



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Kent içi raylı sistemlerde sürdürülebilirlik ve yeşil dönüşüm: Ankara, İstanbul ve İzmir’de yenilenebilir enerji kullanımı

 Mert Ökten^{a,*}
^aManisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Manisa, 45400, Türkiye

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Kasım 2024

Düzeltilme 20 Şubat 2025

Kabul 19 Nisan 2025

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Karbon azaltımı

Şehir içi raylı ulaşım sistemleri

Sürdürülebilirlik

Yenilenebilir enerji

ÖZET

Bu çalışma, sürdürülebilirlik ve yeşil dönüşüme vurgu yaparak yenilenebilir enerji ve rejeneratif fren sistemlerinin Ankara, İstanbul ve İzmir’deki kentsel raylı sistem ağlarına entegrasyonunu araştırmaktadır. Mevzuat raporları, yenilenebilir enerji potansiyeli haritaları ve uluslararası vaka çalışmalarından faydalanan araştırma, enerji tasarrufu, karbon azaltımı ve ekonomik uygulanabilirliği ölçmektedir. Metodolojik olarak, senaryoları değerlendirmek için mevsimsel enerji üretim faktörleri, rejeneratif frenleme ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) modelleri kullanılmaktadır. Temel bulgular, Ankara’nın raylı sistemlerinin rejeneratif frenleme kullanarak yıllık enerji tüketimini 22 GWh azaltabileceğini, İstanbul ve İzmir’in ise sırasıyla 90 GWh ve 44 GWh tasarruf edebileceğini göstermektedir. Üç şehir için karbon emisyonlarında 47,3 bin, 193,5 bin ve 94,6 bin ton CO₂ azaltımı öngörülmektedir. Ekonomik analizler 5,8, 4,2 ve 3,7 yıllık geri ödeme sürelerini ve %17,2, %23,7 ve %27,4’e ulaşan yatırım getirisi (ROI) oranlarını ortaya koymaktadır. Çalışma, hibrit enerji depolama sistemleri ve güneş enerjili havalandırma gibi altyapı modernizasyonunun AB Yeşil Mutabakatı ve Paris Anlaşması gibi küresel sürdürülebilirlik çerçevelerine uyum sağlamadaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Bununla birlikte, şebeke uyumluluğu ve mevsimsel enerji değişkenliği gibi zorluklar hedefe yönelik müdahaleler gerektirmektedir. Politika önerileri, Türkiye’nin düşük karbonlu kentsel hareketliliğe geçişini hızlandırmak için kamu-özel sektör ortaklıklarının geliştirilmesini ve uluslararası yeşil fonlardan yararlanılmasını içermektedir.

Urban rail systems sustainability and green transformation: the use of renewable energy in Ankara, İstanbul, and İzmir

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 Nov 2025

Received in revised form 20 Feb 2025

Accepted 19 April 2025

Available online

Keywords:

Carbon reduction

Urban rail transport systems

Sustainability

Renewable energy

ABSTRACT

This study investigates the integration of renewable energy and regenerative braking systems into urban rail networks in Ankara, İstanbul, and İzmir, emphasizing sustainability and green transformation. By leveraging regulatory reports, renewable energy potential maps, and international case studies, the research quantifies energy savings, carbon reduction, and economic viability. Methodologically, it employs seasonal energy production factors, regenerative braking, and levelized cost of energy (LCOE) models to evaluate scenarios. Key findings indicate that Ankara’s rail systems could reduce annual energy consumption by 22 GWh using regenerative braking, while İstanbul and İzmir could save 90 GWh and 44 GWh, respectively. Carbon emission reductions are projected at 47.3k, 193.5k, and 94.6k tons of CO₂ for the three cities. Economic analyses reveal payback periods of 5.8, 4.2, and 3.7 years, with return on investment (ROI) rates reaching 17.2%, 23.7%, and 27.4%. The study highlights the critical role of infrastructure modernization, such as hybrid energy storage systems and solar-powered ventilation, in aligning with global sustainability frameworks like the EU Green Deal and the Paris Agreement. However, challenges such as grid compatibility and seasonal energy variability require targeted interventions. Policy recommendations include enhanced public-private partnerships and leveraging international green funds to accelerate Türkiye’s transition to low-carbon urban mobility.

I. GİRİŞ

Dünya genelinde kentleşmenin artması ile birlikte toplu taşıma sistemlerine olan talep de artmıştır. Kent içi raylı sistemler, şehir içi ulaşımında önemli bir yer tutmakta ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri arayışında kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin çevresel etkilerini azaltma ve enerji verimliliğini artırma çabaları, “yeşil dönüşüm” kavramı ile şekillenmektedir. Sürdürülebilirlik, sadece çevresel değil, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla da ele alınarak, kent içi ulaşımın her yönüyle daha verimli, daha az kaynak tüketen ve çevreye dost hale getirilmesini hedefler. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, küresel ulaşımdan kaynaklanan karbon emisyonları yılda 7,3 milyar ton civarındadır [1]. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji geri kazanımı, raylı sistemlerin enerji ihtiyacını karşılamak için önemli bir seçenek sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji, fosil yakıtların çevresel etkilerini en aza indiren, doğaya zarar vermeyen enerji türleri arasında yer almaktadır. Kent içi raylı sistemler için yenilenebilir enerji kullanımının artması, bu sistemlerin daha temiz, daha düşük karbon emisyonlarına sahip hale gelmesini sağlar. Yeşil dönüşüm süreci, yalnızca enerji kaynaklarını değil, aynı zamanda altyapı ve teknoloji yatırımlarını da kapsar. Elektrikli trenlerin daha verimli hale gelmesi, batarya teknolojilerinin gelişmesi ve enerji depolama çözümlerinin entegrasyonu, bu dönüşümün önemli unsurlarındandır. Ayrıca, yenilenebilir enerjinin kullanımı ile birlikte, karbon salınımı düşerken, enerji maliyetleri de uzun vadede daha sürdürülebilir bir düzeye ulaşabilir.

Kentsel raylı ulaşım sisteminin enerji tasarrufu ve emisyon azaltımındaki rolünü üç açıdan belirlemeye çalışmaktadır: kent sakinlerinin seyahat davranışı, kara taşımacılığı operasyonu ve kentsel raylı ulaşım sisteminin etkisi altında düşük karbon, enerji tasarrufu ve azaltılmış emisyon [2]. Çin’de yapılan bir çalışmaya göre işletme aşamasında, birim yolculuk başına sera gazı emisyon yoğunluğu 0,084 kg CO₂e/yolcu-km’dir [3].

