



TCDD DE24000 ve DE36000 tipi Dizel-Elektrik Genset Lokomotiflerde Çoklu Motor Senkronizasyonu ve Enerji Yönetim Sistemi Tasarımı

Kadir AYDIN¹, İlhami PEKTAŞ²

¹ OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
² Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelemesi (ARUS), OSTİM, Ankara, Türkiye

*kadir.aydin@ostimteknik.edu.tr

(Alınış/Received: 30.03.2026, Kabul/Accepted: 03.05.2026, Yayımlama/Published: 03.05.2026)

Öz: Bu çalışma, dizel-elektrik genset lokomotiflerde çoklu motor-jeneratör setlerinin elektriksel senkronizasyonu, güç elektroniği topolojileri ve enerji yönetim sistemi (EYS) tasarımını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmanın özgün katkısı, TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen 1200 BG (883 kW) gücündeki V8 özgün dizel motorun 2 adetli (DE24000, toplam 1766 kW) ve 3 adetli (DE36000, toplam 2649 kW) çoklu motor konfigürasyonlarında kullanılması için detaylı bir sistem mimarisi önermesidir. Araştırmada; 750-1200V ortak DC bara mimarisi üzerinden jeneratör senkronizasyonu, pasif diyot doğrultucu (%30 THD, 0,85-0,95 güç faktörü) ve aktif ön uç (AFE) dönüştürücü (<%5 THD, birime yakın güç faktörü, ~2 kat maliyet) alternatifleri, IGBT cer invertör konfigürasyonları, kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri ile fonksiyonel güvenlik gereksinimleri (EN 50126/50128/50129, SIL 2) detaylı olarak ele alınmaktadır. NRE 3GS21B (3 motorlu, 182 adet üretilmiş, %40+ yakıt tasarrufu), Bombardier TRAXX DE ME Class 245 (4 motorlu, 137 adet, ~%10 tasarruf) ve CRRC HXN6 hibrit lokomotif (~%20 tasarruf, 180 ton/yıl yakıt azaltımı) deneyimleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Optimizasyon tabanlı EYS stratejilerinin kural tabanlı yaklaşımlara kıyasla %5-27 ek yakıt tasarrufu potansiyeli sunduğu, SiC yarı iletken teknolojisinin cer sistem verimini %35'e varan oranlarda artırdığı belirlenmiştir. Sonuçlar, 3 motorlu konfigürasyonun (DE36000) kontrol karmaşıklığı, %33/%67/%100 güç granülaritesi ve %67 arıza yedekliliği açısından en uygun dengeyi sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Genset lokomotif, Çoklu motor senkronizasyonu, DC bara mimarisi, Enerji yönetim sistemi, Güç elektroniği, Cer invertör, CAN bus, Fonksiyonel güvenlik

Design of Multiple Motor Synchronization and Energy Management System in TCDD DE24000 and DE36000 Type Diesel-Electric Genset Locomotives

Abstract: This study comprehensively examines the electrical synchronization of multiple engine-generator sets, power electronics topologies, and energy management system (EMS) design in diesel-electric genset locomotives. The original contribution is proposing a detailed system architecture for utilizing the indigenously developed 1200 HP (883 kW) V8 diesel engine by TÜBİTAK-RUTE in 2-engine (DE24000, total 1,766 kW) and 3-engine (DE36000, total 2,649 kW) configurations. The research addresses 750–1,200V common DC bus synchronization, passive diode rectifier vs. active front-end converter alternatives, rule-based and optimization-based EMS strategies, and functional safety requirements (EN 50126/50128/50129, SIL 2). Comparative analysis of NRE 3GS21B (182 units, 40%+ fuel savings), TRAXX DE ME Class 245 (137 units, ~10% savings), and CRRC HXN6 hybrid (~20% savings) reveals that the 3-engine configuration offers the optimal balance with 33%/67%/100% power granularity and 67% fault redundancy. Optimization-based EMS strategies provide 5–27% additional fuel savings over rule-based approaches, while SiC semiconductor technology can improve traction system efficiency by up to 35%.

Keywords: Genset locomotive, Multi engine synchronization, DC bus architecture, Energy management system, Power electronics, Traction inverter, CAN bus, Functional safety

Atıf için/Cite as: K. Aydın, İ. Pektaş, "TCDD DE24000 ve DE36000 tipi dizel-elektrik genset lokomotiflerde çoklu motor senkronizasyonu ve enerji yönetim sistemi tasarımı" *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 24, no. 1919326, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1919326

1. Giriş

Dizel-elektrik lokomotiflerde tek büyük dizel motorun birden fazla küçük dizel motorla değiştirilmesi konsepti (çoklu motor / genset konfigürasyonu), yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı açısından kanıtlanmış avantajlar sunmaktadır. Yazarların önceki çalışmasında [1], çoklu motor konfigürasyonlarının manevra hizmetinde %40-50, ana hat hizmetinde ise %10 civarında yakıt tasarrufu sağladığı, NO_x emisyonlarında %80 ve PM emisyonlarında %90'a varan azaltımlar elde edildiği kapsamlı bir literatür taramasıyla ortaya konulmuştur. Ayrıca, TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen 1200 BG (883 kW) gücündeki V8 özgün dizel motorun çoklu motor konfigürasyonunda kullanılarak DE24000 ve DE36000 tipi genset lokomotifler geliştirilmesi önerilmiştir [1].

Ancak, birden fazla dizel motor-jeneratör setinin tek bir lokomotif platformunda nasıl elektriksel olarak senkronize edileceği, güç akışının hangi topolojilerle yönetileceği, enerji yönetim sisteminin hangi algoritma ve kontrol stratejileriyle çalışacağı ve tüm bu alt sistemlerin hangi iletişim protokolleriyle koordine edileceği kritik mühendislik soruları olarak yanıt beklemektedir. Bombardier TRAXX DE ME (Class 245) lokomotifinin devreye alma sürecinde yaşanan ciddi sorunlar—yazılım hatalarından kaynaklanan dizel partikül filtresi (DPF) tıkanmaları, elektrik sistemi aşırı ısınmaları ve yangın olayları [2,3] çoklu motor sistem entegrasyonunun karmaşıklığını somut biçimde ortaya koymaktadır.

Son yıllarda hibrit ve çoklu güç kaynaklı lokomotif enerji yönetimi alanında önemli akademik ilerleme kaydedilmiştir. Škrbina ve Deur [4], hibrit elektrikli lokomotif için dinamik programlama tabanlı optimizasyon ile %22,9 yakıt tasarrufu elde etmiştir. Wang vd. [5], hiyerarşik BOSE enerji yönetim stratejisi önererek %27,22 yakıt iyileştirmesi sağlamıştır. Herrera-Jaramillo vd. [6], bulanık mantık-MPC kombinasyonu ile çift modlu lokomotifte %95 elektriksel verimlilik göstermiştir. Cipek vd. [7], gerçekçi dağlık hat koşullarında batarya-hibrit dizel-elektrik lokomotifinde %16,5 yakıt tasarrufu potansiyeli belirlemiştir. Tang vd. [8], takviyeli öğrenme tabanlı enerji yönetim stratejilerinin hibrit güç sistemlerindeki uygulamalarını kapsamlı bir şekilde gözden geçirmiştir. Qin vd. [9], cer sistemi termal karakteristiklerini dikkate alan derin takviyeli öğrenme tabanlı enerji yönetim stratejisi geliştirmiş, Pan vd. [10] ise hibrit elektrikli araçlar için son dönem enerji yönetim stratejilerini derleyerek kural tabanlı, optimizasyon tabanlı ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımların karşılaştırmalı analizini sunmuştur. Bununla birlikte, bu çalışmaların büyük çoğunluğu tek motorlu dizel + batarya/yakıt hücresi hibrit konfigürasyonlarına odaklanmakta olup, çoklu dizel motor-jeneratör setlerinin senkronizasyonu ve koordineli kontrolüne özgü mühendislik sorunlarını ele almamaktadır.

