications of Energy Storage Devices in Electrified Railways, *IET Elect. Syst. Transp.*, 4 (1), 9-20, 2014.
40. de la Torre S., Sánchez-Racero A.J., Aguado J.A., Reyes M., Martínez O., Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems, *IEEE Trans. Power Syst.*, 30 (3), 1492-1500, 2015.
41. Barrero R., Tackoen X., van Mierlo J., Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network, *P. I. Mech. Eng. F-J Rai*. 224, 207-225, 2010.
42. Steiner M., Klohr M., Pagiela S., Energy Storage System With Ultracaps on Board of Railway Vehicles, In: *2007 European Conference on Power Electronics and Applications - EPE, Aalborg, Denmark*, 1-10, 2007, doi: 10.1109/EPE.2007.4417400.
43. Albert H., Levin C., Vietrosa E., Witte G. Reducing Energy Consumption in Underground Systems, *Internationals Metropolitan Railways Comitte, UITP*, September 1995.
44. Ticket to Kyoto. Overview of Quick Wins Implemented by Partners in the Public Transport Field, *Ticket to Kyoto Project*, 2011.
45. Hathaway R., Energy Efficient Train Regulation on the Victoria Line, In: *IMEchE Railway Division Seminar Gaining traction in Energy Efficiency*, London, UK, 2012.
46. Açıkbaz S., Söylemez M.T., Coasting Point Optimisation for mass Rail Transit Lines Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms, *IET Electr. Power. App.* 2, 172-182, 2008.
47. Açıkbaz, M. Söylemez, M.T., Energy Loss Comparison Between 750 VDC and 1500 VDC Power Supply Systems Using Rail Power Simulation, *Int. Conf. on Comp. Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Transit Systems (COMPRAIL 2004)* Dresden, Germany, 959-960, 2004.
48. Fuertes A., Casals M., Gangolells M. Puigdollers O., Overcoming Challenges for Energy Management in Underground Railway Stations, *European Conference on Product and Process Modelling*, Reykjavik, 124-128 2012.
49. Giretti A., Lemma M., Vaccarini M., Ansuini R., Larghetti R., Ruffini S., Environmental Modeling for the Optimal Energy Control of Subway Stations, In: *World Conference on Robotics and Automation in Construction - ISG\*ISARC2012*, Eindhoven, The Netherlands, 1-5, 2012.
50. Açıkbaz S., Alataş A., Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş ve Frenleme Enerjisinin Geri Kazanılması, *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, İstanbul. 237-245, 2006.
51. TS EN ISO 50001, TSE. Enerji Yönetim Sistemleri-Şartlar ve Kullanım İçin Kılavuz, ICS 27.010. 1-2, 2013.
52. <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz?hatturu=metro>
53. İşcan S., Ünver Ü., Güneş T., İstanbul Kent İçi Elektrikli Raylı Ulaşım Sistemlerine Ait Elektrik Enerjisi Tüketimleri İçin Enerji Analizi ve Yönetiminin Yapılması, 4. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul. 1453-1454, 23-24 Nisan, 2019
54. İşcan, S. Metro İstanbul Enerji Yönetim Sisteminin Oluşturulması, Modellenmesi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova, 2019.
55. Albrecht T., Reducing Power Peaks and Energy Consumption in Rail Transit Systems by Simultaneous Train Running Time Control, *Adv. Transport*. 15, 885-894, 2004.
56. Chen J.F., Lin R.L., Liu Y.C., Optimization of an MRT Train Schedule - Reducing Maximum Traction Power by Using Genetic Algorithms, *IEEE T. Power Syst.* 20, 1366-1372, 2005.
57. Chymera M., Renfrew A., Barnes M., Analyzing the Potential of Energy Storage on Electrified Transit Systems, In: *8th World Congress of Railway Research - WCRR*, Seoul, South Korea, 2008.
58. Barrero R., van Mierlo J., Tackoen X., Energy Savings in Public Transport, *IEEE Veh. Technol. Mag.* 3, 26-36, 2008.

59. Domínguez M., Cucala A.P., Fernández A., Pecharrómán R.R., Blanquer J., Energy Efficiency on Train Control - Design of Metro ATO Driving and Impact of Energy Accumulation Devices, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, 22-26, 2011.