Raylı sistemlerde trenin hareketi için ve diğer yardımcı elemanların beslenmesi için gerekli olan güce “cer gücü” denir. Rejeneratif frenleme, demiryolu elektrikli çekiş sistemlerinde elde edilen yüksek enerji verimliliği seviyelerinin arkasındaki ana nedenlerden biridir. Rejeneratif frenleme sırasında cer motoru bir jeneratör görevi görür ve kinetik enerjinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu enerjiyi kullanmak için ya elektrik şebekesine geri beslenmeli ya da daha sonra kullanılmak üzere bir enerji depolama sisteminde (bataryalar, süper kapasitörler ve volanlar) depolanmalıdır. Sabit süper kapasitör enerji depolama sistemlerinin uygulanması, kentsel raylı transit araçların rejeneratif frenleme enerjisini geri kazanmanın etkili bir yoludur [4, 5].

Fotovoltaik enerji üretimi raylı ulaşım güç kaynağı sistemine bağlanarak; ulaşım sisteminin işletme maliyetini düşürebilir, geleneksel termal enerji kullanımını azaltabilir ve karbon emisyonlarını azaltabilir ve çevreyi koruyabilir [6]. Sri Lanka’da yapılan bir çalışma bir demiryolu hattı boyunca fotovoltaik sistemler kurarak, demiryolu elektrik sistemi için gereken enerjinin %90’ının sağlanabileceğini göstermiştir [7]. Fotovoltaik sistemlerin hibrit enerji depolama sistemlerine entegre edilerek bir raylı ulaşım fotovoltaik hibrit enerji depolama sistemi oluşturulması etkili bir enerji tasarrufu ve emisyon azaltma önlemdir [8-10]. Li ve Or’un yapmış oldukları çalışmada fotovoltaik- rejeneratif frenleme hibrit enerji depolama sistemlerinin maliyette %11.98’lik bir azalma ve kullanımında %13,94’lük bir iyileşme gösterdiği belirtilmiştir [11].

Avrupa Birliği, çeşitli projeler ve politikalar aracılığıyla yeşil toplu taşımanın teşvik edilmesinde öncü rol oynamaktadır. Avrupa İklim Paketi girişimi, elektrikli araçlar, bisikletler, e-bisikletler, yeşil otobüsler ve trenler dahil olmak üzere verimli, daha sağlıklı ve daha az kirleten ulaşım yöntemleri için çok sayıda seçeneği

desteklemektedir. Pakt, eylemi ve etkiyi artırmak, şehirleri daha temiz ve işleri daha yeşil hale getirmek için diğer girişimlerle bağlantı kurmayı amaçlamaktadır. Örneğin, Polonya ve Avusturya'daki girişimler fotovoltaik enerjinin erişimini genişletmeye odaklanırken, İtalya'nın projesi toplu taşıma ağlarını daha yeşil güç kaynaklarına geçirmeyi amaçlamaktadır [12]. Çin merkezli yapılan bir araştırmada ise yüksek hızlı tren ağı ile entegreli yerel metro sistemlerinin karbon emisyonlarının oluşumunu azaltabileceği hesaplanmıştır [13].

Hollanda, elektrifikasyon, bisiklet altyapısı ve yenilikçi toplu taşıma çözümlerini içeren kapsamlı yaklaşımıyla yeşil toplu taşımada öncü konumdadır. Amsterdam'ın tramvay ve metro sistemleri, rüzgar enerjisinden %100 olarak faydalanmakta ve tramvay sisteminde frenleme sırasında enerji geri kazanımı uygulanmaktadır. Hollanda'da devlet teşvikleri, rüzgar enerjisi projelerinin %40'ını finanse ederken, Türkiye'de bu oran %10'dur. Bu fark, altyapı yatırımlarının hızını doğrudan etkilemektedir. İsveç Stockholm metro sistemi, 2017 yılından bu yana tüm elektrik ihtiyacını rüzgar enerjisinden sağlamaktadır. Araçlar, frenleme sırasında enerji geri kazanımı sağlayarak tüketimlerinin %15'e kadarı rejeneratif frenleme ile karşılanmaktadır. İsveç, toplu taşımadan kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik devam eden projelerle 2045 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmayı hedeflemektedir. İngiltere Londra metrosu, frenleme enerjisini geri kazanarak %20'ye kadar enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bazı hatlarda biyogaz ve diğer alternatif enerji kaynakları deneyen Londra Metrosu'nda kullanılan enerjinin yalnızca %16'sı yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. 2030 yılına kadar Londra Metrosu'nun enerjisinin %100'ünü yenilenebilir kaynaklardan sağlanması hedeflenmektedir [12, 14].

Şili Santiago metrosu, %60 oranında güneş ve rüzgar enerjisi kullanarak enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Hong Kong metro sisteminin %30'a kadarı rejeneratif frenleme ile sağlanmaktadır. Hindistan Yeni Delhi metrosu, istasyon çatılarına yerleştirilen güneş panelleriyle yıllık yaklaşık 27 MW enerji üretmekte ve yıllık 35 bin ton karbon emisyonunu azaltmaktadır. Yeni Delhi metrosu, karbon ayak izini azaltma konusunda Dünya Bankası'ndan karbon kredi sertifikası almış ilk metro sistemidir. Metro istasyonları ve depoları yeşil bina sertifikalarına sahiptir [12, 15]. Türkiye'de var olan 14 şehir içi toplu taşıma hattı arasında ise Ankara'da bulunan hatların her zaman en iyi performans gösteren ilk 5 hat arasında yer aldığı tespit edilmiştir [16].

Bu örneklerde de görüldüğü gibi, çeşitli yöntemler ve enerji kaynakları kullanılarak dünya genelinde metro ve tramvay sistemleri enerji tüketimlerini azaltmak [17, 18] ve sürdürülebilir kaynaklardan karşılamak için çalışmalarda bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve rejeneratif frenleme sistemlerinin kullanımı, şehir içi ulaşım sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen çözümler arasında yer almaktadır.

Bu çalışma, Türkiye'nin üç büyük şehrinin kent içi raylı ulaşım sistemlerine yenilenebilir enerji entegrasyonunun çevresel ve ekonomik etkilerini incelemektedir.

