

ENERGY EFFICIENCY IN RAILWAY TRANSPORT: PRACTICAL DRIVING OPTIMISATION IN REGIONAL TRAINS OF IZMIR REGION

MERVE TEKİN, MUSTAFA YILMAZ

ABSTRACT

This study aims to provide a comparative analysis of the energy consumption data of Diesel Multiple Unit (DMU) train sets operated in Izmir Region, consisting of four wagons, controlled from both sides, with a passenger capacity of 260 people, for the years 2023 and 2024, and to reveal the effects of energy efficiency strategies on field applications and simulation-supported driving optimizations. Within the scope of the study, the energy performance of the trains was evaluated by calculations based on fuel consumption values, distances traveled and liters/kilometer (l/km). In 2023, a total of 122,119,000 liters of diesel fuel and 523,347,000 kWh of electricity consumption was recorded for all trains operated by TCDD Taşımacılık A.Ş. In 2024, the data obtained as a result of the studies carried out in the Izmir Region showed that although the trains traveled longer distances in total, there were significant reductions in unit consumption values, demonstrating the success of the strategies based on idling, constant speed travel and driver training implemented in the field. In the field tests, energy savings ranging from 4% to 29.27% were achieved in four different trains, with a savings rate of 21.99%. Simulation studies conducted on 54 regional trains at Izmir Regional Directorate contributed to the development of strategies and their successful testing on long-distance lines departing from Basmane. In addition, trainings for engineers, establishment of technical monitoring teams and daily consumption monitoring supported the sustainability of energy efficiency targets. The results show that energy efficiency strategies not only reduce costs but also make a high contribution in terms of emission management. In this context, it is recommended that the strategies developed should be institutionalized and disseminated in all regions and integrated with automated driving support systems.

Keywords: Energy Efficiency, Rail Transport, Fuel Consumption, Simulation, DMU Sets, Sustainable Transport

Mühendis, TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü
Mail: tekmervali@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8617-7059>

Daire Başkanı, TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü
Mail: mustafayilmaz345@yahoo.com.tr

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5650-5583>

Makale Atf Bilgisi:	Tekin, M., Yılmaz, M. (2025). "Demiryolu Taşımacılığında Enerji Verimliliği: İzmir Bölgesi Bölgesel Trenlerinde Uygulamalı Sürüş Optimizasyonu". <i>Ulaştırma ve Altyapı</i> , Yıl: 2, Sayı: 2, s. (50-74)
Makale Türü:	Araştırma
Geliş Tarihi:	19.04.2025
Kabul Tarihi:	17.06.2025
Yayın Tarihi:	25.06.2025
Yayın Sezonu:	Ocak-Haziran 2025

DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ: İZMİR BÖLGESİ BÖLGESEL TRENLERİNDE UYGULAMALI SÜRÜŞ OPTİMİZASYONU

MERVE TEKİN, MUSTAFA YILMAZ

ÖZ

Bu araştırma İzmir Bölgesi'nde işletilen ve dört vagon dan oluşan, her iki taraftan kumanda edilebilen, 260 kişilik yolcu kapasitesi olan, Dizel Çoklu Birim (DMU) tren setlerine ait 2023 ve 2024 yılı enerji tüketim verilerinin karşılaştırmalı analizini, enerji verimliliği stratejilerinin saha uygulamaları ve simülasyon destekli sürüş optimizasyonları üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, trenlerin yakıt tüketim değerleri, kat edilen mesafeler ve litre/kilometre (l/km) bazında yapılan hesaplamalarla enerji performansları değerlendirilmiştir. TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından işletilen trenlerin tamamında 2023 yılında toplam 122.119.000 litre motorin ve 523.347.000 kWh elektrik tüketimi kaydedilmiştir. 2024 yılında İzmir Bölgesi'nde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, trenlerin toplamda daha uzun mesafe kat etmesine rağmen birim tüketim değerlerinde önemli ölçüde düşüşler yaşandığını ortaya koymuş; bu durum sahada uygulanan boşta gitme, sabit hızda seyir ve sürücü eğitimlerine dayalı stratejilerin başarısını göstermiştir. Gerçekleştirilen saha testlerinde, dört farklı trende %4 ila %29,27 arasında değişen oranlarda enerji tasarrufu sağlanmış, bu tasarruf oranı %21,99 olarak hesaplanmıştır. İzmir Bölge Müdürlüğündeki 54 adet bölgesel trende yürütülen simülasyon çalışmaları, stratejilerin geliştirilmesi ve Basmane çıkışlı uzun mesafeli hatlarda başarıyla test edilmesine katkı sunmuştur. Ayrıca makinistlere yönelik eğitimler, teknik izleme ekiplerinin kurulması ve günlük tüketim takibi gibi uygulamalar, enerji verimliliği hedeflerinin sürdürülebilirliğini desteklemiştir. Sonuçlar, enerji verimliliği stratejilerinin yalnızca maliyetleri azaltmakla kalmayıp emisyon yönetimi açısından da yüksek katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda geliştirilen stratejilerin kurumsallaştırılarak tüm bölgelerde yaygınlaştırılması ve otomatik sürüş destek sistemleriyle entegre edilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Verimliliği, Demiryolu Taşımacılığı, Yakıt Tüketimi, Simülasyon, DMU Setleri, Sürdürülebilir Ulaşım

1. Giriş

Enerji verimliliği günümüzde yalnızca bireysel tüketim alışkanlıklarıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda ulusal kalkınma hedeflerinin ve sürdürülebilirlik politikalarının temel yapı taşlarından biri hâline gelmiştir. Ev tipi beyaz eşyalar gibi bireysel tüketim ürünlerinde enerji sınıflandırmaları kullanıcı tercihlerini yönlendirirken; kamu hizmetleri, sanayi, ulaştırma ve altyapı sistemleri gibi geniş ölçekli alanlarda enerji verimliliği, ekonomik kalkınma ile çevresel sorumlulukların dengelenmesi açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir. A sınıfı bir buzdolabının, B sınıfına kıyasla yaklaşık %20 daha az enerji tüketmesi gibi örnekler, mikro düzeyde verimliliğin önemini vurgularken; makro ölçekte ise bina yalıtımları, termostatik sistemler, enerji kimlik belgeleri ve yenilenebilir kaynaklara yönelim gibi stratejiler ön plana çıkmaktadır (Aydın, 2016).

Bu çerçevede enerji verimliliği, yalnızca sabit sistemlerle sınırlı kalmayıp özellikle ulaştırma sektöründe de stratejik öneme sahiptir. Artan enerji maliyetleri, enerji kaynaklarının sınırlılığı ve iklim değişikliğinin çevresel etkileri, ulaşım sistemlerinin daha verimli çalışmasını zorunlu hâle getirmiştir. Otomotiv sektörü kadar demiryolu taşımacılığı da bu bağlamda enerji verimliliğini önceliklendirmekte; trenlerin sürüş modları, hat geometrisi ve işletme stratejileri üzerinden enerji tüketimi azaltılmaya çalışılmaktadır. Dünya genelinde demiryolu taşımacılığının liberalleşmesi ve özelleşmesiyle birlikte, sektörde rekabetin artması ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesi gerekliliği, enerji verimliliği uygulamalarını daha da ön plana çıkarmaktadır (Batır, 2019).

Demiryolu taşımacılığı diğer ulaşım türlerine göre daha düşük karbon salımı ve daha az enerji tüketimi ile çevreci bir profil çizmektedir. Ancak bu avantajı sürdürülebilirlik için sistem içi verimlilik iyileştirmeleri kaçınılmazdır. Özellikle dizel motorlu tren setlerinin yoğun kullanıldığı bölgesel hatlarda, motor gücü yönetimi, frenleme teknikleri ve güzergâh planlaması gibi parametreler enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sürdürülebilir bir ulaşım anlayışı çerçevesinde, enerji tasarrufu sağlayan tekniklerin sistematik olarak uygulanması, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik faydalar da doğurmaktadır.

Bu çalışma Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) Taşımacılık A.Ş. İzmir Bölge Müdürlüğü bünyesinde işletilen dizel motorlu (DMU) tren setlerinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla yürütülen "Enerji Verimli Sürüş" projesine odaklanmaktadır. Söz konusu proje; makinistlerin sürüş tekniklerinin optimize edilmesi, frenleme ve hızlanma stratejilerinin yeniden yapılandırılması ve simülasyon temelli öneri sistemlerinin geliştirilmesi yoluyla enerji tasarrufu sağlamayı, bakım maliyetlerini azaltmayı ve CO emisyonlarını düşürmeyi hedeflemektedir.

