

Evaluating energy transition strategies for net-zero emissions in the manufacturing sector using an integrated decision-making model

Gulmisar Taskin ¹, Beyzanur Cayir Ervural ²

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 21.04.2026

Accepted: 09.08.2026

Doi:

10.65206/pajes.1935196

Corresponding author:

Beyzanur Cayir Ervural
(bc.ervural@erbakan.edu.tr)

Author addresses:

¹ Department of Industrial Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye
(gulmisartaskn@gmail.com)

² Department of Aviation Management, Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye
(bc.ervural@erbakan.edu.tr)

ABSTRACT

Context—This study addresses the prioritization of energy transition strategies applicable to the manufacturing sector to achieve net-zero emission targets as a strategic decision problem. Increased industrialization and economic growth have significantly increased energy consumption and carbon emissions, making the manufacturing sector a priority area for achieving net-zero targets. In this context, correctly identifying energy transition strategies is of great importance in terms of environmental sustainability and economic competitiveness. However, the energy transition process involves multi-dimensional and often contradictory decision problems where economic, technical, environmental, and regulatory criteria are evaluated together. Existing studies generally fail to address these criteria within a holistic framework and offer limited approaches to systematically prioritizing strategies. Therefore, there is a need to evaluate energy transition strategies for net-zero targets in the manufacturing sector with an integrated and structured decision-making approach.

Objective—In this context, the study focuses on the necessity of supporting decisions regarding energy transition with systematic and analytical methods. While most studies in the literature focus on the question of "which technology?", this study focuses on "which strategic transformation path?" This study aims to answer the question of how energy transition can be addressed. Instead of limiting the discussion to the selection of specific technologies, the study presents feasible and prioritized strategic transformation pathways for manufacturing businesses through an integrated decision model.

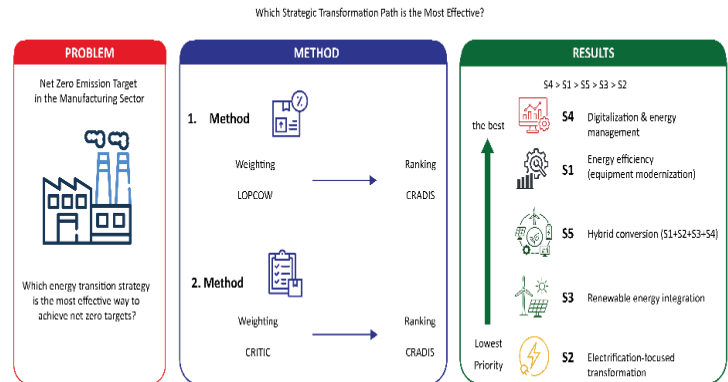
Method—To achieve this, the study applies a multi-criteria decision-making (MCDM) framework, using LOGarithmic Percentage Change-driven Objective Weighting (LOPCOW) and Criteria Importance Through InterCriteria Correlation (CRITIC) methods to determine criteria weights and the Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution (CRADIS) method to rank energy transition alternatives, thereby constructing a strategic roadmap in the context of net-zero emissions.

Results—The findings showed that the performance of the strategies was ranked as $S4 > S1 > S5 > S3 > S2$. The S4 strategy demonstrated a significant advantage, exhibiting considerably higher performance compared to all other strategies. S1 and S5 produced moderately similar results, while strategy S2 showed the lowest performance.

Conclusion—The results show that digitalization and energy management strategies are more effective in achieving net-zero targets. This highlights the importance of monitoring, analyzing, and effectively managing energy use, in addition to technological investments, in energy transition processes. The findings serve as a decision support tool for policymakers and industry stakeholders and can guide the prioritization of sustainable energy investments. Future studies are recommended to examine the applicability and scalability of these approaches through different regional scenarios and long-term impacts.

Key Words—CRADIS, CRITIC, Decision-making model, Energy transition, LOPCOW, Net-zero emission target.

Energy Transition Strategies for Net-Zero Emissions in the Manufacturing Sector
Evaluation with an Integrated Decision-Making Model



Digitalization & energy management (S4) has been identified as the most effective approach in terms of economic, environmental, and technical criteria.

İmalat sektöründe net-sıfır emisyon için enerji dönüşüm stratejilerinin bütünlük karar verme modeliyle değerlendirilmesi

Gülmisar Taşkın¹, Beyzanur Çayır Ervural²

MAKALE BİLGİLERİ

Tarihler:

Geliş: 21.04.2026

Kabul: 09.08.2026

Doi:

10.65206/pajes.1935196

Sorumlu yazar:

Beyzanur Çayır Ervural
(bc.ervural@erbakan.edu.tr)

Yazar adresleri:

¹ Endüstri Mühendisliği Bölümü,
Necmettin Erbakan Üniversitesi,
Konya, Türkiye
(gulmisartaskn@gmail.com)

² Havacılık Yönetimi Bölümü,
Necmettin Erbakan Üniversitesi,
Konya, Türkiye
(bc.ervural@erbakan.edu.tr)

ÖZ

Arka Plan—Bu çalışma, net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için imalat sektöründe uygulanabilecek enerji dönüşüm stratejilerinin önceliklendirilmesini stratejik bir karar problemi olarak ele almaktadır. Artan sanayileşme ve ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde artırmış; bu durum, imalat sektörünü net sıfır hedeflerine ulaşmada öncelikli bir alan hâline getirmiştir. Bu bağlamda, enerji dönüşüm stratejilerinin doğru şekilde belirlenmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik rekabet gücü açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak enerji dönüşümü süreci; ekonomik, teknik, çevresel ve düzenleyici kriterlerin bir arada değerlendirildiği, çok boyutlu ve çoğu zaman çelişkili karar problemleri içermektedir. Mevcut çalışmalar genellikle bu kriterleri bütüncül bir çerçevede ele almakta yetersiz kalmakta ve stratejilerin sistematik biçimde önceliklendirilmesine yönelik sınırlı yaklaşımlar sunmaktadır. Bu nedenle, imalat sektöründe net sıfır hedeflerine yönelik enerji dönüşüm stratejilerinin bütünlük ve yapılandırılmış bir karar verme yaklaşımıyla değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Amaç—Bu bağlamda çalışma, enerji dönüşümüne yönelik kararların sistematik ve analitik yöntemlerle desteklenmesi gerekliliğine odaklanmaktadır. Literatürde çoğu çalışmanın “hangi teknoloji?” sorusuna yoğunlaştığı gözlemlenirken, bu çalışma “hangi stratejik dönüşüm yolu?” sorusuna yanıt vermeyi hedeflemektedir. Çalışma, enerji dönüşümünü sadece belirli teknolojilerin seçimiyle sınırlı ele almak yerine, imalat işletmeleri için uygulanabilir ve önceliklendirilebilir stratejik dönüşüm yollarını bütünlük bir karar modeli aracılığıyla sunmaktadır.

Yöntem—İfade edilen amacı gerçekleştirmek için kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Logaritmik Yüzde Değişime Dayalı Nesnel Ağırlıklandırma (LOPCOW) ve Kriterler Arası Korelasyona Dayalı Kriter Önemlendirme (CRITIC) yöntemleri, enerji dönüşüm alternatiflerinin sıralanmasında ise İdeal Çözüme Olan

Uzaklığa Dayalı Uzlaşık Alternatif Sıralama (CRADIS) yöntemi kullanılarak net sıfır bağlamında stratejik bir yol haritası çıkarılmıştır.

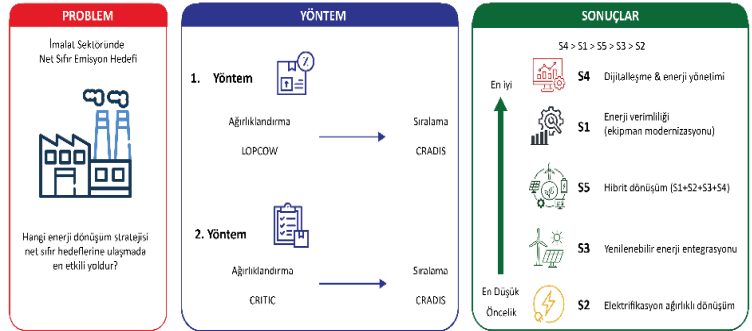
Bulgular—Elde edilen bulgular, stratejilerin performansının $S4 > S1 > S5 > S3 > S2$ şeklinde sıralandığını göstermiştir. S4 stratejisi, diğer tüm stratejilere kıyasla belirgin biçimde daha yüksek performans sergileyerek anlamlı bir üstünlük sağlamıştır. S1 ve S5 orta düzeyde benzer sonuçlar üretirken, S2 stratejisi en düşük performansı göstermiştir.

Sonuç—Sonuçlar, dijitalleşme ve enerji yönetimi stratejisinin net sıfır hedeflerine ulaşmada daha yüksek etkinlik sağladığını göstermektedir. Bu durum, enerji dönüşüm süreçlerinde teknolojik yatırımların yanı sıra enerji kullanımının izlenmesi, analiz edilmesi ve etkin şekilde yönetilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, politika yapıcılar ve sektör paydaşları için karar destek aracı niteliği taşımakta olup, sürdürülebilir enerji yatırımlarının önceliklendirilmesinde yol gösterici olabilir. Gelecek çalışmaların, farklı bölgesel senaryolar ve uzun dönemli etkiler üzerinden bu yaklaşımların uygulanabilirliğini ve ölçeklenebilirliğini incelemesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler—CRADIS, CRITIC, Karar verme modeli, Enerji dönüşümü, LOPCOW, Net-sıfır emisyon hedefi.

İmalat Sektöründe Net-Sıfır Emisyon İçin Enerji Dönüşüm Stratejilerinin Bütünlük Karar Verme Modeliyle Değerlendirilmesi

Hangi Stratejik Dönüşüm Yolu En Etkilidir?



Dijitalleşme & enerji yönetimi (S4), ekonomik, çevresel ve teknik kriterler açısından en etkili yol olarak tespit edilmiştir.

I. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayileşme ve ekonomik büyümenin hızlı olması iklimlerin bozulmasına yol açmıştır. Kaynak kıtlığı ve ekolojik çöküş şiddetli olumsuz hava koşullarına, kuraklığa ve flora ve fauna kaybına neden olmaktadır. Bu bağlamda, toplulukların uygun adımları atmadığı takdirde mevcut koşulların daha da kötüleşeceği tahmin edilmektedir [1]. Dünyada süregelen iklim değişikliğine önerilen öncelikli çözüm, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle de uyumlu olan küresel ölçekte net sıfır emisyonu ulaştırmaktır. En fazla sera gazı üretimine neden olan enerji sektörü net sıfır emisyonu ulaştırmadaki öncelikli alandır [2].

Net sıfıra geçiş, hız kazanan teknik bir dönüşüm süreci olmanın ötesinde, bu sürecin gerçekleştirilmesi için sosyal, ekonomik ve politik alanlarda köklü değişimleri de zorunlu kılmaktadır. 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşma yönündeki küresel uzlaş, temellerini 2016 yılında COP21 kapsamında kabul edilen Paris Anlaşması'nda bulunan yasal iklim hedefleri ve stratejilerine dayanmaktadır. Bu sürecin başlatılmasında COP21'in BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Koordinatörü olan Christiana Figueres'in öncü rolü belirleyici olmuştur. 1.5°C hedefine ulaşma yönündeki siyasi baskılar devam etse de mevcut enerji dönüşümünün bu hedefe ulaşmak için yeterli olmadığına dikkat çeken güçlü kanıtlar bulunmaktadır. Sürdürülebilir enerji yatırımlarına ilişkin karar alma süreci oldukça karmaşık olup, projelerin kendi yapısal zorluklarına ek olarak teknik, ekonomik ve finansal riskler bu süreci daha karmaşık hale getirmektedir. Sürdürülebilir enerji projeleri, proje geliştiriciler ve finans kuruluşları açısından; işlem maliyetlerinin yüksekliği, enerji fiyatlarındaki oynaklık, enerji tasarrufu tahminlerindeki belirsizlikler, ekipman performansına ilişkin riskler ile standartlaştırılmış prosedürler ve düzenleyici çerçevelerdeki eksiklikler nedeniyle önemli belirsizlikler içermektedir [3], [4].

Endüstride ve ticari binalarda enerji tüketiminin ve buna bağlı oluşan karbon ayak izinin azaltılması; çevresel hedeflere ulaşılması ve enerji üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılığın düşürülmesi açısından önemlidir. Bu bağlamda, literatürde Net Sıfır Enerji Sistemleri (NZES) için çeşitli tanımlar bulunmaktadır. NZES, yıllık bazda elektrik, ısıtma-soğutma ve ulaşım gibi enerji gereksinimleri kadar enerjiyi yerinde üretebilen ticari veya endüstriyel sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım, enerji sistemleri arasındaki anlık entegrasyondan ziyade, yıllık enerji dengesi esas alınarak yapılan değerlendirmelere dayanmaktadır [5], [6].

