

Araştırma Makalesi / Research Article

ENERJİ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE ÖLÇÜLMESİ VE COPELAND YÖNTEMİ İLE BÜTÜNLEŞTİRİLMESİ: OECD ÜLKELERİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Sude TEKER¹ , Selen AVCI AZKESKİN² , Zerrin ALADAĞ³ 

ÖZET

Günlük hayatın devamı için enerji bir zorunluluktur. Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve nüfus artışı gibi nedenler enerjiye olan ihtiyacı daha da arttırmıştır. Bu artışa bağlı olarak yenilenemeyen enerji kaynakları tükenme tehlikesi ile karşı karşıya kalmış; enerji maliyetleri ve zararlı gazların çevreye salınımı artmıştır. Yüksek maliyetler, enerji ihtiyacını ithalat yoluyla karşılayan birçok ülkenin dışa bağımlılığını artırarak ekonomisini etkilemiştir. Dolayısıyla, “enerji sürdürülebilirliği” ülkeler için hayati öneme sahip olmuştur. Günümüzde çoğu ülke enerji sürdürülebilirliğine önem vermekte ve bu alanda çeşitli politikalar yürütmektedir. Bu çalışmada, verileri temin edilebilen 36 OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) ülkesinin enerji sürdürülebilirliği 15 kriter kullanılarak Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Kriterler CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi ile ağırlıklandırılmış; alternatifler PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method For Enrichment Evaluations), VIKOR (VIse Kriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje) ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemleri ile sıralanmıştır. Elde edilen sıralamalar Copeland yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Ayrıca, 4 yöntemin birbiri ile ilişkisi Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı ile analiz edilmiştir. CRITIC yöntemine göre en öncelikli kriter “güneş enerjisinden elektrik üretimi”dir. PROMETHEE, GİA ve Copeland yönteminden elde edilen sonuçlara göre enerji sürdürülebilirliği bakımından en iyi alternatif “İsviçre” olurken, VIKOR yöntemine göre “Almanya” en iyi alternatiftir. “Güney Kore” tüm sıralamalarda son sırada yer almıştır. Spearman Korelasyon Katsayısına göre en benzer sıralamalar PROMETHEE ve Copeland yöntemlerinden elde edilen sıralamalardır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Sürdürülebilirliği, Copeland, PROMETHEE, VIKOR, Gri İlişkisel Analiz (GİA)
JEL Sınıflandırması: C38, C65, S42, S56

MEASUREMENT OF ENERGY SUSTAINABILITY THROUGH MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING METHODS AND INTEGRATION WITH COPELAND METHOD: A STUDY ON OECD COUNTRIES

ABSTRACT

Energy is a necessity for the continuation of daily life. Contemporary factors such as technological advancements, industrialization, and population growth have further increased the demand for energy.

¹ Endüstri Mühendisi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye sudeteker20@gmail.com

² Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye selen.avci@kocaeli.edu.tr

³ Prof. Dr., İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul, Türkiye
zerrin.aladag@nisantasi.edu.tr

Due to this increase, non-renewable energy sources have faced the threat of depletion, leading to a rise in energy costs and the emission of harmful gases into the environment. High costs have increased the dependence of many countries that meet their energy needs through imports, thereby impacting their economies. Therefore, “energy sustainability” has become crucial for nations. Currently, most countries prioritize energy sustainability and implement various policies in this regard. In this study, the energy sustainability of 36 OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) countries, for which data is available, is compared using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods based on 15 criteria. The criteria are weighted using the CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) method, and the alternatives are ranked using PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations), VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), and Grey Relational Analysis (GRA) methods. The obtained rankings are integrated using the Copeland method. Additionally, the relationship among the four methods is analyzed using the Spearman Rank Correlation Coefficient. According to the CRITIC method, the most prioritized criterion is ‘electricity generation from solar energy.’ According to the results obtained from PROMETHEE, GRA, and the Copeland method, ‘Switzerland’ emerges as the best alternative in terms of energy sustainability, while according to the VIKOR method, ‘Germany’ is the best alternative. ‘South Korea’ ranks last in all rankings. The most similar rankings, according to the Spearman Rank Correlation Coefficient, are derived from the PROMETHEE and Copeland methods.

Keywords: Energy Sustainability, Copeland, PROMETHEE, VIKOR, Grey Relational Analysis (GRA)

JEL Classification Codes: C38, C65, S42, S56

EXTENDED SUMMARY

Research Questions & Purpose

Energy is a fundamental necessity for the continuity of daily life and a crucial element for a nation’s economic development. The increasing global demand for energy, driven by technological advancements, industrialization, and population growth, has led to the depletion risk of non-renewable energy resources, rising costs, and higher emissions of harmful gases into the environment. These challenges have intensified the significance of “energy sustainability,” which has become a critical priority for many nations. This study aims to evaluate and compare the energy sustainability performance of 36 OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) countries using 15 criteria through Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods. By employing CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation), PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations), VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), and Grey Relational Analysis (GRA) methods, the study provides a comprehensive ranking of these countries, highlighting critical aspects of energy sustainability.

Literature Review

Previous studies emphasize the growing importance of renewable energy sources for achieving energy sustainability. Studies such as those by Li et al. (2020) and Saraswat & Dugalwar (2021) have employed MCDM methods to assess renewable energy alternatives in China and India, respectively. These studies underline the significance of integrating sustainability themes into energy policies. Similarly, Altıntaş (2020) and Gökgöz & Yalçın (2021) evaluated

OECD countries' environmental and economic performances using fuzzy AHP and CRITIC methods. Despite significant contributions, existing research often lacks a unified approach to synthesizing rankings from different MCDM methods. This study fills this gap by combining results from multiple methods using the Copeland technique, aiming for a more objective and reliable ranking of energy sustainability performances.

Methodology

This study employs a hybrid MCDM approach, integrating CRITIC for criteria weighting and PROMETHEE, VIKOR, and GRA for ranking alternatives. CRITIC was selected for its objective evaluation based on standard deviations and inter-criteria correlations. PROMETHEE offers partial and full rankings, enabling a detailed analysis of alternatives. VIKOR focuses on reconciling conflicting criteria by minimizing regret and maximizing group utility, while GRA effectively addresses uncertainty. The results from these methods were aggregated using the Copeland method to obtain a consolidated ranking. The Spearman rank correlation coefficient was used to assess the consistency and relationships between the rankings generated by these methods. Data for the analysis were sourced from reputable databases, including the World Bank, OECD, and IRENA, ensuring reliability and relevance.

Results and Conclusion

The results reveal significant insights into energy sustainability performance among OECD countries. According to the CRITIC method, "electricity generation from solar energy" emerged as the most critical criterion, followed by "electricity generation from wind energy" and "fossil fuel consumption." The Copeland method, combining results from PROMETHEE, VIKOR, and GRA, identified Sweden, Switzerland, Norway, Germany, and Denmark as the top-performing countries in terms of energy sustainability. Conversely, South Korea consistently ranked last across all methods. The findings highlight that successful countries exhibit strong performances in critical criteria, such as low carbon emissions and high renewable energy capacity. For instance, Sweden achieved exemplary results in both cost-oriented and benefit-oriented criteria, including minimal fossil fuel consumption and maximum electricity generation from renewable sources. The study also underscores regional disparities in energy sustainability, with countries like South Korea, Australia, and the United States demonstrating weaker performances due to higher dependency on fossil fuels and suboptimal renewable energy utilization. Türkiye, ranking 29th in the consolidated results, shows potential for improvement in criteria such as primary energy supply, hydroelectric power generation, and R&D investments. Policy implications of this study emphasize the need for enhanced investments in renewable energy, fiscal incentives for private and public sectors, and the development of energy-efficient technologies. Countries must also prioritize carbon reduction programs and energy storage solutions to ensure the continuity of renewable energy systems. Future research should explore sectoral energy sustainability and longitudinal analyses to capture temporal changes in performance, providing actionable recommendations for policymakers aiming to achieve sustainable energy transitions.

1. Giriş

Enerji, günlük hayatın vazgeçilmez bir unsuru olmasının yanı sıra bir ülkenin ekonomik kalkınması için en önemli konulardan biridir. Enerji ihtiyacının günden güne artması nedeniyle ileriki yıllarda kaynakların tükeneceği öngörüldüğünden enerji sürdürülebilirliği tüm dünya ülkeleri için üzerinde önemle durulması gereken bir konudur (Bilgiç vd., 2021).

Enerjinin herhangi bir değişime veya dönüşüme uğramamış haline birincil (primer) enerji denmektedir (Koç & Kaya, 2015). Birincil enerjinin, “yenilenemeyen” ve “yenilenebilir” olmak üzere iki şekli vardır. Yenilenemeyen enerji kaynakları, bir gün tükenme ihtimali olan fosil yakıtlar ve nükleer enerjidir. Fosil yakıtlar, oluşması yıllar süren bitki ve hayvan kalıntıları sonucu elde edilen kömür, doğalgaz, petrol vb. yakıtlardır. Fosil yakıtların karbon içerikleri çok yüksek olduğundan bu yakıtlar çevre üzerinde olumsuz etki yaratırlar. Nükleer enerji ise atomun çekirdeğindeki radyoaktif enerjidir. Nükleer enerji, küçük bir yakıt miktarıyla büyük miktarda enerji üretebilir ve fosil yakıtlara göre sera gazı salınımı düşüktür. Ancak; nükleer santrallerde meydana gelebilecek kaza veya felaketler, radyoaktif atıklar ve yüksek santral inşaa ve işletme maliyetleri düşünüldüğünde bu enerji türünün dikkatli bir şekilde kullanılması oldukça önemlidir (İşeri & Özen, 2013). Güneş, rüzgâr, su gibi kaynaklardan elde edilen enerjiye ise “yenilenebilir enerji” denir. Yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara göre çevre dostu olan bir enerjidir. Yenilenebilir enerjinin kullanımı karbon ve sera gazı emisyonunu azaltır ve enerji sürdürülebilirliğini sağlar.

Sürdürülebilirlik, mevcut kaynakları gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama imkânını ortadan kaldırmadan kullanmaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyeti, enerjide sürdürülebilirlik için kritik bir faktördür. Ekonomik olarak gelişmiş bir ülkede enerji talebi genellikle yüksektir ve bu nedenle enerji kaynaklarının mevcudiyeti önemlidir. Diğer yandan, yüksek enerji tüketimi olan bir ülke genellikle ekonomik olarak gelişmektedir. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyeti, sürdürülebilir ekonomik büyüme için hayati öneme sahiptir ve ülkelerin bu kaynakları teşvik etmeleri gerekmektedir. Ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarını kullandıkça enerji taleplerini dışa bağımlı olmadan ve kesinti yaşamadan karşılayabilir. Bu da ekonomik kalkınmayı beraberinde getirecektir (Dinçer & Karakuş, 2020).

