

Araştırma Makalesi

Elektrikli Ağır Yük Taşıma Aracı Seçiminin Çok Kriterli Analizi: Bulanık AHP-TOPSIS Çerçevesi

Tuğçe Ece Ergin, Halil Karlı*

Department of International Trade and Logistics, Faculty of Economics and Administrative Sciences,
Bartın University, Bartın, Türkiye

*Correspondence: hkarli@bartin.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1700101

Özet: Uluslararası karayolu yük taşımacılığının önümüzdeki dönemde dikkate alması gereken ana zorluklardan biri ulusal ve uluslararası çevreci düzenlemelerdir. Bu düzenlemelere uyum sağlamanın yollarından biri de araç filosunu elektrikli ağır yük taşıma araçlarıyla dönüştürmektir. Ancak yüksek sermaye yatırımı isteyen bu dönüşümde doğru araç seçimi uzun dönemli etkileri olan bir karardır. Bu çalışmanın amacı, uluslararası karayolu yük taşımacılığı bağlamında elektrikli ağır yük taşıma aracı (EAYTA) seçiminde çok boyutlu karar verme sürecini sistematik bir biçimde ele alacak bütünleşmiş bir model geliştirmektir. Çalışmada bulanık AHP ve TOPSIS yöntemi bütünleşmiş bir şekilde kullanılmıştır. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenme aşamasında Bulanık AHP yönteminden faydalanılırken alternatiflerin seçim aşamasında ise TOPSIS yönteminden faydalanılmıştır. Çalışma bulgularına göre, bulanık AHP analizi sonucunda EAYTA seçiminde etkili olan kriterler sırasıyla; yük kapasitesi, menzil, satın alma maliyeti, şarj gücü, işletme maliyeti ve motor gücüdür. TOPSIS analizi sonucu ise EAYTA sıralaması; alternatif 1, alternatif 2, alternatif 4, alternatif 5 ve alternatif 3 olarak sıralanmaktadır. Elektrikli araç seçimine yönelik yapılan çalışmalar genellikle binek araçlar veya hafif yük taşıma araçları üzerine yoğunlaşırken bu çalışma, özellikle uluslararası karayolu yük taşımacılığı bağlamında EAYTA seçim problemine yönelik bir uygulamayla hem akademik hem de endüstriyel karar süreçlerine doğrudan uygulanabilir bir model önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli kamyon, elektrikli tır, bulanık AHP, TOPSIS, yeşil lojistik, yeşil taşımacılık.

Multi-Criteria Analysis of Electric Heavy-Duty Vehicle Selection: A Fuzzy AHP-TOPSIS Framework

Abstract: One of the main challenges that international road freight transport must consider in the coming period is national and international environmental regulations. One way to comply with these regulations is to convert the vehicle fleet to electric heavy-duty vehicles. However, this transformation, which requires significant capital investment, involves making the right vehicle selection, a decision with long-term implications. The aim of this study is to develop an integrated model that systematically addresses the multi-dimensional decision-making process in the selection of electric heavy-duty vehicles (EHDVs) within the context of international road freight transport. The study employs a combined approach using the fuzzy AHP and TOPSIS methods. The fuzzy AHP method was utilized in the stage of determining the weights of the criteria, while the TOPSIS method was employed in the stage of selecting the alternatives. According to the study findings, the criteria effective in EHDV selection, as determined by the fuzzy AHP analysis, are, in order of importance: load capacity, range, purchase cost, charging power, operating cost, and motor power. The TOPSIS analysis results the EHDV ranking as follows: alternative 1, alternative 2, alternative 4, alternative 5, and alternative 3. While studies on electric vehicle selection have generally focused on passenger vehicles or light-duty vehicles, this study proposes a model that can be directly applied to both academic and industrial decision-making processes by addressing the EHDV selection problem in the context of international road freight transport.

Keywords: Electric truck, electric tractor+semi-trailer, fuzzy AHP, TOPSIS, green logistics, green transportation.

* Corresponding author.

ORCID: 0009-0007-2589-2139, 0000-0002-5366-9774 (in hierarchical order, added after if manuscript is accepted for publication)

Received 15.05.2025; Accepted 23.09.2025

Peer review under responsibility of Bandırma Onyedi Eylül University. This work is licensed under CC BY 4.0.

APA Citation Info: Ergin, T. E., & Karlı, H. (2025). Elektrikli Ağır Yük Taşıma Aracı Seçiminin Çok Kriterli Analizi: Bulanık AHP-TOPSIS Çerçevesi. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 8(2), 112-132. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1700101>

1. Giriş

Karayolu yük taşımacılığı, küresel lojistiğin ayrılmaz bir parçası olmasına rağmen, özellikle hava kirliliği ve sera gazı emisyonları üzerindeki belirgin tesirleri nedeniyle çevreye ve halk sağlığına yönelik önemli tehditler oluşturmaktadır. Çin’de, yük taşımacılığı operasyonlarına hâkim olan ağır yük taşıma araçları* (AYTA), ulusal hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biri olup, taşıt kaynaklı NOx emisyonlarının %74’ünden ve PM emisyonlarının %52’sinden sorumludur. (Zhang vd., 2021). Türkiye’de de karayolu yük taşımacılığı, ülkenin lojistik sektöründeki kritik rolü sebebiyle önemli bir sera gazı emisyon kaynağıdır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025). Bu durum, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde benzer eğilimler göstermesiyle küresel bir sorun halini almaktadır (UNEP, 2024). Karayolu yük taşımacılığından kaynaklanan zararlı emisyonlar; solunum ve kardiyovasküler hastalıklar, erken ölümler ve artan sağlık maliyetleri gibi insan sağlığı ve ekonomi üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır (Brusselaers vd., 2023; Bynum vd., 2018; Piscitelli vd., 2019). Bu emisyonların sağlık üzerindeki ciddi tehlikelerinin yanı sıra, çevreye yönelik olumsuz etkileri de büyük bir endişe kaynağıdır.

Yük taşımacılığının çevresel etkileri, bilhassa karbon yoğun enerji kullanımı ve artan emisyonların iklim değişikliğine katkıları ve kaynakların tükenme riski bağlamında ele alınması gereken kritik bir sorunsalı teşkil etmektedir. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), hidroflorokarbonlar (HFC’ler) ve siyah karbon gibi kirleticiler iklim değişikliğini önemli ölçüde tetiklemektedir (Bynum vd., 2018). Sadece AYTA’lar, taşımacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarının %40’ından ve küresel sera gazı emisyonlarının %9’undan sorumludur (Statista, 2023a). Ayrıca, sektörün fosil yakıtlara olan bu bağımlılığı çevresel tahribatı daha da derinleştirmektedir. Bu soruna çözüm olarak, başta Avrupa Birliği’nin AYTA emisyonlarını 2030 yılına kadar 2019/2020 seviyelerine kıyasla %30 azaltma hedefi olmak üzere, çeşitli ülkeler emisyon azaltma tedbirleri uygulamaya başlamıştır (Breed vd., 2021). Bu hedeflere ulaşmak amacıyla yük taşımacılığında köklü değişiklikler yapmak ve sürdürülebilir yenilikleri benimsemek acil bir zorunluluktur.

Bu çevresel zorluklara karşı umut vadeden bir çözüm olarak Elektrikli Ağır Yük Taşıma Araçları (EAYTA’lar) öne çıkmaktadır. Geleneksel dizel motorlu kamyonların aksine EAYTA’lar, sıfır egzoz emisyonu sayesinde hava kirliliğini ve sera gazı salınımını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir (Zhang vd., 2021). Örneğin, bataryalı EAYTA’lar, dizel AYTA’lara kıyasla yaklaşık %63 daha az sera gazı emisyonuna neden olmaktadır (ICCT, 2023). Özellikle Avrupa Birliği’ndeki düzenleyici tedbirlerin EAYTA’ların benimsenmesini ivmelendirmesiyle, bu araçların satışlarının 2023 yılındaki 3.500 adetten 2026 yılına kadar 22.000 adedi aşması öngörülmektedir (Statista, 2023b). Bu büyüme, EAYTA’ların sürdürülebilir yük taşımacılığına geçişte oynadığı kilit rolü ve potansiyel katkısını açıkça göstermektedir.

EAYTA’lar üzerine yapılan mevcut araştırmalar; yaşam döngüsü emisyonları, maliyet analizleri, benimseme stratejileri ve politika etkileri gibi geniş bir yelpazeyi ele almaktadır. Ana odaklanılan konular değerlendirildiğinde AYTA ve EAYTA’ları çevresel ve ekonomik performansa göre karşılaştırmaları (Zhang vd., 2021; Xu vd., 2023), farklı motor teknolojileri için sürdürülebilirlik ölçütlerini değerlendirmeler öne çıkmaktadır (Alonso-Villar vd., 2023; Moreno-Solaz vd., 2023). Bununla birlikte gerçek dünya operasyonel verilerine dayanan fizibilite analizleri (Chen ve Lin, 2024; Tanvir vd., 2021), teşviklerin ve sistematik etkilerin incelendiği modelleme çalışmaları da araştırmacıların odaklandığı konular arasında yer almaktadır (Raoofi vd., 2024; Wangsa vd., 2023). Ayrıca, son zamanlarda yapılan çalışmalarda bulanık mantık, VIKOR ve Delphi gibi gelişmiş metodolojiler kullanılarak EAYTA için karar verme çerçeveleri araştırılmıştır (Aita vd., 2024; Büyükselçuk, 2024; Özlü ve Çelebi, 2024).