Araştırmanın temel amacı, İzmir Bölgesi'nde işletilen DMU setlerine ait 2023 ve 2024 yılı enerji tüketim verilerinin karşılaştırmalı analizini yapmak, sahada uygulanan enerji verimliliği stratejilerinin performansını değerlendirmek ve bu stratejilerin operasyonel süreçlerdeki etkilerini ölçmektir. Araştırmada boşa gitme (coasting), sabit hızda seyir, düşük ivmelenme, frenleme optimizasyonu ve sürücü eğitimleri gibi yöntemlerin etkisi; yakıt tüketimi, kat edilen mesafe ve litre/

km bazında birim tüketim değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Aynı zamanda simülasyon destekli sürüş optimizasyonlarının makinist eğitim programlarıyla nasıl bütünleştirildiği ve bu uygulamaların günlük operasyonlara entegrasyonu da ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Gerçekleştirilen saha testleri ve teorik simülasyon analizleri sonucunda elde edilen bulgular, yalnızca İzmir Bölgesi özelinde değil; ülke genelinde enerji verimliliği odaklı demiryolu işletmeciliği açısından da örnek teşkil edecek niteliktedir. Bu bağlamda, çalışmanın sonuçları yalnızca teknik bir iyileştirme değil; aynı zamanda sürdürülebilir ulaşım politikalarına stratejik bir katkı niteliği taşımaktadır.

2. Kavramsal Çerçeve

Araştırmanın bu bölümünde ilgili alanyazın taraması yapılarak enerji verimliliği, enerji verimliliğini etkileyen faktörler vb. konuların açıklaması yapılmıştır.

2.1. Enerji Verimliliği Kavramı

Enerji verimliliği üreticiler açısından aynı miktarda hizmet veya faydalı çıktı üretmek için daha az enerji kullanımı anlamına gelmektedir (Patterson, 1996). Tüketiciler açısından ise bu kavram, enerji yoksulluğunu azaltarak ekonomik kazanç sağlayan mali tasarruf biçiminde tanımlanmaktadır (Association, 2007). 1970'li yıllardan bu yana enerji verimliliği stratejik düzeyde önemli bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen araştırmalar, enerji politikaları ile ilgili çok sayıda çalışmayı kapsamaktadır. Enerji verimliliği; enerji tasarrufu, yeni teknolojilerin geliştirilmesi, emisyon düzeylerinin azaltılması ve maliyetlerin düşürülmesi gibi birçok unsur üzerinde etkili olmakta ve aynı zamanda bir ülkenin genel enerji tüketim kalıplarını da belirlemektedir (Taylor vd., 2010).

Enerji verimliliğini artırmak; maliyetleri ve çevresel kirlenmeyi azaltmak, enerji güvenliğini sağlamak, karbon ayak izini düşürmek ve iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek gibi çok sayıda avantaj sağlamaktadır. Buna ek olarak enerji verimliliğine yönelik yapılan yatırımlar, ekonomik büyümeyi teşvik eden ve yeni girişimlerin oluşumunu destekleyen dolaylı ve uzun vadeli sonuçlar üretmektedir (Tuominen vd., 2013). Yapılan araştırmalar enerji verimliliği politikalarının sürdürülebilir bir enerji sistemine geçiş sürecinde kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Ringel vd., 2016).

Ulusal ve bölgesel yönetimler, enerji verimliliğini teşvik ederek enerji tasarrufunu artırmayı ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmayı hedeflemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan verilere göre 2017 yılında dünya genelinde enerji verimliliğine yapılan yatırımlar %3 oranında artış göstererek 236 milyar Amerikan dolarına ulaşmıştır (IEA, 2015). Her ne kadar son kırk yıl içerisinde dünyanın en büyük ekonomilerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler alınmış olsa da 2017 yılı itibarıyla küresel karbondioksit salımı 32.5 gigatona ulaşarak tüm zamanların en yüksek seviyesine erişmiştir (IEA, 2018). Düşük enerji verimliliği nedeniyle oluşan çevre kirliliği hem ekonomik hem

de çevresel açıdan ciddi maliyetlere yol açmaktadır. Yapılan bir araştırmaya göre, hava kirliliği kaynaklı ekonomik kayıplar dünya genelinde %3 ila %7 arasında değişmektedir (Zheng vd., 2005).

Enerji verimliliği yalnızca konut, sanayi ve hizmet sektörlerinde değil ulaştırma sistemlerinde de stratejik önem taşımaktadır. Ulaştırma sektörü dünya genelinde nihai enerji tüketiminin yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır ve bu tüketimin önemli bir kısmı karayolu taşımacılığına aittir. Buna karşılık raylı sistemler; düşük sürtünme katsayısı, sabit güzergâh yapısı ve yüksek taşıma kapasitesi sayesinde, birim yolcu veya yük başına çok daha az enerji tüketmektedir. Özellikle dizel motorlu tren setlerinde gerçekleştirilen hız optimizasyonu, frenleme geri kazanımı (rejeneratif frenleme) ve boşta gitme gibi stratejiler, raylı sistemlerde enerji verimliliğini artıran temel uygulamalardır. Ayrıca elektrikli tren hatlarının yaygınlaştırılması ve otomatik kontrol sistemlerinin kullanımı ile enerji kayıplarının minimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu çerçevede raylı sistemler, sürdürülebilir ulaşım politikalarının merkezinde yer almakta hem enerji tüketimini azaltmakta hem de karbon emisyonlarını düşürerek çevresel etkileri sınırlamaktadır. Dolayısıyla enerji verimliliği politikalarının ulaştırma sektörüyle entegrasyonu hem ekonomik kalkınmayı hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir.

Bu bağlamda enerji verimliliğinin artırılması ve enerji kullanımının azaltılması, ekonomik büyümenin sağlanması ve çevrenin korunması açısından büyük önem arz etmektedir. Enerji verimliliğinin artırılması, enerji ve kaynakların korunmasına yönelik etkili bir çevre koruma stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Aynı zamanda bu durum ekonomik büyümeyi yönlendirmekte ve genel ekonomik verimliliği de artırmaktadır. Enerji verimliliği politikaları karbon salımını azaltarak sürdürülebilir kalkınma sürecine katkı sağlamaktadır.

Bu kapsamda enerji verimliliği konusu sosyal bilimcilerin de ilgisini çekmekte ve daha karmaşık sosyal bağlamlar ile insan davranışlarını inceleyen araştırmalara konu olmaktadır. Enerjinin daha etkili nasıl kullanılabileceğini anlamak adına yapılan çalışmalar; enerji verimliliğinin kuramsal temelleri, pratik uygulamaları, sosyolojik sonuçları ve toplumsal yansımaları hakkında kapsamlı araştırmalar yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda gelecekte enerji verimliliğini artırma, enerji politikalarını şekillendirme ve destekleme sürecinde arz ve talep odaklı enerji verimliliğini etkileyen faktörlerin analizi, önemli bilgiler sunmaktadır.

2.2. Raylı Sistem Araçlarında Enerji Verimliliğini Etkileyen Faktörler

2.2.1. Hat Geometrisi

Demiryolu hattının durumu, hattı oluşturan bileşenlerin fiziksel özellikleri ve bu bileşenlerin hattaki konumları tarafından belirlenmektedir. Hat bileşenlerinin durumu, hattın yenilenmesi ve bozulması gibi karmaşık süreçlerde birbirleriyle güçlü bir şekilde ilişki içerisinde bulunmaktadır. Bu bileşenlerden birinin bozul-

ması durumunda diğer bileşenlerin de olumsuz etkilenmesi kaçınılmaz olmaktadır. Hat üzerindeki bileşenlerin yapısal durumu zayıfsa hattın konumunu ideal seviyede tutmak mümkün olamamaktadır.

Demiryolu altyapısına yönelik planlamalar yapılırken hattın yaşı dikkate alınmaktadır. Bu doğrultuda demiryolu hatları; "genç", "orta" ve "yaşlı" olmak üzere üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Bu dönemlerin süresi ve özellikleri, hattın teknik ve fiziksel niteliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca bu yaş kategorileri, hattın bakım gereksinimlerini ve bakım faaliyetlerinin yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir.

Hat geometrisinin enerji verimliliği üzerindeki etkisi trenin hız profili, ivmelenme-duraklama noktaları ve boşta gitme bölgeleri ile doğrudan ilişkilidir. Hat üzerindeki eğim profili, viraj yarıçapları, düz hat uzunlukları ve altyapı kalitesi, sürüş dinamiklerini etkileyerek enerji tüketiminde önemli değişikliklere yol açmaktadır (Güler & Evren, 2011). Örneğin uzun ve yumuşak eğimli hat kesimleri, trenlerin boşta gitme (coasting) stratejilerini daha verimli biçimde uygulamasına olanak sağlamakta; bu durum doğrudan yakıt veya enerji tüketimini azaltmaktadır (Morea, 2021). Diğer yandan, bozuk hat geometrileri veya sık hız limiti değişimi gerektiren bölümler, sürekli hızlanma ve frenleme ihtiyacı doğurduğu için enerji tüketimini artırmakta; sistemin verimli çalışmasını engellemektedir (Boynukalın, Açıkbaş & Söylemez, 2021).

Bu bağlamda hat geometrisinin düzenli olarak analiz edilmesi ve modernleştirilmesi, enerji verimli sürüş stratejilerinin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Uygun hat yapısı, trenlerin sabit hızla seyredebilmesini, frenleme noktalarının daha verimli planlanmasını ve rejeneratif frenleme gibi enerji geri kazanım yöntemlerinin daha etkin kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla, hat geometrisinin optimize edilmesi hem taşıma güvenliğini artırmakta hem de demiryolu sistemlerinde enerji verimliliğine somut katkılar sunmaktadır.

