

ÖZGÜN ARAŞTIRMA / ORIGINAL ARTICLE



Copyright@Author(s) - Available online at dergipark.org.tr/en/pub/igusbd.
Content of this journal is Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 (CC BY-NC-ND) International License.

Otomotiv Üretiminde Çevresel Sürdürülebilirlik Performansının Boylamsal Bir Değerlendirmesi

A Longitudinal Evaluation of Environmental Sustainability Performance in Automotive Manufacturing

¹Zafer DURAN 

Öz

Amaç: Bu çalışma, otomotiv üretiminde çevresel sürdürülebilirlik performansını işletme düzeyinde boylamsal bir yaklaşımla değerlendirerek hem literatürdeki sınırlılıkları aşmayı hem de uygulayıcılara yönelik stratejik içgörüler sunmayı amaçlamaktadır.

Yöntem: Çalışmada, MEREC ve CRADIS yöntemlerinin çift yönlü normalizasyonla geliştirilmiş türevleri olan DNMEREC ve DNCRADIS hibrit bir yapıda kullanılmıştır. Bu sayede performans değerlendirmesi, öznel yargılardan arındırılmış, belirsizliklerin azaltıldığı ve sonuçların güvenilirliğinin artırıldığı nesnel ve duyarlı bir çerçeve içinde gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Çalışmada incelenen çevresel göstergeler arasında atık miktarı, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonunun çevresel performans üzerinde en belirleyici etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu göstergelerde yıllar içinde kaydedilen değişimler, çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu bir dönüşüme işaret etmektedir. Performans düzeyleri ise 2019 yılından itibaren genel olarak iyileşme göstermiş; en yüksek performans 2023 yılında elde edilmiştir. Bulgular, işletmenin çevresel etkilerini azaltma yönünde istikrarlı bir çaba içinde olduğuna işaret etmektedir.

Sonuçlar: Çalışma, çevresel sürdürülebilirlik açısından en kritik gelişim alanlarının açık biçimde tanımlanmasına katkı sağlamaktadır. İşletmelerin sınırlı kaynaklarını hangi alanlara yönlendirmeleri gerektiğine dair somut ve veri temelli bir yol haritası sunmaktadır. Ayrıca DNMEREC ve DNCRADIS yöntemlerinin birlikte kullanımı, karar önceliklerinin nesnel ve duyarlı biçimde belirlenmesini sağlayarak işletme düzeyindeki çevresel performansın ölçümünde güçlü bir yöntemsel çerçeve sunmuştur.

Anahtar Kelimeler

Otomotiv endüstrisi, Sürdürülebilir otomotiv üretimi, Çevresel sürdürülebilirlik performansı, DNMEREC Yöntemi, DNCRADIS Yöntemi

¹Dr. Öğr. Üyesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Gazipaşa Mustafa Rahmi Büyükbali Meslek Yüksekokulu, Antalya, Türkiye
✉ zafer.duran@alanya.edu.tr

Geliş/Received: 12.05.2025
Kabul/Accepted: 13.01.2026

Abstract

Purpose: This study aims to address gaps in the literature and provide strategic insights for practitioners by evaluating environmental sustainability performance in automotive manufacturing using a longitudinal company-level approach.

Method: In this study, DNMEREC and DNCRADIS – derivatives of the MEREC and CRADIS methods enhanced through bidirectional normalization – were used within a hybrid framework. This approach enabled objective and sensitive performance evaluation by minimizing subjective judgment, reducing uncertainty in decision-making, and increasing the reliability of the results.

Findings: The study shows that among the environmental indicators analyzed, waste generation, energy consumption, and greenhouse gas emissions have the greatest impact on environmental performance. Changes in these indicators over time suggest a positive trajectory toward environmental sustainability. A notable improvement in performance levels has been recorded since 2019, with the highest level achieved in 2023. These findings indicate that the company has been consistently working to reduce its environmental impact.

Conclusions: The present study makes a meaningful contribution to identifying the most critical areas for improving environmental sustainability. It offers a concrete, data-driven roadmap to help businesses effectively allocate their limited resources. Moreover, integrating the DNMEREC and DNCRADIS methodologies provides a robust methodological framework for assessing environmental performance at the enterprise level, enabling more objective and nuanced decision-making.

Keywords

Automotive industry, Sustainable automotive manufacturing, Environmental sustainability performance, DNMEREC method, DNCRADIS method

Giriş

Küresel ısınmanın giderek şiddetlenen etkileri ve fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi hem tüketiciler hem de kamu otoriteleri nezdinde endüstriyel işletmelere yönelik sürdürülebilir üretim uygulamalarının benimsenmesi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması yönünde güçlü ve artan bir baskı oluşturmaktadır (Mathiyazgahan, Sengupta & Poovazhagan 2018, s. 58). Bu baskı, sürdürülebilirliği işletmeler açısından bir tercih olmaktan çıkarak rekabet gücünü korumanın, yatırımcı ve tüketici güvenini kazanmanın ve uzun vadeli kurumsal başarıyı sağlamanın temel koşulu haline getirmektedir. Bu bağlamda özellikle yüksek enerji ve hammadde kullanımı, atık üretimi ve karbon salımı gibi çevresel etkilerin yoğun yaşandığı otomotiv endüstrisinde temel iş stratejileri giderek daha fazla sürdürülebilirlik unsurlarını içerecek şekilde yeniden yapılandırılmaktadır (Wang, Nhieu & Nguyen, 2024, s.1). Bu dönüşüm salt çevresel kaygılardan ibaret olmayıp endüstriyel değer zincirinin yeniden inşası, yeni teknolojik paradigmaların benimsenmesi ve iş modellerinin sürdürülebilirlik ekseninde evrimleşmesini içermektedir.

Otomotiv endüstrisi hem ekonomik büyümenin lokomotifi hem de teknolojik dönüşümün öncüsü olarak küresel endüstri ekosisteminde merkezi bir konumda yer almaktadır. Yüksek katma değerli üretim kapasitesi, genişleyen tedarik ağları ve güçlü istihdam yaratma potansiyeliyle, doğrudan üretim çıktılarının ötesine geçerek lojistikten Ar-Ge'ye, finansal hizmetlerden dijital dönüşüme kadar pek çok sektörel alan üzerinde çarpan etkisi yaratmaktadır. Bu çok yönlü yapısıyla otomotiv endüstrisi, milli gelirdeki artış ve dış ticaret dengelerinin istikrarında kritik bir rol üstlenmektedir (Ostojic & Traverso 2024, s. 105). Ancak otomotiv endüstrisi, tüm ekonomik ve teknolojik katkılarına rağmen çevresel açıdan önemli sorunlara da neden olmaktadır. Nitekim küresel endüstriyel atığın yaklaşık %5'i otomotiv endüstrisinden kaynaklanmaktadır (Simic 2013, s. 371). Yoğun hammadde tüketimi, fosil yakıt temelli üretim süreçleri ve araç kullanım evresi boyunca ortaya çıkan yüksek düzeyde emisyon, otomotiv endüstrisini iklim değişikliğine doğrudan etki eden başlıca sektörlerden biri hâline getirmektedir. Bu tablo, otomotiv endüstrisinin ekonomik yönlerinin yanı sıra çevresel etkilerinin de yakından izlenmesini zorunlu kılmaktadır. Karbon salımı, doğal kaynak tüketimi ve atık üretimi gibi temel çevresel baskılar göz önüne alındığında, otomotiv sanayinde çevresel sürdürülebilirlik

performansının kapsamlı ve sistematik bir biçimde değerlendirilmesi hem çevresel sorumluluğun gereği hem de sektörün uzun vadeli rekabet gücünü koruyabilmesi açısından stratejik bir önem taşımaktadır.

