VERİMLİLİK DERGİSİ
JOURNAL OF PRODUCTIVITY

Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimi Planlamasında Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması Analizi ve RMVC Algoritmasının Uygulaması

Abdurrahman Dayıoğlu[1], Basri Çelik[1]

ÖZET

***Amaç*:** Bu çalışmanın amacı, Türkiye elektrik enerjisi planlamasında Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin kısıtlarını aşmak üzere önerilen Relational Membership Value Calculation (RMVC) algoritmasının performansını değerlendirmek ve sürdürülebilir enerji projeksiyonları sunmaktır.

***Yöntem*:** Araştırmada, Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ) ve Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerinden elde edilen 61488 adet gerçek zamanlı saatlik veri noktası, Python tabanlı veri madenciliği teknikleriyle işlenmiştir. 7 farklı enerji kaynağı; kapasite faktörü, şebeke stresi, maliyet (LCOE) ve emisyon gibi teknik, ekonomik, çevresel ve politik boyutları temsil eden 9 kriter altında analiz edilmiştir. Önerilen RMVC algoritması; TOPSIS, VIKOR, GRA ve WASPAS yöntemleriyle kıyaslanarak test edilmiştir.

***Bulgular*:** Analiz sonuçları, klasik yöntemlerin (özellikle TOPSIS) yüksek verimliliğe sahip fosil kaynakların çevresel dezavantajlarını maskelemesine izin verdiğini, RMVC'nin ise bu aykırı değerleri ilişkisel yöntemle dengeleyerek daha kararlı sıralamalar ürettiğini göstermektedir. Tüm yöntemlerde Jeotermal Enerji ilk sırada yer alırken; RMVC sıralaması (Jeotermal > Rüzgâr > HES > Linyit > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz), yenilenebilir kaynakları üst sıralara taşıyarak Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefleriyle tam bir tutarlılık sergilemiştir.

***Özgünlük*:** Bu çalışma, enerji planlaması literatüründe soft küme teorisine dayalı göreceli üyelik yaklaşımını ilk kez kullanarak, adayları ideal çözüme uzaklıkları yerine verinin kendi içindeki gizli örüntüleri üzerinden değerlendiren metodolojik bir yenilik sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler*:* Enerji Planlaması, RMVC Algoritması, Çok Kriterli Karar Verme, TOPSIS, WASPAS, Soft Küme.

JEL Kodları: C44, D81, Q42, Q48.

Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Approaches in Türkiye's Power Generation Planning and application of the RMVC Algorithm

ABSTRACT

***Purpose*:** The aim of this study is to evaluate the performance of the Relational Membership Value Calculation (RMVC) algorithm, proposed to overcome the limitations of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods in Türkiye's power generation planning, and to present sustainable energy projections.

***Methodology*:** In the research, 61.488 real-time hourly data points obtained from EPİAŞ and TEİAŞ were processed using Python-based data mining techniques. Seven different energy sources were analyzed under nine criteria representing technical, economic, environmental, and political dimensions, such as capacity factor, grid stress, cost (LCOE), and emissions. The proposed RMVC algorithm was tested by comparing it with TOPSIS, VIKOR, GRA, and WASPAS methods.

***Findings*:** The analysis results indicate that classical methods (particularly TOPSIS) tend to mask the environmental disadvantages of high-efficiency fossil fuels, whereas RMVC generates more stable rankings by balancing these outliers through a relational approach. While Geothermal Energy ranked first across all methods, the RMVC ranking (Geothermal > Wind > HEPP > Lignite > Imported Coal > Solar > Natural Gas) prioritized renewable sources, demonstrating full consistency with Türkiye's 2053 Net Zero Emission targets.

***Originality*:** This study introduces a methodological novelty to the energy planning literature by utilizing a relative membership approach based on soft set theory for the first time, evaluating candidates through hidden patterns inherent in the data rather than their distance to the ideal solution.

***Keywords*:** Energy Planning, RMVC Algorithm, Multi-Criteria Decision Making, TOPSIS, WASPAS, Soft Set.

JEL Codes: C44, D81, Q42, Q48.

[1] Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Bursa, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Abdurrahman Dayıoğlu, dayioglu@uludag.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1894768

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 21.02.2026 | Kabul / Accepted: 04.04.2026

Atıf/Cite: Dayıoğlu, A. ve Çelik, B. (2026). "Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimi Planlamasında Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması Analizi ve RMVC Algoritmasının Uygulaması", *Verimlilik Dergisi*, 60(3), 787-812.

EXTENDED ABSTRACT

The low-carbon transition of energy systems is a multi-dimensional optimization problem that requires the simultaneous achievement of climate commitments, security of supply, and economic competitiveness. Following the ratification of the Paris Agreement in 2021, Türkiye announced its 2053 Net Zero Emission target, prioritizing the integration of renewable energy capacities and energy efficiency into the power grid. This transition necessitates a rigorous mathematical evaluation of energy sources, balancing technical performance with environmental sustainability and geopolitical autonomy.

The primary motivation of this study is to address the limitations of classical Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, such as TOPSIS and VIKOR, which rely on geometric distances (L_p metrics) and are often sensitive to normalization bias. In these methods, the high technical efficiency of fossil fuels can mathematically mask their environmental disadvantages. This study evaluates the performance of the Relational Membership Value Calculation (RMVC) algorithm, which analyzes energy sources not through static geometric distances but via the relational topology and hidden patterns inherent in the data.

The research introduces a methodological novelty by utilizing high-resolution data mining. Unlike existing literature that relies on static annual averages, this study processed 61,488 real-time hourly data points from EPİAŞ and TEİAŞ for the year 2024 using Python-based algorithms. Seven energy alternatives were evaluated under nine criteria, including dynamic technical metrics like Grid Stress (C_4) and Variability (C_2), derived from 8,784 hourly ramp-rate observations. The RMVC algorithm, based on Soft Set theory, utilizes a continuous "relative membership function" (Θ) to contextually re-evaluate candidates that fail to meet arithmetic mean thresholds, thereby capturing implicit parametric correlations.

Comparative analysis reveals that while Geothermal Energy ranks first across all methods, classical approaches (especially TOPSIS) tend to rank high-efficiency fossil fuels (e.g., Imported Coal) second due to their technical stability, despite their environmental costs. In contrast, the RMVC algorithm generates a more stable and policy-aligned ranking (Geothermal > Wind > HEPP > Lignite > Imported Coal > Solar > Natural Gas). By balancing technical superiority with environmental and domestic criteria through relational mapping, RMVC mitigates the "masking effect" and provides a ranking consistent with Türkiye's 2053 Net Zero targets.

The results demonstrate that RMVC is not merely a calculation tool but a strategic verification framework that manages uncertainties better than distance-based models. The study proves that utilizing high-resolution time-series data instead of static averages significantly alters the reliability of MCDM outcomes. By integrating relational membership values, the proposed model ensures that sustainability-focused criteria are not overshadowed by short-term economic or technical advantages, offering a robust mathematical foundation for long-term energy policy planning in Türkiye.

1. GİRİŞ

Enerji sistemlerinin düşük karbonlu dönüşümü, iklim taahhütleri, arz güvenliği ve ekonomik rekabetçilik hedeflerinin eşzamanlı olarak gerçekleştirilmesi gereken çok boyutlu bir optimizasyon problemidir. Türkiye, Paris Anlaşması'nı 2021'de onaylayarak 2053 Net Sıfır Emisyon hedefini ilan etmiş (Türkiye Cumhuriyeti İletişim Başkanlığı, 2023); uzun dönemli iklim stratejisini ve 2024–2030 dönemi azaltım/uyum eylem planlarını oluşturmuştur. Bu çerçevede elektrik üretiminde yenilenebilir kapasitenin artırılması, enerji verimliliğinin hızlandırılması ve nükleer dâhil taban yük seçeneklerinin dengeli entegrasyonu, politika belgelerinin ana eksenini oluşturmaktadır. Uzun Dönem İklim Stratejisi ve güncellenen Ulusal Katkı Beyanı, sektörler arası 89 stratejiyi içeren kapsamlı bir yol haritası ortaya koyarak 2053 hedefini somutlaştırmıştır. Ayrıca, COP29 kapsamında sunulan resmi beyanlar ve kamu iletişimleri; kurulu güçte yenilenebilir enerjinin payının %59'a çıktığını, 2053'e giden yolda önceliklerin yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve nükleer enerji olduğunu teyit etmektedir. (UNFCCC, 2024)

Makroekonomik ve dış ticaret dinamikleri de dönüşüm ihtiyacını güçlendirmektedir. Dünya Bankası'nın Country Climate and Development Report-CCDR- (World Bank Group, 2022) değerlendirmesi; enerji ithalatına bağımlı ekonomiler için yeşil dönüşümün enerji güvenliği ve fiyat oynaklığına karşı dayanıklılığı artıracağını vurgulamaktadır. Türkiye özelinde iklim eyleminin kalkınma hedefleriyle hizalanması, AB Yeşil Mutabakatı ve karbon sınır düzenleme mekanizmaları (CBAM) bağlamında rekabetçiliğin korunması açısından kritik görülmektedir. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin Net Sıfır 2053 çalışmalarında (SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi, 2023) ise elektrik sektöründe net-sıfır patikalarının teknik/ekonomik uygulanabilirliği, geliştirilmesi gereken politika setleri ve finansman araçları ile birlikte modellenmiştir.

