

**Türkiye Demiryolu Sektörü İçin Çoklu Motorlu (Genset) Lokomotif Konfigürasyonlarının Karşılaştırmalı Ekonomik Analizi: DE24000 ve DE36000 Platformlarında TCO, LCOH ve Geri Ödeme Süresi Değerlendirmesi**Kadir AYDIN^{*1}, İlhami PEKTAŞ²¹ OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye² Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelmesi (ARUS), OSTİM, Ankara, Türkiye

*kadir.aydin@ostimteknik.edu.tr

(Alınış/Received: 01.06.2026, Kabul/Accepted: 01.08.2026, Yayımlama/Published: 01.08.2026)

Öz: Bu çalışmanın amacı, dizel-elektrik lokomotiflerde çoklu motor (genset) konfigürasyonunun ekonomik fizibilitesini, Türkiye demiryolu sektörü bağlamında ve yerli TÜBİTAK-RUTE V8 dizel motoruyla geliştirilmesi öngörülen DE24000 (2 motorlu, 1766 kW) ile DE36000 (3 motorlu, 2649 kW) platformları özelinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Analizlerde IEC 60300-3-3 ve UIC 345 standartlarına dayalı yaşam döngüsü maliyetlendirme yaklaşımı benimsenmiş; toplam sahip olma maliyeti (TCO), birim taşıma maliyeti (LCOH), net bugünkü değer (NPV) ve geri ödeme süresi yöntemleri 30 yıllık hizmet ömrü ve %8 iskonto oranı varsayımıyla uygulanmıştır. Girdi parametreleri, Mayıs 2026 dönemine ait güncel piyasa verilerinden (motorin fiyatı, döviz kurları ve Ocak 2026 TCDD-Stadler ihalesi birim fiyatı) türetilmiş ve seçilme gerekçeleriyle birlikte sunulmuştur. Sonuçlar, yerli çoklu motorlu platformların edinim maliyeti (%40-56 daha düşük CAPEX), 30 yıllık TCO (%28-51 tasarruf) ve birim taşıma maliyeti açısından ithal tek motorlu muadillerine kıyasla belirgin ekonomik avantaj sağladığını; geri ödeme sürelerinin (2,5-3,3 yıl) endüstri kabul eşiğinin altında kaldığını göstermektedir. Duyarlılık analizi, yakıt fiyatı ve yıllık kullanım saatinin baskın parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, filo yenileme ve ithal ikamesi kararlarında kullanılabilecek Türkiye'ye özgü, karşılaştırmalı ve güncel bir ekonomik karar destek çerçevesi sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Toplam sahip olma maliyeti, Birim taşıma maliyeti, Genset lokomotif, Net bugünkü değer, Yerli üretim, Geri ödeme süresi

Comparative Economic Analysis of Multi-Engine (Genset) Locomotive Configurations for the Turkish Railway Sector: TCO, LCOH and Payback Period Assessment of the DE24000 and DE36000 Platforms

Abstract: The aim of this study is to comparatively evaluate the economic feasibility of the multi-engine (genset) configuration in diesel-electric locomotives within the context of the Turkish railway sector, focusing on the DE24000 (2-engine, 1,766 kW) and DE36000 (3-engine, 2,649 kW) platforms envisaged to be developed with the indigenous TÜBİTAK-RUTE V8 diesel engine. A life cycle costing approach based on IEC 60300-3-3 and UIC 345 standards was adopted; total cost of ownership (TCO), levelized cost of haulage (LCOH), net present value (NPV) and payback period methods were applied assuming a 30-year service life and an 8% discount rate. Input parameters were derived from current market data for May 2026 (diesel price, exchange rates, and the unit price of the January 2026 TCDD-Stadler tender) and are presented together with their selection rationale. The results show that domestic multi-engine platforms provide significant economic advantages over imported single-engine equivalents in terms of acquisition cost (40-56% lower CAPEX), 30-year TCO (28-51% savings) and levelized cost of haulage, with payback periods (2.5-3.3 years) well below the industry acceptance threshold. Sensitivity analysis identifies fuel price and annual utilization as the dominant parameters. The study provides a Turkey-specific, comparative and up-to-date economic decision support framework for fleet renewal and import-substitution decisions.

Keywords: Total cost of ownership, Levelized cost of haulage, Genset locomotive, Net present value, indigenous manufacturing, Payback period

Atıf için/Cite as: K. Aydın, İ. Pektaş, "Türkiye demiryolu sektörü için çoklu motorlu (Genset) lokomotif konfigürasyonlarının karşılaştırmalı ekonomik analizi: DE24000 ve DE36000 platformlarında TCO, LCOH ve geri ödeme süresi değerlendirilmesi" *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 25, no. 1961768, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1961768

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı, küresel ekonomi içinde stratejik bir konuma sahip olup, modern lokomotif filolarının yenilenmesi tüm operatörler için kritik bir yatırım kararıdır. Bu makale, yazarların çoklu motorlu (genset) lokomotif konusundaki üç aşamalı araştırma programının son halkasıdır. Programın ilk çalışmasında [1], dizel-elektrik lokomotiflerde çoklu motor konfigürasyonunun yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı potansiyeli ortaya konmuş; ikinci çalışmasında [2] ise DE24000 ve DE36000 platformları için çoklu motor senkronizasyonu, güç elektroniği mimarisi ve enerji yönetim sistemi tasarımı geliştirilmiştir. Bu iki çalışma genset konseptinin teknik fizibilitesini kanıtlamıştır; ancak teknik olarak uygulanabilir bir konseptin filo yenileme yatırım kararına dönüşebilmesi, ekonomik fizibilitesinin de nicel olarak ortaya konmasını gerektirmektedir. Zira lokomotif yatırımları on yıllara yayılan nakit akışları içerdiğinden, teknik performans üstünlüğü tek başına yatırım kararını gerektirememektedir. Bu üçüncü ve son çalışma, önceki iki çalışmada teknik tasarımı doğrulanan DE24000 ve DE36000 platformlarının ekonomik fizibilitesini değerlendirmektedir.

Lokomotif yatırım kararları, doğası gereği yüksek sermaye yoğunluğu, uzun hizmet ömrü (30-40 yıl) ve karmaşık operasyonel maliyet yapısı nedeniyle geleneksel edinim fiyatı karşılaştırmalarının ötesinde, kapsamlı bir Toplam Sahip Olma Maliyeti (Total Cost of Ownership, TCO) analizi gerektirmektedir [3,4]. Benzer şekilde, farklı taşıma teknolojilerinin (dizel, hibrit, elektrikli, hidrojen) karşılaştırması için Birim Taşıma Maliyeti (Levelized Cost of Haulage, LCOH) metriği, enerji sektöründeki LCOE (Levelized Cost of Energy) ve hidrojen üretimindeki LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) ile benzer bir metodolojik temelde önemli bir karar destek aracı olarak öne çıkmaktadır [5,6].

Türkiye demiryolu sektöründe ekonomik tablo özellikle dikkat çekicidir. Sayıştay'ın 2024 yılı denetim raporuna göre, TCDD Taşımacılık A.Ş. geçmiş yıllarda olduğu gibi 2024 yılını da 25,1 milyar TL net zararla kapatmıştır [7]. Aynı raporda, dizel ana hat lokomotiflerinin %75'inin, manevra lokomotiflerinin %29'unun 30 yaş ve üzerinde olduğu belirtilmiştir [7]. Ocak 2026'da TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin Stadler firmasından 35 adet Euro4001 dizel-elektrik lokomotifini yaklaşık 270 milyon Euro'ya (birim başına yaklaşık 7,7 milyon Euro $\approx$ 408 milyon TL) alacak olması [8], yaşlanan filonun yenilenmesinde dışa bağımlılığın ve döviz kuru etkisinin somut bir göstergesidir.

Bu çalışmanın özgün katkıları üç temel noktada toplanmaktadır. Birincisi, literatürdeki TCO/LCOH çalışmaları genellikle ABD ve AB piyasası bağlamında ele alınırken, bu çalışma Türkiye demiryolu pazarına özgü parametreleri (motorin fiyatı, güncel döviz kurları, yerli işçilik, TCDD operasyonel verileri, Ocak 2026 Stadler ihalesi referansı) kullanarak yerelleştirilmiş bir analiz sunmaktadır. İkincisi, mevcut literatürde tek motorlu konvansiyonel lokomotif ile alternatif teknolojilerin (batarya, yakıt hücresi) karşılaştırılması ağırlıktayken, bu çalışma çoklu motor (genset) konfigürasyonunun ithal tek motorlu, tam elektrikli ve hibrit alternatiflere karşı ekonomik konumlandırmasını detaylı duyarlılık analiziyle birlikte ortaya koymaktadır. Üçüncüsü, çalışma yerli TÜBİTAK-RUTE V8 motorla üretilebilecek olan DE24000 ve DE36000 platformları için somut yatırım kararı destek araçları sunmaktadır.