2.2.2. Araç Özellikleri

Araç ağırlığı hem çekici hem de çekilen birimlerin toplam kütesini ifade etmekte olup, bu ağırlığın artması, ivmelenme sırasında daha yüksek düzeyde enerji gereksinimini beraberinde getirmektedir. Araç ağırlığındaki artış, motor üzerine binen yükü artırmakta ve bu durum doğrudan yakıt tüketiminin artmasına yol açmaktadır. Motor gücü ve tipi, enerji verimliliği açısından belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Motorun verimlilik seviyesi, güç dağılım karakteristikleri ve frenleme türü (elektriksel, dinamik veya konvansiyonel) enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Özellikle elektriksel frenleme sistemlerinde enerji geri kazanımı söz konusu olabilmekte, bu da tüketim değerlerini olumlu yönde etkilemektedir. Frenleme ve hızlanma diyagramları, trenlerin çalışma esnasında enerji tüketim profillerini belirlemekte önemli rol oynamaktadır. Rejeneratif frenleme sistemlerinin kullanılması, frenleme anında kinetik enerjinin geri kazanılmasını sağlamakta ve bu sayede toplam enerji tüketimini azaltmaktadır. Benzer şekilde hızlanma sırasındaki ivmelenme değerleri de enerji kullanım miktarını doğrudan etkilemektedir.

2.3. Ekonomik Sürüş Stratejileri

Bir trenin enerji tüketimi, sahip olduğu teknik donanım ve izlediği güzergâh ile doğrudan ilişkilidir. Trenin ihtiyaç duyduğu enerji miktarı, aracın alabileceği pozisyon sayısı ile hızlanma ve yavaşlama oranlarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Kuramsal olarak en enerji tasarruflu sürüş biçimi, düşük hızda ilerlemeyi sürdürmek ve ani yön değişikliklerinden kaçınmak şeklinde tanımlanmaktadır.

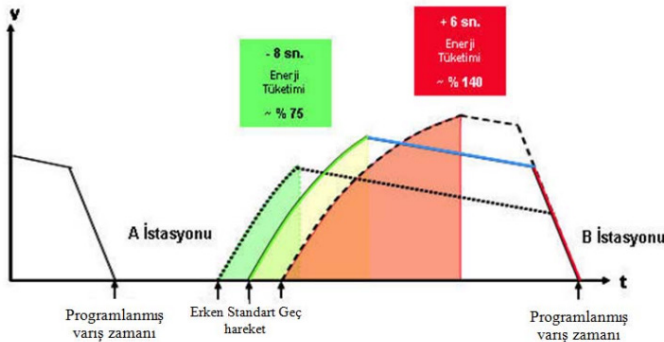
Tren seyir planları oluşturulurken, öngörülemeyen gecikmeleri telafi etmek amacıyla genellikle belirli bir "yedekleme süresi aralığı" planlamaya dâhil edilmektedir. Bu zaman aralıkları, olası gecikmelerin yönetilmesinde kritik bir rol oynamakta ve yapılan araştırmalar, seyahat süresinde gözle görülür bir azalma olmasına rağmen daha uzun ancak güvenli yolculuk sürelerinin tercih edilmekte olduğunu ortaya koymaktadır.

Günümüzde sürücülerin bireysel yeterliliklerinin ötesinde, en uygun sürüş stratejilerini analiz eden ve bu stratejileri sürekli olarak güncelleyen gelişmiş sürüş öneri sistemleri geliştirilmektedir. Mobil iletişim ağlarının, telematik çözümlerinin ve simülasyon yazılımlarının ilerlemesi, tren sistemlerinin ve kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır (Deutsche, 2003).

2.3.1. Optimum Enerji Tasarrufu

Optimum enerji tasarrufu, trenin "mümkün olan en kısa sürede gitmesi" değil, "makul sürede, en az enerjiyle gitmesi"dir. Bu strateji, %80'e varan enerji kazancı sağlayabilir (örnek: Şekil 5 – Menderes–Pancar hattı). Böylece hem işletme maliyetleri düşer hem de karbon salımı azaltılarak çevresel sürdürülebilirlik sağlanır.

Araçların demiryolu sisteminde nasıl sürüldüğü, tükettikleri enerji miktarını doğrudan etkilemektedir. Şekil 1, enerji tüketimini en aza indirmek amacıyla istasyonlardaki bekleme süresinin ve maksimum hızın azaltılmasının etkilerini ortaya koymaktadır.



Şekil 1: Erken veya Gecikmeli Kalkışların Enerji Tüketimine Etkisi
Kaynak: Albert vd., 1995

Hız profili, enerji tasarrufu açısından ideal bir yapıyı temsil etmektedir. Yüksek başlangıç ivmesi, optimum düzeyde düşük seyir hızı, istasyonların konumu, yolcu yoğunluğu, zaman çizelgesi ile hat geometrisi arasındaki mesafenin uyumu, uzun frenleme süresi, yüksek frenleme ivmesi ve kısa bekleme süresi gibi unsurlar, sürüş koşullarına bağlı olarak sürücülere ortalama %20 ila %30 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır (Albert vd., 1995).

2.3.2. Manuel Sürüş Prosedürleri

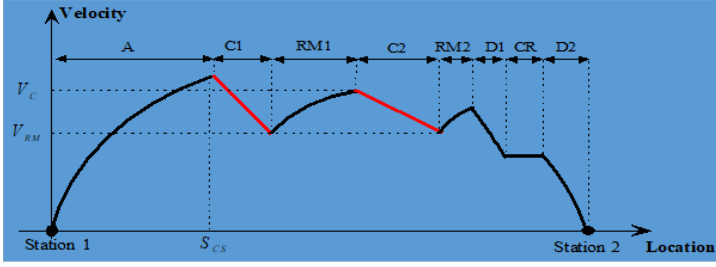
Manuel sürüş sistemine sahip şirketlerde makine operatörleri araçları en verimli şekilde kullanabilmeleri amacıyla kapsamlı bir şekilde eğitilmektedir. Bu eğitimlerde kalkış ve duruş teknikleri öğretilmekte ve uzun süreli rölantide bekleme gibi enerji tasarrufu sağlayan stratejiler uygulanmaktadır. Bu kapsamda araçların gereksiz enerji harcadığı bölgelere uyarı işaretleri yerleştirilmekte ve sürücüler olası enerji kayıpları konusunda bilinçlendirilmektedir. Bu senaryoda tren sürücüsü iki istasyon arasında hareket ederken belirlenen işaretlere bağlı kalarak seyretmektedir.

Değişken hız kontrolü daha karmaşık ancak daha etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemde dijital bir göstergesi istasyonun sonunda ulaşılması gereken hızı izlemekte ve bunu hesaplayabileceği uygun bir noktada yerleştirilmektedir. Böylece makine, belirlenen hıza uygun biçimde çalışmaktadır. Sürücülere yönelik önerilerin sunulması ve eğitim programlarının uygulanması yoluyla, enerji tüketiminde yaklaşık %10 oranında bir azalma sağlanması beklenmektedir (Albert vd., 1995).

2.3.3. Otomatik Sürüş Prosedürleri

Günümüzde enerji tasarruflu sürüş ilkeleri dikkate alınarak sistemler otomatik biçimde kontrol edilmektedir. Otomatik sürüş teknolojisi, manuel sürüşten kaynaklanan mekanik ve operasyonel hataları ortadan kaldırmaktadır. Trenlerin hızı, frenleme ve hızlanma süreçleri, boşta kalma süresi ve sürüş konforu, tahrik kontrol ünitesi tarafından sürekli olarak izlenmektedir.

Otomatik sürüşün birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlardan biri, trenlerin konumlarını optimize ederek yer değiştirebilme kapasitesidir. Bu sayede trenlerin eş zamanlı hızlanması sağlanmakta ve enerji daha verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Enerji tasarrufu belirli otomatik sistem özelliklerinin ve enerji verimliliğine yönelik yöntemlerin uygulanmasıyla %30'un üzerine çıkabilmektedir (Albert vd., 1995).

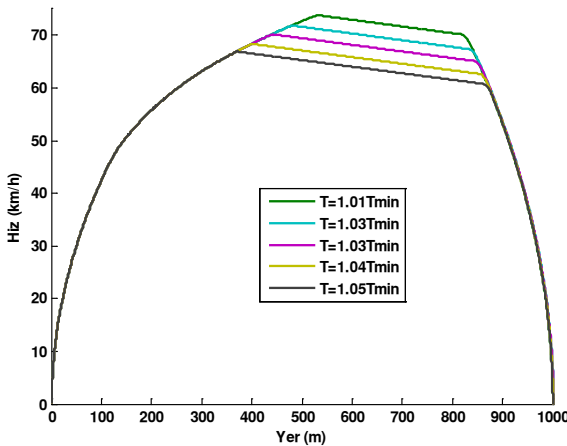


Şekil 2: Boşta Gitme Tekniği
Kaynak: Boynukalın, vd., 2021

Şekil 2, trenlerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak uygulanan boşta gitme stratejisinin tipik seyir profili üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu yöntemde tren boşta gitme başlangıç hızı (V_{RM}) seviyesine ulaştığında çekiş gücü kesilmekte ve araç, motor kapatılarak serbest seyir moduna geçmektedir. Bu süreç, grafikte C1 ve C2 ile gösterilen bölgelere karşılık gelmektedir.

