



Dizel-Elektrik Lokomotiflerde Çoklu Motor Konfigürasyonu ile Yakıt Tüketimi ve Emisyon Azaltımı

Kadir AYDIN^{*1}, İlhami PEKTAŞ²

¹ OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

² Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelmesi, OSTİM, Ankara, Türkiye

*kadir.aydin@ostimteknik.edu.tr

(Alınış/Received: 18.02.2026, Kabul/Accepted: 19.03.2026, Yayımlama/Published: 19.03.2026)

Öz: Dizel-elektrik lokomotifler, dünya genelinde elektrifikasyon altyapısı bulunmayan demiryolu hatlarında yük ve yolcu taşımacılığının temel unsuru olmaya devam etmektedir. Geleneksel dizel-elektrik lokomotiflerde kullanılan tek büyük dizel motorun kısmi yüklerde düşük verimle çalışması, aşırı yakıt tüketimi ve yüksek emisyon değerlerine neden olmaktadır. Bu çalışmada, tek büyük dizel motor yerine birden fazla küçük dizel motorun kullanıldığı çoklu motor (multi-engine) konfigürasyonlarının yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma kapsamında; jeneratör seti (genset) lokomotifleri, Bombardier TRAXX DE ME (Class 245) gibi ana hat çoklu motorlu lokomotifler ve hibrit dizel-elektrik sistemler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Literatür taraması sonuçlarına göre, çoklu motor konfigürasyonları ile geleneksel tek motorlu lokomotiflere kıyasla %20-50 yakıt tasarrufu, NOx emisyonlarında %80, partikül madde (PM) emisyonlarında %90 ve sera gazı emisyonlarında %37'ye varan azaltımlar sağlanabilmektedir. Ayrıca, çoklu motor sistemlerinin bakım maliyetlerini düşürdüğü, operasyonel esnekliği artırdığı ve lokomotif kullanılabilirlik oranını yükselttiği belirlenmiştir. Ayrıca, çoklu motor konfigürasyonunun Türkiye demiryolu sektöründe uygulanabilirliği; TCDD dizel lokomotif filosunun mevcut durumu, TÜRASAS yerli üretim kapasitesi ve 2053 net sıfır emisyon hedefi çerçevesinde değerlendirilmektedir. Çalışma, enerji yönetim stratejilerinin optimizasyonu, hibrit sistemlerle entegrasyon potansiyeli ve gelecek nesil düşük emisyonlu lokomotif teknolojileri hakkında öneriler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Dizel-elektrik lokomotif, Çoklu motor konfigürasyonu, Genset lokomotif, Yakıt tüketimi azaltımı, Emisyon kontrolü, Enerji yönetim stratejisi

Fuel Consumption and Emission Reduction through Multi-Engine Configuration in Diesel-Electric Locomotives

Abstract: Diesel-electric locomotives remain the backbone of freight and passenger transportation on non-electrified railway lines worldwide. The operation of a single large diesel engine at partial loads in conventional diesel-electric locomotives results in low efficiency, excessive fuel consumption, and high emission levels. This study comprehensively examines the effects of multi-engine configurations, where multiple smaller diesel engines replace a single large diesel engine, on fuel consumption and emission reduction. The research evaluates genset locomotives, mainline multi-engine locomotives such as the Bombardier TRAXX DE ME (Class 245), and hybrid diesel-electric systems in detail. According to the literature review results, multi-engine configurations can achieve 20-50% fuel savings, up to 80% reduction in NOx emissions, up to 90% reduction in particulate matter (PM) emissions, and up to 37% reduction in greenhouse gas emissions compared to conventional single-engine locomotives. Furthermore, multi-engine systems have been found to reduce maintenance costs, increase operational flexibility, and improve locomotive availability rates. Furthermore, the applicability of multi-engine configuration to the Turkish railway sector is evaluated in the context of the current state of Turkish State Railways (TCDD)'s diesel locomotive fleet, Turkish Rail System Vehicles Industry Inc. (TÜRASAS)'s domestic manufacturing capacity, and Türkiye's 2053 net-zero emission target. The study presents recommendations regarding the optimization of energy management strategies, integration potential with hybrid systems, and next-generation low-emission locomotive technologies.

Atıf için/Cite as: K. Aydın, İ. Pektaş, "Dizel-elektrik lokomotiflerde çoklu motor konfigürasyonu ile yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı" *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 24, no. 1892069, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1892069

Keywords: Diesel-electric locomotive, Multi-engine configuration, Genset locomotive, Fuel consumption reduction, Emission control, Energy management strategy

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığına kıyasla 3-4 kat daha yakıt verimli olmasına rağmen [1], dizel-elektrik lokomotifler hâlâ önemli miktarda fosil yakıt tüketen ve çevresel kirlilik yaratan araçlardır. Günümüzde dünya genelindeki demiryolu hatlarının önemli bir bölümü henüz elektrifiye edilmemiş olup, bu hatlarda dizel-elektrik lokomotifler birincil çekiş gücü olarak kullanılmaya devam etmektedir [1,2]. Avrupa'da bile düşük trafik yoğunluğuna sahip uzun mesafeli birçok demiryolu hattı hâlâ elektrifiye edilmemiştir ve bu hatların elektrifikasyonu için gereken yüksek sermaye yatırımları nedeniyle kısa vadede tam elektrikli sisteme geçiş mümkün görünmemektedir.

Geleneksel dizel-elektrik lokomotiflerde, tipik olarak 2.000-4.400 kW arasında güç üreten tek bir büyük dizel motor bulunmaktadır [2]. Bu motor, bir alternatör/jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretir ve bu enerji çekiş motorlarına iletilerek tekerleklerle mekanik güç olarak aktarılır. Bu sistemin temel sorunu, dizel motorun kurulu gücünün yalnızca hızlanma ve rampa tırmanma gibi sınırlı durumlarda tam olarak kullanılmasıdır. Lokomotif sabit hızla seyrederken, hafif yüklerle çalışırken veya rölantide beklerken motor gücünün büyük bölümü kullanılmaz; ancak motor çalışmaya devam ederek yakıt tüketir. Manevra lokomotiflerinde ise rölanti süresinin toplam çalışma süresinin %60-70'ine ulaşabildiği bildirilmektedir [3,4]. Bu durum, motorun kısmi yük bölgesinde düşük özgül yakıt tüketimi (BSFC) verimliliğiyle çalışmasına yol açmaktadır.

Dizel motorlarda özgül yakıt tüketimi (BSFC- Brake Specific Fuel Consumption), motorun yakıtı mekanik enerjiye dönüştürme verimliliğinin temel göstergesidir. Tipik bir dizel motor için en düşük BSFC değeri 195-210 g/kWh aralığında olup, bu değer motorun orta devirlerde ve yüksek tork bölgesinde, yani optimal çalışma noktasında elde edilir [5]. Kısmi yüklerde ise BSFC değeri önemli ölçüde artarak motorun termal verimini %40-45'ten %20-25'lere kadar düşürebilmektedir [5]. Bu durum, tek büyük motorlu lokomotiflerde sistematik bir verimsizlik kaynağı oluşturmaktadır.

Bu temel probleme çözüm olarak, tek büyük dizel motorun birden fazla küçük dizel motorla değiştirilmesi konsepti giderek artan bir ilgiyle araştırılmaktadır. Çoklu motor konfigürasyonu yaklaşımında, lokomotive birden fazla bağımsız dizel motor-jeneratör seti yerleştirilir ve bir elektronik kontrol sistemi, anlık güç talebine göre gerekli sayıda motoru devreye alıp çıkarır. Bu sayede her motor, optimal verim bölgesine yakın çalıştırılabilir ve ihtiyaç duyulmayan motorlar tamamen kapatılarak yakıt tasarrufu sağlanır [8,9]. Bu konsept hem manevra/çekim operasyonlarında (jeneratörlü lokomotifler) hem de ana hat hizmetinde (Bombardier TRAXX DE ME) başarıyla uygulanmıştır.

Bu bağlamda Türkiye, çoklu motor teknolojisinin uygulanması için özellikle elverişli bir ülke konumundadır. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) bünyesindeki toplam 13.919 km demiryolu ağının yaklaşık %49'u henüz elektrifiye edilmemiş olup, bu hatlarda dizel-elektrik lokomotifler birincil çekiş aracı olarak hizmet vermeye devam etmektedir [31]. Dizel ana hat lokomotif filosunun %75'inin 30 yaş ve üzerinde olması [32], yüksek bakım maliyetleri ve düşük enerji verimliliği sorunlarını beraberinde getirmektedir. 2053 yılı net sıfır emisyon hedefi ve Avrupa Yeşil Mutabakatı uyum sürecinde Türkiye'nin demiryolu sektöründe emisyon azaltımı kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir [33]. Bu nedenle çalışma, uluslararası literatür incelemesinin yanı sıra çoklu motor konfigürasyonunun Türkiye demiryolu sektörüne uygulanabilirliğini de kapsamlı şekilde değerlendirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, dizel-elektrik lokomotiflerde çoklu motor konfigürasyonlarının yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir literatür taramasıyla ortaya koymak, mevcut uygulamaları karşılaştırmalı olarak değerlendirmek, Türkiye demiryolu sektörüne uygulanabilirliğini analiz etmek ve gelecek nesil lokomotif teknolojileri için öneriler sunmaktır.