Sürdürülebilirlik, çok boyutlu yapısı ve dinamik doğası nedeniyle sosyal bilimlerle mühendislik disiplinlerinin kesişiminde şekillenen, kavramsal ve metodolojik açıdan son derece karmaşık bir alandır. Bu durum sürdürülebilirliğin değerlendirilmesini yalnızca teknik göstergelere dayalı tek boyutlu bir süreç olmaktan çıkarmakta ve normatif değerlerin, bağlamsal farklılıkların ve zaman içinde değişen toplumsal önceliklerin de dikkate alındığı çok katmanlı ve dinamik bir sürece dönüştürmektedir. Ayrıca her işletmenin faaliyet gösterdiği sektörün yapısı, operasyonel ölçeği ve paydaş beklentileri gibi kendine özgü dinamikleri, sürdürülebilirlik göstergelerinin belirlenmesini ve bu göstergelere dayalı değerlendirmelerin karşılaştırılabilirliğini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Bu durum sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesini geleneksel yaklaşımlardan uzaklaştırmakta ve giderek daha bütüncül, çok disiplinli yöntemlerin benimsendiği bir çerçevede ele alınmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, LCA), çevresel ayak izi hesaplamaları ile karbon ve enerji yoğunluğu göstergeleri gibi çevre temelli yaklaşımlar, üretim süreçlerinin ve ürün kullanım ömrünün çevresel etkilerini nicel olarak ortaya koyarken; çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, bu etkilerin farklı önceliklendirme senaryoları altında karşılaştırmalı biçimde analiz edilmesinde kullanılmaktadır. Örneğin, Schaltegger ve Wagner (2006) Sürdürülebilirlik Dengeli Karnesi (Sustainability Balanced Scorecard) aracılığıyla çevresel ve sosyal göstergeleri finansal performansla bütünleştirirken Finkbeiner, Schau, Lehmann ve Traverso (2010) yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi (LCSA) ile çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri ürün ve süreç düzeyinde ele almıştır. Öte yandan Hsu, Ou ve Ou (2014), sürdürülebilir iş performansını gri ilişkisel analiz ve geliştirilmiş TOPSIS yöntemlerinin entegre edildiği bir ÇKKV yaklaşımıyla değerlendirirken Suhi, Enayet, Haque, Ali ve Traverso (2019) ise ÇKKV yöntemlerinden BWM'yi kullanarak çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için en önemli göstergelerin neler olduğunu belirlemeye çalışmıştır.

Sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesi otomotiv endüstrisi özelinde ele alındığında çok daha yüksek bir karmaşıklık düzeyi taşımaktadır. Sektörün çok katmanlı ve küresel ölçekte örgütlenmiş tedarik zinciri yapısı, yüksek hacimli kaynak ve enerji tüketimi, ürünlerin uzun yaşam döngüleri ve çok paydaşlı operasyonel süreçleri, sürdürülebilirlik göstergelerinin hem belirlenmesini hem de izlenmesini güçleştirmektedir. Bu durum daha esnek, bağlamsal ve sektör odaklı yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Nitekim araştırmacılar çeşitli yaklaşımlarla bu zorlukların üstesinden gelmeye çalışmışlardır. Örneğin Amrina ve Yusof (2012), otomotiv üreticilerinin sürdürülebilirlik performansını değerlendirmeye yönelik yorumlayıcı yapısal bir model (ISM) önerirken; Grandhi ve Wibowo (2016) bulanık çok kriterli karar verme yardımıyla performans değerlendirmelerinde belirsizliklerin azaltılması ve daha hassas karşılaştırmalar yapılmasına katkı sağlamıştır. Ancak otomotiv endüstrisinin sosyoekonomik ağırlığına ve çevresel etkiler açısından taşıdığı stratejik öneme rağmen, sürdürülebilirlik performansına ilişkin değerlendirmeler hâlen sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, söz konusu sınırlılığı aşmak amacıyla otomotiv üretim süreçlerinde sürdürülebilirlik performansına odaklanılmış ve bu kapsamda sektörün çevresel boyutuna ilişkin daha bütüncül bir anlayış geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda Türkiye'nin önde gelen otomotiv üreticilerinden biri sürdürülebilirlik ekseninde özgün bir yaklaşımla ele alınmış; böylece hem literatüre metodolojik ve bağlamsal katkı sunulması hem de uygulamaya dönük stratejik çıktılar üretilmesi amaçlanmıştır.

Literatür

Sürdürülebilirlik, çok boyutlu yapısı ve disiplinler arası niteliği nedeniyle akademik literatürde son derece geniş bir perspektiften ele alınan bir konudur. Kavramın farklı bağlamlarda, sektörlerde ve yöntemsel yaklaşımlarla incelenmesi, sürdürülebilirlik literatürünün oldukça kapsamlı ve dağınık bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle literatür taraması, çalışmanın odağına uygun şekilde yapılandırılmış sözcük gruplarıyla gerçekleştirilerek yalnızca otomotiv endüstrisinde sürdürülebilirliği ele alan çalışmalar kapsayacak biçimde sınırlandırılmıştır. Tarama sonucunda öne çıkan çalışmalar ve bu çalışmalara ilişkin temel bulgular aşağıda kronolojik bir şekilde sunulmuştur.

Mathiyazgahan vd. (2018), DEMATEL yönteminden yararlanarak Hindistan otomotiv sektöründe çevresel sürdürülebilirliği hayata geçirme sürecinde karşılaşılan temel zorlukları analiz etmişlerdir.

Akademisyenler ve endüstri uzmanlarından elde edilen verilere dayanarak maliyet faktörünün sürdürülebilirliğe geçişte en kritik engel olduğu sonucuna ulaşmışlardır. ÇKKV yöntemlerini sürdürülebilirlik bağlamında ele alan bir çalışma da Stoycheva, Marchese, Paul, Padoan, Juhmani ve Linkov (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada otomotiv sanayinde sürdürülebilir üretim materyallerinin seçimi MAVT yöntemiyle modellenmiş; karar vericilerin stratejik malzeme seçiminde sürdürülebilirlik kriterlerini nasıl dikkate aldıkları irdelenmiştir. DEMATEL yönteminin farklı bir bağlamda kullanıldığı çalışma ise Gedam, Raut, Lopes de Sousa Jabbour, Narkhede ve Grebnevych (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada ise yeşil insan kaynakları uygulamaları aracılığıyla çevresel performansa etki eden faktörler analiz edilmiş; üst yönetim desteği ile tedarikçilere yönelik çevresel denetimin öncelikli etkenler olduğu belirlenmiştir.