EAYTA’lar üzerine yapılan mevcut literatür, bu araçların çevresel etkileri, operasyonel fizibilitesi ve politika çerçeveleri gibi çeşitli boyutlarının anlaşılmasına değerli katkılar sağlamıştır. Ancak, bu çalışmalar metodolojik yaklaşımlarında, özellikle de EAYTA’lar benimsenmesiyle ilgili kriterlerin

* 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu’na göre, kamyonet azami yüklü ağırlığı 3.500 kg’ı geçmeyen, kamyon ise bu sınırın üzerindeki yük taşıma amaçlı motorlu taşıtlardır. “TIR” ifadesi kanunda yer almasa da bu araçlar çekici ve yarı römork birleşiminden oluşan bir taşıma sistemidir. Çekici, yük taşımayan ancak yarı römork çeken araç, yarı römork ise ağırlığının bir kısmını çekiciye aktaran motorsuz taşıttır. Bu çalışmada iki araç türünü kapsaması açısından ağır yük taşıma aracı ifade kullanılmıştır.

karmaşıklığını ve birbirine bağımlılığını ele almada genellikle yetersiz kalmaktadır. Araştırmaların birçoğu, pratik uygulamalar için kritik olan karar verme süreçlerinin çok boyutlu yapısını tam olarak yansıtamayan tekil analitik yöntemlere veya betimleyici çerçevelere odaklanmaktadır. Moreno-Solaz vd. (2023) ve Özlü ve Çelebi (2024) gibi çalışmalar, atık toplama araçları gibi spesifik uygulama alanlarına ya da EAYTA'lar için genel kabul faktörlerine yoğunlaşmaktadır. Büyükselçuk (2024) çalışmasında EAYTA'ya yönelik çok kriterli karar verme yöntemiyle bir seçim çalışması gerçekleştirmesiyle birlikte bağlam konusunda ve kamyon tanımı konusunda belirsizlikler bulunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu literatür boşluğunu doldurmak amacıyla, EAYTA'ları teknik ve ekonomik kriterler açısından değerlendiren bütünsel birçok kriterli karar verme (ÇKKV) modeli geliştirmekte ve yük taşımacılığı paydaşlarına uygulanabilir stratejik çıkarımlar sunmayı hedeflemektedir. Bu çalışmanın bağlamı, uluslararası karayolu yük taşımacılığıdır. Bu sektörün en önemli taşıma noktalarından biri Avrupa ülkeleri olması ve Avrupa Birliği'nin uygulamış olduğu çevreci düzenlemeler bu firmaların dönüşümünü zorunlu kılmaktadır. Bu firmalar için uygun olmayan EAYTA seçimi, özellikle uzun mesafeli yük taşımacılığı gibi zorlu koşullar altında maliyetlerin artmasına, üretkenliğin azalmasına ve kaynakların boşa harcanmasına neden olabilir. Bu doğrultuda, bu çalışma ile EAYTA seçim sürecini optimize edecek pratik bir yaklaşım sunulması amaçlanmaktadır. Böyle bir yaklaşım, teknik ve ekonomik faktörlerin karmaşık etkileşimlerini sistematik bir biçimde dikkate alarak karar vericilere uygulanabilir ve değerli öngörüler sunma potansiyeline sahiptir.

Makalenin devamı şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, elektrikli araç seçimine yönelik ÇKKV uygulamalarını içeren ilgili literatür taraması sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerini kapsayan araştırma metodolojisi ayrıntılandırılmaktadır. Dördüncü bölümde, vaka çalışması, önerilen araştırma çerçevesi bulgular sunulmaktadır. Sonuç bölümünde ise çalışmanın temel çıkarımları özetlenmekte, pratik ve teorik katkıların yanı sıra mevcut sınırlılıklar belirtilmekte ve gelecek araştırmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. Literatür Taraması

Elektrikli araç (EA) literatürü ağırlıklı olarak otomobillere odaklanmakta ve bu araçların özellikle kişisel ve şehir içi ulaşımında yaygın olarak benimsendiğini ortaya koymaktadır. Otomobil seçimi konusu, literatürde geniş bir yer tutmakta olup bu alanda Biswas ve Das (2019), Das vd. (2019), Sonar ve Kulkarni (2021), Pal vd. (2023), Tian vd. (2023) ve Golui vd. (2024), Görçün vd. (2024), Güler ve Polatgil (2024) ve Ziemba vd. (2024) gibi çok sayıda araştırmacı tarafından önemli çalışmalar yürütülmüştür. Hafif yük araçları ise özellikle paket taşımacılığında yaygın olarak kullanılmakta olup bu konu Watróbski (2017), Shekhovtsov vd. (2020), Boskovic vd. (2023) ve Wang vd. (2023) gibi araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Elektrikli otobüsler, toplu taşımacılıktaki kritik rolleri nedeniyle daha spesifik bir araştırma alanı oluşturmakta ve Hamurcu ve Eren (2020) ile Alamoodi vd. (2024) tarafından ele alınmaktadır. Bununla birlikte, Nur vd. (2020) ve Chatterjee vd. (2024) tarafından incelenen teslimat dronları, insansız hava araçlarının lojistik süreçlerine artan entegrasyonunu göstermektedir.

EA seçimi literatürünün önemli bir bölümü, karar verme süreçlerini geliştirmek amacıyla hibrit ÇKKV metodolojilerine yönelmektedir. Böylece farklı tekniklerin güçlü yönlerini birleştirerek daha sağlam ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi hedeflemektedir. Örneğin, Watróbski (2017), Alosaimi vd. (2021) ve Güler ve Polatgil (2024) gibi araştırmacılar, PROMETHEE, Bulanık TOPSIS, AHP ve SWARA gibi yöntemleri bütünleştirerek çok sayıda kriter içeren karmaşık karar verme problemlerini analiz etmektedir. Bu yöntemler arasında TOPSIS ve türevleri; basitlikleri, hesaplama etkinlikleri ve net sıralamalar üretebilme kabiliyetleri nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir (Hamurcu ve Eren, 2020; Pal vd., 2023; Więckowski vd., 2023). Benzer biçimde, AHP ve bulanık AHP gibi uyarlamaları da kriter ağırlıklandırma amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, Biswas ve Das (2019) ile Sonar ve Kulkarni (2021) gibi çalışmaların metodolojik temelini oluşturmaktadır. Daha sınırlı bir kullanıma sahip olsa da PROMETHEE yöntemi de Gomes vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi hibrit çerçevelere entegre edilmiştir. Yenilikçi ancak daha az sıklıkla uygulanan metodolojiler arasında AROMAN (Boskovic vd., 2023), PROBID (Chatterjee vd., 2024) ve ORESTE (Tian vd., 2023) yer almaktadır. Bu yaklaşımlar, artırılmış duyarlılık ve özgün sıralama mekanizmaları gibi benzersiz avantajlar sunsa da muhtemel karmaşıklıkları veya araştırmacılar arasındaki sınırlı bilinirlikleri nedeniyle uygulamada kısıtlı bir yer bulmaktadır.

Tablo 1. Elektrikli araç seçimine ilişkin literatür

Yazarlar	Araç tipi	Metodoloji	Kriterler	Alternatif
Watróbski (2017)	Hafif Yük Taşıma Aracı	PROMETHEE II- Bulanık TOPSIS	Performans; taşıma kapasitesi, maksimum hız, hareket aralığı Pil; pil şarj süresi %100, pil şarj süresi %80, pil kapasitesi Motor; motor gücü, motor torku Fiyat	36
Biswas ve Das (2019)	Otomobil	Bulanık AHP-MABAC	Kombine yakıt ekonomisi, batarya menzili, maksimum hız, hızlanma süresi, araç maliyeti	7
Das vd. (2019)	Otomobil	Bulanık AHP-EVAMIX	Fiyat, batarya kapasitesi, tork, şarj süresi, toplam ağırlık, oturma kapasitesi, sürüş menzili, maksimum hız, hızlanma	12
Biswas vd. (2020)	Otomobil	CRITIC-CoCoSo	Yakıt ekonomisi, menzil, yıllık yakıt maliyeti, 60 mil hıza ulaşma, maliyet, egzoz emisyonu	5
Hamurcu ve Eren (2020)	Otobüs	AHP-TOPSIS	Hız, yolcu kapasitesi, menzil, maksimum güç, akü kapasitesi, şarj süresi	6
Nur vd. (2020)	Teslimat Dronu	Bulanık TOPSIS	Fiziksel özellikler; Drone genel boyutu, ağırlığı, drone tipi, yakıt tipi Performans; Dahili hesaplama bileşenleri, konum ve yakınlık doğruluğu, iletişim ve veri kalitesi, izlenebilirlik, güvenilirlik Ekonomik; onarım maliyeti, toplam birim maliyeti, toplam yaşam döngüsü maliyeti, işletme maliyeti, eğitim maliyeti Çevresel; uyarlanabilirlik, şarj/yakıt konumu, çevresel etki, gerekli teslimat mesafesi Faydalı yük kapasitesi; maksimum uçuş süresi, toplam şarj/yakıt süresi, şarj/yakıt kullanım oranı, maksimum yük, maksimum taşıma boyutları, maksimum ulaşılabilir irtifa, drone hızı, dinamik atamaya uyarlanabilirlik, paket işleme esnekliği, teslimat esnekliği	4
Shekhovtsov vd. (2020)	EHYTA	COMET	Performans; taşıma kapasitesi, maksimum hız, hareket aralığı Pil; pil şarj süresi %100, pil şarj süresi %80, pil kapasitesi Motor; motor gücü, tork Fiyat	10
Alosaimi vd. (2021)	Otomobil	Bulanık AHP-Bulanık TOPSIS	Düzenleyici; hükümet politikaları, trafik politikaları, iç politikalar Teknik; verimlilik, kapsam, çevre, güvenlik, İş; tüketici memnuniyeti, hizmet, yatırım Tasarım; pil, geri dönüştürülebilirlik, uyumluluk	5)
Sonar ve Kulkarni (2021)	Otomobil	AHP-MABAC	Sürüş menzili, batarya kapasitesi, fiyat, tork, oturma kapasitesi, şarj süresi	6
Gomes vd. (2022)	Otomobil	AHP-PROMETHEE	Fiyat, tüketim, menzil, konfor, marka, güvenlik, teknoloji	4