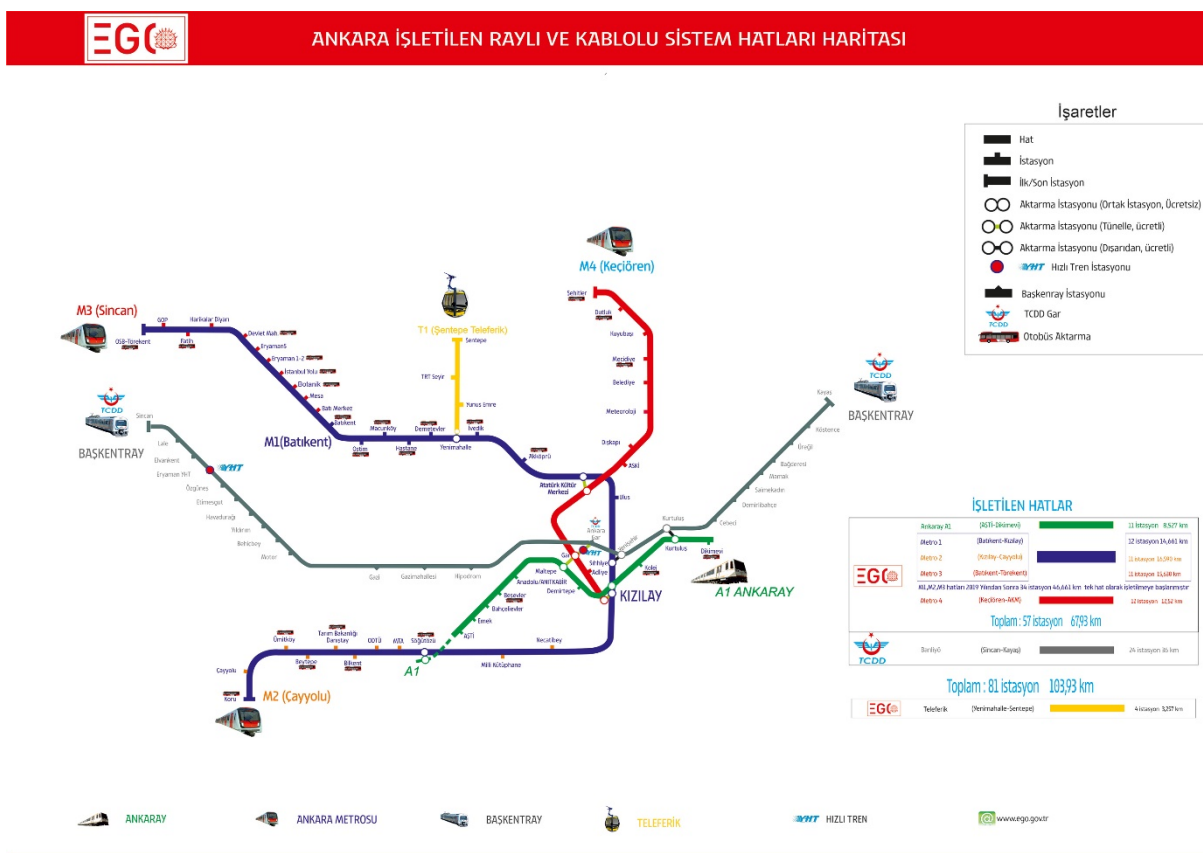
II. TEORİK METOD

Bu çalışmada, Ankara, İstanbul ve İzmir'in raylı sistem enerji tüketim ve yenilenebilir enerji potansiyellerine ilişkin veriler incelenmiştir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) 2024 raporları, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) 2023 raporları, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) 2024 raporları ve şehirlerin mevcut enerji altyapıları temel alınmıştır. Yenilenebilir enerji kullanımı ve rejeneratif frenleme yöntemlerinin enerji maliyetleri ve karbon emisyonları üzerindeki etkileri, hesaplama modelleri ve uluslararası literatürdeki benzer

projelerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Şehirlerin her birine özgü enerji ihtiyaçlarını karşılamak için farklı teknolojik çözümler önerilmiş, enerji tasarrufu ve karbon azaltımı senaryoları detaylandırılmıştır.

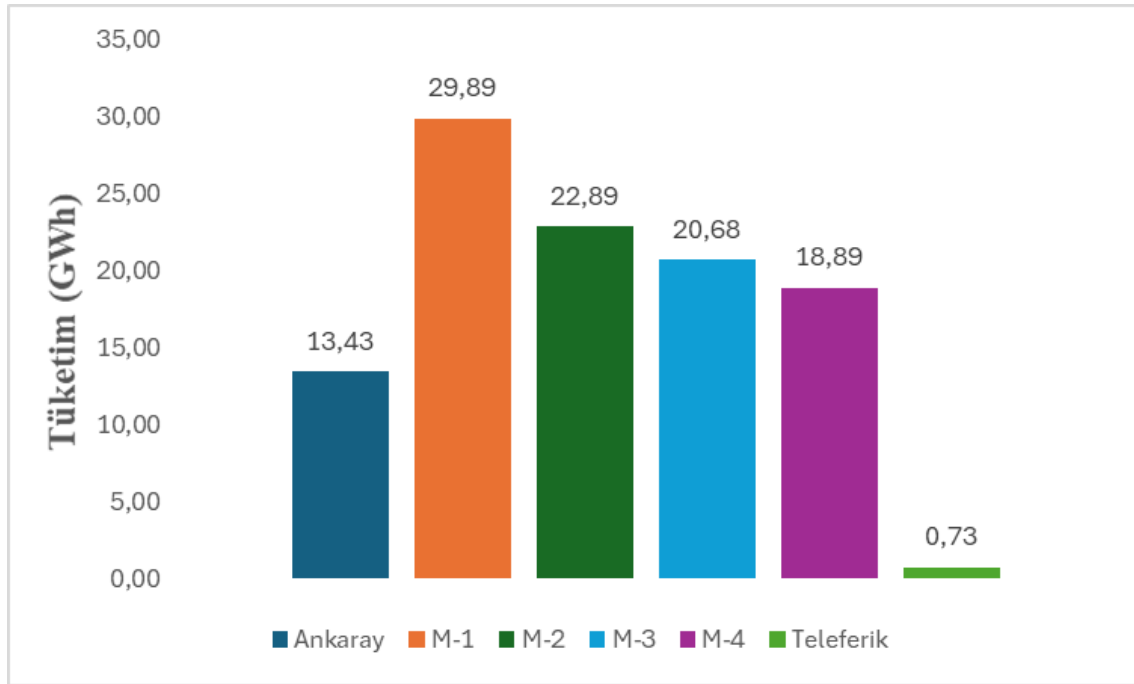
EPDK 2024 elektrik piyasası ağustos ayı sektör raporuna göre Ankara’da 2,42 GW, İstanbul’da 3,54 GW, İzmir’de 5,24 GW kurulu elektrik gücü bulunmaktadır. Bu sektör raporuna göre üretilen lisanslı elektrik gücü Ankara’da 919,84 GWh, İstanbul’da 843,75 GWh, İzmir’de 1628,06 GWh’tir. İhtiyaç fazlası satın alınan enerji miktarı ise Ankara’da 93,79 GWh, İstanbul’da 4,38 GWh, İzmir’de 70,91 GWh’tir [19].

Şekil 1’de Ankara raylı sistemler ağı haritası gösterilmiştir [20]. Veriler EGO 2024 istatistiklerine dayanmaktadır. 2024 itibarıyla Ankara Metrosu 67,4 km, 57 istasyon ile Başkentray banliyö hattı ise 37,4 km, 24 istasyon ile hizmet vermektedir [21]. Ankara metrosunda toplam tren sayısı ise 357 adettir [21].