Bu kapsamda çalışmanın temel amacı; Türkiye demiryolu sektörüne özgü güncel piyasa verilerini kullanarak, yerli çoklu motorlu DE24000 ve DE36000 lokomotif platformlarının ithal tek motorlu, tam elektrikli ve hidrojen yakıt hücreli alternatifler karşısındaki ekonomik konumunu TCO, LCOH, NPV ve geri ödeme süresi metrikleri üzerinden karşılaştırmalı olarak ortaya koymak ve filo yenileme kararlarına yönelik nicel bir karar destek çerçevesi sunmaktır. Makalenin kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2 ilgili literatürü tematik olarak özetlemekte ve araştırma boşluğunu tanımlamakta, Bölüm 3 metodolojiyi ve varsayımların gerekçelerini sunmakta, Bölüm 4-8 sırasıyla CAPEX, OPEX, kümülatif TCO, LCOH ve geri

ödeme/duyarlılık analizlerini içermekte, Bölüm 9 Türkiye bağlamını, Bölüm 10 tartışmayı ve Bölüm 11 sonuçları vermektedir.

2. Literatür Özeti

Lokomotif yatırımlarının ekonomik değerlendirmesine ilişkin literatür üç tematik eksenle ele alınabilir: toplam sahip olma maliyeti çalışmaları, birim taşıma maliyeti ve enerji depolama analizleri ile çoklu motor konfigürasyonlarına ilişkin saha deneyimleri.

2.1. Toplam sahip olma maliyeti çalışmaları

Ahluwalia ve diğerleri [3], ABD Enerji Bakanlığı H2@Rail çalıştayı kapsamında hat tipi, bölgesel ve manevra lokomotifleri için 30 yıllık hizmet ömrü varsayımıyla kapsamlı bir TCO çerçevesi oluşturmuş; hat tipi lokomotiflerde yakıtın TCO'nun yaklaşık %80'ini, manevra lokomotiflerinde ise %55'ini oluşturduğunu raporlamıştır. Bu bulgu, yakıt tasarrufu sağlayan konfigürasyonların TCO üzerinde belirleyici etki yaratacağının literatürdeki temel dayanağıdır. Rout ve diğerleri [10], hidrojen yakıt hücreli, bataryalı elektrikli ve dizel ağır vasıtaların TCO karşılaştırmasını gerçekleştirmiş; satın alma teşvikleri ile yakıt fiyatının TCO rekabetçiliğindeki belirleyici rolünü göstermiştir. Zenobē [17], elektrikli filolarda TCO metodolojisinin bakım ve enerji maliyeti bileşenlerine ilişkin sektörel kabulleri derlemiş ve tedarikçiye bağımlı bakım sözleşmelerinin bağımsız bakıma kıyasla maliyet primi taşıdığını belgelemiştir.

2.2. Birim taşıma maliyeti ve enerji depolama analizleri

Kapetanović ve diğerleri [9], dizel-elektrik trenlerde enerji depolama sistemlerinin optimal boyutlandırılmasının yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkisini yaşam döngüsü maliyeti çerçevesinde incelemiş ve depolama kapasitesi ile ekonomik fayda arasındaki ödünleşimi nicelleştirmiştir. Xu ve diğerleri [11], İngiltere demiryolu için hidrojen tedarik zinciri tabanlı LCOH analizini gerçekleştirmiş ve hidrojen penetrasyon senaryolarına bağlı olarak 5,13-6,13 £/kg LCOH aralığı raporlamıştır. Bu çalışmalar, enerji sektöründeki seviyelendirilmiş maliyet (LCOE/LCOH) yaklaşımının demiryolu taşımacılığına uyarlanabilirliğini ortaya koymakta ve bu çalışmada kullanılan birim taşıma maliyeti metriğinin metodolojik temelini oluşturmaktadır.

2.3. Genset saha deneyimleri ve araştırma boşluğu

Kuzey Amerika'da 2005-2015 döneminde yoğunlaşan genset uygulamaları ekonomik açıdan karışık sonuçlar üretmiştir: NRE 3GS21B, 182 adetlik üretimiyle ticari başarı örneği oluştururken; Railpower Technologies'in iflası ve bazı işletmecilerin filodan çıkarma kararları, ekonomik fizibilitenin operasyonel profil, kullanım yoğunluğu ve bakım stratejisiyle güçlü etkileşimini göstermiştir [16]. Bu deneyimler, genset ekonomisinin evrensel değil bağlama bağımlı olduğunu ve her pazar için yerleştirilmiş analiz gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Literatür birlikte değerlendirildiğinde üç araştırma boşluğu öne çıkmaktadır: (i) mevcut TCO/LCOH çalışmaları ağırlıklı olarak ABD ve AB piyasa koşullarına dayanmakta olup, yüksek enflasyon ve döviz kuru oynaklığı yaşayan ülkeler için yerleştirilmiş analiz bulunmamaktadır; (ii) genset konfigürasyonunun ithal tek motorlu, tam elektrikli ve hidrojen yakıt hücreli alternatiflerle aynı metodolojik çerçevede karşılaştırıldığı bütünsel bir ekonomik analiz literatürde yer almamaktadır; (iii) yerli üretimin döviz kuru riskine karşı sağladığı korumanın nicelleştirilmesi ihmal edilmiş bir boyuttur. Bu çalışma, söz konusu üç boşluğu Türkiye örneği üzerinden doldurmayı hedeflemektedir.

3. TCO ve LCOH Metodolojisi

Lokomotif yaşam döngüsü maliyet analizinde, IEC 60300-3-3 standardı [4] ve UIC 345 leafleti [12] uluslararası referans çerçeveleri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada analiz süreci dört aşamada yürütülmüştür: (i) her konfigürasyon için CAPEX'in, güncel ihale referansı ve alt sistem maliyet dağılımı üzerinden tahmini; (ii) yıllık OPEX bileşenlerinin (yakıt, bakım, işçilik) operasyonel profil varsayımlarına göre hesaplanması; (iii) 30 yıllık nakit akışlarının NPV ve LCOH metriklerine dönüştürülmesi; (iv) tek değişkenli duyarlılık analiziyle parametre belirsizliklerinin NPV üzerindeki etkisinin nicelleştirilmesi. Hesaplamalar deterministik baz senaryo üzerine kurulmuş, belirsizlik duyarlılık taramasıyla ele alınmıştır.

3.1. Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO)

Lokomotif TCO'su; CAPEX (edinim maliyeti), OPEX (yakıt, bakım, işçilik, sigorta, alt yapı erişim ücretleri), büyük revizyon maliyetleri ve hurda değerinden oluşmaktadır. 30 yıllık hizmet ömrü için Net Bugünkü Değer (NPV) yaklaşımıyla TCO hesabı Denklem (1) ile ifade edilmektedir:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Burada C_t t yılındaki net nakit akışı, r iskonto oranı (Türkiye demiryolu sektörü için Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti, WACC $\approx$ %8 olarak kabul edilmiştir [4]), T ise hizmet ömrüdür ($T=30$ yıl). Büyük revizyonlar tipik olarak 15. yılda gerçekleştirilmekte olup, motor ana parçalarının yenilenmesini ve cer sistemi modernizasyonunu kapsamaktadır [3].

3.2. Birim Taşıma Maliyeti (LCOH)

LCOH metriği, lokomotifin yaşam döngüsü boyunca yaptığı toplam taşıma işine (ton-km) bölünmüş iskonto edilmiş toplam maliyettir [5,11]. Denklem (2) ile ifade edilmektedir:

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n (CAPEX_t + OPEX_t)(1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^n E_t(1+r)^{-t}} \quad (2)$$

Burada E_t t yılındaki taşıma işidir (ton-km). $LCOH$ 'un birimi TL/1000 ton-km veya €/1000 ton-km olarak ifade edilir ve farklı teknolojilerin (dizel, hibrit, elektrikli, hidrojen) ekonomik karşılaştırılmasında standart bir metrik olarak kullanılmaktadır [9,11].