Develi & Korkmaz (2012), Türkiye’nin 1960-2009 yılları arasındaki verilerini kullanarak enerji tüketimi, kullanımı ve gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) arasındaki nedensellik ilişkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin olduğunu ve enerji tüketimi ile GSYİH arasında çift yönlü nedensellik bulunduğunu göstermiştir. O halde yüksek GSYİH için enerjiye ve sürdürülebilir kaynaklar için de yenilenebilir enerjiye ihtiyaç bulunmaktadır. Çalışkan (2009), Türkiye’nin enerji arz ve güvenliği, enerjide dışa bağımlılık sorunlarını ele almış ve çözüm önerilerinden biri olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının devreye alınmasını sunmuştur. Ürün & Soyu (2016), yıllık bazda ülkelerin enerji kaynaklarını tüketme paylarını incelemiş ve bunun sonucunda alternatif enerji kaynaklarının gerekliliği üzerinde durmuştur. Öymen (2020), enerji sektöründen 16 uzman ile derinlemesine mülakat gerçekleştirilmiş ve yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirlik üzerindeki rolünü araştırmıştır. Çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının, enerji talebinin en az finansman, en az çevresel ve sosyal maliyet ve sürekli temini için önemi ortaya konmuştur. Aydın (2016), Türkiye’nin enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınma açısından önemini ortaya koymuş ve gelecek nesilleri koruyacak önlemler sunmuştur. Yazara göre yenilenebilir enerji kaynaklarını

ve bu kaynakları kullanabilmek için geliştirilecek teknolojileri teşvik etmek sürdürülebilirliğin temel taşlarından biridir. Sağbaş & Başbuğ (2018), Türkiye'nin enerji durumunu iklim değişikliğini ele alarak değerlendirmiş ve enerji verimliliği politikalarına istinaden fosil yakıt kullanımının en kısa süre içerisinde minimum düzeye indirilmesini tavsiye ederek alternatif enerjilere yönelmenin önemini vurgulamıştır.

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, birden fazla alternatif ve kriterin bulunduğu durumlarda istenen en iyi sonuca ulaşmak için, karar almaya yardımcı olan yöntemlerdir. Bazı ÇKKV yöntemleri kriterlerin birbirine göre önemlerini ortaya koyarak kriterleri ağırlıklandırmak için kullanırken, bazıları alternatifleri sıralamak için kullanır (Demircioğlu & Coşkun, 2018).

Literatürde ÇKKV yöntemleriyle bir ülke ya da bir bölge için yenilenebilir enerji seçimi birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmalardan bazıları seçim sürecinde "sürdürülebilirlik" temasını ön plana çıkarmıştır. Örneğin; Li vd. (2020), Çin'de yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi ve kullanılmasını sürdürülebilir kalkınma perspektifinden değerlendirmek için ÇKKV yöntemlerini kullanmıştır. Kriterlerin ağırlığını belirlemek için, Analitik Ağ Prosesi (ANP) kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralamasında ise WSM (Weighted Sum Method - Ağırlıklı Toplam Yöntemi), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality) ve VIKOR (VİseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmaya göre, Çin için en iyi yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektrik enerjidir. Saraswat & Dıgalwar (2021), Hindistan'daki çeşitli enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik faktörlerine dayalı olarak değerlendirilmesi için entegre bir bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) - bulanık TOPSIS modeli geliştirmiştir. Çalışmada, sürdürülebilirlik kriter ağırlıklarının belirlenmesinde bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra dikkate alınan alternatifleri değerlendirmek ve sıralamak için bulanık TOPSIS tekniği kullanılmıştır. Analizin sonucunda, Hindistan için güneş enerjisinin öncelikli olduğu tespit edilmiştir. Bilgiç vd. (2021), çevresel sürdürülebilirliği korumak amacıyla artan enerji talebini karşılamak için gerçekleştirilecek olan enerji kaynak yatırımlarının daha az maliyetle, daha temiz kaynaklarla planlanması doğrultusunda, bir özel enerji şirketi için İç Anadolu Bölgesi'nde yatırım yapmak üzere en uygun yenilenebilir enerji kaynağını belirlemeyi hedeflenmiştir. Bunun için ÇKKV yöntemlerinden En İyi En Kötü Yöntemi (Best Worst Method-BWM) kullanılmıştır. Sonuç olarak yatırım için güneş enerjisinin en iyi alternatif olduğu tespit edilmiştir. Avşar Özcan vd. (2022), enerji üretimi alanındaki yatırımların sürdürülebilir enerji politikasının geliştirilmesi üzerindeki etki düzeyini araştırmak için ekonomiklik, kesintisizlik, çevreye duyarlılık ve verimlilik kriterlerini dikkate alarak Türkiye için yatırım yapılabilecek enerji kaynağını seçmek üzere sıralama yöntemlerinden TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR ve COPRAS (Complex Proportional Assessment)'ı kullanmıştır. Çalışmada kriter ağırlıklandırmak için AHP ve ANP yöntemleri kullanılmıştır. Yenilenebilir ve yenilemeyen enerji kaynaklarının birlikte değerlendirildiği çalışmada öncelikli alternatif rüzgâr olarak belirlenmiştir.

Literatürde enerji göstergeleri açısından ülkelerin birbirleriyle karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Tezcan (2014), enerji üretimi ve kullanımı ile elektrik üretimi ve tüketimi, ihraç edilen enerji oranı, fosil yakıt tüketimi ve alternatif ve nükleer enerji oranı gibi bazı te-

mel kriterleri kullanarak OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) ülkeleri ile BRIC (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin) ülkelerini Çok Boyutlu Ölçekleme (ÇBÖ) Analizi ile karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ABD, İsveç, Norveç, İzlanda ve Çin'in diğer ülkelerden farklı olduğu tespit edilmiştir. Altıntaş d. (2020), 35 OECD üyesi ülkenin genel enerji sürdürülebilirliği performanslarını karşılaştırmak için bulanık AHP ile entegre yeni bir Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi önermiştir. Gökgöz & Yalçın (2021), OECD ülkelerinde enerji sektörünün çevresel ve ekonomik performanslarını 2013-2017 yılları arasındaki verilere dayanarak CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation), GİA ve Çok Niteklili Fayda Teorisi (MAUT) yöntemleriyle analiz etmiştir. Çalışma sonucunda, çevre ve enerji ekonomisi performansı açısından İsviçre ve İrlanda'nın daha iyi performans sergilediği ortaya konmuştur. Güler vd. (2021), 36 OECD ülkesinin sürdürülebilir enerji performansını değerlendirmek üzere Veri Zarflama Analizi (VZA) ve PROMETHEE yöntemlerini kullanmış, sıralamalar arasındaki ilişkileri Spearman sıra korelasyon katsayısı ile incelemiştir. Brodny & Tutak (2021), Orta ve Doğu Avrupa ülkelerinde sürdürülebilir enerji gelişimini 21 kriter ile TOPSIS, VIKOR, MOORA (Multi-objective Optimization By Ratio Analysis) ve COPRAS yöntemlerini kullanarak değerlendirmiştir. Kriter ağırlıkları Şanon'un Entropi yöntemine göre hesaplanmıştır. Sonuçlar, 2008 ve 2018 yıllarında en iyi sıralamanın Letonya ve Hırvatistan'a; en kötü sıralamanın ise Polonya ve Bulgaristan'a ait olduğunu göstermiştir. Brodny & Tutak (2023), Avrupa Birliği (AB)'ne üye 27 ülkenin sürdürülebilir enerji ve iklim gelişimini değerlendirmek için ÇKKV yöntemlerinden CODAS (Complex Proportional Assessment of Alternatives), EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution), TOPSIS, VIKOR ve WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment)'ı kullanmıştır. Kesin sıralama içinse Nihai Değerlendirme Puanının normalleştirilmiş değerine dayanan bir metodoloji önermiştir. Sonuç olarak, AB-27 ülkelerinin sürdürülebilirlik açısından birbirinden farklı düzeyde ilerleme kaydettiği ortaya konmuştur. Farajı vd. (2023), AB üyesi ülkeler içerisinde yenilenebilir enerji açısından sürdürülebilir ülkeleri belirlemek üzere bulanık AHP yöntemini kullanmıştır. Bulgular, sırasıyla İsveç, Belçika, İrlanda, Fransa, Almanya, İspanya, Hollanda, Polonya ve İtalya'nın en gelişmiş ülkeler olduğunu göstermiştir.

Çalışmada, araştırma ve yayın etiği kurallara uyulmuştur. Çalışmada, 15 kriter kullanılarak OECD üyesi 36 ülkenin sürdürülebilir enerji potansiyellerini karşılaştırmak amaçlanmıştır. Kullanılan kriterler CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılmış, alternatifler ise PROMETHEE, VIKOR ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemleri ile sıralanmıştır. CRITIC yöntemi, korelasyona dayalı bir ağırlıklandırma tekniği olarak objektif olma özelliğinden dolayı tercih edilmiştir (Zafar vd., 2021; Demircioğlu & Coşkun, 2018). Sıralama yöntemleri de literatürde sıklıkla yer bulan ÇKKV yöntemleridir. PROMETHEE yöntemi, basit, açık ve dengeli bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem ile alternatifler için hem kısmi (PROMETHEE I), hem de tam (PROMETHEE II) sıralanabildiği için daha ayrıntılı analizler elde edilmektedir (Şenkayas & Hekimoğlu, 2013). VIKOR yönteminde hem fayda hem maliyet kriterleri dikkate alınarak karar vericilerin fikir ayrılıkları uzlaştırılabilir (Ertuğrul & Karakaşoğlu, 2009). GİA ise ÇKKV problemlerindeki belirsizlikleri analiz etmektedir ve belirsizliği analiz etme aşamasında diğer yöntemlerden daha kolay bir çözüm yöntemi sunmaktadır (Ayaydın vd., 2017).

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak elde edilen sıralamalar Copeland yöntemi kullanılarak birleştirilmiş, böylece daha objektif bir kesin sonuç elde etmek amaçlanmıştır. Son olarak, 4 yöntemin birbiri ile ilişkisini ölçmek için Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı kulla-

nılmıştır. Çalışma, 15 farklı enerji göstergesi ile hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen enerji kaynaklarının değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji politikasının geliştirilmesi ve ülkeler arası karşılaştırmalı analiz yapılması bakımından literatüre katkı sunmaktadır.