Bu dönüşümün maliyet-rekabetçilik cephesine ilişkin uluslararası göstergeler, yenilenebilir teknolojilerin yeni kapasite yatırımlarında fosil alternatiflere kıyasla kalıcı avantajını teyit etmektedir. Lazard LCOE+ 2024 analizi (LAZARD, 2024), bazı maliyet baskılarının sürmesine rağmen uzun vadede taban yük ihtiyacının çeşitlendirilmiş üretim filoları ile karşılanacağını; rüzgâr/güneş gibi değişken kaynakların maliyet rekabetçiliğini koruduğunu belirtmektedir. IRENA'nın 2024 yılı için hazırladığı maliyet raporu (IRENA, 2025) ise 2024'te devreye alınan yenilenebilir kapasitenin %91'inin LCOE bazında en ucuz yeni fosil alternatiften daha düşük maliyetle elektrik ürettiğini ve jeotermal ile hidro gibi bazı teknolojilerde maliyet düşüşlerinin sürdüğünü göstermektedir.

Maliyet ve emisyon göstergeleri tek başına karar vermek için yeterli değildir; enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği, yalnızca ekonomik ve çevresel boyutlarla değil, aynı zamanda şebeke esnekliği, frekans kararlılığı, kapasite faktörü, üretim değişkenliği ve şebeke stresi gibi dinamik teknik metriklerle birlikte değerlendirilmelidir. Bu parametreler, arazi ve su ayak izi gibi çevresel etkiler ve yerlilik gibi jeopolitik faktörlerle entegre bir şekilde ele alınmalıdır. Karar vericiler, çoğu zaman birbiriyle çelişen çoklu hedefleri eşzamanlı olarak optimize etmek zorundadır. Klasik Fuzzy Küme teorisi (Zadeh, 1965) belirsizliği modellemede güçlü bir araç olmakla birlikte, üyelik fonksiyonlarının belirlenmesindeki öznel yaklaşım sorununu tam olarak ortadan kaldıramamıştır. Molodtsov (1999) tarafından önerilen Soft Küme teorisi, parametrizasyon eksikliklerini gidermek için genel bir matematiksel çerçeve sunmuştur; ancak standart uygulamalar çoğunlukla "var/yok" mantığına dayalı ikili yapılar kullanır ve bu durum enerji piyasaları gibi sürekli ve karmaşık veri setlerinin hassasiyetini karşılamakta yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Olumlu yönlerinin matematiksel bir çerçeve sunması sebebiyle, belirsizliği temsil edebilen bulanık (fuzzy) ve soft küme temelli yöntemler ile çok kriterli karar verme yaklaşımları enerji planlamasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Ağbulut ve diğerleri, 2023; Selçuklu ve diğerleri, 2023; Baykasoğlu ve Gölcük 2015). Bununla birlikte, literatürdeki klasik yöntemlerde (TOPSIS, VIKOR, GRA, WASPAS vb.) farklı birimlere (örneğin; TL/MWh ve CO_2/ton) sahip verilerin normalizasyonu sırasında, verinin doğal topolojisinin bozulabildiği, orijinal bilginin kaybolabildiği, metrik duyarlılığı nedeniyle orta sıralarda farklılıklar ürettiği ve sıralama kararlılığının veri deseni ile yöntem seçimine oldukça hassas biçimde bağlı olduğu tekraren rapor edilmiştir. (Sałabun ve diğerleri, 2020; Samal ve diğerleri, 2022).

Mevcut MCDM yöntemlerinden bazıları (TOPSIS, VIKOR vb.) adayları R^n uzayında birer nokta olarak ele alır ve L_p metrikleri ile karar verir. Ancak enerji verisi, doğası gereği doğrusal değildir ve parametreler arasında "örtük" ilişkiler vardır. Klasik yöntemler bu örtük ilişkileri "Ağırlıklandırma" ile çözmeye çalışır, bu da subjektiflik yaratır.

Bu çalışmanın temel motivasyonu, enerji kaynaklarının seçimini sadece geometrik uzaklıklar üzerinden değil, parametreler arasındaki örtük ilişkiler üzerinden de analiz eden daha hassas bir matematiksel model sunmaktır. Bu amaçla, (Dayıoğlu ve diğerleri, 2025) tarafından geliştirilen Relational Membership Value Calculation (RMVC) algoritması, enerji verimliliği problemine uyarlanmıştır. RMVC, klasik ÇKKV yöntemlerinden farklı olarak, adayları ideal çözüme olan uzaklıklarına göre değil, veri setinin kendi içindeki ilişkisel topolojisine göre değerlendirir. Yöntemimiz, Soft Küme teorisinin aksiyomatik yapısını kullanır ancak ikili (0-1) mantık yerine, adayların sahip olduğu ve olmadığı özellikler arasındaki bağları analiz eden

sürekli bir "göreceli üyelik fonksiyonu" tanımlar. Bu yaklaşım, özellikle yüksek korelasyonlu ancak farklı fiziksel anlamlara sahip parametrelerin ayrıştırılmasında, klasik yöntemlere göre daha yüksek bir ayırt edicilik sağlar.

Türkiye enerji piyasasından elde edilen 61.488 gerçek zamanlı veri noktası analiz edilmiştir. Bu kapsamda araştırma şu sorulara odaklanır:

(i) Dinamik teknik metrikler ve yapısal çevresel/ekonomik/politik metrikler birlikte ele alındığında, RMVC klasik ÇKKV yöntemlerine göre daha kararlı ve politika olarak daha yorumlanabilir sıralamalar üretir mi?

(ii) RMVC'nin göreceli üyelik mekanizması, fosil kaynakların tekil teknik üstünlüklerinin (örneğin çok yüksek kapasite faktörü) çevresel ve jeopolitik dezavantajlar ile bağlamsal olarak dengelenmesini sağlayarak, sürdürülebilirlik uyumlu sonuçlar verir mi?

(iii) Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi bağlamındaki politika öncelikleri ile RMVC çıktıları tutarlılık gösterir mi? (ör. yerli/yenilenebilir kaynakların üst sıralara taşınması)

2. VAKA ANALİZİ: ADAY HAVUZU ve DEĞERLENDİRME KRİTERLERİNİN YAPILANDIRILMASI

Bu çalışma, çok kriterli karar verme (MCDM) problemlerinde önerilen RMVC yaklaşımının geçerliliğini test etmek amacıyla, Türkiye elektrik enerjisi piyasasının gerçek dinamikleri üzerine kurgulanmış kapsamlı bir vaka analizini temel almaktadır. Problemin uzayı; Türkiye'nin mevcut kurulu gücünü temsil eden 7 enerji alternatifi ve bu alternatiflerin performansını ölçen 9 teknik-ekonomik kriter ile tanımlanmıştır.

Enerji planlaması problemleri, doğası gereği çelişen hedefleri (maliyet, verim, çevre) aynı anda optimize etmeyi gerektiren çok boyutlu problemlerdir (Çolak 2024). Aşağıda aday enerji kaynaklarının seçimi ve değerlendirme kriterlerinin gerekçelendirilmesi detaylandırılmıştır.

2.1. Enerji Alternatiflerinin Tanımlanması ve Türkiye Bağlamı

Türkiye, OECD ülkeleri arasında enerji talebi en hızlı artan ülkelerden biri olup, "2053 Net Sıfır Emisyon" hedefi ile "Arz Güvenliği" politikası arasında bir denge kurmaya çalışmaktadır. Bu ikilem, analiz için seçilen aday kümesinin heterojen yapısını belirlemiştir:

1. A_1=*Jeotermal Enerji:* Türkiye, jeotermal kurulu gücünde Avrupa'da 1., dünyada 4. sırada yer almaktadır (JESDER, 2023). Özellikle Batı Anadolu graben sistemlerinde yoğunlaşan bu kaynak, rüzgâr ve güneşin aksine baz yük (base-load) santrali olarak çalışabilme ve 7/24 kesintisiz üretim yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu çalışmada, bazı kriterlerdeki verileri tespit edebilmek için eski nesil "Flaş Buhar" santralleri yerine, jeotermal akışkanın tamamen kapalı devrede dolaştığı ve emisyonların atmosfere değil yeraltına re-enjekte edildiği Modern Binary Cycle (Kapalı Çevrim) teknolojisi esas alınmıştır. Bu ayrım, jeotermalin "yenilenebilir" kimliğinin doğru temsili için kritiktir.
2. A_2=*Rüzgâr Enerjisi:* Ege ve Marmara bölgelerindeki yüksek potansiyeli ile Türkiye'nin yenilenebilir enerji portföyünün omurgalarından biridir. İşletme maliyetinin düşüklüğü avantaj iken, rüzgâr hızına bağlı kesintili üretim profili ve şebeke frekans kararlılığı üzerindeki negatif etkisi, bu adayın analizdeki zayıf tarafını oluşturur.
3. A_3=*Güneş Enerjisi:* Türkiye'nin yüksek güneşlenme süresi (özellikle İç ve Güney Anadolu), fotovoltaik (PV) sistemleri cazip kılmaktadır. Ancak, üretimin sadece gündüz saatleri ile sınırlı olması ve baz yük santrali olarak çalışabilmesi için depolama teknolojilerine duyduğu bağımlılık, çeşitli kriterlerde dezavantaj yaratmaktadır. Bununla birlikte, çalışmanın sayısal analiz aşamasında 'Kurulu Güç' verisi belirlenirken önemli bir teknik ayrım gözetilmiştir. EPİAŞ 2024 Yıllık Bülteni (EPİAŞ, 2025) ve TEİAŞ 2024 faaliyet raporu (TEİAŞ, 2025a) verilerine göre Türkiye'nin toplam güneş enerjisi kurulu gücü 19.882 Megawatt (MW) seviyesine ulaşmıştır. Ancak bu kapasitenin çok büyük bir bölümünü (yaklaşık 18.563 MW), "Lisanssız Elektrik Üretimi Yönetmeliği" kapsamında kurulan; meskenlerin çatıları, sanayi tesislerinin öz-tüketim modelleri ve arazi tipi bireysel santrallerden oluşan lisanssız santraller oluşturmaktadır. Analizde kullanılan saatlik, günlük üretim verileri, merkezi sisteme anlık teklif veren 'Lisanslı' santralleri kapsadığı için; kapasite faktörü ve güvenilirlik hesaplamalarında metodolojik tutarlılığı sağlamak adına lisanssız kısım dışarıda bırakılmıştır. Bu doğrultuda, çalışmada güneş enerjisi kurulu gücü olarak sadece lisanslı santrallere tekabül eden 1.319 MW değeri (Toplam - Lisanssız) temel alınmıştır.
4. A_4=*Hidroelektrik (Hidroelektrik Santral (HES) = Barajlı + Akarsu):* Türkiye'nin toplam kurulu gücünün yaklaşık %30'unu oluşturan HES'ler, sistemin sigortası niteliğindedir. Barajlı HES'lerin enerji depolama yeteneği ve ani talep değişimlerine hızlı yanıt verebilmesi, onları diğer yenilenebilir kaynaklardan ayırır. Ancak kuraklık riski, bu kaynağın en büyük belirsizliğidir.
5. A_5=*Doğal Gaz:* İthal bir kaynak olmasına rağmen, yüksek verimliliği ve şebeke dengesizliklerini anlık olarak tolere edebilen "pik yük" santrali olması nedeniyle stratejiktir. Emisyon açısından kömürden daha temiz, ancak maliyet açısından dışa bağımlıdır.

6. *A_6=İthal Kömür:* Yüksek ısıl değere sahip kömürlerin kullanıldığı bu santraller, sürekli enerji sağlasa da hem cari açığa hem de karbon emisyonlarına olumsuz katkı sunar.
7. *A_7=Linyit:* Türkiye'nin en önemli yerli fosil kaynağıdır. Enerji bağımsızlığı ve yerlilik açısından kritik bir öneme sahipken; düşük ısıl değer, yüksek kül oranı ve yüksek sera gazı emisyonu nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından en tartışmalı adaylardan biridir.

2.2. Değerlendirme Kriterleri, Veri Madenciliği Süreci ve Hesaplama Algoritmaları

Karar matrisinin bir parçasını oluşturacak olan kriterler için parametre seti, literatürdeki standart enerji planlama metriklerinin bazıları (Wang ve diğerleri, 2009) ve (Kaya ve Kahraman, 2010) taranarak oluşturulmuştur. Seçilen 9 kriter, santrallerin sadece "maliyetine" değil, şebekeye olan "teknik etkisine" de odaklanmaktadır.

Teknik Kriterler

C_1: Kapasite Faktörü (Capacity Factor - %): Bir santralin belirli bir zaman diliminde ürettiği gerçek enerjinin, o santralin tam kapasiteyle sürekli çalışması durumunda üretebileceği maksimum enerjiye oranıdır. Verimliliğin en net göstergesi olduğundan verim olarak adlandırabilir. 2024 yılı artık yıl olduğu için toplam saat değerini $366 \cdot 24 = 8784$ olarak alınmıştır (Eşitlik 1).

$$Verim = \frac{Gerçek\ Yıllık\ Üretim\ (MWh)}{Kurulu\ Güç\ (MW) \cdot 8784} \quad (1)$$

C_2: Değişkenlik Katsayısı (Coefficient of Variation): Özellikle yenilenebilir enerjinin en büyük sorunu olan "güvenilmezliği" ölçmektedir. Üretim verilerinin standart sapmasının (σ), ortalamaya (μ) oranıdır (Eşitlik 2).

$$Değişkenlik = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

C_3: Arz Güvenliği Katsayısı (Security / Availability): Bu kriter, santralin yıl boyunca şebekeye kesintisiz olarak sağlayabildiği en düşük günlük güç seviyesinin, santralin kurulu gücüne oranı olarak tanımlanmıştır. ($\boldsymbol{P_{min}}$), santralin en olumsuz işletme koşullarında dahi sürdürebildiği minimum üretim kapasitesini temsil ederken; ($\boldsymbol{P_{kurulu}}$), santralin tasarım ve lisans koşulları altında ulaşabileceği maksimum anlık güç kapasitesini ifade eden sabit bir referans değerdir (Eşitlik 3). Bu oran, farklı enerji kaynaklarının en kötü durum performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

$$Arz\ Güvenliği = \frac{P_{min}}{P_{kurulu} \cdot 24} \quad (3)$$

Bu oran; Jeotermal ve Termik santrallerde 1'e yaklaşırken, Rüzgâr ve Güneş gibi meteorolojiye bağımlı kaynaklarda 0'a yaklaşmaktadır.

C_4: Şebeke Stresi (Ramp Rate Volatility): Bu kriter, enerji kaynağının günden güne ne kadar sert dalgalanmalar (rampa) yaptığını yani rampa hızı değişkenliğini ölçmektedir. Üretimdeki ani değişimlerin kurulu güce oranının standart sapması hesaplanarak bulunur (Eşitlik 4). Düşük değer, şebeke için daha az stres (daha kararlı yapı) anlamına gelmektedir.

$$Şebeke\ Stresi = \sigma\left(\frac{P_t - P_{t-1}}{P_{kurulu}}\right) \quad (4)$$

Çevresel ve Sosyal Kriterler

C_5: Arazi Kullanım Yoğunluğu (Land Use Intensity – m^2/MWh(Megawatt-saat)): Birim enerji üretimi için işgal edilen toplam yüzey alanıdır. Güneş santralleri (paneller) ve HES'ler (rezervuar alanı) geniş alanlara ihtiyaç duyarken, Nükleer veya Doğal Gaz santralleri çok daha kompakt alanda üretim yapmaktadır.

C_6: Su Ayak İzi (Water Consumption - L/MWh): İşletme ve özellikle soğutma süreçleri için harcanan su miktarıdır. Termik santrallerde bu değer yüksektir. Kuraklık riski taşıyan bölgeler için kritik bir kısıttır.

C_8: Karbon Emisyonu (Carbon Emission - kgCO_2/MWh): IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) yönergelerine göre yaşam döngüsü emisyonlarıdır. Literatürde eski tip Jeotermal santraller için karbon emisyon değerleri 0.04-0.09 kg/kWh (Kilovat-saat) bandında görülse de, bu çalışmada yeterli düzeyde kesin bilgi bulunmadığından modern Binary Cycle teknolojisi için Jeotermal emisyon değeri bu değerlerden daha düşük olan 0.03 kg/kWh kabul edilmiştir.

C_9: Yerlilik Durumu: Enerji arz güvenliğinin politik boyutudur. Kaynak yerli ise "1", ithal ise "0" değeri alır. Cari açık ve jeopolitik riskler açısından hayati öneme sahiptir.

Ekonomik Kriter

C7: Enerji üretim maliyetleri, uluslararası literatürde kabul gören LCOE (Levelized Cost of Electricity) metodolojisi ile belirlenmiştir. Temel veri aralıkları için (LAZARD, 2024) ve (IRENA, 2025) raporları referans

alınmıştır. Ancak, bu raporlardaki küresel ortalamalar doğrudan kullanılmamış; Türkiye'nin coğrafi ve makroekonomik gerçeklerine göre kalibre edilmiştir. Türkiye'nin yüksek güneş alışı ve rüzgâr potansiyeli dikkate alınarak; Rüzgâr için 3,30 ¢/kWh ve Güneş için 3,80 ¢/kWh maliyetleri, LAZARD (2024) ve IRENA (2025) raporlarında sunulan maliyet aralıklarının alt bandına yakın olarak belirlenmiştir.