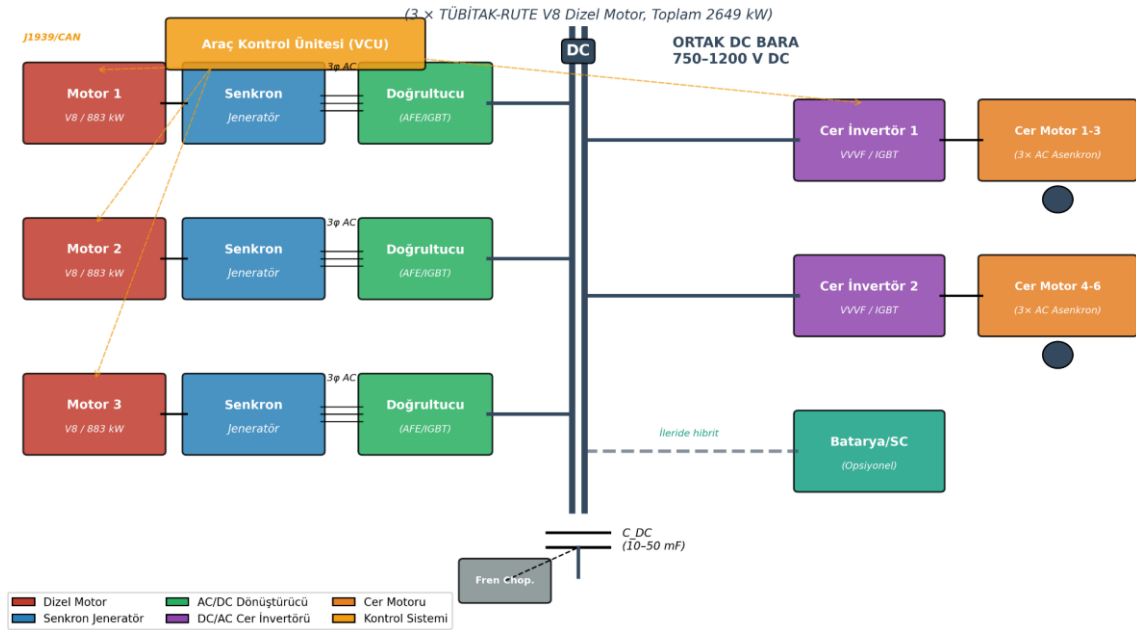
Bu çalışma, mevcut literatürden üç temel noktada ayrılmaktadır. Birincisi, mevcut çalışmalar ağırlıklı olarak tek motor + enerji depolama hibrit sistemlerine odaklanırken [4,5,6,7], bu çalışma birden fazla bağımsız dizel motor-jeneratör setinin ortak DC bara üzerinden elektriksel senkronizasyonu ve koordineli yük paylaşımı sorunlarını spesifik olarak ele almaktadır. İkincisi, literatürdeki enerji yönetim çalışmaları genellikle ideal veya benzetim ortamında değerlendirilirken, bu çalışma NRE 3GS21B ve TRAXX DE ME'nin gerçek dünya operasyonel deneyimlerinden, özellikle yazılım kaynaklı DPF tıkanması, termal yönetim sorunları ve yangın olaylarından [2,3] çıkarılan tasarım derslerini sistematik olarak analiz etmektedir. Üçüncüsü, bu çalışma genel bir teorik çerçeveye sınırlı kalmayıp, TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen ve dinamometre testleri tamamlanmış [1] özgün V8 dizel motorun DE24000 (2×883 kW) ve DE36000 (3×883 kW) konfigürasyonlarında kullanılması için; DC bara gerilim seçimi, doğrultucu topolojisi, cer invertör konfigürasyonu, EYS algoritma mimarisi, iletişim protokolü hiyerarşisi ve fonksiyonel güvenlik gereksinimlerini kapsayan somut bir sistem mimarisi önermektedir.

2. DC Bara Mimarisi ve Elektriksel Senkronizasyon

2.1. Ortak DC bara topolojisi

Başarılı tüm genset lokomotif uygulamalarında benimsenen temel mimari karar, ortak DC bara (common DC bus) topolojisidir [2,11,12]. Bu mimaride, her motor-jeneratör seti kendi özel doğrultucu ünitesi (pasif diyot köprüsü veya aktif ön uç dönüştürücü) aracılığıyla paylaşımlı bir DC bağlantı hattına besleme yapar. DC akımın frekansı ve fazı olmadığından, geleneksel AC paralelleme için gerekli olan gerilim büyüklüğü, frekans, faz açısı ve faz sırası eşleştirmesi gereksizdir [12].

NRE 3GS21B uygulamasında, üç adet Cummins QSK19C motoru (her biri 700 BG) GM Model 752RDL DC jeneratörleriyle eşleştirilmiş olup, çıkışlar ortak DC barada birleştirilerek dört adet GM D77/78 DC cer motorunu beslemektedir [11,13]. Bombardier TRAXX DE ME (Class 245) ise daha gelişmiş bir AC-DC-AC mimarisi kullanmaktadır: dört adet Caterpillar C18 motoru (her biri 563 kW) senkron alternatörleri, IGBT tabanlı MITRAC cer dönüştürücüleri aracılığıyla ortak DC bağlantı hattına beslemekte, buradan da VVVF invertörler AC asenkron cer motorlarını sürmektedir [2,3,14]. Önerilen DE36000 konfigürasyonu için tasarlanan ortak DC bara mimarisi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. DE36000 genset lokomotif için ortak DC bara mimarisi (3 × TÜBİTAK-RUTE V8 dizel motor)

2.2. DC barada yük paylaşımı mekanizmaları

Pasif diyot doğrultucularda, her jeneratörün bara akımına katkısı, doğrultulmuş çıkış geriliminin bara gerilimine göre konumuna göre belirlenir, daha yüksek çıkış gerilimi daha fazla akım teslimatı anlamına gelir. Aktif ön uç (AFE) dönüştürücülerle ise merkezi lokomotif kontrol bilgisayarını, her motorun devir/güç ayar noktasını ve her AFE'nin güç referansını doğrudan komuta eder [2,14]. Bu durumda lokomotif kontrol sistemi, kaç motorun çalışacağına ve hangi güç seviyesinde çalışacağına karar veren üst düzey bir Güç Yönetim Sistemi işlevi görür.

2.3. Yumuşak yükleme/boşaltma prosedürleri

Jeneratör bağlantısı ve ayrılması sırasında geçici aşırı akımları önlemek için yumuşak yükleme (soft-loading) ve yumuşak boşaltma (soft-unloading) prosedürleri uygulanır. Bağlantı sırasında: motor çalıştırılarak kararlı çalışma devrine ulaşılır; jeneratör uyarımı çıkış gerilimini oluşturur, bir ön şarj devresi (seri direnç) doğrultucu DC kapasitörlerinin bara gerilimine eşleşmesi sırasında akım sınırlaması yapar; gerilim farkı eşik değerinin altına düştüğünde ana kontaktör kapanır ve kontrol sistemi güç çekimini 5-15 saniye içinde kademeli olarak artırır [2,11]. Ayrılma sırasında ise yük önce azaltılır, uyarım düşürülür ve kontaktör sıfıra yakın akımda açılır.

3. Güç Elektronik Topolojileri

3.1. Doğrultucu/dönüştürücü alternatifleri

Doğrultucu topolojisi seçimi kritik bir mühendislik ödünleşimini temsil etmektedir. Pasif 6 darbeli diyot doğrultucular en düşük maliyet, en yüksek güvenilirlik ve kontrol karmaşıklığı sunmaz; ancak tek yönlüdür (rejeneratif yetenek yoktur), yaklaşık %30 toplam harmonik bozulma (THD) üretir ve güç faktörü 0,85-0,95 aralığındadır. On iki darbeli konfigürasyonlar, 30° faz kayması ile iki köprü kullanarak THD değerini ~%10'a düşürür [12,15]. Aktif ön uç (AFE) dönüştürücüler ise IGBT'ler kullanarak çift yönlü güç akışı, birime yakın güç faktörü, %5'in altında THD ve aktif DC bara gerilim regülasyonu sağlar; ancak yaklaşık 2 kat maliyet artışı ve daha karmaşık kontrol gereksinimleri getirir [14,15].