2. Yöntem

Çalışmada, OECD ülkelerinin enerji sürdürülebilirliğini değerlendirmek için öncelikle kriterler CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Daha sonra, alternatifleri sıralamak için PROMETHEE, VIKOR ve GİA yöntemlerine başvurulmuştur. Copeland yöntemi ile sıralamalar bütünleştirilerek tek bir sıralama elde etmek amaçlanmıştır. Son olarak, Spearman Korelasyon Katsayısı ile dört yöntemin birbiri ile ilişkileri tespit edilerek elde edilen sonuçların yakınlıkları incelenmiştir. Söz konusu yöntemler alt başlıklarda sırayla açıklanmıştır.

2.1. CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)

CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation), karar problemlerinde yer alan kriterlerin önem ağırlıklarının nesnel olarak belirlenmesi için kullanılır (Akçakanat vd., 2018). Yöntemin en önemli özelliği, uzman görüşlerinden yola çıkılarak elde edilen öznel değerlendirmelerle değil, kriterlerin standart sapmalarına ve kriterler arası korelasyona göre değerlendirme yapmasıdır. Yöntemin adımları aşağıdaki gibidir (Demircioğlu & Coşkun, 2018):

Adım 1. Karar matrisi Denklem 1’de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2. Karar matrisi normalize edilir. Maliyet yönlü kriterler için Denklem (2), fayda yönlü kriterler için Denklem (3) kullanılır.

$$r_{ij} = \frac{x_j^{maks} - x_{ij}}{x_j^{maks} - x_j^{min}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{maks} - x_j^{min}} \quad (3)$$

Adım 3. Denklem (4) ile herhangi bir j kriteri ile k kriteri arasındaki korelasyon hesaplanarak ilişki katsayısı matrisi oluşturulur.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_j)(r_{ik} - r_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ik} - r_k)^2}} \quad j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Adım 4. Normalizasyon matrisindeki her sütunun standart sapması Denklem (5) ile bulunur. Ardından Denklem (6) kullanılır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_j)^2}{m - 1}} \quad (5)$$

$$C_j = \sigma_j \times \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Adım 5. Denklem (7) ile kriter ağırlıkları hesaplanır.

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_j} \quad (7)$$

2.2. PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method For Enrichment Evaluations)

PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method For Enrichment Evaluations), kriterler doğrultusunda alternatifler arasında tercih fonksiyonlarına dayalı karşılaştırmalar ile hem kısmi (PROMETHEE I) hem tam sıralama (PROMETHEE II) yapabilen bir yöntemdir. Yöntemin adımları şu şekildedir (Balkaya vd., 2021; Ekin & Okutan, 2021;):

Adım 1. Karar matrisi oluşturulur.

Adım 2. Her kriter için tercih fonksiyonu tanımlanır. 6 tip tercih fonksiyonu vardır.

- Birinci Tip (Olağan): Kararı veren kişi, ilgili değerlendirme kriteri içinden farklı bir seçeneğe tercih etmiyorsa kullanılması gereken fonksiyon birinci tip yani “Olağan” olmalıdır.
- İkinci Tip (U Tipi): Kararı veren kişi tercihini ilgili kriter için kendi belirlemiş olduğu sayısal değerin üstündeki bir değere sahip değerden yana kullanmak istiyorsa kullanılacak olan tercih fonksiyonu ikinci tip yani “U tipi” olmalıdır.
- Üçüncü Tip (V Tipi): Kararı veren kişi, ilgili kriter için ortalamanın üstünde bir sayısal değere sahip alternatifini seçmek istiyor ama bu değerden daha küçük olan değerleri de dikkate almak istiyorsa, kullanılacak olan tercih fonksiyonu üçüncü tip yani “V tipi” olmalıdır.
- Dördüncü Tip (Seviyeli): Kararı veren kişi, kararını ilgili kriter için belli bir sayısal değer aralığında belirlemek istiyorsa, kullanılacak tercih fonksiyonu dördüncü tip yani “Seviyeli” olmalıdır.
- Beşinci Tip (Doğrusal): Kararı veren kişi, ilgili kriter için tercihini ortalamanın üstünde değere sahip alternatiften yana kullanmak istiyorsa, beşinci tip yani “Doğrusal” tercih fonksiyonunu tercih etmelidir.
- Altıncı Tip (Gaussian): Kararı veren kişinin tercihinde belirleyici olan durum bir kriter değerlerinin ortalamadan sapma değerleri ise kullanılması gereken altıncı tip yani “Gaussian” tercih fonksiyonu olmalıdır.

Adım 3: Tercih fonksiyonları belirlendikten sonra her bir değerlendirme faktörü için Denklem (8) ve (9)'daki gibi ikili karşılaştırmalar yapılır ve ortak tercih fonksiyonlarının belirlenmesi sağlanır (Şenkayas & Hekimoğlu, 2013).

$$P(a, b) = 0 \quad f(a) \leq f(b) \quad (8)$$

$$P(a, b) = p[f(a) - f(b)] \quad f(a) > f(b) \quad (9)$$

Adım 4: Ortak tercih fonksiyonları kullanılarak karşılaştırılan karar noktalarına ait tercih indeksleri Denklem (10) ile belirlenir.

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^k (w_i p_i(a, b)) \quad (10)$$

Adım 5: Karar noktaları belirlenirken pozitif () değer için Denklem (11) ve negatif () değer için Denklem (12) kullanılır.

$$\varphi^+ = 1/(n-1) \sum \pi(a, x) \quad (11)$$

$$\varphi^- = 1/(n-1) \sum \pi(x, a) \quad (12)$$

Adım 6: PROMETHEE I ile kısmi sıralama belirlenir. Bu aşamada üç durum ile karşılaşırız. Bunlar karar noktasının diğerine üstünlüğü, karar noktalarının farksızlığı ve karar noktalarının birbirleriyle karşılaştırılamamasıdır.

A'nın B'den üstün olduğu durum (Denklem 13):

$$\begin{cases} \varphi^+(a) > \varphi^+(b) \quad \text{ve} \quad \varphi^-(a) < \varphi^-(b) \\ \varphi^+(a) > \varphi^+(b) \quad \text{ve} \quad \varphi^-(a) = \varphi^-(b) \\ \varphi^+(a) = \varphi^+(b) \quad \text{ve} \quad \varphi^-(a) < \varphi^-(b) \end{cases} \quad (13)$$

A'nın B'den farksız olduğu durum (Denklem 14):

$$\varphi^+(a) = \varphi^+(b) \quad \text{ve} \quad \varphi^-(a) < \varphi^-(b) \quad (14)$$

A ile B'nin karşılaştırılamadığı durum (Denklem 15):

$$\begin{cases} \varphi^+(a) > \varphi^+(b) \quad \text{ve} \quad \varphi^- \\ \varphi^+(a) < \varphi^+(b) \quad \text{ve} \quad \varphi^- \end{cases} \quad (15)$$

Adım 7: PROMETHEE II ile tam sıralama belirlenir. Tam sıralama için Denklem (16) kullanılarak tam öncelik değerleri hesaplanır ve bu değerler büyükten küçüğe doğru sıralanır.

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (16)$$

2.3. VIKOR (VİseKriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje)

VIKOR (VİseKriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemi, birbiriyle çelişebilme durumu olan sistemlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir ÇKKV yöntemidir. VIKOR yöntemi çoğunluğun grup faydasını ve karşıt durumun minimum pişmanlığını hesaplayarak karar vericilerin fikir ayrılıkları uzlaştırılabilir. Yöntemin adımları aşağıdaki gibidir (Bircan vd., 2020; Ertuğrul & Karakaşaoğlu, 2009):

Adım 1. Karar matrisi Denklem (17)'de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Adım 2. Her bir kriter için en iyi ve en kötü kriter belirlenir. Kriter maksimizasyon yönlü ise Denklem (18), kriter minimizasyon yönlü ise Denklem (19) kullanılır.

$$\begin{cases} f_i^* = \max_j x_{ij} \\ f_i^- = \min_j x_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} f_i^* = \min_j x_{ij} \\ f_i^- = \max_j x_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

Adım 3. Matris Denklem (20) kullanılarak normalize edilir.

$$r_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (20)$$

Adım 4. Normalize karar matrisi Denklem (21) kullanılarak ağırlıklandırılır.

$$v_{ij} = r_{ij} \times w_i \quad (21)$$

Adım 5. Denklem (22) ve Denklem (23) ile S_i ve R_i değerleri hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \times \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (22)$$

$$R_j = \max_j \left(w_j \times \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right) \quad (23)$$

Adım 6. Denklem (24) ile Q_j değerleri hesaplanır. Denklemde v , w_j ve x_{ij} 'dir. Formülde kullanılan "v" parametresi maksimum grup faydasını ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle "v" maksimum grup faydasını sağlayacak strateji için ağırlığı, (1-v) ise karşıt görüştekilerin minimum pişmanlığının ağırlığını belirtmektedir. v 0 ile 1 arasında bir değer alabilir. Genelde uzlaşma anlamına gelen "0,5" tercih edilir.

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^*)}{S^- - S^*} + \frac{(1-v)(R_j - R^*)}{R^- - R^*} \quad (24)$$

Adım 7. Q_i değerleri hesaplandıktan sonra ilk sırada yer alan alternatifin en iyi olduğunun kabul edilmesi iki koşula bağlıdır. 1. Koşulu gösteren Denklem (25)'e göre en iyi 2. alternatif ve en iyi alternatif farkının DQ 'dan büyük olması gerekir. DQ Denklem (26) ile hesaplanır.

$$Q(A^2) - Q(A^1) > DQ \quad (25)$$

$$DQ = 1/(m - 1) \quad (26)$$

2. Koşula göre ise Q_i değerlerine göre en iyi alternatif, R_i ve S_i değerlerinin en az birinde de en iyi sonucu vermiş olmalıdır.

2.4. Gri İlişkisel Analiz (GİA)

Gri İlişkisel Analiz (GİA), belirsizlikleri çözmeye amacıyla kullanılan gri sistem teorisi temelli bir yöntemdir. Veriler yeterli olduğunda istatistiksel analizlerin yanı sıra diğer ÇKKV yöntemleri gibi karar problemlerinde alternatiflerin sıralanması için de kullanılabilir. GİA temel olarak, tüm alternatiflerin performansını karşılaştırılabilir bir diziye dönüştürür. Referans bir dizi belirlenir ve ardından tüm karşılaştırılabilir diziler ile referans dizi arasındaki gri ilişkisel katsayılar hesaplanır. Son olarak, gri ilişkisel katsayılar kullanılarak gri ilişki derecesi hesaplanır. Gri ilişki derecesi en yüksek olan alternatif en iyi seçenektir. Yöntemin adımları aşağıdaki gibidir (Ecer & Günay, 2014; Şişman & Eleren, 2013):

Adım 1. Denklem (27)'deki gibi karar matrisi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Adım 2. Referans serisi karar matrisinin ilk satırına yazılarak karşılaştırma matrisi oluşturulur.