Tablo 1. Devam

Yazarlar	Araç tipi	Metodoloji	Kriterler	Alternatif
Babar vd. (2021)	Otomobil	Bulanık SWOT	İç Kriterler; kirlilik kontrolü, satın alınabilirlik, gelecekteki sürdürülebilirlik, verimlilik, ulusal fayda Dış Kriterler; teknolojik gelişmeler, enerji sürdürülebilirliği, küresel teşvikler, küresel baskı, yakıt fiyatları	
Pradhan vd. (2022)	Otomobil	Bulanık Mantık-COPRAS-QFD	Teknik kriterler; Maksimum güç, maksimum tork, akü kapasitesi, tam şarj aralığı, boş ağırlık, maksimum hız güvenliği, Müşteri Kriterleri; AC şarj, DC şarj, akü garantisi, araç tipi, yerden yükseklik, toplam maliyet, bagaj hacmi, işletme maliyeti	6
Boskovic vd. (2023)	EHYTA	AROMAN	Fiyat, taşıma kapasitesi, batarya kapasitesi, hacim	4
Pal vd. (2023)	Otomobil	Entropi-TOPSIS	Fiyat, hızlanma, pil kapasitesi, maksimum güç, menzil, şarj süresi	13
Sejwal vd. (2023)	Otomobil	AHP-TOPSIS-MOORA	Maliyet, sürüş menzili, şarj, hız, hızlanma, batarya, tork, güç	8
Tian vd. (2023)	Otomobil	MADM-ORESTE	Konfor, maliyet performansı, görünüm, iç mekân, yakıt tüketimi, alan, kullanım, güç	8
Wang vd. (2023)	EHYTA	Fuzzy-Rough SWARA- Fuzzy-Rough MARCOS	Fiyat, hızlanma, menzil, motor gücü, batarya kapasitesi, şarj süresi, hızlı şarj süresi, araç tüketimi, maksimum taşıma kapasitesi, kargo hacmi	9
Więckowski vd. (2023)	Otomobil	Aralık TOPSIS	Fiyat, 100'e hızlanma, tam akü menzili, tam şarj süresi, %80'e kadar hızlı şarj süresi, azami hız, enerji kullanımı, akümülatör kapasitesi, motor gücü, araç ağırlığı, azami tork	7
Alamoodi vd. (2024)	Otobüs	Entropi DOSM	Araç faktörleri; yolcu kapasitesi, maksimum hız, menzil, tırmanma kabiliyeti Dış faktörler; Mali boyut; enerji maliyetleri, sermaye başlangıç maliyeti, yolcu başına sermaye başlangıç maliyeti, bakım maliyeti, batarya ve şarj maliyeti, Çevresel etki; emisyon maliyeti, gürültü maliyeti, mülk değerlerinde indirim, EUAC, ortam seviyesinin üzerindeki gürültü miktarı	6
Chatterjee vd. (2024)	Teslimat Dronu	SPC-PROBID-SPROBID	Uçuş süresi, maksimum kalkış ağırlığı, maksimum hız, maksimum uçuş yüksekliği, ortalama çalışma sıcaklığı, uzaktan kumanda mesafe aralığı, kamera çözünürlüğü, yaklaşık maliyet	8
Golui vd. (2024)	Otomobil	Bulanık TOPSIS	Menzil, akıllı özellikler, performans, pil ömrü, depolama alanı, fiyat, şarj süresi	8
Görçün vd. (2024)	Otomobil	MADM-COPRAS	Fiyat, motor gücü, şarj süresi, estetik, yetkili servis, tek şarj mesafesi, konfor, enerji tüketimi, maksimum hız, koltuk sayısı, akü kapasitesi, garanti süresi, araç yakıt eşdeğeri, toplam tork, enerji temini, hava kirliliği, gürültü kirliliği, endüstriyel ilişki, istihdam maliyeti, bakım maliyeti, yol tesisi, onarım ve kişiselleştirme kolaylığı, daha fazla çeşit ve seçim seçeneği, yeniden satış değeri, dayanıklılık, güvenilirlik, güvenlik, yedek parça bulunabilirliği, teşvikler, yükseklik, dönüş yarıçapı, frenler	6

Tablo 1. (Devam)

Yazarlar	Araç tipi	Metodoloji	Kriterler	Alternatif
Güler ve Polatgil (2024)	Otomobil	AHP-SWARA	Fiyat, batarya kapasitesi, menzil, motor kapasitesi, enerji kullanımı, tam şarj süresi, beygir gücü, tork, son hız, 100'e hızlanma, araç ağırlığı	44
Ziemba vd. (2024)	Otomobil	Çok kriterli değerlendirme için PVM-VSI (Tercih Vektörü Yöntemi-Vektör Uzayı Artışları). PROMETHEE II, TOPSIS, ELECTRE III ve AHP ile karşılaştırılmıştır.	Objektif kriterler; tek şarjla menzil (WLTP yöntemi kullanılarak test edilmiştir), maksimum hız, priz elektriği kullanarak aküleri tamamen şarj etme süresi, motor gücü, minimum bagaj kapasitesi, araç fiyatı, yetkili servislerin karar vericinin ikametgahına uzaklığı Öznel kriterler; dış görünüm, iç görünüm ve işlevsellik, sürüş konforu	6
Büyükselçuk vd., 2024	EAYTA	Dairesel Sezgisel Bulanık Kümelere Dayanan VIKOR	Batarya kapasitesi, şarj süresi, motor gücü, tork, toplam katar ağırlığı, ortalama hız, menzil, enerji tüketimi	4
Bizim çalışmamız	EAYTA	Bulanık AHP-TOPSIS	Yük kapasitesi, menzil, şarj gücü, satın alma maliyeti, işletme maliyeti, motor gücü	5

EAYTA seçimi üzerine literatürde çalışmalar bulunmasına rağmen (Büyükselçuk vd., 2024). Bu çalışma, uluslararası karayolu taşımacılığı bağlamında EAYTA için ÇKKV yaklaşımını benimseyen öncü bir araştırmadır. Çalışma; yük kapasitesi, menzil, şarj gücü, satın alma maliyeti, işletme maliyeti ve motor gücü gibi kritik faktörleri dikkate alarak, uzun mesafeli lojistikte EAYTA'ların spesifik gereksinimlerini derinlemesine incelemektedir. Otomobil veya EHYTA'lardan farklı olarak EAYTA'lar, operasyonel verimliliğin lojistik sektöründe başarının temel bir göstergesi olduğu uzun mesafeli ve büyük hacimli yük taşımacılığında hayati bir rol oynamaktadır. Diğer elektrikli araç kategorilerine kıyasla EAYTA'ların kendine has özellikleri, bu araçların beraberinde getirdiği özgün zorlukların üstesinden gelinmesi ve sunduğu fırsatların değerlendirilmesi için özel stratejiler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada Bulanık AHP-TOPSIS metodolojisinin tercih edilmesinin temel nedeni, çok sayıda faktör içeren karmaşık karar verme problemlerinin çözümündeki kanıtlanmış sağlamlığıdır. Bulanık AHP, uzman görüşlerini karar sürecine dahil etme ve doğal belirsizlikleri modelleme kabiliyeti sayesinde kriter ağırlıklarının hassas bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, paydaş önceliklerinin genellikle değişkenlik gösterdiği EAYTA değerlendirmeleri için kritik bir avantaj sunmaktadır. Bu yaklaşımı tamamlayan TOPSIS ise, alternatifleri ideal çözüme olan göreceli yakınlıklarına göre sıralayarak karar vericilere açık ve eyleme dönüştürülebilir bilgiler sunmaktadır. Her iki yöntemin de geçerliliği, Boskovic vd. (2023) tarafından da belirtildiği gibi, çeşitli disiplinlerdeki tek başına ve bütünleşmiş uygulamalarıyla literatürde geniş kabul görmektedir. Mevcut çalışma, lojistik sektörünün özel ihtiyaçlarına göre uyarlanmış bütünleşik bir çerçeve ortaya koyarak literatüre katkı sağlamak ve hem teorik hem de pratik çıkarımlar sunmaktadır. Bu sayede çalışma, yalnızca EAYTA'ların incelenmesi alanındaki önemli bir boşluğu doldurmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir ve verimli lojistik sistemlerinin tesis edilmesinde bu araçların oynayacağı role dair anlayışı da derinleştirmektedir.

3. Metodoloji

3.1. Bulanık AHP

Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHP), bulanık çok kriterli analizde en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Öznel akıl yürütmeyi barındıramayan geleneksel AHP'nin aksine, BAHP bulanık bir bağlamda hiyerarşik karar verme zorluklarını ele almaktadır (Mete ve Öztaş Karlı, 2025). Bu çalışmada, diğer BAHP yaklaşımlarındaki kısıtlamalar nedeniyle Buckley'in (1985) yöntemi benimsenmiştir. Buckley'in BAHP yönteminin adımları önceki çalışmalarda ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Gul vd., 2018; Tzeng ve Huang, 2011).

Adım 1: Hiyerarşik yapı içindeki tüm kriterler arasında ikili karşılaştırmalar oluşturulmaktadır. Dilsel terimler, aşağıdaki gibi bir matrisle göreceli önemi belirtmek için kullanılır:

$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \frac{1}{\tilde{a}_{12}} & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ & & \ddots & \\ \frac{1}{\tilde{a}_{1n}} & \frac{1}{\tilde{a}_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

İkili karşılaştırma matrisi $\tilde{M}$, hiyerarşik bir yapı içindeki tüm kriterleri bulanık dilsel ölçekler kullanarak karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Matris simetriktir ve elemanlar bir kriterin diğerine göre bulanık önemini temsil etmektedir. Burada $\tilde{a}_{ij}$ i kriterinin j kriterine göre göreceli önemini temsil eden bulanık sayıdır. Bulanık dilsel ölçekler, Tablo 2'de verilen dönüştürme ölçeğine dayalı olarak üçgen bulanık sayılara dönüştürülür ve göreceli önem değerlerinin tutarlı ve kesin bir şekilde temsil edilmesini kolaylaştırır.