TRAXX DE ME, IGBT tabanlı MITRAC dönüştürücüleri (AFE yaklaşımı) kullanırken, NRE 3GS21B daha basit diyot doğrultucuları DC jeneratörlerle birlikte kullanmaktadır [2,11]. Önerilen DE24000/DE36000 konfigürasyonları için seçim, rejeneratif frenleme yeteneğinin gerekli olup olmadığına bağlıdır.

3.2. DC bara gerilim seviyesi ve cer invertör konfigürasyonları

Önerilen konfigürasyonlar için DC bara gerilimi 750-1200V DC aralığında hedeflenmelidir. Bu aralık, orta güçlü dizel-elektrik lokomotifler (1766-2649 kW toplam) için uygundur ve cer invertörlerinde standart 1700V sınıfı IGBT'lerin kullanılmasına olanak tanır [12,15]. Daha yüksek gerilim, verilen güç için akımı azaltarak daha küçük iletkenler ve düşük I²R kayıpları sağlar.

Cer invertör konfigürasyonları arasında; 2 seviyeli invertörler (3 fazlı köprü başına 6 IGBT, 3,3 kV IGBT'lerle ~1800V'a kadar DC bara için standart kanıtlanmış teknoloji) ve 3 seviyeli NPC (Nötr Nokta Kenetlemeli, kenetleme diyotlarıyla 12 IGBT, daha iyi harmonik performans, azaltılmış dv/dt stresi ve düşük anahtarlama kayıpları) yer almaktadır [14,15]. Bombardier'nin en son MITRAC Power 1500 nesli, silisyum karbür (SiC) yarı iletkenler kullanarak %35 enerji azaltımı, 19 dB düşük gürültü emisyonu ve %25 düşük yaşam döngüsü maliyeti elde etmektedir [14].

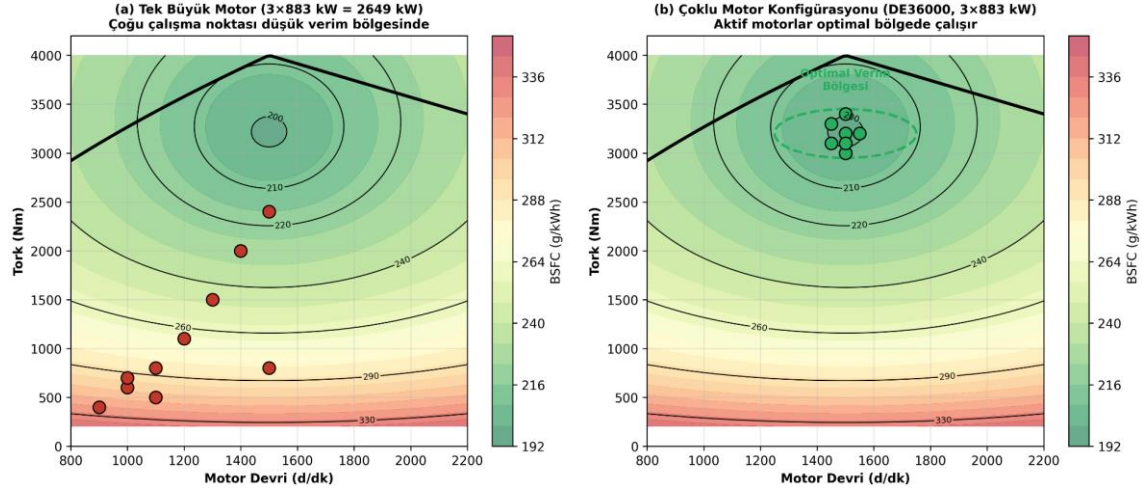
3.3. Enerji depolama entegrasyonu

Genset konseptinin hibrit uzantısı olarak, DC bara üzerinden lityum iyon batarya ve/veya süperkapasitör entegrasyonu çift yönlü DC/DC dönüştürücüler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bombardier, TRAXX DE ME'nin dördüncü dizel motorunun frenleme enerjisini depolayan bir batarya ile değiştirilmesini açıkça önermiştir [2,3]. Bu modüler yaklaşım, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefiyle uyumlu kademeli bir geçiş yolu sunmaktadır.

4. Enerji Yönetim Stratejileri

Çoklu motor konfigürasyonun yakıt verimliliği avantajının temel kaynağı, her motorun BSFC haritasındaki optimal verim bölgesine yakın çalıştırılabilmesidir. Tek büyük motorun düşük

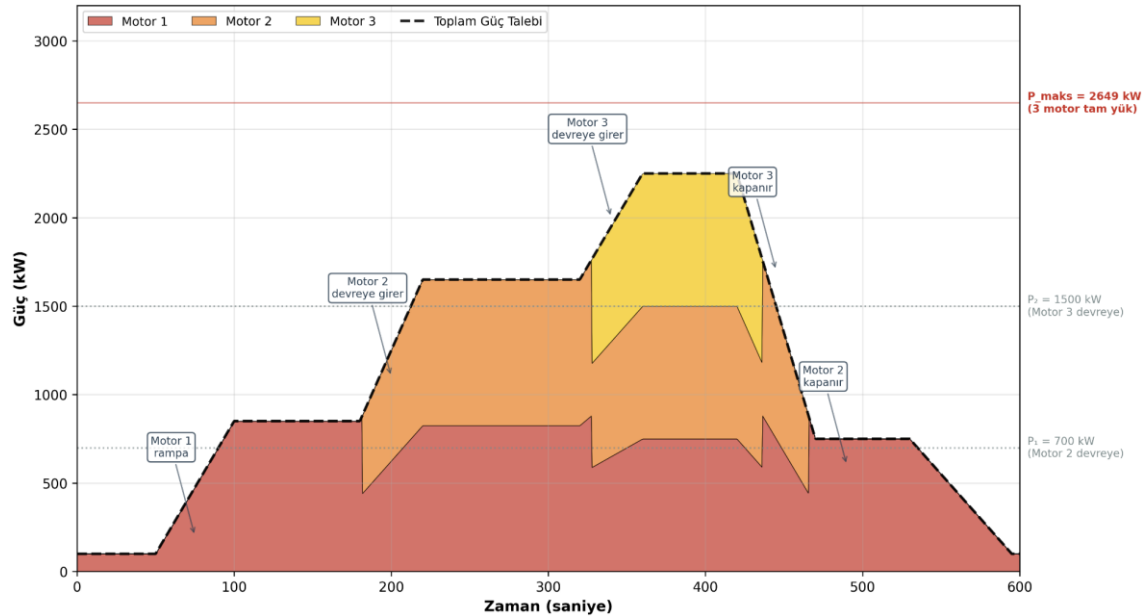
yüklerde yüksek BSFC değerinde çalışması ile çoklu motor sisteminin gerekli sayıda motoru optimum bölgede çalıştırarak elde ettiği verim avantajı Şekil 2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. BSFC haritası üzerinde tek motor ve çoklu motor çalışma noktalarının karşılaştırması: (a) tek büyük motor ile düşük yük bölgesinde dağılım, (b) çoklu motor konfigürasyonunda optimal verim bölgesinde yoğunlaşma

4.1. Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri

Kural tabanlı enerji yönetim stratejileri (RBEMS), üretim genset lokomotiflerinde baskın kontrol yaklaşımıdır. NRE 3GS21B, eşik değer tabanlı kademeli mantık kullanır: rölantide yalnızca bir motor çalışır; güç talebi arttıkça ikinci ve üçüncü motorlar otomatik olarak devreye girer. 15 dakikalık hareketsizlik sonrasında son çalışan motor da otomatik olarak kapanır [11,13]. TRAXX DE ME benzer şekilde her yük değişiminde dört motorundan kaç tanesinin gerekli olduğunu belirler [2,3]. Önerilen DE36000 konfigürasyonu için tipik bir manevra çalışma döngüsü altında kademeli motor devreye alma mantığının zaman ekseninde davranışı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. DE36000 kural tabanlı kademeli motor devreye alma mantığı (tipik manevra çalışma döngüsü)

Bu stratejiler, motor avcılığını (hunting) önlemek için histerezis bantları kullanır; yeni bir motoru devreye alma eşiği tipik olarak mevcut çalışan kapasitenin \sim %70'i, kapatma eşiği ise \sim %40'dır. Minimum çalışma süreleri (30-120 saniye) ve minimum kapalı kalma süreleri (60-300 saniye) ek döngü koruması sağlar [11,16]. Motor aşınma dengeleme algoritması, motor başına kümülatif çalışma saatlerini takip eder, yeni motor gerektiğinde en az saate sahip olan çalıştırılır; motor kapatılacağına ise en çok saate sahip olan durdurulur [2,11].