Adım 3. Fayda kriterleri için Denklem (28), maliyet kriterleri için Denklem (29) kullanılarak veriler normalize edilir.

$$x_i^* = \frac{x_i^{(j)} - \min_{x_i}^{(j)}}{\max_{x_i}^{(j)} - \min_{x_i}^{(j)}} \quad (28)$$

$$x_i^- = \frac{\max_{x_i}^{(j)} - x_i^{(j)}}{\max_{x_i}^{(j)} - \min_{x_i}^{(j)}} \quad (29)$$

Adım 4. Denklem (30) ile mutlak değer matrisi oluşturulur.

$$x_i = \frac{|x_i^{(j)} - x_{ob}^{(j)}|}{\max_{x_i}^{(j)} - \min_{x_i}^{(j)}} \quad (30)$$

Adım 5. Denklem (31) kullanılarak gri ilişkisel katsayı matrisi oluşturulur. 0 ile 1 arasında değer alabilen bir parametre olup genellikle 0,5 olarak tercih edilir.

$$\gamma_{0i}^{(j)} = \frac{\Delta \min + \delta \Delta \max}{\Delta_{0i}^{(j)} + \delta \Delta \max} \quad (31)$$

Adım 6. Denklem (32) ile gri ilişki derecesi hesaplanır. Denklemdeki w_i kriter ağırlığını ifade eder.

$$r_{0i} = \sum_{j=1}^n w_i^{(j)} \gamma_{0i}^{(j)} \quad (32)$$

2.5. Copeland

Aynı karar problemi için ÇKKV yöntemlerinden elde edilen farklı sonuçların birleştirilmesi ve nihai sıralamanın elde edilebilmesi için toplamsal / çarpımsal sıralama kuralı, Borda yöntemi gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri olan Copeland yöntemi diğer yöntemlere kıyasla objektif ve daha istikrarlıdır. Bu nedenle bu çalışmada tercih edilmiştir. Yöntem adımları aşağıda verilmiştir (Güler vd., 2021):

Adım 1. Alternatifler, önem durumuna bağlı olarak sıralanır. Değerlendirilen alternatif, yöntemden elde edilen sonuca göre öncelikli sıradaysa 1 değerini; aksi durumda ise 0 değerini alır. Bu ifade Denklem (33)'te açıklanmıştır.

$$f_s(i, j) = \begin{cases} 1, & s_k(A_i) < s_k(A_j) \\ 0, & s_k(A_i) > s_k(A_j) \quad i \neq j \\ \text{boş}, & s_k(A_i) = s_k(A_j) \end{cases} \quad (33)$$

Adım 2. Her alternatifin ÇKKV yöntemlerinden elde ettiği toplam oy sayısı, k sıra sayısı ve y kullanılan ÇKKV yöntemi sayısı olmak üzere Denklem (34) ile hesaplanır.

$$T(i, j) = \sum_{k=1}^y f_s(i, j), \quad i \neq j \quad (34)$$

Adım 3. Galibiyet, yenilgi ve beraberlik değerlendirmesi için Denklem (35) kullanılır.

$$G(i, j) = \begin{cases} 1, & T(i, j) > (y - T(i, j)) \\ \frac{1}{2}, & T(i, j) = (y - T(i, j)) \quad i \neq j \\ -1, & T(i, j) < (y - T(i, j)) \end{cases} \quad (35)$$

Adım 4. Copeland puanı (Denklem (36) ile hesaplanır. Burada, galibiyet puanı, beraberlik puanı, yenilgi puanı, n alternatif sayısıdır. Galibiyet ve beraberlik puanı toplamının yenilgi puanına farkı ile alternatifin Copeland puanı hesaplanır.

$$\begin{aligned} GP_i &= \sum_{j=1}^n G(i, j), \quad G(i, j) > 0, \quad n \\ BP_i &= \sum_{j=1}^n G(i, j), \quad G(i, j) = 1/2, \quad n \\ YP_i &= \sum_{j=1}^n G(i, j), \quad G(i, j) < 0, \quad n \\ CP_i &= GP_i + BP_i - YP_i \end{aligned} \quad (36)$$

2.6. Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı

Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı, iki değişken arasındaki ilişkinin derecesini bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu katsayı -1 ile +1 arasında değerler almaktadır. İlişkinin az olduğu durumda katsayı sıfıra yaklaşırken, kuvvetli bir ilişki olduğunda değer -1 ve +1'e yaklaşmaktadır (Altaş vd., 2012).

3. Vaka Çalışması

Bu çalışmada, Tablo 1'de gösterilen 36 OECD ülkesinin enerji sürdürülebilirliği 15 kriter kullanılarak Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Kosta Rika ve İzlanda, veri yetersizliğinden dolayı çalışmaya katılmamıştır. Veriler; Our World in Data (2023), U.S. Energy Information Administration – EIA (2023), The World Bank (2023), OECD (2023) ve IRENA (2023) kaynaklarından elde edilmiştir.

Tablo 1: OECD Ülkeleri

Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler
1	Türkiye	10	Hollanda	19	Lüksemburg	28	Estonya
2	ABD	11	İsveç	20	Japonya	29	Yeni Zelanda
3	Fransa	12	İspanya	21	Güney Kore	30	Çekya
4	Kanada	13	Portekiz	22	Finlandiya	31	Macaristan
5	Avusturya	14	Norveç	23	İsrail	32	Slovenya
6	İngiltere	15	İsviçre	24	Letonya	33	Polonya
7	Belçika	16	Danimarka	25	Kolombiya	34	Şili
8	Almanya	17	Yunanistan	26	Litvanya	35	Slovakya
9	İtalya	18	İrlanda	27	Avustralya	36	Meksika

Çalışmada kullanılan kriterler, kriterlerin kodları, birimleri, fayda / maliyet türleri, veri kaynakları ve referans çalışmalar Tablo 2’de gösterilmiştir. Ayrıca karbon yoğunluğu da sürdürülebilirlik açısından önemli görülerek çalışmaya dâhil edilmiştir.

Tablo 2: Kriterler ve Ayrıntıları

Kod	Kriter	Birim	Kriter Tipi	Veri Kaynağı	Referans
C ₁	Fosil Yakıt Tüketimi	kWh/kişi	Maliyet	Our World in Data, 2023	Tezcan, 2014
C ₂	CO ₂ Emisyonu	t/kişi	Maliyet	Our World in Data, 2023	Samut, 2023
C ₃	Sera Gazı Emisyonu	t/kişi	Maliyet	Our World in Data, 2023	Samut, 2023
C ₄	Karbon Yoğunluğu	gCO ₂ e	Maliyet	Our World in Data, 2023	-
C ₅	Enerji Yoğunluğu	1000Btu/2015\$ GDP PPP	Maliyet	U.S. Energy Information Administration, 2023	Doğan & Yıllankırkan, 2015
C ₆	Elektrik Talebi	tWh	Maliyet	Our World in Data, 2023	Meşin, 2020
C ₇	Yenilenebilir Enerji Tüketimi	kWh/kişi	Fayda	Our World in Data, 2023	Samut, 2023
C ₈	Birincil Enerji Arzı	Toe/1000 US \$	Fayda	OECD, 2023	Karık, 2017
C ₉	Hidroelektrikten elektrik Üretimi	kWh/kişi	Fayda	Our World in Data, 2023	Karık, 2017
C ₁₀	Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi	kWh/kişi	Fayda	Our World in Data, 2023	Karık, 2017
C ₁₁	Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi	kWh/kişi	Fayda	Our World in Data, 2023	Karık, 2017
C ₁₂	GSYİH	US\$/kişi	Fayda	The World Bank, 2023	Develi & Korkmaz, 2012
C ₁₃	AR-GE	Milyon USD	Fayda	OECD, 2023	Kılınç & Şahbaz Kılınç, 2021
C ₁₄	Yenilenebilir Enerji Kapasitesi	MW	Fayda	IRENA, 2023	Ürtün & Soyu, 2016
C ₁₅	Net Etkin Enerji	GJ	Fayda	OECD, 2023	Aydın, 2016

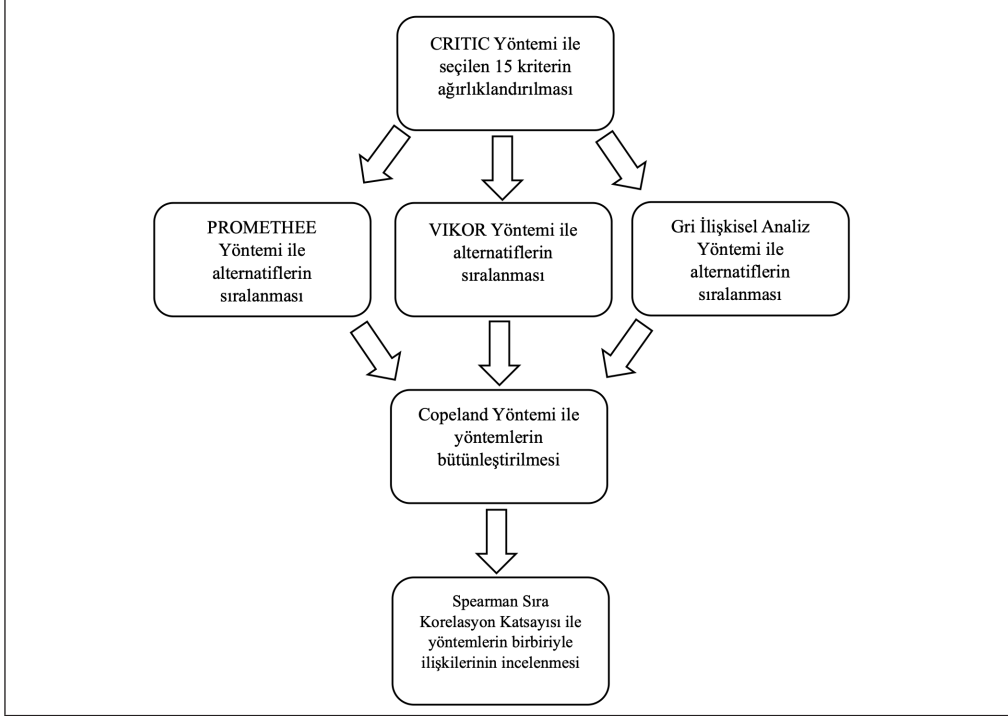
Belirlenen alternatif ve kriterler doğrultusunda Tablo 3'te gösterilen veri seti oluşturulmuştur.