Tablo 1. Bulanık Ölçekteki Üçgen Bulanık Sayıların Dilsel Tanımları

Dilsel İfadeler	Temel Puan	Üçgen	Üçgen Bulanık
Aynı derecede önemli	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Biraz üstün fakat yakın önemde	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
Orta düzeyde üstün	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Kuvvetliye doğru artan üstünlük	4	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
Kuvvetli üstün	5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Çok kuvvetli üstün	6	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
Aşırı güçlü üstün	7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Kesin ve çok güçlü üstünlük	8	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)
Mutlak üstün	9	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

Adım 2: Geometrik ortalama yöntemi uygulanarak bulanık geometrik ortalama matrisi oluşturulur. Her bir kriter için bulanık geometrik ortalama $\tilde{r}_i$ kullanılarak hesaplanır:

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (2)$$

$\tilde{a}_{in}$ değeri i kriterinin n kriterine göre bulanık karşılaştırmasını, $\tilde{r}_i$ değeri ise i kriteri ile diğer tüm kriterler arasındaki bulanık karşılaştırmaların geometrik ortalamasını ifade etmektedir.

$\tilde{a}_{in}$ Adım 3: Her bir kriter için bulanık ağırlıklar belirlenir;

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (3)$$

Bir kriterin bulanık ağırlığı, w_i , tipik olarak üçgen bulanık sayı olarak temsil edilir: $w_i = (l_{wi}, m_{wi}, u_{wi})$. Bu bulanık ağırlık üç bileşenden oluşur: l_{wi} , m_{wi} and u_{wi} . Birincisi, l_{wi} , mümkün olan en düşük ağırlığı gösteren minimum değeri temsil eder. İkincisi, m_{wi} , en olası veya ortalama ağırlığı yansıtan merkezi değerdir. Üçüncüsü, u_{wi} , mümkün olan en yüksek ağırlığı temsil eden maksimum değeri gösterir. Bu parametreler birlikte kriterin bulanık ağırlığını kapsamlı bir şekilde tanımlar.

Adım 4: Optimum bulanık olmayan performansı (BOP) belirlemek için, alan merkezi yaklaşımı kullanılır.

$$w_i = \frac{(u_{wi} - l_{wi}) + (m_{wi} - l_{wi})}{3} + l_{wi} \quad (4)$$

3.2. TOPSIS

Hwang ve Yoon (1981) tarafından tanımlanan TOPSIS hem teoride hem de pratikte yaygın olarak kullanılan ve basit bir sıralama tekniğidir. Pozitif ideal çözüme olan uzaklığı minimize ederek ve negatif ideal çözüme olan uzaklığı maksimize ederek alternatifleri belirlenir. Pozitif ideal çözüm fayda kriterlerini en üst düzeye çıkarmaya ve maliyet kriterlerini en aza indirmeye çalışırken, negatif ideal çözüm tam tersini yaparak maliyet kriterlerini en üst düzeye çıkarmakta ve fayda kriterlerini en aza indirmektedir (Behzadian vd., 2012). TOPSIS, basitliği, uygulama kolaylığı ve çok kriterli ve alternatifli problemleri ele almadaki etkinliği nedeniyle en popüler ÇKKV yöntemlerinden biridir (Çelikkalek ve Tüysüz, 2020; Öztaş Karlı, 2025).

Bu çalışma Behzadian vd. (2012) tarafından özetlenen adımları takip etmektedir.

Adım 1: Standartlaştırılmış bir karar matrisi geliştirilmesi

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad \text{for } i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (1)$$

Burada, x_{ij} orijinal puanları temsil ederken, r_{ij} karar matrisinin normalleştirilmiş puanlarını göstermektedir.

Adım 2: Ağırlıklı ve normalleştirilmiş karar matrisini oluşturma

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (2)$$

Burada w_j -inci kritere atanan ağırlığı ifade eder.

Adım 3: Pozitif ideal ve negatif ideal çözümleri belirlenmesi.

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\} \quad (3) \text{ Positive ideal solution}$$

$$v_j^* = \{\max(v_{ij}) \text{ if } j \in J; \min(v_{ij}) \text{ if } j \in J'\}$$

$$A' = \{v_1', \dots, v_n'\} \quad (4) \text{ Negative ideal solution}$$

$$v_j' = \{\min(v_{ij}) \text{ if } j \in J; \max(v_{ij}) \text{ if } j \in J'\}$$

Adım 4: Her alternatif için ayırma mesafelerini hesaplanması. Pozitif ideal alternatiften ayırma mesafesi:

$$S_i^* = \left[\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2 \right]^{1/2} \quad \text{for } i = 1, \dots \quad (5)$$

Benzer şekilde, negatif ideal alternatiften ayrılma mesafesi:

$$S_i' = \left[\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j')^2 \right]^{1/2} \quad \text{for } i = 1, \dots \quad (6)$$

Adım 5: C_i^* ideal çözüme göreceli yakınlığını belirlenmesi.

$$C_i^* = S_i' / (S_i^* + S_i') \quad (7)$$

$$0 < C_i^* < 1$$

C_i^* ile 1'e en yakın alternatifi seçilmelidir.

4. Uygulama

4.1. Araştırma Çerçevesi

Dağdeviren vd. (2009) tarafından önerilen model, bu çalışmada Türkiye'deki uluslararası karayolu yük taşımacılığı sektörüne odaklanan bir uygulama üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sektörün sürdürülebilirlik ve operasyonel verimlilik konularına giderek daha fazla önem vermesiyle uyum sağlamak amacıyla, bataryalı EAYTA'lar, bataryalı elektrikli katener AYTA'lar ve hidrojen yakıt hücreli AYTA'lar dahil olmak üzere çeşitli EAYTA türleri değerlendirilmiştir. Her bir teknoloji farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Bu da uzun mesafeli, sınır ötesi lojistiğin zorluklarını ele almak için seçimlerini kritik hale getirmektedir. Bataryalı EAYTA'ların, sıfır emisyonlu yük taşımacılığına geçişte öncü bir teknoloji olarak kabul görmesi (Moultak vd., 2017; Qiao ve Raifer, 2022) ve mevcut dizel AYTA'lara kıyasla önemli bir alternatif sunması nedeniyle, bu çalışma özellikle bataryalı EAYTA'ların performansını ve uygunluğunu detaylı bir şekilde analiz etmeye odaklanmaktadır.

Tasarımın Oluşturulması	Bulanık AHP	TOPSIS
- Karar verme ekibinin oluşturulması - Alternatif EAYTA'lara karar verilmesi - Kriterlerin belirlenmesi - Karar hiyerarşisinin yapılandırılması - Karar hiyerarşisinin onaylanması	- BAHP aracılığıyla kriter ağırlıklarının atanması - Kriter ağırlıklarının onaylanması	- Alternatiflerin değerlendirilmesi - Nihai sıralamanın belirlenmesi - Optimum EAYTA'nın seçilmesi

Şekil 1. Önerilen model

Tablo 3'te ayrıntıları verilen dokuz uzmandan oluşan bir grubu belirlemek ve bir araya getirmek için sektör temsilcilerinin yüksek katılımıyla bilinen iki önemli lojistik fuarına katılım sağlanmıştır. Daha sonra bu uzmanlara matrisler dağıtılmış ve veriler bu doğrultuda toplanmıştır.

Tablo 3. Uzman bilgileri

Uzmanlar	Pozisyon	Deneyim Yılları
Uzman 1	Filo yöneticisi	8
Uzman 2	Operasyon uzmanı	5
Uzman 3	Genel Müdür	26
Uzman 4	Filo yöneticisi	14
Uzman 5	Satın alma müdürü	9
Uzman 6	Genel müdür yardımcısı	17
Uzman 7	Operasyon uzmanı	8
Uzman 8	Akademisyen	42
Uzman 9	Akademisyen	12

4.2. Alternatifler

EAYTA alternatifleri için belirli markalara odaklanmak yerine bağımsız olarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, bulguların genelleme kapasitesini korumak ve analizi belirli üreticilerin özellikleri veya spesifikasyonlarıyla sınırlamaktan kaçınmak için benimsenmiştir. Bu yöntem aynı zamanda markaya yerine araç özelliklerine odaklanan objektif bir değerlendirmeye de olanak sağlamaktadır. Tablo 4'te gösterildiği gibi EAYTA'nın çeşitli teknolojik ve operasyonel özelliklerini temsil eden beş model oluşturulmuştur. Her model, yük kapasitesi, menzil, şarj gücü, satın alma maliyeti, işletme maliyet ve motor gücü gibi temel kriterler etrafında yapılandırılmıştır. Bu alternatifler çalışmanın genelleme kapasitesini artırmak ve geniş bir senaryo yelpazesinde uygulanabilirliği sağlamak için tasarlanmıştır.

Tablo 4. EAYTA için alternatifler

Kriterler	Birim	Alternatif 1 (A1)	Alternatif 2 (A2)	Alternatif 3 (A3)	Alternatif 4 (A4)	Alternatif 5 (A5)
Yük kapasitesi (K1)	Ton	17	25	18	26	23
Menzil (K2)	Kilometre (km)	450	800	500	280	390
Şarj gücü (K3)	Kilowatt (kW)	200	150	180	90	130
Satın alma maliyeti (K4)	ABD doları (USD)	140	190	130	210	170

İşletme maliyeti (K5)	USD/km (yıllık 50.000 km için)	0,4	0,6	0,45	0,7	0,5
Motor Gücü (K6)	Beygir Gücü (HP)	420	390	450	340	400

4.3. Kriterler

Çeşitli akademik makaleler ve sektör raporlarından oluşan kapsamlı bir literatür taramasıyla altı kriter belirlenmiştir. Seçimde, EAYTA değerlendirilmesinde hem teorik açıdan önemli hem de pratik açıdan uygun olan kriterlere öncelik verilmiştir. Literatürde yaygın olarak vurgulanan bu kriterler, operasyonel verimlilik ve teknolojik fizibilite gibi temel hususları ele almaktadır. Tablo 5'te kriterler, tanımları ve kaynakları sunulmaktadır.