2. Dizel-Elektrik Lokomotiflerde Problem Tanımı

2.1. Dizel-elektrik lokomotif çalışma prensibi

Dizel-elektrik lokomotifler, seri hibrit güç aktarma sistemi prensibine göre çalışmaktadır [2]. Dizel motor, mekanik enerjiyi bir alternatör/jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Üretilen alternatif akım (AC), bir redresör tarafından doğru akıma (DC) çevrilerek çekiş motorlarına iletilir. Modern lokomotiflerde, değişken voltaj/değişken frekans (VVVF) sürücüler kullanılarak AC çekiş motorları beslenebilmektedir. Bu konfigürasyon, mekanik şanzıman ihtiyacını ortadan kaldırarak sıfır hızdan maksimum hıza kadar sürekli çekiş kuvveti sağlanmasına imkân tanımaktadır.

Lokomotif güç kontrolü, tipik olarak 8 kademelik (notch) bir gaz kolu sistemiyle gerçekleştirilir. Her kademe, motorun farklı bir devir-tork kombinasyonuna karşılık gelir ve jeneratör çıkış gerilimi/akımı buna göre ayarlanır. Kademe 1'den 8'e doğru artan güç talebi, motorun devir sayısını ve yakıt enjeksiyon miktarını artırır [2]. Ancak modern elektronik kontrol sistemleri bile, tek büyük motorun geniş yük aralığındaki verim düşüşünü tam olarak telafi edememektedir.

2.2. Kısmi yükte verim kaybı problemi

Dizel motorlarda termal verim, motorun çalışma noktasına (devir ve tork kombinasyonu) güçlü şekilde bağlıdır. Bir dizel motorun BSFC haritası incelendiğinde, en düşük özgül yakıt tüketiminin (en yüksek verimin) orta devirlerde ve yüksek yük bölgesinde elde edildiği görülür. Lokomotif dizel motorları için tipik minimum BSFC değeri 195-210 g/kWh aralığındadır; bu, %40-43 termal verime karşılık gelir [5]. Ancak motor yükü nominal değerinin %25'inin altına düştüğünde, BSFC değeri 300-400 g/kWh seviyelerine çıkabilir; bu da termal verimin %25'in altına düşmesi anlamına gelir [5].

Gerçek işletme koşulları altında yapılan ölçümler, dizel-elektrikli lokomotiflerin zamanlarının önemli bir kısmını rölantide veya düşük yükte geçirdiğini göstermektedir. FRA verilerine göre, manevra lokomotifleri çalışma döngülerinin %50-80'inde rölantide çalışmakta, toplam yakıtın %20-40'ını tüketmekte ve neredeyse hiç faydalı iş üretmemektedir [3]. Ana hat yük lokomotifleri bile genellikle döngülerinin yalnızca %20-30'unda tam güçte çalışmakta, geri kalanını kısmi yük seviyelerinde geçirmektedir [4]. Motorun optimum çalışma bölgesi ile gerçek çalışma döngüsü arasındaki bu uyumsuzluk, çoklu motor konfigürasyonlarının ele almayı amaçladığı temel verimlilik sorununu oluşturmaktadır.

2.3. Çoklu motor konseptinin teorik temeli

Çoklu motor konfigürasyonunun temel prensibi, güç bölünmesi (power splitting) yoluyla her bir motorun optimal verim bölgesine yakın çalıştırılmasını sağlamaktır. n adet eşit güçlü motor kullanıldığında, düşük güç talebinde yalnızca gerekli sayıda motor çalıştırılır ve her aktif motor, nominal gücüne yakın yükte (yani en verimli bölgede) çalışır. Örneğin, 4 motorlu bir sistemde %25 yükte yalnızca bir motor tam yükte çalıştırılabilir; oysa tek motorlu sistemde motor %25 yükte (düşük verimle) çalışmak zorunda kalır. Bu yaklaşım, motorların ortalama termal verimini artırarak toplam yakıt tüketimini azaltır.

Matematiksel olarak ifade edilecek olursa; tek motorlu bir sistemde toplam güç $P_{toplam} = P_{motor}$ ve motorun verimliliği η (P_{toplam} / P_{nom}) iken, çoklu motor sisteminde n aktif motor için her motorun verimliliği η ($P_{toplam} / (n \times P_{nom_birim})$) olur. n değeri, toplam güç talebine göre dinamik olarak ayarlanarak her aktif motorun η değerinin maksimize edilmesi sağlanır. En önemli avantaj, toplam güç talebinin düşük olduğu durumlarda (örneğin, nominal gücün %30'u), tek bir büyük motorun %30 yükte (düşük verimlilik bölgesi) çalıştırılması yerine, sistemin kalan motorlar tamamen kapatılırken daha küçük bir motoru %90 yükte (yüksek verimlilik bölgesi) çalıştırabilmesidir [8,9].

3. Jeneratör Seti (Genset) Lokomotiflerde Problem Tanımı

3.1. Jeneratör seti (genset) lokomotifleri

Genset lokomotifler, çoklu motor konseptinin en yaygın ve başarılı uygulamasını temsil eder. Bu lokomotifler, tek bir büyük dizel motorun yerine, her biri 500-1200 BG üreten 1-4 adet daha küçük endüstriyel dizel motor-jeneratör seti kullanır [8]. Her motor-jeneratör seti bağımsız olarak çalıştırılıp durdurulabilir. Daha küçük motorlar tipik olarak karayolu kamyonlarından veya endüstriyel güç üretimi uygulamalarından (örneğin, Cummins QSK19, QSK15, QSK50) türetilmiştir ve parça bulunabilirliği, bakım kolaylığı ve mevcut emisyon standartlarına uyumluluk açısından avantajlar sunar. Mikrodenetleyici tabanlı bir kontrol sistemi, anlık güç talebini izler ve gerekli sayıda motor-jeneratör setini otomatik olarak etkinleştirir.

Genset lokomotif konseptinin geliştirilmesinde öncü rol oynayan Union Pacific Railroad'ın mühendisi Mike Iden, 2002 yılında bu fikri ortaya atmıştır [6,7]. National Railway Equipment (NRE) daha sonra N-ViroMotive ürün serisi altında bir dizi jeneratörlü lokomotif geliştirmiş ve ticarileştirmiş, Kuzey Amerika genelindeki I. Sınıf ve bölgesel demiryollarına 250'den fazla ünite teslim etmiştir [8]. En yaygın model olan NRE 3GS21B, her biri 700 BG (522 kW) üreten üç adet Cummins QSK19C motoru kullanarak toplam 2.100 BG (1.570 kW) güç çıkışı sağlamaktadır [8]. Bu lokomotiflerden 180'den fazla üretilmiş olup, BNSF Railway 72, Union Pacific ise 59 adet sipariş vermiştir [6,8].

Genset lokomotiflerin çalışma prensibi şu şekildedir: rölantide sadece bir motor çalışır ve lokomotif belirli bir süre hareketsiz kalırsa, bu motor da otomatik olarak kapanır (otomatik başlatma/durdurma fonksiyonu). Çekiş gücü talebi arttıkça, ek motorlar sırayla çalıştırılır. Her motor nominal gücünde veya ona yakın bir güçte çalışır ve talep azaldığında motorlar ters sırada kapatılır. Bu yaklaşım, çalışan motorların her zaman yüksek verimlilik bölgesinde çalışmasını sağlar [6,8]. Kontrol yazılımı, motorlar arasındaki çalışma saatlerini senkronize ederek dengeli bakım döngüleri sağlar. Motor-jeneratör setleri modülerdir ve arıza durumunda 6 saatten daha kısa sürede değiştirilebilir [8]. Bu modülerlik aynı zamanda, bir motor arızalanırsa, lokomotifin kalan motorlarla düşük güçte çalışmaya devam edebileceği anlamına gelir; bu da operasyonel güvenilirliği önemli ölçüde artırır. Dünyada mevcut başlıca genset lokomotif modelleri ve teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Başlıca genset lokomotif modelleri ve teknik özellikleri

Model	Motor Sayısı	Motor Tipi	Toplam Güç (BG)	Dingil Düzeni	Üretici
NRE 2GS14B	2	Cummins QSK19C	1.400	B-B	NRE
NRE 3GS21B	3	Cummins QSK19C	2.100	B-B	NRE
NRE 3GS21C	3	Cummins QSK19C	2.100	C-C	NRE
NRE 2GS36C-DE	2	Cummins QSK50L	3.600	C-C	NRE
NRE 2GS12B (Tier 4)	2	Cummins QSK15	1.200	B-B	NRE

3.2. Bombardier TRAXX DE ME (Class 245)- ana hat çoklu motorlu lokomotif

Bombardier Transportation (şimdiki adıyla Alstom) tarafından geliştirilen TRAXX DE ME (Dizel-Elektrikli Çok Motorlu Lokomotif), çok motorlu lokomotif konseptinin manevra hizmetinden ana hat yolcu ve yük taşımacılığına genişletilmesini temsil etmektedir [9]. TRAXX modüler lokomotif platformunun dizel versiyonu olan bu lokomotif, 2012 yılında InnoTrans fuarında tanıtılmış ve 2013 yılında DB Regio AG, 200 adede kadar TRAXX DE ME lokomotif için bir çerçeve sözleşmesi imzalamış ve 2024 yılı itibariyle 137 adet lokomotif teslim edilerek hizmete girmiştir [10,11].