İmalat sektörü diğer sektörlerle kıyasla daha fazla enerji tüketmekle birlikte ekonomik faaliyet ve istihdam yaratma potansiyeli açısından da ülke ekonomisine en çok katkı sağlayan sektörlerden biridir [7]. İmalat sektörünün ekonomik büyüme, sanayileşme ve ulusal rekabet gücü üzerindeki etkisi dikkate alındığında, sektörün enerji tüketim davranışlarının ve enerji dönüşümüne yönelik stratejik seçeneklerinin incelenmesi önemli bir akademik ve politik gereklilik hâline gelmektedir. Enerji geçişi, enerji tüketim alışkanlıklarında önemli dönüşümleri ve enerji sistemlerinde köklü yapısal değişimleri içeren, çok boyutlu ve halen devam eden bir süreçtir. Bu süreç; fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerinden, düşük karbonlu ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına doğru yönelimi kapsamaktadır. Üretici firmalar, karbon salımlarının azaltılmasını hedefleyen çevresel düzenlemeler, emisyon sınırları ve iklim politikaları aracılığıyla fosil yakıt kullanımını azaltmaya ve alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye teşvik edilmektedir. Buna ek olarak, enerji geçişinin hızlandırılması amacıyla yeşil kredi, sürdürülebilir tahvil ve benzeri finansal araçlar yoluyla yatırımlar desteklenmekte ve firmaların bu dönüşüme uyum süreci kolaylaştırılmaktadır [8].

Enerji geçişi sürecinde üretici firmalar, hangi enerji dönüşüm stratejisinin ne zaman ve hangi öncelikte uygulanması gerektiğine ilişkin karmaşık kararlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu kararlar; ekonomik maliyetler, çevresel etkiler, teknik

uygulanabilirlik, düzenleyici uyum ve finansal riskler gibi birbiriyle çelişebilen çok sayıda kriterin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, enerji dönüşümüne yönelik stratejik kararların sezgisel yaklaşımlar yerine sistematik ve analitik yöntemlerle ele alınması gerekmektedir.

Literatürde, enerji ve sürdürülebilirlik alanındaki bu çok boyutlu karar problemlerinin çözümünde Çok Kriterli Karar Verme / Multi-Criteria Decision Making (ÇKKV / MCDM) yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. ÇKKV tabanlı yaklaşımlar; farklı paydaş önceliklerini, belirsizlikleri ve kriterler arası etkileşimleri bütüncül bir çerçevede ele alarak enerji dönüşümüne ilişkin alternatiflerin karşılaştırılmasına ve önceliklendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, enerji teknolojilerinin seçimi, yenilenebilir enerji yatırımlarının değerlendirilmesi ve enerji politikalarının analizi gibi alanlarda çeşitli ÇKKV yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar literatürde yer almaktadır [1], [3], [9]-[14].

Net sıfır emisyonlu enerji dönüşümü konusunda literatürde, çok kriterli karar verme ve senaryo temelli karar destek modellerini kullanan önemli çalışmalar bulunmaktadır. Sevgi ve Figen (2025) tarafından yapılan çalışmada Kriterler Arası Korelasyona Dayalı Kriter Önemlendirme (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation -CRITIC) ve Karmaşık Oransal Değerlendirme (Complex Proportional Assessment-COPRAS) yöntemi kullanılarak 2053 Net Sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada fosil yakıttan yenilenebilir enerjiye geçiş incelenmiştir [13]. Ma vd., (2023) tarafından yapılan çalışmada, fosil yakıttan yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik etkisi İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution -TOPSIS) yöntemiyle değerlendirilmiştir [15].

Ancak mevcut çalışmaların önemli bir kısmı, "hangi teknoloji daha uygundur?" sorusuna odaklanmakta; enerji geçişini bir bütün olarak ele alan ve firmalar için "hangi stratejik dönüşüm yolunun izlenmesi gerektiği" sorusuna yanıt veren bütünlük karar modellerinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, net sıfır hedefleri bağlamında enerji dönüşümüne yönelik firma özelinde hazırlanan stratejik yol haritalarının analitik karar verme yaklaşımlarıyla ele alınmasına duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak amacıyla hangi enerji dönüşüm stratejilerinin hangi öncelik sırasıyla uygulanması gerektiği stratejik bir karar problemi olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda, enerji geçişi sürecinde karşı karşıya kalınan çok boyutlu ve çelişkili kriterlerin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla ÇKKV yaklaşımı benimsenmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Tercih Kriteri Yönelimlerinin Logaritmik Yüzde Değişime Dayalı Nesnel Ağırlıklandırma (Logarithmic Percentage Change-driven Objective Weighting -LOPCOW) ve CRITIC yöntemleri, enerji dönüşüm alternatiflerinin önceliklendirilmesinde ise İdeal Çözüme Olan Uzaklığa Dayalı Uzlaşık Alternatif Sıralama (Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution -CRADIS) yöntemi kullanılarak metal imalat sektöründe faaliyet gösteren firma özelinde net sıfır bağlamında analitik bir stratejik yol haritasının oluşturulması hedeflenmektedir. Çalışma, enerji dönüşümünü belirli teknolojilerin seçimiyle sınırlı ele almak yerine, imalat işletmeleri için uygulanabilir ve önceliklendirilebilir stratejik dönüşüm yollarına odaklanarak literatüre özgün bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde ilgili enerji geçişi ve sürdürülebilir imalat, üçüncü bölümünde literatür incelenmekte, dördüncü bölümünde kullanılan yöntemler açıklanmakta, beşinci bölümünde uygulama süreci sunulmakta, altıncı bölümde analiz sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilmekte ve sonuçlar tartışılarak gelecekteki araştırmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.

II. ENERJİ GEÇİŞİ ve SÜRDÜRÜLEBİLİR İMALAT (ENERGY TRANSITION and SUSTAINABLE MANUFACTURING)

2015 yılından bu yana Avrupa Birliği (AB), 2050'ye kadar net sıfır karbonlu bir ekonomiye ulaşma hedefi doğrultusunda geçiş stratejisini sürekli olarak güncellemiştir. Bu kapsamda AB, geleceğin enerji sisteminin; vatandaşları merkeze alan, adil bir dönüşümü güvence altına alan; aynı zamanda merkezileşme, elektrifikasyon, serbestleşme ve sistemler arası entegrasyon ilkeleriyle şekilleneceğini vurgulamaktadır [9].

Zhang ve Zahoor (2025) tarafından Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development -OECD) ülkelerinde 2000-2022 yılları arasında net sıfır emisyon hedefine yönelik enerji dönüşüm süreçlerini, enerji teşvik ve desteklerini, tasarruflarını ve geçiş etkisinin incelendiği çalışmada enerji dönüşümü yoluyla net sıfır emisyonu sağlamak için enerji tedarik zincirindeki sübvansiyonların aşamalı olarak kaldırılmasını, enerji geçişinin hızlandırılmasını ve temiz enerji teknolojilerinin yaygın biçimde yaygınlaştırılmasını içeren çok boyutlu bir stratejiyi gerekli kıldığı vurgulanmaktadır [2].

Küresel iklim değişikliği, düşük karbonlu enerji teknolojilerine geçişi zorunlu hâle getirmektedir. Düşük karbonlu enerji teknolojileri, yanma temelli süreçlerden uzaklaşmayı; bataryalı elektrikli araçlar, yüksek sıcaklıkta çalışabilen ısı pompaları gibi teknolojiler aracılığıyla farklı sektörlerdeki ısı ihtiyacının elektrifikasyonunu ve elektrik motorlarının yaygın kullanımını kapsamaktadır. Bu geçiş sürecinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, çevresel açıdan geniş kapsamlı faydalar sağlamakta ve aynı zamanda sosyal fırsatlar yaratmaktadır [11].

Enerji dönüşümü (geçiş), enerji sistemlerinde yapısal bir değişim olarak tanımlanmaktadır. Doğal kaynak kullanımı, teknolojik gelişmeler, yerel ve uluslararası politikalara kadar teknik ve sosyal boyutları kapsayan bir kavram olarak değerlendirilmektedir. Bu geçiş sürecinde asıl zorluk, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin adil bir şekilde ekonomik büyümenin çevresel baskının azaltılmasının sağlanmasıdır. Bu nedenle, sürdürülebilir gelecek için iklim ve kalkınma stratejileri öncelikli olarak entegre edilmelidir [10]. Yenilenebilir enerji kaynaklara geçiş sürdürülebilir kalkınmayı beslediği gibi uzun vadede biyolojik olarak dost olarak belirtilmektedir. Ülkelerin ve işletmelerin fosil enerjiye olan bağımlılığını azaltması, enerji çeşitliliğine olanak tanınması ve iklim değişikliğine olan pozitif etkisi yenilenebilir enerji geçişinin olumlu özellikleri arasındadır [1].

İmalat endüstrisinde, geleneksel hedefler çoğunlukla süreçlere ve müşteri siparişlerine odaklanırken, günümüzde işletme yöneticilerinin rekabet gücünü ve kârlılığı artırmak amacıyla toplam maliyetleri optimize ederken enerji maliyetlerini de stratejik bir unsur olarak ele almaları gerekmektedir. Bu yaklaşım, işletmelerin ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını daha verimli şekilde karşılayabilen ısıtma, Havalandırma ve Klima (HVAC) sistemlerine yönelmelerini; aynı zamanda pasif tasarım özelliklerini geliştiren, enerji verimliliğini artıran ve sürdürülebilirliği destekleyen ileri çözümlerle tesislerini donatmalarını zorunlu kılmaktadır [12], [16].

Günümüzde enerji verimliliğinin ölçümü toplam faktör verimliliğine (TFP) dayanmakta olup enerji verimliliğinin iyileştirilmesi, enerji girdilerini azaltmaya ve teknolojik yeniliğe bağlıdır. Endüstriler arasındaki verimlilik ve büyüme farklılıkları nedeniyle, enerji kaynakları düşük verimli sektörlerden yüksek verimli sektörlerle yönlenecek; bu da endüstriyel yapının daha az girdiyle, daha verimli ve yenilik odaklı bir modele doğru dönüşmesini sağlayacaktır [17].

Dijital dönüşüm ve düşük karbonlu kalkınma arasındaki ilişki, özellikle imalat sektörü bağlamında son yıllarda artan bir ilgi görmektedir. Bu doğrultuda He vd. (2025) tarafından yapılan

çalışmada, Çin örneğinde dijital ekonominin imalat sektörünün düşük karbonlu ticaret rekabet gücü üzerindeki etkisini inceleyerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmak amaçlanmıştır [18]. Düşük karbonlu ticaret rekabet gücü, karbon emisyonlarını azaltırken ticaret rekabetçiliğinde artış sağlama yeteneği olarak tanımlanmakta; dijital ekonomi ise çok göstergeli bir endeks aracılığıyla ölçülmektedir. Ampirik bulgular, dijital ekonominin imalat sektöründe düşük karbonlu ticaret rekabet gücünü anlamlı biçimde artırdığını, bu etkinin özellikle yeşil ve genel teknolojik inovasyon yoluyla güçlendiğini ve çevresel düzenleme yoğunluğuna bağlı olarak doğrusal olmayan eşik etkileri sergilediğini ortaya koymaktadır. Dijital teknolojilerin sürdürülebilir üretim ve uluslararası rekabet gücü arasındaki dengeyi sağlamada önemli bir araç olmasıyla birlikte, gelişmekte olan imalat ekonomileri için dijitalleşme ve düşük karbonlu kalkınmanın eşgüdümlü ilerlemesi gerekmektedir.

III. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Net sıfır hedefine ulaşmak için enerji dönüşümü bir gereklilik olarak görülmüştür. ÇKKV yöntemleri başta olmak üzere kesitsel bağımlılık testi; enerji sistem modellemesi (Energy System Modeling, ESM) ve yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, LCA); senaryo analizi kapsamında CRITIC ve COPRAS yöntemleri; Çok Aktörlü Çok Kriterli Analiz (Multi-Actor Multi-Criteria Analysis, MAMCA); Analitik hiyerarşi prosesi (Analytic Hierarchy Process, AHP); bulanık analitik hiyerarşi prosesi (Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP) ve TOPSIS; Tercih Sıralama Organizasyon Yöntemi (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, PROMETHEE); Bilgi tabanlı Doğrusal Olmayan Çok Amaçlı Genetik Algoritma II (Knowledge-Based Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, KB-NSGA-II) ve Uzlaşık Çözüm Yöntemi (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR); enerji simülasyonları ve PROMETHEE II; Bulanık TOPSIS (Fuzzy TOPSIS); Doğrusal Olmayan Gecikmesi Dağıtılmış Otoregresif Model (Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag, CS-ARDL), Genişletilmiş Ortalama Grup Tahmincisi ([H2.1] Augmented Mean Group, AMG), Ortak Korelasyonlu Etkiler Ortalama Grup Tahmincisi (Common Correlated Effects Mean Group, CCEMG) ve Tam Düzeltilmiş En Küçük Kareler Yöntemi (Fully Modified Ordinary Least Squares, FMOLS), literatürde farklı çalışmalarda kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır [1]-[3], [9]-[11], [13], [14], [16], [17], [19]-[23].

Tablo 1'de net sıfır emisyon hedefleri hakkında yapılan çalışmalara yönelik özet bir literatür araştırması literatürde en çok kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Yapılan literatür incelemesi, enerji geçişinin sürdürülebilirlik ve karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşmada rol oynadığını ve bu karmaşık sürecin yönetiminde ÇKKV yöntemlerinin yaygın olmamakla birlikte vazgeçilmez bir araç seti sunduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmalar, güneş ve rüzgâr enerjisinin, özellikle İran örneğinde olduğu gibi, teknik, ekonomik ve çevresel kriterlerin kapsamlı bir değerlendirilmesi sonucunda (AHP, FAHP, TOPSIS, Bulanık Mantık kullanılarak) tutarlı bir şekilde en yüksek öncelikli kaynaklar olarak öne çıktığını göstermektedir. Bu geçişin itici gücü, başta imalat sektörü olmak üzere birçok sektör için aciliyet arz etmekte olup, enerji geçişi, yenilenebilir enerji tüketiminin anlamlı şekilde azalttığı kanıtlanmıştır. Bu sürecin optimizasyonu için geliştirilen dinamik enerji planlama çerçeveleri Guangdong Eyaleti örneğinde olduğu gibi, karbon nötrliğe ulaşmanın mümkün olduğunu ve açık deniz rüzgâr enerjisi gibi spesifik enerji dönüşüm teknolojilerinin önceliklendirilmesi gerektiğini göstermektedir. ABD ve Kanada için yapılan iddialı modelleme çalışmaları, güç sektörünün yanı sıra endüstriyel süreçlerin de tamamen karbonsuzlaştırıldığı bir "Solar-X Ekonomisine" geçişin teknik olarak mümkün ve maliyet açısından optimum olduğunu, elektrik üretiminin 2050'ye kadar yaklaşık beş kat artarak büyük ölçüde güneş enerjisi tarafından domine edileceğini öngörmektedir.