Fosil yakıtlar için; Türkiye'nin doğal gaz ve kaliteli kömürde ithalatçı olduğu gerçeği göz önüne alınmıştır. Türkiye'de ithal kömürle çalışan termik santrallerin LCOE'si, yüksek ithal kömür fiyatları ve orta verimlilik değerleri nedeniyle genellikle 6,2 – 7,7 ¢/kWh aralığında tahmin edilmektedir. Bu çalışmada bu değer küresel kömür maliyet aralıkları ile tutarlı olarak üst sınırdan alınmıştır. Linyit santraller için LCOE, düşük ısıl değerli yerli kömür tüketimi ve nispeten düşük termal verimlilik nedeniyle 5,5 – 7,5 ¢/kWh aralığında gerçekçi bir maliyet tahmini olarak kullanılabilmektedir. Bu aralık literatürde yeni termik kömür santralleri için öngörülen maliyet aralıkları ile genellikle uyumlu olmaktadır. Yine bu değer yerel kömür maliyet aralıkları ile tutarlı olarak üst sınırdan alınmıştır. Yerli sanayinin gelişmiş olduğu HES projelerinde maliyetler, (IRENA, 2025) küresel ortalamasının altında, yerel pazar gerçeklerini yansıtacak şekilde 4,2 ¢/kWh olarak modele dâhil edilmiştir. Bu yaklaşım, veri setinin hem uluslararası standartlarla uyumlu hem de bölgesel kısıtları temsil eden gerçekçi bir yapıda olmasını sağlamıştır. Bu nedenle, ABD merkezli LAZARD (2024) raporundaki düşük gaz maliyetleri yerine, aynı raporun sunduğu aralığın üst bandı referans alınarak Doğal Gaz için 8,5 ¢/kWh değeri atanmıştır. Jeotermal santraller için LCOE çalışmaları, kaynakların yerel jeolojik özellikleri, sondaj maliyetleri ve kapasite faktörlerinin yüksekliği nedeniyle önemli ölçüde değişmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın 2024 maliyet veri tabanına göre, jeotermal elektrik üretiminin LCOE'si Türkiye gibi yüksek kapasite faktörlü bölgelerde yaklaşık 5,3 ¢/kWh civarındadır, bu da küresel ortalama LCOE'ye oldukça yakın bir değerdir.

Mevcut literatürdeki enerji planlama çalışmalarının çoğu (Acar ve diğerleri, 2023; Başoğlu Kabran ve Ünlü, 2025; Brown ve diğerleri, 2025; Haugen ve diğerleri, 2023; Karamollaoğlu, 2025; Kat, 2023; Kat ve diğerleri, 2024; Levin ve diğerleri, 2024; Mongird ve diğerleri, 2024; Önenli ve diğerleri, 2023) kriter değerlerini yıllık ortalama raporlardan veya uzman görüşlerinden statik veri olarak almaktadır. Ancak enerji üretimi, doğası gereği zamana bağlı ve stokastik bir süreçtir. Bu çalışmayı metodolojik olarak ayrıştıran en temel üstünlük; C_1, C_2, C_3 ve C_4 teknik kriterlerinin statik kabullerle değil, Yüksek Çözünürlüklü Veri Madenciliği teknikleriyle hesaplanmasına dayanmaktadır.

Analiz için Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. Şeffaflık Platformu (EPİAŞ, 2025) veri tabanı kullanılarak, 01.01.2024 - 31.12.2024 dönemini kapsayan "Gerçek Zamanlı Üretim" verileri sistemden çekilmiştir. Her bir aday kaynak için 8.784 satır (2024 yılı saatlik verisi) olmak üzere, toplamda 61.488 adet veri noktası işlenmiştir. Ham veriler .csv formatında çekilmiş, veri temizleme ve eksik veri tamamlama işlemlerinin ardından birleşik bir veri çerçevesine dönüştürülmüştür.

Büyük hacimli zaman serisi verilerinin analizi ve kriterlerin (C_1-C_4) insan hatasından arındırılmış biçimde hesaplanması için Python programlama dili ve Pandas/NumPy kütüphaneleri kullanılarak özel algoritmalar geliştirilmiştir. Özellikle "Şebeke Stresi" (C_4) ve "Değişkenlik" (C_2) gibi dinamik davranış ölçen metriklerin hesaplanmasında özenle tasarladığımız fonksiyonlar kullanılmıştır. Bu algoritmik yaklaşım sayesinde; dinamik davranış analizi yapılmıştır. Yani Rüzgâr ve Güneş gibi kesintili kaynakların şebekeye verdiği anlık stres (C_4), sadece "ortalama" değerlere bakılarak değil, 8.784 saatlik değişimlerin tek tek hepsi incelenerek tespit edilmiştir. Bilimsel nesnellik bakımından klasik yöntemlerdeki "uzman kanaati" yerine, sahadan gelen deneye dayalı kanıtlar kullanılmış, böylece çalışmanın tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği maksimize edilmiştir.

Çevresel, ekonomik ve yapısal parametrelerin kaynaklandırılması (C_5 – C_9) noktasında dinamik olarak hesaplanan teknik kriterlerin aksine; çevresel, ekonomik ve jeopolitik parametreler, teknolojinin yapısal özelliklerine ve ulusal düzenlemelere dayanmaktadır. Bu kriterler için kullanılan veri kaynakları ve kabul setleri aşağıda özetlenmiştir:

- Çevresel Etki Parametreleri (C_5, C_6, C_8): Arazi kullanımı (C_5) ve su ayak izi (C_6) verileri; UNECE (Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu) tarafından yayımlanan elektrik üretim teknolojilerine yönelik Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) raporları ile NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) tarafından yürütülen LCA harmonizasyon çalışmaları ve elektrik üretim teknolojileri için yaşam döngüsü su kullanımı derleme/harmonizasyon çalışmalarından derlenmiş; Türkiye coğrafi koşullarına en uygun ortalama değerler seçilerek kullanılmıştır (Meldrum ve diğerleri, 2013; NREL, 2025; UNECE, 2021; UNECE, 2022). Karbon emisyonu (C_8) için IPCC'nin Ulusal Sera Gazı Envanterleri Kılavuzları (2006 Kılavuzu ve 2019 Güncellemesi/Refinement) esas alınmıştır (IPCC, 2019).
- Ekonomik Maliyet (C_7): Maliyet analizi verileri; yenilenebilir kaynaklar (Jeotermal, Rüzgar, Güneş, HES) için Cumhurbaşkanı Kararı ile belirlenen ve EPİAŞ duyurularında yayımlanan güncellenmiş YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması) uygulama/taban-tavan fiyatları esas alınarak, fosil kaynaklar (Gaz, Kömür) için EPİAŞ tarafından yayımlanan Elektrik Piyasaları Aylık Raporlarında yer alan Piyasa Takas Fiyatı (PTF) ağırlıklı ortalamaları temel alınarak derlenmiştir

(Cumhurbaşkanı Kararı, 2023; EPİAŞ, 2025). Uluslararası karşılaştırma ve doğrulama amacıyla teknoloji bazlı seviye maliyet aralıkları için LAZARD (2024)'ın Levelized Cost of Energy+ raporu ile IRENA'nın "Renewable Power Generation Costs in 2024" raporundaki küresel maliyet göstergeleri referans alınmıştır (LAZARD, 2024; IRENA, 2025).

- Yerlilik (C_9): Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın "Milli Enerji ve Maden Politikası" tanımları esas alınarak; kaynağın menşei Türkiye sınırları içinde olanlar "1", yakıtı ithal edilenler "0" olarak kodlanmıştır.

Bu kapsamlı veri işleme süreci sonucunda, bütün detaylı hesaplamalarımızın neticesi olarak, karar-verme yöntemlerinde kullanılacak olan temel yapı taşı, Karar Verme Matrisi (Decision Making Matrix) Tablo 1'deki gibi elde edilmiştir.

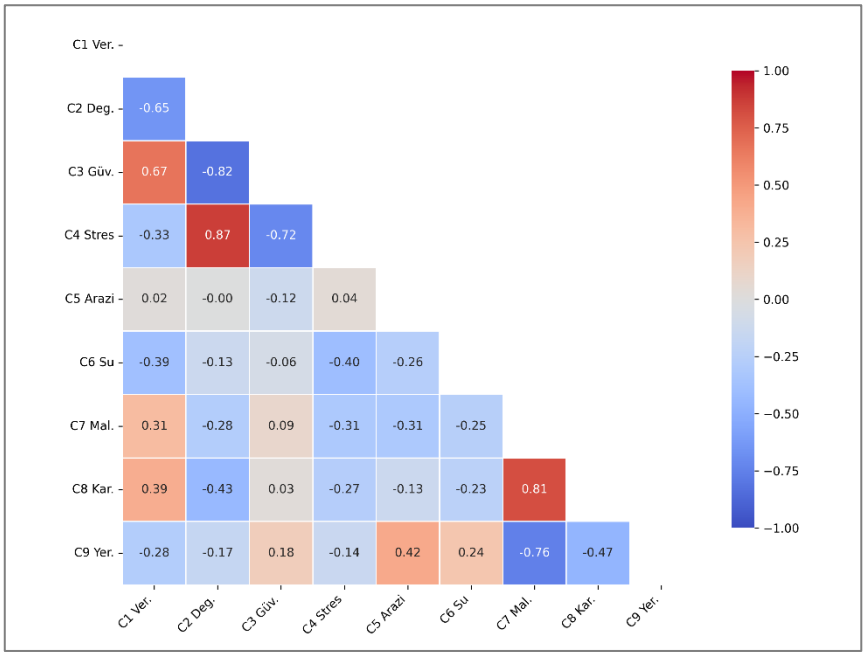
Tablo 1. Enerji alternatifleri için karar verme matrisi