Trenin hızı, hız eşik seviyesi (V_C) olarak tanımlanan bir alt sınırın altına düştüğünde motor tekrar devreye girmekte (RM1, RM2) ve araç çekişli sürüşe dönmektedir. Bu döngü, hatta ilerleyiş sırasında birden fazla kez (örneğin konumundan itibaren) tekrarlanabilir. Seyir boyunca trenin yavaşlama ve duruş bölgeleri ise D1, D2, CR gibi sembollerle tanımlanmıştır.

Bu teknik yaklaşım sayesinde tren yalnızca gerektiğinde enerji kullanmakta; böylece yakıt tüketimi ile birlikte karbondioksit (CO_2) emisyonları da önemli ölçüde azaltılmaktadır. Boşta gitme stratejisi, özellikle uzun mesafeli hatlarda enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından anlamlı kazanımlar sunmaktadır.

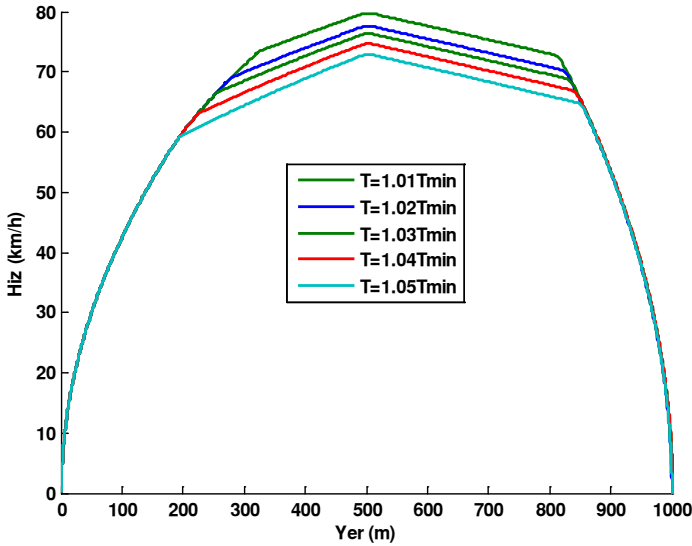


Şekil 3: Düz Hattta Seyir Süresi ve Enerji Tüketimi
Kaynak: Morea, 2021

Şekil 3'te 1 km uzunluğundaki düz hatta farklı sürelerde uygulanan boşta gitme stratejisinin seyir süresi artışına ve enerji tasarrufuna etkisi gösterilmektedir. Boşta gitme uygulamasının düz hatta %1'den %5'e kadar olan seviyelerde elde ettiği enerji tasarruf oranları, boşta gitme stratejisine geçtiği mesafe ve seyir süresindeki artış değerleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Düz Hatta Tasarruf Oranları Tablosu
Kaynak: Morea, 2021

	Seyir Süresindeki Artış				
	%1	%2	%3	%4	%5
X_{coast}	540	490	450	410	380
$\Delta E(\%)$	16.06	20.40	23.74	27.23	29.83



Şekil 4: Eğimli Hatta Seyir Süresi ve Enerji Tüketimi
Kaynak: Morea, 2021

%-3 ve %-0,6 eğimli hatlarda uygulanan boşta gitme stratejisinin hız profili üzerindeki etkisi ve enerji tasarrufu davranışı şekil üzerinde gösterilmektedir. Eğimi olan hat kesimlerinde coasting stratejisiyle elde edilen enerji tasarruf oranları ΔE , boşta gitme stratejisine geçtiği mesafe ve seyir süresi artışları karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Eğimli Hatta Tasarruf Oranları Tablosu
Kaynak: Morea, 2021

	Seyir Süresindeki Artış				
	%1	%2	%3	%4	%5
X_{coast}	335	290	265	235	205
$\Delta E(\%)$	25.44	31.39	34.76	39.21	43.78

Düz hat kesimlerinde yapılan analizler boşta gitme oranı artırıldıkça enerji tasarrufunun anlamlı şekilde yükseldiğini ancak buna bağlı olarak seyir süresinin de belirgin ölçüde arttığını göstermektedir. Örneğin %1 oranında boşta gitme uygulaması ile %16,00 oranında enerji tasarrufu sağlanırken bu oran %5'e çıkarıldığında tasarruf %29z,83'e ulaşmakta; ancak seyir süresi de 540 saniyeden 648 saniyeye yükselmektedir. Bu durum düz hatlarda boşta gitme stratejisinin enerji verimliliği sağlamasına rağmen zaman performansında kayba yol açtığını ortaya koymaktadır.

Öte yandan eğimli hatlardaki sonuçlar aynı stratejinin çok daha avantajlı olduğunu göstermektedir. %–3 ve %–0,6 eğime sahip hatlarda %5 oranında boşta gitme uygulaması ile %43,78 gibi oldukça yüksek bir enerji tasarrufu elde edilirken seyir süresindeki artış yalnızca 30 saniye düzeyinde kalmaktadır. Eğimli hatların yerçekiminden kaynaklı doğal ivmelenme sağlaması bu farkın temel nedenidir. Bu bağlamda eğimli hatlarda boşta gitme stratejisi daha verimli çalışmakta ve enerji-tasarruf/zaman-maliyeti dengesi daha uygun bir düzeyde kalmaktadır.

Sonuç olarak boşta gitme stratejisi hem düz hem eğimli hatlarda enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ancak bu stratejinin uygulanabilirliğinde hat profili, zaman kısıtları ve işletme senaryoları gibi parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Eğimli hatlarda boşta gitme yüksek tasarruf ve düşük zaman maliyeti sunarken; düz hatlarda daha dikkatli optimizasyon gerektirmektedir.

3. Uygulama Süreci ve Gelişmeler

TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından yürütülen çalışmalarda İzmir Bölge Müdürlüğü bünyesinde işletilmekte olan DMU (Diesel Multiple Unit) tren setlerine ait enerji tüketim değerlerine ilişkin standart bir analiz yapısının bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu yapısal eksikliğin giderilmesi amacıyla TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından uzman teknik ekiplerden profesyonel destek alınarak kapsamlı bir analiz ve geliştirme süreci başlatılmıştır. Söz konusu çalışmalar her tren için her istasyon aralığında asgari ve tabii seyir sürelerinin belirlenmesine yönelik detaylı performans değerlendirmelerini içermekte olup bu analizler HI-SIM Teknoloji Mühendislik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tabii seyir süresi içerisinde enerji tüketiminin azaltılması amacıyla boşa alma, azami hızın düşürülmesi gibi çeşitli enerji verimliliği stratejileri uygulanmıştır. Başlangıçta kullanılan hızlanma ivmesi değerlerinin sahadaki gerçek koşulları yeterince yansıtmadığı belirlenmiş; bu doğrultuda simülasyon modelleri, sahada elde edilen ölçüm verilerine göre güncellenmiş ve optimize edilmiştir.

Geliştirilen senaryoların sahada gerçekleştirilen doğrulama testleri başarıyla tamamlanmıştır. Aynı tren ve aynı setle, ardışık günlerde yapılan testlerin ilk gününde makinist müdahalesi olmaksızın referans sürüşü gerçekleştirilmiş, ikinci gün ise belirlenen senaryolara uygun şekilde sürüş uygulanmıştır. Dört farklı tren üzerinden gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizlerde sırasıyla %20,67, %18,78, %4,14 ve %29,27 oranlarında enerji tasarrufu sağlandığı, tüm testlerin ortalamasının ise %21,99 düzeyinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Makinistlere, başmakinistler ve eğitici makinistler eşliğinde tren üzerinde uygulamalı eğitimler verilmiştir. Tüm trenler için sürüş tabloları hazırlanmış ve İzmir Bölge Müdürlüğünde teknik ekiple yapılan değerlendirme toplantıları ile uygulama süreci resmî olarak başlatılmıştır. Uygulamanın sürdürülebilirliğini sağlamak ve süreçte ortaya çıkabilecek aksaklıkları hızlıca tespit ederek müdahale edebilmek amacıyla "Sürekli İzleme Ekibi" oluşturulmuştur. Bu ekip, trenlerin yakıt tüketimini tren, set ve makinist bazında günlük olarak takip etmekte; uygulamayı olumsuz etkileyebilecek unsurları belirleyerek gerekli düzeltmelerin yapılması için ilgili birimlere düzenli olarak rapor sunmaktadır.