4.2. Optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri

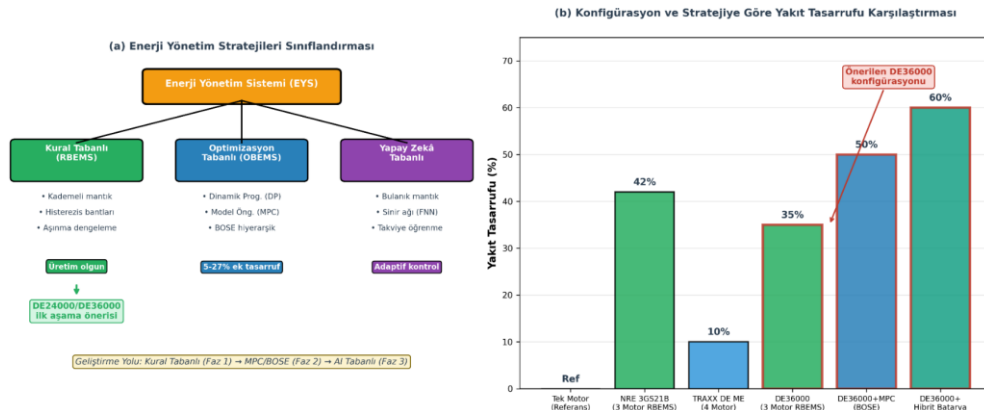
Dinamik programlama (DP), sürüş döngüsünün tam önceden bilgisi verildiğinde teorik olarak en iyi çözümü bulabilen global optimizasyon kriteri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şkrbina ve Deur [4], hibrit dizel-elektrik lokomotif için DP optimizasyonu ile %22,9 yakıt tasarrufu elde etmiştir. Wang vd. [5], hiyerarşik BOSE (Optimal Sistem Verimliliğine Dayalı) EYS önererek %27,22 yakıt iyileştirmesi sağlamış ve DP global optimumuna yalnızca %7,21 uzaklıkta kalmıştır. Model Öngörücü Kontrol (MPC), 5-30 saniyelik kayan ufuk penceresi üzerinden gerçek zamanlı optimizasyon sunmaktadır [6]. Bulanık mantık-MPC kombinasyonu ile çift modlu lokomotif de %95 küresel elektriksel verimlilik elde edilmiştir [6].

4.3. Yapay zekâ tabanlı ileri kontrol yöntemleri

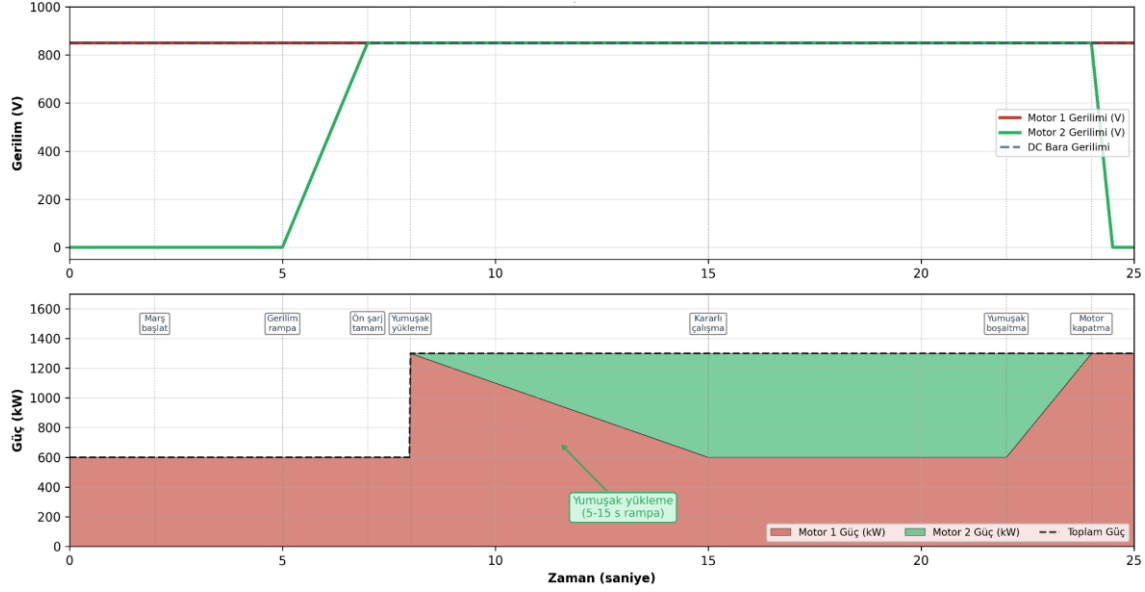
Takviyeli öğrenme (reinforcement learning), lokomotif enerji yönetiminde gelişen bir sınırı temsil etmektedir. Çift derin Q-ağı (DDSQ-network) mimarisi ile çoklu elektrikli lokomotiflerin hız, enerji tüketimi ve bağlantı kuvveti optimizasyonunun tren dinamiklerine ilişkin önceden bilgi olmaksızın gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir [17]. Bulanık sinir ağlarının (FNN) DP sonuçlarıyla eğitilmesiyle kural tabanlı stratejiye göre %10'un üzerinde yakıt azaltımı sağlanmıştır [18]. Farklı EYS stratejilerinin sınıflandırması ve önerilen DE36000 için yakıt tasarrufu potansiyeli Şekil 4'te özetlenmiştir.

4.4. Motor devreye alma/çıkarma geçiş yönetimi

Endüstriyel dizel motorlar (Cummins QSK19C, Caterpillar C18 vb.) tipik olarak marştan rölanteye 3-8 saniye, rölantiden tam nominal yüke ise turboşarj tepki süresi ile sınırlı olarak 5-15 saniye gerektirir. Cer dönüştürücüsü, hangi motorların çalıştığından bağımsız olarak DC bara gerilimini yönetir ve geçişler sırasında kararlı cer motoru akımı sağlar. TRAXX DE ME'nin TraxxControl sistemi, bu geçişleri sürücü için şeffaf hale getirmektedir; sürücü, TRAXX DE ME ile tek motorlu varyant arasında çok az fark görmektedir [2,3]. Motor 2'nin devreye alma ve çıkarma sürecinde gerilim, akım ve güç profili Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. EYS stratejileri ve DE36000 yakıt tasarrufu potansiyeli: (a) enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırması ve geliştirme yolu, (b) konfigürasyon ve stratejiye göre yakıt tasarrufu karşılaştırması