Alternatif	*Jeotermal*	*Rüzgâr*	*Güneş*	*HES*	*Doğal Gaz*	*İthal Kömür*	*Linyit*
C_1 - Verim (%)	67,18	32,26	45,15	26,36	29,26	81,40	46,38
C_2 - Değişkenlik	0,106	0,51	0,396	0,284	0,484	0,201	0,125
C_3 - Güvenlik	0,522	0,026	0,047	0,122	0,019	0,215	0,185
C_4 - Stres	0,014	0,142	0,092	0,031	0,084	0,065	0,027
C_5 - Arazi (m^2/MWh)	2,5	0,3	13,5	0,5	0,2	0,2	5
C_6 - Su(L/MWh)	0,7	0,01	0,1	18	0,5	1,5	2
C_7 - Maliyet (¢/kWh)	5,3	3,3	3,8	4,2	8,5	7,7	7,5
C_8 - Emisyon ($kgCO_2$/MWh)	0,03	0,01	0,04	0,02	0,49	0,95	1,15
C_9 - Yerlilik	1	1	1	1	0	0	1

Notlar: C_1, C_3, C_9 fayda, diğer kriterler maliyet yönlüdür. HES su ayak izi, UNECE metodolojisine göre rezervuar yüzey buharlaşmasını kapsamaktadır.

2.3. İstatistiksel Doğrulama: Kriter Bağımsızlığı Analizi

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) modellerinde, kriterler arası yüksek korelasyon, belirli özelliklerin modeldeki ağırlığını yapay olarak artırabilir. Bu riski yönetmek için kriter seti üzerinde Pearson Korelasyon Analizi uygulanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kriterler arasındaki pearson korelasyonu ısı haritası

Analiz sonuçları iki önemli bulguyu ortaya koymaktadır:

- Genel Bağımsızlık: Kriter çiftlerinin büyük çoğunluğu (örneğin C_1 Verim ile C_2 Arazi arasında ($r = -0.65$) düşük düzeyde ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, kriter setinin probleme çok boyutlu bir bakış açısı sunduğunu kanıtlamaktadır.
- Yapısal İstisna (C_2 ve C_4): Şekil 1'de görüldüğü üzere, sadece C_2 (Değişkenlik) ile C_4 (Şebeke Stresi) kriterleri arasında ($r = 0.87$) düzeyinde kritik eşik sınırına yakın ($|r| > 0.90$) fakat eşiği geçmeyen

güçlü bir pozitif ilişki tespit edilmiştir. İstatistiksel olarak bu iki değişken benzer davranıyor görünse de çalışmanın teknik derinliği açısından her ikisi de modelde korunmuştur. Çünkü;

- C_2, enerji kaynağının meteorolojik karakteristiğini temsil ederken; C_4, bu karakteristiğin iletim şebekesi üzerindeki teknik zorlanmasını temsil etmektedir.
- C_2 yüksekliği "Yedek Kapasite" maliyetlerini tetiklerken, C_4 yüksekliği anlık "Frekans Kontrolü" maliyetlerini etkilemektedir.

Bu fiziksel ve ekonomik ayrım nedeniyle, yüksek korelasyona rağmen bu iki kriterin ayrık olarak değerlendirilmesi, enerji planlamasının gerçekçiliği için zorunlu görülmüştür.

Sonuç olarak; istatistiksel ve teorik olarak doğrulanan bu karar matrisi (Tablo 1), adaylar arasındaki performans farklarını ortaya koymak için bir veri seti sunmaktadır. Çalışmanın ana hedefi olan RMVC algoritmasının performansını objektif bir zeminde değerlendirebilmek için, öncelikle literatürde kabul görmüş klasik yöntemlerle bir "kıyaslama referansı" (benchmark) oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla, bir sonraki bölümde, elde edilen veri seti; TOPSIS, VIKOR, GRA ve WASPAS yöntemleriyle analiz edilerek, adayların geleneksel sıralamaları incelenmiştir.

3. BAZI ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE KIYASLAMA ANALİZİ

Önerdiğimiz RMVC modelinin tutarlılığını ve çözümleme gücünü test etmek amacıyla, aynı veri seti literatürde en yaygın kullanılan dört farklı deterministik yöntem (TOPSIS, VIKOR, GRA, WASPAS) ile analiz edilmiştir.

3.1. Ağırlıklandırma Stratejisi: Eşit Ağırlık Yaklaşımı

Enerji planlamasında kriterlerin önem derecesi (ağırlıklar), genellikle politik veya ekonomik tercihlere göre değişmektedir. Ancak bu çalışmada, adayların performansını herhangi bir ön yargı veya dışsal tercih olmaksızın, "yalın" haliyle kıyaslayabilmek için Eşit Ağırlık yöntemi benimsenmiştir. Teknik (C_1-C_4), Çevresel (C_5, C_6, C_8), Ekonomik (C_7) ve Politik (C_9) boyutların her birinin sürdürülebilir bir gelecek için eşdeğer öneme sahip olduğu varsayımıyla, 9 kriterin her biri için ağırlık katsayısı şu şekilde (Eşitlik 5) sabitlenmiştir:

$$w_j = \frac{1}{\mathrm{n}} = \frac{1}{9} \approx 0.1111 \ \ (\mathrm{j} = 1,2,\dots,9) \tag{5}$$

3.2. Metodolojik Çerçeve ve Hesaplama Adımları

Karşılaştırmalı analizde kullanılan yöntemlerin matematiksel temelleri ve hesaplama algoritmaları aşağıda özetlenmiştir.

3.2.1. TOPSIS

Her kriterdeki en iyi değerlerin ideal çözüme (A^*) olan en kısa mesafesi (maliyet için en düşük, verim için en yüksek vb. gibi) ile negatif ideal çözüme (A^-) olan en uzak mesafesini esas alır. Eşit ağırlıklı normalize matris (v_{ij}) üzerinden pozitif (Eşitlik 6) ve negatif (Eşitlik 7) ideal çözümler belirlenir.

$$A^* = \left\{ v_j^* \;\middle|\; v_j^* = \begin{cases} \max\limits_i (v_{ij}), & j \in J_{fayda} \\ \min\limits_i (v_{ij}), & j \in J_{maliyet} \end{cases} \right\} = \{v_1^*, v_2^*, v_3^*, \dots, v_n^*\} \tag{6}$$

$$A^- = \left\{ v_j^- \;\middle|\; v_j^- = \begin{cases} \min\limits_i (v_{ij}), & j \in J_{fayda} \\ \max\limits_i (v_{ij}), & j \in J_{maliyet} \end{cases} \right\} = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-, \dots, v_n^-\} \tag{7}$$

Her bir adayın ideal çözümlere olan Öklid uzaklıkları S_i^*ve S_i^- (Eşitlik 8) hesaplanır:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^*)^2}, \ S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2} \tag{8}$$

Nihai sıralama için Göreceli Yakınlık Katsayısı CC_i (Eşitlik 9) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, \ 0 \le CC_i \le 1 \tag{9}$$

Burada CC_i değeri 1'e yaklaştıkça adayın performansı artar.

3.2.2. VIKOR

Çelişen kriterler varlığında "uzlaşık çözümü" arayan bu yöntem, L_p-metriğini temel alır ve adayların ideal çözüme olan "Maksimum Grup Faydasını" ve "Minimum Bireysel Pişmanlığını" dengelemeyi amaçlar. Hesaplama adımları şu şekildedir:

Adım 1: Karar matrisindeki (v_{ij}) her bir kriter sütunu için En İyi (v_j^*) ve En Kötü (v_j^-) değerler belirlenir.

Eğer j kriteri fayda yönlü ise (Eşitlik 10):

$$v_j^* = \max_i(v_{ij}) \text{ ve } v_j^- = \min_i(v_{ij}) \quad (10)$$

Eğer j kriteri maliyet yönlü ise (Eşitlik 11):

$$v_j^* = \min_i(v_{ij}) \text{ ve } v_j^- = \max_i(v_{ij}) \quad (11)$$

Adım 2: Her bir aday için Grup Faydası ($\boldsymbol{S_i}$) ve Bireysel Pişmanlık (R_i) değerleri (Eşitlik 12) hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{(v_j^* - v_{ij})}{(v_j^* - v_j^-)} \quad R_i = \max_j \left[w_j \frac{(v_j^* - v_{ij})}{(v_j^* - v_j^-)} \right] \quad (12)$$

Adım 3: Nihai sıralamayı belirleyen VIKOR İndeksi (Q_i) (Eşitlik 13) hesaplanır.

$$Q_i = v \frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v) \frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (13)$$

Burada; $S^* = \min S_i$, $S^- = \max S_i$, $R^* = \min R_i$, $R^- = \max R_i$, v : Maksimum grup faydasını sağlayan strateji ağırlığıdır (Literatür standardı olarak $v = 0.5$ alınmıştır). En düşük Q_i değerine sahip aday, en iyi performansı gösteren uzlaşık çözüm olarak kabul edilir.