Literatür taramasında tedarik ve üretim kararlarının sürdürülebilirlik bağlamında ele alındığı çalışmalarda da ÇKKV yöntemlerinin çeşitli şekillerde kullanıldığı görülmüştür. Singh ve Sarkar (2021), otomotiv üretiminde sürdürülebilir fason üretici seçimini AHP ve VIKOR yöntemleriyle ele alarak değerlendirme sürecini ürün yaşam döngüsü boyunca çevresel sürdürülebilirliği kapsayacak şekilde yapılandırmışlardır. Şirket ölçeğinde uygulama odaklı bir yaklaşım ise Sharma, Sharma ve Karwasra (2021) tarafından sunulmuştur. Araştırmacılar, bulanık AHP ve ELECTRE I yöntemlerini bir arada kullanarak direksiyon üretimi yapan bir işletmede yeşil üretim uygulamalarını analiz etmişlerdir. Bu çalışmanın bulguları çevre yönetim sistemi etkinliği ve tehlikeli atık yönetiminin yeşil üretim açısından en kritik göstergeler olduğunu ortaya koymuştur. Zhang, Zhang, Yan, Liu, Jiang ve Li (2021) ise Çin otomotiv endüstrisinde kurumsal çevresel sorumluluğu Üçlü Alt Çizgi (TBL) perspektifiyle değerlendirmiş; bulanık DEMATEL yöntemiyle regülasyon baskısı, teknolojik yetkinlik, yönetim taahhüdü ve piyasa beklentilerini öne çıkan faktörler olarak sınıflandırmıştır.

Türkiye otomotiv sektörüne odaklanan sınırlı sayıda çalışmalardan biri, Alioğulları, Türkan ve Çakmak (2023) tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada çevresel ve sürdürülebilir tedarik zinciri riskleri FMEA ve Entropy tabanlı EDAS yöntemleriyle analiz edilmiş; en etkili önlemin üst yönetimin sürdürülebilirlikle ilgili net taahhütler ve hedefler belirlemesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Operasyonel verimliliği odağına alan Wang vd. (2024) ise Malmquist Veri Zarflama Analizi (VZA) ile Sıralı Öncelik Yaklaşımını (OPA) birleştirerek verimli operasyonların sürdürülebilir üretimin temel itici gücü olduğunu ortaya koymuşlardır. Son olarak Sarkar, Khanapuri ve Tiwari (2025) tarafından yapay zekâ temelli bir yaklaşım benimsenerek üretim ve dağıtım süreçlerinin çevresel etkileri dinamik bir şekilde modellenmeye çalışılmıştır. ICP-DNSGA-II algoritması ve derin sinir ağları gibi modellerin kullanıldığı bu çalışmada çevresel sürdürülebilirlik ve operasyonel verimliliği aynı anda iyileştirebilme potansiyeli ortaya konmuştur.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda da görüldüğü üzere, otomotiv sanayinde çevresel sürdürülebilirliği ele alan araştırmalar görece yeni olup, büyük ölçüde sektörel düzeyde genel eğilimleri esas alan bir bakış açısıyla şekillenmektedir. Bununla birlikte belirli bir işletmeye odaklanan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır ve özellikle bir işletmenin çevresel sürdürülebilirlik performansındaki değişimi zaman içerisinde izleyen herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanılamamıştır. Bu eksiklikten hareketle gerçekleştirilen bu çalışmada, Türkiye'nin önde gelen otomotiv üreticilerinden birinin çevresel sürdürülebilirlik performansı yıllar itibarıyla boylamsal bir yaklaşımla ele alınmış; böylece hem literatürdeki bu boşluğun giderilmesi hem de uygulayıcılara yönelik anlamlı içgörüler sunulması hedeflenmiştir.

Yöntem

Bu çalışmada, MEREC ve CRADIS yöntemlerinin çift yönlü normalizasyonla geliştirilmiş türevleri olan DNMEREC ve DNCRADIS yöntemleri hibrit bir yapı içerisinde birlikte kullanılmıştır. DNMEREC, MEREC'in nesnel ağırlıklandırma mantığını korumakla birlikte çift yönlü normalizasyon yaklaşımı sayesinde kriterler arası bilgi kaybını azaltmakta ve ağırlıkların daha dengeli bir biçimde belirlenmesini sağlamaktadır. Benzer biçimde DNCRADIS yöntemi de CRADIS'in sıralama yapısını çift normalizasyon çerçevesi altında geliştirerek alternatiflerin ideal çözüme olan göreceli uzaklıklarını daha tutarlı bir şekilde ölçme imkânı sunmaktadır. Nitekim Puška, Božanić, Mastilo ve Pamučar (2023), gerçekleştirdikleri çalışmada klasik MEREC ve CRADIS yaklaşımlarına kıyasla çift yönlü normalizasyon temelli versiyonlarının kriter ağırlıkları ve alternatif sıralamalarında daha dengeli ve kararlı sonuçlar

ürettiğini, normalizasyon tercihinin bağlı sapmaların ise belirgin biçimde azaldığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda söz konusu yöntemler sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde sıklıkla karşılaşılan farklı ölçeklerdeki kriterlerin birlikte ele alınmasından kaynaklanabilecek sorunları en aza indirebilmek amacıyla bu çalışmada tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında ilk olarak değerlendirilen işletmenin Kamuyu Aydınlatma Platformu (KAP) üzerinden kamuya açık olarak yayımladığı entegre raporundan çevresel göstergelere ilişkin veriler temin edilmiştir. Ardından DNMEREC yöntemiyle çevresel göstergelerin ağırlıkları belirlenmiş ve DNCRADIS yöntemiyle de şirketin sürdürülebilirlik performansı yıllar itibarıyla hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, incelenen işletmenin net sıfır hedefi doğrultusundaki ilerleyişi değerlendirilmiş, çevresel performanstaki yönelimler, yapısal dönüşümler ve kritik gelişim alanları ortaya konmuştur. Ayrıca zamansal karşılaştırmalarla iyileşme ve gerileme dönemleri ayrıştırılarak performans dinamikleri bütüncül bir yaklaşımla yorumlanmıştır.

Çalışmada kullanılan çevresel veriler ve uygulanan yöntemsel yaklaşımlara ilişkin detaylar, aşağıda sistematik bir şekilde sunulmuştur.

Veri Seti

Araştırmada kullanılan veriler, değerlendirilen şirketin KAP üzerinden yayımladığı en güncel bildirimlerden alınmıştır. Veri seçimi sürecinde, üretim miktarlarında yaşanabilecek dalgalanmaların sürdürülebilirlik performansını yanıltıcı biçimde yansıtmaya riskini ortadan kaldırmak amacıyla yalnızca araç başına hesaplanan göstergeler dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde elde edilen sonuçların üretim ölçeğinden bağımsız, daha karşılaştırılabilir ve performans odaklı bir yapıda değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Söz konusu göstergeler, Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Çevresel Performans Göstergeleri ve Tanımlanan Kodları

Göstergeler	Amaç	Kod
Enerji Tüketimi (GJ/Araç)	J^{min}	G1
Sera Gazı Emisyonu (Ton CO ₂ /Araç)	J^{min}	G2
Taze su tüketimi (M ³ /Araç)	J^{min}	G3
Atık miktarı (kg/Araç)	J^{min}	G4
Tehlikeli Atık+ Arıtma Çamuru (kg/Araç)	J^{min}	G5

Tablo 1’de sunulduğu üzere çalışma kapsamında kullanılan göstergelerin tamamı en küçüklenmesi gereken maliyet yönlü çevresel göstergelerdir. Söz konusu göstergelerden araç başına enerji tüketimi (GJ/araç), her bir aracın üretim sürecinde harcanan enerjiyi yansıtarak enerji tüketimi açısından önemli bir ölçüt sunmaktadır. Sera gazı emisyonu yoğunluğu (ton CO₂/araç), iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir gösterge olarak, üretilen araç başına düşen karbon salımını ortaya koymaktadır. Su yoğunluğu (m³/araç), üretilen araç başına tüketilen temiz su miktarını göstererek kaynak kullanımındaki etkinliği yansıtmaktadır. Toplam atık miktarı (kg/araç) ile tehlikeli atık ve arıtma çamuru miktarı (kg/araç) ise üretim süreçlerinin çevresel yükünü ve atık yönetimi uygulamalarının etkinliğini göstermektedir. Değerlendirilen işletmenin söz konusu göstergelere ilişkin yıllık verileri, Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Çevresel Sürdürülebilirlik Göstergelerine İlişkin Skorlar