3.3. Temel varsayımlar ve girdi parametreleri

2026 yılı Mayıs ayındaki dizel yakıtı fiyatı ve döviz kurları dikkate alınarak ekonomik analizde kullanılan temel parametreler ve varsayımlar Tablo 1'de verilmiştir. Varsayımların seçilme gerekçeleri şu şekildedir: 30 yıllık hizmet ömrü ve 15. yılda büyük revizyon varsayımı, lokomotif TCO literatüründeki yaygın kabule dayanmaktadır [3]. %8 iskonto oranı, kamu demiryolu yatırımları için literatürde önerilen %6-10 WACC aralığının orta noktası olarak seçilmiş; %5 ve %12 uç değerleri duyarlılık analizinde ayrıca test edilmiştir. Motorin fiyatı (70 TL/L), EPDK'nın Mayıs 2026 aylık ortalama bayi satış fiyatları aralığının (67-72 TL/L) orta değeridir [13]. Döviz kurları, analiz döneminde geçerli piyasa kurları olup tüm ithal maliyet kalemlerinin TL'ye çevriminde tutarlı biçimde kullanılmıştır. Yıllık kullanım saatleri ile yakıt tasarrufu oranları, yazarların önceki çalışmalarında [1,2] doğrulanan teknik performans değerlerinden alınmıştır.

Tablo 1. Ekonomik analizde kullanılan temel parametreler ve varsayımlar (Mayıs 2026)

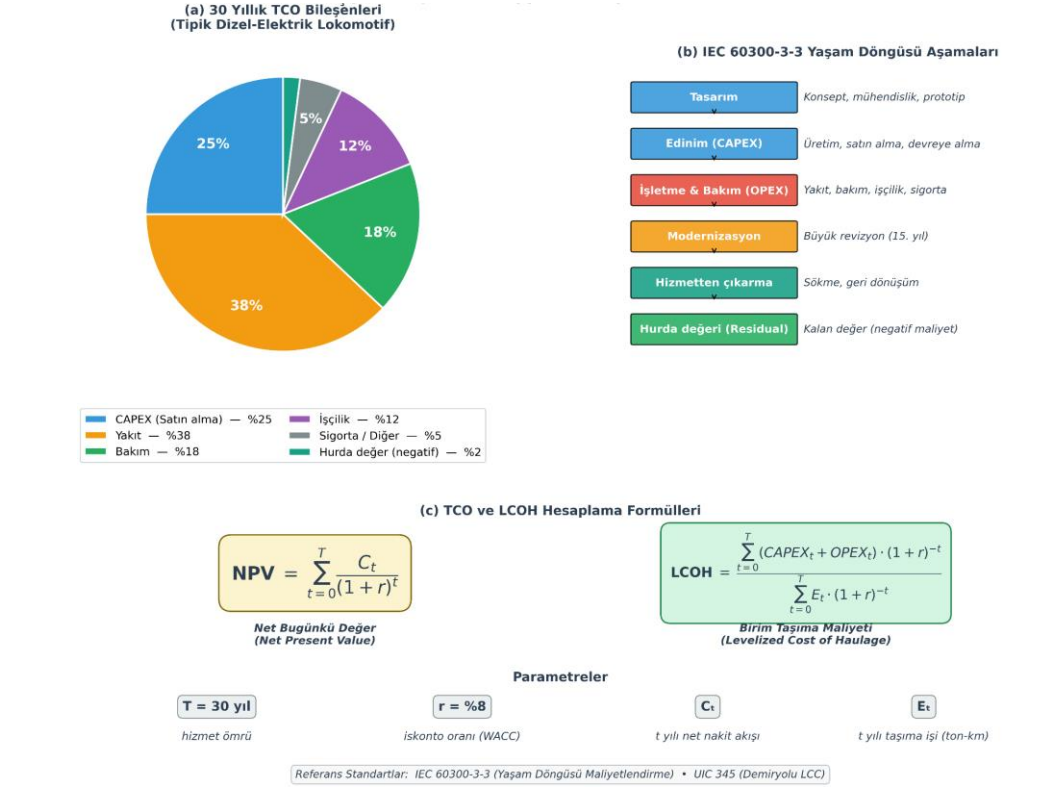
Parametre	Değer	Kaynak
Hizmet ömrü (T)	30 yıl	[3,4]
İskonto oranı (r, WACC)	%8	[4]
Motorin fiyatı (Mayıs 2026)	70 TL/L	[13]
Euro/TL kuru (Mayıs 2026)	1 € $\approx$ 53 TL	[7]
ABD doları/TL kuru	1 \$ $\approx$ 45,5 TL	[7]
Yıllık kullanım (manevra)	2.000-3.000 saat	[3]
Yıllık kullanım (ana hat)	5.000-7.000 saat	[3]
Yakıt tasarrufu (manevra)	%40-50	[1,2]
Yakıt tasarrufu (ana hat)	%10	[1,2]
Büyük revizyon dönemi	15 yıl	[3,4]
TCDD yıllık net zararı (2024)	25,1 milyar TL	[7]

4. CAPEX Analizi: Lokomotif Edinim Maliyetleri

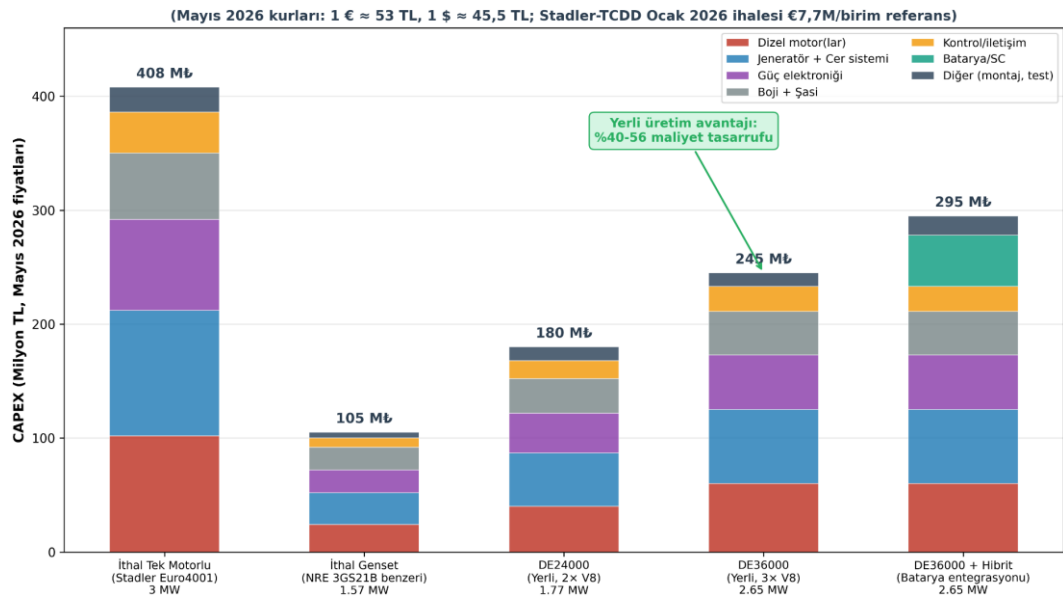
Lokomotif edinim maliyetleri, TCO'nun yaklaşık %25'lik bir bölümünü oluşturmalarına rağmen, ön yatırım kararını şekillendiren en belirleyici faktördür [3]. 2024-2026 döneminde küresel piyasada görülen referans fiyatlar şu şekildedir: Kuzey Amerika Tier 4 ana hat lokomotifleri yaklaşık 3-4 milyon ABD doları (~135-180 M TL), Avrupa ana hat dizelleri 3-4 milyon Euro (~160-210 M TL), genset manevra lokomotifleri 2-2,5 milyon ABD doları (~90-115 M TL) ve TRAXX DE ME türü çok motorlu ana hat lokomotifleri 4-5 milyon Euro (~210-265 M TL) [3,14]. Ocak 2026'da imzalanan TCDD Taşımacılık-Stadler anlaşması, 35 adet Euro4001 Co-Co dizel-elektrik lokomotifi için toplam yaklaşık 270 milyon Euro değerinde olup, birim fiyatı 7,7 milyon Euro (~408 M TL) olarak hesaplanmaktadır [8].