3.2.3. GRA

Veri setindeki belirsizlikleri yönetmek ve adaylar arasındaki ilişki düzeyini geometrik benzerlik üzerinden analiz etmek için kullanılan bu yöntem, adayların oluşturduğu serilerin "Referans Seriye" (İdeal Profile) olan yakınlığını esas almaktadır. Analiz süreci aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir:

Adım 1. Veri Ön İşleme (Normalizasyon): Farklı ölçü birimlerine sahip ham verilerin ($\boldsymbol{v_{ij}}$) karşılaştırılabilir olması için, veriler 0-1 aralığına normalize edilerek v_{ij}^* matrisi oluşturulur.

Fayda yönlü kriterler için (Eşitlik 14):

$$v_{ij}^* = \frac{v_{ij} - \min_i(v_{ij})}{\max_i(v_{ij}) - \min_i(v_{ij})} \quad (14)$$

Maliyet yönlü kriterler için (Eşitlik 15):

$$v_{ij}^* = \frac{\max_i(v_{ij}) - v_{ij}}{\max_i(v_{ij}) - \min_i(v_{ij})} \quad (15)$$

Bu işlem sonucunda, her kriter için en iyi performans değeri "1", en kötü performans değeri "0" olmaktadır.

Adım 2. Referans Serinin Tanımlanması ve Sapma Hesabı: Tüm kriterlerde en iyi performansı temsil eden bir Referans Seri (x_0^*) tanımlanır. Normalizasyon gereği bu seri $x_0^* = \{1, 1, \dots, 1\}$ vektörüdür. Ardından, her adayın referans seriden mutlak sapması (Δ_{ij}) (Eşitlik 16) hesaplanır:

$$\Delta_{ij} = \left| v_{0j}^* - v_{ij}^* \right| = |1 - v_{ij}^*| \quad (16)$$

Adım 3. Gri İlişkisel Katsayının (ξ_{ij}) Hesaplanması: Her aday ve kriter çifti için gri ilişki katsayısı, sistemdeki minimum (Δ_{min}) ve maksimum (Δ_{max}) sapma değerleri (Eşitlik 17) kullanılarak elde edilir:

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \rho\, \Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \rho\, \Delta_{max}} \quad (17)$$

Burada; $\Delta_{min} = \min_i \min_j \Delta_{ij}$, $\Delta_{max} = \max_i \max_j \Delta_{ij}$, ρ : Ayırt etme katsayısıdır ve standart olarak $\rho = 0.5$ olarak alınmaktadır.

Adım 4. Gri İlişkisel Derecenin (γ_i) Hesaplanması: Son aşamada, her aday için kriter ağırlıkları (w_j) dikkate alınarak genel gri ilişki derecesi (Eşitlik 18) hesaplanır:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^{n} w_j\, \xi_{ij} \quad (18)$$

Burada w_j, Eşit Ağırlık yaklaşımı gereği $1/9$ olarak alınmıştır. Sıralama kuralı olarak en yüksek γ_i değerine sahip aday, referans seriye en çok benzeyen ve en iyi performansı gösteren adaydır.

3.2.4. WASPAS

Karar verme problemlerinde sıralama doğruluğunu artırmak amacıyla geliştirilen bu yöntem, Ağırlıklı Toplam Modeli (WSM) ve Ağırlıklı Çarpım Modelini (WPM) tek bir çerçevede birleştirir. Geleneksel WASPAS yönteminin sıralama doğruluğu (ranking accuracy) üzerine son yıllarda literatürde önemli

güncellemeler yapılmış ve ağırlıklı toplam ile ağırlıklı çarpım modellerinin optimizasyonu yeniden ele alınmıştır (Baykasoğlu ve Gölcük, 2020). Yöntem, lineer normalizasyon tekniğini kullanmaktadır ve aşağıdaki adımlardan oluşur:

Adım 1. Lineer Normalizasyon: Ham veri matrisindeki (v_{ij}) değerlerin birimlerinden arındırılması ve karşılaştırılabilir hale getirilmesi için kriterin yönüne (Fayda/Maliyet) göre normalizasyon işlemi uygulanır. Normalize edilmiş değerler $\bar{v}_{ij}$ ile gösterilmiştir:

Fayda yönlü kriterler için (Eşitlik 19):

$$\bar{v}_{ij} = \frac{v_{ij}}{\max_i(v_{ij})} \quad (19)$$

Maliyet yönlü kriterler için (Eşitlik 20):

$$\bar{v}_{ij} = \frac{\min_i(v_{ij})}{v_{ij}} \quad (20)$$

Bu işlem sonucunda tüm $\bar{v}_{ij}$ değerleri 0 ile 1 arasına çekilmektedir.

Adım 2. Ağırlıklı Toplam (WSM) ve Ağırlıklı Çarpım (WPM) Skorlarının Hesaplanması: Her bir aday için, kriter ağırlıkları (w_j) kullanılarak iki farklı performans skoru hesaplanır:

WSM Skoru ($Q_i^{(1)}$) (Eşitlik 21):

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{n} \bar{v}_{ij}\, w_j \quad (21)$$

WPM Skoru ($Q_i^{(2)}$) (Eşitlik 22):

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^{n} \left(\bar{v}_{ij}\right)^{w_j} \quad (22)$$

Adım 3: Bütünleşik WASPAS Skorunun (Q_i) Hesaplanması

Nihai sıralama, WSM ve WPM skorlarının ağırlıklı kombinasyonu (Eşitlik 23) ile elde edilir:

$$Q_i = \lambda\, Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) Q_i^{(2)} \quad (23)$$

Burada; λ: İki yöntemin göreceli önemini belirleyen parametredir. Literatürde WSM ve WPM'in doğruluğuna eşit mesafede durmak için standart olarak λ = 0.5 kabul edilir. w_j: Kriter ağırlıklarıdır (Eşit ağırlık yaklaşımıyla $w_j = 1/9$). En yüksek Q_i değerine sahip aday, en iyi performansı gösteren alternatiftir.

3.3. Karşılaştırmalı Analiz Bulguları

Tablo 1'de oluşturulan karar verme matrisi, yukarıda matematiksel formülasyonlarla tanımı yapılan literatürdeki dört farklı karar verme yöntemine (TOPSIS, VIKOR, GRA, WASPAS), eşit ağırlık varsayımıyla tasarladığımız python kodları vasıtasıyla uygulanmıştır. Yöntemlerin ürettiği skorlar hesaplandıktan sonra nihai sıralamalar toplu olarak Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. **Enerji alternatifleri için farklı yöntemlerin toplu sonuçları ve sıralamaları**

Alternatif	*TOPSIS Skor*	*TOPSIS Sıra*	*VIKOR Skor*	*VIKOR Sıra*	*GRA Skor*	*GRA Sıra*	*WASPAS Skor*	*WASPAS Sıra*
Jeotermal	0,8913	1	0,0	1	0,8718	1	0,5093	1
Rüzgâr	0,5785	3	0,8007	4	0,7053	2	0,5017	2
Güneş	0,5062	7	0,8179	6	0,639	4	0,286	5
HES	0,5236	6	0,7694	2	0,673	3	0,3351	3
Doğal Gaz	0,5342	5	1,0	7	0,5181	7	0,1228	7
İthal Kömür	0,6014	2	0,8118	5	0,6252	6	0,2	6
Linyit	0,5695	4	0,7855	3	0,6364	5	0,2901	4

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Jeotermal enerjinin genel bir üstünlüğü göze çarpsa da, yöntemlerin matematiksel altyapılarına bağlı olarak sıralamalarda karakteristik değişimler gözlemlenmiştir. Yöntem bazlı detaylı analizler aşağıda verilmiştir:

3.3.1. TOPSIS Yöntemi Analizi

Adayların İdeal Çözüme olan Öklid mesafesini en aza indirmeyi hedefleyen TOPSIS yöntemi, hem fayda hem de maliyet kriterlerinde dengeli performansa sahip adayları ödüllendirmiştir.

Jeotermal > İthal Kömür > Rüzgâr > Linyit > Doğal Gaz > HES > Güneş

Jeotermal (A_1), 0,8913 gibi çok yüksek bir yakınlık katsayısı ile rakiplerine büyük fark atarak 1. sıraya yerleşmiştir. Hem baz yük (C_3) sağlayabilmesi hem de düşük emisyonlu (C_8) olması onu "İdeal Çözüm" noktasına en yakın aday yapmıştır. İthal Kömür (A_6), çevresel dezavantajlarına rağmen, çok yüksek verimlilik (%81,4) ve şebeke kararlılığı sağladığı için matematiksel olarak 2. sıraya yerleşmiştir. Bu durum, TOPSIS'in "mesafe" mantığının, yüksek teknik performansı çevresel maliyete tercih edebildiğini göstermektedir.

3.3.2. VIKOR Yöntemi Analizi

Maksimum grup faydası ve minimum bireysel pişmanlık ilkesiyle çalışan VIKOR yöntemi, "Uzlaşık Çözüm" arayışındadır. Skorun 0'a yakın olması iyiyi, 1'e yakın olması kötüyü temsil etmektedir.