TRAXX DE ME, tek bir MTU 16V 4000 motoru yerine dört adet Caterpillar C18 endüstriyel dizel motoru kullanmaktadır. Her bir motor 563 kW (yaklaşık 755 BG) güç üretmekte ve toplam kurulu güç 2.252 kW (yaklaşık 3.062 BG)'dir [9,10]. Lokomotifin maksimum hızı 160 km/saat ve maksimum çekiş gücü 300 kN'dır. Önemli bir avantaj olarak, dört motordan biri arızalansa bile, kalan üç motor maksimum çekiş gücünü sağlamak için yeterlidir ve %100'e yakın bir kullanılabilirlik oranı sunmaktadır [9].

TRAXX DE ME'nin enerji yönetim sistemi, her yük değişimi için en uygun motor kombinasyonunu belirler: hangi motorların etkinleştirileceği ve her birinin hangi yük seviyesinde çalışması gerektiğini hesaplar. Düşük talep koşullarında (örneğin, hafif bir trenle istasyondan kalkış veya düz arazide seyir), yalnızca bir veya iki motor çalışırken, kalan motorlar tamamen kapatılır. En yüksek talep dönemlerinde (örneğin, dik eğimlerde ağır trenler), dört motorun tamamı nominal güçte veya nominal güce yakın bir güçte çalışır. Bombardier, bu konfigürasyonun eşdeğer tek motorlu bir lokomotive göre %10 daha yakıt verimli olduğunu bildirmektedir [9,11]. Technische Universität Dresden ile iş birliği içinde, dört motorun regülasyonu ve birleşik performanslarının optimizasyonu üzerine detaylı çalışmalar yapılmıştır [9].

TRAXX DE ME, AB Aşama IIIB emisyon standartlarını karşılamaktadır [12] ve endüstriyel tip motorların kullanımı, büyük lokomotiflere özgü motorlara kıyasla egzoz son işlem teknolojisini basitleştirir. Modüler mimari ayrıca uzun vadeli stratejik değer sunar: bireysel dizel motor modülleri, bu teknolojiler olgunlaştıkça potansiyel olarak batarya-elektrik veya hidrojen yakıt hücresi modülleriyle değiştirilebilir ve sıfır emisyonlu işletmeye kademeli bir geçişi mümkün kılar [9]. Lokomotif, TRAXX elektrikli lokomotiflerle %75'e varan parça ortaklığına sahiptir; bu, işletme, bakım ve yedek parça tedarikinde önemli maliyet avantajları sağlamaktadır.

3.3. Diğer çoklu motor uygulamaları

Tarihsel açıdan bakıldığında, çoklu motor konsepti demiryollarında yeni değildir. Almanya'nın DB V200 Sınıfı lokomotifi (1956), yedeklilik sağlayan ve hafif yüklü hatlarda tek motorlu işletmeyi mümkün kılan iki adet Maybach MD650 motoru kullanmıştır. Benzer şekilde, 1950'ler-1970'ler arasındaki çok sayıda dizel-hidrolik tasarım, çift motorlu konfigürasyonlar kullanmıştır [2]. Bununla birlikte, günümüzde çoklu motor kullanımı bilinçli bir enerji verimliliği stratejisi olarak benimsenmektedir.

Alstom'un Prima H4 lokomotifi, dört adet motor-jeneratör seti ile çalışan ve gelecekte dizel motorların yakıt hücresi veya batarya modülleriyle değiştirilebilmesine olanak tanıyan modüler bir mimariye sahiptir [13]. Progress Rail (Caterpillar), Brezilya'daki Rumo demiryolu şirketi için GT38H hibrit lokomotiflerini geliştirmiştir; bu lokomotifler dizel motor ve batarya kombinasyonunu modüler bir mimaride birleştirmektedir [14]. Çin'de CRRC Ziyang tarafından geliştirilen HXN6 hibrit lokomotif, 1.250 kW dizel motor gücüne ek olarak 1.175 kW batarya kapasitesiyle manevra ve aktarma hizmetlerine yönelik tasarlanmıştır [15].

4. Yakıt Tüketimi Analizi

4.1. Genset lokomotiflerinde yakıt tasarrufu

Genset lokomotiflerin yakıt tüketimi performansı, çeşitli saha çalışmaları ve üretici verileriyle kapsamlı şekilde belgelenmiştir. ABD Federal Demiryolu İdaresi'nin Lokomotif Emisyon Karşılaştırma Aracı (LECT), kapsamlı yakıt tüketimi verileri sağlamaktadır. (LECT) dokümantasyonuna göre, geleneksel GP/SD serisi dizel manevra lokomotiflerinin genset lokomotiflerle değiştirilmesi durumunda %20-50 arasında yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir [3]. Bu geniş aralık, manevra hizmetinin yoğunluğuna ve lokomotifin kullanım profiline bağlıdır.

Union Pacific Railroad verilerine göre, jeneratörlü lokomotifler benzer hizmette geleneksel dizel lokomotiflere kıyasla %20'den fazla yakıt tasarrufu sağlıyor [6,7]. NRE, MTH Trains'in 3GS21B modelinin, özellikle otomatik başlatma/durdurma fonksiyonu ve yalnızca gerekli sayıda motoru etkinleştirerek güç çıkışını talebe göre ayarlama yeteneği sayesinde, manevra işlemlerinde %40'ın üzerinde yakıt tasarrufu sağladığını bildiriyor [8]. Bu yüksek tasarruf oranları, özellikle rölanti süresinin uzun olduğu manevra hizmetlerinde ortaya çıkmaktadır.

Dağıtık güç (distributed power) konfigürasyonlarında ise lokomotiflerin tren boyunca dağıtılması %4-6 oranında ek yakıt tasarrufu sağlamaktadır [7]; bu durum, çoklu motor yaklaşımının sadece lokomotif seviyesinde değil, tren seviyesinde de verimlilik artışı sağlayabileceğini göstermektedir.

4.2. TRAXX DE ME yakıt verimliliği

Bombardier tarafından yayınlanan verilere göre, TRAXX DE ME (Sınıf 245), eşdeğer tek motorlu TRAXX DE lokomotifine göre yaklaşık %10 daha az yakıt tüketmektedir [9,11]. Bu oran, jeneratörlü lokomotiflerdeki %20-50'lik tasarruftan daha düşük görünse de buradaki karşılaştırma ana hat hizmetinde yapılmıştır. Ana hat hizmetinde, lokomotifler manevra hizmetine göre daha yüksek ortalama yüklerde çalışır, bu nedenle çoklu motor avantajı daha az belirgindir; ancak yine de önemli bir tasarruf elde edilmektedir. Bu avantaj, özellikle hafif yolcu trenleri, rölanti ve frenleme gibi motor gücünün azaltılması gereken koşullarda daha da artmaktadır.

4.3. Hibrit dizel-elektrik lokomotif sistemleri

Çoklu motor konseptinin ötesinde, dizel motor(lar)ın batarya enerji depolama sistemleriyle birleştirildiği hibrit konfigürasyonlar da mevcuttur. GE (General Electric), frenleme enerjisini geri kazanmak ve yeniden kullanmak için rejeneratif frenleme ve yüksek kapasiteli bir batarya bankası kullanan hibrit bir lokomotif geliştirdi. Bu sistem, ana hat hizmetinde %10-15 oranında yakıt tasarrufu ve manevra operasyonlarında daha yüksek tasarruflar sağlamaktadır [14]. Literatürdeki çalışmalar, hibrit dizel-elektrikli lokomotif sistemlerinin geleneksel dizel lokomotiflere kıyasla %16,5-34 oranında yakıt tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir [16,17]. Yenilikçi enerji yönetim stratejileri kullanıldığında, hibrit bir lokomotif sisteminin yakıt ekonomisinin geleneksel yakıtlı bir lokomotive kıyasla %27,22 oranında iyileştirilebileceği ve dinamik programlama ile elde edilen küresel optimuma yalnızca %7,21 oranında yaklaşabileceği bildirilmiştir [18]. Farklı lokomotif konfigürasyonlarında yakıt tasarrufu oranlarının karşılaştırması Tablo 2'de verilmiştir.

GE (General Electric) tarafından geliştirilen hibrit lokomotif, rejeneratif frenleme ve yüksek kapasiteli batarya bankası kullanarak enerji geri kazanımı sağlamaktadır [2]. Dizel jeneratörü lityum iyon batarya paketiyle entegre eden CRRC Ziyang'ın HXN6 hibrit lokomotifi, saha denemelerinde yaklaşık %20 yakıt tasarrufu göstermiştir [15]. Railpower Technologies'in Green

Goat hibrit manevra lokomotifi, geleneksel manevra lokomotiflerine kıyasla %60'a varan yakıt tasarrufu sağlamıştır [19].