	G1	G2	G3	G4	G5
2023	2,78	0,31	2,61	25,53	5,60
2022	3,19	0,32	2,74	26,84	4,89
2021	3,97	0,39	2,91	37,77	4,99
2020	4,02	0,38	2,98	30,60	5,37
2019	4,01	0,38	3,33	39,60	5,40

Tablo 2’de sunulan veriler, incelenen işletmenin çalışma kapsamında ele alınan çevresel göstergelere ilişkin yıllık performans skorlarını içermekte olup, analiz sürecinde oluşturulan karar matrisinin temel veri setini oluşturmaktadır.

DNMEREK Yöntemi

MEREC yöntemi, her bir kriterin karar sürecindeki göreceli önemini alternatiflerin performansları üzerindeki etkilerine dayanarak hesaplayan bir anlayışa sahiptir. Yöntemin temel yaklaşım, bir kriterin analizden çıkarılması durumunda alternatiflerin genel performanslarında meydana gelen değişiklikleri ölçmeye dayanmaktadır (Keshavarz-Ghorabae, Amiri, Zavadskas & Turskis, 2021, s. 7). Bu amaçla öncelikle logaritmik tabanlı eşit ağırlıklı bir performans ölçütü kullanılmakta; ardından her bir kriterin çıkarılması durumunda oluşan sapmalar hesaplanmaktadır. Böylece her bir kriterin ağırlığını objektif bir şekilde hesaplama olanağı sunulmaktadır. Bu yöntemin geliştirilmiş bir versiyonu olan DNMEREK ise klasik MEREC yönteminin işlem adımlarını hem maksimum hem de minimum değerleri dikkate alan çift yönlü normalizasyon yaklaşımıyla genişletmektedir. Bu sayede karar matrisindeki veriler daha hassas bir biçimde analiz edilmekte ve kriter ağırlıkları daha duyarlı bir şekilde belirlenebilmektedir. Zira çift yönlü normalizasyon, tek yönlü normalizasyonda ortaya çıkabilen ölçek/dağılım kaynaklı sapmaları sınırlamaktadır. Böylece kriter önemlerinin normalizasyon tercihinin aşırı duyarlı hâle gelmesinin önüne geçilerek daha kararlı ve genellenebilir bir ağırlık seti üretilebilmektedir. Yöntemin işlem adımları, şu şekildedir (Puška vd., 2023, s. 7101-7102):

1. Adım: Başlangıç karar matrisi oluşturularak normalize edilir. Bu adımda öncelikle alternatiflerin seçilen kriterlere göre değerlendirildiği bir karar matrisi oluşturulmakta ve ardından bu matris üzerinde normalizasyon işlemi uygulanmaktadır. Normalizasyon sürecinde veriler hem maksimum hem de minimum değerlere göre ayrı ayrı normalize edilmekte; böylece farklı normalizasyon yaklaşımlarına dayanan iki ayrı normalize karar matrisi elde edilmektedir. Bu işlem esnasında fayda yönlü kriterler için 1 numaralı eşitlikten, maliyet yönlü kriterler için ise 2 numaralı eşitlikten yararlanılmaktadır.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmax}}, \quad n'_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}} \quad (1)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}}, \quad n'_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmax}} \quad (2)$$

2. Adım: Oluşturulan normalize karar matrisleri dikkate alınarak alternatiflerin toplam performansı hesaplanır. Bu adımda alternatiflerin genel performanslarını elde etmek için eşit kriter ağırlıklarına sahip logaritmik bir ölçü uygulanır. Hesaplamalar, 3 numaralı eşitliklerden yararlanılarak her iki normalizasyon yaklaşımına ilişkin karar matrisi için ayrı ayrı gerçekleştirilir.

$$S_i = \ln\left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij}^x)|\right)\right), \quad S_i = \ln\left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij}^{x'})|\right)\right) \quad (3)$$

3. Adım: Her bir kriterin kaldırılması durumunda alternatiflerin sahip olacağı performans değerleri hesaplanır. Bu işlem esnasında 4 numaralı eşitliklerden yararlanılır.

$$S'_{ij} = \ln\left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k, k \neq j} |\ln(n_{ik}^x)|\right)\right), \quad S''_{ij} = \ln\left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k, k \neq j} |\ln(n_{ik}^{x'})|\right)\right) \quad (4)$$

4. Adım: 5 numaralı eşitlikler yardımıyla mutlak değerlerden sapmaların toplamı hesaplanır.

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i|, \quad E'_j = \sum_i |S''_{ij} - S_i| \quad (5)$$

5. Adım: 6 numaralı eşitliklerden yararlanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanır.

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k}, \quad w'_j = \frac{E'_j}{\sum_k E'_k} \quad (6)$$

6. Adım: İki farklı normalizasyon işlemine dayalı olarak hesaplanmış olan ağırlıkların ortalaması alınarak kriterlerin nihai ağırlıkları belirlenir. Bu işlem, 7 numaralı eşitlikle gerçekleştirilmektedir.

$$cw_j = \frac{w_j + w'_j}{2} \quad (7)$$

7. Adım: kriterlerin ortalama ağırlıklarının toplamı birden büyük veya küçük olabileceğinden kriterlerin ağırlığı, 8 numaralı eşitlik yardımıyla toplamı bire eşit olacak şekilde düzeltilir.

$$fw_j = \frac{cw_j}{\sum_{k=1}^n \sum cw_k} \quad (8)$$

Bu adımlardan da anlaşılacağı gibi DNMEREC yöntemiyle ağırlıklar belirlenirken, farklı normalizasyon yöntemleri kullanılarak ağırlıkların karşılaştırmalı olarak hesaplanması sağlanır. İşlemler sonucunda kriterlerin nihai ağırlığı, her bir kriterin ortalama bireysel ağırlıklarının hesaplanmasıyla elde edilir. Bu yaklaşım, kriterlerin hesaplanan ağırlıklarının, başlangıçtaki karar matrisindeki verilerin maksimum ve minimum değerleriyle olan ilişkisini dikkate alır. Uygulanan her bir normalizasyon, karar matrisindeki verilerin maksimum veya minimum değerlerine ilişkin farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Bu sayede başlangıçtaki karar matrisindeki veriler arasındaki ilişkiler hakkında daha kapsamlı ve eksiksiz bilgiler elde edilmektedir.