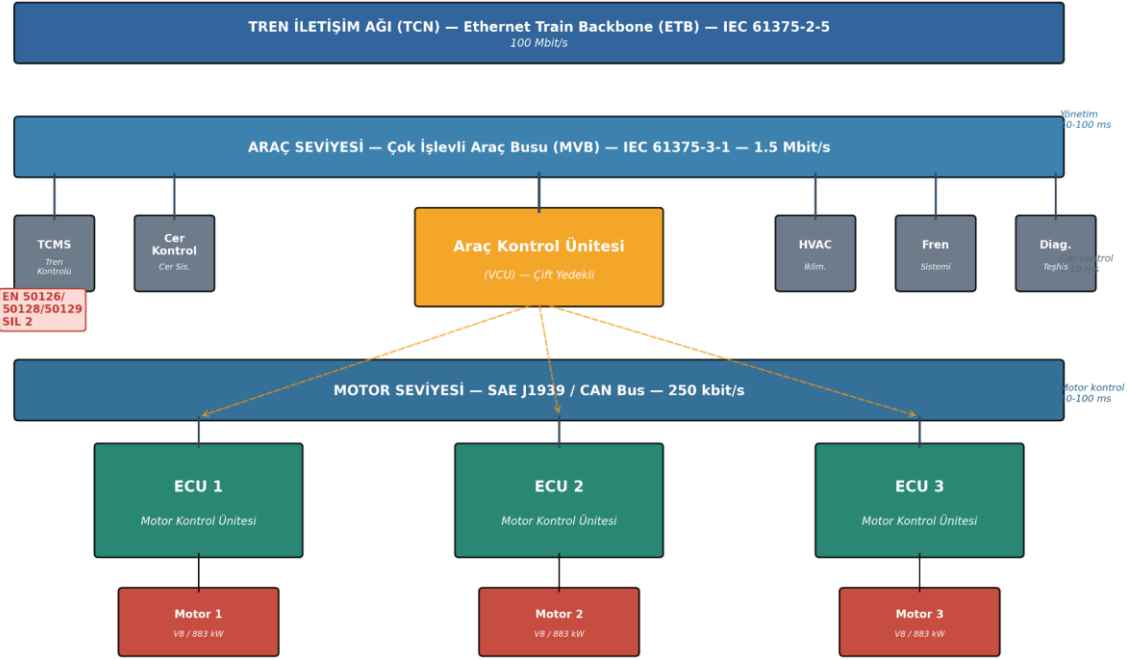
Şekil 5. Motor 2'nin devreye alma ve çıkarma süreci- yumuşak yükleme/boşaltma prosedürünün gerilim ve güç ekseninde gösterimi

5. İletişim ve Kontrol Mimarisi

5.1. Hiyerarşik iletişim yapısı

Çoklu motor genset lokomotiflerinin iletişim mimarisi katı bir hiyerarşi izler. Motor seviyesinde, SAE J1939 protokolü CAN bus (250 kbit/s, 29 bit genişletilmiş tanımlayıcılar) üzerinden her dizel motorun Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU) ile lokomotif ana kontrolörü arasındaki arayüzü sağlar [19,20]. Her motor, kendi özel J1939 bus segmentine sahiptir ve ağ geçidi ECU'ları araç busuna köprüleme yapar.

Araç seviyesinde, IEC 61375-3-1 standardına göre Çok İşlevli Araç Busu (MVB), 1,5 Mbit/s hızda ana-yardımcı yayıncı/abone iletişimi ile tüm yerleşik alt sistemleri (cer, fren, HVAC, göstergeler, teşhis) bağlar. Modern tasarımlar giderek artan şekilde IEC 61375-3-4'e göre Ethernet Bileşenleri Ağını (ECN) ve IEC 61375-2-5'e göre Ethernet Tren Omurgasını (ETB) 100 Mbit/s hızda benimsemektedir [20,21]. MITRAC kontrol sistemi, MVB üzerinden bağlı çift yedekli kontrol bilgisayarlarıyla bu yapıyı uygulamaktadır [14]. Önerilen DE36000 için tasarlanan üç katmanlı hiyerarşik iletişim mimarisi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Hiyerarşik kontrol ve iletişim mimarisi: Tren iletişim ağı (TCN/ETB) → araç seviyesi MVB → motor seviyesi SAE J1939/CAN

5.2. Dağıtık kontrol mimarisi

Çoklu motor genset lokomotiflerinin iletişim mimarisi katı bir hiyerarşi izler. Motor seviyesinde SAE J1939/CAN bus (250 kbit/s), araç seviyesinde IEC 61375-3-1 MVB (1,5 Mbit/s) ve tren seviyesinde IEC 61375-2-5 Ethernet Train Backbone (100 Mbit/s) kullanılır [19,20]. Çoklu motor genset lokomotifinin dağıtık kontrol mimarisi şu bileşenlerden oluşur: motor seviyesi ECU'ları (genset başına bir adet, yakıt enjeksiyonu, devir, tork ve egzoz son işlem kontrolü); merkezi Araç Kontrol Ünitesi (VCU, güç talep tahsisi, motor çalıştırma/durdurma sıralaması ve yük dengeleme yönetimi); cer kontrol sistemi (güç elektroniği yönetimi); ve sensör verilerini toplayan ve aktüatörleri kontrol eden Uzak G/Ç modülleri [14,20]. Gerçek zamanlı zamanlama gereksinimleri fonksiyona göre değişir: motor seviyesi kontrol parametreleri J1939 üzerinde 10-100 ms döngüde, MVB süreç verileri 1-1024 ms yapılandırılabilir döngüde, cer kontrol döngüleri invertör PWM için 1-10 ms ve tork kontrolü için 10-50 ms'de çalışır [20].

5.3. Fonksiyonel güvenlik gereksinimleri

EN 50126/50128/50129 standartları kapsamında lokomotif kontrol fonksiyonlarına Güvenlik Bütünlüğü Seviyeleri (SIL) atanır. Aşırı hız koruması, acil fren başlatma ve cer etkinleştirme/devre dışı bırakma tipik olarak SIL 2 olarak derecelendirilir (tehlikeli arıza oranı: saatte 10^{-7} ile 10^{-6} arası). Yangın algılama ve müdahale SIL 1-2, motor koruma fonksiyonları ise tipik olarak SIL dışı veya SIL 1 seviyesindedir [21,22]. Çoklu motora özgü güvenlik fonksiyonları arasında tüm motorların koordineli acil kapatılması, istenmeyen yeniden başlatmanın önlenmesi ve yakıt izolasyon valfi kontrolü (SIL dereceli) yer almaktadır [22].

6. DE24000 ve DE36000 Konfigürasyon Tasarımı

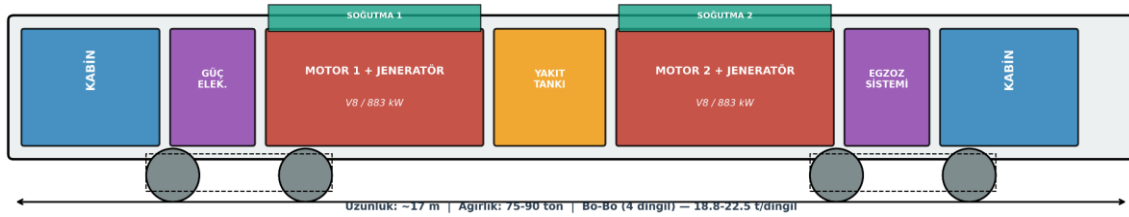
6.1. TÜBİTAK-RUTE özgün V8 dizel motor

TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen V tipi, 8 silindri, 30 litre hacimli özgün dizel motor, 1200 BG (883 kW) güç çıkışı ile 195 g/kWh özgül yakıt tüketimi hedefine ulaşmıştır. 500 saatten

fazla dinamometre testinden başarıyla geçen motorun 2 adedinin üretimi ve testleri tamamlanmış, motorlardan bir tanesi yine TÜBİTAK-RUTE tarafından tasarlanarak üretimi yapılan alternatör/jeneratör ile birlikte DE11000 tipi manevra lokomotifine monte edilmek üzere TÜRESAŞ'a teslim edilmiştir [1]. Motor ve alternatör/jeneratörün lokomotifte montajı TÜRESAŞ Eskişehir Lokomotif Fabrikasında tamamlanmak üzere olup, en geç Nisan 2026 içerisinde yol testlerine başlanması planlanmaktadır. Bu motor-jeneratör seti (genset), çoklu motor konfigürasyonunun temel yapı taşını oluşturacaktır.