Türkiye'de TÜRASAŞ tarafından geliştirilen yerli lokomotifler için CAPEX, ithal muadillerine kıyasla önemli ölçüde düşüktür. E5000 elektrikli ana hat lokomotifi projesinde 95 adetlik seri üretim sözleşmesi kapsamında yerlilik oranı %65'ten %85'e çıkarılmıştır [15]. Yerlilik oranının yüksek olması, özellikle son yıllarda TL'nin Euro karşısında değer kaybetmesinin yarattığı maliyet baskısına karşı önemli bir koruma sağlamaktadır, zira yerli üretim ağırlıklı bir lokomotifin maliyet bileşenlerinin yaklaşık %70'i TL bazında gerçekleşmekte ve doğrudan döviz kuru riskine maruz kalmamaktadır. Bu yerlileştirme yaklaşımı dizel-elektrik platformlara da uygulandığında, DE24000 (2×883 kW V8) için tahmini CAPEX 180 M TL, DE36000 (3×883 kW V8) için 245 M TL ve DE36000 + batarya hibrit konfigürasyonu için 295 M TL düzeyindedir. Bu rakamlar, ithal muadillere kıyasla %40-56 oranında maliyet tasarrufu anlamına gelmektedir. DE24000 ve DE36000 CAPEX tahminleri üç adımda oluşturulmuştur. İlk adımda, Stadler Euro4001 ihalesinin birim fiyatı (408 M TL) referans alınarak güç oranı düzeltilmesiyle eşdeğer ithal maliyet tabanı türetilmiştir. İkinci adımda, alt sistem maliyet dağılımı (motor ve cer sistemi yaklaşık %50, güç elektroniği %20, boji ve şasi %15, kontrol sistemleri %10, diğer %5) uluslararası genset üretim verilerinden [3,14] uyarlanmıştır. Üçüncü adımda, E5000 projesinde ulaşılan %85 yerlilik oranı [15] temel alınarak yerli üretilen bileşenlerde işçilik ve tedarik zinciri avantajı yansıtılmış, ithal kalan bileşenlerde (IGBT modülleri, bazı sensörler) ise güncel kur uygulanmıştır. Bu yaklaşımla elde edilen 180 M TL (DE24000) ve 245 M TL (DE36000) tahminleri, birim güç başına sırasıyla yaklaşık 102 ve 92 bin TL/kW değerlerine karşılık gelmekte olup, ithal muadilin 136 bin TL/kW düzeyinin belirgin altındadır. Şekil 1 ile Şekil 2 sırasıyla TCO metodoloji çerçevesini ve alt sistem bazında CAPEX dağılımının karşılaştırmasını sunmaktadır.

CAPEX'in alt sistem dağılımı incelendiğinde, dizel motor(lar) ve jeneratör + cer sistemi birlikte toplam maliyetin yaklaşık %50'sini, güç elektroniği %20'sini, mekanik bileşenler (boji ve şasi) %15'ini, kontrol ve iletişim sistemleri %10'unu ve diğer kalemler %5'ini oluşturmaktadır. Çoklu motor konfigürasyonunda her motor için ayrı alternatör, doğrultucu ve soğutma sistemi gerekmesine rağmen, daha küçük güçte endüstriyel motorların (Cummins QSK19, Caterpillar C18 muadili TÜBİTAK-RUTE V8) tek büyük lokomotif motoruna kıyasla birim güç başına maliyet avantajı, toplam maliyeti dengelemektedir [1,14].



Şekil 1. Lokomotif TCO metodolojisi ve bileşenleri



Şekil 2. Lokomotif edinim maliyeti (CAPEX) karşılaştırması

5. OPEX Analizi: İşletme Maliyetleri

5.1. Yakıt maliyeti

Yakıt maliyetleri, dizel-elektrik lokomotiflerde OPEX'in %35-50'sini oluşturarak toplam TCO'nun yaklaşık %38'ine ulaşmaktadır [3]. Mayıs 2026 itibarıyla Türkiye'de motorin fiyatı 67-72 TL/L aralığında bulunmakta olup, bu çalışmada baz senaryo için 70 TL/L olarak alınmıştır [13]. Ana hat hizmetinde tipik bir 3 MW lokomotif yıllık 1,2 milyon litre civarında yakıt tüketmekte, bu da yıllık 84 milyon TL yakıt giderine karşılık gelmektedir. Çoklu motor konfigürasyonunda yakıt tüketimi ana hatta %10, manevra hizmetinde ise %40-50 azalmakta [1,2], bu durum yıllık yakıt giderinde önemli azaltım sağlamaktadır.

5.2. Bakım maliyetleri

Bakım maliyetleri; günlük (A-sınıfı), aylık (B-sınıfı), yıllık (C-sınıfı), 5 yıllık (D-sınıfı) ve 15 yıllık büyük revizyon (E-sınıfı) bakımlardan oluşmaktadır [3]. Tipik dizel-elektrik lokomotif bakım maliyeti 0,30-0,50 ABD doları/km veya 0,25-0,45 Euro/km düzeyindedir. İthal lokomotiflerin bakım maliyetleri, yedek parçaların önemli bir kısmının döviz cinsinden ödenmesi nedeniyle döviz kuru oynaklığından doğrudan etkilenmektedir; bu çalışmada ithal lokomotifler için bakım maliyetleri yerli muadillere kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek varsayılmıştır. Bu varsayımın dayanağı iki bileşenlidir: (i) ithal lokomotiflerde yedek parça maliyetlerinin döviz cinsinden faturalandırılması ve son beş yıldaki kur artışının parça maliyetlerine doğrudan yansması; (ii) filo TCO metodolojisi literatüründe belgelendiği üzere [17], tedarikçiye bağımlı bakım sözleşmelerinin bağımsız veya yerli bakım altyapısına kıyasla %25-35 maliyet primi taşıması. Yerli platformlarda TÜRASAŞ'ın mevcut bakım altyapısının ve yerli yedek parça tedarik zincirinin kullanılabilmesi bu primi ortadan kaldırmaktadır. Çoklu motor konfigürasyonunun önemli bir avantajı, endüstriyel sınıf dizel motorların küresel yedek parça ağı ile modüler değişim olanağı sunmasıdır. NRE 3GS21B uygulamasında bir motor modülünün değişimi 6 saatten az sürede tamamlanabilmektedir, oysa geleneksel tek motorlu lokomotifte bu süre günlerle ifade edilmektedir [16].

5.3. İşçilik ve diğer maliyetler

İşçilik maliyetleri makinist, bakım personeli ve operasyon personeli giderlerini kapsamaktadır. TCDD Taşımacılık Sayıştay raporuna göre, mevcut filoda yaklaşık 250 makinistin lokomotif üzerinde görev yapmadığı, bunun diğer makinistlerin görev sürelerini artırarak iş kazası riskini yükselttiği belirtilmiştir [7]. Yıllık çalışma süresi kazaları arasında 11 saati aşan makinist çalışma süresine sahip vakalar bulunduğu da rapor edilmiştir [7]. Filo modernizasyonu hem işçilik verimliliğini hem de iş güvenliğini olumlu yönde etkilemektedir. İşçilik maliyetlerinin ekonomik analizle ilişkisi şu şekilde kurulmuştur: makinist ve bakım personeli giderleri üç konfigürasyonda da eşit kabul edilmiş (6 M TL/yıl), böylece TCO farklarının yalnızca teknolojiye bağlı kalemlerden (CAPEX, yakıt, bakım, revizyon) kaynaklanması sağlanmıştır. Sayıştay raporundaki makinist eksikliği bulgusu [7] ise doğrudan bir maliyet kalemi olarak değil, filo modernizasyonunun işgücü verimliliği üzerindeki dolaylı etkisini gösteren bağlamsal veri olarak sunulmuştur. Diğer maliyet kalemleri kapsamındaki sigorta, altyapı erişim ücretleri ve idari giderler, üç konfigürasyon için de benzer düzeyde olduğundan karşılaştırmalı analizde ayrıştırıcı etkisi sınırlıdır; bu kalemler TCO hesabında yıllık sabit gider içinde toplulaştırılmıştır.