DNCRADIS Yöntemi

CRADIS yöntemi, Puška, Stević ve Pamučar (2022) tarafından alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıklarını sistematik bir şekilde değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. ARAS, MARCOS ve TOPSIS yöntemlerinin bir kombinasyonu olan bu yöntem alternatiflerin performansını tüm kriterler ekseninde değerlendirerek ideal çözüme olan uzaklıklarına göre uzlaşmacı bir çözüm sunmaktadır. Bu yöntemin geliştirilmiş bir versiyonu olan DNCRADIS yöntemi ise CRADIS yöntemine çift yönlü normalizasyon ekleyerek alternatiflerin daha hassas ve dengeli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu genişletme sayesinde alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıkları tek bir referans noktasından ziyade hem maksimum hem de minimum değerler dikkate alınarak hesaplanarak normalizasyon tercihinden kaynaklanabilecek yanlışlıklar azaltılmaktadır. Ayrıca çift yönlü normalizasyon kriterler arası ölçek farklılıklarının sıralama üzerindeki etkisini azaltarak alternatifler arasındaki göreceli performans farklarının daha net ortaya konmasına imkân tanımakta ve birbirine yakın performans sergileyen alternatiflerin ayırt ediciliğini artırmaktadır. Bu yönüyle DNCRADIS, doğrusal toplama varsayımına dayanan SAW ve tek ideal referanslı TOPSIS gibi yöntemlere kıyasla hem ideal hem anti-ideal çözümleri eşzamanlı dikkate alarak MARCOS benzeri uzlaşmacı bir yapı sunmaktadır. Bununla birlikte benimsediği çift yönlü normalizasyon sayesinde bu yöntemlere kıyasla daha dengeli ve kararlı sıralamalar üretme kabiliyetine sahiptir. DNCRADIS yönteminin işlem adımları, şu şekildedir (Puška vd., 2023, s. 7102-7103):

1. Adım: Başlangıç karar matrisi oluşturulur. Söz konusu matris, alternatiflerin ilgili kriterlere ilişkin skorlarını ifade etmektedir.

2. Adım: Başlangıç karar matrisi normalize edilir. Bu adımda veriler hem maksimum hem de minimum değerlere göre ayrı ayrı normalize edilmekte; böylece farklı normalizasyon yaklaşımlarına dayanan iki ayrı normalize karar matrisi elde edilmektedir. Bu işlem esnasında fayda yönlü kriterler için 9 numaralı eşitliklerden, maliyet yönlü kriterler için ise 10 numaralı eşitliklerden yararlanılmaktadır.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmax}}, \quad n'_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}} \quad (9)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{jmin}}{x_{ij}}, \quad n'_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{jmax}} \quad (10)$$

3. Adım: Oluşturulan normalize karar matrisleri ağırlıklandırılır. Bu işlem esnasında 11 numaralı eşitliklerden yararlanılır.

$$v_{ij} = n_{ij} \cdot w_j, \quad v'_{ij} = n'_{ij} \cdot w_j \quad (11)$$

4. Adım: İdeal ve anti-ideal çözümler belirlenir. Bu işlem esnasında 12 ve 13 numaralı eşitliklerden yararlanılır. İdeal çözüm, ağırlıklı karar matrislerindeki en yüksek değeri temsil ederken; anti-ideal çözüm, ağırlıklı karar matrislerindeki en düşük değeri temsil etmektedir.

$$t_i = \max v_{ij}, \quad t'_i = \max v'_{ij} \quad (12)$$

$$t_{ai} = \min v_{ij}, \quad t'_{ai} = \min v'_{ij} \quad (13)$$

5. Adım: İdeal ve anti-ideal çözümlerden sapmalar hesaplanır. Bu işlem esnasında 14 ve 15 numaralı eşitliklerden yararlanılır.

$$d^+ = t_i - v_{ij}, \quad d'^+ = t'_i - v'_{ij} \quad (14)$$

$$d^- = v_{ij} - t_{ai}, \quad d'^- = v'_{ij} - t'_{ai} \quad (15)$$

6. Adım: Alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlerden sapmaları hesaplanır. Bu işlem esnasında 15 ve 16 numaralı eşitliklerden yararlanılır.

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^n d^+, \quad s_i'^+ = \sum_{j=1}^n d'^+ \quad (16)$$

$$s_i^- = \sum_{j=1}^n d^-, \quad s_i'^- = \sum_{j=1}^n d'^- \quad (17)$$

7. Adım: Her alternatifin fayda fonksiyonu 18 ve 19 numaralı eşitlikler yardımıyla hesaplanarak optimum alternatiften sapmaları belirlenir. Bir diğer deyişle bu adımda her alternatif optimum alternatif ile karşılaştırılmış olur.

$$K_i^+ = \frac{s_0^+}{s_i^+}, \quad K_i'^+ = \frac{s_0'^+}{s_i'^+} \quad (18)$$

$$K_i^- = \frac{s_0^-}{s_i^-}, \quad K_i'^- = \frac{s_0'^-}{s_i'^-} \quad (19)$$

8. Adım: Fayda fonksiyonları doğrultusunda 20 numaralı eşitlikler yardımıyla CRADIS değerleri hesaplanır.

$$Q_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{2}, \quad Q_i' = \frac{K_i'^+ + K_i'^-}{2} \quad (20)$$

9. Adım: Elde edilen CRADIS değerleri birbirine bölünerek alternatiflerin nihai sıralamaları belirlenir. Bu işlem esnasında 21 numaralı eşitlikten yararlanılır.

$$R_i = \frac{Q_i}{Q_i'} \quad (21)$$

Bulgular

Araştırmanın değerlendirme sürecinde ilk adım olarak değerlendirme işlemlerinde kullanılacak çevresel göstergelerin ağırlıkları DNMEREC yöntemiyle belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ilk olarak tüm göstergelere çift normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Göstergelerin tamamı maliyet yönlü olduğundan, normalizasyon aşamasında 2 numaralı eşitlikler kullanılmıştır. Ardından, 3 numaralı eşitlikler kullanılarak her yıla ait toplam performans skorları (S_i); 4 numaralı eşitlikler aracılığıyla ise her bir göstergenin sistemden çıkarılması durumunda elde edilen performans değerleri (S_{ij}' , S_{ij}'') çift normalizasyon yaklaşımına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu işlemler sonucunda elde edilen değerler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Göstergelerin Kaldırılması Halinde Yıllara İlişkin Performans Değerleri

Yıllar	S'_{ij}					S''_{ij}				
	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5
2023	0,0268	0,0268	0,0268	0,0268	0,0000	0,1671	0,1909	0,1909	0,1552	0,2277
2022	0,0270	0,0462	0,0441	0,0439	0,0534	0,1670	0,1741	0,1741	0,1399	0,1830
2021	0,1394	0,1616	0,1815	0,1332	0,1962	0,0578	0,0602	0,0602	0,0512	0,0382
2020	0,1167	0,1443	0,1579	0,1495	0,1645	0,0818	0,0790	0,0790	0,0332	0,0741
2019	0,1786	0,2067	0,1989	0,1663	0,2223	0,0134	0,0077	0,0077	0,0139	0,0067

MEREC yöntemi, gösterge ağırlıklarını her bir göstergenin devre dışı bırakılması durumunda alternatiflerin performans puanlarında oluşacak değişimler üzerinden belirlemektedir. Bu bağlamda yöntemin işlem basamaklarına uygun olarak Tablo 3'te yer alan puanlar kullanılarak 5 numaralı eşitlikler yardımıyla göstergelere ilişkin mutlak sapma değerleri (E_j , E'_j) ve 6 numaralı eşitlikler yardımıyla da kriterlerin ağırlıkları (w_j , w'_j) çift normalizasyon yaklaşımına uygun bir şekilde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ardından 7 ve 8 numaralı eşitlik yardımıyla göstergelere ilişkin nihai ağırlıklar belirlenmiştir. Söz konusu işlemlere ilişkin sonuçlar, Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Göstergelere İlişkin Mutlak Sapmalar ve Kriter Ağırlıkları