6.2. DE24000 konfigürasyonu (2×883 kW)

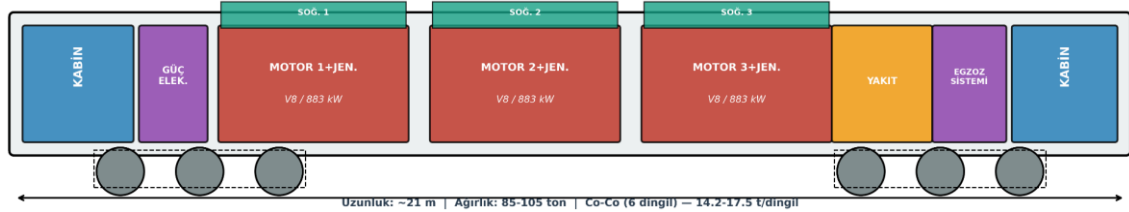
DE24000 konfigürasyonu, mevcut DE24000 tipi lokomotif platformu üzerine 2 adet TÜBİTAK-RUTE V8 motor-jeneratör setinin entegrasyonunu öngörmektedir. Toplam kurulu güç 1766 kW (2400 BG) olup, mevcut DE24000 serisinin 1790 kW (1900 BG MTE-Alsthom) nominal gücüne yakın bir performans sunmaktadır. Bu konfigürasyonda güç granülaritesi %50/%100 şeklindedir: düşük güç talebinde tek motor çalışırken, tam güç gerektiğinde her iki motor devreye girecektir. Tahmini toplam ağırlık 75-90 ton aralığında olup, Bo-Bo dingil düzeninde dingil başına 18,8-22,5 ton yük elde edilir; bu değer Avrupa ana hat limitlerinin (20-22,5 ton) içindedir. Referans olarak, TRAXX DE ME 81-83 ton Bo-Bo ağırlığıyla toplam 2252 kW güç üretmektedir. Her motor-jeneratör seti yaklaşık 2,5-3,0 m uzunluk, 1,8 m genişlik ve 1,5 m yükseklikte modüler bir kayar platform üzerine monte edilmiştir [11]. DE24000 konfigürasyonunun önerilen mekanik yerleşim planları Şekil 7'de teknik karşılaştırması ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 7. DE24000 (Bo-Bo) konfigürasyonu için önerilen mekanik yerleşim planı

6.3. DE36000 konfigürasyonu (3×883 kW)

DE36000 konfigürasyonu, 3 adet TÜBİTAK-RUTE V8 motor-jeneratör setinin entegrasyonu ile toplam 2649 kW (3600 BG) kurulu güç sunmaktadır. Bu güç seviyesi, mevcut DE36000 Powerhaul serisinin 2760 kW (3700 BG) gücüne yakın olup, ağır yük taşımacılığı gereksinimlerini karşılayabilecek düzeydedir. Güç granülaritesi %33/%67/%100 şeklinde olup, çoklu motor avantajının en belirgin şekilde ortaya çıktığı kademeli güç yönetimini mümkün kılmaktadır. DE36000 konfigürasyonunun önerilen mekanik yerleşim planı Şekil 8'de teknik karşılaştırması ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 8. DE36000 (Co-Co) konfigürasyonu için önerilen mekanik yerleşim planı

Tablo 1. DE24000 ve DE36000 konfigürasyonlarının teknik karşılaştırması

Parametre	DE24000	DE36000
Motor sayısı	2	3
Motor tipi	TÜBİTAK-RUTE V8	TÜBİTAK-RUTE V8
Motor başına güç	883 kW (1200 BG)	883 kW (1200 BG)
Toplam kurulu güç	1766 kW (2400 BG)	2649 kW (3600 BG)
Güç granülaritesi	%50 / %100	%33 / %67 / %100
Arıza yedekliliği	%50 güç	%67 güç
Önerilen dingil düzeni	Bo-Bo	Co-Co
Tahmini ağırlık	75-90 ton	85-105 ton
DC bara gerilimi	750-1200V DC	750-1200V DC
Hedef uygulama	Manevra / Hafif hat	Ana hat yük

TCDD DE24000 ve DE36000 tipi lokomotiflerde tahmini toplam ağırlık 85-105 ton aralığındadır. Bo-Bo dingil düzeninde 21,3-26,3 ton/dingil yüküne ulaşılabilir; bu değer hafif hatlarda limitleri aşabileceğinden, yük taşımacılığı uygulamaları için Co-Co dingil düzeni tercih edilmelidir (14,2-17,5 ton/dingil). 3 adet motor-jeneratör seti, kabinin bir ucunda ve tüm motorların uzun kaput içinde seri olarak yerleştirildiği bir düzende konumlandırılır. NRE 3GS21B'nin 182 adet ticari başarısıyla doğrulanan 3 motorlu konfigürasyon [11,13], kontrol karmaşıklığı, güç granülaritesi ve yedeklilik açısından optimum dengeyi sunmaktadır.

6.4. Soğutma, egzoz ve titreşim tasarımı

Bağımsız soğutma devreleri kanıtlanmış yaklaşımdır; TRAXX DE ME her C18 motoruna kendi soğutma sistemini sağlamaktadır [2,3]. Her 883 kW motor yaklaşık 300-400 kW ısı atımı gerektirir. Çatı montajlı radyatör bankaları, motor başına bağımsız birincil (motor soğutma suyu + yağ soğutucu) ve ikincil (şarj havası ara soğutucusu) devreleri ve motor başına 15-25 m² radyatör yüzeyi tipik uygulamayı oluşturur. TRAXX DE ME'nin belgelenen aşırı ısınma sorunları [3], dar alanda çoklu ısı kaynağı ile termal yönetimin kritik bir tasarım zorluğu olduğunu vurgulamaktadır.

AB Stage V uyumluluğu için motor başına DOC + DPF + SCR + ASC egzoz son işlem sistemi gereklidir; her sistem yaklaşık 200-400 kg ağırlığında ve 0,3-0,5 m³ hacimde olup, 3 motor için toplam 600-1200 kg'a ulaşır [23]. TRAXX DE ME'nin yazılım hatalarından kaynaklanan DPF tıkanma deneyimi [3], çoklu motor DPF rejenerasyon yönetiminin özellikle pasif rejenerasyonun yetersiz kalabildiği düşük yük çalışmasında sağlam bir yazılım gerektirdiğini göstermektedir.

Titreşim izolasyonu için elastomerik kauçuk takozlar (doğal kauçuk, neopren veya EPDM) %90'a varan titreşim yalıtımı sağlar. V8 motor 1800-2100 d/dk'da baskın 2. harmonik frekanslarını 60-70 Hz'de üretir; takoz doğal frekansı bunun çok altında (tipik olarak 5-15 Hz) ayarlanmalıdır. Birden fazla motorun farklı hızlarda çalışması durumunda vuru frekansları ve şasi eğilme modlarıyla (tipik 15-40 Hz) potansiyel yapısal rezonans, dikkatli sonlu elemanlar analizi (FEA) gerektirmektedir [24]. EN 45545 yangın güvenliği standardı kapsamında motor bölmeleri arasında yangın bariyerleri, her motor bölmesinde algılama ve söndürme sistemi ve tüm malzemelerin uygun tehlike seviyesi gereksinimlerini (HL1-HL3) karşılaması zorunludur [25].

7. Tartışma ve Değerlendirme

Dünya genelindeki çoklu motor lokomotif deneyimleri karşılaştırıldığında (Tablo 2), birçok kritik tasarım dersi ortaya çıkmaktadır. Birincisi, motor sayısı ile kontrol karmaşıklığı arasındaki ödünleşim belirleyici bir faktördür. NRE 3GS21B'nin 182 adetlik ticari başarısı ile TRAXX DE

ME'nin ~137 adetlik daha sınırlı penetrasyonu [2,11], kontrol karmaşıklığının artışıyla güvenilirlik riskinin orantılı olarak yükseldiğini göstermektedir. Literatürde de benzer bulgular raporlanmıştır: Din ve Hillmansen [16], çoklu motor hibrit trenlerde akıllı anahtarlar kontrolörlerinin enerji verimliliğine etkisini incelerken, kontrol stratejisinin basitliği ile güvenilirliği arasındaki güçlü korelasyonu vurgulamıştır. Çipek vd. [7], gerçekçi dağlık hat koşullarında batarya-hibrit dizel-elektrik lokomotifinde yaptıkları değerlendirmede, enerji yönetim stratejisinin hat profiline bağlı olarak %10-20 oranında farklı performans sergilediğini göstererek tek tip bir stratejinin her koşula uygun olamayacağını ortaya koymuştur.