Tablo 3: Veri Seti

Kriterlerin Yönleri	min	min	min	min	min	min	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks
Kriterler ve Alternatifler	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
Türkiye	18.661	5,26	7,06	432	2,57	329	0,060	3.695	658	153	368	9.661	23.835	53.233	1,52
ABD	62.365	14,9	17,6	379	4,77	4192	0,103	8.166	731	488	1.122	70.249	195.212	325.391	0,89
Fransa	20.192	4,74	6,06	67	3,39	505,4	0,082	5.535	924	244	571	43.659	491.280	59.546	4,6
Kanada	65.082	14,30	20,4	128	8,18	587,9	0,168	30.324	9.885	134	923	51.988	575.927	102.932	2,22
Avusturya	28.860	7,24	8,23	148	3,15	74,5	0,073	17.303	4.343	312	755	53.638	128.545	22.014	5,13
İngiltere	22.610	5,15	6,26	268	2,47	331,3	0,056	5.320	83	185	966	46.510	521.544	50.293	6,05
Belçika	48.190	8,24	10,9	157	4,84	91,2	0,099	6.089	36	484	1.033	51.247	42.335	12.402	3,78
Almanya	31.834	8,09	8,94	366	3,04	563,7	0,070	8.190	236	592	1.375	51.204	539.975	138.151	6,19
İtalya	24.328	5,55	6,28	341	2,88	329,2	0,064	5.472	766	423	353	35.658	195.212	56.987	6,55
Hollanda	47.774	8,06	10,2	389	3,91	121,9	0,075	6.824	5	657	1.028	57.768	318.490	22.954	10,15
İsveç	17.011	3,42	6,22	46	4,01	146,2	0,088	30.865	7.059	146	2.602	61.029	196.733	34.525	3,98
İspanya	22.413	4,92	5,99	194	3,23	271,7	0,068	7.308	624	571	1.307	30.104	309.506	61.517	4,32
Portekiz	17.376	3,96	5,01	219	2,83	54,2	0,060	8.444	1.157	218	1.285	24.568	45.392	15.061	5,29
Norveç	29.057	7,57	13,4	26	5,86	133,6	0,088	75.242	25.663	6	2.095	89.154	246.741	39.769	4,75
İsviçre	16.156	4,02	4,74	47	1,84	16,4	0,038	30.865	4.252	333	17	91.992	184.658	18.813	6,85
Danimarka	18.821	5,05	7,61	221	2,03	37,9	0,054	12.507	3	224	2.742	68.008	73.881	10.340	7,6
Yunanistan	22.359	5,39	5,72	353	3,56	58,3	0,068	5.431	565	503	1.003	20.193	195.212	11.520	5,59
İrlanda	28.452	7,53	11,7	364	1,24	33,2	0,028	6.143	150	18	1.961	100.172	18.355	4.813	6,25
Lüksemburg	58.533	13,1	14,5	187	2,45	7,0	0,050	4.671	172	282	485	133.590	195.212	456	6,88
Japonya	33.750	8,57	8,86	479	3,47	958,5	0,078	4.520	635	712	72	39.313	957.925	111.860	2,38
Güney Kore	57.231	11,9	12,7	458	5,69	588,5	0,130	2.511	59	462	61	34.998	296.975	24.365	3,23
Finlandiya	27.204	6,79	14,4	146	4,54	89,3	0,130	20.123	2.852	54	1.478	53.655	108.921	9.629	4,3
İsrail	31.065	6,13	8,08	550	2,72	66,6	0,059	1.684	2	521	21	52.171	195.212	2.614	7,00
Letonya	16.712	3,88	7,88	224	2,77	7,6	0,080	5.388	1.446	5	75	21.148	195.212	1.857	3,31
Kolombiya	6.947	1,78	5,81	182	2,28	81,4	0,056	3.425	1.130	6	1	6.104	195.212	12.553	0,68
Litvanya	22.283	4,98	8,85	245	2,71	13,2	0,076	2.390	136	68	488	23.723	4.563	1.266	4,08
Avustralya	53.369	15,1	23,2	531	4,68	247,1	0,104	7.928	569	1.082	1.007	60.443	81.325	36.617	1,32
Estonya	42.158	7,86	11,9	481	2,43	9,8	0,105	7.103	15	263	549	27.944	507	989	4,45
Yeni Zelanda	27.225	6,59	13,4	133	3,97	43,4	0,101	18.325	4.675	39	511	48.781	7.990	7.562	3,11
Çekya	33.716	9,24	9,60	406	4,20	72,7	0,106	2.881	229	221	57	26.821	45.387	4.415	3,61
Macaristan	22.608	4,99	5,80	233	3,41	48,7	0,087	1.982	22	391	68	18.728	33.990	3.022	2,67
Slovenya	21.412	5,92	8,38	239	3,43	15,3	0,082	6.641	2.222	212	5	29.291	195.212	1.606	4,67
Polonya	29.710	8,58	10	660	3,35	179,7	0,086	2.500	61	103	424	18.000	195.212	15.424	4,39
Şili	17.422	4,38	6,36	417	3,50	81,5	0,082	6.288	845	554	370	16.265	1.523	14.890	1,01
Slovakya	25.023	6,48	7,73	168	4,11	30,7	0,099	3.555	835	123	0	21.392	8.978	2.376	3,03
Meksika	13.082	3,21	6,38	400	3,07	339,4	0,082	1.565	272	112	166	10.046	5.443	29.443	1,41

Bölüm 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4’te ayrıntıları verilen metodoloji Şekil 1’deki akış şemasında gösterilmiştir.

Şekil 1: Akış Şeması



3.1. Kriterlerin Ağırlıklandırılması

CRITIC yöntemi ile elde edilen ağırlıklandırmaya göre, öncelikli kriter 0,0816 ağırlık ile “güneş enerjisinden elektrik üretimi” dir. Tüm kriterlerin ağırlıkları Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4: Kriter Ağırlıkları

Sıra	Kriterler	Kriter Ağırlıkları	Sıra	Kriterler	Kriter Ağırlıkları
1	Güneş Enerjiden Elektrik Üretimi	0,0816	9	GSYİH	0,0667
2	Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi	0,0768	10	Net Etkin Enerji	0,0655
3	Fosil Yakıt Tüketimi	0,0755	11	Yenilenebilir Enerji Kapasitesi	0,0646
4	Birincil Enerji Arzı	0,0739	12	Enerji Yoğunluğu	0,0605
5	CO ₂ Emisyonu	0,0727	13	Elektrik Talebi	0,0526
6	Sera Gazı Emisyonu	0,0704	14	Hidroelektrikten Elektrik Üretimi	0,0514
7	Karbon Yoğunluğu	0,0691	15	Yenilenebilir Enerji Tüketimi	0,0512
8	AR-GE	0,0675			

3.2. Alternatiflerin Sıralanması

PROMETHEE yönteminde herhangi bir kriter için ortalamanın üstünde değere sahip alternatif tercih edilmek istenmiş ancak bu değerden daha küçük olan değerlerin de analiz içinde kalması tercih edilmiştir. Bu nedenle V-tipi tercih fonksiyonu kullanılmıştır. PROMETHEE yöntemine göre tüm alternatiflerin sıralamaları Tablo 5'teki gibidir. Tablo 5'e göre, en iyi alternatif İsveç olurken, Güney Kore son sırada yer almıştır.

Tablo 5: PROMETHEE Yöntemine Göre Alternatiflerin Sıralanması

Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler				
1	İsveç	0,2248	10	Finlandiya	0,0666	19	İsrail	-0,0191	28	Lüksemburg	-0,0901
2	Norveç	0,1832	11	Hollanda	0,0631	20	Kanada	-0,0291	29	Estonya	-0,0971
3	İsviçre	0,179	12	Japonya	0,0435	21	Letonya	-0,0298	30	Meksika	-0,1037
4	Almanya	0,1595	13	İtalya	0,0392	22	Kolombiya	-0,0419	31	Türkiye	-0,1067
5	Danimarka	0,1382	14	Portekiz	0,0352	23	Macaristan	-0,0421	32	Çekya	-0,1104
6	İspanya	0,1211	15	Yunanistan	0,0325	24	Belçika	-0,0446	33	Polonya	-0,1198
7	Fransa	0,0961	16	İrlanda	0,0263	25	Şili	-0,0489	34	ABD	-0,1727
8	Avusturya	0,0753	17	Slovenya	-0,0059	26	Litvanya	-0,0596	35	Avustralya	-0,1819
9	İngiltere	0,0741	18	Yeni Zelanda	-0,0117	27	Slovakya	-0,0603	36	Güney Kore	-0,1821

Tüm alternatiflerin VIKOR yöntemine göre sıralaması Tablo 6'daki gibidir. Tablo 6'da gösterilen Q_i değerlerine göre en iyi alternatif Koşul 1 ve Koşul 2'yi de sağlayan Almanya olurken Güney Kore son sırada yer almıştır.

Tablo 6: VIKOR Yöntemine Göre Alternatiflerin Sıralanması

Sıra	Ülkeler	$v=0,5$	Sıra	Ülkeler	$v=0,5$	Sıra	Ülkeler	$v=0,5$	Sıra	Ülkeler	$v=0,5$
1	Almanya	0,1368	10	İngiltere	0,4413	19	Macaristan	0,7032	28	Slovakya	0,7899
2	İspanya	0,1730	11	İsviçre	0,4782	20	Türkiye	0,7107	29	Belçika	0,7991
3	Danimarka	0,2922	12	İtalya	0,4884	21	Slovenya	0,7206	30	Kolombiya	0,8104
4	İsveç	0,3209	13	Norveç	0,5205	22	İsrail	0,7299	31	Letonya	0,8105
5	Fransa	0,3376	14	Şili	0,5836	23	Meksika	0,7359	32	ABD	0,8246
6	Hollanda	0,3550	15	Lüksemburg	0,6164	24	İrlanda	0,7512	33	Çekya	0,8395
7	Avusturya	0,3571	16	Japonya	0,6366	25	Litvanya	0,7614	34	Polonya	0,8420
8	Yunanistan	0,4042	17	Finlandiya	0,6723	26	Yeni Zelanda	0,7830	35	Avustralya	0,8434
9	Portekiz	0,4294	18	Estonya	0,6762	27	Kanada	0,7884	36	Güney Kore	0,8918

GİA yönteminin sonuçları Tablo 7'deki gibidir. Tablo 7'ye göre İsveç en iyi alternatiftir, Güney Kore son sıradaki alternatif olmuştur.