Tablo 5. EAYTA için değerlendirmeye alınan kriterler

Kriterler ve Kod	Açıklama	Kaynaklar
Yük kapasitesi (K1)	Taşıyabileceği maksimum yük miktarını	Alonso-Villar vd., 2023; Shoman vd., 2023; Tanvir, 2021; Vijigapoul ve Rossue, 2021; Wang vd., 2023; Yu ve Sun, 2024
Menzil (K2)	Tek bir şarjla gidebileceği mesafeyi	Alonso-Villar, 2022; Bergqvist vd., 2023; Bhardwaj ve Mostofi, 2022; Cantillo vd., 2022; Cheng ve Lin, 2024; Cunanan vd., 2021
Şarj Gücü (K3)	Bataryanın belirli bir zaman dilimi içinde ne kadar hızlı şarj edilebileceği	Alonso-Villar vd., 2023; Tanvir vd., 2021; Teichert vd., 2023; Wang vd., 2022; Wangsa vd., 2023; Xu vd., 2023
Satın Alma Maliyeti (K4)	Araç satın alma maliyeti	Vijigapoul ve Rossue, 2021; Wangsa vd., 2023; Werner vd., 2017; Xu vd., 2023; Yu ve Sun, 2024; Zhang vd., 2022
Operasyonel Maliyet (K5)	Toplam işletme maliyetini temsil eden bir ölçüt. Buna akü maliyetleri, bakım maliyetleri, sürücü ücretleri, yol ücretleri, elektrik tüketim maliyetleri, sigorta ve diğer işletme giderleri dahildir.	Alonso-Villar vd., 2022; Bergqvist vd., 2023; Bhardwaj ve Mostofi, 2022; Cantillo vd., 2022; Cheng ve Lin, 2024
Motor Gücü (K6)	Motorun üretebileceği maksimum güç çıkışı	Cantillo vd., 2022; Hovi vd., 2020; Iyer vd., 2023; Karlsoon ve Grauers, 2023b; Leonard vd., 2022

4.4. Bulanık AHP Bulguları

Tablo 6'da karşılaştırma matrisi, uzmanlar tarafından sağlanan matrislerin geometrik ortalaması kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yöntem, bireysel girdilerin bütünlüğünü korurken fikir birliği sağlayarak kararlarının toplu bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.

Tablo 6. Karşılaştırmalı matrislerin geometrik ortalamaları

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	(1,1,1)	(0.92,1.38,1.84)	(2.01,3.12,4.17)	(2.01,2.72,3.52)	(0.78,1.17,1.63)	(3.19,4.03,4.81)
K2	(0.54,0.73,1.08)	(1,1,1)	(1.46,2.03,2.50)	(1.63,2.51,3.51)	(0.60,0.86,1.23)	(3.38,4.42,5.44)
K3	(0.24,0.32,0.50)	(0.40,0.49,0.69)	(1,1,1)	(0.96,1.34,1.78)	(0.35,0.44,0.60)	(1.76,2.62,3.62)
K4	(0.28,0.37,0.50)	(0.28,0.40,0.61)	(0.56,0.74,1.05)	(1,1,1)	(0.25,0.34,0.54)	(1.34,2.20,3.07)
K5	(0.61,0.86,1.28)	(0.81,1.16,1.66)	(1.66,2.28,2.85)	(1.86,2.98,4.03)	(1,1,1)	(2.64,3.58,4.67)
K6	(0.21,0.25,0.31)	(0.18,0.23,0.30)	(0.28,0.38,0.57)	(0.33,0.46,0.75)	(0.21,0.28,0.38)	(1,1,1)

Tablo 7, her bir kriter için bulanık geometrik ortalama, bulanık ağırlıklar ve bulanıklaştırma değerleri dahil olmak üzere bulanık AHP analizinin sonuçlarını sunmaktadır. Her bir kriterin göreceli önemini temsil eden bulanıklaştırma değerleri, yorumlama ve karşılaştırmayı kolaylaştırmak için hesaplanmıştır. Bu değerler, karar vericilerin bir araya getirilmiş yargılarından türetilen değerlendirme çerçevesindeki kriterlerin öncelikli önemini ortaya koymaktadır.

Tablo 7. Bulanık AHP sonuçları

Kriterler	Her Satırın Bulanık Geometrik Ortalaması			Bulanık Ağırlıklar			Bulanıklaştırma Değerleri
K1	1.4510	1.9490	2.4411	0.2734	0.2775	0.2687	0.3563
K2	1.1751	1.5535	1.9989	0.2214	0.2212	0.2201	0.2122
K3	0.6197	0.7908	1.0478	0.1168	0.1126	0.1153	0.1174
K4	0.4968	0.6572	0.8987	0.0936	0.0936	0.0989	0.1322
K5	1.2635	1.7001	2.2013	0.2381	0.2420	0.2423	0.1004
K6	0.3005	0.3738	0.4962	0.0566	0.0532	0.0546	0.0812

Tablo 7, kriterleri bulanıklaştırma değerlerine göre yük kapasitesi (0.3563) en kritik kriterdir ve EAYTA'nın değerlendirilmesinde karar vericiler tarafından dikkat çekmektedir. Menzil (0.2122) ikinci en önemli faktör olarak operasyonel fizibilite açısından karar vericileri etkilemiştir. Satın alma maliyeti (0.1322) üçüncü sırada yer alarak maliyet odaklı karar verme üzerindeki önemli etkisini yansıtmaktadır. Şarj gücü (0.1174) teknolojik performanstaki rolünü ortaya koyarak dördüncü sırada yer almaktadır. İşletme maliyeti (0.1004) beşinci sırada yer almaktadır ve maliyet verimliliğine orta düzeyde bir katkısı olduğunu göstermektedir. Son olarak, motor gücü (0.0812) en düşük ağırlığa sahiptir ve değerlendirme sürecindeki nispeten sınırlı bir etkiye sahiptir.

4.5. TOPSIS Analizi ve Alternatif Sıralaması

Tablo 8, TOPSIS yöntemi kullanılarak elde edilen normalleştirilmiş karar matrisini göstermektedir. Bu matris daha sonra BAHF yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları ile çarpılarak Tablo 9'da gösterilen ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 8. Normalleştirilmiş karar matrisi

Alternatif/Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
A1	0.3439	0.7499	0.2331	0.4018	0.5143	0.5871
A2	0.5058	0.5000	0.1399	0.6250	0.5878	0.5284
A3	0.3642	0.3125	0.3264	0.2902	0.2939	0.4770
A4	0.5260	0.1750	0.7460	0.4688	0.3306	0.2495
A5	0.4653	0.2437	0.5129	0.3795	0.4408	0.2936

Tablo 9. Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi

Alternatif/Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
A1	0.1225	0.1591	0.0274	0.0531	0.0516	0.0477
A2	0.1802	0.1061	0.0164	0.0826	0.0590	0.0429
A3	0.1298	0.0663	0.0383	0.0384	0.0295	0.0387
A4	0.1874	0.0371	0.0876	0.0620	0.0332	0.0203
A5	0.1658	0.0517	0.0602	0.0502	0.0443	0.0238

Tablo 10, TOPSIS yöntemi kullanılarak elde edilen pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerini göstermektedir. Pozitif ideal çözüm her bir kriter için en iyi performansı temsil etmekte olup en yüksek değerler K1 (0.1874), K2 (0.1591), K3 (0.0876), K4 (0.0384), K5 (0.0295) ve K6 (0.0477) için gözlemlenmiştir. Tersine, negatif ideal çözüm en düşük değerler K1 (0.1225), K2 (0.0371), K3 (0.0164), K4 (0.0826), K5 (0.0590) ve K6 (0.0203) olmak üzere en az elverişli sonuçları temsil eder.

Bu ölçütler, her bir alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlere olan mesafelerinin hesaplanmasında kritik öneme sahiptir.

Tablo 10. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri

İdeal çözüm değerleri	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Pozitif ideal çözüm	0.1874	0.1591	0.0876	0.0384	0.0295	0.0477
Negatif ideal çözüm	0.1225	0.0371	0.0164	0.0826	0.0590	0.0203