Tablo 2. Dünya genelindeki başlıca çoklu motor lokomotif uygulamalarının karşılaştırması

Parametre	NRE 3GS21B	TRAXX DE ME	CRRC HXN6	DE36000 (Öneri)
Motor sayısı	3	4	1+batarya	3
Toplam güç	1570 kW	2252 kW	2200 kW	2649 kW
Üretim adedi	182	~137	Ticari	Prototip
Kontrol yaklaşımı	Kural tabanlı	MITRAC EYS	Mikrobilgisayar	Kural tabanlı+
DC bara	DC jeneratör	AC-DC-AC	DC bağlantı	AC-DC-AC
Yakıt tasarrufu	%40+	~%10	~%20	%40+ (hedef)

İkincisi, yazılım kalitesi ve termal yönetim çoklu motor sistemlerinde birincil risk alanlarıdır. TRAXX DE ME'nin 2015-2019 yılları arasında yaşadığı sorunlar—yazılım hatalı DPF tıkanmaları, 2016 yazında elektrik sistemi aşırı ısınması, Mart 2017'de 245 204 numaralı üniteye duman oluşumu [3] bunun somut kanıtıdır. Bu deneyim, Saadat vd. [26] tarafından önerilen bulanık ileriye dönük kontrol yaklaşımının pratikte yalnızca yakıt tasarrufunu değil, aynı zamanda egzoz son işlem sistemi performansını da dikkate alması gerektiğini doğrulamaktadır. Ghaviha vd. [27], gerçek dünya değerlendirmesinde dizel-elektrik çift sürümlü lokomotifin enerji tüketimi ve emisyon performansını analiz ederek, simülasyon sonuçları ile saha verileri arasında %8-15 farklılık olduğunu raporlamış ve bu durum, laboratuvar koşullarında geliştirilen EYS algoritmalarının sahada yeniden kalibrasyona ihtiyaç duyabileceğini göstermektedir.

Üçüncüsü, enerji yönetim stratejilerinin performans karşılaştırması, ileri algoritmaların önemli bir iyileştirme potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Wang vd. [5] tarafından önerilen hiyerarşik BOSE yaklaşımı, kural tabanlı stratejiye göre %27,22 yakıt iyileştirmesi sağlarken, DP global optimumuna yalnızca %7,21 uzaklıkta kalmıştır. Bu sonuç, gerçek zamanlı uygulanabilir stratejilerin teorik optimuma oldukça yaklaşabildiğini kanıtlamaktadır. Takviyeli öğrenme alanında ise Tang vd. [8] ve Qin vd. [9] son dönem çalışmaları, derin takviyeli öğrenme algoritmalarının (DDPG, SAC, PPO) geleneksel optimizasyon yöntemlerine kıyasla adaptif ve öğrenme yeteneğine sahip kontrol politikaları sunabildiğini, ancak eğitim süreci stabilitesi ve gerçek zamanlı hesaplama yükü açısından hâlâ zorluklar barındırdığını ortaya koymuştur.

Dördüncüsü, yerli motor kullanımı lojistik ve ekonomik avantajlar sunmaktadır. TÜBİTAK-RUTE V8 motorunun 195 g/kWh özgül yakıt tüketimi, endüstriyel tip motorlarla (Cummins QSK19C: ~200 g/kWh, Caterpillar C18: ~205 g/kWh) karşılaştırılabilir düzeydedir [1]. V12 (1800 BG) ve V16 (2400 BG) versiyonlarının tasarımının tamamlanmış olması, gelecekte DE48000 ve Milli CoCo projesi için güç paketi ölçeklenebilirliği sunmaktadır [1].

Beşincisi, enerji depolama entegrasyonu tasarımın başından itibaren planlanmalıdır. Endüstri trendi açıkça hibrit konfigürasyonlara doğru ilerlemektedir. Alstom Prima H3 (%50 yakıt azaltımı), Vossloh DM 20-BDD (50 adet sipariş) [28,29] ve CRRC HXN6 (180 ton/yıl yakıt tasarrufu, >560 ton CO₂ azaltımı) [30] bunun somut örnekleridir. Kapetanović vd. [31], dizel-elektrik trenler için enerji depolama sistemi boyutlandırmasını incelemiş ve optimal batarya

kapasitesinin hat profiline ve hizmet türüne göre %20-40 aralığında değiştiğini göstermiştir. DC bara mimarisi, baştan batarya/süperkapasitör modülleri için arayüz noktaları tasarlanarak gelecekteki hibrit uzantıya hazır hale getirilmelidir.

8. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, dizel-elektrik genset lokomotiflerde çoklu motor senkronizasyonu, güç elektroniği topolojileri ve enerji yönetim sistemi tasarımı kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve TÜBİTAK-RUTE V8 özgün dizel motorunun DE24000 ve DE36000 konfigürasyonlarında kullanılması için detaylı bir sistem mimarisi önerilmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

(1) Ortak DC bara mimarisi, çoklu motor-jeneratör setlerinin elektriksel senkronizasyonu için en uygun çözüm olarak değerlendirilmiş olup, geleneksel AC paralelleme karmaşıklığını ortadan kaldırmaktadır. Dünya genelindeki başarılı uygulamalar (NRE 3GS21B, TRAXX DE ME, CRRC HXN6), bu topolojinin farklı güç seviyeleri ve hizmet türlerinde etkin şekilde uygulanabildiğini doğrulamaktadır.

(2) Güç elektroniği topolojisi seçiminin, lokomotifin performans zarfını ve gelecek hibrit uzantı potansiyelini doğrudan belirlediği tespit edilmiştir. Pasif diyot doğrultucular prototip aşaması için basitlik ve güvenilirlik avantajı sunarken, AFE dönüştürücüler rejeneratif frenleme ve enerji depolama entegrasyonu gerektiren uygulamalar için üstün performans sağlamaktadır.

(3) Enerji yönetim stratejilerinin, çoklu motor sistemlerinin verimlilik potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmada belirleyici bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Kural tabanlı yaklaşımlar üretim olgunluğu açısından ilk aşama için uygun olmakla birlikte, optimizasyon tabanlı ve yapay zekâ tabanlı stratejilerin önemli ek yakıt tasarrufu potansiyeli sunduğu mevcut literatürle desteklenmektedir.

(4) Motor sayısı ile kontrol karmaşıklığı arasındaki ödünleşim analizi, 3 motorlu konfigürasyonun güç granülaritesi, arıza yedekliliği ve sistem güvenilirliği açısından en uygun dengeyi sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, NRE 3GS21B'nin dünya genelindeki ticari başarısıyla da tutarlıdır.

(5) TRAXX DE ME'nin devreye alma sürecinde yaşanan operasyonel sorunların analizi, çoklu motor sistemlerinde yazılım kalitesinin, termal yönetimin ve motor geçiş mantığının birincil risk alanları olduğunu göstermektedir. Bu risk alanlarının erken tasarım aşamasında sistematik olarak ele alınması, başarılı bir ürün geliştirme süreci için zorunludur.

(6) Hiyerarşik iletişim mimarisi (SAE J1939 / MVB / Ethernet) ve fonksiyonel güvenlik çerçevesinin (EN 50126/50128/50129), çoklu motor lokomotiflerinin sertifikasyon sürecinde karşılanması gereken temel gereksinimleri oluşturduğu değerlendirilmektedir.

8.1. Çalışmanın sınırlılıkları

Bu çalışma, kapsamlı bir sistem mimarisi önerisi sunmakla birlikte, bazı önemli sınırlılıklar barındırmaktadır. Birincisi, önerilen DC bara mimarisi, güç elektroniği topolojileri ve EYS algoritmaları henüz prototip üretimi veya fiziksel doğrulama aşamasına ulaşmamış olup, sunulan tasarım parametreleri literatür verileri ve benzer uygulamalardan elde edilen deneyimlere dayanmaktadır. İkincisi, yakıt tasarrufu ve verimlilik tahminleri, gerçek Türkiye demiryolu hat profilleri ve işletme koşulları yerine, genel literatür verilerine dayalı karşılaştırmalara dayanmaktadır; Türkiye'ye özgü hat eğim profilleri, iklim koşulları ve trafik yoğunluğu parametreleriyle doğrulama yapılmamıştır. Üçüncüsü, toplam sahip olma maliyeti (TCO) analizi, yatırım maliyeti-geri dönüş süresi hesaplamaları ve yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Dördüncüsü, titreşim, gürültü ve elektromanyetik

uyumluluk (EMC) analizleri teorik düzeyde ele alınmış olup, sonlu elemanlar analizi (FEA) veya deneysel doğrulama gerçekleştirilmemiştir. Çoklu Motor Senkronizasyonunun toplam sahip olma maliyeti (TCO) analizi, yatırım maliyeti-geri dönüş süresi hesaplamaları ve yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi ise bir sonraki çalışma olarak planlanmıştır.