Tablo 1. Net sıfır emisyon hedeflerinde enerji dönüşümün önemini gösteren özet literatür tablosu.**Table 1.** Summary literature table showing the importance of energy transition in achieving net zero emission targets.

Ref.	Yöntem	Amaç
[1]	CS-ARDL, AMG, CCEMG ve FMOLS	En büyük on imalatçı ülkede enerji geçişi ve çevresel inovasyonun ekolojik ayak izi üzerindeki etkisini analiz etmek
[2]	Kesitsel bağımlılık testi	OECD ülkelerinde (2000–2022) net sıfır emisyonla yönelik enerji dönüşümlerinde enerji sübvansiyonları, tasarruflar ve enerji geçişlerinin etkisini incelemek
[3]	AHP	Sürdürülebilir enerji yatırım projelerinde karar verme sürecinde proje geliştiricileri ve finans kuruluşları tarafından dikkate alınan temel kriterleri belirlemek ve karşılaştırmak.
[9]	MAMCA	Enerji topluluklarında geçiş yönetiminin uygulanabilirliğini ve çok paydaşlı karar alma süreçlerini incelemek
[10]	AHP, PROMETHEE	Kömür santrallerinin sürdürülebilir enerjiye dönüşümü için teknolojik alternatifleri değerlendirmek
[11]	ESM, LCA	Net sıfır emisyonla geçiş senaryolarında, malzeme ve enerji kullanımı arasındaki etkileşimi analiz ederek çevresel ödünleşmeleri ve belirsizlikleri ortaya koymak
[12]	PROMETHEE II	Akıllı bina bağlamında, ofis binaları için güneşten korunma cihazları ve kontrol stratejilerinin enerji verimliliği, iç konfor ve çevresel etkiler açısından en uygun kombinasyonlarını belirlemek
[13]	CRITIC, COPRAS	OECD ülkelerinin sürdürülebilir kalkınma açısından yenilenebilir enerji kullanım performansını değerlendirmek
[14]	AHP, FAHP, TOPSIS	İran'ın fosil yakıtlara bağımlı enerji yapısını çeşitlendirmek ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla, yenilenebilir enerji seçeneklerini çok kriterli bir çerçevede değerlendirmek ve önceliklendirmek
[15]	TOPSIS	Guangdong Eyaleti için düşük karbonlu ve net sıfır karbon hedeflerine yönelik dinamik enerji planlamasının değerlendirilmesi
[16]	KB-NSGA-II, VIKOR	Zaman dilimine bağlı elektrik tarifeleri altında demir-çelik sektöründe enerji maliyetlerini ve üretim geçiş maliyetlerini dikkate alan enerji odaklı üretim planlama problemini optimize etmek.
[17]	Sistem Dinamikleri (SD) yöntemi	Pekin'de imalat sanayinin "çift karbon" hedefleri doğrultusunda yeşil toplam faktör enerji verimliliği eğilimlerini analiz etmek ve düşük karbonlu gelişim için en uygun geçiş yollarını belirlemek
[19]	Fuzzy TOPSIS	Yenilenebilir enerji kaynaklarını akıllı şebeke entegrasyonu kapsamında çok kriterli olarak değerlendirmek
[20]	Senaryo analizi ve SAW	Hindistan için gelecekteki elektrik talebini karşılayacak ve net sıfır emisyon hedefini sağlayacak sürdürülebilir enerji dönüşüm senaryolarının değerlendirilmesi
[21]	Senaryo analizi	ABD ve Kanada için enerji ve imalat sektöründe net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda %100 yenilenebilir enerjiye dayalı dönüşüm yollarının değerlendirilmesi
[22]	AHP, GIS	G20 ülkelerinde net sıfır ve 1,5 °C hedefleri bağlamında güneş ve karasal rüzgâr enerjisi üretim potansiyelinin değerlendirilmesi
[23]	Senaryo analizi	Endonezya'da net sıfır emisyonla yönelik enerji geçişi için alternatif yolları ve düşük karbonlu enerji sisteminin potansiyelini incelemek

OECD ülkelerinin küme analizi ve CRITIC-COPRAS gibi yöntemlerle değerlendirildiği çalışmalar, ülkelerin yenilenebilir enerji performanslarının heterojen olduğunu ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada karbon yoğunluğu gibi göstergelerin de öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Enerji toplulukları gibi yerel geçiş süreçlerinin yönetiminde ise, MAMCA gibi katılımcı yöntemlerin, paydaş bakış açılarını anlama, sosyal temsili sağlama ve iletişimi güçlendirme konularında değerli bir metodoloji sunduğu belirtilmektedir. Son olarak, sürdürülebilir enerji yatırımlarının hızlandırılması için, proje geliştiricileri ile finansal kuruluşların önceliklerinin (teknik karmaşıklık, finansal durum, enerji piyasası dalgalanmaları, politika istikrarı vb.) AHP ile analiz edilmesi ve bu farklılıkların dikkate alındığı uyarlanabilir stratejiler geliştirilmesi önerilmektedir. Toplu olarak ele alındığında, bu literatür, enerji geçişinin başarısının, teknolojik potansiyelin optimizasyonunun yanı sıra, çok çeşitli teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal kriterlerin sistematik değerlendirilmesine, çok paydaşlı katılım mekanizmalarına ve yatırım kararlarını hızlandıracak politika çerçevelerine bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır ([1], [3], [9], [10], [13]-[15] [19], [21]).

Sonuç olarak gerçekleştirilen literatür taraması, LOPCOW, CRADIS ve CRITIC yöntemlerinin tekil kullanımına yönelik çalışmaların sınırlı olduğunu ve bütünsel kullanıma yönelik çalışmaların bulunmadığını göstermektedir. Bununla birlikte mevcut çalışmalar incelendiğinde, bu yöntemlerin karşılaştırmalı analizine, farklı karar problemlerinde birlikte uygulanmasına ve elde edilen sonuçların metodolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik önemli boşluklar bulunduğu görülmektedir.

Bu çalışma, söz konusu yöntemleri bütünsel bir çerçevede ele alarak hem yöntemler arası ilişkileri ortaya koymakta hem de uygulama bağlamında karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca nicel bir eksikliği değil, ayrıca literatürdeki metodolojik ve uygulamaya dönük boşluğu doldurarak özgün bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

IV. UYGULANAN YÖNTEMLER (METHODS APPLIED)

Bu çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesinde iki farklı nesnel yöntem kullanılmıştır. İlk aşamada LOPCOW yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmış ve CRADIS yöntemi ile alternatifler sıralanarak temel sonuç elde edilmiştir. İkinci aşamada, sonuçların doğrulanması amacıyla CRITIC yöntemi ile alternatif bir ağırlık seti oluşturulmuş ve CRADIS yöntemi tekrar

uygulanmıştır. Elde edilen sıralamalar karşılaştırılarak ağırlıklandırma yöntemlerinin karar sonuçları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Literatürde LOPCOW, CRADIS ve CRITIC yöntemlerinin hibrit ÇKKV çerçevesinde birlikte kullanımına yönelik çalışmalar oldukça sınırlı olup, mevcut araştırmaların önemli bir kısmı yöntemler arası etkileşimi ve sonuçların duyarlılığını yeterince tartışmamaktadır. Bu çalışma, yöntemleri bütünsel bir yaklaşımla ele alarak entegrasyon sürecini sistematik biçimde ortaya koymakta ve elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz ederek literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamaktadır.

A. LOPCOW

LOPCOW, logaritma kavramını temel alan nesnel bir ağırlık belirleme yöntemidir. Yöntemin öne çıkan başlıca avantajları şunlardır: uygulamasının basit ve etkili olması, ağırlıkların hesaplanmasında kriter türlerini dikkate alması, tercih dağılımlarındaki değer artışlarını ve varyasyonları dengelemek amacıyla logaritmik fonksiyonlardan yararlanması ve karar verme sürecinde kriter önceliklerinin daha net anlaşılmasını sağlayan, ayırt ediciliği yüksek ağırlıklar üretmesidir [24].

Ecer ve Pamucar tarafından 2022 yılında önerilen LOPCOW, etkili bir ağırlıklandırma yöntemidir. Kolay hesaplama süreci, negatif verileri kullanabilme yeteneği ve anlaşılabilir yapısı sayesinde kısa sürede araştırmacıların dikkatini çekmeyi başarmıştır. Bugüne kadar yöntem ve belirsiz uzantıları; mikro mobilite araçlarının sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesi, firma performansının analizi, tarımsal insansız hava aracı değerlendirmeleri, malzeme seçimi, teknoloji seçimi ve hisse senedi seçimi gibi pek çok zorlu karar verme probleminde uygulanmıştır [25]. LOPCOW, karar verme sürecinde belirli bir hiyerarşik yapı içinde değerlendirme kriterlerini önceliklendirmek amacıyla literatüre yakın zamanda kazandırılmış olup diğer nesnel ağırlıklandırma yöntemlerinden farklı olarak ham verilerdeki negatif değer sorununu ele alabilmekte ve ilgili kriterler arasındaki önceliklerde oluşabilecek önemli farklılıkları dengeleyebilmektedir. Ayrıca kriter türünün fayda ya da maliyet olmasından kaynaklanan etkileri ortadan kaldırarak her iki yapıdaki kriter kümeleri için uygun çözümler sunmakta ve veri yapısından doğan boyutsal farklılıkların giderilmesine katkı sağlamaktadır [26].

Bu çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesinde nesnel ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olan LOPCOW yöntemi kullanılmıştır. LOPCOW yöntemi, kriterlerin standart

sapmalarını ve alternatif sayısını dikkate alarak logaritmik yüzde değişim temelli bir yapı üzerinden kriter önem derecelerini belirlemektedir. Yöntem, yüksek varyasyon içeren karar matrislerinde kriterler arasındaki önem farklarını daha dengeli bir şekilde yansıtabilmektedir. Uygulama adımları aşağıda verilmiştir [24]-[30]:

1. Adım: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Başlangıç karar matrisi $\mathbf{X} = [x_{ij}]$ kriterlerin fayda ve maliyet özelliklerine göre normalize edilir. Eşitlik (1)'de fayda kriteri için kullanılan denklem sunulmaktadır. Eşitlik (2)'de ise maliyet kriterleri için kullanılan denklem sunulmaktadır:

$$r_{ij} = (x_{ij} - x_j^{\min}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}), \quad (1)$$

$$r_{ij} = (x_j^{\max} - x_{ij}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}), \quad (2)$$

burada x_{ij} , i alternatifi j kritere göre performans değerini temsil ederken $i = 1, 2, \dots, m$ alternatifleri, $j = 1, 2, \dots, n$ ise kriterleri göstermektedir.

2. Adım: Kriter Yüzde Değerlerinin (PV) Hesaplanması

Eşitlik (3)'te her bir kriter için yüzde değişim değeri hesaplama denklemi sunulmaktadır:

$$PV_j = \left| \ln \left(\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2 / m} / \sigma_j \right) \times 100 \right|, \quad (3)$$

burada m , alternatif sayısını; σ_j , kriterin standart sapmasını; r_{ij} ise normalize edilmiş değerleri göstermektedir.

3. Adım: Nihai Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Eşitlik (4)'te her bir kriterin ağırlığı hesaplama denklemi sunulmaktadır:

$$w_j = PV_j / \sum_{j=1}^n PV_j, \quad (4)$$

burada w_j , kriterin nihai ağırlığını göstermektedir ve $\sum w_j = 1$ koşulu sağlanmaktadır. Bu adım sonucunda kriter ağırlıkları elde edilerek CRADIS yönteminde kullanılmak üzere hazır hale getirilir.

B. CRADIS

Puşka ve arkadaşları tarafından 2022 yılında geliştirilen CRADIS yöntemi, öncelik sıralama düzeninin belirlenmesine yönelik yeni bir çerçeve olarak kabul edilmektedir. Yöntem başlangıçta yalnızca kesin tercih bilgileriyle çalışacak şekilde önerilmiş, daha sonra belirsiz ortamlarda da öncelik sıralama düzenini belirleyebilecek biçimde genişletilmiştir [31].

CRADIS yöntemi, MARCOS, TOPSIS ve ARAS yöntemlerinin güçlü yönlerini bir araya getiren bütünlük bir yaklaşımdır. Yöntem, farklı normalleştirme tekniklerinin kullanılmasına imkân tanıdığı gibi alternatif sapma hesaplama yöntemlerinin algoritmaya dâhil edilmesine de olanak sağlamaktadır. Ancak sahip olduğu potansiyele rağmen CRADIS yöntemi henüz yaygın biçimde kullanılmamaktadır. Bu yaklaşım, farklı yöntemlerin dezavantajlarını en aza indirmekle birlikte avantajlarından azami ölçüde yararlanmayı hedeflemektedir. CRADIS yönteminin ortaya çıkışı, tamamen yeni yöntemler geliştirmenin giderek zorlaştığı bir dönemde, ÇKKV prosedürlerinin geliştirilmesine yönelik yeni bakış açıları sunan yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [32].