Tablo 7: GİA Yöntemine Göre Alternatiflerin Sıralanması

Sıra	Ülkeler	r_{oi}	Sıra	Ülkeler	r_{oi}	Sıra	Ülkeler	r_{oi}	Sıra	Ülkeler	r_{oi}
1	İsveç	0,6101	10	İrlanda	0,5288	19	Japonya	0,5142	28	Türkiye	0,4923
2	İsviçre	0,6062	11	Yunanistan	0,5259	20	Meksika	0,5132	29	Kanada	0,4913
3	Norveç	0,5998	12	Hollanda	0,5234	21	Finlandiya	0,5123	30	Belçika	0,4782
4	Danimarka	0,5936	13	Letonya	0,5215	22	Lüksemburg	0,5088	31	Estonya	0,4727
5	Kolombiya	0,5599	14	Almanya	0,5193	23	Slovenya	0,5059	32	Avustralya	0,4716
6	Fransa	0,5514	15	İtalya	0,5188	24	Litvanya	0,5041	33	Çekya	0,4632
7	Portekiz	0,5505	16	Avusturya	0,5181	25	İsrail	0,5017	34	Polonya	0,4597
8	İspanya	0,5443	17	Macaristan	0,5161	26	Slovakya	0,4968	35	ABD	0,4544
9	İngiltere	0,5371	18	Şili	0,5144	27	Yeni Zelanda	0,4940	36	Güney Kore	0,4412

3.3. Copeland Yöntemi ile Tam Sıralamanın Elde Edilmesi

ÇKKV yöntemlerinden elde edilen sıralamalar birbirinden farklı olduğundan Copeland yöntemi ile ortak bir sıralama elde etmek amaçlanmıştır. Böylelikle, PROMETHEE, VIKOR ve GİA yöntemleri bütünleştirilmiştir. Bütünleştirme sonucuna göre; İsveç en iyi alternatif olurken Güney Kore son sırada yer almışlar. Nihai sıralama Tablo 8'deki gibidir.

Tablo 8: Copeland Yöntemine Göre Alternatiflerin Nihai Sıralaması

Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler	Sıra	Ülkeler				
1	İsveç	35	10	İngiltere	17	19	Slovenya	-3	28	Slovakya	-19
2	İsviçre	33	10	Portekiz	17	20	Lüksemburg	-5	29	Türkiye	-21
3	Norveç	31	12	Yunanistan	13	20	İsrail	-5	29	Estonya	-21
4	Almanya	29	13	İtalya	11	20	Kolombiya	-5	31	Belçika	-23
5	Danimarka	27	14	Japonya	7	23	Letonya	-7	32	Avustralya	-27
6	İspanya	25	15	İrlanda	5	24	Yeni Zelanda	-11	33	Çekya	-29
7	Fransa	23	15	Finlandiya	5	25	Litvanya	-13	34	Polonya	-31
8	Avusturya	19	17	Şili	1	25	Meksika	-13	35	ABD	-33
8	Hollanda	19	18	Macaristan	-1	27	Kanada	-15	36	Güney Kore	-35

3.4. Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı ile Yöntemlerin Karşılaştırılması

Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı sonuçlarına göre Copeland yöntemi ile elde edilen nihai sıralamanın tüm yöntemlerden elde edilen sıralamalar ile yüksek düzeyde ilişkisi olduğu tespit edilmiştir. Birbirine en yakın sıralamalar 0,950 korelasyon katsayısı ile Copeland-PROMETHEE yöntemlerinden elde edilen sıralamalar olurken, birbirinden en farklı sıralamalar 0,735 korelasyon katsayısı ile VIKOR-GIA yöntemlerinden elde edilen sıralamalar olmuştur. Sonuçlar Tablo 9'daki gibidir.

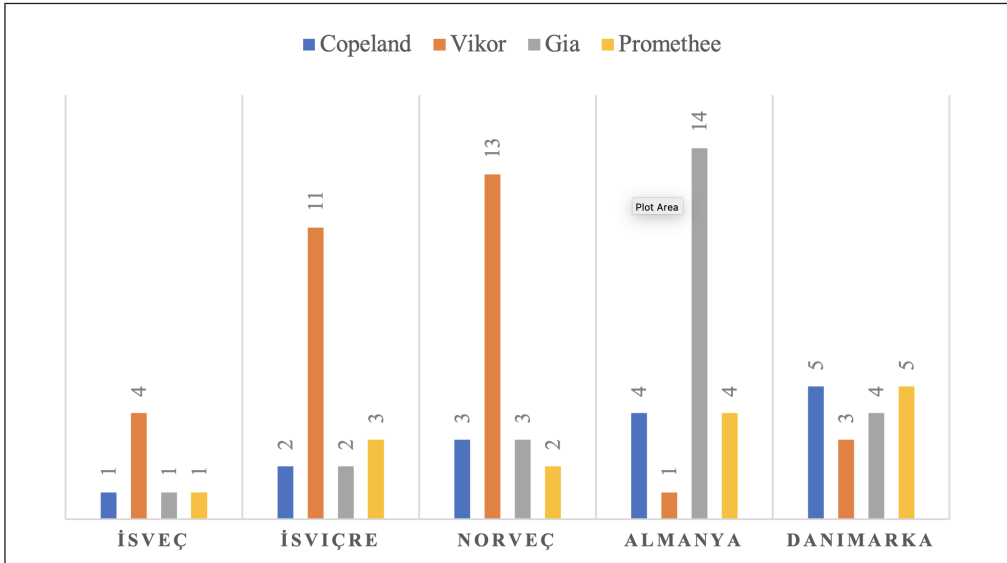
Tablo 9: Spearman Sıra Korelasyon Katsayıları

Yöntemler	PROMETHEE	VIKOR	GİA	Copeland
PROMETHEE	1,000	0,821**	0,830**	0,950**
VIKOR	0,821**	1,000	0,735**	0,899**
GİA	0,830**	0,735**	1,000	0,907**
Copeland	0,950**	0,899**	0,907**	1,000

**Korelasyon 0,01 önem düzeyinde anlamlıdır.

3.5. Bulgular

Şekil 2: Enerji Sürdürülebilirliğinde İlk 5 Ülke

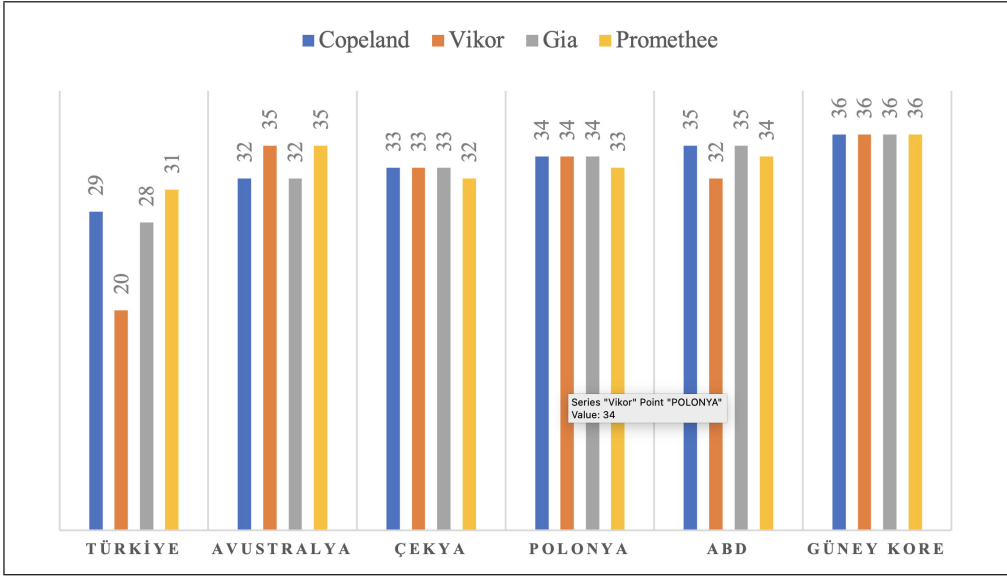


Copeland yöntemine göre enerji sürdürülebilirliğinde en iyi 5 ülke ve bu ülkelerin diğer yöntemlere göre sıralamaları Şekil 2’de gösterilmiştir. Copeland yöntemine göre en iyi 5 ülke İsveç, İsviçre, Norveç, Almanya ve Danimarka olmuştur. İsveç; PROMETHEE ve GİA yöntemlerinde 1., VIKOR yönteminde ise 4. olarak Copeland yöntemine göre 1. sırada yer almıştır. Böylece tüm yöntemlere göre ilk 5’te yer almıştır. İsviçre, VIKOR yönteminde 11. olsa da GİA yönteminde 2., PROMETHEE yönteminde 3. olduğundan Copeland’a göre 2. sırada yer alabilmiştir. Benzer şekilde Norveç, VIKOR yönteminde 13. olsa da GİA yönteminde 3., VIKOR yönteminde 2. olarak Copeland’a göre 3. sıradadır. GİA yöntemine göre 14. olan Almanya, VIKOR yönteminde 1. ve PROMETHEE yönteminde 4. olduğundan Copeland’a göre dördüncü sırada yer almıştır. VIKOR yönteminde 3., GİA yönteminde 4. ve PROMETHEE yönteminde 5. olan Danimarka Copeland yöntemine göre de 5. sırada yer almıştır. İsveç ve Danimarka için 4 yöntemde de birbirine yakın sıralamalar elde edilirken; İsviçre, Norveç ve Almanya ülkelerinde VIKOR ve GİA yöntemlerine göre yapılan sıralamalarda bazı sapmalar

yaşandığı gözlemlenmiştir. Ancak bu ülkeler, 4 yöntemden 3'üne göre ilk sıralarda yer aldığından Copeland'a göre ilk 5'e girebilmiştir.

Enerji sürdürülebilirliği açısından başarılı olan ülkeler; CRITIC yöntemine göre ağırlığı en yüksek 5 kriter içinde yer alan fosil yakıt tüketimi, CO₂ emisyonu gibi maliyet kriterlerinde minimum değerlere ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, birincil enerji arzı gibi fayda kriterlerinde maksimum değerlere sahiptir. Bu ülkeler diğer kriterler içinde ortalama değerlere sahip olduğundan ilk sırada yer alabilmişlerdir.