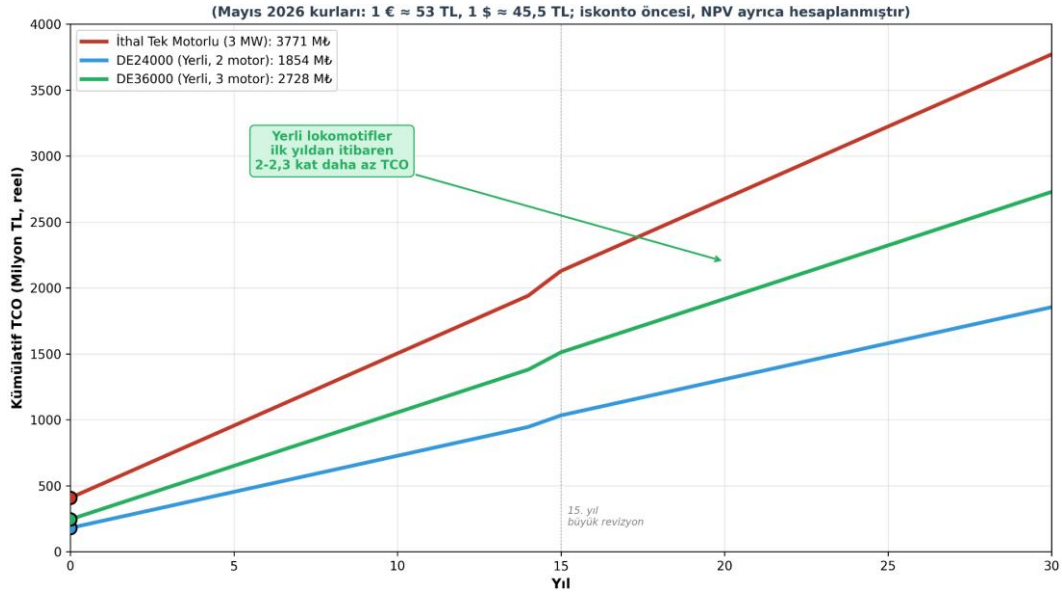
6. 30 Yıllık Kümülatif TCO Karşılaştırması

30 yıllık hizmet ömrü boyunca üç farklı konfigürasyon için kümülatif TCO Tablo 2 ve Şekil 3'te sunulmaktadır. İskonto öncesi reel TL cinsinden hesaplanan değerler, %8 iskonto oranıyla NPV'ye dönüştürülmüş ve sonuçlar yatırım kararı açısından değerlendirilmiştir.

Tablo 2’den görüldüğü üzere, 30 yıllık kümülatif TCO açısından DE24000 platformu ithal muadiline kıyasla yaklaşık %51 tasarruf, DE36000 platformu ise %28 tasarruf sağlamaktadır. NPV bazında ise tasarruflar sırasıyla %52 ve %30 düzeyindedir. DE24000’in daha yüksek tasarruf oranı, manevra ve hafif hat hizmetinde daha yüksek yakıt tasarrufu (%40-50) elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Döviz kurunun sonuçlar üzerindeki etkisini test etmek amacıyla hesaplamalar, karşılaştırma senaryosu olarak 1 € = 36 TL (2024 yılı ortalaması düzeyi) kuru ile tekrarlanmıştır. Bu senaryoda ithal lokomotifin 30 yıllık TCO’su 3.490 M TL’ye gerilemekte, yerli DE24000’in tasarruf avantajı ise %51’den %49’a sınırlı biçimde daralmaktadır. Bu karşılaştırma, yerli üretimin ekonomik avantajının kur seviyesinden bağımsız olarak korunduğunu, ancak TL’deki değer kaybının bu avantajı daha da genişlettiğini göstermektedir.

Tablo 2. 30 yıllık TCO bileşenleri karşılaştırması (Milyon TL, Mayıs 2026 reel fiyatları)

TCO Bileşeni	İthal Tek Motor	DE24000	DE36000	Tasarruf (%)
CAPEX	408	180	245	%40-56
Yakıt (30 yıl)	2.520	1.197	1.890	%25-53
Bakım (30 yıl)	585	264	363	%38-55
İşçilik (30 yıl)	180	180	180	-
Büyük revizyon (15. yıl)	78	33	50	%36-58
Toplam TCO	3.771	1.854	2.728	%28-51
NPV (%8 iskonto)	1.665	806	1.174	%30-52



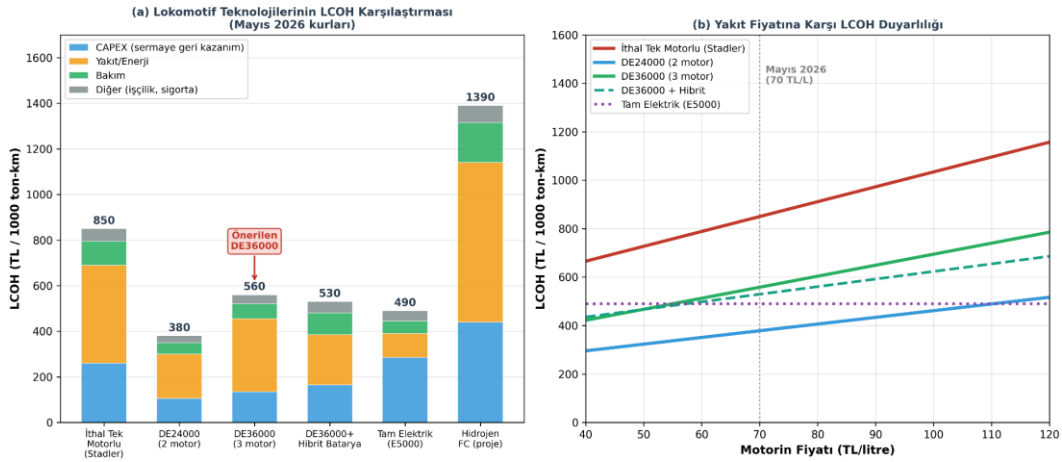
Şekil 3. 30 yıllık kümülatif TCO karşılaştırması (Mayıs 2026 döviz kurları)

7. Birim Taşıma Maliyeti (LCOH) Analizi

Farklı lokomotif teknolojilerinin ekonomik karşılaştırması için LCOH metriği standart bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada altı farklı teknoloji alternatifi—ithal tek motorlu Stadler, DE24000, DE36000, hibrit DE36000, tam elektrikli E5000 ve hidrojen yakıt hücresi (FC) projeksiyon—1000 ton-km başına TL cinsinden LCOH değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 4’te sunulmaktadır. Yakıt fiyatı duyarlılığı, tek bir senaryo yerine 40-120 TL/L sürekli aralığı boyunca taranmıştır: alt sınır (40 TL/L) 2021-2026 döneminde reel bazda gözlenen

en düşük fiyat düzeyini, üst sınır (120 TL/L) ise baz fiyatın yaklaşık %70 üzerindeki bir arz şoku senaryosunu temsil etmektedir.

Şekil 4-(a) incelendiğinde, ithal tek motorlu lokomotifin LCOH'u 850 TL/1000 ton-km ile en yüksek değeri sergilerken, DE24000 platformu 380 TL/1000 ton-km ile en düşük LCOH'a sahip olmaktadır. DE36000 (560 TL/1000 ton-km) ana hat hizmetinde daha yüksek taşıma kapasitesi sunmakta, ancak birim maliyet açısından DE24000'in altında kalmaktadır. Hibrit DE36000 (530 TL/1000 ton-km) ek CAPEX yatırıma rağmen yakıt tasarrufu sayesinde DE36000'den daha düşük LCOH sergilemektedir. Tam elektrikli E5000 lokomotifi, yüksek edinim maliyetine karşın düşük enerji maliyetiyle 490 TL/1000 ton-km değerine ulaşırken, hidrojen FC alternatifi mevcut hidrojen fiyatları (5,13-6,13 £/kg) [11] göz önüne alındığında 1.390 TL/1000 ton-km ile ekonomik olarak en az çekici alternatif olarak görünmektedir.



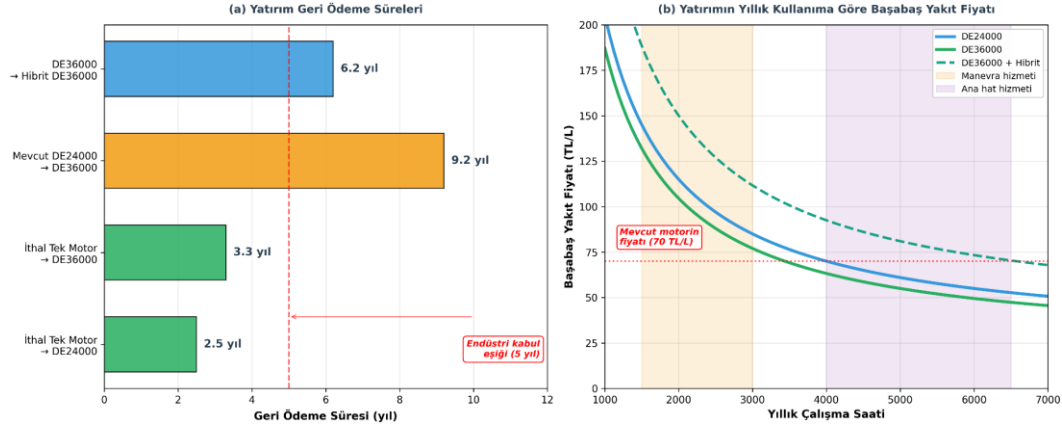
Şekil 4. LCOH (birim taşıma maliyeti) analizi: (a) altı farklı lokomotif teknolojisi için LCOH bileşenleri, (b) motorin fiyatına karşı LCOH duyarlılığı

Şekil 4-(b)'deki yakıt fiyatı duyarlılık analizi, çoklu motor konfigürasyonlarının yakıt fiyatı yükselişine karşı önemli bir koruma sağladığını göstermektedir. Motorin fiyatının 120 TL/L'ye çıkması senaryosunda ithal tek motorlu lokomotifin LCOH'u %50 artarken, DE36000'inki yalnızca %32 artmakta, hibrit DE36000'inki ise %25 ile sınırlı kalmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin enerji ithalatı bağımlılığı ve döviz kuru oynaklığı koşullarında stratejik bir avantaj olarak değerlendirilmelidir.