Parametreler	G1	G2	G3	G4	G5
E_j	0,2096	0,1124	0,0888	0,1783	0,0616
E'_j	0,1018	0,0772	0,0772	0,1956	0,0592
w_j	0,3222	0,1727	0,1365	0,2740	0,0947
w'_j	0,1992	0,1510	0,1510	0,3828	0,1160
fw_j	0,2607	0,1619	0,1437	0,3284	0,1053

Tablo 4'ten anlaşılacağı üzere şirketin çevresel performans değerlendirmesinde en yüksek ağırlık değerine sahip gösterge, 0,3284 ile G4 kodlu atık miktarı olmuştur. Bu göstergeyi, 0,2607 ağırlık değeriyle G1 kodlu enerji tüketimi ve 0,1619 ağırlık değeriyle G2 kodlu sera gazı emisyonu takip etmiştir. Bununla birlikte G3 kodlu su yoğunluğu ve G5 kodlu tehlikeli atık ve arıtma çamuru göstergelerinin ağırlıklarının nispeten düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu durum söz konusu göstergelerin önemsiz olduğu anlamına gelmemekle birlikte şirketin yıllar itibarıyla bu göstergelerdeki performans değişimlerinin daha sınırlı kaldığına işaret etmektedir.

Gösterge ağırlıklarının belirlenmesinin ardından, uygulamanın ikinci aşamasına geçilmiş ve şirketin çevresel sürdürülebilirlik performansı yıllar itibarıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, DNCRADIS yönteminin işlem adımlarına uygun olarak tüm göstergeler 10 numaralı eşitlikler doğrultusunda normalize edilmiş, ardından 11 numaralı eşitlikler kullanılarak ağırlıklı normalizasyon matrisleri oluşturulmuştur. Daha sonra 14 numaralı eşitlikler kullanılarak ideal çözümlerden sapma değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda elde edilen sonuçlar, Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. İdeal Çözüme Uzaklıklar

Yıllar	d^+					d^{+*}				
	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5
2023	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0134	0,0804	0,0329	0,0311	0,1167	0,0000
2022	0,0335	0,0060	0,0068	0,0160	0,0000	0,0538	0,0279	0,0255	0,1058	0,0134
2021	0,0781	0,0329	0,0148	0,1064	0,0021	0,0032	0,0000	0,0181	0,0152	0,0115
2020	0,0804	0,0309	0,0178	0,0544	0,0094	0,0000	0,0025	0,0151	0,0746	0,0043
2019	0,0800	0,0288	0,0311	0,1167	0,0099	0,0006	0,0050	0,0000	0,0000	0,0038

İdeal çözüme olan uzaklıkların belirlenmesinin ardından 15 numaralı eşitlik kullanılarak anti-ideal çözüme olan uzaklıklar da hesaplanmıştır. Bu işleme ilişkin elde edilen sonuçlar, Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Anti-ideal Çözüme Uzaklıklar

Yıllar	d^+					d^-				
	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5
2023	0,0804	0,0329	0,0311	0,1167	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0134
2022	0,0469	0,0268	0,0243	0,1006	0,0134	0,0266	0,0050	0,0056	0,0109	0,0000
2021	0,0023	0,0000	0,0163	0,0103	0,0112	0,0772	0,0329	0,0129	0,1015	0,0019
2020	0,0000	0,0020	0,0132	0,0623	0,0039	0,0804	0,0304	0,0160	0,0420	0,0090
2019	0,0004	0,0041	0,0000	0,0000	0,0034	0,0798	0,0279	0,0311	0,1167	0,0096

Anti-ideal çözüme olan uzaklıklar belirlendikten sonra DNCRADIS yönteminin işlem adımlarına uygun olarak 16 ve 17 numaralı eşitlikler yardımıyla ideal ve anti-ideal çözümlerden sapma değerleri hesaplanmıştır. Ardından 18 ve 19 numaralı eşitlikler aracılığıyla optimum alternatiften sapmalar, 20 numaralı eşitlikler ile CRADIS değerleri ve son olarak 21 numaralı eşitlik ile performans sıralamaları elde edilmiştir. Tüm bu hesaplamalara ilişkin sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Sapmalar, Performans Skorları ve Sıralamalar

Yıllar	s_i^+	s_i^{+}	s_i^-	s_i^{-}	K_i^+	K_i^{+}	K_i^-	K_i^{-}	Q_i	Q_i'	R_i	Sıra
2023	0,0134	0,2610	0,2610	0,0134	1,0000	0,0360	1,0000	0,0504	1,0000	0,0432	23,1451	1
2022	0,0624	0,2263	0,2120	0,0481	0,2140	0,0415	0,8122	0,1814	0,5131	0,1115	4,6037	2
2021	0,2344	0,0480	0,0400	0,2264	0,0570	0,1958	0,1533	0,8543	0,1052	0,5251	0,2003	4
2020	0,1929	0,0966	0,0815	0,1778	0,0692	0,0974	0,3120	0,6711	0,1906	0,3842	0,4961	3
2019	0,2664	0,0094	0,0080	0,2650	0,0501	1,0000	0,0305	1,0000	0,0403	1,0000	0,0403	5

Tablo 7'de sunulan DNCRADIS analiz sonuçları, değerlendirmeye konu olan şirketin çevresel sürdürülebilirlik performansının yıllar içinde genel olarak iyileşme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şirketin en düşük performansı 2019 yılında gözlemlenmiş, bunu izleyen dönemlerde performans skorlarında istikrarlı bir artış yaşanmıştır. Özellikle 2023 yılı, en yüksek R_i skoru olan 23,1451 ile birinci sırada yer alarak analiz döneminin en başarılı yılı olmuştur. Sıralama açısından tek istisna 2021 yılıdır. 2021 yılında bir önceki yıla kıyasla kısa süreli bir gerileme yaşanmış olsa da sonraki yıllarda yeniden artış eğilimine dönmüştür. Bu bulgular, şirketin çevresel göstergeler temelinde zaman içerisinde daha güçlü bir sürdürülebilirlik performansı sergilediğini göstermektedir.

Sonuçlar

Sürdürülebilirlik, günümüz üretim paradigmasının temel belirleyicilerinden biri olmakla birlikte çevresel etkileri yoğun olan sektörlerde stratejik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda otomotiv endüstrisi, yüksek enerji tüketimi, emisyon salımı ve atık üretimi gibi çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından en fazla dönüşüm baskısı altında bulunan sektörlerden biri olarak dikkat çekmektedir. Öte yandan küresel ekonomik sistem içerisindeki merkezi konumu otomotiv endüstrisini sürdürülebilir üretim paradigmasının edilgen bir unsuru olmaktan çıkartarak aktif bir dönüştürücü güç haline getirmektedir. Bu çalışmada söz konusu dönüşümün işletme düzeyinde nasıl somutlaştığını ortaya koymak amacıyla Türkiye'nin önde gelen otomotiv üreticilerinden birinin çevresel sürdürülebilirlik performansı boyutsal bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde MEREK ve CRADIS yöntemlerinin çift normalizasyon versiyonları hibrit bir yapıda kullanılarak araştırmada kullanılan göstergelere ilişkin ağırlıklar ve yıllık performans skorları nesnel bir şekilde belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, değerlendirmeye alınan şirketin çevresel sürdürülebilirlik performansında dönemsel dalgalanmalar yaşansa rağmen genel eğilimin istikrarlı biçimde yukarı yönlü olduğunu