Tablo 2. Farklı lokomotif konfigürasyonlarında yakıt tasarrufu karşılaştırması

Konfigürasyon	Yakıt Tasarrufu (%)	Hizmet Türü	Referans/Kaynak
Genset (manevra)	20-50	Manevra/Yol değiştirme	FRA/LECT
NRE 3GS21B	40+	Manevra/Yol değiştirme	NRE/UP
TRAXX DE ME (Class 245)	~10	Ana hat (yolcu/yük)	Bombardier
Dağıtık güç	4-6	Ana hat (yük)	Union Pacific
Hibrit dizel-batarya	16,5-34	Çeşitli	Akademik Çalışmalar
Hibrit (optimum EYS)	27,22	Ana hat (yük)	ScienceDirect
Green Goat (hibrit)	60'a kadar	Manevra	Railpower

5. Emisyon Analizi

5.1. Emisyon standartları

Lokomotif emisyonları, hem ABD'de EPA (Environmental Protection Agency) hem de Avrupa Birliği'nde giderek sıkılaştıran standartlarla düzenlenmektedir [12,20]. ABD'de lokomotif emisyon standartları Tier 0'dan Tier 4'e kadar kademeli olarak uygulanmış olup, Tier 4 standardı NO_x ve PM emisyonlarında Tier 0'a göre %90'ın üzerinde azaltım gerektirmektedir [20,21,22]. AB'de ise Stage I'den Stage V'e kadar benzer bir ilerleme söz konusu olup, Stage IIIB PM limiti 0,025 g/kWh ve Stage IV NO_x limiti 0,4 g/kWh olarak belirlenmiştir. Stage V ile birlikte partikül sayı (PN) limiti de 1×10^{12} /kWh olarak eklenmiştir [12,22,23]. Environmental Protection Agency (EPA) lokomotif emisyon standartları müsaade edilen emisyon limitleri Tablo 3'te sıralanmıştır.

Tablo 3. EPA lokomotif emisyon standartları (hat hizmeti, g/bhp-hr)

Standart	NO _x (g/bhp-hr)	PM (g/bhp-hr)	HC (g/bhp-hr)	CO (g/bhp-hr)
Tier 0	9,5	0,60	1,00	5,0
Tier 1	7,4	0,45	0,55	2,2
Tier 2	5,5	0,20	0,30	1,5
Tier 3	5,5	0,10	0,30	1,5
Tier 4	1,3	0,03	0,14	1,5

5.2. Genset lokomotiflerinde emisyon azaltımı

Çoklu motor konfigürasyonunun emisyon performansı çeşitli bağımsız çalışmalarla doğrulanmıştır. Union Pacific Railroad verilerine göre, genset lokomotifler, aynı hizmette çalışan geleneksel manevra lokomotiflerine kıyasla NO_x emisyonlarında %80'e varan, PM emisyonlarında %90'a varan ve sera gazı (GHG) emisyonlarında %37'ye varan azalma sağlamaktadır [6,7]. Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu (CARB), genset lokomotifleri 'ultra düşük emisyonlu lokomotifler' olarak sınıflandırmıştır [24].

NRE tarafından geliştirilen Tier 4 sertifikalı 2GS12B genset lokomotif, Cummins QSX15 motorlar kullanarak kapsamlı saha testlerinden geçirilmiştir. Bay Area Hava Kalitesi Yönetim Bölgesi (BAAQMD) koordinasyonunda Richmond, California'daki RPRC demiryolu sahasında gerçekleştirilen 3.000 saatlik dayanıklılık testinde, lokomotif 1,175 g/bhp-hr NO_x ve 0,0037729

g/bhp-hr PM emisyon değerlerini kaydetmiştir [24]. Bu değerler, EPA Tier 4 standardının gerektirdiği 1,3 g/bhp-hr NOx ve 0,03 g/bhp-hr PM limitlerinin oldukça altında kalmıştır [20,24].

New York Eyalet Enerji Araştırma ve Geliştirme Otoritesi (NYSERDA) tarafından yürütülen bir demonstrasyon projesinde, rölanli azaltma teknolojileriyle birlikte 50.000 galonun üzerinde dizel yakıt tasarrufu sağlanmış, buna ek olarak 193 kg PM, 14.000 kg NOx ve 554 ton CO₂ emisyon azaltımı belgelenmiştir [25].

5.3. Emisyon azaltım mekanizmaları

Çoklu motor sistemlerinin emisyon azaltım mekanizmaları birkaç temel faktöre dayanmaktadır. Birincisi, ihtiyaç duyulmayan motorların tamamen kapatılması, rölanli emisyonlarını sıfıra indirmektedir. Manevra lokomotiflerinde rölanli süresinin toplam çalışma süresinin büyük bölümünü oluşturduğu düşünüldüğünde, bu tek başına önemli bir emisyon azaltımı sağlar. İkincisi, aktif motorların optimal yük bölgesinde çalıştırılması, yanma sürecinin daha verimli gerçekleşmesini sağlar; bu da daha düşük CO, HC ve PM oluşumuna yol açar. Ayrıca eski, daha az düzenlenmiş lokomotiflere özgü motorların yerine modern, sertifikalı endüstriyel motorların (Tier 3/4 veya Stage IIIB/IV) kullanılması, doğal olarak daha düşük özgül emisyonlar üretir. Üçüncüsü, her bir motorun en yüksek verimlilik noktasına daha yakın çalıştırılması, özgül yakıt tüketimini azaltır; bu da doğrudan birim iş başına daha düşük CO₂ emisyonlarına dönüşür. Dördüncüsü, endüstriyel motorlar lokomotiflere özgü motorlardan çok daha büyük hacimlerde üretildiğinden, seçici katalitik indirgeme (SCR), dizel partikül filtreleri (DPF) ve egzoz gazı devridaimi (EGR) dahil olmak üzere daha gelişmiş emisyon kontrol teknolojilerinden yararlanırlar [8,12,24].

6. Enerji Yönetim Stratejileri

6.1. Kural tabanlı enerji yönetimi

Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri (RBEMS), çoklu motor ve hibrit lokomotif sistemlerinde en yaygın kullanılan gerçek zamanlı kontrol yaklaşımlarıdır. Bu stratejilerde, güç talebi belirli eşik değerlerle karşılaştırılarak motor devreye alma/çıkarma kararları alınır. Tipik bir genset lokomotifinde kural tabanlı strateji şu şekilde çalışır: Güç talebi P1 eşliğinin altında ise yalnızca Motor-1 çalışır; P1 ile P2 arasında Motor-1 ve Motor-2 çalışır; P2'nin üzerinde tüm motorlar devrededir. Histerezis döngüleri, motorların sık açılıp kapanmasını önlemek için uygulanır [16,26].

6.2. Optimizasyon tabanlı enerji yönetimi

Optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri (OBEMS), yakıt tüketimini minimize etmek için matematiksel optimizasyon tekniklerini kullanır. Demiryolu taşımacılığının önceden bilinen zaman çizelgeleri, hız sınırlamaları ve hat eğim profilleri nedeniyle deterministik yapısı, dinamik programlama (DP) gibi global optimizasyon algoritmalarının etkin şekilde uygulanmasına olanak tanır [27]. Yapılan çalışmalarda, DP tabanlı optimal batarya şarj durumu (SoC) referansının enerji yönetim sistemine beslenmesiyle hibrit lokomotif güç aktarma organlarının enerji verimliliğinin önemli ölçüde artırılabilirdiği gösterilmiştir [27].

Sistem optimal verimliliği tabanlı enerji yönetim stratejisi (BOSE) yaklaşımında, üst katmanda tüm çalışma noktalarının optimal verimliliği ve her bileşenin operasyonel durumu çevrimdışı olarak belirlenir; alt katman ise tekerlek koşullarını çevrimiçi olarak tanımlayarak mod seçimi ve tork dağıtımını gerçekleştirir. Bu hiyerarşik yaklaşım, %27,22'ye varan yakıt ekonomisi iyileştirmesi sağlarken, bileşen güvenilirliğini ve kontrol rasyonelliğini de korumaktadır [18].

6.3. Bulanık mantık ve ileri kontrol yöntemleri

Bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejileri, özellikle belirsiz ve değişken çalışma koşullarında etkin sonuçlar vermektedir. İleriye dönük bulanık kontrol (fuzzy look-ahead control) yaklaşımında, rota bilgisi ve hat profili kullanılarak gelecekteki güç taleplerinin öngörülmesi ve buna göre motor/batarya güç dağılımının optimize edilmesi sağlanır. Bu yöntem, GM SD40-2 lokomotifinin hibrit dönüşümü üzerinde yapılan çalışmalarda başarıyla uygulanmıştır [26].