Alternatiflerin değerlendirilmesi için CRADIS yöntemi kullanılmıştır. CRADIS yöntemi, alternatiflerin ideal ve anti-ideal çözümlerden olan uzaklıklarını dikkate alarak uzlaşma temelli bir sıralama sunmaktadır. Yöntem, mesafe tabanlı yaklaşımları birleştiren hibrit bir yapı sunmaktadır. CRADIS yöntemi adımları aşağıda verilmiştir [27]-[29], [31]-[33].

1. Adım: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Eşitlik (5) ve (6)'da sırasıyla fayda ve maliyet kriterleri için kullanılan denklemler sunulmaktadır:

$$n_{ij} = x_{ij} / x_j^{\max}, \quad (5)$$

$$n_{ij} = x_j^{\min} / x_{ij}. \quad (6)$$

2. Adım: Ağırlıklı Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması

Eşitlik (7)'de ağırlıklı normalize karar matrisinin oluşturulması için kullanılan denklem verilmektedir:

$$u_{ij} = w_j n_{ij}, \quad (7)$$

burada w_j , LOPCOW yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıklarıdır.

3. Adım: İdeal ve Anti-İdeal Çözümlerin Belirlenmesi

Eşitlik (8)'de ideal, anti-ideal çözüm denklemi sunulmaktadır:

$$t_j = \max(u_{ij}); \quad t_{aj} = \min(u_{ij}). \quad (8)$$

4. Adım: Sapma Değerlerinin Hesaplanması

Eşitlik (9)'da sapma değerlerinin hesaplanması için kullanılan denklem sunulmaktadır:

$$d_{ij}^+ = t_j - u_{ij}; \quad d_{ij}^- = u_{ij} - t_{aj}. \quad (9)$$

5. Adım: Toplam Sapmaların Hesaplanması

Eşitlik (10)'da toplam sapmaların hesaplanması için kullanılan denklem sunulmaktadır:

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^n d_{ij}^+; \quad s_i^- = \sum_{j=1}^n d_{ij}^-. \quad (10)$$

6. Adım: Fayda Fonksiyonlarının Hesaplanması

Eşitlik (11)'de fayda fonksiyonlarının hesaplanması için kullanılan denklem sunulmaktadır:

$$K_i^+ = s_0^+ / s_i^+; \quad K_i^- = s_i^- / s_0^-, \quad (11)$$

burada s_0^+ , ideal çözüme en yakın alternatifi sapma değerleridir. İdeal çözümden sapma toplamı, karar matrisindeki her bir alternatife ait değerlerin ideal çözüm değerinden olan farkının toplanmasıyla elde edilir. İdeal durumun kendisinden sapması sıfır olacağı için bu değer her zaman sabittir ve 0 olarak alınır. s_0^- , anti-ideal çözüme en uzak alternatifi sapma değerleridir. Alternatiflerin anti-ideal çözümden olabilecek en uzak (en başarılı) durumunu temsil eder. Anti-ideal sapma matrisindeki alternatiflere ait satır toplamalarının en büyüğü seçilerek bulunur.

7. Adım: Nihai Uzlaşma Skorunun Hesaplanması ve Sıralama

Eşitlik (12)'de nihai uzlaşma skorunun hesaplanması için kullanılan denklem sunulmaktadır:

$$Q_i = (K_i^+ + K_i^-) / 2. \quad (12)$$

En yüksek Q_i değerine sahip alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

C. CRITIC

Geleneksel CRITIC yöntemi, endeks ağırlıklarının hesaplanmasında yaygın biçimde kullanılan bir yaklaşım olmakla birlikte hibrit ÇKKV verilerinin taşıdığı karmaşıklık ve belirsizlik karşısında, yalnızca kriter öneminin ağırlıklar üzerindeki etkisini dikkate almasıyla önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır [34].

1995 yılında Diakoulaki ve arkadaşları tarafından önerilen CRITIC yöntemi, temelde kriterlerin ağırlıklarını belirlemede kullanılmakta ve niteliksel özellikler bazı niceliklerle değiştirilmektedir [35]. Bu yöntem, diğer kriterlerle daha yüksek düzeyde çatışma gösteren ya da daha düşük düzeyde gereksizliğe sahip olan kriterlere daha yüksek ağırlık verilmesini sağlar. Genel

olarak CRITIC yönteminin, kontrast yoğunluğu yüksek ve diğer kriterlerle daha belirgin çatışma içinde bulunan kriterlere daha fazla önem atfettiği söylenebilmektedir [36].

Bu çalışmada, LOPCOW tabanlı ana modele ek olarak sonuçların doğrulanması amacıyla nesnel ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olan CRITIC yöntemi kullanılmıştır. CRITIC yöntemi, kriterlerin hem varyasyon miktarını hem de kriterler arasındaki korelasyon ilişkilerini dikkate alarak her bir kriterin bilgi içeriğini ölçmektedir. Bu yönüyle CRITIC yöntemi, kriterler arasındaki çakışmaları ve bağımlılıkları göz önünde bulundurarak daha dengeli ağırlıklar üretmektedir. Bu tekniğin ana adımları aşağıdaki gibi açıklanabilir [34]-[36].

1. Adım: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Başlangıç karar matrisi $X = [x_{ij}]$, min-max normalizasyon yöntemi kullanılarak normalize edilir. Fayda ve maliyet kriterleri için sırasıyla (1) ve (2) eşitliklerinden faydalanılır. Bu durumda x_j^{min} kriter için minimum değeri ve x_j^{max} ise kriter için maksimum değeri tanımlar.

2. Adım: Kriterlerin Standart Sapmalarının Hesaplanması

Eşitlik (1) ve (2)'den faydalanarak her bir kriter için standart sapma değeri (15) ile hesaplanır:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}, \quad (13)$$

burada $\bar{r}_j$, kriterin ortalama normalize edilmiş değeri olup; m ise alternatif sayısıdır.

3. Adım: Kriterler Arası Korelasyon Katsayılarının Hesaplanması

Eşitlik (14)'de her iki kriter arasındaki doğrusal ilişki Pearson korelasyon katsayısı yardımıyla hesaplama denklemi sunulmaktadır:

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}}. \quad (14)$$

4. Adım: Kriter Bilgi İçeriklerinin Hesaplanması

Eşitlik (15)'de her bir kriter için bilgi içeriğinin hesaplama denklemi sunulmaktadır:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}), \quad (15)$$

burada σ_j , standart sapmayı; ρ_{jk} ise j ve k kriterleri arasındaki korelasyon katsayısını ifade etmektedir. Bu adımda, yüksek varyasyona sahip ve diğer kriterlerle düşük korelasyon gösteren kriterler daha yüksek bilgi içeriğine sahip olmaktadır.

5. Adım: Nihai Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Eşitlik (16)'da her bir kriterin ağırlığının normalize edilme denklemi sunulmaktadır:

$$w_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j, \quad (16)$$

burada w_j , nihai ağırlık olup; $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ koşulu sağlanmaktadır. Bu adım sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları, CRADIS yönteminde kullanılarak alternatiflerin sıralanmasında değerlendirilmiştir.

V. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu çalışmanın uygulama kısmı, Konya ilinde faaliyet gösteren ve metal ambalaj sektöründe önemli bir yere sahip olan bir üretim işletmesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 40 yıldır faaliyet gösteren işletme, tek tesis üzerinde üretim yapmakta ve yaklaşık 460 çalışanı ile kesintisiz üretim modelini sürdürmektedir. Firma, üretimini yaklaşık %60'ını Avrupa ülkelerine ihraç etmekte olup, uluslararası pazarda rekabet edebilmek için çevresel standartlara ve sürdürülebilirlik

kriterlerine büyük önem vermektedir. Firma GTIP kodları nedeniyle, özellikle son yıllarda Avrupa Birliği kaynaklı çevre politikaları ve karbon düzenlemeleri, işletmenin üretim anlayışını doğrudan etkilemektedir.

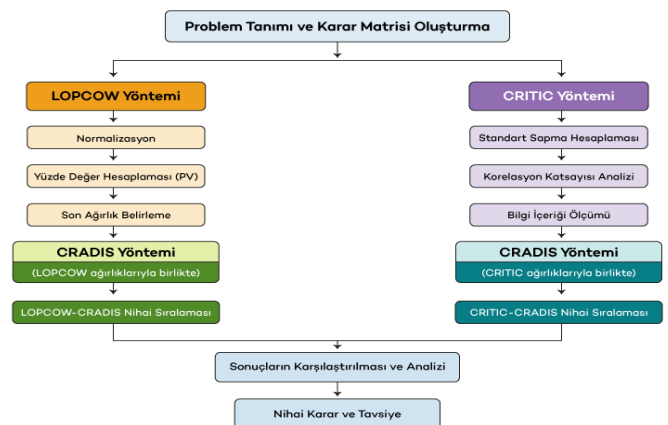
Bu gelişmeler doğrultusunda işletme, enerji verimliliği, çevre dostu üretim ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik uygulamalara yönelmiş; sürdürülebilirliği stratejik bir öncelik haline getirmiştir. Artan enerji maliyetleri ve rekabet baskısı, firmanın net-sıfır hedefleri kapsamında üretim ve enerji sistemlerini yeniden yapılandırmasını gerekli kılmaktadır. Bu süreçte işletme yönetimi, hangi dönüşüm yolunun izlenmesi gerektiğini belirlemek amacıyla kararlarını yalnızca deneyime dayalı olarak değil, analitik ve objektif yöntemlerle desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma, söz konusu ihtiyaca bilimsel bir çerçeveye sunmayı hedeflemektedir.

Uygulama aşamasında, ÇKKV probleminin çözümü amacıyla iki aşamalı ve karşılaştırmalı bir yaklaşım benimsenmiştir. İlk aşamada, kriter ağırlıklarının nesnel olarak belirlenebilmesi için LOPCOW ve CRITIC yöntemleri ayrı ayrı uygulanmıştır. LOPCOW yöntemi ile kriterlerin büyüklük ve dağılım özellikleri dikkate alınarak ağırlıklar elde edilirken, CRITIC yöntemi kapsamında kriterlerin değişkenlik düzeyleri ve birbirleriyle olan ilişkileri değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise her iki yöntemle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak CRADIS yöntemi aracılığıyla alternatiflerin sıralaması gerçekleştirilmiştir. Böylece farklı ağırlıklandırma yaklaşımlarının sonuçlar üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve elde edilen bulguların tutarlılığı incelenmiştir. Çalışmada ele alınan stratejik enerji dönüşüm alternatifleri, uluslararası enerji ajansları raporları ve endüstriyel karbonsuzlaşma literatüründe sıklıkla vurgulanan temel dönüşüm yolları esas alınarak belirlenmiştir [37]-[39].

Önerilen yaklaşım, Şekil 1'de akış şeması ile gösterilmektedir. Çalışmada 5 alternatif strateji, 5 ana kriter ve toplamda 16 alt kriter yer almaktadır. İlgili alternatifler şu şekilde yer almaktadır; S1: Enerji verimliliği (ekipman modernizasyonu), S2: Elektrifikasyon ağırlıklı dönüşüm, S3: Yenilenebilir enerji entegrasyonu, S4: Dijitalleşme & enerji yönetimi, S5: Hibrit dönüşüm (enerji verimliliği, elektrifikasyon, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve dijitalleşme bileşenlerinin ortak altyapı ve koordinasyon altında bütünleşik olarak uygulanması).

Kriter seti, net-sıfır hedefleri bağlamında enerji dönüşüm kararlarının çevresel, ekonomik, operasyonel, teknolojik ve politik boyutlarını bütüncül biçimde temsil edecek şekilde literatür araştırmalarına göre oluşturulmuştur. Tablo 2'de kriterler açıklanmış ve literatür araştırmasıyla da desteklenerek referansları sunulmuştur.

Şekil 2'de belirlenen kriterler gruplandırılarak gösterilmektedir. Karar matrisi, literatürde raporlanan endüstriyel uygulama



Şekil 1. Problem için önerilen akış şeması.

Figure 1. Proposed flowchart for the problem.

Tablo 2. Kriterler.

Table 2. Criteria.