8. Geri Ödeme Süresi ve Duyarlılık Analizi

8.1. Geri ödeme süresi analizi

Yatırım kararının pratik değerlendirmesinde geri ödeme süresi, endüstri uygulayıcıları tarafından sıkça başvurulmuş basit ve sezgisel bir metriktir. Bu çalışmada dört farklı geçiş senaryosu için geri ödeme süreleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur.

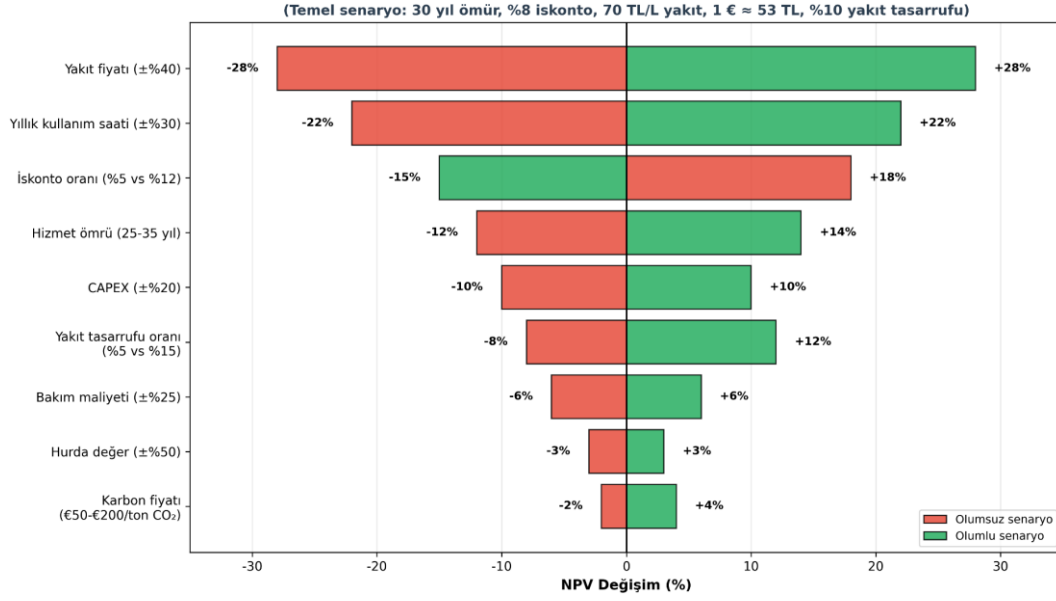


Şekil 5. Geri ödeme süresi ve başabaş yakıt fiyatı analizi (Mayıs 2026 kurları)

İthal tek motorlu lokomotiften DE24000'e geçiş 2,5 yıl, DE36000'e geçiş ise 3,3 yıl geri ödeme süresi sunmaktadır. Bu değerler, endüstri kabul eşiği olan 5 yılın belirgin biçimde altında kalarak ekonomik açıdan oldukça çekici olduğunu ortaya koymaktadır [17]. Şekil 5-(b)'deki başabaş yakıt fiyatı analizi, ana hat çalışma aralığında (4.000-6.500 saat/yıl) DE36000 için başabaş yakıt fiyatının 45-65 TL/L'ye düştüğünü, bu durumun mevcut motorin fiyatı altında bile DE36000 yatırımının kârlılığını koruduğunu göstermektedir. Başabaş analizi tek bir kullanım düzeyi yerine 1.000-7.000 saat/yıl sürekli aralığında sunulmuştur: manevra bölgesinde (1.500-3.000 saat/yıl) başabaş yakıt fiyatı 75-130 TL/L aralığında kalmakta ve yatırım kârlılığı yakıt fiyatına duyarlı hale gelmekte; ana hat bölgesinde ise başabaş fiyatın mevcut piyasa fiyatının altına inmesi, yatırımın geniş bir fiyat bandında kârlı kaldığını göstermektedir. Bu bulgu, genset yatırım önceliğinin yüksek kullanımlı ana hat ve yoğun manevra profillerine verilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

8.2. NPV duyarlılık analizi

DE36000 yatırımının NPV'sinin temel parametrelere duyarlılığı Şekil 6'da tornado diyagramı şeklinde sunulmaktadır. Parametre aralıkları şu gerekçelerle seçilmiştir: yakıt fiyatı $\pm\%40$ bandı, 2021-2026 döneminde Türkiye'de gözlenen yıllık motorin fiyat değişim aralığını kapsamaktadır; yıllık kullanım $\pm\%30$ bandı, manevra ve ana hat profilleri arasındaki operasyonel değişkenliği yansıtmaktadır; iskonto oranı $\%5-12$ aralığı, kamu (düşük) ve özel sektör (yüksek) finansman koşullarını temsil etmektedir; hizmet ömrü 25-35 yıl bandı ise erken hizmetten çıkarma ve ömür uzatma senaryolarına karşılık gelmektedir.



Şekil 6. DE36000 NPV duyarlılık analizi (tornado diyagramı)

Duyarlılık analizinde, yakıt fiyatının NPV üzerindeki etkisi ($\pm\%28$) en yüksek değerdir. Yıllık kullanım saati ($\pm\%22$) ve iskonto oranı (%5 ile %12 senaryosunda $\pm\%15-18$) ikinci derecede önemli faktörlerdir. Hizmet ömrü (25 ile 35 yıl arasında $\pm\%12-14$), CAPEX değişikliği ($\pm\%10$), yakıt tasarrufu oranı (%5 ile %15 senaryosunda $\pm\%8-12$) ve bakım maliyeti ($\pm\%6$) orta düzeyde etkili faktörlerdir. Karbon fiyatı senaryosu (€50-€200/ton CO₂) NPV üzerinde küçük ($-\%2$ ile $+\%4$) bir etki göstermekte, bu durum Türkiye'nin henüz karbon fiyatlandırması uygulamadığı mevcut durumun bir yansımasıdır; ancak AB Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) Türkiye-AB demiryolu taşımacılığını dolaylı olarak etkileyebilecek bir gelişmedir [18].

9. Türkiye Ekonomik Bağlamı ve Yatırım Teşvikleri

9.1. TCDD Taşımacılık operasyonel ve finansal durumu

Türkiye demiryolu sektörünün mevcut durumu, yerli teknoloji geliştirmenin aciliyetini somut biçimde ortaya koymaktadır. Sayıştay'ın 2024 yılı denetim raporuna göre [7]; TCDD Taşımacılık AŞ 2024'ü 25,079 milyar TL net zararla kapatmıştır. 22 yıllık birikimli zarar 84 milyar TL'ye ulaşmıştır. Dizel ana hat lokomotiflerinin %75'i, manevra lokomotiflerinin %29'u 30 yaş ve üzerindedir. 2.263 adet vagon, 26 yıla yakın süredir revizyon görmeden atıl durumdadır. Makinist eksikliği nedeniyle 11 saati aşan çalışma süresi vakaları rapor edilmiştir. Bu tablo, modern lokomotif filosuna acil ihtiyaç olduğunu ve mevcut ithal alım stratejisinin sürdürülebilir olmadığını göstermektedir.