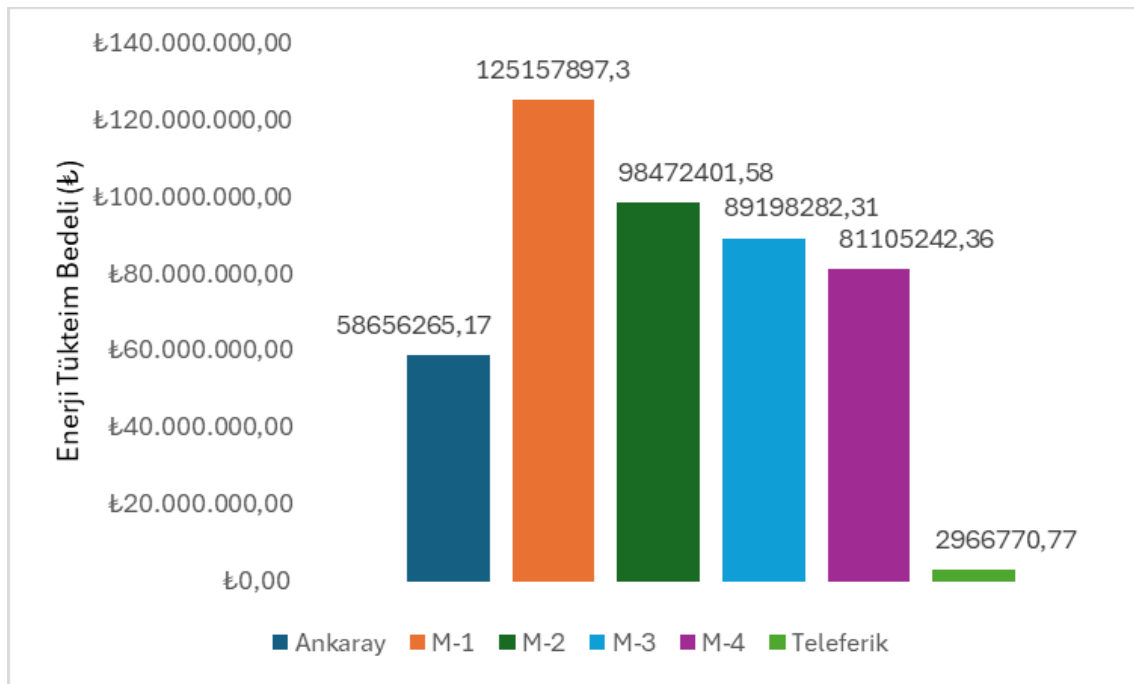


Şekil 1. Ankara raylı sistemler ağı haritası

Şekil 2’de Ankara’nın 2024 Eylül ayı enerji tüketimini GWh cinsinden Şekil 3’te ise enerji tüketim bedelleri gösterilmiştir. Veriler, EPDK’nın ve TEİAŞ’ın [22] aylık enerji raporları ve metro işletme verileri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3’teki maliyetler, birim enerji fiyatı (₺/kWh) ile çarpılarak elde edilmiştir ve fosil yakıt bağımlılığının maliyet yükünü ortaya koymaktadır. Hesaplamalarda, metro hatlarının ortalama günlük çalışma süresi (18 saat) ve araç başına enerji tüketimi (2.5 kWh/km) dikkate alınmıştır. Ankara raylı sistemler 2024 Eylül itibarıyla enerji tüketimi toplam 106,52 GWh, enerji tüketim bedeli ise yaklaşık 456 milyon ₺’dir [21].

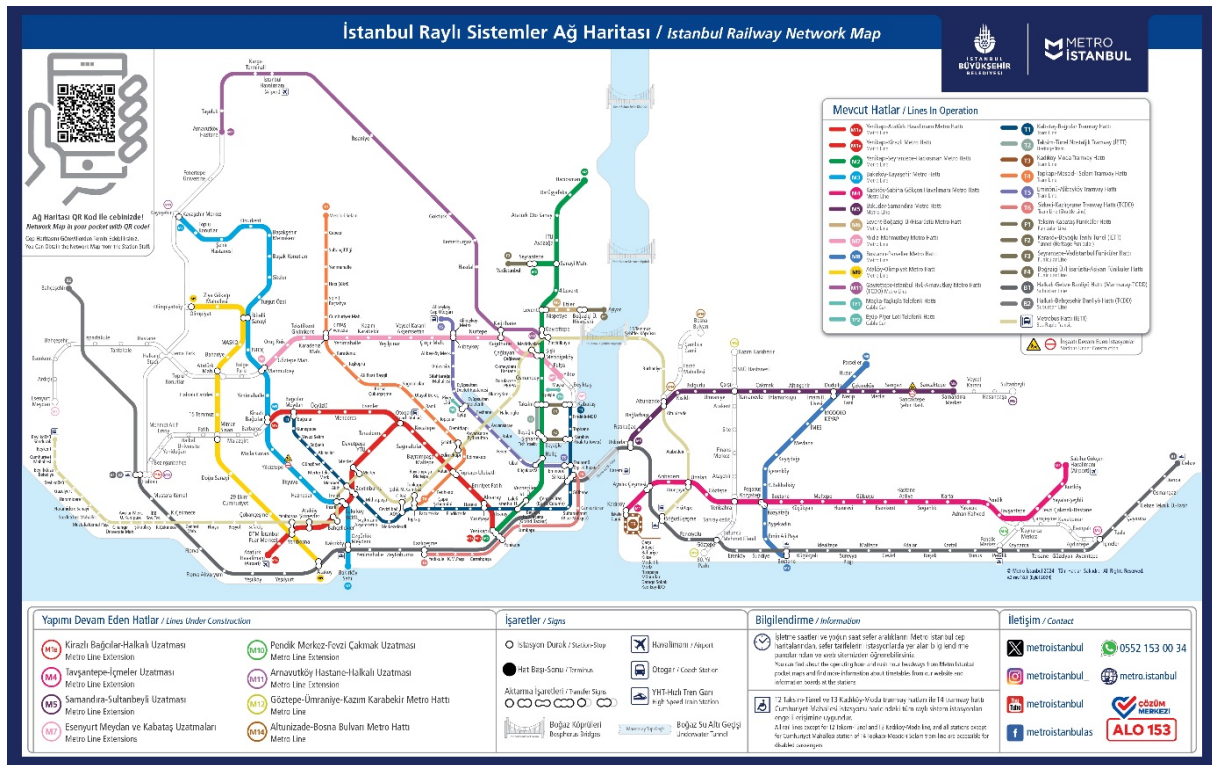


Şekil 2. Ankara raylı sistemler 2024 Eylül itibariyle enerji tüketimi (GWh)



Şekil 3. Ankara raylı sistemler 2024 Eylül itibariyle enerji tüketim bedeli (₺)

Şekil 4'te İstanbul raylı sistemler ağı haritası verilmiştir [23]. 243,3 km metro hattında 159 istasyon 886 araç, 44,7 km tramvay hattında 67 istasyon 192 araç, 75,771 km Marmaray (banliyö) hattında 43 istasyon 440 araç, 13,5 km Halkalı – Bahçelievler banliyö hattında 2 istasyon 10 araç, 8,394 km Sirkeci – Kazlıçeşme banliyö hattında 2 istasyon 10 araç ve 2,763 km föniküler hattında 8 istasyon 8 araç bulunmaktadır [23].