Kriter	Açıklama	Literatür Dayanağı
C1 – Emisyon Azaltım Potansiyeli	Uygulanan stratejinin yıllık toplam CO ₂ emisyonlarını azaltma kapasitesi	[37], [40]
C2 – Emisyon Azaltım Hızı	Stratejinin kısa ve orta vadede emisyon azaltımı sağlama hızı	[41], [42]
C3 – Net-Sıfır Uyum Seviyesi	Stratejinin uzun vadeli net-sıfır hedefleriyle stratejik uyum derecesi	[37], [40]
C4 – Başlangıç Yatırım Maliyeti (Capex)	Stratejinin uygulanması için gereken ilk yatırım maliyeti	[43], [44]
C5 – Yaşam Döngüsü Maliyeti (Lcc)	Yatırımın tüm ömrü boyunca oluşan toplam maliyet	[45], [46]
C6 – Geri Ödeme Süresi	Yatırım maliyetinin geri kazanılması için gereken süre	[43], [44]
C7 – Finansal Sürdürülebilirlik	Stratejinin uzun vadede ekonomik olarak sürdürülebilirliği	[43], [47]
C8 – Uygulama Süresi	Stratejinin tam olarak hayata geçirilmesi için gereken süre	[47], [48]
C9 – Üretim Kesintisi Riski	Uygulama sürecinde üretimde yaşanabilecek aksama riski	[47], [48]
C10 – Sistem Karmaşıklık	Stratejinin teknik ve yönetsel açıdan uygulanma zorluk seviyesi	[47]
C11 – Ölçeklenebilirlik	Stratejinin farklı tesislere veya üretim hatlarına uygulanabilme potansiyeli	[39], [49]
C12 – Teknoloji Olgunluk Seviyesi	Kullanılan teknolojilerin ticarî ve teknik olgunluk seviyesi	[41], [50]
C13 – Esneklik	Stratejinin farklı üretim senaryolarına ve talep değişimlerine uyum yeteneği	[49]
C14 – Regülasyon Uyumu	Stratejinin mevcut ve gelecekteki çevre ve enerji mevzuatına uyum derecesi	[41], [52]
C15 – Karbon Fiyatlandırmasına Duyarlılık	Karbon fiyatlarının artması durumunda stratejinin sağladığı ekonomik avantaj	[51], [52]
C16 – Politika Belirsizliği Riski	İklim ve enerji politikalarındaki belirsizliklerin strateji üzerindeki olası etkisi	[51], [53]

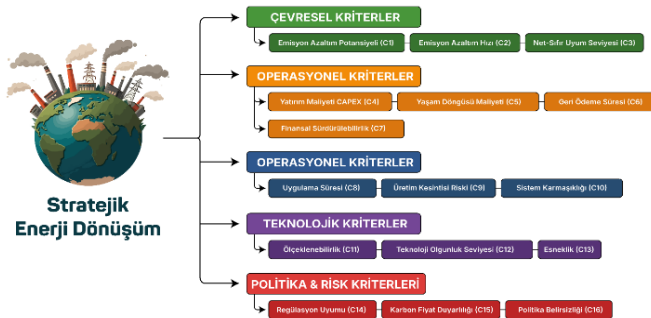
aralıkları ile uzman görüşlerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda aritmetik ortalama yöntemiyle oluşturulmuştur. Bu kapsamda, enerji sektöründe faaliyet gösteren endüstriyel işletmelere danışmanlık yapan ve alanında en az 3 yıl deneyime sahip beş uzmandan veri toplanmıştır. Veri toplama sürecinde verisi toplanan firmanın kendi çalışanlarından çevre mühendisi ve kalite sorumlusu da yardımcı olmuştur. Uzmanların meslek ve tecrübe bilgileri aşağıda verilmiştir.

- *Uzman 1:* Makine Mühendisi, 7 yıl deneyim, karbon ayak izi hesaplama ve raporlama alanında çalışmaktadır.
- *Uzman 2:* Enerji Sistemleri Mühendisi, 9 yıl deneyim, yeşil dönüşüm ve sürdürülebilirlik alanında çalışmaktadır.
- *Uzman 3:* Endüstri Mühendisi, 11 yıl deneyim, yatırım danışmanlığı alanında çalışmaktadır.
- *Uzman 4:* Enerji Sistemleri Mühendisi, 3 yıl deneyim, yeşil dönüşüm ve sürdürülebilirlik alanında çalışmaktadır.
- *Uzman 5:* Çevre Mühendisi, 19 yıl deneyim, çevre uzmanı olarak sanayi alanında çalışmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, belirli bir işletme için tekil bir en uygun çözüm önermekten ziyade, net-sıfır hedefleri çerçevesinde ele alınan stratejik enerji dönüşüm alternatiflerinin göreceli önceliklerini karşılaştırmalı bir bakış açısıyla ortaya koymaktır. Bu çalışmada kullanılan karar kriterleri fayda ve maliyet kriterleri olarak iki gruba ayrılmıştır. Fayda kriterleri, değeri arttıkça tercih edilirliliği artıran çevresel, stratejik ve regülasyon uyumunu temsil eden göstergelerden oluşurken; maliyet kriterleri yatırım maliyeti, uygulama süresi, operasyonel riskler ve politika belirsizliği gibi minimize edilmesi gereken unsurları içermektedir.

Kriterlerin farklı ölçüm birimlerine sahip olması nedeniyle, değerlendirme sürecinde nicel ve nitel göstergeler birlikte kullanılmıştır. Bu kapsamda kriterler, ölçüm yapısına göre üç ana grupta ele alınmıştır.

Net-Sıfır Stratejileri İçin Kriter Grupları



Şekil 2. Kriter grupları.

Figure 2. Criteria groups.

Emisyon azaltım potansiyeli (C1) kriteri, alternatiflerin yıllık karbon azaltım miktarını ifade etmekte olup ton CO₂ eşdeğeri cinsinden değerlendirilmiştir. Bu nedenle karar matrisinde C1 kriterine ait değerler mutlak sayısal büyüklükler şeklinde yer almaktadır. Başlangıç yatırım maliyeti (C4), yaşam döngüsü maliyeti (C5), geri ödeme süresi (C6), uygulama süresi (C8) ve üretim kesintisi riski (C9) gibi kriterler, işletmenin mali kayıtları ve geçmiş proje verileri dikkate alınarak parasal değerler, yıl/ay bazlı süreler veya tahmini risk süreleri şeklinde belirlenmiştir. Emisyon azaltım hızı (C2), net-sıfır uyum seviyesi (C3), finansal sürdürülebilirlik (C7), sistem karmaşıklık (C10), ölçeklenebilirlik (C11), esneklik (C13), regülasyon uyumu (C14), karbon fiyatlandırmasına duyarlılık (C15) ve politika belirsizliği riski (C16) gibi nitel ağırlıklı kriterler ise uzman değerlendirmelerine dayalı olarak 0–1 aralığında normalize edilmiş puanlama sistemi ile ölçülmüştür. Bu ölçekte, 0 değeri en düşük, 1 değeri ise en yüksek performans düzeyini ifade etmektedir. Teknoloji olgunluk seviyesi (C12) ise dijital dönüşüm seviyesi referans alınarak 0-1 ölçeğinden farklı olarak 1–9 arası değerlendirilmiştir.

A. LOPCOW uygulama (LOPCOW application)

Bu bağlamda alınan beş uzman görüşünün aritmetik ortalamasıyla ile oluşturulan karar matrisi Tablo 3'te sunulmaktadır. Çalışmada öncelikle LOPCOW yöntemi uygulanmaktadır ve aşağıda aşamaları sunulmaktadır.

Tablo 4'te normalize edilmiş karar matrisi sunulmaktadır. Ardından kriter yüzde değerlerinin (PV) hesaplanmasına geçilmiştir. Bu kapsamda her bir kriter için aritmetik ortalama, standart sapma ve karekök ortalama (RMS) değerleri sırasıyla hesaplanmıştır. Elde edilen bu istatistiksel göstergeler kullanılarak kriterlerin göreceli önem düzeyleri belirlenmiş ve yüzde değerleri oluşturulmuştur. Hesaplanan PV değerleri, Tablo 5'te sunulmuş olup, ağırlıklandırma sürecinde girdi olarak kullanılmıştır. Hesaplanan kriter yüzde değerlerinin toplamı 807.66 olarak bulunmuştur. Her bir kriterin yüzde değeri, bu toplam değere bölünerek normalize edilmiş ve Tablo 6'da LOPCOW yöntemi kapsamında elde edilen kriter ağırlıkları sunulmuştur.

B. LOPCOW-CRADIS uygulama (LOPCOW-CRADIS application)

CRADIS yöntemi ile oluşturulan normalize edilmiş değerler Tablo 7'de verilmiştir. Normalize matrisi, LOPCOW yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı normalize matrisi Tablo 8'de oluşturulmuştur. Ağırlıklı normalize karar matrisinin maksimum ve minimum değerleri alınarak ideal ve anti ideal değerler Tablo 9'da verilmiştir.

Ağırlıklı normalize değerler ideal değerler çıkarılarak ideal çözümden sapmalar elde edilmiş, anti ideal değerlerden ağırlıklı normalize değerler çıkarılarak anti ideal çözümden sapmalar Tablo 10'da elde edilmiştir.

Tablo 3. Karar matrisi.**Table 3.** Decision matrix.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	1200	0.65	0.7	1.8	4.5	3.2	0.75	12	10	2	0.7	9	0.65	0.7	0.6	0.3
S2	1800	0.75	0.8	3	5.8	5.5	0.7	24	20	4	0.8	7	0.75	0.8	0.75	0.35
S3	2500	0.85	0.9	4.2	6.2	6.8	0.72	18	15	3	0.85	8	0.7	0.9	0.85	0.25
S4	900	0.6	0.65	1.2	3.9	2.8	0.8	9	5	2	0.75	9	0.85	0.75	0.65	0.3
S5	3200	0.95	0.95	5	6	6	0.85	30	25	5	0.95	8	0.9	0.95	0.9	0.2

Tablo 4. Karar matrisi normalizasyonu.**Table 4.** Decision matrix normalization.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.13	0.14	0.17	0.84	0.74	0.90	0.33	0.86	0.75	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.33
S2	0.39	0.43	0.50	0.53	0.17	0.33	0.00	0.29	0.25	0.33	0.40	0.00	0.40	0.40	0.50	0.00
S3	0.70	0.71	0.83	0.21	0.00	0.00	0.13	0.57	0.50	0.67	0.60	0.50	0.20	0.80	0.83	0.67
S4	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.67	1.00	1.00	1.00	0.20	1.00	0.80	0.20	0.17	0.33
S5	1.00	1.00	1.00	0.00	0.09	0.20	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00

Tablo 5. Kriter yüzde değerlerinin (PV) hesaplanması.**Table 5.** Calculation of criterion percentage values (PV).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Ortalama	0.44	0.46	0.50	0.52	0.40	0.49	0.43	0.54	0.50	0.60	0.44	0.60	0.48	0.48	0.50	0.47
Std	0.37	0.37	0.38	0.37	0.40	0.39	0.36	0.37	0.35	0.39	0.34	0.37	0.37	0.37	0.38	0.34
RMS	0.58	0.59	0.63	0.64	0.56	0.63	0.56	0.65	0.61	0.71	0.56	0.71	0.61	0.61	0.63	0.58
PV	45.13	47.02	50.23	53.23	35.16	45.99	43.20	58.18	54.93	60.93	48.45	63.65	49.19	49.19	50.23	52.97

Std: Standart sapma

Tablo 6. Nihai kriter ağırlıklarının hesaplanması.**Table 6.** Calculation of final criterion weights.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
W _j	0.056	0.058	0.062	0.066	0.044	0.057	0.053	0.072	0.068	0.075	0.060	0.079	0.061	0.060	0.062	0.066

Tablo 7. Normalizasyon.**Table 7.** Normalization.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.375	0.684	0.737	0.667	0.867	0.875	0.882	0.750	0.500	1.000	0.737	1.000	0.722	0.737	0.667	0.667
S2	0.563	0.789	0.842	0.400	0.672	0.509	0.824	0.375	0.250	0.500	0.842	0.778	0.833	0.842	0.833	0.571
S3	0.781	0.895	0.947	0.286	0.629	0.412	0.847	0.500	0.333	0.667	0.895	0.889	0.778	0.947	0.944	0.800
S4	0.281	0.632	0.684	1.000	1.000	1.000	0.941	1.000	1.000	1.000	0.789	1.000	0.944	0.789	0.722	0.667
S5	1.000	1.000	1.000	0.240	0.650	0.467	1.000	0.300	0.200	0.400	1.000	0.889	1.000	1.000	1.000	1.000

Tablo 8. Ağırlıklı normalize karar matrisi.**Table 8.** Weighted normalized decision matrix.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.021	0.040	0.046	0.044	0.038	0.050	0.047	0.054	0.034	0.075	0.044	0.079	0.044	0.045	0.041	0.044
S2	0.031	0.046	0.052	0.026	0.029	0.029	0.044	0.027	0.017	0.038	0.051	0.061	0.051	0.051	0.052	0.037
S3	0.044	0.052	0.059	0.019	0.027	0.023	0.045	0.036	0.023	0.050	0.054	0.070	0.047	0.058	0.059	0.052
S4	0.016	0.037	0.043	0.066	0.044	0.057	0.050	0.072	0.068	0.075	0.047	0.079	0.058	0.048	0.045	0.044
S5	0.056	0.058	0.062	0.016	0.028	0.027	0.053	0.022	0.014	0.030	0.060	0.070	0.061	0.061	0.062	0.066

Tablo 9. İdeal ve anti ideal değerler.**Table 9.** Ideal and anti-ideal values.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
İdeal	0.056	0.058	0.062	0.066	0.044	0.057	0.053	0.072	0.068	0.075	0.060	0.079	0.061	0.061	0.062	0.066
Anti ideal	0.016	0.037	0.043	0.016	0.027	0.023	0.044	0.022	0.014	0.030	0.044	0.061	0.044	0.045	0.041	0.037

Tablo 10. İdeal çözümden sapmalar ve anti ideal çözümden sapmalar.**Table 10.** Deviations from the ideal solution and deviations from the anti-ideal solution.

İdeal Çözümünden Sapmalar																
Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
S2	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.03	0.01	0.05	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03
S3	0.01	0.01	0.00	0.05	0.02	0.03	0.01	0.04	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
S4	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02
S5	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.00	0.05	0.05	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Anti İdeal Çözümünden Sapmalar																
Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
S2	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
S3	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
S4	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.01	0.05	0.05	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
S5	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03

Elde edilen sapma matrisleri kullanılarak her bir alternatif için ideal çözüme olan toplam sapma ve anti-ideal çözüme olan toplam sapma değerleri satır bazında toplanarak hesaplanmıştır (Tablo 11). Eş zamanlı olarak, sistemin erişebileceği en başarılı ve en başarısız durumları temsil eden optimal üst ve alt sınır değerleri de belirlenmiştir. Ardından, alternatiflerin toplam sapma değerleri bu optimal sınırlara oranlanarak her bir alternatif için ideal çözüme göre fayda fonksiyonu ve anti-ideal çözüme göre fayda fonksiyonu katsayıları türetilmiştir.