60. Ciccarelli F., Iannuzzi D., Tricoli P., Control of Metro-trains Equipped With Onboard Supercapacitors for Energy Saving and Reduction of Power Peak Demand, *Transport. Res. C-Emer.* 24, 36-49, 2012.
61. Iannuzzi D., Tricoli P., Speed-based State-of-charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors, *IEEE T. Power Electr.* 27, 2129-2140, 2012.
62. Steiner M., Scholten J., Energy Storage on Board of DC Fed Railway Vehicles, In: IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference - PESC, Aachen, Germany, 666-672, 2004.
63. Moskowicz J.P., Cohuau J.L., STEEM: ALSTOM and RATP Experience of Supercapacitors in Tramway Operation, In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference - VPPC 2010, Lille, France, 1-5, 2010, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729152.
64. Rufer A., Hotellier D., Barrade P., A Supercapacitor-based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks, *IEEE T. Power Deliver.* 19, 629-636, 2004.
65. B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer and M. Klohr, Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network, 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, 2007, 1-10, doi: 10.1109/EPE.2007.4417349.
66. Lee H., Song J., Lee H., Lee C., Jang G., Kim G., Capacity Optimization of the Supercapacitor Energy Storages on DC Railway System Using a Railway Powerflow Algorithm, *Int. J. Innov. Comput. I.* 7, 2739-2753, 2011.
67. Teymourfar R., Asaei B., Iman-Eini H., Nejati fard R., Stationary Super-capacitor Energy Storage System to Save Regenerative Braking Energy in a Metro Line, *Energ. Convers. Manage.* 56, 206-214, 2012.
68. Iannuzzi D., Lauria D., Ciccarelli F., Wayside Ultracapacitors Storage Design for Light Transportation Systems: A Multiobjective Optimization Approach, *Int. Rev. Electr. Eng.-I.* 8, 190-199, 2013.
69. Iannuzzi D., Ciccarelli F., Lauria D., Stationary Ultracapacitors Storage Device for Improving Energy Saving and Voltage Profile of Light Transportation Networks, *Transport. Res. C-Emer.* 21, 321-337, 2012.
70. Vazquez S., Lukic S.M., Galvan E., Franquelo L.G., Carrasco J.M., Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications, *IEEE T. Ind. Electron.* 17, 3881-3895, 2010.
71. González-Gil A., Palacin R., Batty P., Sustainable Urban Rail Systems: Strategies and Technologies for Optimal Management of Regenerative Braking Energy, *Energ. Convers. Manage.* 75, 374-388, 2013.
72. Ogasa M., Application of Energy Storage Technologies for Electric Railway Vehicles - Examples with Hybrid Electric Railway Vehicles, *IEEJ T. Electr. Electr.* 5, 304-311, 2010.
73. Ogura K., Nishimura K., Matsumura T., Tonda C., Yoshiyama E., Andriani M., Francis W., Schmitt R.A., Visgotis A., Gianfrancesco N., Test Results of a High Capacity Wayside Energy Storage System Using Ni-MH Batteries for DC Electric Railway at New York City Transit, In: IEEE Green Technologies Conference - Green 2011, Baton Rouge, USA, 2011.
74. Meinert M., New Mobile Energy Storage System For Rolling Stock, In: 13th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'09, Barcelona, Spain, 1-10, 2009
75. Bolund B., Bernhoff H., Leijon M., Flywheel Energy and Power Storage Systems, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 11, 235-258, 2007.
76. Tzeng J., Emerson R., Moy P., Composite Flywheels for Energy Storage, *Compos. Sci. Technol.* 66, 2520-2527, 2006.
77. Ibaiondo H. Romo A., Kinetic Energy Recovery on Railway Systems With Feedback to the Grid, Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, 2010, T9-94-T9-97, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606545.
78. Warin Y., Lanselle R., Thiounn M., Active Substation, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, 22-26, 2011.