7. Bakım, Maliyet ve Operasyonel Avantajlar

Çoklu motor sistemlerinin yakıt tasarrufu ve emisyon azaltımının ötesinde, bakım, maliyet ve operasyonel açıdan da önemli avantajları bulunmaktadır. Motor-jeneratör setlerinin modüler yapısı, bakım ve onarım süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. NRE genset lokomotiflerinde, bir motor-jeneratör setinin değiştirilmesi 6 saatten kısa sürede tamamlanabilmektedir [8]. Endüstriyel tip motorların (Cummins QSK19C, Caterpillar C18 vb.) kullanılması, yedek parça bulunabilirliğini ve tedarik zinciri güvenilirliğini artırmaktadır [8,9].

TRAXX DE ME'de kontrol yazılımı, tüm motorlar arasında çalışma saatlerini ve ortalama yükü otomatik olarak dengeleyerek bakım döngülerinin eşzamanlı olmasını sağlamaktadır. Bu, planlı bakımın optimize edilmesine ve beklenmedik arıza sürelerinin azaltılmasına katkıda bulunur. Dört motordan birinin arızalanması durumunda lokomotifin üç motorla çalışmaya devam edebilmesi, kullanılabilirlik oranını %100'e yakın seviyeye çıkarmaktadır [9].

Toplam sahip olma maliyeti (TCO) açısından değerlendirildiğinde, çoklu motor lokomotiflerinin satın alma maliyeti geleneksel tek motorlu lokomotiflere kıyasla daha yüksek olabilir; ancak yakıt tasarrufu, düşük bakım maliyetleri, yüksek kullanılabilirlik ve düzenleyici uyumluluk avantajları bu farkı ömür boyu maliyet hesabında telafi etmektedir. Birleşik Krallık'taki değerlendirmelere göre, elektrikli lokomotif motorlarının maliyeti dizel motorlara göre yaklaşık %20 daha düşük, bakım maliyetleri ise %25-35 daha azdır [1].

8. Çoklu Motor Konfigürasyonunun Türkiye'de Uygulanabilirliği

8.1. Türkiye demiryolu ağı ve dizel lokomotif filosunun mevcut durumu

Türkiye, 13.919 km toplam hat uzunluğuna sahip kapsamlı bir demiryolu ağına sahiptir. Son 22 yılda gerçekleştirilen yoğun elektrifikasyon yatırımlarıyla elektrikli hat uzunluğu %237 oranında artırılarak 7.142 km'ye (%51) ulaştırılmıştır [31]. 12. Kalkınma Planı kapsamında elektrikli hat oranının %72'ye çıkarılması hedeflenmekte olup, hâlihazırda 993 km'lik hat kesiminde elektrifikasyon yapım çalışmaları devam etmektedir [31,33]. Bununla birlikte, ağın yaklaşık %49'u (yaklaşık 6.800 km) hâlâ elektrifiye edilmemiş durumdadır ve bu hatlar özellikle Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Karadeniz bölgelerindeki düşük trafik yoğunluğuna sahip uzun mesafeli güzergâhları kapsamaktadır. Bu hatların elektrifikasyonu için gereken yüksek sermaye yatırımları (km başına yaklaşık 0,5-1,5 milyon Euro) ve uzun yapım süreleri göz önüne alındığında, kısa ve orta vadede bu güzergâhlarda dizel-elektrik lokomotif işletmeciliğinin sürdürülmesi kaçınılmaz görünmektedir.

TCDD Taşımacılık A.Ş. dizel lokomotif filosu, farklı dönemlerde ve farklı lisanslarla TÜRASAS (eski adıyla TÜLOMSAS) tarafından üretilmiş çeşitli serilerden oluşmaktadır. Filodaki başlıca dizel-elektrik lokomotif serileri şunlardır: DE 24000 serisi (1.900 HP, MTE-Alstom lisansı, 1970'ten itibaren üretim, 418 adet), DE 22000 serisi (2.000 HP, GM lisansı, 1985-1989, 86 adet), DE 33000 serisi (3.000 HP, EMD lisansı, 2003'ten itibaren, 89 adet) ve DE 36000 serisi Powerhaul (3.700 HP, GM lisansı, 2014-2015, 20 adet) [34]. Sayıştay denetim raporuna göre, dizel ana hat lokomotiflerinin %75'i 30 yaş ve üzerindedir [32]. Özellikle DE 24000 serisinin en

eski birimleri 50 yılı aşkın süredir hizmette olup, bu durum bakım-onarım ve yakıt giderlerinin artmasına ve işletmecilik maliyetlerinin yükselmesine neden olmaktadır. TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin 2024 yılını 25 milyar TL'nin üzerinde net zararla kapatması [32], filo modernizasyonunun ne denli acil bir gereklilik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

8.2. Çoklu motor teknolojisinin Türkiye'ye uygulanabilirliği

Türkiye'nin mevcut demiryolu işletme koşulları, çoklu motor konfigürasyonunun uygulanması için birçok açıdan elverişli bir zemin sunmaktadır. Birincisi, Türkiye'nin coğrafi yapısı geniş yük ve eğim değişkenliğine sahip güzergâhlar içermektedir. Anadolu platosu ve dağlık bölgelerdeki hatlar, lokomotiflerden hem ağır rampa tırmanma hem de uzun düzlük seyir performansı talep etmektedir. Çoklu motor sistemi, bu değişken yük profillerine optimal şekilde uyum sağlayabilir: düzlükte bir veya iki motor yeterli güç sağlarken, rampalarda tüm motorlar devreye girerek maksimum çekiş kuvvetini üretir. Bu esneklik, Türkiye'nin heterojen hat profilinde tek motorlu sistemlere kıyasla önemli yakıt tasarrufu potansiyeli sunmaktadır.

İkincisi, Türkiye demiryolu ağında manevra hizmetleri önemli bir yer tutmaktadır. İstanbul, İzmir, Mersin, İskenderun ve Derince gibi büyük liman bağlantılı terminaller ile Halkalı, Köseköy ve Kayaş gibi büyük marşandiz garlarında yoğun manevra operasyonları yürütülmektedir. Bu tesislerde lokomotiflerin rölanti süreleri toplam çalışma süresinin büyük bölümünü oluşturmaktadır olup, genset tipi çoklu motor lokomotiflerin en yüksek yakıt tasarrufu (%40-50) sağladığı kullanım senaryosuna tam olarak karşılık gelmektedir [3,8]. Ayrıca lojistik merkezler ve organize sanayi bölgelerine demiryolu bağlantılarının güçlendirilmesi planları [33], manevra lokomotif ihtiyacını daha da artıracaktır.

Üçüncüsü, elektrifikasyon geçiş döneminde çoklu motor lokomotifleri stratejik bir köprü teknolojisi olarak işlev görebilir. Elektrifikasyonu planlanan ancak henüz tamamlanmamış hatlarda, çoklu motor dizel lokomotifler hem mevcut dizel işletmeciliğin verimini artırabilir hem de modüler yapıları sayesinde gelecekte dizel motorların batarya modülleri veya yakıt hücreleriyle değiştirilmesine olanak tanıyabilir. TRAXX DE ME'nin Alstom tarafından Prima H4 platformunda gösterdiği gibi [13], bu modüler yaklaşım Türkiye'nin uzun vadeli elektrifikasyon ve karbonsuzlaştırma stratejisiyle tam uyumludur.

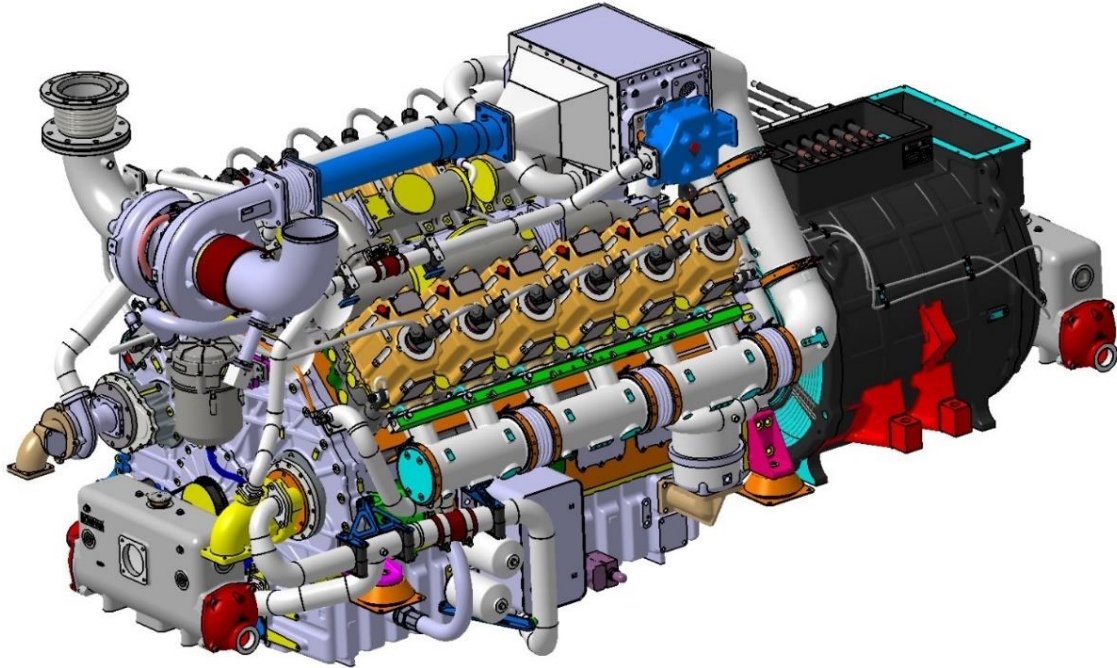
8.3. Türkiye'de genset lokomotifler için dizel motor geliştirme çalışmaları