Yöntemin son adımında ise, her alternatifin sahip olduğu bu iki farklı fayda fonksiyonu değerinin aritmetik ortalaması alınarak nihai uzlaşma skorları hesaplanarak Tablo 12’de verilmiştir. Elde edilen nihai uzlaşma skorları büyükten küçüğe doğru dizilerek alternatiflerin başarı sıralaması oluşturulmuş ve en yüksek skora sahip olan alternatif en optimal seçenek olarak belirlenmiştir.

C. CRITIC uygulama (CRITIC application)

İkinci aşama olan CRITIC ile alternatiflerin elde edilmesi çerçevesinde kriterler arası çelişki düzeyini belirlemek amacıyla, normalize edilmiş karar matrisi kullanılarak kriterler arasında Pearson korelasyon katsayılarından oluşan korelasyon matrisi oluşturulmuştur (Tablo 13).

Normalize edilmiş karar matrisi üzerinden hesaplanan kriter standart sapmaları ile kriterler arası korelasyonlardan elde edilen çelişki ölçüleriyle kriter bilgi içerikleri hesaplanmış ve bu

değerler normalize edilerek CRITIC kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Tablo 14’te kriter ağırlıkları verilmektedir. LOPCOW yöntemi sonuçlarına göre en yüksek ağırlık değerleri C12 (0.0788) ve C10 (0.0754) kriterlerinde elde edilirken, en düşük ağırlık C5 (0.0435) kriterine aittir. Bu sonuçlar, enerji dönüşüm stratejilerinin değerlendirilmesinde teknoloji olgunluğu ve ilgili performans göstergelerinin karar sürecinde daha belirleyici rol oynadığını göstermektedir. CRITIC yöntemi sonuçlarında ise C4 (0.0735) ve C10 (0.0729) kriterleri en yüksek ağırlıklara sahip olurken, C16 (0.0477) en düşük ağırlık değerini almıştır. Her iki yöntemde de kriter ağırlıkları belirli farklılıklar gösterse de ağırlıkların aşırı şekilde yoğunlaşmaması, karar probleminin çok boyutlu yapısını yansıtmakta ve bir kriterin diğer tüm kriterlere baskın hale gelmediğini göstermektedir.

D. CRITIC-CRADIS uygulama (CRITIC-CRADIS application)

CRITIC kriter ağırlıkları elde edildikten sonra CRADIS yöntemiyle hesaplama yapılmıştır. Normalize matrisi, CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı normalize matrisi Tablo 15’te verilmiştir. Ağırlıklı normalize karar matrisinin maksimum ve minimum değerleri alınarak ideal ve anti ideal değerler Tablo 16’da verilmiştir. İdeal çözümden sapmalar ve anti ideal çözümden sapmalar Tablo 17’de elde edilmiştir. Toplam sapma değerleri Tablo 18’te verilmiştir. Son aşamada, CRADIS skorları elde edilmiş ve skorlar esas alınarak alternatiflerin nihai sıralaması Tablo 19’da belirlenmiştir.

Tablo 11. Toplam sapma.

Table 11. Total deviation.

Alternatif	Toplam	K_i^+	Alternatif	Toplam	K_i^-
S1	0.25	0.287	S1	0.20	0.664
S2	0.36	0.000	S2	0.10	0.326
S3	0.28	0.211	S3	0.17	0.574
S4	0.15	0.573	S4	0.30	1.000
S5	0.25	0.286	S5	0.20	0.663
S_0^+	0.00		S_0^-	0.30	
S_n^+	0.36		S_n^-	0.00	

Tablo 12. Alternatiflerin skorları.

Table 12. Scores of the alternatives.

Alternatif	Skor	Sıra
S1	0.4758	2
S2	0.1631	5
S3	0.3927	4
S4	0.7864	1
S5	0.4747	3

Tablo 13. Korelasyon.

Table 13. Correlation.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
C1	1.00	1.00	0.99	-0.99	-0.88	-0.87	0.29	-0.87	-0.87	-0.85	0.95	-0.51	0.34	0.95	0.96	0.76
C2	1.00	1.00	0.99	-1.00	-0.89	-0.89	0.25	-0.88	-0.88	-0.86	0.94	-0.54	0.32	0.95	0.96	0.74
C3	0.99	0.99	1.00	-1.00	-0.93	-0.93	0.14	-0.86	-0.87	-0.83	0.92	-0.59	0.24	0.95	0.96	0.69
C4	-0.99	-1.00	-1.00	1.00	0.92	0.92	-0.18	0.87	0.88	0.84	-0.93	0.57	-0.27	-0.95	-0.96	-0.71
C5	-0.88	-0.89	-0.93	0.92	1.00	0.98	0.20	0.82	0.85	0.78	-0.77	0.79	0.00	-0.82	-0.88	-0.40
C6	-0.87	-0.89	-0.93	0.92	0.98	1.00	0.18	0.76	0.78	0.72	-0.79	0.74	-0.05	-0.87	-0.91	-0.44
C7	0.29	0.25	0.14	-0.18	0.20	0.18	1.00	-0.19	-0.13	-0.27	0.44	0.42	0.79	0.32	0.22	0.69
C8	-0.87	-0.88	-0.86	0.87	0.82	0.76	-0.19	1.00	0.99	0.99	-0.85	0.75	-0.40	-0.78	-0.82	-0.43
C9	-0.87	-0.88	-0.87	0.88	0.85	0.78	-0.13	0.99	1.00	0.97	-0.82	0.76	-0.30	-0.76	-0.81	-0.42
C10	-0.85	-0.86	-0.83	0.84	0.78	0.72	-0.27	0.99	0.97	1.00	-0.88	0.73	-0.52	-0.80	-0.83	-0.44
C11	0.95	0.94	0.92	-0.93	-0.77	-0.79	0.44	-0.85	-0.82	-0.88	1.00	-0.50	0.60	0.98	0.97	0.75
C12	-0.51	-0.54	-0.59	0.57	0.79	0.74	0.42	0.75	0.76	0.73	-0.50	1.00	-0.06	-0.49	-0.59	0.16
C13	0.34	0.32	0.24	-0.27	0.00	-0.05	0.79	-0.40	-0.30	-0.52	0.60	-0.06	1.00	0.48	0.43	0.44
C14	0.95	0.95	0.95	-0.95	-0.82	-0.87	0.32	-0.78	-0.76	-0.80	0.98	-0.49	0.48	1.00	0.99	0.76
C15	0.96	0.96	0.96	-0.96	-0.88	-0.91	0.22	-0.82	-0.81	-0.83	0.97	-0.59	0.43	0.99	1.00	0.69
C16	0.76	0.74	0.69	-0.71	-0.40	-0.44	0.69	-0.43	-0.42	-0.44	0.75	0.16	0.44	0.76	0.69	1.00

Tablo 14. Kriter ağırlıkları.

Table 14. Criterion weights.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
I_j	5.35	5.41	5.74	6.36	6.03	6.19	4.30	5.82	5.53	6.31	4.81	5.00	4.81	5.23	5.55	4.13
W_j	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05

Tablo 15. Ağırlıklı normalize karar matrisi.

Table 15. Weighted normalized decision matrix.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.023	0.043	0.049	0.049	0.060	0.063	0.044	0.050	0.032	0.073	0.041	0.058	0.040	0.044	0.043	0.032
S2	0.035	0.049	0.056	0.029	0.047	0.036	0.041	0.025	0.016	0.036	0.047	0.045	0.046	0.051	0.053	0.027
S3	0.048	0.056	0.063	0.021	0.044	0.029	0.042	0.034	0.021	0.049	0.050	0.051	0.043	0.057	0.061	0.038
S4	0.017	0.039	0.045	0.073	0.070	0.071	0.047	0.067	0.064	0.073	0.044	0.058	0.052	0.048	0.046	0.032
S5	0.062	0.062	0.066	0.018	0.045	0.033	0.050	0.020	0.013	0.029	0.056	0.051	0.056	0.060	0.064	0.048

Tablo 16. İdeal ve anti ideal değerler.

Table 16. Ideal and anti-ideal values.

Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
İdeal	0.062	0.062	0.066	0.073	0.070	0.071	0.050	0.067	0.064	0.073	0.056	0.058	0.056	0.060	0.064	0.048
Anti ideal	0.017	0.039	0.045	0.018	0.044	0.029	0.041	0.020	0.013	0.029	0.041	0.045	0.040	0.044	0.043	0.027

Tablo 17. İdeal çözümden sapmalar ve anti ideal çözümden sapmalar.

Table 17. Deviations from the ideal solution and deviations from the anti-ideal solution.

İdeal Çözümünden Sapmalar																
Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
S2	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02	0.04	0.01	0.04	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
S3	0.01	0.01	0.00	0.05	0.03	0.04	0.01	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
S4	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02
S5	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.04	0.00	0.05	0.05	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Anti İdeal Çözümünden Sapmalar																
Alternatif	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
S1	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.03	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
S2	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
S3	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
S4	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.04	0.01	0.05	0.05	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
S5	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02

Tablo 18. Toplam sapma.

Table 18. Total deviation.

Alternatif	Toplam	K_i^+	Alternatif	Toplam	K_i^-
S1	0.26	0.286	S1	0.21	0.666
S2	0.36	0.000	S2	0.10	0.335
S3	0.29	0.185	S3	0.17	0.548
S4	0.15	0.575	S4	0.31	1.000
S5	0.27	0.258	S5	0.20	0.633
S_0^+	0.00		S_0^-	0.31	
S_n^+	0.36		S_n^-	0.00	

Tablo 19. Alternatiflerin skorları.

Table 19. Scores of the alternatives.

Alternatif	Skor	Sıra
S1	0.4763	2
S2	0.1674	5
S3	0.3666	4
S4	0.7877	1
S5	0.4456	3

Tablo 20'de LOPCOW-CRADIS ve CRITIC-CRADIS uygulama sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki yaklaşımda da alternatiflerin aynı sırayla derecelendirildiğini göstermektedir. Buna göre stratejik dönüşüm alternatiflerinin öncelik sıralaması; S4, S1, S5, S3 ve S2 şeklinde belirlenmiştir. Her iki yöntemin tutarlı sonuçlar üretmesi, elde edilen bulguların güvenilirliğini ve sağlamlığını artırmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, incelenen işletmenin net-sıfır hedeflerine yönelik dönüşüm sürecinin planlanmasında karar

vericilere sistematik bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Özellikle farklı maliyet, risk ve teknik gerekliliklere sahip stratejik alternatiflerin çok kriterli karar verme yöntemleri aracılığıyla birlikte değerlendirilmesi, yatırım önceliklerinin daha tutarlı biçimde belirlenmesine imkân sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek performansı gösteren alternatif, dijitalleşme ve enerji yönetimi stratejisini temsil eden S4 olmuştur. Bu durum, enerji dönüşüm süreçlerinde yalnızca teknolojik değişimlerin değil, aynı zamanda enerji kullanımının

Tablo 20. Yöntemlerin karşılaştırılması.

Table 20. Comparison of methods.

Alternatif/Yöntem	LOPCOW-CRADIS	CRITIC-CRADIS
S1	2	2
S2	5	5
S3	4	4
S4	1	1
S5	3	3

izlenmesi, analiz edilmesi ve etkin şekilde yönetilmesinin de önemli olduğunu göstermektedir. Dijital izleme sistemleri, gerçek zamanlı veri analizi, akıllı kontrol mekanizmaları ve enerji yönetim uygulamaları sayesinde mevcut kaynakların daha verimli kullanılabilmesi, bu stratejinin diğer alternatiflere kıyasla daha yüksek performans göstermesinde etkili olmuştur. İkinci sırada yer alan S1 stratejisi, enerji verimliliği odaklı ekipman modernizasyonunu içermektedir. Mevcut ekipmanların daha verimli teknolojilerle değiştirilmesi veya iyileştirilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve operasyonel performansın artırılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sonuca göre, enerji dönüşüm süreçlerinde öncelikle mevcut sistemlerin verimliliğinin artırılması, etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Üçüncü sırada yer alan hibrit dönüşüm stratejisi (S5), enerji verimliliği, elektrifikasyon, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve dijitalleşme bileşenlerini bir araya getiren kapsamlı bir dönüşüm yaklaşımını temsil etmektedir. Stratejinin üst sıralarda yer alması, bütüncül dönüşüm uygulamalarının önemli faydalar sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, farklı uygulamaların eş zamanlı olarak hayata geçirilmesini gerektirmesi nedeniyle ortaya çıkan yatırım maliyetleri, uygulama karmaşıklığı ve yönetim gereksinimleri, stratejinin ilk iki alternatifin gerisinde kalmasına neden olmuş olabilir. Dördüncü sırada yer alan S3 stratejisi, yenilenebilir enerji entegrasyonuna dayalıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemlerine entegre edilmesi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak bu tür uygulamaların yüksek başlangıç yatırımı gerektirmesi, teknik altyapı ihtiyaçları ve kaynak sürekliliğine ilişkin belirsizlikler nedeniyle diğer bazı stratejilere kıyasla daha düşük performans göstermiş olabileceği değerlendirilmektedir. Son sırada yer alan S2 stratejisi ise elektrifikasyon ağırlıklı dönüşümdür. Elektrifikasyon, fosil yakıt bağımlılığının azaltılması ve düşük karbonlu enerji sistemlerine geçiş açısından önemli bir araç olmakla birlikte, mevcut altyapının uyum gereksinimleri, yüksek yatırım maliyetleri ve enerji arzına ilişkin teknik gereklilikler nedeniyle değerlendirilen alternatifler arasında görece düşük performans göstermiştir. Bu sonuç, elektrifikasyonun tek başına uygulanmasından ziyade diğer dönüşüm stratejileriyle birlikte değerlendirilmesinin daha etkili sonuçlar doğurabileceğine işaret etmektedir.