göstermektedir. Şirketin en düşük performansı 2019 yılında gözlemlenmiş ancak izleyen yıllarda özellikle atık yönetimi, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonu gibi alanlarda kaydedilen gelişmelerle şirket, 2023 yılında en yüksek performans düzeyine ulaşmıştır. Bununla birlikte 2021 yılında sınırlı bir gerileme yaşanmış olsa da bu eğilim geçici olmuş ve çevresel göstergeler yeniden olumlu bir yönelim sergilemiştir. Bu sonuçlar, şirketin çevresel sürdürülebilirlik vizyonunu operasyonel stratejilerine etkin biçimde entegre ettiğini ve net sıfır hedefi doğrultusunda kararlı adımlar attığını göstermektedir. Elde edilen bu başarı, şirketin sektörel dönüşümde öncü bir rol üstlenme potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Gösterge ağırlıkları bağlamında yapılan değerlendirmeler, çevresel performans üzerinde en belirleyici etkiye sahip değişkenin araç başına düşen atık miktarı olduğunu ortaya koymuştur. Bunu enerji tüketimi ve sera gazı emisyonu izlemiş, su tüketimi ve tehlikeli atık göstergeleri ise görece daha düşük ağırlıklara sahip olmuştur. Bu durum, söz konusu göstergeler arasında gözlemlenen performans farklılıklarının doğal bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Özellikle düşük ağırlıklı göstergelerin, şirket tarafından daha istikrarlı bir şekilde yönetildiği ya da bu alanlarda iyileştirme potansiyelinin sınırlı olduğu düşünülmektedir. Çalışmada elde edilen bu sonuç, çevresel sürdürülebilirlik stratejilerinin önceliklendirilmesinde ve kaynak tahsisinde karar vericilere önemli bir yol haritası sunmaktadır. Zira özellikle atık yönetimi, enerji verimliliği ve sera gazı azaltımı gibi yüksek ağırlığa sahip alanlara odaklanılmasıyla çevresel performansın daha etkili şekilde iyileştirilmesi mümkün olacaktır.

Çalışma, literatürdeki iki temel boşluğa anlamlı katkılar sunmaktadır. İlk olarak çoğu sürdürülebilirlik değerlendirmesi sektör ya da ülke düzeyinde yapılmakta, işletme ölçeğinde zamana yayılan analizlere çok sınırlı yer verilmektedir. Bu çalışma, işletme düzeyindeki çevresel sürdürülebilirlik performansını beş yıllık dönemde boylamsal olarak inceleyerek bu boşluğu gidermeyi hedeflemiştir. İkinci olarak ise kullanılan yöntemsel çerçeve, klasik çok kriterli karar verme yöntemlerinin ötesinde çift yönlü normalizasyon temelli ve veri duyarlılığı yüksek modellerin birlikte kullanımına dayanmaktadır. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesinde daha hassas, tekrarlanabilir ve objektif bir yöntem önerisi sunmaktadır. Bununla birlikte çalışmada elde edilen bulgular, literatürdeki bazı temel eğilimleri de destekler niteliktedir. Örneğin, Sharma vd. (2021) ve Zhang vd. (2021) gibi çalışmalarda otomotiv sektöründe çevresel performansın özellikle enerji verimliliği, atık yönetimi ve emisyon kontrolü gibi alanlarda yoğunlaştığı belirtilmektedir. Bu çalışmada da en yüksek ağırlıkların bu göstergelere ait olması, söz konusu bulgularla örtüşmekte ve yöntemin karar önceliklerini belirlemedeki güvenilirliğini desteklemektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Türkiye otomotiv sanayisinin güncel ve geleceğe dönük sürdürülebilirlik politikaları açısından da önemli çıkarımlar içermektedir. Özellikle AB Yeşil Mutabakatı çerçevesinde uygulamaya geçen Sınırdan Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ve buna paralel olarak şekillenen “yeşil dönüşüm” gündemi, otomotiv üreticilerinin karbon yoğunluğu, enerji verimliliği, atık yönetimi ve kaynak kullanımı gibi göstergelerde ölçülebilir iyileşmeler ortaya koymasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda çalışmada ortaya konan ağırlıklandırma ve sıralama bulguları, işletmelerin CBAM uyumu ve net sıfır taahhütleri doğrultusunda önceliklendirilmiş bir dönüşüm yol haritası geliştirmesine katkı sağlayabilir. Zira elde edilen bulgular, sürdürülebilirlik performansının firma düzeyinde hangi boyutlar üzerinden daha belirleyici olduğunu ortaya koyarak işletmelerin CBAM ve net sıfır hedefleri kapsamında raporlama ve izleme süreçlerini daha sistematik bir zemine oturtmasına katkı sağlayabilecek niteliktedir. Bununla birlikte çalışmanın bulguları değerlendirilirken bazı sınırlılıkların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Öncelikle analiz tek bir üreticiye odaklanmaktadır. Bu nedenle çalışma geniş ölçekli bir genelleme iddiası taşımaktan ziyade sürdürülebilirlik performansının şirket düzeyinde çok kriterli karar verme yöntemleri aracılığıyla nasıl değerlendirilebileceğini ortaya koyan bir vaka analizi olarak ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, incelenen kuruluş özelinde ayrıntılı bir değerlendirme sağlamış olsa da sonuçların sektör geneline veya farklı ölçek ve yapıya sahip işletmelere genellenmesinde temkinli olunmalıdır. Ayrıca kullanılan kriter seti araştırmaya konu olan işletmenin raporları doğrultusunda belirlenmiş olup farklı kriter setleriyle veya çoklu firma karşılaştırmalarıyla yürütülecek analizlerde bulguların farklılaşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Gelecek çalışmalarda bu araştırmada kullanılan metodolojik çerçevenin farklı ölçek ve yapıya sahip birden fazla işletmeye uygulanması, elde edilen bulguların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine ve genellenebilirliğinin test edilmesine olanak sağlayacaktır. Özellikle otomotiv sektöründe faaliyet gösteren

firmaların yanı sıra farklı sanayi kollarında yürütülecek uygulamalar, önerilen yaklaşımın sektörler arası geçerliliğini ortaya koyabilir. Ayrıca kriter setinin genişletilerek sosyal ve yönetim boyutlarını içeren göstergelerin desteklenmesi, sürdürülebilirlik performansının daha bütüncül bir perspektiften ele alınmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, farklı nesnel ve öznel ağırlıklandırma yöntemleriyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması, DNMEREC–DNCRADIS bütünlük yaklaşımının göreceli üstünlüklerinin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine imkân tanıyarak literatürü zenginleştirebilir.

Beyanlar

Etik kurul beyanı: Bu çalışma kapsamında yalnızca Kamuyu Aydınlatma Platformu üzerinden kamuya açık olarak yayımlanmış ikincil veriler kullanılmıştır. İnsan katılımcılardan veri toplanmamış ve herhangi bir deneysel müdahale gerçekleştirilmemiştir. Bununla birlikte çalışmada gramer-yazım düzeltmeleri için, metinlerde gramer doğruluğunu, imla ve üslup tutarlılığını destekleyen üretken bir yapay zeka uygulaması olan Grammarly kullanılmıştır.