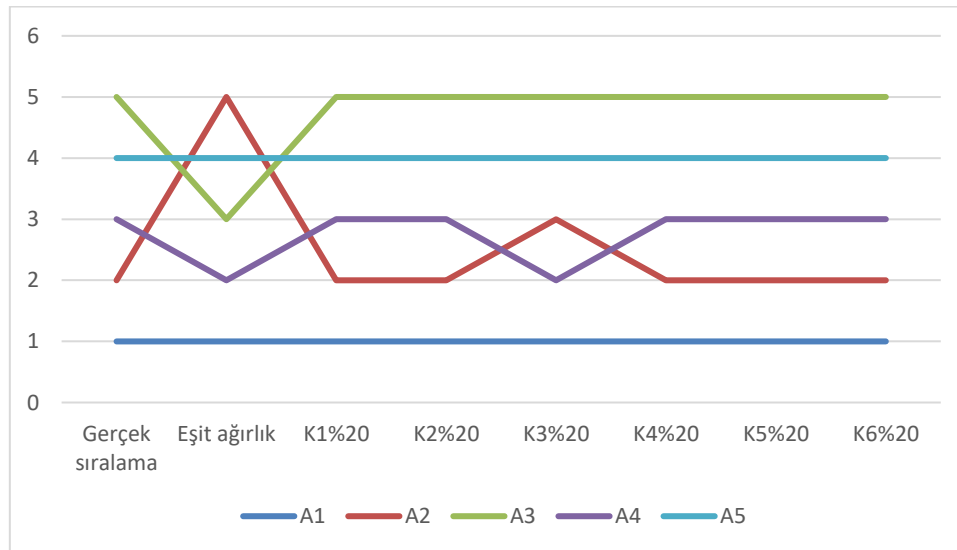
Tablo 11, TOPSIS yöntemi ile belirlenen alternatiflerin ideal çözüme yakınlıklarını ve nihai sıralamalarını göstermektedir. A1 alternatifi en yüksek göreceli yakınlık değeriyle (0.5829) ilk sırada yer almakta ve pozitif ideal çözüme olan güçlü yakınlığını göstermektedir. A2 0.4717 göreceli yakınlık değeri ile ikinci sırada yer almakta ve olumlu performansı yansıtmaktadır. A4, ideal çözüme orta derecede yakınlık gösteren 0.4444 değeriyle üçüncü sırada yer almaktadır. A5, 0.3833'lük göreceli yakınlık değeriyle dördüncü sırada yer alırken, A3 en düşük değerle (0.3595) beşinci sırada yer alarak ideal çözümden en fazla uzaklaşan alternatif olmuştur. Bu sıralamalar, ideal çözüme göreceli yakınlıklarına göre en uygun alternatifin A1 olduğunu göstermektedir

Tablo 11. Alternatiflerin ideal çözüme yakınlığı ve nihai sıralama

Alternatifler	Pozitif ideal mesafe çözümü	Negatif ideal mesafe çözümü	Göreceli yakınlık değerleri	Sıralama
A1	0.0924	0.1292	0.5829	1
A2	0.1038	0.0927	0.4717	2
A3	0.1202	0.0675	0.3595	5
A4	0.1273	0.1018	0.4444	3
A5	0.1170	0.0727	0.3833	4

4.6. Duyarlılık Analizi

Kriter ağırlıklarındaki değişiklikler altında sıralamaların istikrarını değerlendirmek için TOPSIS yöntemine bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Analiz orijinal sıralama, kriterler arasında eşit ağırlık dağılımı ve her bir kriterin ağırlığının %20 artırılırken diğer ağırlıkların orantılı olarak azaltıldığı altı senaryo olmak üzere toplamda sekiz senaryo içermektedir: Şekil 2'deki duyarlılık grafiği, alternatiflerin (A1-A5) sıralamalarının bu senaryolar arasında nasıl değiştiğini görselleştirmektedir.



Şekil 2. Duyarlılık analizi

Duyarlılık grafiği, A1'in tüm senaryolarda en üst sıradaki yerini tutarlı bir şekilde koruduğunu ve en iyi performans gösteren alternatif olarak sağlamlığını ve baskınlığını göstermektedir. Buna karşılık A2 ve A3, özellikle K1 ve K2'nin ağırlıkları artırıldığında önemli dalgalanmalar sergilemekte ve bu kriterlerin sıralamalar üzerindeki güçlü etkisinin altını çizmektedir. Buna karşılık, K3 ve K6'nın ağırlıklarındaki değişiklikler minimum etkiye sahiptir ve bu da karar verme sürecindeki önemlerinin daha düşük olduğunu göstermektedir. A4 ve A5, belirli senaryolarda zaman zaman küçük kaymalarla birlikte orta düzeyde bir istikrar sergilemektedir.

Bu analiz, özellikle diğer alternatiflerden sürekli olarak daha iyi performans gösteren A1 için önerilen TOPSIS modelinin sağlamlığını vurgulamaktadır. K1 ve K2'ye olan duyarlılık, bu kriterlerin karar verme sürecindeki kritik rolünü yansıtmaktadır. Genel olarak, sıralamalar değişen ağırlık konfigürasyonlarında nispeten sabit kalmakta ve modelin güvenilirliğine olan güveni pekiştirmektedir. Bu yaklaşım karar vericiler için değerli bilgiler sunmakta ve kilit önceliklerin değerlendirme sürecine etkin bir şekilde yansıtılmasını sağlamaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerini bütünlüklü bir yaklaşımla kullanarak EAYTA'ları uluslararası karayolu yük taşımacılığı bağlamında değerlendirmek için sağlam bir karar verme çerçevesi ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, operasyonel verimlilik ve fizibilite üzerindeki doğrudan etkileri göz önüne alındığında, EAYTA seçim sürecinde yük kapasitesi ve menzilin en belirleyici ve kritik öneme sahip kriterler olduğunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, satın alma maliyeti ve şarj gücünün de karar verme sürecinde ağırlıklı faktörler olduğu saptanmıştır. Bu durum, ekonomik fizibilitenin teknolojik yetkinliklerle dengeli bir şekilde ele alınması zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, ağır yük taşımacılığının bağlamını ele alarak mevcut bilgi birikimine katkıda bulunmakta ve EAYTA'ları temel operasyonel, teknik ve ekonomik kriterlere göre önceliklendirmek ve değerlendirmek için sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle sınırlı menzil ve taşıma kapasitesi gibi yük taşımacılığının temel zorluklarına odaklanan bu araştırma, lojistik operatörleri, araç üreticileri ve politika yapımcılar için eyleme dönüştürülebilir stratejik bilgiler sağlayarak EAYTA'ların sektörde daha yaygın bir şekilde kabul görmesine ve benimsenmesine destek sunmaktadır.

5.1. Teorik Katkılar

Bu çalışma, sürdürülebilir yük taşımacılığı ve EAYTA seçimi literatürüne önemli teorik katkılar sağlamaktadır. İlk olarak, çok kriterli karar verme yöntemlerinde nispeten az araştırılmış bir kategori olan EAYTA'ya uygulayarak, sürdürülebilir taşımacılık araştırmalarının metodolojik çeşitlilik sunmakta ve uzun mesafeli taşımacılığın ihtiyaçlarını karşılamak için yapılandırılmış bir temel sağlamaktadır.

İkinci olarak, çalışma, EAYTA'ların fizibilitesi için kritik öneme sahip olan yük kapasitesi ve menzil gibi operasyonel ve teknik kriterlerin göreceli önemi hakkında ampirik kanıtlar sunmaktadır. Bulgular, batarya ağırlığı ve menzil sınırlamaları dahil olmak üzere temel operasyonel kısıtlamaları ve bunların lojistik performans üzerindeki etkilerinin önemini ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, motor gücü gibi geleneksel ölçütlerin daha düşük sıralamalarda yer alması, geleneksel güç aktarma sistemi özelliklerinden ziyade teknolojik yenilik ve enerji yönetimine dikkat çekerek araç performansı değerlendirmesinde bir bakış açısı değişikliğini yansıtmaktadır.

Üçüncü olarak, bu araştırma ilk satın alma maliyetini operasyonel maliyetlerle ilişkilendirerek EAYTA'ların benimsenmesinin ekonomik dinamiklerini dikkate almaktadır. Bulgular, uzun vadeli operasyonel verimliliklerin yüksek başlangıç maliyetleri ödünleşimin önemini belirtmektedir. Bu bakış açısı, kısa vadeli finansal engellerin önemli bir kriter olduğunu ortaya koymaktadır.

Son olarak, markaya özgü modeller yerine teorik olarak tanımlanmış alternatifler kullanılarak elde edilen çerçevenin uyarlanabilirliği, farklı operasyonel ve coğrafi bağlamlarda uygulanmasını sağlamaktadır. Bu esneklik, karşılaştırmalı çalışmalar için bir temel sağlamakta ve çeşitli lojistik ortamlarında sürdürülebilir araç çözümlerini değerlendirmek için önemli bir içgörü oluşturmaktadır.

5.2. Pratik Katkıları

Bu çalışma, EAYTA'ların benimsenmesini ve entegrasyonunu teşvik etmek için uluslararası taşımacılık şirketleri, araç üreticileri ve politika yapımcılar da dahil olmak üzere kilit paydaşlar için eyleme geçirilebilir bilgiler sunmaktadır. Bulgular, uluslararası lojistik şirketlerinin operasyonel ve ekonomik önceliklere dayalı olarak EAYTA'ları değerlendirmek ve seçmek için kullanabilecekleri kapsamlı bir karar verme çerçevesi oluşturmaktadır. Bu çerçeve, yük kapasitesi ve menzil gibi kriterlerin önemini belirtmektedir. Uluslararası karayolu yük taşımacılığı firmaları için şarj gücüne odaklanılması EAYTA'ların zamana duyarlı teslimat operasyonlarına sorunsuz entegrasyonunu sağlamlaştırabilir. Ayrıca bu bilgiler, filo geçişlerini uzun vadeli ekonomik ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir şekilde yönlendirmek için maliyet-fayda analizleri yapılmasını destek sağlayabilir.

Bulgular, üreticilere uluslararası yük taşıma şirketleri için önceliklerini karşılayan EAYTA'lar tasarımları için değerli içgörüler sunmaktadır. Üreticiler batarya verimliliğini artırmaya, menzili yükseltmeye ve şarj uyumluluğunu geliştirmeye odaklanarak pazardaki rekabet gücünü arttırabilirler. Bulgular ayrıca motor gücünün öneminin azaldığını göstermekte ve benimsenmeyi doğrudan etkileyen teknolojilere öncelik vermeye teşvik etmektedir. Ayrıca, satın alma maliyeti engellerini ele alarak, üreticiler EAYTA'ların yaygın olarak benimsenmesini teşvik etmek ve pazar paylarını genişletmek için fiyatlandırma stratejileri geliştirebilirler.