Türkiye'de TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin envanterinde en çok DE24000 tipi dizel-elektrik lokomotifler mevcuttur ve bu lokomotiflerde kullanılan TLM16V185 tipi Ağır Dizel Motorlar hem teknolojik olarak demode olmaları, parça temininde yaşanan sıkıntılar, yakıt tüketiminin ve emisyonlarının yüksek olması gibi sebeplerle yenileştirilmesi gerekmektedir. 770 kW (2400 HP) nominal maksimum güce sahip olan V tipi, 16 silindirli, indirek püskürtmeli (IDI) bu motor 117G025 numaralı TÜBİTAK-KAMAG projesi kapsamında silindir başlığı, piston, biyel, kam mili ve kam zamanlaması, turboşarj ünitesi, egzoz manifoldu, yağ basınçlandırma sistemi ve hatları yenilenerek direk püskürtmeli (DI) hale dönüştürülmüş ve common rail yakıt püskürtme sisteminin entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Motorun kataloğunda 232 gr/kWh olan verilen özgül yakıt tüketiminin [38] yapılan dinamometrede testleri sonucu 242 gr/kWh olduğu, yapılan geliştirme çalışmaları sonucu ise özgül yakıt tüketimi 205 gr/kWh'a kadar düşürülmüştür. Geliştirilen TLM16V185 tipi ağır dizel motorun dinamometre testleri ve kalibrasyonları tamamlanmış olup, en kısa zamanda TÜRASAŞ tarafından DE24000 tipi bir dizel-elektrik lokomotifte monte edilerek çeşitli iklim koşullarında 60.000 km yol testine tabi tutulacaktır.

Yine aynı proje kapsamında TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen V tipi, 8 silindirli, 30 litre hacimli, 1200 BG (883 kW) gücündeki özgül dizel motorda (Şekil 1) özgül yakıt tüketimi rakip firmaların motorlarından da daha aşağıya düşürülerek 195 g/kWh özgül yakıt tüketimi hedefine



Şekil 2. DE11000 tipi manevra lokomotifine monte edilmek üzere TÜRESAŞ'a teslim edilen milli genset





Şekil 3. TÜBİTAK-RUTE tarafından tasarımı tamamlanan V12, 1800 BG dizel motor ve alternatör seti

TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen özgün V8 dizel motor, askeri ve sivil gemilerin jeneratörlerinde kullanılmak üzere Tübitak-RUTE tarafından %100 hidrojen veya amonyakla çalışacak şekilde yeniden tasarlanmıştır (Şekil 4). Proje Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) tarafından desteklenmekte olup, 2026 yılı içerisinde ilk prototip üretilerek dinamometre testlerine başlanılacaktır.

Proje Hedefleri

 Yakıt: Hidrojen / Amonyak

 8 Silindir – 30,1 L

 600-1800 rpm

 580 kW



Şekil 4. TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen 8 silindirli, 788 BG hidrojen/amonyak motoru

8.4. TÜRASAŞ yerli üretim potansiyeli ve teknoloji transferi

Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş. (TÜRASAŞ), 100 yılı aşkın üretim tecrübesiyle Türkiye'nin demiryolu araç üretimindeki en önemli kuruluşudur. TÜRASAŞ bünyesinde Eskişehir, Sakarya ve Sivas'ta bulunan üretim tesislerinde lokomotif, tren seti, vagon ve alt bileşen üretimi gerçekleştirilmektedir [35]. Kuruluş, 2023 yılından itibaren Eskişehir 5000 (E5000) Milli Elektrikli Anahat Lokomotifinin seri üretimine başlamış olup, 95 adet lokomotif için TCDD Taşımacılık ile sözleşme imzalanmıştır [36]. 2025 yılı sonu itibariyle 15 adet E5000 elektrikli lokomotif TCDD Taşımacılık A.Ş.'ye teslim edilmiş olup, aktif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca 7,2 MW gücünde Milli CoCo Tipi 6 akslı elektrikli ve dizel-elektrikli anahat lokomotifinin konsept ve ön tasarım aşamaları tamamlanmıştır [37]. 2025-2027 yatırım programı kapsamında Eskişehir'de Milli Elektrikli Lokomotif İmalat ve Elektrik Sistemleri Fabrikası, Sakarya'da Milli Elektrikli Tren Seti İmalat ve Test Fabrikası ve Sivas'ta Milli Raylı Sistem Araçları Parça İmalat Fabrikası olmak üzere üç yeni fabrikanın temelleri atılacaktır [35].

TÜRASAŞ'ın mevcut ve planlanan altyapısı, çoklu motor lokomotif üretimi için güçlü bir temel oluşturmaktadır. Kuruluşun dizel motor üretim ve entegrasyon deneyimi (DE 10000K ve DE 6000K manevra lokomotifleri), cer motoru ve cer konvertörü tasarım-üretim yetkinliği ve modüler lokomotif platformu geliştirme kapasitesi, çoklu motor konfigürasyonunun yerli olarak tasarlanıp üretilmesini mümkün kılmaktadır [35,36]. Endüstriyel tip dizel motorların (Cummins, Caterpillar vb.) Türkiye'de geniş servis ve yedek parça ağına sahip olması, çoklu motor sistemlerinin lojistik açıdan da avantajlı olduğunu göstermektedir. Yerli üretim yaklaşımı, döviz tasarrufu sağlamanın yanı sıra, teknoloji transferi ve Ar-Ge yetkinliğinin geliştirilmesine de katkıda bulunacaktır.

Öte yandan, TCDD Taşımacılık'ın 2025 yılında 35 adet dizel-elektrik lokomotif alımı için uluslararası ihaleye çıkması ve ihalenin 274 milyon Euro bedelle Stadler Rail Group'a verilmesi [38], acil filo yenileme ihtiyacını ortaya koymakla birlikte, yerli üretim kapasitesinin değerlendirilmesi konusundaki tartışmaları da beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, çoklu motor konfigürasyonuna sahip yerli lokomotif geliştirme projelerinin TÜRASAŞ'ın Ar-Ge gündemine alınması, hem kısa vadeli filo yenileme ihtiyacını karşılayabilir hem de orta-uzun vadede ihracat potansiyeli oluşturabilir.

8.5. Çevresel, ekonomik ve stratejik faydalar

Çoklu motor konfigürasyonunun Türkiye'de uygulanması, birçok boyutta önemli faydalar sağlayabilir. Çevresel açıdan, Türkiye'nin 2021 yılında taraf olduğu Paris Anlaşması doğrultusunda 2053 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşması için ulaştırma sektöründe köklü dönüşümler gerekmektedir [33]. Demiryolu sektöründe dizel lokomotif emisyonlarının azaltılması, bu hedefe katkı sağlayacak en uygulanabilir adımlardan biridir. Çoklu motor lokomotiflerin mevcut tek motorlu dizel lokomotiflerin yerine konulmasıyla, NOx

emisyollarında %80, PM emisyollarında %90 ve CO₂ emisyollarında %37'ye varan azaltımlar [6,7] hem ulusal emisyollar hedeflerine hem de Avrupa Yeşil Mutabakatı uyum sürecine doğrudan katkı sağlayacaktır.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, çoklu motor lokomotiflerin %20-50 yakıt tasarrufu potansiyeli [3,8], Türkiye'nin enerji ithalatı bağımlılığı dikkate alındığında stratejik bir öneme sahiptir. Türkiye petrol ihtiyacının büyük bölümünü ithal etmekte olup, demiryolu sektöründe sağlanacak yakıt tasarrufu doğrudan döviz tasarrufuna dönüşecektir. TCDD Taşımacılık'ın yıllık 25 milyar TL'yi aşan net zararı [32] göz önüne alındığında, yakıt ve bakım maliyetlerindeki azalma işletme ekonomisine önemli katkı sağlayabilir. Endüstriyel tip motorların kullanılması sayesinde düşen bakım maliyetleri ve modüler yapının sunduğu yüksek kullanılabilirlik oranı, toplam sahip olma maliyetini (TCO) olumlu yönde etkileyecektir.

Stratejik açıdan ise Türkiye'nin Orta Koridor (Trans-Hazar) inisiyatifi kapsamında artan uluslararası demiryolu yük taşımacılığı, verimli ve güvenilir dizel lokomotif filosuna olan ihtiyacı artırmaktadır. Bakü-Tiflis-Kars demiryolu hattı ve İran ile yeniden başlatılan demiryolu bağlantıları gibi uluslararası güzergâhlarda, elektrifiye edilmemiş sınır ötesi kesimlerde yüksek performanslı dizel lokomotifler kritik öneme sahiptir. Çoklu motor konfigürasyonuna sahip lokomotifler, bu güzergâhlarda hem yakıt verimliliği hem de operasyonel güvenilirlik açısından rekabet avantajı sunabilir.