Yazarlık katkıları: Bu çalışma tek yazarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma tasarımı, veri toplama, analiz, yorumlama, literatür taraması ve yazım süreçlerinin tamamı yazar tarafından yürütülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı: Bu makale ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Finansal Destek: Çalışma için hiçbir kurum ya da kişiden finansal destek alınmamıştır.

Kaynaklar

ALİOĞULLARI, E., TÜRKAN, Y. S., & ÇAKMAK, E. (2023). A decision model for the assessment of environmental sustainability risks of the automotive industry. *Journal of Management and Economics Research*, 21(4), 296-318. <https://doi.org/10.11611/yeard.1335958>

AMRINA, E., & YUSOF, S. M. (2012). Interpretive structural model of key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in automotive companies. In *2012 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 656-660). IEEE.

FINKBEINER, M., SCHAU, E. M., LEHMANN, A., & TRAVERSO, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2(10), 3309-3322. <https://doi.org/10.3390/su2103309>

GEDAM, V. V., RAUT, R. D., LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B., NARKHEDE, B. E., & GREBINEVYCH, O. (2021). Sustainable manufacturing and green human resources: Critical success factors in the automotive sector. *Business Strategy and the Environment*, 30(2), 1296-1313. <https://doi.org/10.1002/bse.2685>

GRANDHI, S., & WIBOWO, S. (2016). Sustainability performance evaluation of automotive manufacturing companies. In *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 1725-1730). IEEE.

HSU, L.-C., OU, S.-L., & OU, Y.-C. (2014). A Comprehensive performance evaluation and ranking methodology under a sustainable development perspective. *Journal of Business Economics and Management*, 16(1), 74-92. <https://doi.org/10.3846/16111699.2013.848228>

KESHAVARZ-GHORABAE, M., AMIRI, M., ZAVADSKAS, E. K., TURSKIS, Z., & ANTUCHEVICIENE, J. (2021). Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). *Symmetry*, 13(4), 525. <https://doi.org/10.3390/sym13040525>

MATHIYAZHAGAN, K., SENGUPTA, S., & POOVAZHAGAN, L. (2018). A decision making trial and evaluation labradoru approach to analyse the challenges to environmentally sustainable manufacturing in Indian automobile industry. *Sustainable Production and Consumption*, 16, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.05.007>

OSTOJIC, S., & TRAVERSO, M. (2024). Application of life cycle sustainability assessment in the automotive sector – a systematic literature review. *Sustainable Production and Consumption*, 47, 105-127. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.033>

PUŠKA, A., BOŽANIĆ, D., MASTILO, Z., & PAMUČAR, D. (2023). Extension of MEREC-CRADIS methods with double normalization-case study selection of electric cars. *Soft Computing*, 27(11), 7097-7113. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08054-7>

- PUŠKA, A., STEVIĆ, Ž., & PAMUČAR, D. (2022). Evaluation and selection of healthcare waste incinerators using extended sustainability criteria and multi-criteria analysis methods. *Environment, Development and Sustainability*, (24), 11195–11225. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01902-2>
- SARKAR, P., KHANAPURI, V. B., & TIWARI, M. K. (2025). Strategic decision-making for sustainable production and distribution in automotive industry: a machine learning enabled dynamic multi-objective optimisation. *International Journal of Production Research*, 63(7) 2339-2362. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2403111>
- SCHALTEGGER, S., & WAGNER, M. (2006). Integrative management of sustainability performance, measurement and reporting. *International Journal of Accounting, Auditing and Performance Evaluation*, 3(1), 1-19. <https://doi.org/10.1504/IJAAPE.2006.010098>
- SHARMA, V., SHARMA, V., & KARWASRA, K. (2021). A decision framework for green manufacturing indicators using fuzzy AHP-ELECTRE I: a case study of the steering system manufacturer. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1332-1341. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1970272>
- SIMIC, V. (2013). End-of-life vehicle recycling-a review of the state-of-the-art. *Technical Gazette/ Tehnički Vjesnik*, 20(2), 371-380.
- SINGH, P. K., & SARKAR, P. (2021). A multi-criteria decision approach to select contract manufacturer for sustainable development of automotive products: an integrated framework. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5(4), 843-857. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00181-8>
- STOYCHEVA, S., MARCHESE, D., PAUL, C., PADOAN, S., JUHMANI, A. S., & LINKOV, I. (2018). Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 187, 257-272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.133>
- SUHI, S. A., ENAYET, R., HAQUE, T., ALI, S. M., MOKTADIR, M. A., & PAUL, S. K. (2019). Environmental sustainability assessment in supply chain: An emerging economy context. *Environmental Impact Assessment Review*, 79, 106306. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106306>
- WANG, C. N., NHIEU, N. L., & NGUYEN, T. T. (2024). Strategic assessment of sustainable production in the international automobile sector using efficiency analysis and decision-making models. *Journal of Cleaner Production*, 452, 142173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142173>
- ZHANG, H., ZHANG, M., YAN, W., LIU, Y., JIANG, Z., & LI, S. (2021). Analysis the drivers of environmental responsibility of Chinese auto manufacturing industry based on triple bottom line. *Processes*, 9(5), 751. <https://doi.org/10.3390/pr9050751>

Summary

This study conducts a longitudinal evaluation of environmental sustainability performance at the firm level in the automotive industry. This approach remains markedly underexplored in the extant literature. In doing so, it addresses methodological gaps and provides data-driven strategic insights for practitioners. The analysis focuses on a leading automotive manufacturer in Turkey and covers the five-year period from 2019 to 2023, using environmental indicators calculated per vehicle unit. Five key indicators are used in this assessment: energy consumption, greenhouse gas emissions, water consumption, total waste, and hazardous waste and sludge generation. The performance assessment employs a hybrid analytical framework that integrates the DNMEREC and DNCRADIS methods. These are bidirectional normalizations of the MEREC and CRADIS models. DNMEREC is used to determine the weights of the environmental indicators, whereas DNCRADIS is employed to calculate annual performance scores. This dual-method approach contributes in two significant ways: it enhances the objectivity and reliability of performance evaluations and facilitates a more granular analysis of year-to-year performance dynamics.

Indicator weight analysis shows that total waste per vehicle was the most influential factor in environmental performance, followed by energy consumption and greenhouse gas emissions. These findings align with those reported by Sharma et al. (2021) and Zhang et al. (2021). By contrast, water consumption and hazardous waste/sludge had lower relative weights, indicating limited potential

for substantial performance variation in these areas. This differentiation provides a data-driven roadmap for managerial prioritization of sustainability efforts and resource allocation. The results also show a favorable trajectory in the company's environmental sustainability performance over time. The lowest performance was observed in 2019, while the highest was recorded in 2023. A temporary decline in 2021 did not alter the overall upward trend, suggesting that the company has progressively strengthened its environmental strategies and made consistent progress toward its net-zero ambitions.

This research makes two contributions to the existing body of literature on environmental sustainability. First, it provides a rare, firm-level, indicator-driven longitudinal assessment that renders temporal sustainability trends analytically visible. This is a notable advance, as it addresses a gap in the literature, which is dominated by sector- and country-level studies. Second, it advances methodological rigor by applying a high-sensitivity, bidirectionally normalized hybrid model that surpasses conventional approaches by offering a robust and replicable framework for environmental performance evaluation. Beyond these contributions, the study emphasizes the need to conceptualize environmental sustainability not as a static outcome but as a dynamic and strategically manageable process. This perspective facilitates the effective allocation of limited organizational resources and provides a structured foundation for firms seeking to promote sectoral progress in line with sustainability objectives.