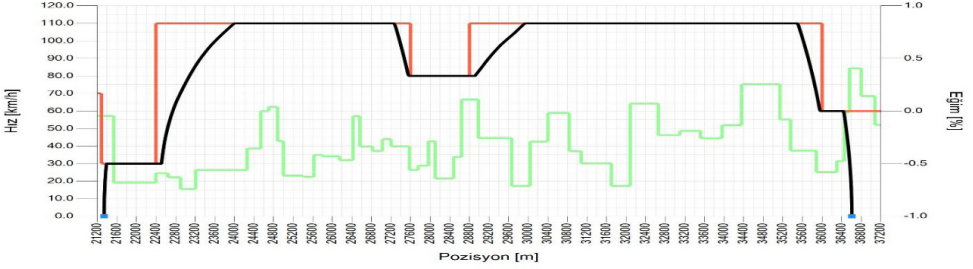
4. Saha Uygulamaları ve Testler

İzmir Bölgesi'nde hâlihazırda 54 bölgesel tren hizmet vermektedir. Bu trenlerde yaygın olarak 15400 tipi DMU setler kullanılmakta olup, günlük toplam motorin tüketimi 20.000 ila 25.000 litre arasında değişmektedir. 2023 yılı verilerine göre bölgede günlük ortalama 9.329 tren-km mesafe kat edilmiştir. Bu doğrultuda belirtilen tüketim aralığına göre bir tren-km başına motorin tüketimi yaklaşık 2,14 ila 2,68 litre arasında gerçekleşmektedir. Enerji tüketimini azaltmaya yönelik olarak trenlerin hız profili, motor performansı ve hat karakteristikleri dikkate alınarak stratejik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu çerçevede motorin tüketimini azaltmayı hedefleyen ve süzülme esasına dayanan enerji verimli bir sürüş yöntemi önerilmektedir. Geliştirilen yöntem, trenlerin uygun kesimlerde motor gücü kesilerek ivmesiz şekilde hareket etmesini sağlayan süzülme bölgelerinin belirlenmesine dayanmaktadır.

Her trenin, her istasyon aralığı için asgari ve tabii seyir sürelerine yönelik analizler yapılmış ve tabii seyir süresinde enerji tüketimini azaltmak amacıyla süzülme uygulamaları ile azami hızın düşürülmesi gibi yöntemler hayata geçirilmiştir. Söz konusu analizler, simülatör programları aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup; simülasyon modelleri, dizel motor karakteristikleri, vagon konfigürasyonu, hat eğim profili ve bölgesel hız limitleri gibi parametreler esas alınarak çalışmaktadır.

Simülasyon raporlamaları kapsamında, çalışmalarda kullanılan tüm kilometre değerleri trenin başlangıç noktasına göre referans alınmaktadır. Süzülme stratejisinin uygulandığı bölgeler grafiksel olarak gösterilmekte ve varış istasyonundaki bekleme süresine göre farklı senaryolar oluşturulmaktadır. Bu bağlamda, bir dakikalık bekleme süresi öngörülen durumlarda süzülme uygulaması, 15 ila 20 saniyelik tabii süre aşımalarına izin vermekte; iki dakika ve üzeri bekleme sürelerinde ise bu süre yaklaşık 60 saniye olarak planlanmaktadır. Süzülme bölgelerinde makinistler, belirlenen hız limitlerine kesin olarak uymakla yükümlü olup, gerekli durumlarda frenleme yaparak hız aşımını engellemekle sorumlu tutulmaktadır.

Aynı tren setinde farklı sürüş teknikleriyle gerçekleştirilen testlerde ortalama %21,99 oranında enerji tasarrufu elde edilmiştir. Sahada yürütülen uygulamalı eğitimlerde, makinistlerin tamamı geliştirilen senaryoları benimsemekte ve bu doğrultuda sürüş gerçekleştirmektedir. Şekil 5 Menderes-Pancar arası 32757 numaralı trenin asgari sürede hattı geçmek üzere tam güçle çalıştığı referans bir senaryoyu temsil etmektedir.



Şekil 5: Menderes-Pancar arası 32757 Tren Asgari Süre Durumu İçin Hız-Konum Grafiği

Bu tür bir sürüş, sistemin maksimum performans kapasitesini belirlemek amacıyla referans olarak kullanılmakta ve enerji verimliliğine yönelik stratejilerin karşılaştırılması için temel oluşturmaktadır. Bu sürüş modu ancak trenin tehirl olduğu durumlar için uygulanmalıdır. Çünkü yolcu trenleri hiçbir istasyondan vaktinden önce hareket edemez.

- **Hız Limitleri (Kırmızı Çizgi):** Hat boyunca farklı kesimlerde geçerli olan azami hız sınırlarını göstermektedir. Bu limitler, demiryolu altyapısının teknik özellikleri ve emniyet kriterlerine göre belirlenmektedir.
- **Gerçek Hız (Siyah Çizgi):** Tren, senaryo kapsamında mümkün olan en yüksek hızlarda seyretmekte olup, genellikle azami hız sınırlarına oldukça yakın ilerlemektedir. Bu durum, sistemin tam kapasite çalıştığını göstermektedir.
- **Eğim Profili (Yeşil Çizgi):** Hat eğimini yüzdelerle ifade etmekte ve inişli bölgeler (negatif eğim) enerji tasarrufu açısından potansiyel süzülme fırsatları sunmaktadır.

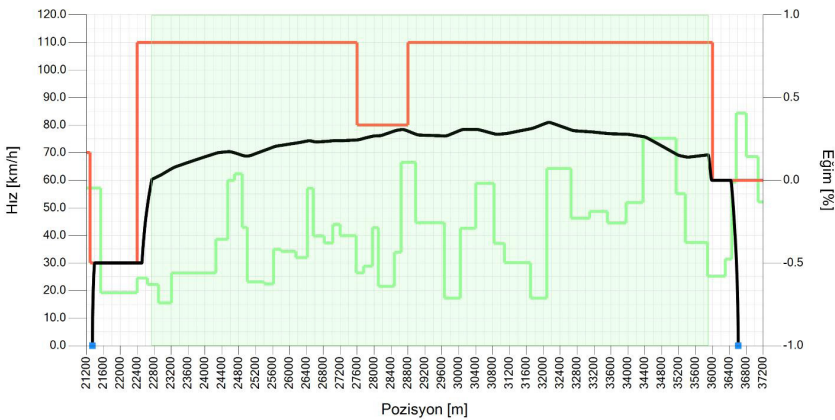
Söz konusu referans sürüşün öne çıkan parametreleri şu şekildedir:

- Asgari Süre: 10 dakika
- Gerçek Seyir Süresi: 11 dakika 25 saniye
- Enerji Tüketimi: 72 kWh

Şekil 5'teki senaryoda trenin motoru kesintisiz olarak çalışmakta, süzülme yöntemi uygulanmamakta ve maksimum hızlara ulaşmak için yüksek ivmelenme tercih edilmektedir. Bu durum, enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, eğim profili göz ardı edilmekte ve eğimli bölgelerde motor gücünün kapatılması gibi stratejilere yer verilmemektedir. Bu tür bir yaklaşım, potansiyel enerji tasarrufu fırsatlarının değerlendirilmediğini göstermektedir. Trenin vaktinde olduğu durumda bu senaryonun uygulanması, istasyona 3-4 dakika erken gelme gibi bir sonuca yol açacaktır. Yolcu treni vaktinden önce hareket edemeyeceğinden bu senaryo ancak istasyondaki bekleme süresinin artmasına sebep olacak, bunun karşılığı ise yüksek miktarda enerji harcaması olacaktır.

Fren bölgeleri kısa tutulmuş olup bu durum yüksek hızdan kısa sürede düşük hıza inme zorunluluğunu beraberinde getirmekte ve frenleme sistemleri üzerinde ilave yük oluşturmaktadır.

Şekil 5, enerji açısından verimsiz bir sürüş senaryosunu temsil etmekle birlikte sistemin minimum seyir süresi içerisinde nasıl bir performans gösterdiğini ortaya koyması bakımından önem arz etmektedir. Aynı hat üzerinde daha planlı ve enerji odaklı sürüş stratejilerinin uygulanması hâlinde, yalnızca birkaç dakikalık süre artışı ile enerji tüketiminin %80'e kadar azaltılabileceği, diğer senaryolarla yapılan karşılaştırmalı analizlerde ortaya konulmaktadır. Şekil 6, Menderes-Pancar hattında hizmet veren 32757 numaralı trenin, enerji verimliliği odaklı bir sürüş stratejisiyle gerçekleştirdiği seyri temsil etmektedir.



Şekil 6: Menderes-Pancar arası 32757 Tren Tabii Seyir Süresine Uygun Hız-Konum Grafiği

Bu sürüş profilinde, çizelgeye uyum sağlanarak enerji tasarrufu amacıyla boşta gitme (coasting) tekniği uygulanmıştır. Grafik, hız-konum ilişkisini temel alarak bu stratejinin teknik ve operasyonel etkilerini ayrıntılı bir şekilde analiz etmektedir.

- Hız Limitleri (Kırmızı Çizgi): Hat boyunca geçerli olan azami hız değerlerini göstermektedir. Bu sınırlar, demiryolu güvenliği ve altyapı özellikleri doğrultusunda belirlenmektedir.
- Gerçek Araç Hızı (Siyah Çizgi): Sürüş profili daha yumuşak geçişlere sahip olup sabit seyir hızlarını içermektedir. Özellikle boşta gitme uygulanan bölgeler, hız eğrisinde belirgin hale gelmektedir.
- Eğim Profili (Yeşil Çizgi): Hat üzerindeki eğim dağılımını yansıtmaktadır. Negatif eğimli bölgelerde süzülme stratejisinin aktif olarak kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, eğimin enerji verimliliği lehine etkin biçimde değerlendirildiğini göstermektedir.