Şekil 3: Enerji Sürdürülebilirliğinde Son 5 Ülke ve Türkiye



Copeland yöntemine göre enerji sürdürülebilirliğinde son 5 ülke ile Türkiye ve bu ülkelerin diğer yöntemlere göre sıralamaları Şekil 3'te gösterilmiştir. Avustralya, Çekya, Polonya ve ABD sıralamalarda bazı değişiklikler olsa da tüm yöntemlerde son 5'te yer almıştır. Güney Kore dört yönteme göre de son sırada yer aldığından Copeland yöntemine göre de son sıradadır. Türkiye, VIKOR yönteminde 20., GİA yönteminde 28. ve PROMETHEE yönteminde 31. sırada yer alarak Copeland yönteminde 29. olmuştur. Enerji sürdürülebilirliği bakımından başarılı olan İsveç, İsviçre, Danimarka gibi ülkelerle kıyaslandığında Türkiye'nin "birincil enerji arzı, hidroelektrikten elektrik üretimi, GSYİH, AR-GE" gibi kriterlerde iyileşme sağlaması ülkeyi daha ön sıralara taşıyabilir.

4. Sonuç ve Değerlendirmeler

Enerjiye duyulan ihtiyaç gün geçtikçe arttığından enerji kaynakları tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Enerji kaynaklarımızı koruyabilmek ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak için "enerji sürdürülebilirliği" üzerinde önemle durulması gereken bir kavramdır.

Bu çalışmada 36 OECD ülkesinin enerji sürdürülebilirliği performanslarını karşılaştırmak amaçlanmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için ÇKKV yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Belirlenen 15 kriter CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılmış, PROMETHEE, VIKOR, GİA yöntemleri ile alternatifler birbiri ile karşılaştırılarak sıralanmıştır. Son olarak, Copeland yöntemi ile bu üç yöntem bütünleştirilerek tek bir sıralama elde edilmiştir. Yöntemlerin birbiri ile olan ilişkisi Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı kullanılarak gözlemlenmiştir.

CRITIC yöntemi ile elde edilen ağırlıklandırmaya göre, 0,0816 kriter ağırlığı ile “güneş enerjisinden elektrik üretimi” en yüksek ağırlığa sahiptir. Bu kriteri 0,0768 ile “rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi” takip etmiştir. 0,0755 ile “fosil yakıt tüketimi” üçüncü sırada yer almıştır.

PROMETHEE yönteminde enerji sürdürülebilirliği bakımından ilk beş ülke sıralaması; İsveç, Norveç, İsviçre, Almanya ve Danimarka şeklindedir. Son beş ise; Çekya, Polonya, ABD, Avustralya ve Güney Kore’dir. VIKOR yönteminde ilk beş ülke; Almanya, İspanya, Danimarka, İsveç ve Fransa’dır. Son beş ise ABD, Çekya, Polonya, Avustralya ve Güney Kore’dir. GİA yönteminde ilk beş ülke İsveç, İsviçre, Norveç, Danimarka ve Kolombiya olurken son beş ülke ise Avustralya, Çekya, Polonya, ABD ve Güney Kore’dir. Yöntemlerden elde edilen sıralamalar farklı olduğundan Copeland yöntemi ile tam sıralama elde edilmiştir. Copeland yöntemine göre ilk beş ülke İsveç, İsviçre, Norveç, Almanya ve Danimarka’dır. Son beş ülke Avustralya, Çekya, Polonya, ABD ve Güney Kore’dir. İsveç ve Danimarka dört yöntemde de ilk beşte yer almıştır. Güney Kore, Avustralya, ABD, Polonya ve Çekya dört yöntemde de son beşte yer almıştır. Türkiye; PROMETHEE yönteminde 31.sırada, VIKOR yönteminde 20. sırada, GİA yönteminde 28.sırada ve Copeland yönteminde 29. sıradadır.

Copeland, en iyi ve en kötü alternatif bakımından PROMETHEE ve GİA yöntemleri ile benzerlik göstermiştir. Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı sonuçlarına göre, Copeland yöntemine en yakın yöntem 0,950 benzerlik katsayısı ile PROMETHEE yöntemi olmuştur. PROMETHEE yöntemini 0,907 ile GİA ve 0,899 ile VIKOR yöntemi takip etmektedir. PROMETHEE yöntemi, Copeland yönteminden sonra en çok 0,830 katsayı ile GİA ile benzerdir. Son olarak, PROMETHEE’nin VIKOR ile benzerliği ise 0,821 olarak hesaplanmıştır. VIKOR yönteminin diğer yöntemlerle benzerlikleri en yakından en uzağa; Copeland, PROMETHEE ve GİA şeklindedir. Genel olarak birbirine en benzer sıralamalar 0,950 ile Copeland-PROMETHEE yöntemlerinden elde edilen sıralamalar olurken, birbirine en uzak sıralamalar 0,735 ile VIKOR-GİA sıralamalarıdır.

Tablo 3’e göre; İsveç, minimum değerde olması gereken C_1 - fosil yakıt tüketimi, C_2 - CO₂ emisyonu, C_3 -sera gazı emisyonu ve C_4 - karbon yoğunluğu kriterlerinde düşük değerlerden birini almıştır. Maksimum değer olması gereken C_7 - yenilenebilir enerji tüketimi, C_8 -birincil enerji arzı, C_9 -hidroelektrikten elektrik üretimi, C_{11} - rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi ve C_{12} -GSYİH kriterlerinde ise yüksek değerlerden birini alarak enerji sürdürülebilirliğinde en başarılı ülkelerden biri olmuştur. C_5 -enerji yoğunluğu, C_6 -elektrik talebi, C_{10} -güneş enerjisinden elektrik üretimi, C_{13} AR-GE, C_{14} -yenilenebilir enerji kapasitesi ve C_{15} -net etkin enerji kriterlerinde de kriterlerin yönlerine göre iyi değerler almıştır. İsviçre; bütün maliyet kriterlerinde düşük değerlerden birini almıştır. C_3 -sera gazı emisyonu kriterinde ise en düşük değerlerin sahibidir. Fayda kriterlerinden olan C_8 - birincil enerji arzı, C_{12} - GSYİH, C_{13} -AR-GE ve C_{15} -net etkin enerji için ülkeler arasında en yüksek değerlerden birini almıştır. Norveç, maliyet kriteri olan C_4 -karbon yoğunluğunda en iyi değere sahiptir. Fayda kriteri olan C_8 -birincil enerji arzı ve C_9 -hidroelektrikten elektrik üretiminde de maksimum değerleri almıştır. Alman-

ya, C_{13} -AR-GE, C_{14} -yenilenebilir enerji kapasitesi ve C_{15} -net etkin enerji fayda kriterlerinde iyi değerler elde ederken; Danimarka, C_1 -fosil yakıt tüketimi, C_5 -enerji yoğunluğu, C_6 -elektrik talebi ve C_{15} -net etkin enerji maliyet ve fayda kriterlerinde iyi değerlere sahiptir. Ayrıca C_{11} -rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde 2.724 kWh/kişi ile en iyi ülke olmuştur. ABD, Kanada, Avustralya gibi ülkeler genel olarak fayda kriterleri açısından başarılı olsalar da maliyet kriterleri düşük değerlere sahip değildir. Kanada, maliyet kriteri olan C_1 -fosil yakıt tüketiminde 65.082 kWh/kişi ile ve C_5 -enerji yoğunluğunda 8,18 1000Btu/2015\$ GDP PPP ile maksimum değere sahiptir. Avustralya C_2 -CO₂ emisyonunda 15,1 t/kişi ve C_3 -sera gazı emisyonunda 23,2 t/kişi ile maksimum değeri almıştır. ABD ise C_6 - elektrik talebinde 4.192 tWh maksimum değerine sahiptir. Polonya, Çekya ve Güney Kore gibi ülkeler genel olarak hem maliyet hem de fayda kriterlerinde iyi değerlere sahip olamadığından son sıralarda bulunmaktadır. Türkiye, C_1 - fosil yakıt tüketimi, C_2 - CO₂ emisyonu ve C_5 - enerji yoğunluğu gibi minimum olması gereken kriterlerde başarılı olmuştur. Ancak, C_8 -birincil enerji arzı, C_9 -hidroelektrikten elektrik üretimi, C_{12} -GSYİH ve C_{13} -AR-GE gibi fayda kriterlerinde düşük değerlere sahiptir.

Çalışmada ele alınan kriterler kapsamında; İsveç, İsviçre, Norveç, Almanya, Danimarka gibi ülkeleri enerji sürdürülebilirliği bakımından başarılı ülkeler olarak değerlendirebilmek mümkündür. Güney Kore, ABD, Avustralya, Çekya, Polonya gibi ülkelerin ise çeşitli politikalar düzenlemeleri önerilebilir. Enerji sürdürülebilirliği için öncelikle yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etmek önemlidir. Örneğin, politika yapıcılar özel sektör ve bireyler için vergi indirimleri, düşük faizli krediler, sübvansiyonlar gibi destekler sağlamalıdır. Yenilenebilir enerji santralleri ile mevcut enerji şebekeleri arasındaki bağlantı maliyetlerini azaltmak da önemli bir adımdır; bu tür şebeke bağlantı teşvikleri, özel sektörün yenilenebilir enerji projelerine girişini kolaylaştıracaktır. Diğer yandan, karbon emisyonlarının kademeli olarak azaltılması için karbon azaltım programları uygulanabilir; böylece ülkelerin fosil yakıt bağımlılığını azaltma yolunda somut adımlar atması mümkün olur. Enerji verimliliğini artırmak için binalar, araçlar ve sanayi tesisleri gibi farklı alanlarda daha sıkı enerji verimliliği standartları belirlenmelidir. Enerji verimliliği yüksek binalar ve enerji tasarrufu sağlayan teknolojiler desteklenerek toplam enerji tüketimi azaltılabilir. Bunun yanında sanayi sektöründe enerji tasarrufunu teşvik etmek amacıyla enerji verimliliği sağlayan cihaz ve ekipmanların kullanımını desteklemek için finansal yardımlar sağlanabilir. Enerji verimliliğini teşvik eden bu önlemler, ülkelerin toplam enerji talebini azaltmalarına katkı sunar. Aynı zamanda, rüzgâr ve güneş enerjisi santralleri için yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek bölgelerde altyapının güçlendirilmesi ve santral kurulması için alan tahsisi yapılabilir. Bu sayede yenilenebilir enerji altyapısı genişlerken, ülkeler enerji üretimlerini çeşitlendirebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamak adına enerji depolama çözümlerine yönelik yatırımlar da artırılmalıdır. Toplumun enerji sürdürülebilirliğine katkıda bulunabilmesi için kamu farkındalığı kampanyaları düzenlenmeli ve yenilenebilir enerji ile enerji verimliliği konularında bilinçlendirme çalışmaları yapılmalıdır. Bu tür kampanyalar, bireylerin enerji tüketim alışkanlıklarını değiştirmelerine ve sürdürülebilir bir yaşam tarzı benimsemelerine yardımcı olabilir. Yenilenebilir enerji sektöründe çalışabilecek uzman iş gücünün yetişmesi için eğitim ve beceri geliştirme programlarının artırılması da önemlidir. Böylelikle, yerel iş gücü yenilenebilir enerji sektöründe istihdam edilerek hem sektörel gelişim sağlanır hem de ekonomik katkı elde edilir. Son olarak, ülkeler sürdürülebilir enerji geçişi için uzun vadeli enerji hedefleri belirlemelidir; bu hedefler, enerji üretiminde yenilenebilir enerji oranının artırılması veya fosil yakıtların kademeli olarak azaltılması gibi somut amaçlar içermelidir. Bu çabaların yanı sıra, sürdürülebilir enerji potansiyeli yüksek ülkelerle

işbirliği yapılarak yenilenebilir enerji teknolojileri, finansal destekler ve sürdürülebilir enerji politikaları geliştirilmesi konusunda karşılıklı destek sağlanabilir. Böylece, düşük performansı gösteren ülkeler hem kendi enerji politikalarını güçlendirir hem de uluslararası düzeyde sürdürülebilir enerjiye geçişi hızlandıran bir yaklaşım benimsemiş olur.