Şekil 4. İstanbul raylı sistemler ağ haritası

İstanbul metrosunda 2023 yılı itibariyle 436,58 GWh elektrik tüketimi gerçekleşmiştir. 1 yolcunun 1 km taşınması için yapılan CO₂ salınımı ise 34,79 g/km olarak hesaplanmıştır [24].

Şekil 5'te İzmir raylı sistemler ağı haritası gösterilmiştir [25]. 27 km metro hattında 24 istasyon 182 araç, 33,6 km tramvay hattında 47 istasyon 38 araç ve 136 km İZBAN/Egeray banliyö hattında 41 istasyon 73 araç ile hizmet vermektedir [25]. İzmir metrosunda 2020 yılı itibariyle araç başına enerji tüketimi 2,14 kWh/araç-km olarak gerçekleşmiştir. İlkbahar-Sonbahar sezonunda en fazla 2,75 kWh/araç-km iken bu değer Yaz-Kış sezonunda 3 kWh/araç-km'dir [26].

Şehir içi raylı sistemlerin enerji tüketimlerinin kendi kendine karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji ve rejeneratif frenleme yöntemlerinin katkılarını hesaplamak için Eşitlik 1-3 kullanılabilir [6, 7, 11].

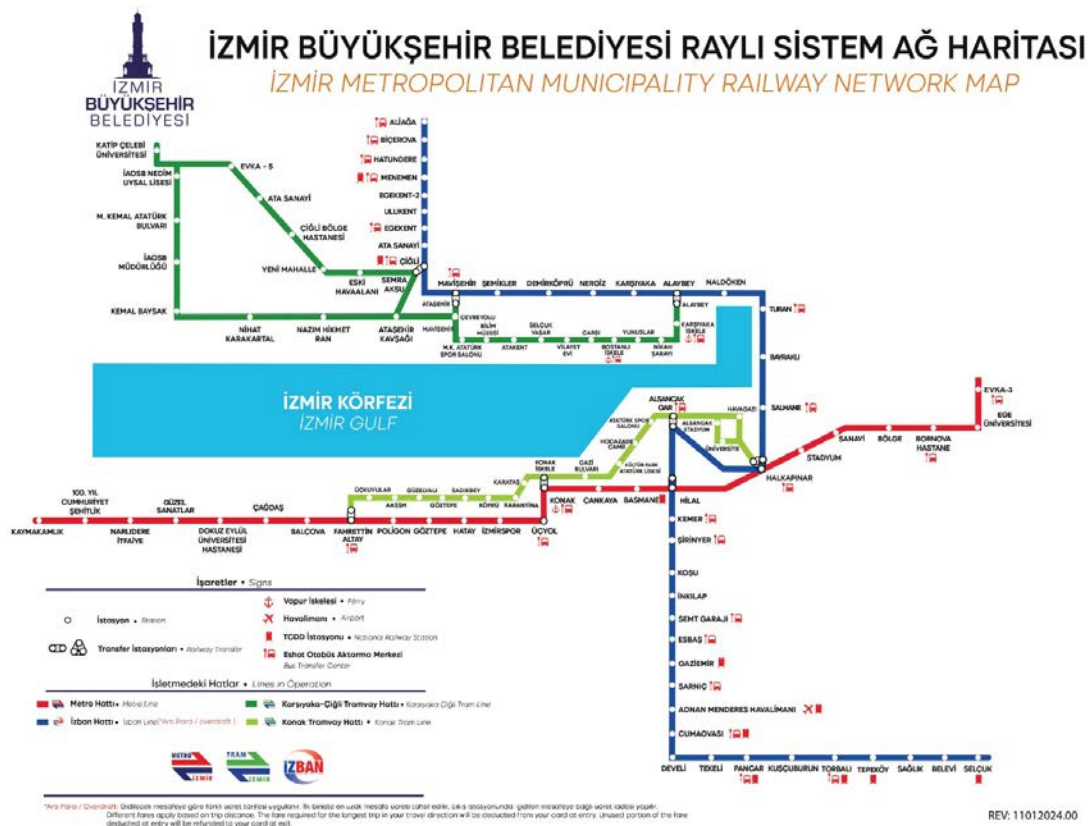
$$E_{rejeneratif} = E_{yillik\ tuketim} \times \eta_{rejeneratif} \quad (1)$$

$$E_{karsilanan} = E_{rejeneratif} + E_{yenilenebilir\ enerji} \quad (2)$$

$$Karşılama oranı (\%) = \frac{E_{karşılana}}{E_{yillik tüketim}} \times 100 \quad (3)$$

Hesaplamalarda rejeneratif fren verimliliği ($\eta_{\text{rejeneratif}}$), trenlerin frenleme sırasında kinetik enerjinin %85'ini elektriğe dönüştürebildiği varsayımıyla 0,85 olarak alınmıştır. Bu değer, literatürdeki deneysel çalışmalarla uyumludur [6, 7, 11].

Şehirlerin yenilenebilir enerji potansiyelleri için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [27], Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası [28], TÜREB [29], Ankara Kalkınma Ajansı [30], İstanbul Kalkınma Ajansı [31] ve İzmir Kalkınma Ajansı [32] verilerinden yararlanılmıştır. Bu veriler kullanılarak mevsimsel enerji farklılıkları için; güneş enerjisi Ankara ve İstanbul için yaz aylarında üretim faktörü 1,3, kış aylarında 0,7, İzmir'de 1,5 ve 0,8 iken rüzgar enerjisi içinse bu değerler Ankara'da 0,35 ve 0,45, İstanbul'da 0,55 ve 0,75, İzmir'de (kıyı etkisi) 0,9 ve 1,1'dir değerleri alınmıştır. Ankara'da güneş enerjisi üretiminin yazın 1,3, kışın 0,7 faktörüyle değişmesi, enerji depolama sistemlerinin kapasite planlamasını zorunlu kılmaktadır. Kış aylarında rüzgar enerjisinin (0,45 faktör) devreye alınması, güneş enerjisi açığını kapatabileceği düşünülmektedir. Ayrıca İzmir'in kıyı etkisiyle rüzgar faktörünün 1,1 olması, kurulabilecek açık deniz rüzgar çiftlikleri için uygun bir altyapıyı gerektirmektedir.



Şekil 5. İzmir raylı sistemler ağı haritası

Çalışmanın ekonomik analizi kısmında ise yenilenebilir enerji maliyetleri için IRENA [33], doğal gaz maliyetleri için de EIA [34] ve IEA [35] tarafından sağlanan veriler kullanılmıştır. IRENA verilerince 2024 yılı güneş enerjisi maliyeti 0,03–0,07 \$/kWh, rüzgar 0,04–0,08 \$/kWh'tir [33]. Doğal gaz santrallerinin yakıt ve işletme maliyetleri ise ABD'de 0,05–0,10 \$/kWh [34] iken Avrupa'da Rusya-Ukrayna savaşı sonrasında 0,15–0,25 \$/kWh'tir [35].