8.6. Uygulama yol haritası önerisi

Çoklu motor konfigürasyonunun Türkiye demiryolu sektöründe başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için aşağıdaki aşamalı yol haritası önerilmektedir. Kısa vadede (2026-2028), TÜRASAŞ bünyesinde mevcut DE 10000K/DE 6000K manevra lokomotifi platformu üzerine ikili veya üçlü motor-jeneratör seti entegrasyonu ile bir prototip genset manevra lokomotifi geliştirilmesi hedeflenmelidir. Bu prototip, İstanbul veya İzmir liman bölgelerindeki manevra hizmetlerinde saha testlerine tabi tutularak performans verileri toplanmalıdır.

Orta vadede (2028-2032), prototip testlerinden elde edilen sonuçlara dayanarak, TRAXX DE ME benzeri dört motorlu ana hat lokomotifi tasarımının TÜRASAŞ tarafından geliştirilmesi ve seri üretime hazırlanması planlanmalıdır. Bu aşamada, Milli CoCo lokomotif projesinin dizel-elektrik versiyonuna çoklu motor mimarisinin entegre edilmesi değerlendirilmelidir [37]. Ayrıca enerji yönetim sistemi yazılımının Türkiye'nin spesifik hat profilleri ve işletme koşullarına göre optimize edilmesi için üniversite-sanayi iş birliği projeleri (TÜBİTAK 1505, TEYDEB vb.) başlatılmalıdır.

Uzun vadede (2032-2040), çoklu motor platformunun modüler yapısından yararlanarak dizel motor modüllerinin kademeli olarak batarya-elektrik veya hidrojen yakıt hücresi modülleri ile değiştirilmesi suretiyle sıfır emisyonlu lokomotif teknolojisine geçiş sağlanmalıdır. Bu yaklaşım, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefiyle tam uyumlu bir teknoloji geçiş yolu sunmakta ve yatırım riskini minimize etmektedir. Avrupa'daki Alstom, Siemens ve Stadler gibi üreticilerin benzer modüler geçiş stratejilerini benimsemiş olması [9,13,14], bu yaklaşımın teknik ve ticari açıdan uygulanabilirliğini teyit etmektedir.

9. Tartışma ve Değerlendirme

Çoklu motor konfigürasyonlarının avantajları ve sınırlamaları bir arada değerlendirildiğinde, bu teknolojinin özellikle belirli kullanım senaryolarında güçlü avantajlar sunduğu görülmektedir. Manevra hizmetinde, rölanti süresinin uzun olması ve güç talebinin geniş bir aralıkta değişmesi nedeniyle genset lokomotifleri %40-50'ye varan yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir [3,7,8]. Ana

hat hizmetinde ise TRAXX DE ME benzeri konfigürasyonlar %10 civarında tasarruf sunarken, hibrit sistemlerle entegrasyon bu oranı %27'ye kadar yükseltebilmektedir [9,18].

Bununla birlikte, çoklu motor sistemlerinin bazı teknik zorlukları da bulunmaktadır. Birden fazla motorun koordineli çalıştırılması, karmaşık bir elektronik kontrol sistemi gerektirmektedir. TRAXX DE ME'nin ilk hizmete giriş döneminde elektrik sistemi aşırı ısınması, partikül filtrelerin yazılım hataları nedeniyle tıkanması ve motor yağı/soğutma suyu sızıntıları gibi sorunlar yaşanmış olup, bunlar 2019'a kadar süren aksaklıklara neden olmuştur [9]. Bu deneyim, çoklu motor sistemlerinin güvenilirliğinin olgunlaşma sürecine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Ayrıca, çoklu motor konfigürasyonlarının toplam güç çıkışı, aynı boyut ve ağırlıktaki tek motorlu lokomotiflere kıyasla sınırlı kalabilmektedir. NRE'nin en güçlü genset tasarımı olan 2GS36C-DE, 3.600 HP toplam güçle sınırlı kalmış olup, modern hat lokomotiflerinin 4.000-4.400 HP güç aralığına ulaşamamıştır [8]. Bu nedenle ağır yük hizmetinde çoklu motor konseptinin tek başına yeterli olmayabileceği ve hibrit sistemlerle desteklenmesi gerekebileceği değerlendirilmektedir.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, çoklu motor konfigürasyonu TCDD'nin yaşlanan dizel lokomotif filosunun modernizasyonu için stratejik bir fırsat sunmaktadır. Dizel ana hat lokomotiflerinin %75'inin 30 yaş üzerinde olması [32] ve TCDD Taşımacılık'ın kronik mali zararları, filo yenileme sürecinde hem yakıt verimliliği hem de bakım maliyeti optimizasyonunu zorunlu kılmaktadır. Çoklu motor teknolojisi, elektrifikasyonu tamamlanmamış yaklaşık 6.800 km'lik hat ağında [31] geçiş döneminde emisyon azaltımı sağlarken, TÜRASAS'ın yerli üretim kapasitesiyle [35,36] döviz tasarrufu ve teknolojik bağımsızlık hedeflerine de hizmet edebilir. Bununla birlikte, Türkiye'nin dağlık coğrafyası ve ağır yük taşımacılığı gereksinimleri, çoklu motor sistemlerinin hibrit enerji depolama ile desteklenmesini gerekli kılabilir.

Gelecek perspektifinden bakıldığında, çoklu motor konfigürasyonlarının en büyük potansiyeli, hibrit güç aktarma organları ve alternatif yakıtlarla entegrasyonunda yatmaktadır. TRAXX DE ME'nin modüler mimarisi, gelecekte dizel motorların hidrojen yakıt hücreleri, batarya modülleri veya alternatif yakıtlı motorlarla değiştirilmesine olanak tanımaktadır [9,13]. Bu esneklik, demiryollarının karbonsuzlaşma sürecinde geçiş teknolojisi olarak çoklu motor konfigürasyonlarını stratejik bir konuma yerleştirmektedir.

10. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, dizel-elektrik lokomotiflerde tek büyük dizel motor yerine birden fazla küçük dizel motor kullanılmasının yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

(1) Çoklu motor konfigürasyonları, çalışma koşullarına bağlı olarak %10-50 arasında yakıt tasarrufu sağlamaktadır [3,7,8,9]. En yüksek tasarruf oranları (%40-50), rölanti süresinin uzun olduğu manevra hizmetinde elde edilmektedir. Ana hat hizmetinde ise %10 civarında tasarruf sağlanmakta, hibrit sistemlerle entegrasyon bu oranı %27'ye kadar artırabilmektedir [18].

(2) Emisyon azaltımı açısından, genset lokomotifler NO_x emisyonlarında %80, PM emisyonlarında %90 ve sera gazı emisyonlarında %37'ye varan azaltımlar sağlamıştır [6,7,24]. NRE'nin Tier 4 sertifikalı genset lokomotifi, 3.000 saatlik saha testinde EPA Tier 4 standartlarının çok altında emisyon değerleri kaydetmiştir [24].

(3) Çoklu motor sistemleri, modüler yapıları sayesinde yüksek kullanılabilirlik oranları (%100'e yakın), düşük bakım süreleri ve esnek güç yönetimi avantajları sunmaktadır [8,9]. Endüstriyel tip motorların kullanılması, yedek parça tedariğini kolaylaştırmakta ve bakım maliyetlerini düşürmektedir.

(4) Enerji yönetim stratejilerinin optimizasyonu, çoklu motor ve hibrit sistemlerin verimlilik potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmada kritik öneme sahiptir [18,26,27]. Dinamik programlama, bulanık mantık ve hiyerarşik kontrol yaklaşımları bu alanda umut verici sonuçlar üretmektedir.

(5) Çoklu motor konfigürasyonları, modüler mimarileri sayesinde gelecekte dizel motorların alternatif güç kaynaklarıyla (hidrojen yakıt hücresi, batarya, alternatif yakıtlar) değiştirilmesine olanak tanımakta [9,13,14] ve demiryollarının karbonsuzlaşma sürecinde stratejik bir geçiş teknolojisi rolü üstlenmektedir.

Gelecek çalışmalar için; farklı hizmet profilleri ve hat koşullarına göre optimal motor sayısı ve güç dağılımının belirlenmesi, yapay zekâ tabanlı ileri enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi, çoklu motor sistemlerinin hidrojen ve amonyak gibi alternatif yakıtlarla entegrasyonunun araştırılması ve Türkiye demiryolu ağına özgü çoklu motorlu lokomotif tasarımlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.