Çalışmada kullanılan bütünlük ÇKKV modeli, metal ambalaj üretimi yapan işletme yönetiminin farklı senaryolar altında alternatif stratejileri yeniden değerlendirebilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle model, değişen enerji maliyetleri,

regülasyon koşulları ve piyasa dinamikleri karşısında stratejik kararların güncellenmesini destekleyen esnek bir karar destek aracı sunmaktadır. Son olarak, geliştirilen değerlendirme çerçevesi, metal ambalaj üretimi yapan işletmenin enerji dönüşüm sürecinde kaynak tahsisi, yatırım zamanlaması ve risk yönetimi gibi temel yönetsel süreçlerin daha analitik bir temele dayandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, karar alma sürecinin kurumsallaşmasını desteklemekte ve uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir yönetim yaklaşımının geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

E. Duyarlılık analizi (Sensitivity analysis)

Verilerde gerçekleştirilen belirli değişikliklerin çözüm üzerindeki etkisini ortaya koymak ve modelin kararlılığını değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizine başvurulmuştur. Değerlendirme kriterlerine uygulanan farklı ağırlıklandırma senaryoları, ayrıntılı bir duyarlılık analizi kapsamında incelenmiş ve bu süreç, önerilen karar verme çerçevesinin sağlamlığının doğrulanmasına imkân tanımıştır.

1. LOPCOW-CRADIS duyarlılık analizi (LOPCOW-CRADIS sensitivity analysis)

En yüksek ağırlık değerine sahip olan C12 ve C10'un %5 artırılıp azaltılarak oluşturulan yeniden hesaplanan LOPCOW ağırlıkları Tablo 21'de, CRADIS sonuçları ise Tablo 22'de verilmiştir.

2. CRITIC-CRADIS duyarlılık analizi (CRITIC-CRADIS sensitivity analysis)

En yüksek ağırlık değerine sahip olan C4 ve C10'un %5 artırılıp azaltılarak oluşturulan yeniden hesaplanan CRITIC ağırlıkları Tablo 23'te, CRADIS sonuçları ise Tablo 24'te verilmiştir. Elde edilen sonuç sıralaması Tablo 25'te verilmiştir. Bu sıralama sonuçlarının uyumluluğunu değerlendirmek için Tablo 26'da Spearman sıra korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Korelasyon katsayısının 1 olması, sıralamaların uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Yapılan $\pm 5\%$ ağırlık değişimlerinin alternatif skorları üzerinde yalnızca sınırlı etkiler oluşturduğu ve nihai sıralamada herhangi bir değişime yol açmadığı gözlenmiştir. Bu durum, karar modelinin kriter ağırlıklarındaki küçük değişimlere karşı yüksek düzeyde kararlı olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, alternatiflerin görece performansları yalnızca belirli bir kriterin ağırlığına bağlı olarak şekillenmemekte, tüm kriterlerin ortak etkisi altında oluşmaktadır. Özellikle en yüksek ağırlığa sahip kriterlerdeki değişikliklere rağmen S4 alternatifinin her

Tablo 21. Yeniden hesaplanan LOPCOW ağırlıkları.

Table 21. Recalculated LOPCOW weights.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
C12 %5 +	0.0556	0.0580	0.0619	0.0656	0.0433	0.0567	0.0533	0.0717	0.0677	0.0751	0.0597	0.0827	0.0606	0.0606	0.0619	0.0653
C12 %5 -	0.0561	0.0585	0.0625	0.0662	0.0437	0.0572	0.0537	0.0723	0.0683	0.0758	0.0602	0.0749	0.0612	0.0612	0.0625	0.0659
C10 %5 +	0.0557	0.0580	0.0619	0.0656	0.0434	0.0567	0.0533	0.0717	0.0677	0.0792	0.0597	0.0785	0.0607	0.0607	0.0619	0.0653
C10 %5 -	0.0561	0.0585	0.0624	0.0662	0.0437	0.0572	0.0537	0.0723	0.0683	0.0717	0.0602	0.0791	0.0611	0.0611	0.0624	0.0659

Tablo 22. Yeniden hesaplanan CRADIS sonuçları.

Table 22. Recalculated CRADIS results.

Alternatif	Skor	Sıra	Skor (C12 %5 +)	Sıra	Skor (C12 %5 -)	Sıra	Skor (C10 %5 +)	Sıra	Skor (C10 %5 -)	Sıra
S1	0.4758	2	0.4773	2	0.4743	3	0.4792	2	0.4724	3
S2	0.1631	5	0.1626	5	0.1636	5	0.1624	5	0.1637	5
S3	0.3927	4	0.3930	4	0.3925	4	0.3926	4	0.3929	4
S4	0.7864	1	0.7870	1	0.7858	1	0.7876	1	0.7852	1
S5	0.4747	3	0.4747	3	0.4747	2	0.4707	3	0.4788	2

Tablo 23. Yeniden hesaplanan CRITIC ağırlıkları.

Table 23. Recalculated CRITIC weights.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
C4+	0.0616	0.0622	0.0661	0.0771	0.0693	0.0712	0.0495	0.0669	0.0636	0.0726	0.0554	0.0575	0.0553	0.0601	0.0639	0.0475
C4-	0.0621	0.0627	0.0667	0.0698	0.0699	0.0717	0.0499	0.0675	0.0641	0.0732	0.0558	0.0580	0.0558	0.0606	0.0644	0.0479
C10+	0.0616	0.0622	0.0661	0.0732	0.0693	0.0712	0.0495	0.0669	0.0636	0.0765	0.0554	0.0575	0.0553	0.0601	0.0639	0.0475
C10-	0.0621	0.0627	0.0667	0.0738	0.0699	0.0717	0.0499	0.0675	0.0641	0.0692	0.0558	0.0580	0.0558	0.0606	0.0644	0.0479

Tablo 24. Yeniden hesaplanan CRADIS sonuçları.**Table 24.** Recalculated CRADIS results.

Alternatif	Skor	Skor (C4 %5+)	Skor (C4 %5 -)	Skor (C10 %5 +)	Skor (C10 %5 -)	Sıra
S1	0.4763	0.4763	0.4763	0.4795	0.4730	2
S2	0.1674	0.1668	0.1680	0.1668	0.1680	5
S3	0.3666	0.3630	0.3703	0.3666	0.3666	4
S4	0.7877	0.7891	0.7863	0.7888	0.7865	1
S5	0.4456	0.4408	0.4504	0.4420	0.4493	3

Tablo 25. Sonuçların karşılaştırılması.**Table 25.** Comparing the results.

Alternatifler	LOPCOW-CRADIS	CRITIC-CRADIS
S1	2	2
S2	5	5
S3	4	4
S4	1	1
S5	3	3

Tablo 26. Spearman korelasyon matrisi.**Table 26.** Spearman correlation matrix.

	LOPCOW-CRADIS	CRITIC-CRADIS
LOPCOW-CRADIS	1	1
CRITIC-CRADIS	1	1

senaryoda ilk sıradaki konumunu koruması, bu alternatifin üstünlüğünün tek bir kriterde değil, çok sayıda kriterde sergilediği dengeli performansa dayandığını göstermektedir. Benzer şekilde diğer alternatiflerin sıralamalarının korunması, elde edilen sonuçların ağırlıklandırma sürecindeki küçük belirsizliklerden etkilenmediğini ve modelin karar vericilere güvenilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Spearman sıra korelasyon katsayısının 1 olarak elde edilmesi, iki farklı ağırlıklandırma yaklaşımının tamamen tutarlı sonuçlar ürettiğini ve önerilen modelin yöntem bağımsız olarak güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

VI. SONUÇ ve GELECEK ARAŞTIRMALAR (CONCLUSION and FUTURE RESEARCH)

Bu çalışmada, imalat firmalarının net-sıfır emisyon hedeflerine ulaşma sürecinde uygulayabilecekleri enerji dönüşüm stratejilerinin önceliklendirilmesi ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda belirlenen enerji verimliliği (S1), elektrifikasyon ağırlıklı dönüşüm (S2), yenilenebilir enerji entegrasyonu (S3), dijitalleşme ve enerji yönetimi (S4) ile hibrit dönüşüm stratejisi (S5) alternatifleri, uzman görüşleri ile oluşturulan karar matrisi üzerinden değerlendirilmiştir. Analizlerde CRADIS yöntemi kullanılmış, kriter ağırlıkları ise LOPCOW ve CRITIC yöntemleriyle ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışma, enerji dönüşüm stratejilerinin değerlendirilmesinde LOPCOW/CRITIC tabanlı CRADIS yaklaşımını entegre biçimde ele alarak literatüre metodolojik bir katkı sunmaktadır.

Elde edilen bulgular, her iki ağırlıklandırma yaklaşımı altında da alternatiflerin öncelik sıralamasının değişmediğini ve $S4 > S1 > S5 > S3 > S2$ şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, önerilen karar verme modelinin farklı kriter ağırlıklandırma tekniklerine karşı kararlı ve tutarlı sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır. Özellikle dijitalleşme ve enerji yönetimi stratejisinin (S4) tüm analizlerde en yüksek önceliğe sahip olması, imalat firmalarının net-sıfır emisyon hedeflerine ulaşma sürecinde enerji tüketiminin etkin şekilde izlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Enerji verimliliği odaklı ekipman modernizasyonunun (S1) ikinci sırada yer alması, mevcut sistemlerin performansını artırmaya yönelik yatırımların dönüşüm sürecinde önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Hibrit dönüşüm stratejisinin (S5) üçüncü sırada yer alması, farklı dönüşüm uygulamalarının bir arada değerlendirilmesinin önemli

avantajlar sağladığını göstermektedir. Yenilenebilir enerji entegrasyonunun (S3) dördüncü sırada konumlanması, sürdürülebilir enerji kaynaklarının emisyon azaltımındaki önemini doğrularken, elektrifikasyon ağırlıklı dönüşümün (S2) son sırada yer alması, bu stratejinin yüksek yatırım ve altyapı gereksinimleri nedeniyle diğer alternatiflere kıyasla daha düşük önceliğe sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak sonuçlar, net-sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada dijitalleşme ve enerji yönetimi uygulamalarının öncelikli bir rol üstlendiğini, diğer stratejilerin ise bu dönüşümü destekleyen tamamlayıcı unsurlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın bulguları, sürdürülebilirlik ve enerji dönüşümü alanında gerçekleştirilen önceki araştırmalarla genel olarak uyumludur. Özellikle Sevgi ve Figen (2025) tarafından OECD ülkelerinin yenilenebilir enerji kullanım performansının CRITIC ve COPRAS yöntemleri kullanılarak değerlendirildiği çalışmada, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasında yenilenebilir enerji yatırımlarının ve enerji dönüşüm süreçlerinin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır [13]. Benzer şekilde, bu çalışmada da net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada enerji dönüşüm stratejilerinin sistematik biçimde değerlendirilmesinin karar vericiler açısından önemli olduğu ortaya konulmuştur. Bununla birlikte mevcut çalışma, ülke ölçeğindeki performans değerlendirmelerinden farklı olarak işletme düzeyinde enerji dönüşüm stratejilerinin önceliklendirilmesine odaklanmakta ve LOPCOW-CRITIC-CRADIS bütünsel yaklaşımını kullanarak literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, imalat sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin net sıfır emisyon hedeflerine yönelik stratejik karar alma süreçlerine katkı sağlayabilecek niteliktedir.

Bununla birlikte çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, karar matrisi sınırlı sayıda ($n=5$) uzmanın değerlendirmelerine dayanmaktadır ve bu durum sonuçların genellenebilirliğini kısıtlayabilir. İkinci olarak, kullanılan kriter seti literatür ve uzman görüşleriyle oluşturulmuş olsa da farklı sektörler veya bölgesel koşullar altında değişkenlik gösterebilir. Ayrıca, analiz statik bir veri seti üzerinden yürütülmüş olup zaman içindeki belirsizlikler, maliyet dalgalanmaları ve politika değişiklikleri modele dâhil edilmemiştir. Son olarak, kullanılan ÇKKV yöntemleri belirli varsayımlar altında çalışmakta olup farklı yöntemlerin kullanılması durumunda sıralama sonuçlarında değişiklikler gözlemlenebilir.

Gelecek araştırmalarda, daha geniş ve farklı uzman gruplarından veri toplanarak sonuçların sağlamlığı artırılabilir. Bunun yanı sıra, bulanık, gri veya stokastik ÇKKV yaklaşımları kullanılarak

belirsizlikler modele entegre edilebilir ve sonuçların duyarlılığı daha kapsamlı biçimde analiz edilebilir. Farklı sektörler ve ülke koşulları için karşılaştırmalı uygulamalar yapılarak stratejilerin bağlama duyarlılığı incelenebilir. Ayrıca, dinamik veri setleri kullanılarak zaman boyutunu içeren analizler gerçekleştirilebilir ve politika senaryolarının etkileri değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma imalat firmalarının enerji dönüşüm stratejilerini belirlerken bütünlük ve çok boyutlu yaklaşımlara öncelik vermeleri gerektiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, karar vericilere stratejik planlama sürecinde yol gösterici nitelikte olup, enerji dönüşümüne yönelik yatırımların daha etkin ve sürdürülebilir biçimde yönlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen LOPCOW/CRITIC tabanlı CRADIS yaklaşımının benzer stratejik karar problemlerinde güvenle uygulanabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda bulanık CRADIS ve bulanık LOPCOW gibi yaklaşımlar kullanılarak belirsizlikler modele entegre edilebilir.