Düzleştirilmiş enerji maliyeti (LCOE), bir enerji üretim teknolojisinin ömrü boyunca ürettiği elektriğin ortalama birim maliyetini hesaplamak için kullanılan, yatırım maliyeti, işletme maliyeti, yakıt maliyeti, finansman ve santral ömrü gibi faktörleri içeren bir ölçüdür [36]. Çalışmada geri ödeme süresi Eşitlik 4 ile yatırım getirisi (ROI) de Eşitlik 5 ile hesaplanmıştır [37, 38].

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım}}{\text{Yıllık Tasarruf}} \quad (4)$$

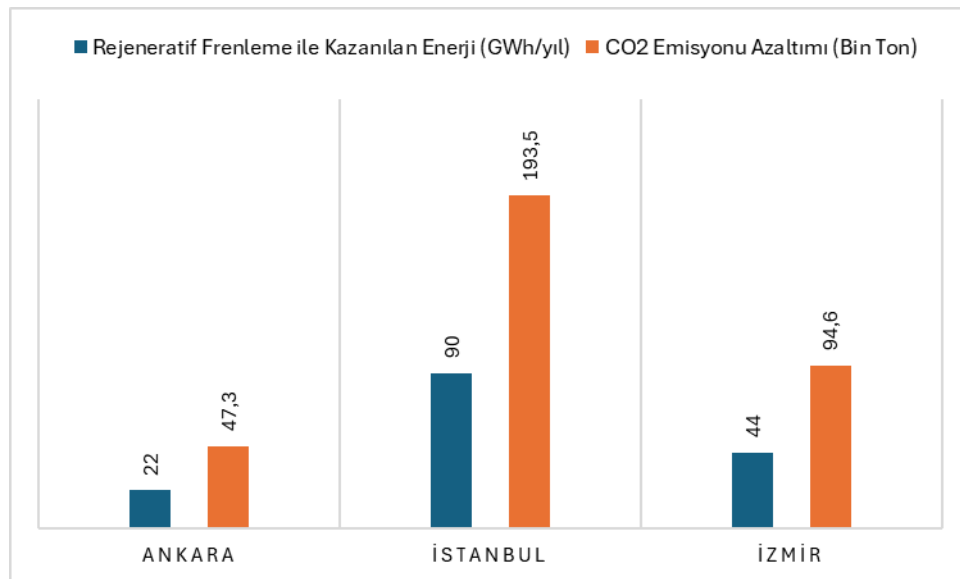
$$\text{Yatırım Getirisi (ROI)} = \frac{\text{Net Kar}}{\text{Yatırım}} \quad (5)$$

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kent içi raylı ulaşımın sürdürülebilir dönüşüm, çevresel etkilerin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından ve rejeneratif frenleme yöntemlerinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir.

Çalışmada kullanılan veriler Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (REPA, GEPA), EPDK, TEİAŞ, TÜREB, kalkınma ajansları, mevcut belediye kaynakları ve literatür örneklerinden yararlanılmış, hesaplamalar ise IRENA, EIA ve IEA gibi uluslararası raporlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Mevsimsel varyasyonlar, EPDK'nın aylık raporlarına göre düzeltme faktörleriyle entegre edilmiştir. Makalenin temel hesaplamalarında kullanılan enerji tüketimi, rejeneratif frenleme verimliliği, yenilenebilir enerji üretim kapasitesi ve karbon emisyon azaltım hesaplamaları, literatürde sıklıkla başvuru yapılan modellerden uyarlanmıştır. Araç başına enerji tüketimi (kWh/km) ve hat uzunluğu çarpılarak yıllık tüketim hesaplanmıştır.

Ankara'da 104,8 km uzunluğundaki raylı sistemler hattı, yılda yaklaşık 110 GWh enerji tüketmektedir. Karbon emisyonları ise yaklaşık 47,3 bin ton CO₂'dir. Mevcut yenilenebilir enerji üretiminden miktarı karşılayabilmektedir [27, 28, 30, 39]. Ayrıca %20 rejeneratif frenleme [12] ile birlikte toplam enerji ihtiyacından yıllık 22 GWh tasarruf sağlayabilmektedir. 54,7 milyon \$ sermaye harcamasının yaklaşık 5,8 yıl civarında geri ödeme süresi ve %17,2 yatırım getirisi sağlaması hesaplanmıştır. İstanbul'da ise 388,13 km uzunluğundaki raylı sistemler hattının enerji tüketiminin yenilenebilir enerji ile karşılanmasından 193,5 bin ton CO₂ emisyonu, rejeneratif frenleme ile de yıllık 90 GWh enerji tasarrufu sağlanabilecektir. 161 milyon \$ yatırım, 4,2 yıl geri ödeme süresi ve %23,7 ROI öngörülmektedir. İzmir'de 196,6 km uzunluğundaki raylı sistemler hattına 68,8 milyon \$ yatırım ile 94,6 bin ton CO₂ emisyonu, 44 GWh/yıl enerji tasarrufu sağlanabilecektir. Bu sistemin geri ödeme süresi 3,7 yıl ve yatırım getirisi %27,4'tür.



Şekil 6. Bulguların karşılaştırılması

Bulgular, kent içi raylı sistemlerde yeşil dönüşümün, çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabileceğini göstermektedir (Şekil 6). Üç şehir arasında İzmir'in en kısa geri ödeme süresi (3,7 yıl) ve yatırım getirisi (%27,4 ROI) potansiyeli dikkat çekicidir. İstanbul'un yüksek karbon azaltım kapasitesi (193,5 bin ton CO₂), nüfus ve hat uzunluğu ile ilişkilidir. Grafik, altyapı yatırımlarının ekonomik ve çevresel faydalarını net bir şekilde özetlemektedir. Ancak bu dönüşümün başarısı, altyapı yatırımları, yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliği ve politik destekle ilişkilidir.

Amsterdam'ın %100 rüzgar entegrasyonunda devlet teşviklerinin (%40) payı yüksektir [12]. Türkiye'de ise teşviklerin %10'u aşamaması benzer bir modeli zorlaştırmaktadır. Londra Metrosu'nun %20 enerji tasarrufu hedefi [14], İstanbul'un %53 yenilenebilir enerji entegrasyonu ile karşılaştırıldığında, altyapı modernizasyonunun önemi açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, Yeni Delhi Metrosu'nun karbon kredisi mekanizması [15], Türkiye'de benzer bir sistemin uygulanabilirliği için önemli bir referans oluşturmaktadır. Yeni Delhi Metrosu'nun istasyon çatılarına güneş paneli entegrasyonu, İstanbul ve İzmir'deki depolar için uygulanabilir. Ancak, Türkiye'deki yapı ruhsatı düzenlemeleri, bu tür projelerde izin süreçlerini uzatmaktadır.