Türkiye özelinde, çoklu motor konfigürasyonu TCDD'nin yaşlanan dizel lokomotif filosunun modernizasyonu ve 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşılması için stratejik bir teknoloji seçeneği olarak değerlendirilmelidir. TÜRASAS'ın mevcut üretim altyapısı ve yerli lokomotif geliştirme deneyimi, çoklu motor lokomotiflerinin Türkiye'de tasarlanıp üretilmesi için uygun bir zemin sunmaktadır [35,36]. Kısa vadede manevra hizmetleri için genset lokomotif prototipi geliştirilmesi, orta vadede ana hat çoklu motor lokomotif üretilmesi ve uzun vadede modüler yapının sıfır emisyonlu teknolojilere geçişi desteklemesi şeklinde kurgulanan aşamalı bir yol haritası, Türkiye demiryolu sektörünün sürdürülebilir dönüşümüne önemli katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- [1] EESI, "Electrification of U.S. Railways: Pie in the Sky, or Realistic Goal?", Environmental and Energy Study Institute, 2017.
- [2] Britannica, "Locomotive – Diesel, Electric, Hybrid", Encyclopedia Britannica, Updated 2024.
- [3] Federal Railroad Administration (FRA), "Locomotive Emissions Comparison Tool (LECT): Emissions Data Documentation", December 2023.
- [4] North Carolina State University, "Evaluation of Locomotive Emissions Reduction Strategies", NCDOT Project 2016-20, Final Report.
- [5] C. Marin, M. Radulescu, "Locomotive Diesel Engine Operation with Optimal Specific Fuel Consumption", Procedia Manufacturing, Vol. 46, pp. 270-277, 2020.
- [6] Union Pacific Railroad, "Low-Emissions Locomotive Technology Brings Unique Challenges", Inside Track, October 2021.
- [7] Union Pacific Railroad, "How Are Locomotives Getting More Fuel Efficient for the Railroad Industry?", UP Technology Report, 2022.
- [8] National Railway Equipment (NRE), "N-ViroMotive Product Line – Ultra-Low Emitting Locomotives", NRE Technical Documentation, 2020.
- [9] K. Barrow, "Four into One: Bombardier's Multi-Engine Traxx DE ME", International Railway Journal, September 2018.
- [10] Bombardier Transportation, "TRAXX DE Multi-Engine Locomotive – Frame Contract with DB Regio AG for 200 Locomotives", Press Release, April 2011.
- [11] Sudostbayernbahn, "Bombardier Delivers TRAXX Diesel Multi-Engine Locomotives", Mass Transit Magazine, 2014.
- [12] European Commission, "Directive 2004/26/EC – Emission Standards for Non-Road Mobile Machinery", Official Journal of the European Union, 2004.
- [13] J. de Graaf et al., "Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains", Energies, Vol. 14, No. 18, 5920, 2021.
- [14] Progress Rail (Caterpillar), "Hybrid Diesel/Battery Electric Locomotives to Support Customers' Emission Reduction Goals", Press Release, InnoTrans Berlin, 2022.

- [15] CRRC Ziyang Co., "HXN6 Hybrid Locomotive Technical Specifications", Railway Technology, July 2022.
- [16] T. Din, S. Hillmansen, "Operation and energy evaluation of diesel and hybrid trains with smart switching controls", Control Engineering Practice, Vol. 117, 2021, 104927.
- [17] J. Milošević, J. Deur, Z. Herold, "Comparative analysis of conventional diesel-electric and hypothetical battery-electric heavy haul locomotive operation", Energy, Vol. 219, 2021, 119524.
- [18] Z. Wang, X. Li, Y. Zhang, "Novel hybrid power system and energy management strategy for locomotives", Applied Energy, Vol. 348, 2023, 121448.
- [19] Railpower Technologies, "Green Goat Hybrid Switching Locomotives", Technical Report, 2005.
- [20] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Regulations for Emissions from Locomotives", 40 CFR Part 1033, 2008.
- [21] Bureau of Transportation Statistics, "Federal Exhaust Emissions Standards for Locomotives", U.S. DOT, 2016.
- [22] DieselNet, "Emission Standards: USA – Nonroad Diesel Engines" and "EU – Nonroad Engines", Online Database, 2024.
- [23] ICCT, "European Stage V Non-Road Emission Standards", Policy Update, November 2016.
- [24] California Air Resources Board (CARB), "NRE Tier 4 GenSet Locomotive Final Report and Addendum", July 2015.
- [25] New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), "Demonstration of Idle Reduction Technology for Short-Line Railroads", Technical Report, 2012.
- [26] M. Saadat, M. Esfahanian, M.H. Saket, "Reducing fuel consumption of diesel-electric locomotives using hybrid powertrain and fuzzy look-ahead control", Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit, Vol. 231, No. 4, pp. 406-418, 2017.
- [27] J. Škrbina, J. Deur, "Optimized Energy Management Control of a Hybrid Electric Locomotive", Machines, Vol. 11, No. 6, 589, 2023.
- [28] M. Ghaviha, J. Bohlin, C. Holmberg, E. Dahlquist, "Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive", Cleaner Engineering and Technology, Vol. 22, 2024, 100791.
- [29] J. Kim, Y. Lee, S. Choi, "A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Diesel Locomotives", Applied Sciences, Vol. 10, No. 12, 4093, 2020.
- [30] S. Park et al., "Investigation of real operation gaseous emissions from a diesel locomotive", Transportation Research Part D, Vol. 108, 2022, 103335. TCDD Genel Müdürlüğü, "Demiryolu Ağı ve Elektrifikasyon Verileri", TCDD Resmi İstatistikler, 2024. (Elektrikli hat uzunluğu 7.142 km, toplam hat uzunluğu 13.919 km).
- [31] Sayıştay Başkanlığı, "TCDD Taşımacılık A.Ş. 2024 Yılı Denetim Raporu", Ankara, 2025. (Dizel ana hat lokomotiflerinin %75'i 30 yaş üzerinde, 2024 net zarar: 25 milyar TL).
- [32] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, "On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)", Ankara, 2023. (Elektrikli hat oranı hedefi: %72, sinyalli hat oranı hedefi: %80).
- [33] TÜRASAŞ, "Yeni Nesil Lokomotifler – Teknik Özellikler", TÜRASAŞ Resmi Web Sitesi, 2024. (DE 36000 Powerhaul, DE 10000K, DE 6000K teknik verileri).
- [34] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, "Yerli ve Milli Lokomotif İçin 3 Yeni Fabrika", Basın Açıklaması, Aralık 2024.
- [35] TÜRASAŞ – TCDD Taşımacılık, "Eskişehir 5000 Elektrikli Anahat Lokomotifi Temin Sözleşmesi", 95 adet lokomotif üretimi, 2024.
- [36] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, "Milli CoCo Tipi 6 Akıllı Anahat Lokomotifi Projesi", Tasarım hedefi: 7,2 MW güç, Eylül 2025.
- [37] TCDD Taşımacılık A.Ş., "35 Adet Dizel-Elektrik Anahat Lokomotifi Alım İhalesi", İhale Sonucu: Stadler Rail Group, 274 milyon Euro, Ekim 2025.
- [38] TLM16V185 Dizel Motorun Teknik Özellikleri, https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/ek.tlm16v185_motor_katalogu.pdf

Özgeçmiş**Kadir AYDIN**

Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 1983 yılında Lisans derecesini, 1986 yılında da Yüksek Lisans derecesini almıştır. Doktora çalışmalarını Liverpool Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde 1993 yılında tamamlamıştır. 1993 yılında Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yardımcı Doçent, 1995 yılında Doçent, 2001 yılında da Profesör olmuştur. Nisan 2025'de kamudan emekli olarak Ostim Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Profesör ve Bölüm Başkanı olarak göreve başlamıştır. Araştırma alanları İçten Yanmalı Motorlar, Hibrit ve Elektrikli Taşıtlar.

E-Posta: kadir.aydin@ostimteknik.edu.tr

**İlhami PEKTAŞ**

ODTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümünden 1983 yılında lisans, 1988 yılında Yüksek Lisans derecesini almıştır. Doktora çalışmalarını Gazi Üniversitesi Makine bölümünde 1994 yılında tamamlamıştır. Erkunt Döküm Makine Fabrikasında başladığı iş hayatına sırasıyla Tübitak-SAGE, Mitaş Enerji, Ereğli Çelik Çekme Fabrikası-ÇELBOR, Mitaş Poligon Fabrikasında görev yapmıştır. Halen Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelenmesinde Koordinatör ve Ostim Vakfı mütevelli heyeti üyesi olarak iş hayatına devam etmektedir. İlgi alanları: Malzeme, Yüzey Kaplama İşlemleri, Enerji, Raylı Sistemlerdir.

E-Posta: ilhami.pektas@ostim.org.tr

Beyanlar:

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, yapay zekâ tabanlı araçlardan yalnızca yazım dili, dilbilgisi ve anlatımın iyileştirilmesi amacıyla yararlanılmıştır. Yapay zekâ araçları, literatür taraması, çalışmanın bilimsel içeriğinin oluşturulması, veri analizi, sonuçların elde edilmesi veya yorumlanması süreçlerinde kullanılmamıştır. Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Kadir AYDIN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Yazma, Görselleştirme, Kontrol. İlhami PEKTAŞ: Gözden geçirme ve düzenleme.