9.2. Yatırım teşvikleri ve finansman olanakları

Türkiye'de demiryolu Ar-Ge ve yerli üretim için kapsamlı bir teşvik ekosistemi mevcuttur. TÜBİTAK 1505 (Üniversite-Sanayi İşbirliği), 1511 (Öncelikli Alanlar) ve 1512 (Girişimcilik) programları, lokomotif Ar-Ge projelerinde %60-100 destek oranlarıyla katkı sağlamaktadır [19]. TÜBİTAK ARDEB 1007 programı kapsamında TÜBİTAK-RUTE V8 özgün motor projesi 4 yıl gibi kısa sürede tamamlanmış olup, motor 1 litre hacminden 44,5 BG güç üretmekte ve V8/V12/V16 versiyonlarıyla 2700 BG'ye kadar ölçeklenebilmektedir [20]. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın açıkladığı 2025-2027 yatırım programı kapsamında TÜRASAŞ bünyesinde üç yeni fabrika (Eskişehir Milli Elektrikli Lokomotif İmalat Fabrikası, Sakarya Milli Elektrikli Tren Seti Fabrikası, Sivas Milli Raylı Sistem Araçları Parça İmalat Fabrikası) 2025 yılında

temellendirilmiştir [21]. TÜRASAŞ-TCDD Taşımacılık arasında imzalanan 95 adet Eskişehir 5000 elektrikli ana hat lokomotifi sözleşmesi, yerli üretimin ölçeklenmesi için stratejik bir referans oluşturmaktadır [15]. Bu teşvik mekanizmalarının analiz bulgularıyla ilişkisi iki yönlüdür. Birincisi, TÜBİTAK destekleri ile yatırım teşvikleri kapsamındaki vergi indirimleri, Bölüm 4’te sunulan 180-245 M TL edinim maliyeti tahminlerinin Ar-Ge ve geliştirme maliyeti bileşenini büyük ölçüde kamu kaynağına aktarabilmekte, böylece seri üretim birim maliyetini daha da düşürme potansiyeli taşımaktadır. İkincisi, Sayıştay raporundaki filo yaşı ve zarar verileri ile Bölüm 6’da hesaplanan lokomotif başına yaklaşık 1,9 milyar TL’lik 30 yıllık tasarruf birlikte değerlendirildiğinde, örneğin 100 adetlik bir filo yenileme programında yaklaşık 190 milyar TL düzeyindeki toplam tasarruf potansiyelinin, TCDD Taşımacılık’ın 22 yıllık birikimli zararının (84 milyar TL) iki katından fazlasına karşılık geldiği görülmektedir.

10. Tartışma ve Değerlendirme

Lokomotif tedarik alternatiflerinin çok kriterli stratejik karşılaştırması Tablo 3’te sunulmaktadır.

Tablo 3. Lokomotif tedarik alternatiflerinin çok kriterli stratejik karşılaştırması (Mayıs 2026 değerleri)

Kriter	İthal Stadler	DE24000 (Yerli)	DE36000 (Yerli)	Hibrit
CAPEX (M ₺)	408	180	245	295
30 yıllık TCO (M ₺)	3.771	1.854	2.728	2.580
LCOH (TL/1000 t-km)	850	380	560	530
Geri ödeme süresi	-	2,5 yıl	3,3 yıl	6,2 yıl
Döviz bağımlılığı	Yüksek	Düşük	Düşük	Orta
İhracat potansiyeli	Yok	Yüksek	Yüksek	Orta
Yakıt fiyatı duyarlılığı	Yüksek	Düşük	Orta	Çok düşük
Teknoloji bağımsızlığı	Yok	Tam	Tam	Tam

Çoklu motor konfigürasyonlarının ekonomik analizi, üç temel bulgu sunmaktadır. Birincisi, yerli üretimin döviz kuru oynaklığına karşı sağladığı koruma, salt CAPEX karşılaştırmasının ötesinde stratejik bir değerdir. Türk lirasının son beş yılda Euro karşısında belirgin değer kaybı yaşadığı [7] göz önüne alındığında, yerli üretim TCDD Taşımacılık gibi ulusal operatörler için kritik bir mali güvence sağlamaktadır. Mayıs 2026 itibarıyla geçerli 1 € = 53 TL kuruyla yapılan analiz, döviz kuru baskısının ithal lokomotif tedarikinde yarattığı ek mali yükün ne kadar büyüdüğünü açıkça ortaya koymaktadır.

İkincisi, çoklu motor konfigürasyonun yakıt fiyatına karşı sağladığı ekonomik koruma, Türkiye’nin enerji ithalatı bağımlılığı bağlamında özellikle değerlidir. Şekil 4.(b)’de görüldüğü üzere, motorin fiyatının 70 TL/L’den 120 TL/L’ye yükselmesi senaryosunda ithal tek motorlu lokomotif LCOH’unun %50 artarken, DE36000’inki yalnızca %32 ve hibrit DE36000’inki %25 artmaktadır. Bu durum, uluslararası genset deneyimleriyle, Union Pacific’in 135 adetlik RailPower siparişi ve NRE 3GS21B’nin 182 adetlik üretimi [16] ile tutarlıdır.

Üçüncüsü, başarısız ticari deneyimlerden (Railpower Technologies iflası, Progress Rail PR43C’nin emekliye ayrılması) çıkarılan dersler ekonomik fizibilite kadar teknolojik olgunluğun da önemini vurgulamaktadır [16]. Bu nedenle, DE24000/DE36000 platformlarının teknik tasarımının önceki çalışmalarda [1,2] detaylı şekilde ele alınmış olması ve bu ekonomik analizin somut teknik parametrelere dayanması, projenin gerçek dünyada uygulanabilirliği için temel bir avantajdır. Hidrojen yakıt hücreli lokomotif alternatifi, AB ve İngiltere’de gelişen önemli bir ekosistem oluşturmakla birlikte [11], mevcut hidrojen fiyatları ve altyapı eksikliği göz önüne alındığında, Türkiye için kısa-orta vadede ekonomik fizibilitesi sınırlı kalmaktadır.

Bulguların literatürle karşılaştırılması, sonuçların dış geçerliliğini desteklemektedir. Bu çalışmada ithal tek motorlu lokomotif için hesaplanan yakıt payı (30 yıllık TCO'nun yaklaşık %67'si), Ahluwalia ve diğerlerinin [3] hat tipi lokomotifler için raporladığı yaklaşık %80 değeri ile aynı büyüklük mertebesinde; aradaki fark, Türkiye'de işçilik maliyetlerinin ABD'ye kıyasla düşük olması ve bu çalışmada bakım kalemlerinin ayrı modellenmesiyle açıklanabilir. Geri ödeme sürelerinin (2,5-3,3 yıl) endüstri eşiğinin altında kalması, Rout ve diğerlerinin [10] alternatif güç aktarma yatırımlarında yakıt maliyet farkının TCO rekabetçiliğinde belirleyici olduğu bulgusuyla uyumludur. Hidrojen yakıt hücreli alternatifin en yüksek LCOH'u sergilemesi, Xu ve diğerlerinin [11] mevcut hidrojen tedarik maliyetleriyle demiryolu uygulamasının henüz ekonomik olgunluğa ulaşmadığı değerlendirmesini Türkiye bağlamında doğrulamaktadır. Genset saha deneyimlerindeki karışık sonuçlar [16] ise bu çalışmanın kullanım saatine bağlı başabaş bulgusuyla tutarlıdır: genset ekonomisi yüksek kullanımlı profillerde güçlü, düşük kullanımlı profillerde yakıt fiyatına duyarlıdır.

11. Sonuçlar

Bu çalışmada, dizel-elektrik lokomotiflerde çoklu motor (genset) konfigürasyonunun ekonomik fizibilitesi, yerli TÜBİTAK-RUTE V8 dizel motoruyla geliştirilen DE24000 ve DE36000 platformları için kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Analizler, Mayıs 2026 itibarıyla geçerli olan döviz kurları temel alınarak yapılmış olup, elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmektedir.

Yerli üretim avantajıyla DE24000 ve DE36000 platformlarının edinim maliyetlerinin (CAPEX) ithal muadillere kıyasla %40-56 daha düşük olduğu belirlenmiştir. 30 yıllık kümülatif TCO açısından yerli DE24000 platformu, ithal muadiline kıyasla yaklaşık %51 tasarruf, yerli DE36000 platformu ise %28 tasarruf sağlamaktadır. NPV bazında bu değerler sırasıyla %52 ve %30 düzeyindedir.

LCOH analizinde DE24000 (380 TL/1000 ton-km) ve DE36000 (560 TL/1000 ton-km) ithal alternatife (850 TL/1000 ton-km) göre önemli birim taşıma maliyeti avantajı sunmaktadır. Geri ödeme süreleri DE24000 için 2,5 yıl, DE36000 için 3,3 yıl olarak hesaplanmış olup, her ikisi de endüstri kabul eşiği olan 5 yılın belirgin biçimde altında kalmaktadır.