EPDK'nın 2024 yönetmelikleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu için yetersiz kalmaktadır. AB Yeşil Mutabakatı ile uyumlu yeni düzenlemeler (örneğin, karbon vergisi muafiyetleri), sürdürülebilir dönüşümü hızlandırabilir. Yeşil tahvil piyasasının Türkiye'de gelişmemiş olması, uluslararası fonlara bağımlılık yaratmaktadır. %30'a varan vergi indirimleri (Hindistan modeli), özel sektör katılımını artırabilir [15].

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'deki şehir içi raylı sistemlerin yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji ihtiyaçlarını karşılayabilme potansiyelleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, Türkiye'nin üç büyük kentindeki raylı sistemlerde yenilenebilir enerji kullanımı ve rejeneratif frenleme uygulamaları ile enerji verimliliğinin artırılabilirliğini göstermiştir. Ankara, İstanbul ve İzmir'de yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de uzun vadeli enerji maliyetlerinin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

Raylı sistemlerin sürdürülebilirliği, yalnızca enerji verimliliği sağlama ve karbon emisyonlarını azaltma hedefleriyle sınırlı değildir. Aynı zamanda toplumsal fayda, maliyet etkinliği ve teknolojik inovasyonları da içeren bütünsel bir yaklaşımı gerektirir. Dünya genelinde kent içi ulaşımın sürdürülebilir hale getirilmesi için çevre dostu enerji stratejileri, ulaşım altyapısının modernizasyonu, enerji geri kazanımı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile desteklenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için öncelikle yerel yönetimler ve özel sektörün iş birliği yapması gereklidir. Enerji depolama sistemleri ve rejeneratif frenleme altyapısının yaygınlaştırılması için teşvik mekanizmaları oluşturulmalıdır. Ayrıca, güneş enerjisi panelleri ve rüzgar türbinlerinin raylı sistemlere entegrasyonu için uygun alan planlaması yapılmalıdır. Bu yatırımların finansmanı için uluslararası fonlar ve yeşil enerji teşvikleri değerlendirilebilir.

Yenilenebilir enerji projelerinde Hindistan modelinde olduğu gibi KDV muafiyeti ve kurumlar vergisinde %30'a varan indirimler yapılmalı, yerel yönetimlerin yeşil tahvil çıkarması için Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB) tarafından düşük faizli kredi garantileri sağlanmalıdır. Ayrıca belediyeler AB Horizon Europe fonlarına

projelerle başvuru yapılarak hibe destekleri alabilir. Yine Yeni Delhi metrosu örneğinden hareketle, Türkiye’deki sistemlerin karbon kredisi sertifikası alması için teknik destek programları oluşturulması gerekmektedir.

Türkiye’de kent içi raylı sistemlerde sürdürülebilirlik için uygulanabilir stratejiler yedi başlık altında özetlenebilir:

1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı: Güneş ve rüzgar enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarının raylı sistemlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için entegre edilmesi önceliklidir. Tünel havalandırma sistemlerinin yenilenebilir enerji entegrasyonu ile birlikte optimize edilmesi, enerji verimliliğini artıracak ve operasyonel maliyetleri düşürecek kritik bir adımdır. Özellikle güneş enerjisi ile beslenen havalandırma sistemleri, tünel içi enerji tüketimini dengeleyerek sürdürülebilir bir altyapı sağlayabilir.
2. Rejeneratif frenleme sistemlerinin yaygınlaştırılması: Raylı sistemlerde kullanılan frenleme sistemlerinin kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren rejeneratif frenleme teknolojisiyle yenilenmesi, enerji tasarrufunu artırabilir. Bu sistemlerle elde edilen enerji, şebekeye geri beslenerek veya depolama sistemleriyle saklanarak tekrar kullanılabilir.
3. Enerji depolama çözümleri: Hibrit enerji depolama sistemleri (süper kapasitörler, bataryalar) ve yerel enerji depolama altyapılarının raylı sistemlere entegrasyonu, enerji kullanımındaki dalgalanmaları dengeleyebilir ve sistemin kesintisiz çalışmasını sağlayabilir.
4. Altyapı modernizasyonu: Mevcut raylı sistemlerin enerji verimliliğini artırmak amacıyla hatların modernizasyonu, elektrikli çekiş sistemlerinin geliştirilmesi ve enerji kayıplarını azaltacak önlemlerin alınması gereklidir. Bu, aynı zamanda işletim maliyetlerini düşürerek uzun vadeli sürdürülebilirlik sağlar.
5. Kamu-özel sektör işbirlikleri ve finansman modelleri: Yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini artırmak için kamu-özel sektör işbirlikleri teşvik edilmelidir. Ayrıca, ulusal ve uluslararası finansman kaynaklarının (örneğin yeşil enerji fonları) kullanımı, bu projelerin hayata geçirilmesini hızlandırabilir.
6. Karbon emisyonu azaltımı için hedefler: Raylı sistemler için karbon emisyonu azaltım hedefleri belirlenmeli ve bu hedeflere ulaşmak için teşvik mekanizmaları oluşturulmalıdır. Örneğin, düşük karbonlu enerji kaynakları kullanan sistemler için vergi teşvikleri veya enerji tüketimi düşük işletmelere mali destek sağlanabilir.
7. Toplumsal farkındalık ve eğitim programları: Raylı sistemlerin sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik farkındalık artırıcı kampanyalar ve eğitim programları düzenlenmelidir. Bu, toplumsal desteğin kazanılmasına ve enerji tasarrufu konusunda bireysel çabaların artmasına katkı sağlar.

Bu stratejiler, kent içi raylı sistemlerde çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabilir ve Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecine önemli katkılar sunabilir. Çalışma, Türkiye'nin sürdürülebilir ulaşım hedeflerine katkıda bulunarak karbon emisyonlarının azaltılmasını teşvik etmektedir. Türkiye'nin AB Yeşil Mutabakatı ve Paris Anlaşması kapsamındaki taahhütleri, bu çalışmanın önerdiği stratejilerle uyumludur. Dünya genelinde çeşitli şehirlerde uygulanmakta olan bu yöntemler, Türkiye için de örnek teşkil edebilir.