Politika yapımcılar, elektrikli yük taşımacılığına geçişi destekleyen hedefe yönelik müdahaleler tasarlamak için bu çalışmanın bulgularını kullanabilir. Menzil ve şarj altyapısına odaklanılması, yüksek güçlü şarj ağlarına ve ultra hızlı şarj teknolojilerine yatırım yapılması yönündeki teşvikler bu araçlara geçişi hızlandırabilir. Optimum yük kapasitesi ve menzil özelliklerine sahip EAYTA'lar için sübvansiyonlar gibi teşvikler, firmaları elektrikli araçları benimsemeye teşvik edebilir. Ayrıca, toplam sahip olma maliyetini ele alan düzenleyici çerçeveler operatörlere uzun vadeli finansal öngörülebilirlik sağlayarak benimsemeyi daha da hızlandırabilir.

5.3. Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışma, gelecekteki araştırmaların ele alabileceği çeşitli kısıtlamalara sahiptir. İlk olarak, coğrafi olarak Türkiye'ye, özellikle de uluslararası yük taşımacılığı sektörüne odaklanılması, bulguların farklı altyapı, düzenleyici çerçeve ve piyasa dinamiklerine sahip bölgelere genellenebilirliğini sınırlayabilir. Analizin farklı koşullara sahip diğer ülke veya bölgelere genişletilmesi, önerilen çerçevenin sağlamlığını ve uygulanabilirliğini arttıracaktır. İkinci olarak, çalışma öncelikle yük kapasitesi, menzil ve şarj gücü gibi operasyonel ve ekonomik kriterleri vurgularken, karbon emisyonları ve yaşam döngüsü etkileri gibi çevresel hususları ihmal etmektedir. Gelecekteki araştırmalara çevresel faktörlerin dahil edilmesi, küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu daha bütüncül bir değerlendirme sağlayacaktır. Üçüncü olarak, karar verme çerçevesinin statik yapısı, dalgalanan enerji fiyatları, gelişen şarj altyapısı veya devam eden teknolojik ilerlemeler gibi dinamik faktörleri hesaba katmamaktadır. Bu dinamik unsurların çerçeveye dahil edilmesi, çerçevenin değişen piyasa koşullarına uyarlanabilirliğini ve uygunluğunu arttıracaktır. Dördüncü olarak, politika yapımcılar, çevre savunucuları ve araç son kullanıcıları gibi kritik paydaşların perspektifleri analize açıkça dahil edilmemiştir. Bu bakış açılarını dahil etmek için kapsamın genişletilmesi, EAYTA'ların benimsenmesini etkileyen faktörlerin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayabilir. Beşinci olarak, şarj gücü bir kriter olarak dahil edilmiş olsa da çalışma şarj altyapısının ölçeklenebilirliğini, uyumluluğunu veya kullanılabilirliğini derinlemesine incelememiştir. Gelecekteki çalışmalar, altyapı hazırlığı ve dağıtım stratejilerinin EAYTA'ların fizibilitesi ve verimliliği üzerindeki etkisini araştırabilir. Son olarak, çalışma sürücü memnuniyeti, kamuoyu algısı ve güvenlik protokollerine bağlılık gibi sosyal ve güvenlik hususlarını hariç tutarak teknik ve ekonomik faktörlere odaklanmaktadır. Bu hususların eklenmesi lojistik sektöründe EAYTA'ların değerlendirilmesine yönelik daha kapsamlı bir çerçeveye katkıda bulunacaktır.

Araştırmacı Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek Beyanı

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Projesi kapsamında Tuğçe Ece Ergin'in yürütücülüğünü yaptığı 1919B012307319 numaralı projeden üretilmiştir. Sağladığı katkılar dolayısıyla TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Aiello, G., Quaranta, S., Inguanta, R., Certa, A., and Venticinque, M. (2024). A multi-criteria decision-making framework for zero emission vehicle fleet renewal considering lifecycle and scenario uncertainty. *Energies*, 17(6), 1371.

Alamoodi, A. H., Albahri, O. S., Deveci, M., Albahri, A. S., Yussof, S., Dinçer, H., ... and Sharaf, I. M. (2024). Selection of electric bus models using 2-tuple linguistic T-spherical fuzzy-based decision-making model. *Expert Systems with Applications*, 249, 123498. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123498>

Alonso-Villar, A., Davíðsdóttir, B., Stefánsson, H., Ásgeirsson, E. I., and Kristjánsson, R. (2023). Electrification potential for heavy-duty vehicles in harsh climate conditions: A case study based technical feasibility assessment. *Journal of Cleaner Production*, 417, 137997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137997>

Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., and Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with applications*, 39(17), 13051-13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>

Bergqvist, R., Monios, J., and Jönsson, J. (2023). Potential for rapid adoption of battery-electric heavy-duty trucks for pre-and post-haulage at intermodal terminals. *Research in Transportation Business & Management*, 50, 101035. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101035>

Bhardwaj, S., and Mostofi, H. (2022). Technical and business aspects of battery electric trucks-a systematic review. *Future Transportation*, 2(2), 382-401. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2020021>

Biswas, T. K., and Das, M. C. (2019). Selection of commercially available electric vehicle using fuzzy AHP-MABAC. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 100, 531-537. <https://doi.org/10.1007/s40032-018-0481-3>

Biswas, T., Chatterjee, P., and Choudhuri, B. (2020). Selection of commercially available alternative passenger vehicle in automotive environment. *Operational research in engineering sciences: theory and applications*, 3(1), 16-27. <https://doi.org/10.31181/oresta200113b>

Bošković, S., Švadlenka, L., Jovčić, S., Dobrodolac, M., Simić, V., and Bacanin, N. (2023). An alternative ranking order method accounting for two-step normalization (AROMAN)—A case study of the electric vehicle selection problem. *IEEE Access*, 11, 39496-39507. 10.1109/ACCESS.2023.3265818

Breed, A. K., Speth, D., and Plötz, P. (2021). CO₂ fleet regulation and the future market diffusion of zero-emission trucks in Europe. *Energy Policy*, 159, 112640. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112640>

- Brusselaers, N., Macharis, C., and Mommens, K.** (2023). The health impact of freight transport-related air pollution on vulnerable population groups. *Environmental Pollution*, 329, 121555. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121555>
- Buckley, J. J.** (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233-247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Büyükselçuk, E. Ç.** (2024). Elektrikli kamyon seçiminde dairesel sezgisel bulanık kümelere dayalı VIKOR yönteminin uygulanması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(46), 402-427.
- Bynum, C., Sze, C., Kearns, D., Polovick, B., and Simon, K.** (2018). An examination of a voluntary policy model to effect behavioral change and influence interactions and decision making in the freight sector. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.018>
- Cantillo, V., Amaya, J., Serrano, I., Cantillo-García, V., and Galván, J.** (2022). Influencing factors of trucking companies willingness to shift to alternative fuel vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 163, 102753. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102753>
- Çelikkilek, Y., and Tüysüz, F.** (2020). An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis. *Journal of Management Analytics*, 7(2), 281-300. <https://doi.org/10.1080/23270012.2020.1748528>
- Chatterjee, S., Das, P. P., and Chakraborty, S.** (2024). A novel integrated multi-criteria decision-making approach for solving delivery drone selection problem. *OPSEARCH*, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s12597-024-00794-w>
- Cheng, X., and Lin, J.** (2024). Is electric truck a viable alternative to diesel truck in long-haul operation?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129, 104119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104119>
- Cunanan, C., Tran, M. K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., and Fowler, M.** (2021). A review of heavy-duty vehicle powertrain technologies: Diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles. *Clean Technologies*, 3(2), 474-489. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>
- Dağdeviren, M., Yavuz, S., and Kılınç, N.** (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Systems With Applications*, 36(4), 8143-8151. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.016>
- Das, M. C., Pandey, A., Mahato, A. K., and Singh, R. K.** (2019). Comparative performance of electric vehicles using evaluation of mixed data. *Opsearch*, 56, 1067-1090. <https://doi.org/10.1007/s12597-019-00398-9>
- Feng, W., and Figliozzi, M.** (2013). An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>
- Golui, S., Mahapatra, B. S., and Mahapatra, G. S.** (2024). A new correlation-based measure on Fermatean fuzzy applied on multi-criteria decision making for electric vehicle selection. *Expert Systems With Applications*, 237, 121605. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121605>
- Gomes, C. F. S., Sousa, F., Pereira, T., Oliveira, M., and Torres, L. N. M.** (2023). Multicriteria methodology for selection of a personal electric vehicle. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 20(2), 1415-1415. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.1415.2023>

Görçün, Ö. F., Simic, V., Kundu, P., Özbek, A., and Küçükönder, H. (2024). Electric vehicle selection for industrial users using an interval-valued intuitionistic fuzzy COPRAS-based model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-42. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05562-w>

Gul, M., Guven, B., and Guneri, A. F. (2018). A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.014>

Güler, A., and Polatgil, M. (2024) Investigation of the effect of expert's opinions on multi-criteria decision making techniques in electric vehicle selection. *European Transport* 99 (3). <https://doi.org/10.48295/ET.2024.99.3>

Hamurcu, M., and Eren, T. (2020). Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation. *Sustainability*, 12(7), 2777. <https://doi.org/10.3390/su12072777>

Hao, C., Ge, Y., Liang, J., He, Z., Huang, Z., and Dou, G. (2023). Research on promotion pathways for zero-emission medium-and heavy-duty trucks: A case study of Hainan Island. *Atmosphere*, 14(5), 882. <https://doi.org/10.3390/atmos14050882>

Hensher, D. A., and Wei, E. (2024). Energy and environmental costs in transitioning to zero and low emission trucks for the Australian truck Fleet: An industry perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 185, 104108. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104108>

Hovi, I. B., Pinchasik, D. R., Figenbaum, E., and Thorne, R. J. (2019). Experiences from battery-electric truck users in Norway. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 5. <https://doi.org/10.3390/wevj11010005>

International Council on Clean Transportation (ICCT). (2023). *Battery electric trucks emit 63% less GHG emissions than diesel*. ICCT. Erişim: 16 Aralık 2024, <https://theicct.org/battery-electric-trucks-emit-63-less-ghg-emissions-than-diesel/>