Jeotermal > HES > Linyit > Rüzgâr > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz

Jeotermal (A_1), $Q_i = 0$ değeri ile "sıfır pişmanlık" içeren mutlak en iyi çözüm olarak belirlenmiştir. TOPSIS'in aksine VIKOR, HES (A_4) alternatifini 2. sıraya yükseltmiştir. HES'in depolama yeteneği ve ortalama maliyet yapısı, onu gruptaki en güvenli "uzlaşma" noktalarından biri yapmaktadır. Doğal Gaz (A_5), yüksek maliyet ve emisyon riski nedeniyle $Q_i = 1$ skoruyla en kötü çözüm olarak işaretlenmiştir.

3.3.3. GRA (Gri İlişkisel Analiz) Analizi

Veri setindeki belirsizlikleri ve referans seriye olan "geometrik desen benzerliğini" ölçen GRA, özellikle dengeli dağılıma sahip adayları öne çıkarmaktadır.

Jeotermal > Rüzgâr > HES > Güneş > Linyit > İthal Kömür > Doğal Gaz

Jeotermal (A_1), referans seriye 0.8718 oranında benzerlik göstererek liderliğini korumuştur. Rüzgâr (A_2), ve TOPSIS ve VIKOR 'da 3. ve 4. sırada kalırken, GRA yönteminde 2. sıraya yükselmiştir. Bunun nedeni, rüzgâr enerjisinin maliyet ve emisyon gibi kriterlerdeki deseninin, ideal seriye geometrik olarak yüksek uyum sağlamasıdır.

3.3.4. WASPAS Yöntemi Analizi

Ağırlıklı Toplam (WSM) ve Ağırlıklı Çarpım (WPM) modellerini birleştiren WASPAS yöntemi, adaylar arasındaki rekabeti en net ortaya koyan sonucu üretmiştir. Elde edilen sıralama şu şekildedir:

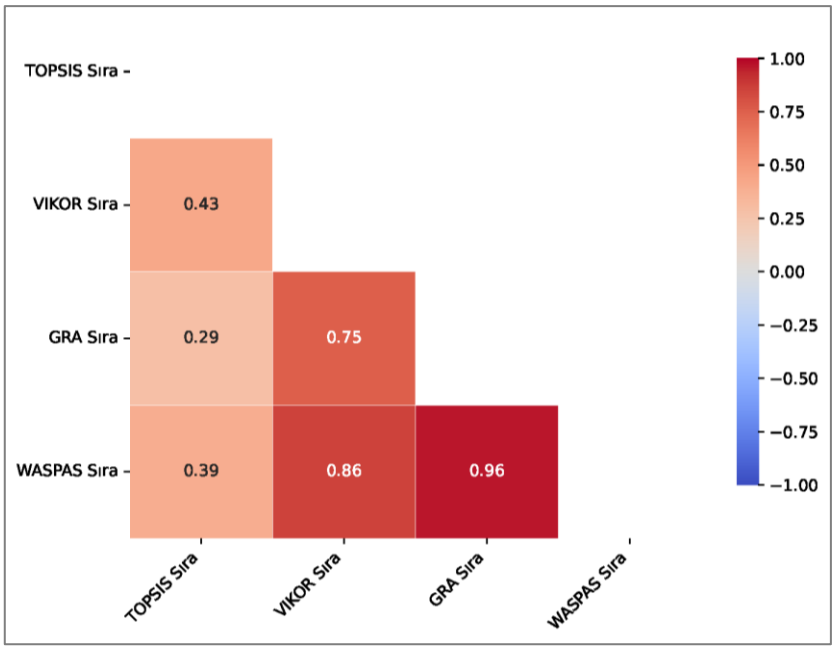
Jeotermal > Rüzgâr > HES > Linyit > Güneş > İthal Kömür > Doğal Gaz

Diğer yöntemlerde Jeotermal (A_1) açık ara farkla lider konumdayken; WASPAS modelinde Rüzgâr (A_2) ile arasındaki makasın belirgin şekilde kapanması ve Jeotermal enerjinin çok küçük bir puan farkıyla (0,0076) liderliği koruyabilmesinin temel sebebi, WASPAS yönteminin kullandığı Lineer Normalizasyon ($\frac{min_i(v_{ij})}{v_{ij}}$) tekniğidir. Rüzgâr enerjisi; Arazi (C_5), Su (C_6), Maliyet (C_7) ve Emisyon (C_8) kriterlerinin tamamında "en iyi" veya "en iyiye yakın" değerlere sahip olduğu için, bu dört kriterden tam puana yakın normalize skorlar elde etmiştir. Bu durum, WASPAS'ın toplamsal (WSM) bileşeninde birinci adaya olduğu kadar ikinci adaya da büyük bir avantaj sağlamıştır. Öte yandan Jeotermal; teknik olarak Rüzgâr kadar üstün olsa da, Maliyet (C_7) kriterinde en iyi değerin (3.3 ¢) çok daha üstünde (5.3 ¢) olduğu için, lineer normalizasyon sonucu puanı bu kriterde hemen hemen yarı yarıya düşmüştür. Buna rağmen Jeotermal'in liderliğini koruması, Verim (C_1) ve Yerlilik (C_9) gibi kriterlerdeki ezici üstünlüğünden kaynaklanmaktadır.

Bu bulgu, sıralamaların yöntem seçimine (özellikle normalizasyon tekniğine) ne kadar duyarlı olduğunun en net kanıtıdır.

3.4. İstatistiksel Tutarlılık ve Yöntemlerin Korelasyon Analizi

Kriter verileri arasındaki doğrusal bağımlılığı ölçmek için Pearson katsayısı kullanılsa da dört farklı deterministik yöntemle (TOPSIS, VIKOR, GRA, WASPAS) elde edilen sıralama sonuçlarının birbirleriyle olan uyumunu test etmek amacıyla Tablo 2' de sıra tabanlı Spearman katsayısı (ρ) tercih edilmiştir.



Şekil 2. Klasik Yöntemlerin Sıralama Sonuçları İçin Spearman Korelasyon Isı Haritası

Isı haritası incelendiğinde şu bulgulara ulaşılmıştır:

Tüm yöntem çiftleri arasında pozitif korelasyon olduğu görülmektedir. Özellikle GRA ve WASPAS yöntemleri arasında tespit edilen çok yüksek korelasyon ($r = 0.96$), bu yöntemlerin veri setindeki geometrik ve aritmetik ilişkilere benzer tepkiler verdiğini göstermektedir.

Uzlaşık çözümü arayan VIKOR ile bütünleşik WASPAS yöntemi arasında da istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir ilişki ($r = 0.86$) görülmektedir. Bu durum, Jeotermal enerjinin liderliğinin metodolojik bir tesadüf olmadığını doğrulamaktadır.

En düşük korelasyon katsayıları, öklid mesafesini kullanan TOPSIS ile gri ilişkisel analizi kullanan GRA ($r = 0.29$) ve WASPAS ($r = 0.39$) arasında gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak klasik yöntemler Jeotermal enerjinin üstünlüğü konusunda genel bir konsensüs içinde olsalar da ($r > 0$), sıralamanın geri kalanı (özellikle orta sıralardaki adaylar) için yöntemler arasında tam bir örtüşme ($r = 1.0$) bulunmamaktadır. Sıralamaların seçilen yönteme göre değişebilmesi, tek bir yönteme güvenmek yerine, tüm bu algoritmaların "ortak aklını" kullanacak bütünleşik bir yaklaşıma ihtiyaç olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu ihtiyaçtan hareketle, adaylar ve kriterler arasındaki ilişkiyi sadece geometrik mesafelerle değil, bulanık küme teorisine dayalı "Göreceli Üyelik Değerleri" (Relational Membership Values) üzerinden modelleyen ve bu çalışmanın temel önerisi olan Relational Membership Value Calculation (RMVC) algoritması 4. bölümde uygulanmıştır.

4. RMVC MODELİ ve ENERJİ PLANLAMA PROBLEMİNE UYGULAMASI

Bu bölümde, çalışmanın temel özgün katkısı olan ve çok kriterli karar-verme problemlerindeki belirsizlikleri yönetmek için geliştirdiğimiz Göreceli Üyelik Değeri Hesaplama (Relational Membership Value Calculation - RMVC) algoritması tanıtılacak ve enerji planlama problemine uygulanacaktır. Klasik yaklaşımların aksine RMVC; veriyi statik bir 'varlık/yokluk' tablosu olarak değil, adaylar arasındaki gizli örüntüleri ve parametrik korelasyonları ortaya çıkaran dinamik bir topolojik uzay olarak ele alır. Tablo 1'deki sayısal verilerin bu algoritmanın çalışabileceği mantıksal düzleme yani Soft Küme formatına nasıl aktarılabileceği de bu bölümde verilecektir.