79. Cornic, D. (2010). Efficient Recovery of Braking Energy Through a Reversible dc Substation. *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion.* doi:10.1109/esars.2010.5665264
80. Alves F.T., Pires C.L., Energy Saving Strategy in São Paulo Metro, In: IET Conference on Railway Traction Systems - RTS 2010, Birmingham, UK, 1-4, 2010.
81. Bocharnikov Y.V., Tobias A.M., Roberts C., Hilmansen S. S., Goodman C.J., Optimal Driving Strategy for Traction Energy Saving on DC Suburban Railways, *IET Electr. Power. App.* 1, 675-682, 2007.
82. Ding Y., Liu H., Bai Y., Zhou F., A Two-level Optimization Model and Algorithm for Energyefficient Urban Train Operation, *J. Transport. Syst. Eng. Inf. Tech.* 11, 96-101, 2011.
83. Chuang H.J., Chen C.S., Lin C.H., Hsieh C.H., Ho C.Y., Design of Optimal Coasting Speed for Saving Social Cost in Mass Rapid Transit Systems, In: 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies - DRPT 2008, Nianjing, China, 2833-2839, 2008.
84. Malavasi G., Palleschi P., Ricci S., Driving and Operation Strategies for Traction-energy Saving in Mass Rapid Transit Systems, *P. I. Mech. Eng. F-J. Rai.* 225, 475-482, 2011.
85. Ke B.R., Lin C.L., Yang C.C., Optimisation of Train Energy-efficient Operation for Mass Rapid Transit Systems, *IET Intell. Transp. Syst.* 6, 58-66, 2012.
86. Miyatake M., Ko H., Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption, *IEEJ T. Electr. Electr.* 5, 263-269, 2010.
87. Hoang H.H., Polis M.P., Haurie A., Reducing Energy Consumption Through Trajectory Optimization for a Metro Network, *IEEE T. Automat. Contr. AC-20*, 590-595, 1975.



88. Duarte M.A., Sotomayor P.X., Minimum Energy Trajectories for Subway Systems, *Optim. Control Appl. Meth.* 20, 283-296, 1999.
89. Ke B.R., Chen M.C., Lin C.L., Block-layout Design Using Max-min Ant System for Saving Energy on Mass Rapid Transit Systems, *IEEE T. Intell. Transp. Syst.* 10, 226-235, 2009.
90. Sandor J., Wiebe E., Bergendorff M., Recagno V., Nolte R., Smart and Efficient Energy Solutions for Railways - The "Railenergy" results, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, (2011).
91. Jin J., Kadhim R., Driver Advisory Information for Energy Management and Regulation, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, 1-12, 2011.
92. Wong K.K., Ho T.K., Dynamic Coast Control of Train Movement With Genetic Algorithm, *Int. J. Syst. Sci.* 35, 835-846, 2004.
93. Domínguez M., Fernández A., Cucala A.P., Lukaszewicz P., Optimal Design of Metro Automatic Train Operation Speed Profiles for Reducing Energy Consumption, *P. I. Mech. Eng. F-J. Rai.* 225, 463-473, 2011.
94. Chang C.S., Sim S.S., Optimising Train Movements Through Coast Control Using Genetic Algorithms, *IEE Proc.-B.* 144, 65-72, 1997.
95. Hartland D., Heating the Countryside or Saving the Kilowatt Hours? In: IMechE Railway Division Seminar "Gaining traction in Energy Efficiency", London, UK., 2012.
96. Tomita M., Fukumoto Y., Suzuki K., Miriyata M., Development of Prototype DC Superconducting Cable for Railway System, *Physica C Supercond.* 470, 1007-1008, 2010.
97. Kondo K., Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems, *IEEJ T. Electr. Electr.* 5, 298-303, 2010.
98. Kondo M., Shimizu Y., Kawamura J., Development of Totally Enclosed Permanent Magnet Synchronous Motor, *Q. Rep. RTRI*, 49, 16-19, 2008.
99. Peroutka Z., Zeman K., Krůs F., Košta F., New Generation of Trams With Gearless Wheel PMSM Drives: From Simple Diagnostics to Sensorless Control, In: 14th International Power Electronics and Motion Control Conference - EPE-PEMC 2010, Ohrid, Macedonia, S10-31, 2010.