8.2. Gelecek çalışma hedefleri

Yukarıda belirtilen sınırlılıklar çerçevesinde, gelecek çalışmalar için aşağıdaki hedefler önerilmektedir:

(a) Kısa vadede (1-2 yıl): DE24000 prototipinin TÜRASAŞ bünyesinde üretilmesi ve seçilmiş bir manevra sahasında (Halkalı veya Köseköy) kapsamlı saha testlerinin gerçekleştirilmesi; DC bara gerilim optimizasyonu ve doğrultucu topolojisi nihai seçimi için MATLAB/Simulink ortamında çoklu motor güç sistemi simülasyonu yapılması; kural tabanlı kademeli EYS yazılımının geliştirilmesi, doğrulanması ve dinamometre testleriyle kalibrasyonu.

(b) Orta vadede (2-4 yıl): Türkiye'nin spesifik hat profilleri (Ankara-Kayseri, Erzurum-Kars, İzmir liman bölgesi) ve işletme koşullarına göre EYS algoritmalarının optimizasyonu ve 60.000 km yol testiyle doğrulanması; batarya/süperkapasitör entegrasyonunun teknik ve ekonomik fizibilite analizi; TCO modeli geliştirilerek çoklu motor ile tek motor konfigürasyonlarının yaşam döngüsü maliyet karşılaştırması; FEA tabanlı titreşim analizi ve EMC/EMI ölçüm kampanyalarının gerçekleştirilmesi.

(c) Uzun vadede (4-7 yıl): Model Öngörücü Kontrol (MPC) ve derin takviyeli öğrenme (DRL) tabanlı adaptif EYS algoritmalarının geliştirilmesi ve gerçek zamanlı doğrulanması; dizel motor modüllerinin batarya-elektrik veya hidrojen yakıt hücresi modülleriyle değiştirilmesine yönelik modüler geçiş stratejisinin uygulanması; EN 50126/50128/50129 fonksiyonel güvenlik sertifikasyonu ve CLC/TS 50701 siber güvenlik uyumluluk sürecinin tamamlanması; V12 (1800 BG) ve V16 (2400 BG) motor versiyonlarıyla DE48000 ve Milli Co-Co projesi için güç paketi ölçekleme çalışmalarının yapılması.

Türkiye özelinde, TÜBİTAK-RUTE tarafından geliştirilen özgün dizel motor ailesinin çoklu motor konfigürasyonunda kullanılması, hem TCDD'nin yaşanan dizel lokomotif filosunun modernizasyonu hem de yerli ve milli lokomotif üretim kapasitesinin güçlendirilmesi açısından stratejik bir fırsat sunmaktadır. Bu teknoloji, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine giden yolda kademeli geçiş imkânı sağlarken, döviz tasarrufu ve ihracat potansiyeli de oluşturmaktadır.

Kaynakça

- [1] K. Aydın, İ. Pektaş, "Dizel-elektrik lokomotiflerde çoklu motor konfigürasyonu ile yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı", Demiryolu Mühendisliği, sy. 24, no. 1892069, 2026.
- [2] K. Barrow, "Four into One: Bombardier's Multi-Engine Traxx DE ME", International Railway Journal, September 2018.
- [3] Rail Engineer, "Bombardier TRAXX DE ME - Four is better than one", Rail Engineer, 2019.
- [4] J. Škrbina, J. Deur, "Optimized Energy Management Control of a Hybrid Electric Locomotive", Machines, Vol. 11, No. 6, 589, 2023.
- [5] Z. Wang, X. Li, Y. Zhang, "Novel hybrid power system and energy management strategy for locomotives", Applied Energy, Vol. 348, 121448, 2023.
- [6] V.I. Herrera-Jaramillo et al., "Fuzzy logic-model predictive control energy management strategy for a dual-mode locomotive", Energy Conversion and Management, Vol. 253, 115163, 2022.
- [7] M. Cipek et al., "Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route", Energy, Vol. 173, pp. 1154-1171, 2019.

- [8] X. Tang et al., "Reinforcement learning-based energy management for hybrid power systems: State-of-the-art survey, review, and perspectives", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 37, No. 43, 2024.
- [9] J. Qin et al., "Energy management strategy for hybrid electric vehicles based on deep reinforcement learning with consideration of electric drive system thermal characteristics", *Energy Conversion and Management*, Vol. 332, 119697, 2025.
- [10] M. Pan et al., "Recent progress on energy management strategies for hybrid electric vehicles", *Journal of Energy Storage*, Vol. 116, 115936, 2025.
- [11] National Railway Equipment (NRE), "N-ViroMotive Product Line – Ultra-Low Emitting Locomotives", NRE Technical Documentation, 2020.
- [12] S. Frey, *Railway Electrification Systems & Engineering*, White Word Publications, 2012.
- [13] Union Pacific Railroad, "Low-Emissions Locomotive Technology Brings Unique Challenges", *Inside Track*, October 2021.
- [14] Bombardier Transportation, "MITRAC – Next Generation Propulsion, Controls and Energy Management Solutions", Press Release, InnoTrans 2019.
- [15] M.M. Bakran, "Power Electronics Technologies for Locomotives", *Power Electronics for Drives and Power Systems*, Springer, 2020.
- [16] T. Din, S. Hillmansen, "Operation and energy evaluation of diesel and hybrid trains with smart switching controls", *Control Engineering Practice*, Vol. 117, 104927, 2021.
- [17] X. Li et al., "Reinforcement learning approach for optimal control of multiple electric locomotives", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 190, 105173, 2020.
- [18] Z. Li et al., "An Improved Energy Management Strategy of Diesel-Electric Hybrid Propulsion System Based on FNN-DP Strategy", *Electronics*, Vol. 12, No. 3, 486, 2023.
- [19] SAE International, "SAE J1939 – Recommended Practice for Serial Control and Communications Vehicle Network", SAE Standard, 2021.
- [20] IEC 61375, "Electronic railway equipment – Train communication network (TCN)", International Electrotechnical Commission, 2012.
- [21] EN 50126/50128/50129, "Railway Applications – RAMS", CENELEC, 2017.
- [22] CLC/TS 50701, "Railway Applications – Cybersecurity", CENELEC Technical Specification, 2021.
- [23] European Commission, "Regulation (EU) 2016/1628 – Stage V Emission Limits", 2016.
- [24] IEC 61373, "Railway applications – Rolling stock equipment – Shock and vibration tests", 2010.
- [25] EN 45545, "Railway Applications – Fire Protection on Railway Vehicles", Parts 1-7, CENELEC, 2013.
- [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*, Vol. 231, No. 4, pp. 406-418, 2017.
- [27] M. Ghaviha et al., "Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive", *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 22, 100791, 2024.
- [28] Alstom, "Prima H3 Hybrid Shunting Locomotive", Technical Documentation, 2018.
- [29] Vossloh Locomotives, "DM 20 Dual-Engine Locomotive for DB Cargo", Press Release, InnoTrans 2022.
- [30] CRRC Ziyang, "HXN6 Hybrid Locomotive – First Chinese New Energy Locomotive Type Certificate", *Railway Technology*, 2022.
- [31] M. Kapetanović et al., "Lifecycle assessment of hybrid energy storage for diesel-electric multiple unit trains", *Applied Energy*, Vol. 286, 116507, 2021.

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 Çukurova Üniversitesi'nden emekli oldu ve Ostim Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Profesör olarak göreve başladı. 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, Kontrol. İlhami PEKTAŞ: Gözden geçirme ve düzenleme.