Duyarlılık analizi, yakıt fiyatının ($\pm\%28$ NPV etkisi), yıllık kullanım saatinin ($\pm\%22$) ve iskonto oranının baskın faktörler olduğunu ortaya koymuştur. Çoklu motor konfigürasyonu, ithal alternatife kıyasla yakıt fiyatı yükselişine karşı %40-50 oranında daha az duyarlılık göstermektedir.

Türkiye özelinde, TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin 2024 yılı 25,079 milyar TL net zararı, 22 yıllık birikimli 84 milyar TL zararı ve dizel filosunun %75'inin 30 yaş üzeri olması, yerli ve milli lokomotif geliştirme stratejisinin ekonomik aciliyetini ortaya koymaktadır. Bu yatırımın kazanımları iki grupta değerlendirilmelidir. Analiz bulgularına doğrudan dayanan nicel kazanımlar; 30 yılda lokomotif başına yaklaşık 1,9 milyar TL mali tasarruf (Tablo 2) ile CAPEX farkından ve 30 yıllık ithal yedek parça-revizyon giderlerinden kaynaklanan yaklaşık 3-4 milyon Euro/lokomotif düzeyindeki döviz tasarrufudur. İhracat potansiyeli ve 2053 net sıfır emisyon hedefine katkı ise bu çalışmanın nicel analiz kapsamı dışında kalan, ancak Tablo 3'teki çok kriterli karşılaştırmada nitel boyut olarak değerlendirilen stratejik kazanımlardır; bu boyutların nicelleştirilmesi gelecek çalışma hedefleri arasında yer almaktadır.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Birincisi, kullanılan CAPEX ve OPEX değerleri literatür verilerine ve karşılaştırılabilir pazar referanslarına dayanmakta olup, gerçek üretim maliyetleri pilot üretim aşamasında daha kesin olarak belirlenebilecektir. İkincisi, Türkiye'ye

özgü hat profillerinin detaylı simülasyonu yapılmamıştır. Üçüncüsü, döviz kuru tahminleri ve yakıt fiyatı projeksiyonları yapısal belirsizlikler içermektedir. Gelecek çalışmalar için; DE24000 prototip üretiminin gerçek CAPEX verilerinin elde edilmesi, TCDD Taşımacılık operasyonel verileriyle detaylı kalibrasyon yapılması, karbon fiyatlandırması senaryolarının ekonomik etkilerinin entegre edilmesi ve V12/V16 motorlu DE48000 ve milli CoCo platformlarının ekonomik analizi önerilmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, TÜBİTAK-RUTE V8 özgün dizel motoru geliştiren araştırma ekibine, TÜRASAŞ Eskişehir Bölge Müdürlüğü'ne ve önceki iki çalışmamıza değerli katkıları için Demiryolu Mühendisliği dergisi editör ve hakemlerine teşekkür eder.

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, doi: 10.47072/demiryolu.1892069
- [2] 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
- [3] R.K. Ahluwalia, D. Papadias, J-K. Peng, and T. Krause, “Total Cost of Ownership for Line Haul, Yard Switchers and Regional Passenger Locomotives –Preliminary Results”, *H2@Rail Workshop*, Argonne National Laboratory, USA, March 2019. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f62/fcto-h2-at-rail-workshop-2019-ahluwalia.pdf> [Accessed May 16, 2026].
- [4] *Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing*, IEC 60300-3-3:2017, Edition 3.0 2017-01, International Electrotechnical Commission (IEC), Switzerland, 2017. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/21776/09486c4e728042ef8d06904eb627e1fc/IEC-60300-3-3-2017.pdf> [Accessed May 15, 2026].
- [5] National Renewable Energy Laboratory, “Annual Technology Baseline (ATB): The 2024 Transportation Update”, NREL, USA, 2024. [Online]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/91635.pdf> [Accessed May 17, 2026].
- [6] J. Bracci, M. Koleva, and M. Chung, “Levelized Cost of Dispensed Hydrogen for Heavy-Duty Vehicles”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA, Tech. Rep. NREL/TP-5400-88818, March 2024. [Online]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/88818.pdf> [Accessed May 15, 2026].
- [7] Sayıştay, “TCDD Taşımacılık A.Ş. 2024 yılı denetim raporu”, T.C. Sayıştay Başkanlığı, Ankara, Türkiye, Kasım 2025.
- [8] Stadler Rail, “Stadler wins contract to supply 35 mainline locomotives to Turkish TCDD Taşımacılık”, Press Release, Bussnang, Switzerland, Feb. 9, 2026. [Online]. Available: https://www.stadlerail.com/api/docs/x/6852ed16f0/20260209_media-release_euro4001-for-tcdd-tasimacilik_en.pdf [Accessed May 17, 2026].
- [9] M. Kapetanović, A. Núñez, N. van Oort, and R.M.P. Goverde, “Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains”, *Applied Energy*, vol. 294, 117018, July 2021. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117018
- [10] C. Rout, H. Li, V. Dupont, and Z. Wadud, “A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel”, *Heliyon*, vol. 8, no. 12, e12417, December 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12417
- [11] Z. Xu, N. Zhao, Y. Yan, Y. Zhang, T. Zhang, D. Wu, S. Hillmanssen, and S. Gao, “Hydrogen supply chain for future hydrogen-fuelled railway in the UK: Transport sector focused”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 88, ss. 1–13, 2024. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.397
- [12] Environmental specifications for new rolling stock, UIC 345: 1ED 2006, International Union of Railways (UIC), France, 2013.

- [13] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “Akaryakıt bayi satış fiyatları – aylık ortalama”, EPDK, Ankara, Türkiye, Mayıs 2026. [Online]. Available: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/21-48/akaryakit-fiyatları> [Accessed May 17, 2026].
- [14] Railway Gazette International, “Stadler to supply 35 Euro4001 diesel locomotives to Turkey’s TCDD Taşımacılık”, Railway Gazette, London, UK, February 9 2026. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/business/2026/02/09/stadler-to-supply-35-euro4001-diesel-locomotives-to-turkeys-tcdd-tasimacilik/> [Accessed May 17, 2026].
- [15] TÜRASAŞ ve TCDD Taşımacılık, “Eskişehir 5000 elektrikli ana hat lokomotif sözleşmesi”, TÜRASAŞ Genel Müdürlüğü, Eskişehir, Türkiye, Mart 2024.
- [16] D. Lustig, “The controversial genset locomotive”, *Trains Magazine*, Kalmbach Media, Waukesha, WI, USA, February 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.trains.com/trn/railroads/locomotives/the-controversial-genset-locomotive/> [Accessed May 15, 2026].
- [17] Zenobē, “Lifetime costs of an electric fleet, and where to start with TCO”, Zenobē Energy Ltd., London, UK, 2025. [Online]. Available: <https://www.zenobe.com/insights-and-guides/lifetime-costs-of-electric-fleet-tco/> [Accessed May 16, 2026].
- [18] Regulation (EU) 2023/956 Establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism, European Commission, Brussels, Belgium, May 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng> [Accessed May 15, 2026].
- [19] TÜBİTAK, “1505 Üniversite-sanayi işbirliği destek programı”, TÜBİTAK, Ankara, Türkiye, 2024. [Online]. Available: <https://tubitak.gov.tr/tr/destekler/sanayi/ulusal-destek-programlari/1505-universite-sanayi-isbirligi-destek-programi> [Accessed May 17, 2026].
- [20] TÜBİTAK, “TÜBİTAK’tan ilk yerli tasarım lokomotif motoru – 160 serisi özgün motor ailesi”, TÜBİTAK Haberleri, Ankara, Türkiye, 2022. [Online]. Available: <https://tubitak.gov.tr/tr/haber/tubitaktan-ilk-yerli-tasarim-lokomotif-motoru> [Accessed May 15, 2026].
- [21] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, “Yerli ve milli lokomotif için 3 yeni fabrika”, UAB Resmî Açıklama, Ankara, Türkiye, 2025. [Online]. Available: <https://www.uab.gov.tr/haberler/yerli-ve-milli-lokomotif-icin-3-yeni-fabrika> [Accessed May 15, 2026].

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. Kaynakça bölümündeki tüm atıflar özgün kaynaklar üzerinden doğrulanmıştır. Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

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

Bu çalışma kapsamında herhangi bir maddi destek alınmamıştır. Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.