100. Germishuizen J., Jöcke A., Hoffmann T., Teichmann M., Löwenstein L., Wangelin F.V., Syntegra™ - Next Generation Traction Drive System, Total Integration Of Traction, Bogie and Braking Technology, In: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion - SPEEDAM 2006, Taormina, Italy, 1073-1076, 2006.
101. Koerner O., Binder A., Feasibility of a Group Drive With Two Permanent Magnet Synchronous Traction Motors for Commuter Trains, *EPE Journal* 14, 32-37, 2004.
102. Barcaro M., Fornasiero E., Bianchi N., Bolognani S., Design Procedure of IPM Motor Drive for Railway Traction. In 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE, 983-988, 2011.
103. Uzel D., Peroutka Z., Control and Design Considerations for Wheel Mounted Drive of Tram: Interesting features offered by IPMSM technology, In: 14th International Power Electronics and Motion Control Conference - EPE-PEMC Ohrid, Macedonia, T9-52, 2010.
104. Toshiba Corporation, Energy Efficient Traction System Utilizing Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), In: IMechE Railway Division Seminar, Gaining traction in Energy Efficiency, London, UK, 2012.
105. Chéron C., Walter M., Sandor J., Wiebe E., ERRAC - European Railway Energy Roadmap: Towards 2030, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, 2011.
106. Carruthers J.J., Calomfirescu M., Ghys P., Prockat J., The Application of a Systematic Approach to Material Selection for the Lightweighting of Metro Vehicles, *P. I. Mech. Eng. F-J. Rai.* 223, 427-437, 2009.
107. Eickhoff B., Nowell R., Determining the Benefit of Train Mass Reduction, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, 2011.
108. Robinson M., Carruthers J., Composites for Lightweighting in Mass Transit Applications, *JEC Compos. Mag.* 43, 35-37, 2006.
109. Hudson C.W., Carruthers J.J., Robinson A.M., Multiple Objective Optimisation of Composite Sandwich Structures for Rail Vehicle Floor Panels, *Compos. Struct.* 92, 2077-2082, 2010.
110. Carruthers J., O'Neill C., Ingleton S., Robinson M., Grasso M., Roberts J., Prockat J., Simmonds G., The Design and Prototyping of a Lightweight Crashworthy Rail Vehicle Driver's Cab, In: 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, Lille, France, 2011.
111. Goodall R.M., Kortüm W., Mechatronic Developments for Railway Vehicles of the Future, *Control Eng. Pract.* 10, 887-898, 2002.
112. Günselmann W., Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems, In: 2005 European Conference on Power Electronics and Applications - EPE 2005, Dresden, Germany, 1-10, 2005, doi: 10.1109/EPE.2005.219712.
113. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings: A State-of-the-art Review, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 94, 87-105, 2010.
114. Amri H., Hofstädter R.N., Kozek M., Energy Efficient Design and Simulation of a Demand Controlled Heating and Ventilation Unit in a Metro Vehicle, In: 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, 7-12, 2011.
115. Kwon S.B., Park D., Cho Y., Park E.Y., Measurement of Natural Ventilation Rate in Seoul Metropolitan Subway Cabin, *Indoor Built Environ.* 19, 366-374, 2010.

- 116.**Li W., Sun J., Numerical Simulation and Analysis of Transport Air Conditioning System Integrated With Passenger Compartment, *Appl. Therm. Eng.* 50, 37-45, 2013.
- 117.**Kumar M., Kar I.N., Design of Model-based Optimizing Control Scheme for an Air-conditioning System, *HVAC&R Res.* 16, 565-597, 2010.
- 118.**Wang X., Yuang X., Reuse of Condensed Water to Improve the Performance of an Air-cycle Refrigeration System for Transport Applications, *Appl. Energ.* 84, 874-881, 2007.
- 119.**Javani N., Dincer I., Naterer G.F., Thermodynamic Analysis of Waste Heat Recovery for Cooling Systems in Hybrid and Electric Vehicles, *Energy* 46, 109-116, 2012.