KAYNAKLAR

1. IEA (2024) CO2 emission in 2022. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>. Erişim 16 Kasım 2024

2. Zhang H (2022) Analysis of the low-carbon, environmental-friendly, energy-saving, and emission-reduction evaluation model of urban rail transit based on the spatiotemporal distribution of passenger flow. *Sci Program* 8995448. <https://doi.org/10.1155/2022/8995448>
3. Guo H, Zha L, Zang S, Wei Y (2024) Calculation of greenhouse gas emissions of urban rail transit systems in China. *Proc Inst Civ Eng Eng Sustain* 177(4):209-216. <https://doi.org/10.1680/jensu.23.00001>
4. Ghaviha N, Campillo J, Bohlin M, Dahlquist E (2017) Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia* 105:4561-4568. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
5. Zhao Y, Zhong Z, Lin F, Yang Z (2024) Multi time scale management and coordination strategy for stationary super capacitor energy storage in urban rail transit power supply system. *Electr Power Syst Res* 228:110046. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.110046>
6. Tian L, Huamg Y, Liu S, Sun S, Deng J, Zhao H (2021) Application of photovoltaic power generation in rail transit power supply system under the background of energy low carbon transformation. *Alexandria Eng J* 60:5167–5174. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.008>
7. Binduhewa PJ (2021) Sizing algorithm for a photovoltaic system along an urban railway network towards net zero emission. *Int J Photoenergy* 5523448. <https://doi.org/10.1155/2021/5523448>
8. Aguado JA (2018) Optimal operation of electric railways with renewable energy and electric storage systems. *IEEE Trans Smart Grid* 9(2):993-1001.
9. Wang X, Zhang X, Qin B, Guo L (2023) Improved multi-objective grasshopper optimization algorithm and application in capacity configuration of urban rail hybrid energy storage systems. *J Energy Storage* 72:108363. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108363>
10. Wang X, Zhang X, Qin B (2024) Improved multi-objective differential evolution algorithm and its application in the capacity configuration of urban rail photovoltaic hybrid energy storage systems. *J Energy Storage* 98:113155. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113155>
11. Li G, Or SW (2024) Multi-agent deep reinforcement learning-based multi-time scale energy management of urban rail traction networks with distributed photovoltaic-regenerative braking hybrid energy storage systems. *J Cleaner Prod* 466:142842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142842>
12. Ukpahan I (2024) Top Countries leading green public transport revolution: Innovations and global impact. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/green-public-transport>. Erişim 16 Kasım 2024
13. Ou Y, Zheng J, Liang Y, Bao Z (2024) When green transportation backfires: High-speed rail's impact on transport-sector carbon emissions from 315 Chinese cities. *Sustaina Cities Society* 114:105770. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105770>
14. Anderson K (2024) How does the London Underground contribute to pollution? <https://greenly.earth/en-gb/blog/ecology-news/how-does-the-london-underground-contribute-to-pollution>. Erişim 16 Kasım 2024
15. Mavi Karbon Teknolojisi AŞ (2024) Yeni Delhi dünyanın ilk tam güneş enerjili metrosu olma yolunda mı? <https://tr.bct-vnenergy.com/news/the-first-fully-solar-powered-metro-53932642.html>. Erişim 16 Kasım 2024
16. Önder HG, Akdemir F (2024) Kent içi raylı toplu taşıma sistemi performansının farklı çok ölçütlü karar verme teknikleri ile karşılaştırmalı değerlendirilmesi. *Demir Müh* 19:184-196. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1395294>
17. Avcı Karataş Ç (2023) Gaziantep banliyö projesi (Gaziray) raylı sistem hattı tünellerinde olası tren yangını durumunda tünel acil durum havalandırma sisteminin simülasyonu. *J Innovative Eng Nat Sci* 3(2):167-190. <http://doi.org/10.29228/JIENS.70514>
18. Avcı Karatas C (2025). Optimizing fire safety and ventilation strategies for structural integrity in rail tunnels. *Civil Eng J* 11(2):14. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-02-014>
19. EPDK (2024) Enerji piyasası düzenleme kurumu 2024 elektrik piyasası ağustos sektör raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=81YDfiCQjC4=>. Erişim 16 Kasım 2024
20. EGO (2024) Ankara raylı sistemler ağ haritası. <https://www.ego.gov.tr/resim/normal/31459.jpg>. Erişim 16 Kasım 2024
21. EGO (2024) İstatistik. <https://www.ego.gov.tr/tr/sayfa/61/istatistikler>. Erişim 16 Kasım 2024
22. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) (2025) Türkiye elektrik üretim-iletim 2023 yılı istatistikleri. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>. Erişim 29 Mart 2025
23. Metro İstanbul (2024) İstanbul raylı sistemler ağ haritası. <https://www.metro.istanbul/yolcu hizmetleri/agharitalari>. Erişim 16 Kasım 2024
24. Metro İstanbul (2024) Sürdürülebilirlik raporu. https://www.metro.istanbul/Dosyalar/efqm/surdurebilirlik_raporu2023.pdf. Erişim 16 Kasım 2024
25. İzmir Metro (2024) İzmir raylı sistemler ağ haritası. <https://www.izmirmetro.com.tr/upload/guncel%20rayli%20sistem%20ag%20haritasi.jpg>. Erişim 16 Kasım 2024

26. İzmir Metro (2024) Faaliyet raporu 2020. <https://www.izmirmetro.com.tr/Sayfa/43/26/2015-faaliyet-raporu-ozet>. Erişim 16 Kasım 2024
27. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2024) Güneş enerjisi potansiyeli atlası. <https://gepa.enerji.gov.tr/>. Erişim 16 Kasım 2024
28. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2024) Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası. <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>. Erişim 16 Kasım 2024
29. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) (2025) Türkiye rüzgar enerjisi istatistik Temmuz 2024 raporu. <https://www.tureb.com.tr/yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporlari/5>. Erişim 30 Mart 2025
30. Ankara Kalkınma Ajansı (2025) Ankara'da yenilenebilir enerji konusunda kümelenme analizi. <https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/34.pdf>. Erişim 30 Mart 2025
31. İstanbul Kalkınma Ajansı (2025) İstanbul'da yenilenebilir enerji teknolojileri ekosistemi. <https://istka.org.tr/Archive/Content/94a3eabccc7accdece2e86d84fe6259283531fdc.pdf>. Erişim 30 Mart 2025
32. İzmir Kalkınma Ajansı (2025) İzmir ili yenilenebilir enerji sektör analizi. https://izka.org.tr/wp-content/uploads/pdf/12_Yenilenebilir_Enerji_Sektör_Analizi.pdf. Erişim 30 Mart 2025
33. IRENA (2024) Renewable power generation costs in 2022. <https://www.irena.org/renewable-power-generation-costs-in-2022/>. Erişim 16 Kasım 2024
34. EIA (2024) Electric power monthly. <https://www.eia.gov/electricity/monthly/>. Erişim 16 Kasım 2024
35. IEA (2024) Gas market report 2023. <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-2023>. Erişim 16 Kasım 2024
36. Lazard.com (2024) Levelized Cost of Energy Plus. <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energy-plus/>. Erişim 16 Kasım 2024
37. Ökten M.(2023) Isı ve elektrik enerjisi üretimi için doğal gazı yeşil bir çözüm: Güneş enerjisi uygulamalarıyla bir örnek olay incelemesi. Gümüşhane J Sci (GUJS) 13(3):702-717. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.123214>
38. Bulut A, Özkardeş S (2025) Thies HH, Zdrallek M, Schwan M. Belli bir kalite düzeyi için sermaye harcamaları (CAPEX) ile işletme harcamalarını (OPEX) optimize edecek bir model. https://www.emo.org.tr/ekler/6c1810def62ed40_ek.pdf. Erişim 30 Mart 2025
39. Ökten M (2021) An investigation on provincial production & consumption of electric energy: A case analysis for Ankara. Kocaeli J Sci Eng (KOJoSE) 4(1):59-68. <https://doi.org/10.34088/kojose.800608>