Tablo verileri üzerinden yapılan teknik analiz şu şekildedir:

- Boşta Alma Noktası: 22.740 m
- Boşta Alma Hızı: 60 km/h
- Fren Noktası: 35.900 m
- Fren Anı Hızı: 69 km/h
- Tabii Seyir Süresi: 14 dakika
- Gerçek Süre (boşta gitme sonrası): 14 dakika 20 saniye
- Enerji Tüketimi: 11.9 kWh
- Enerji Kazancı: 60.1 kWh
- Enerji Kazanç Oranı: %83.5

Şekil 6'da yer alan sürüş stratejisi boşta gitme tekniği ile enerji verimliliği hedeflenerek yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda motor gücü belirli noktalarda kesilerek trenin ivmesiz biçimde hareketine devam etmesi sağlanmıştır. Frenleme noktası, eğim yapısı ve hız limitleri dikkate alınarak stratejik biçimde belirlenmiş; bu sayede kısa süreli seyir süresi artışına karşılık ciddi düzeyde enerji tasarrufu elde edilmiştir. İki istasyon arasındaki yaklaşık 15.200 metrelik mesafenin 13.160 metresinde tren boşta gitmiş ve bu şekilde de harcayacağı en az enerjiyi harcayarak varış istasyonuna vaktinde ulaşmıştır. 20 saniyelik artışta bekleme süresi 1 dakika yerine 40 saniye olarak uygulandığından tehire yol açmamıştır.

Elde edilen verilere göre, referans sürüş ile kıyaslandığında %83.5 oranında enerji kazancı sağlanmıştır. Bu sonuç, planlı sürüş profillerinin enerji tüketimi üzerinde ne denli etkili olduğunu ortaya koymakta ve sürdürülebilir ulaşım stratejileri açısından somut bir örnek sunmaktadır.

Tren hız limitlerine yaklaşmak yerine, enerji verimliliğini esas alan sabit ve dengeli bir hız profili izlemiştir. Hat boyunca eğimli bölgelerde motor gücü kesilerek boşta gitme (coasting) stratejisi uygulanmıştır. Bu sürüş yaklaşımı sonucunda seyir süresi yalnızca 20 saniye artmış, buna karşılık enerji tüketiminde %83.5 oranında azalma sağlanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ilgili stratejinin makinist eğitimi, zaman çizelgelemesi ve otomatik kontrol sistemleri açısından örnek senaryo olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Şekil 6 kapsamında analiz edilen bu uygulama, enerji verimli tren işletmeciliğinin zaman çizelgesine uyumlu şekilde de başarıyla gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Boşta gitme stratejisi sayesinde hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar elde edilmesi mümkün hâle gelmektedir.

Menderes–Pancar kesimi coğrafi olarak İzmir ili sınırları içerisinde yer alan, kısa mesafeli ve eğim, hız limiti gibi parametrelerin kontrollü biçimde analiz edilebildiği bir demiryolu hattıdır. Bu bölge enerji verimli sürüş stratejilerinin—özellikle boşta gitme uygulamasının—geliştirilmesi ve test edilmesi amacıyla simülasyon ortamında kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Bu analiz tüm trenler için tüm istasyon aralıklarında aynı şekilde yapılmıştır. Örneğin Basmane-Denizli hattında trenden trene farklılıklar da olsa her tren için 30 civarında istasyon yer almaktadır. Bu hat kesiminde gidiş dönüş olmak üzere 16 tane tren çalışmaktadır. Bu durum sadece bu hat için, her istasyon aralığında iki analiz yapıldığından, toplamda 960 (16*30*2) adet analiz anlamına gelmektedir.

Simülasyon çıktıları aracılığıyla aşağıdaki unsurlar detaylı biçimde modellenmiştir:

- Boşta alma noktalarının konumu,
- Frenleme bölgeleri,
- Eğim-hız etkileşimleri,
- Seyir süresi ile enerji tüketimi arasındaki ilişkiler.

Elde edilen bu bulgular, sahada uygulanacak stratejilere temel teşkil etmiştir. Simülasyon ortamında geliştirilen söz konusu stratejiler, daha sonra Basmane–Denizli-Basmane, Basmane–Ödemiş-Basmane ve Basmane–Uşak-Basmane gibi hatlarda makinistlerin katılımıyla sahada test edilmiştir. Uygulama süreci sonucunda %4 ila %29.27 arasında değişen oranlarda enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir.

4.1. Teorik Saha Çalışması

Bu araştırma, 32701–32710, 32705–32714, 32721–32726 ve 32601–32610 numaralı trenlerin farklı hatlarda gerçekleştirmiş olduğu enerji verimliliği odaklı saha testlerinin sonuçlarını kapsamaktadır. Her bir tren için, standart sürüş koşulları ile enerji verimliliği esas alınarak planlanmış senaryo sürüşleri karşılaştırılmış ve yakıt tüketiminde elde edilen tasarruf oranları ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

Tablo 3: Senaryo Bazlı Tüketim Analizi

TREN NUMARASI	SET NO	KM	TÜKETİM (NORMAL) (Litre)	TÜKETİM (SENARYO) (Litre)	FARK (L)	FARK (%)	TÜKETİM (NORMAL) l/km	TÜKETİM (SENARYO) l/km
32701-32710	15406	540	1137	902	235	20,67%	2,11	1,67
32705-32714	15405	540	1118	908	210	18,78%	2,07	1,68
32721-32726	15409	230	362	347	15	4,14%	1,57	1,51
32601-32610	15405	580	1584	1120,35	463,65	29,27%	2,73	1,93

Yapılan saha testleri enerji verimliliği esasına dayalı sürüş stratejilerinin yalnızca simülasyon ortamında değil, gerçek saha koşullarında da başarıyla uygulanabildiğini ortaya koymaktadır. Dört farklı hatta uygulanan senaryo sürüşleri sonucunda, trenlerin toplam yakıt tüketiminde anlamlı oranlarda azalma sağlanmıştır. Gerçekleştirilen arazi testleri neticesinde aşağıdaki temel bulgular elde edilmiştir:

- En yüksek tasarruf oranı: %29,27 (Basmene-Uşak hattı; uzun mesafe ve eğimli arazi yapısı nedeniyle süzülme etkisi yüksek düzeydedir),
- En düşük tasarruf oranı: %4,14 (Basmene-Ödemiş hattı; kısa mesafeli olup eğimi daha az olduğundan süzülme uygulanabilecek alanlar sınırlıdır),
- Genel ortalama tasarruf oranı: %21,99,
- Toplam yakıt tasarrufu: 923,65 litre.

Elde edilen bulgular, boşta gitme (coasting) gibi düşük maliyetli ve uygulanabilir sürüş stratejilerinin, özellikle uzun mesafeli ve eğimli hatlarda yüksek düzeyde enerji verimliliği sağladığını göstermektedir. Bu stratejilerin makinist eğitim programlarına, otomatik hız kontrol sistemlerine ve zaman çizelgesi planlamalarına entegre edilmesi hâlinde, demiryolu taşımacılığı hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar elde edebilecektir. Bu doğrultuda, sürdürülebilir ulaşım politikaları çerçevesinde söz konusu uygulamaların yaygınlaştırılması önerilmektedir.

4.2. Kilometre Başına Yakıt Tüketimi Değerlendirmesi

Saha testleri sonucunda elde edilen dikkat çekici bulgulardan biri, trenlerin kilometre başına düşen yakıt tüketimi değeridir. Bu gösterge, enerji verimliliğinin mesafe ile ilişkilendirilmesine olanak tanıyarak daha hassas ve karşılaştırılabilir analizler yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Normal sürüş koşullarında kilometre başına ortalama yakıt tüketimi 2,22 litre/km olarak ölçülmüşken, enerji verimliliği odaklı senaryo uygulandığında bu değer 1,73 litre/km seviyesine düşmüştür. Aradaki fark her bir kilometrede yaklaşık yarım litreye yakın yakıt tasarrufu sağlandığını göstermektedir. Bu fark, örneğin 1.000 kilometrelik haftalık hat kullanımında 500 litreye kadar tasarruf anlamına gelmektedir. Bu tasarruf miktarı büyük ölçekli filo yönetimi ve yoğun günlük operasyonlar söz konusu olduğunda çarpan etkisi yaratarak ciddi düzeyde yakıt maliyet avantajı sağlamaktadır. Aynı zamanda bu fark, karbon salımında yaklaşık %20-25 oranında azalma anlamına da gelmektedir.

Yapılan testlerde elde edilen veriler, hattın fiziki koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin eğimli bir güzergâh olan Basmane-Uşak hattında birim tüketim 2,73 litre/km iken, genellikle düz bir hat olan Basmane-Tire hattında bu değer 1,57 litre/km olarak ölçülmüştür. Hat bazında değerlendirme yapılabilmekle birlikte, genellikle toplam tüketimin kat edilen toplam mesafeye oranlanmasıyla elde edilen kilometre başına ortalama tüketim verisi esas alınmaktadır.