İlerleyen çalışmalarda, ülkelerin enerji sürdürülebilirliği performansları farklı dönemler için analiz edilerek, zaman içerisindeki değişim incelenebilir. Bu tür bir analiz, ülkelerin hangi enerji politikalarının daha etkin olduğunu ortaya koyabilir ve sürdürülebilir enerji hedeflerine yönelik ilerleme kaydeden ülkeler için iyi örnekler oluşturabilir. Bir ülkenin enerji sürdürülebilirliğini bütün olarak ele almak yerine, ülke içindeki farklı bölgeler için enerji göstergeleri bakımından detaylı analizler yapılarak bölgeler arası farklılıklar incelenebilir. CRITIC yöntemine alternatif olarak, AHP, Entropi gibi diğer kriter ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Ülkelerin enerji sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kriterler, sektörel perspektifte ayrıştırılabilir. Sürdürülebilirlik analizleri, sanayi, tarım, hizmet gibi sektörlerdeki enerji tüketim ve üretim göstergeleriyle yapılarak sektör bazlı hedefler ortaya konabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı

Yazar 1, verilerin temini ve metodolojinin belirlenmesi, Yazar 2 literatür taraması ve verilerin analizi, Yazar 3 makalenin yazımı ve sonuçların değerlendirilmesi konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kaynakça

- Akçakanat, Ö., Aksoy, E., & Teker, T. (2018). CRITIC ve MDL temelli EDAS yöntemi ile TR-61 bölgesi bankalarının performans değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(32), 1-24.
- Altaş, D., Kaspar, Ç., & Ergüt, Ö. (2012). İlişki katsayılarının karşılaştırılması: bir simülasyon çalışması. *Sosyal Bilimler Metinleri*, 2012(2), 1-9.
- Altıntaş, K., Vayvay, O., Apak, S., & Çobanoğlu, E. (2020). An extended GRA method integrated with fuzzy AHP to construct a multidimensional index for ranking overall energy sustainability performances. *Sustainability*, 12(4), 1602.
- Avşar Özcan, N., Bulut, M., Özcan, E., & Eren, E. (2022). Enerji üretim yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin istatistiksel ve analitik olarak karşılaştırması: Türkiye örneği. *Journal of Polytechnic*, 25(2), 519-531.
- Ayaydın, H., Durmuş, S., & Pala, F. (2017). Gri ilişkisel analiz yöntemiyle Türk lojistik firmalarında performans ölçümü. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 8(21), 76-94.
- Aydın, M. (2016). Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 14(28), 409-441.
- Balkaya, E., Avcı, S., & Aladağ, Z. (2021). Mühendislik mezunlarının iş bulma sürecinin çok kriterli değerlendirilmesi. *Journal of Industrial Engineering*, 32(3), 513-527.
- Bilgiç, S., Torğul, B., & Paksoy, T. (2021). Sürdürülebilir enerji yönetimi için BWM yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Verimlilik Dergisi*, 2, 95-110.
- Bircan, H., Demir, G., & Güvendi, F. (2020). TOPSIS ve VIKOR yöntemleriyle ikinci dil seçimi. *Ulakbilge Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(46), 313-324.

- Brodny, J., & Tutak, M. (2021). Assessing sustainable energy development in the Central and Eastern European countries and analyzing its diversity. *Science of the Total Environment*, 801, 149745.
- Brodny, J., & Tutak, M. (2023). Assessing the energy and climate sustainability of European Union member states: An MCDM-based approach. *Smart Cities*, 6(1), 339-367.
- Çalışkan, Ş. (2009). Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılık ve enerji arz güvenliği sorunu. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25, 297-310.
- Demircioğlu, M., & Coşkun, İ. T. (2018). CRITIC-MOOSRA yöntemi ve UPS seçimi üzerine bir uygulama. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 183-195.
- Diñcer, H., & Karakuş, H. (2020). Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir ekonomik kalkınma üzerindeki etkisi: BRICS ve MINT ülkeleri üzerine karşılaştırmalı bir analiz. *Esam Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1(1), 100-123.
- Doğan, H., & Yılkıran, N. (2015). Türkiye'nin enerji verimliliği potansiyeli ve projeksiyonu. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 3(1), 375-384.
- Ecer, F., & Günay, F. (2014). Borsa İstanbul'da işlem gören turizm şirketlerinin finansal performanslarının Gri İlişkisel Analiz yöntemiyle ölçülmesi. *Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi*, 25(1), 35-48.
- Ekin, E., & Okutan, C. (2021). PROMETHEE yöntemi ile tesis yeri seçim problemine ilişkin bir uygulama. *Gaziantep Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3(1), 46-58.
- Ertuğrul, İ., & Karakaşoğlu, N. (2009). Banka şube performanslarının VIKOR yöntemi ile değerlendirilmesi. *Journal of Industrial Engineering*, 20(1), 19-28.
- Farajı Abdolmaleki, S., Esfandiary Abdolmaleki, D., & Bello Bugallo, P. M. (2023). Finding sustainable countries in renewable energy sector: a case study for an EU energy system. *Sustainability*, 15(13), 10084.
- Gökğöz, F., & Yalçın, E. (2021). Investigating the environmental and economic performances of energy sector in OECD countries via MCDM approaches. İçinde D. SK. Ting, & A. Vassel-Be-Hagh (Ed.s) *Sustaining Tomorrow. Springer Proceedings in Energy* (s. 65-92). Cham: Springer International Publishing.
- Güler, E., Avcı, S., & Aladağ, Z. (2021). Türkiye'de illerin deprem hasar görebilirlik sıralamasında çok kriterli karar verme tekniklerinin başarısının Copeland yöntemi ile değerlendirilmesi. *Journal of Industrial Engineering*, 32(3), 414-437.
- Güler, E., Yerel Kandemir, S., Acikkalp, E., & Ahmadi, M. H. (2021). Evaluation of sustainable energy performance for OECD countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(6), 491-514.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023). *Renewable Capacity Statistics 2022*. <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 10.01.2024.
- İşeri, E., & Özen, C. (2013). Türkiye'de sürdürülebilir enerji politikaları kapsamında nükleer enerjinin konumu. *İstanbul Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, 47, 161-180.
- Karık, F. (2017). *Türkiye'nin enerji performansının OECD ve BRICS ülkeleri ile karşılaştırılması* (Doktora tezi). <https://tez.yok.gov.tr> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 08.01.2024
- Kılınç, E. C., & Şahbaz, N. (2021). Ar-Ge ve inovasyonun yenilenebilir enerji üretimi üzerindeki etkisi: Panel veri analizi. *Alanya Akademik Bakış*, 5(2), 1087-1105.
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.

- Korkmaz, Ö., & Develi, A. (2012). Türkiye’de birincil enerji kullanımı, üretimi ve gayri safi yurt içi hasıla (GSYİH) arasındaki ilişki. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 27(2), 1-25.
- Li, T., Li, A., & Guo, X. (2020). The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry-A comprehensive analysis of MCDM methods. *Energy*, 212, 118694.
- Meşin, V. (2020). *Türkiye’de enerji verimliliği politikaları özelinde Konya ilindeki firmaların enerji verimliliği önem ve eğilim düzeyleri* (Yüksek lisans tezi). <https://acikerisim.karatay.edu.tr/yayin/1748869&dil=0> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 05.01.2024
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) (2023). *Primary Energy Supply*. <https://data.oecd.org/energy/primary-energy-supply.htm#indicator-chart> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 10.01.2024.
- Our World in Data (2023). *Explore Data on CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 10.01.2024.
- Öymen, G. (2020). Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirlik üzerindeki rolü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(39), 1069-1087.
- Sağbaşı, A., & Başbuğ, B. (2018). Sürdürülebilir kalkınma ekseninde enerji verimliliği uygulamaları: Türkiye değerlendirmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), 43-50.
- Samut, P. K. (2023). OECD ülkelerinin yeşil lojistik performansı ile enerji, sağlık ekonomisi ve çevre ilişkisinin analizi. *Verimlilik Dergisi*, Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilirlik Özel Sayısı, 67-82.
- Saraswat, S. K., & Digalwar, A. K. (2021). Evaluation of energy sources based on sustainability factors using integrated fuzzy MCDM approach. *International Journal of Energy Sector Management*, 15(1), 267-290.
- Şenkayas, H., & Hekimoğlu, H. (2013). Çok kriterli tedarikçi seçimi problemine PROMETHEE yöntemi uygulaması. *Verimlilik Dergisi*, 2, 63-80.
- Şişman, B., & Eleren, A. (2013). En uygun otomobilin Gri İlişkisel Analiz ve ELECTRE yöntemleri ile seçimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 411-429.
- Tezcan, N. (2014). OECD ve BRIC ülkelerinin enerji göstergeleri açısından çok boyutlu ölçekleme analizi ile karşılaştırılması. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 25(77), 119 - 135.
- World Bank Group (2023). *World Bank National Accounts Data (GDP per capita (current US\$))* <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?view=map> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 10.01.2024.
- U.S. Energy Information Administration (2023). *Today in Energy*. <https://www.eia.gov> sayfasından erişilmiştir. Erişim Tarihi: 10.01.2024.
- Ürün, E., & Soyu, E. (2016). Türkiye’nin enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları üzerine bir değerlendirme. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, ICEBSS Özel Sayısı, 31-45.
- Zafar, S., Alamgir, Z., & Rehman, M. H. (2021). An effective blockchain evaluation system based on entropy-CRITIC weight method and MCDM techniques. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14, 3110-3123.