Jahangir Samet, M., Liimatainen, H., van Vliet, O. P. R., and Pöllänen, M. (2021). Road freight transport electrification potential by using battery electric trucks in Finland and Switzerland. *Energies*, 14(4), 823. <https://doi.org/10.3390/en14040823>

Kene, R., Olwal, T., and van Wyk, B. J. (2021). Sustainable electric vehicle transportation. *Sustainability*, 13(22), 12379. <https://doi.org/10.3390/su132212379>

Konstantinou, T., and Gkritza, K. (2023a). Are we getting close to truck electrification? US truck fleet managers' stated intentions to electrify their fleets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 173, 103697. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103697>

Konstantinou, T., and Gkritza, K. (2023b). Examining the barriers to electric truck adoption as a system: A Grey-DEMATEL approach. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 17, 100746. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100746>

Lee, D. Y., Thomas, V. M., and Brown, M. A. (2013). Electric urban delivery trucks: Energy use, greenhouse gas emissions, and cost-effectiveness. *Environmental Science & Technology*, 47(14), 8022-8030. <https://doi.org/10.1021/es400179w>

Leonard, A. T., Salek, F., Azizi, A., and Resalati, S. (2022). Electrification of a class 8 heavy-duty truck considering battery pack sizing and cargo capacity. *Applied Sciences*, 12(19), 9683. <https://doi.org/10.3390/app12199683>

Malozyomov, B. V., Martyshev, N. V., Sorokova, S. N., Efremkov, E. A., Valuev, D. V., and Qi, M. (2024). Mathematical modelling of traction equipment parameters of electric cargo trucks. *Mathematics*, 12(4), 577. <https://doi.org/10.3390/math12040577>

Mauler, L., Dahrendorf, L., Duffner, F., Winter, M., and Leker, J. (2022). Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: A US case study. *Journal of Energy Storage*, 46, 103891. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103891>

Mete, A. N., ve Öztaş Karlı, R. G. (2025). Elektrikli skuterlerin şehir ekosistemine katkısı: Bulanık AHP perspektifi. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (38), 323-341. <https://doi.org/10.54600/igdirsosbilder.1495011>

Moreno-Solaz, H., Artacho-Ramírez, M. Á., Aragonés-Beltrán, P., and Cloquell-Ballester, V. A. (2023). Sustainable selection of waste collection trucks considering feasible future scenarios by applying the stratified best and worst method. *Heliyon*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15481>

Moultak, M., Lutsey, N., and Hall, D. (2017). *Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. The International Council on Clean Transportation*. Erişim: 15 Mayıs 2024, <https://theicct.org/publication/transitioning-to-zero-emission-heavy-duty-freight-vehicles/>

Mu, Z., Zhao, F., Bai, F., Liu, Z., and Hao, H. (2024). Evaluating fuel cell vs. battery electric trucks: economic perspectives in alignment with China's carbon neutrality target. *Sustainability*, 16(6), 2427. <https://doi.org/10.3390/su16062427>

Noto, F., and Mostofi, H. (2023). Acceptance analysis of electric heavy trucks and battery swapping stations in the German market. *Systems*, 11(9), 441. <https://doi.org/10.3390/systems11090441>

Nur, F., Alrahahleh, A., Burch, R., Babski-Reeves, K., and Marufuzzaman, M. (2020). Last mile delivery drone selection and evaluation using the interval-valued inferential fuzzy TOPSIS. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(4), 397-411. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa033>

Nykvist, B., and Olsson, O. (2021). The feasibility of heavy battery electric trucks. *Joule*, 5(4), 901-913. [10.1016/j.joule.2021.03.007](https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.007)

Özlü, L., and Çelebi, D. (2024). Electrifying freight: modeling the decision-making process for battery electric truck procurement. *Sustainability*, 16(9), 3801. <https://doi.org/10.3390/su16093801>

Öztaş Karlı, R. G. (2025). Çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden şehir içi akıllı ulaşım sistemlerinin TOPSIS analizi ile değerlendirilmesi. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.38002/tuad.1496774>

Pal, K., Saraswat, D., and Budhreja, N. (2023). An integrated entropy-TOPSIS approach for electric vehicle selection. *Int. J. Exp. Res. Rev*, 36, 311-318. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2023.v36.028>

Piscitelli, P., Valenzano, B., Rizzo, E., Maggiotto, G., Rivezzi, M., Esposito Corcione, F., and Miani, A. (2019). Air pollution and estimated health costs related to road transportations of goods in Italy: A first healthcare burden assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(16), 2876. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162876>

Pradhan, P., Shabbiruddin, and Pradhan, S. (2022). Selection of electric vehicle using integrated Fuzzy-MCDM approach with analysis on challenges faced in hilly terrain. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 2651-2673. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2056665>

Qiao, Y., and Raufer, R. (2022). Electric truck deployment in Chinese cities: Promotion policies and implications for future policymaking. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 11(4), e433. <https://doi.org/10.1002/wene.433>

Raoofi, Z., Huge Brodin, M., and Pernestål, A. (2024). System-level impacts of electrification on the road freight transport system: a dynamic approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 54(6), 631-651.

Sejwal, R., Pal, S., Kumar Singh, N., Saini, R., and Yuvraj, N. (2022). Selection of Electric Vehicles Using MCDM Techniques. In *Advanced Production and Industrial Engineering* (pp. 598-607). IOS Press. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/ATDE220801>

Sen, B., Ercan, T., and Tatari, O. (2017). Does a battery-electric truck make a difference?—Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. *Journal of cleaner production*, 141, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>

Shekhovtsov, A., Kolodziejczyk, J., and Salabun, W. (2020). Fuzzy model identification using monolithic and structured approaches in decision problems with partially incomplete data. *Symmetry*, 12(9), 1541. <https://doi.org/10.3390/sym12091541>

Shoman, W., Yeh, S., Sprei, F., Plötz, P., and Speth, D. (2023). Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103825. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103825>

Sonar, H. C., and Kulkarni, S. D. (2021). An integrated AHP-MABAC approach for electric vehicle selection. *Research in Transportation Business & Management*, 41, 100665. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100665>

Statista. (2023a). *Global road freight emissions by vehicle type 2020*. Statista. Erişim Tarihi: 16.09.2024, <https://www.statista.com/statistics/1200116/road-freight-emissions-by-vehicle-type-worldwide/>

Statista. (2023b). *Worldwide market forecast for electric trucks by type from 2020 to 2030*. Statista. Erişim Tarihi: 16.06.2024, <https://www.statista.com/statistics/1273791/electric-truck-worldwide-market-forecast-by-type/>

Tanvir, S., Un-Noor, F., Boriboonsomsin, K., and Gao, Z. (2021). Feasibility of operating a heavy-duty battery electric truck fleet for drayage applications. *Transportation Research Record*, 2675(1), 258-268. <https://doi.org/10.1177/0361198120957325>

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). *Türkiye'nin Uzun Dönemli İklim Stratejisi*. Erişim: 14 Mayıs 2025, <https://iklim.gov.tr/db/turkce/dokumanlar/turkiyenin--8230-3143-20250210095501.pdf#page=7.86>

Tian, Z. P., Liang, H. M., Nie, R. X., Wang, X. K., and Wang, J. Q. (2023). Data-driven multi-criteria decision support method for electric vehicle selection. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109061. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109061>

United Nations Environment Programme(UNEP). (2024). *Rise in used heavy-duty vehicles a major contributor to pollution, prompting global action*. Erişim: 16 Aralık 2024, <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/rise-used-heavy-duty-vehicles-major-contributor-pollution-prompting>

Vijayagopal, R., and Rousseau, A. (2021). Electric truck economic feasibility analysis. *World Electric Vehicle Journal*, 12(2), 75. <https://doi.org/10.3390/wevj12020075>

Wang, N., Xu, Y., Puška, A., Stević, Ž., and Alrasheedi, A. F. (2023). Multi-Criteria selection of electric delivery vehicles using fuzzy-rough methods. *Sustainability*, 15(21), 15541. <https://doi.org/10.3390/su152115541>

Wangsa, I. D., Vanany, I., and Siswanto, N. (2023). The optimal tax incentive and subsidy to promote electric trucks in Indonesia: Insight for government and industry. *Case Studies on Transport Policy*, 11, 100966. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100966>

Wątróbski, J., Malecki, K., Kijewska, K., Iwan, S., Karczmarczyk, A., and Thompson, R. G. (2017). Multi-criteria analysis of electric vans for city logistics. *Sustainability*, 9(8), 1453. <https://doi.org/10.3390/su9081453>

Werner, V., and Onufrey, K. (2022). If electric trucks are the solution, what are the problems? A study of agenda-setting in demonstration projects. *Energy Research & Social Science*, 91, 102722. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102722>

Więckowski, J., Wątróbski, J., Kizielewicz, B., and Sałabun, W. (2023). Complex sensitivity analysis in multi-criteria decision analysis: An application to the selection of an electric car. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136051>

Wu, C., Li, P., Zhou, H., and Zhou, Y. (2023). The changing adoption behaviors on electric trucks over time during the intention-purchase stage: Insights from freight enterprises' states and perception features. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138476>

Xu, F., Crawford, C., Feng, Y., Lin, Z., and Li, S. (2023). Environment-economic analysis of diesel, hybrid electric, plug-in hybrid electric trucks in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 117, 103661.

Yu, H., and Sun, X. (2024). Can an industry-led infrastructure development strategy facilitate electric truck adoption?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 134, 104356. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104356>

Zhang, X., Lin, Z., Crawford, C., and Li, S. (2021). Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103152>

Ziemba, P., Kannchen, M., and Borawski, M. (2024). Selection of the family electric car based on objective and subjective criteria—analysis of a case study of polish consumers. *Energies*, 17(6), 1347. <https://doi.org/10.3390/en17061347>