Özellikle uzun mesafeli hatlarda (örneğin Denizli ve Uşak güzergâhlarında) yapılan ölçümler, kilometre başına tüketimin normal koşullarda 2,11-2,73 litre arasında değiştiğini; enerji verimli senaryolar uygulandığında ise bu değer 1,67-1,93 litre aralığına gerilediğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, enerji verimliliği odaklı sürüş stratejilerinin, mesafe uzadıkça sağladığı tasarrufun daha belirgin hâle geldiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Burada yapılan karşılaştırma normal sürüş gerçekleştiren makinist ile senaryoya uygun sürüş arasındaki farkı ortaya koymaktadır. Testlerde %20 oranında bir tasarruf farkı elde edilmiş olsa da uygulamada karşılaşılabilecek tren arızaları, yol kaynaklı tehirlere ve benzeri operasyonel aksaklıklar nedeniyle senaryonun her koşulda tam olarak uygulanamayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle hedef, test sonuçlarının altında olacak şekilde %10 oranında belirlenmiştir.

5. Tüketim ve Tasarruf Verileri

Bu araştırma İzmir Bölgesi'nde DMU setlerine ait 2023 ve 2024 yıllarına ait aylık yakıt tüketimleri, kat edilen mesafeler ve birim tüketim (litre/km) verileri üzerinden yapılan analizleri içermektedir. Veriler, Halkapınar, Uşak, Balıkesir ve Denizli atölye/depolarından yapılan motorin dolum kayıtlarına dayanmakta olup 24 Aralık 2024 tarihine kadar olan dönemi kapsamaktadır. 2024 yılı içinde Güller Ekspresi seferinin devreye alınmasıyla tren sayısı 52'den 54'e çıkmıştır.

Tablo 4: İzmir Bölgesi DMU Setleri Aylık Yakıt Tüketimi (2023–2024)

AYLAR	2023 (litre)	2024 (litre)	FARK(litre)	ORAN (%)
OCAK	891517.31	764181.68	-127335.63	-14.3
ŞUBAT	591210.99	672114.8	80903.81	13.7
MART	678830.13	750970.95	72140.82	10.6
NİSAN	643860.79	700319.02	56458.23	8.8
MAYIS	685541.62	743646.02	58104.4	8.5
HAZİRAN	671573.14	756360.04	84786.9	12.6
TEMMUZ	756925.29	811987.24	55061.95	7.3
AĞUSTOS	736252.24	798886.98	62634.74	8.5
EYLÜL	667669.08	728828.7	61159.62	9.2
EKİM	674988.4	722726.43	47738.03	7.1
KASIM	642734.34	707520.98	64786.64	10.1
ARALIK	708750.08	544933.18	-163816.9	-23.1
TOPLAM	8349853.41	8702476.02	352622.61	4.2

Tablo 4, İzmir Bölgesi'nde 2023 ve 2024 yıllarında DMU setlerine verilen aylık yakıt miktarlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Verilere göre 2024 yılında toplam yakıt miktarı 2023 yılına kıyasla 352.622,61 litre artarak %4,2 oranında yükselmiştir.

Aylık bazda değerlendirildiğinde:

- Ocak ve Aralık aylarında yakıt tüketimi azalmış, özellikle Aralık ayında %23,1 oranında önemli bir düşüş gözlemlenmiştir.
- Diğer tüm aylarda ise yakıt tüketiminde artış meydana gelmiştir.
- Şubat, Haziran ve Mart aylarında çift haneli artış oranları dikkat çekmektedir.

Bazı aylarda enerji verimli sürüş stratejilerinin daha etkin uygulanabildiğini, bazı aylarda ise yolculuk sayısı, hat yoğunluğu veya operasyonel değişkenler nedeniyle yakıt tüketiminin arttığını göstermektedir. Genel toplamda görülen %4,2'lik artış ise yıllık operasyonel genişleme veya taşıma hacmindeki büyümeyle ilişkilendirilebilir.

Tablo 5: İzmir Bölgesi DMU Trenlerinin Aylık Kilometre Verileri(2023-2024)

AYLAR	2023 (km)	2024 (km)	FARK (km)	ORAN (%)
OCAK	298402	330937	32535	11
ŞUBAT	258204	309194	50990	20
MART	297827	330583	32756	11
NİSAN	287074	319748	32674	11
MAYIS	298048	331823	33775	11
HAZİRAN	290775	317878	27104	9
TEMMUZ	304979	331563	26585	9
AĞUSTOS	300754	332206	31452	10
EYLÜL	290736	320263	29526	10
EKİM	305336	330760	25424	8
KASIM	295060	321649	26589	9
ARALIK	313593	246270	-67323	-21
TOPLAM	3540787	3822875	282088	8

Tablo 5, İzmir Bölgesi'nde 2023 ve 2024 yıllarında DMU setlerinin aylık olarak katettiği toplam mesafeleri karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Verilere göre 2024 yılında trenlerin katettiği toplam mesafe 2023 yılına kıyasla 282.088 kilometre artış göstererek %8 oranında yükselmiştir.

Aylık bazda incelendiğinde:

- Ocak ile Kasım ayları arasında tüm aylarda mesafe artışı gözlemlenmiş; bu artışlar genellikle %8 ila %11 arasında değişmiştir.
- Özellikle Şubat ayında %20 oranında dikkat çekici bir artış yaşanmıştır.
- Aralık ayında ise %21 oranında bir düşüş meydana gelmiş, bu da yıl sonunda operasyonel yoğunluğun azaldığını göstermektedir.

2024 yılında DMU setlerinin daha uzun mesafeler katettiğini ve taşıma faaliyetlerinde genel bir artış yaşandığını ortaya koymaktadır. Mesafe artışı, sefer sayısındaki yükseliş, güzergâh genişlemesi veya çizelgeleme yoğunluğu gibi faktörlerle ilişkilendirilebilmektedir. Genel toplamda elde edilen %8'lik artış, bölgesel demiryolu taşımacılığında kapasite kullanımının arttığını göstermektedir. Trenlerin daha fazla çalıştığı, yeni güzergâhların ve depo-gar hareketlerinin hesaba katıldığı görülmektedir.

Tablo 6: 2023 Aylık DMU Yakıt ve Mesafe Verileri (İzmir Bölgesi)

AYLAR	Yakıt Tüketim (l)	Mesafe (km)	BİRİM l/km
OCAK	891517.31	298402	2.99
ŞUBAT	591210.99	258204	2.29
MART	678830.13	297827	2.28
NİSAN	643860.79	287074	2.24
MAYIS	685541.62	298048	2.3
HAZİRAN	671573.14	290775	2.31
TEMMUZ	756925.29	304979	2.48
AĞUSTOS	736252.24	300754	2.45
EYLÜL	667669.08	290736	2.3
EKİM	674988.4	305336	2.21
KASIM	642734.34	295060	2.18
ARALIK	708750.08	313593	2.26
TOPLAM	8349853.41	3540787	2.36

Tablo 6, İzmir Bölgesi'nde 2023 yılı boyunca DMU setlerinin aylık yakıt tüketim değerlerini kat edilen mesafelerle karşılaştırarak, her ay için bir kilometre başına ortalama yakıt tüketimini (L/km) göstermektedir.

- Ocak ayında en yüksek birim tüketim değeri olan 2,99 l/km kaydedilmiştir. Bu, kış aylarındaki işletme koşullarının enerji verimliliği üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir.
- Kasım ve Ekim aylarında ise en düşük birim tüketim değerleri sırasıyla 2,18 ve 2,21 l/km olarak ölçülmüştür. Bu durum, bu aylarda daha verimli sürüş tekniklerinin uygulanmış olabileceğine işaret etmektedir.
- Yıl genelinde birim tüketim ortalaması 2,36 l/km olarak gerçekleşmiştir.

Yılın farklı dönemlerinde iklim koşulları, hat yoğunluğu ve operasyonel farklılıkların enerji verimliliğini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Ayrıca enerji verimli sürüş stratejilerinin uygulanabilirliği açısından temel bir değerlendirme sunmaktadır.

Tablo 7: 2024 Aylık DMU Yakıt ve Mesafe Verileri (İzmir Bölgesi)

AYLAR	Yakıt Tüketim (l)	Mesafe (km)	BİRİM l/km
OCAK	764181.68	330937	2.31
ŞUBAT	672114.8	309194	2.17
MART	750970.95	330583	2.27
NİSAN	700319.02	319748	2.19
MAYIS	743646.02	331823	2.24
HAZİRAN	756360.04	317878	2.38
TEMMUZ	811987.24	331563	2.45
AĞUSTOS	798886.98	332206	2.4
EYLÜL	728828.7	320263	2.28
EKİM	722726.43	330760	2.19
KASIM	707520.98	321649	2.2
ARALIK	544933.18	246270	2.21
TOPLAM	8702476.02	3822874	2.28

Tablo 7'de 2024 yılında trenler daha fazla mesafe kat etmesine rağmen birim yakıt tüketiminde düşüş gerçekleşmiştir. Bu da enerji verimliliği stratejilerinin etkin olarak uygulandığını göstermektedir.

Projenin tam anlamıyla uygulanabilmesi; trenin zamanında seferini gerçekleştirilmesi, kullanılan setlerin sürekli olarak yüksek performans göstermesi ve makinistlerin uygun koşullarda senaryoları uygulaması gibi çeşitli şartların sağlanmasına bağlıdır. Trenin tehirliliği durumunda, bu tehirliliğin azaltılması amacıyla daha az tüketim sağlayacak senaryolar yerine genellikle asgari seyir senaryosu uygulanmakta ve bu da tasarruf elde edilememesine neden olmaktadır.