YAZAR BEYANI (AUTHOR STATEMENT)

İntihal Kontrolü (Plagiarism Check)—Makale iThenticate programı ile taranmış ve derginin intihal politikası ile uyumlu bulunmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)—Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)—Makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı (Use of Artificial Intelligence Tools)—Bu çalışmada, makale yazımında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanılmamıştır.

Finansman ve Proje Desteği (Funding)—Bu çalışma için herhangi bir kurumsal/finansal destek alınmamıştır.

Veri Paylaşım (Data availability)—Bu çalışmayla ilişkili veriler; gizlilik, kurumsal veya teknik kısıtlamalar nedeniyle kamuya açık değildir.

Yazar Katkısı (CRediT Author Contribution)—Kavramsallaştırma, Yöntem, Yazılım, Araştırma, Veri Düzenleme, Biçimsel Analiz, Görselleştirme, Yazım—Taslak (Gülmisar Taşkın); Kavramsallaştırma, Yöntem, Doğrulama, Biçimsel Analiz, Yazım—İnceleme ve Düzenleme, Denetim, Proje Yönetimi (Beyzanur Çayır Ervural). Tüm yazarlar, makalenin yayımlanan halini okumuş ve onaylamıştır.

Teşekkür (Acknowledgment)—Yazarlar, yapıcı yorumları ve makaleye yaptıkları iyileştirmeler için isimsiz hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Bashir, Y. Pan, M. Shahbaz, S. Ghosh, "How energy transition and environmental innovation ensure environmental sustainability? Contextual evidence from Top-10 manufacturing countries", *Renewable Energy*, 204, 697-709, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.049>.
- [2] Y. Zhang, Z. Zahoor, "The role of energy subsidies, savings, and transitions in driving energy transformations toward net-zero emissions", *Energy*, 320, 135209, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135209>.
- [3] C. Karakosta, J. Papatthanasious, "Climate-driven sustainable energy investments: key decision factors for a low-carbon transition using a multi-criteria approach", *Energies*, 17(21), 5515, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17215515>.
- [4] P. W. G. Newman, "Net zero in the maelstrom: professional practice for net zero in a time of turbulent change", *Sustainability*, 15(6), 4810, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15064810>.
- [5] F. Bandejas, M. Gomes, P. Coelho, J. Fernandes, "Towards net zero energy in industrial and commercial buildings in Portugal", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109580, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109580>.
- [6] P. A. Lombardi, "Technical and economic approaches to design net-zero energy factories: a case study of a German carpentry factory", *Sustainability*, 17(17), 7891, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17177891>.
- [7] N. Alsulamy, A. Shoukat, I. Elgammal, "Business strategies for managing non-renewable energy dynamics in Saudi Arabia's manufacturing sector", *Sustainability*, 17(10), 4331, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17104331>.
- [8] E. Izadpanahi, A. Downward, T. Arthanari, Y. Liu, "Robust optimization for energy transition planning in manufacturing firms: an integrated model addressing economic and environmental issues", *Journal of Cleaner Production*, 334, 130237, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130237>.
- [9] M. L. Lode, G. te Boveltd, C. Macharis, T. Coosemans, "Application of multi-actor multi-criteria analysis for transition management in energy communities", *Sustainability*, 13(4), 1783, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13041783>.
- [10] J. V. Lugo, N. N. Torres, R. D. Cavalcante, T. G. Lago, J. A. Lima, J. J. Ledesma, O. H. Ando Junior, "Evaluation of technological alternatives for the energy transition of coal-fired power plants, with a multi-criteria approach", *Energies*, 18(17), 4473, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18174473>.
- [11] A. Menacho, R. Sacchi, C. Bauer, E. Panos, R. McKenna, P. Burgherr, "The material-energy nexus in net-zero transition scenarios: exploring environmental trade-offs and uncertainties", *Resources, Conservation and Recycling*, 218, 108251, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108251>.
- [12] M. Pinto, G. Crespi, F. Dell'Anna, C. Becchio, "Combining energy dynamic simulation and multi-criteria analysis for supporting investment decisions on smart shading devices in office buildings", *Applied Energy*, 332, 120470, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120470>.
- [13] E. Sevgi, A. Figen, "Determination of renewable energy growth using cluster analysis and multi-criteria decision-making methods", *Applied Sciences*, 15(3), 1575, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15031575>.
- [14] A. Soltani, M. A. Imani, M. S. Imani, "Comprehensive strategic assessment of Iran's renewable energy potentials through a hybrid multi-criteria decision-making approach", *Renewable Energy*, 256, 123896, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123896>.
- [15] W. Ma, C. Xiao, S. Ahmed, T. Feng, G. Liu, "Multi-objective carbon neutrality optimization and G1-EW-TOPSIS assessment for renewable energy transition", *Journal of Cleaner Production*, 415, 137808, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137808>.
- [16] L. Chen, L. Cao, Y. Wen, H. Chen, S.-L. Jiang, "A knowledge-based NSGA-II algorithm for multi-objective hot rolling production scheduling under flexible time-of-use electricity pricing", *Journal of Manufacturing Systems*, 69, 255-270, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.06.009>.
- [17] Y. Chi, S. Xu, X. Yang, J. Li, X. Zhang, Y. Chen, "Research on Beijing manufacturing green-oriented transition path under 'double carbon' goal-based on the GML-SD model", *Sustainability*, 15(9), 7716, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15097716>.
- [18] Y. He, M. Wang, C. Yuan, "Digital economy and low-carbon trade competitiveness: a multidimensional analysis of China's manufacturing sector", *Sustainability*, 17(1), 274, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17010274>.
- [19] L. Gao, M. Zhou, M. Shafieezadeh, "Fuzzy TOPSIS-based multi-criteria selection of renewable energy sources for smart grids", *Wind Energy*, 28(10), e70058, 2025. <https://doi.org/10.1002/we.70058>.
- [20] A. Haq, R. Sharma, B. Bakshi, H. Kodamana, M. Ramteke, "Forecasting sustainable power generation profiles to achieve net zero emissions using multi-objective techno-ecological framework: a study in the context of India", *Computers & Chemical Engineering*, 179, 108439, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108439>.
- [21] G. Lopez, A. Aghahosseini, D. Bogdanov, R. Satymov, A. Oyewo, C. Breyer, "Sustainable energy industry systems in the United States and Canada demonstrating the value of solar-to-X", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 15(2), 215-222, 2025. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2025.3531043>.
- [22] S. Miyake, S. Teske, J. Rispler, M. Feenstra, "Solar and wind energy potential under land-resource constrained conditions in the Group of Twenty (G20)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114622, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114622>.
- [23] P. Paiboonsin, G. Oluleye, M. Howells, R. Yeganyan, C. Cannone, S. Patterson, "Pathways to clean energy transition in Indonesia's electricity sector with open-source energy modelling system modelling (OSeMOSYS)", *Energies*, 17(1), 75, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17010075>.
- [24] R. Krishankumar, F. Ecer, S. Korucuk, A. Aytekin, A. Yadav, "Evaluating zero-carbon measures through a probabilistic hesitant fuzzy LOPCOW and WISP approach", *Applied Soft Computing*, 186, 114216, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.114216>.
- [25] A. Ulutas, A. Topal, O. Görçün, F. Ecer, "Evaluation of third-party logistics service providers for car manufacturing firms using a novel integrated grey LOPCOW-PSI-MACONT model", *Expert Systems with Applications*, 241, 122680, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122680>.
- [26] F. Ecer, H. Küçükönder, S. Kaya, O. Görçün, "Sustainability performance analysis of micro-mobility transition in urban

- transportation with a novel IVFNN-Delphi-LOPCOW-CoCoSo framework", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 172, 103667, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103667>.
- [27] F. F. Altıntaş, "Analysis of the prosperity performances of G7 countries: an application of the LOPCOW-based CRADIS method", *Alphanumeric Journal*, 11(2), 157-182, 2023. <https://doi.org/10.17093/alphanumeric.1360478>.
- [28] R. Cheng, J. Fan, M. Wu, H. Seiti, "A large-scale multi-attribute group decision-making method with R-numbers and its application to hydrogen fuel cell logistics path selection", *Complex & Intelligent Systems*, 10(4), 5213-5260, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01437-9>.
- [29] N. Keleş, "LOPCOW ve CRADIS yöntemleriyle G7 ülkelerinin ve Türkiye'nin yaşanabilir güç merkezi şehirlerinin değerlendirilmesi", *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(3), 727-747, 2023. <https://doi.org/10.25287/ohuibf.1239201>.
- [30] M. Riaz, J. Alcantud, Y. Yasin, T. Jameel, "Integration of recursive feature elimination in renewable energy sources with evaluation based on relative utility and nonlinear standardization", *Renewable Energy*, 256, 124538, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124538>.
- [31] W. Wang, Y. Wang, S. Fan, X. Han, Q. Wu, D. Pamucar, "A complex spherical fuzzy CRADIS method based Fine-Kinney framework for occupational risk evaluation in natural gas pipeline construction", *Geoenergy Science and Engineering*, 220, 111246, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111246>.
- [32] S. Ashraf, W. Iqbal, M. Hameed, V. Simic, N. Bacanin, "An enhanced CRADIS decision model for optimizing radioactive waste reduction through transmutations based on disc spherical fuzzy information", *Applied Soft Computing*, 167, 112289, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112289>.
- [33] A. Ulutas, F. Balo, K. Mirkovic, Z. Stevic, M. Mostafa, "MCDM model for critical selection of building and insulation materials for optimising energy usage and environmental effect in production focus", *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(7), 587-603, 2023. <https://doi.org/10.3846/jcem.2023.19569>.
- [34] X. Zhang, M. Lv, X. Yuan, "Research on Cloud-CRITIC-PDR method for hybrid multi-criteria decision making", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45(5), 8789-8803, 2023. <https://doi.org/10.3233/JIFS-232605>.
- [35] N. Sharkasi, S. Rezakhah, "A modified CRITIC with a reference point based on fuzzy logic and Hamming distance", *Knowledge-Based Systems*, 255, 109768, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109768>.
- [36] A. Krishnan, M. Kasim, R. Hamid, M. Ghazali, "A modified CRITIC method to estimate the objective weights of decision criteria", *Symmetry*, 13(6), 973, 2021. <https://doi.org/10.3390/sym13060973>.
- [37] I. A. Bashmakov, L. J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, M. Fischedick, Y. Geng, K. Tanaka, "Industry", *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, Eds., Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 2023, Ch. 11, 1161-1244. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.
- [38] European Commission, "European industrial strategy", https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy_en (30.01.2026).
- [39] IEA, "Net zero by 2050", Paris, France, 2021. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [40] IEA, "World energy outlook 2022", Paris, France, 2022. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/.../WorldEnergyOutlook2022.pdf>.
- [41] IEA, "Energy technology perspectives 2020", Paris, France, 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/.../EnergyTechnologyPerspectives2020PDF.pdf>.
- [42] J. H. Wesseling, C. Bidmon, R. Bohnsack, "Business model design spaces in socio-technical transitions: the case of electric driving in the Netherlands", *Technological Forecasting and Social Change*, 154, 119950, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119950>.
- [43] IEA, "Energy, climate change and environment 2014 insights", Paris, France, 2014. <https://www.iea.org/reports/energy-climate-change-and-environment-2014-insights>.
- [44] P. Thollander, J. Palm, J. Hedbrant, "Energy efficiency as a wicked problem", *Sustainability*, 11(6), 1569, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11061569>.
- [45] Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework, ISO 14040:2006, 2006.
- [46] Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines, ISO 14044:2006, 2006.
- [47] A. Trianni, E. Cagno, "Dealing with barriers to energy efficiency and SMEs: some empirical evidences", *Energy*, 37(1), 494-504, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.005>.
- [48] S. Sorrell, A. Mallett, S. Nye, "Barriers to industrial energy efficiency: a literature review", United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Vienna, Austria, Working Paper 10/2011, 2011. <https://downloads.unido.org/ot/48/17/4817768/...pdf>.
- [49] A. Kylili, P. A. Fokaides, P. A. Lopez Jimenez, "Key performance indicators (KPIs) approach in buildings renovation for the sustainability of the built environment: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 906-915, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.096>.
- [50] J. Mankins, "Technology readiness level – a white paper", NASA, Washington, D.C., USA, 1995.
- [51] P. Aghion, A. Dechezleprêtre, D. Hémous, R. Martin, J. V. Reenen, "Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: evidence from the auto industry", *Journal of Political Economy*, 124(1), 1-51, 2016. <https://doi.org/10.1086/684581>.
- [52] World Bank, "State and trends of carbon pricing 2023", Washington, D.C., USA, 2023. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/58f2a409-9bb7-4ee6-899d-be47835c838f>.
- [53] S. Adams, F. Adedoyin, E. Olaniran, F. V. Bekun, "Energy consumption, economic policy uncertainty and carbon emissions; causality evidence from resource rich economies", *Economic Analysis and Policy*, 68, 179-190, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.09.012>.