Ayrıca kullanılan setlerin çeşitli gerekçelerle beklenen performansa ulaşamaması da senaryoların uygulanmasını engellemektedir.

2023 yılında kilometre başına tüketim 2,36 litre/km iken, bu değer 2024 yılında 2,28 litre/km'ye düşmüştür. Bu durum, yaklaşık %3,4 oranında bir tasarruf sağlandığını göstermektedir. Ancak 2024 döneminde, tren tehirliliği ve set performansına bağlı kısıtlamalar nedeniyle senaryo uygulama oranı yalnızca %35-40 civarında kalmıştır. Buna rağmen bu kısıtlı uygulama oranıyla elde edilen %3,4'lük tasarruf, %10 tasarruf hedefiyle tutarlıdır.

Aylık Bazda Dikkat Çeken Bulgular

2024 yılı verileri aylık bazda incelendiğinde, enerji verimliliği açısından dikkat çekici bazı eğilimler gözlemlenmiştir. Özellikle Ocak 2024 döneminde, bir önceki yılın aynı ayına kıyasla yakıt tüketiminde %14,3 oranında azalma sağlanmış; bu durum kilometre başına tüketim değerine de yansımış ve 2,99 l/km'den 2,31 l/km'ye düşüş gerçekleşmiştir.

Mart-Haziran döneminde, yakıt tüketimi ile mesafe arasındaki oranda düzenli bir iyileşme gözlenmiş, bu da enerji verimli sürüş stratejilerinin sürdürülebilir biçimde uygulandığını ortaya koymaktadır.

Aralık 2024 verileri, tüketimde belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Ancak bu düşüş, söz konusu dönemdeki sefer sayısındaki muhtemel azalma ile ilişkilendirilmelidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 2024 yılı boyunca birim yakıt tüketim değerleri istikrarlı biçimde 2,0-2,3 l/km bandına yerleşmiştir. Bu durum enerji verimliliği stratejilerinin operasyonel düzeyde başarıyla uygulandığını ve standartlaşmaya doğru önemli bir ilerleme sağlandığını göstermektedir.

Tablo 8, İzmir Bölgesi'nde 2023 yılına ait motorin ve elektrik tüketimi verilerini esas alarak %10 oranında tasarruf senaryosu üzerinden yapılan finansal ve çevresel kazanımları göstermektedir.

Tablo 8: 2023 Yılı Motorin ve Elektrik Tüketimi

Tüketim (litre)	%10 Tasarruf (litre)	%10 Tasarruf (TL)	CO2 Emisyon Azalması (kg CO2)
122.119.000	12.211.900	₺549.535.500	32.727.892
Tüketim (kWh)	%10 Tasarruf (kWh)	%10 Tasarruf (TL)	Emisyon Azalması (kg)
523.347.000	52.334.700	₺227.655.945	26.167.350
Toplam Tasarruf (TL)		Toplam Emisyon Azalması (kg CO ₂)	
₺777.191.445		58.895.242	

Tablo 8'de 2023 yılı toplam motorin tüketimi 122.119.000 litre, elektrik tüketimi ise 523.347.000 kWh olarak ölçülmüştür. Bu tüketimler üzerinden %10 tasarruf yapılabileceği varsayıldığında, aşağıda gösterilen ekonomik ve çevresel kazanımlara ulaşılmaktadır. Motorin tüketimi verileri incelendiğinde, toplamda 122.119.000 litre yakıt kullanıldığı görülmektedir. Bu miktardan hareketle %10'luk bir tasarruf sağlanması durumunda 12.211.900 litre yakıt tasarrufu elde edilebileceği hesaplanmıştır. Bu da yaklaşık ₺549.535.500 tutarında mali kazanç anlamına gelmek-

tedir. Ayrıca, bu düzeydeki yakıt tasarrufu ile 32.727.892 kg CO₂ (karbondioksit) emisyonu azaltımı sağlanabileceği öngörülmektedir.

Elektrik tüketimi açısından bakıldığında, 2023 yılı boyunca toplam 523.347.000 kWh elektrik harcanmıştır. %10 oranındaki bir tasarruf, 52.334.700 kWh daha az tüketim anlamına gelmekte olup bu da 227.655.945 tutarında finansal tasarruf sağlamaktadır. Bu senaryo doğrultusunda karbon emisyonundaki düşüş miktarı ise 26.167.350kg/CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Toplamda hem motorin hem de elektrik tüketimi üzerinden elde edilecek %10 oranındaki tasarruf ile birlikte 777.191.445 seviyesinde ekonomik kazanç sağlanmakta ve 58.895.242 kg CO₂ karbon emisyonu azaltılabilmektedir.

Enerji verimliliği stratejilerinin sadece maliyetleri azaltmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe de büyük katkı sunduğunu açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Demiryolu taşımacılığı gibi yoğun enerji tüketen sektörlerde bu tür uygulamaların yaygınlaştırılması, ulusal düzeyde hem ekonomik hem de çevresel kazanımlar açısından büyük önem arz etmektedir.

6. Sonuç ve Öneriler

İzmir Bölgesi'nde 2023–2024 yıllarında işletilen DMU tren setlerinin enerji tüketim verileri analiz edilmiştir. 2023 yılında 122 milyon litre motorin ve 523 milyon kWh elektrik tüketilmiş, bu durum sektörün enerji yoğunluğunu göstermiştir. %10'luk bir iyileştirme 777 milyon tasarruf ve 58.895 ton CO₂ azaltımı sağlamaktadır.

2024'te toplam mesafe artmasına rağmen birim tüketim azalmış bu da boşta gitme, sabit hızda seyir ve sürücü eğitimi gibi stratejilerin sahada başarıyla uygulandığını göstermiştir. Bu çalışmanın, İzmir Bölgesi'nde hizmet veren tüm DMU tren setlerinde sistematik olarak uygulanması planlanmaktadır. Ayrıca hâlihazırda manuel olarak yürütülen izleme faaliyetlerinin, uygun donanım ve yazılım altyapısıyla dijitalleştirilerek sürekli, otomatik ve güvenilir veri takibi sağlayacak şekilde yapılandırılması hedeflenmektedir.

Sonuç olarak enerji verimliliği hedefleri; uygulanabilir, ölçülebilir ve sürdürülebilir yöntemlerle sahada başarıyla hayata geçirilmiştir. Kurumsal takip mekanizmaları ve eğitim temelli destekleyici uygulamalar sayesinde hem ekonomik hem de çevresel anlamda somut kazanımlar elde edilmiştir. Bu kazanımlar, yalnızca maliyet optimizasyonu sağlamamakta, aynı zamanda çevresel sorumlulukların yerine getirilmesi, teknolojik ilerlemelerin desteklenmesi ve sürdürülebilir ulaşım politikalarına katkı sunulması açısından da önemli bir işlev üstlenmektedir.

Bu bağlamda geliştirilen enerji verimliliği stratejilerinin kurumsallaştırılarak kalıcı hale getirilmesi, diğer bölgelere yaygınlaştırılması ve gerekirse otomatikleştirilmiş sürüş destek sistemleriyle entegrasyonunun sağlanması önerilmektedir. Enerji verimliliği, yalnızca bir işletme politikası değil; aynı zamanda çevresel duyarlılığın, teknolojik dönüşümün ve sürdürülebilir kalkınmanın stratejik bir bileşeni hâline gelmiştir.

Kaynakça

- Albert, H., Levin, C., Vietrose, E., & Witte, G. (1995, September). *Reducing energy consumption in underground systems*.
- Aydın, M. (2016). Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 14(28), 409–441.
- Batır, T. (2019). Ulaştırma sektöründe akıllı ulaştırma sistemlerinin etkinliğini arttırmaya yönelik bir model önerisi. *(Yayımlanmamış yüksek lisans tezi)*.
- Boynukalın, S., Açıkbaş, S., & Söylemez, M. T. (2021). CBTC sistemlerinde tolere edilebilir seyahat süresi artışı için enerji verimliliği stratejilerinin karşılaştırılması. *Demiryolu Mühendisliği*, (14), 154–166. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.941405>
- Dernbach, J. C. (2007). Energy efficiency and conservation as ethical responsibilities: Suggestions for IPCC Working Group III. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1089423>
- Deutsche Bahn AG. (2003, March). *Evaluation of energy efficiency technologies for rolling stock and train operation of railways*. Berlin.
- Güler, H., & Evren, G. (2011). Demiryolu hat geometrisi bozulmasının bilgi sistemler destekli modellenmesi. *İTÜ Dergisi/d*, 5(3).
- Morea, D. (2021). Improvement of energy savings in electric railways using coasting technique. *Energies*, 14(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en14030598>
- Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390.
- Ringel, M., Schlomann, B., Krail, M., & Rohde, C. (2016). Towards a green economy in Germany? The role of energy efficiency policies. *Applied Energy*, 179, 1293–1303.
- Taylor, P. G., D'Ortigue, O. L., Francoeur, M., & Trudeau, N. (2010). Final energy use in IEA countries: The role of energy efficiency. *Energy Policy*, 38(11), 6463–6474.
- Tuominen, P., Forsström, J., & Honkatukia, J. (2013). Economic effects of energy efficiency improvements in the Finnish building stock. *Energy Policy*, 52, 181–189.