4.1. RMVC Algoritmasının Matematiksel Altyapısı

Klasik soft küme ve bulanık küme yaklaşımlarında üyelik kavramı genellikle yerel bir perspektife indirgenir; bir adayın belirli bir parametreye ait olup olmaması yalnızca ilgili aday–parametre ikilisi üzerinden değerlendirilir. Bu yaklaşım, adayın sistemin geri kalanıyla kurduğu ilişkileri göz ardı eder ve özellikle ikili (0–1) üyelik temelli modellerde yapısal farklılıkların görünmez hale gelmesine neden olur. Geleneksel modellerde “0” değeri tüm adaylar için eşdeğer bir yokluk anlamına gelirken, RMVC’de her bir “0” değeri bağlamsal olarak yeniden yorumlanır. Bu değer, adayın sahip olduğu diğer parametreler ve bu parametrelerin sistem genelindeki ortak-ortaya-çıkma örüntüleriyle koşullandırılmış nicel bir karşılığa

sahiptir. Dolayısıyla RMVC, üyeliği yalnızca aday–parametre düzeyinde değil, adayın diğer özellikleri ve tüm aday havuzundaki ilişkisel yapı üzerinden kombinatoryal bir hesaplama ile değerlendirir. Bu yaklaşım, eksiklikleri mutlak bir yokluk olarak değil, sistem içindeki göreceli yakınlık derecesi olarak modelleyerek klasik yöntemlerin ötesine geçer.

Tanım: Adayların kümesi $U = \{1,2,3,\dots,n\}$ olarak tanımlansın ve parametrelerin kümesi $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$ olsun. (E, Φ), U üzerinde bir soft küme olsun. Her $1 \leq i \leq m$ için ve herhangi bir $k \in U \setminus \Phi(e_i)$ için, k adayının $\Phi(e_i)$ ile göreceli üyelik değeri Eşitlik 24'teki gibi tanımlanır:

$$\Theta_{e_i}: U \setminus \Phi(e_i) \rightarrow [0,1] \tag{24}$$

Bu fonksiyon *Göreceli Üyelik Fonksiyonu* olarak adlandırılır ve $\Phi(e_i)$ kümesine ait olmayan her bir k adayına bir değer atar. Bu değer Eşitlik 25'teki gibi bulunur:

$$\Theta_{e_i}(k) = \frac{1}{|\Phi e_i| \cdot (m-1)} \sum_{e_t \in E \setminus \{e_i\}} \sum_{j \in \Phi(e_i)} \delta_{e_t}(k,j) \tag{25}$$

Burada $1 \leq j,k \leq n$, $1 \leq i,t \leq m$ ve $n,m \geq 2$ koşulları sağlanır. $e_t \in E \setminus \{e_i\}$ için Kronecker delta fonksiyonu $\delta_{e_{\{t\}}}: [U \setminus \Phi(e_i)] \times \Phi(e_i) \rightarrow \{0,1\}$ biçiminde tanımlanır ve bu noktada δ fonksiyonu Eşitlik 26'da verildiği gibi:

$$\delta_{e_t}(k,j) = \begin{cases} 1; & k \in \Phi(e_t) \wedge j \in \Phi(e_t) \\ 0; & aksi\ hâlde \end{cases} \tag{26}$$

klasik manasıyla yorumlanır.

RMVC yönteminde üyelik, ait olmama hâlinin derecesini de nicel olarak modellemeyi hedeflefiği için bir adayın bir parametreye nasıl ve ne ölçüde "yakın" olduğunu, aşağıdaki unsurları birlikte dikkate alarak hesaplar:

- İlgili parametreye gerçekten sahip olan aday kümesi,
- İncelenen adayın sahip olduğu diğer parametreler,
- Bu parametrelerin, sistemdeki diğer adaylarda birlikte ortaya çıkma sıklıkları.

Bu yapı sayesinde, klasik yaklaşımlarda doğrudan "0" olarak kodlanan eksiklikler, RMVC çerçevesinde bağlamsal bir anlam kazanır.

Önerilen RMVC algoritması dört temel aşamadan oluşur:

1. Göreceli Üyelik Hesabı: Her aday için, o adayın sahip olmadığı kriterlerin göreceli üyelik değerleri hesaplanır.

2. Birleşik Üyelik Matrisi Oluşturma: Doğrudan üyelikler 1 ile, göreceli üyelikler ise 0 ile 1 arasındaki ondalıklı değerlerle temsil edilerek daha yoğun bir üyelik matrisi elde edilir.

3. Skor Hesaplama: Her aday için tüm kriterler boyunca elde edilen üyelik değerleri toplanarak adayın küresel skoru hesaplanır.

4. Karar ve Sıralama: En yüksek skoru elde eden aday optimal seçenek olarak belirlenir.

Bu yapı, klasik sayma temelli yöntemlere (Roy ve Maji, 2007) kıyasla çok daha ince çözünürlüklü ve ayırt edici bir sıralama üretir. RMVC yaklaşımının temel katkısı, soft küme teorisinde uzun süredir var olan ancak yeterince nicel olarak ele alınmamış bir fikri sistematik hâle getirmesidir.

Gerçek yaşam karar verme problemlerinde kriterler çoğunlukla farklı ölçeklerde, farklı yönlerde (fayda veya maliyet) ve heterojen nicel değerler şeklinde sunulmaktadır. RMVC yaklaşımı, soft küme temelli bir çerçeveye dayandığından, bu tür sayısal karar matrislerinin öncelikle anlamlı bir ikili üyelik yapısına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, RMVC'nin ilişkisel gücünü koruyacak ve kriterler arası karşılaştırılabilirliği sağlayacak sistematik bir veri hazırlama süreci izlenmiştir.

4.2. Veri Hazırlığı

Karar probleminde yer alan kriterlerin yönleri öncesinde belirlenmiştir. İncelenen problem bağlamında; C_1, C_3, C_9 'un fayda, diğer kriterlerin maliyet yönlü olduğu biliniyor. RMVC'nin üyelik hesaplaması, kriterlerin aynı yönlü yorumlanmasını gerektirdiğinden maliyet kriterlerinin fayda tipine dönüştürülmesi için veri matematiksel olarak dönüştürülmelidir. Maliyet yönlü kriterlerin fayda yönlü hâle dönüştürülmesinde kullanılan dönüşüm fonksiyonu, yalnızca sıralamayı tersine çevirmekle kalmamalı; aynı zamanda alternatifler arasındaki göreceli farkları da bozmayacak bir yapıya sahip olmalıdır. Bu çalışmada tercih edilen $x' = \frac{1}{x}$ dönüşümü, monoton azalan yapısı sayesinde maliyet–fayda tersliğini açık biçimde

yansıtırken, oransal farkları koruyan doğrusal olmayan bir ölçekleme sunmaktadır. Bu özellik, özellikle LCOE, emisyon yoğunluğu ve su tüketimi gibi pozitif, sürekli ve asimetrik dağılıma sahip enerji göstergeleri için kritik önemdedir. Literatürde maliyet kriterlerinin fayda yönlü kriterler hâline dönüştürülmesi çoğunlukla $min(x_j)/x_{ij}$ veya benzeri normalize edilmiş ters oranlı ifadelerle gerçekleştirilmektedir. Önerilen yaklaşım, bu yapının normalize edilmemiş özünü kullanarak, kriterler arası sıralama ilişkisini doğrudan koruyan ve RMVC'nin göreceli üyelik hesaplamasında yapay üstünlük üretmeyen daha yalın bir dönüşüm sunmaktadır. Böylece dönüşüm, nihai karar üzerinde belirleyici bir rol oynamaktan ziyade, yalnızca RMVC algoritmasının gerektirdiği yönsel tutarlılığı sağlamaktadır. Burada x fayda tipine dönüştürülecek olan ilgili maliyet tipindeki kriterin özgün değerini göstermektedir. Dönüştürülmüş kriterler için $C_i \rightarrow C_i^*$ gösterimini benimsenecektir.

Bu dönüşümle birlikte; düşük maliyetli alternatifler yüksek fayda değerleri almış, tüm kriterler aynı yönlü yani fayda yönlü hâle getirilmiştir.

4.3. Göreceli Eşikleme

Dönüştürülmüş karar matrisi üzerinde her bir kriter için aritmetik ortalama hesaplanır. Aritmetik ortalama, bu çalışmada mutlak bir yeterlilik eşiği olarak değil, alternatifler arası göreceli bir referans noktası olarak kullanılmıştır.

Her bir alternatif için ikili üyelik Eşitlik 27'deki gibi tanımlanır:

$$\mu(u, e_j) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x_{u,e_j} \geq \bar{x}_{e_j} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (27)$$

Burada x_{u,e_j}, alternatif u 'nun kriter e_j altındaki (dönüştürülmüş) değerini, $\bar{x}_{e_j}$ ise ilgili kriterin tüm alternatifler üzerindeki aritmetik ortalamasını göstermektedir.

Bu yaklaşım sayesinde her kriter kendi iç dağılımına göre değerlendirilir, ölçek farklılıkları bertaraf edilir ve alternatiflerin göreceli konumları korunur.

4.4. Eşik Seçiminin RMVC Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmada aritmetik ortalama, eşik değeri olarak tercih edilmiştir. Bununla birlikte, RMVC'nin göreceli üyelik mekanizması, eşikleme aşamasında oluşabilecek yerel farklılıkları büyük ölçüde sönümlemekte; bu nedenle farklı doğrusal eşikleme yaklaşımlarının (ortalama, medyan, vb.) nihai sıralama üzerindeki etkisi sınırlı kalmaktadır. Bu tür doğrusal ölçeklemeler, kriterler arası büyüklükleri ve sıralamayı koruduğundan, RMVC'nin göreceli üyelik hesaplaması üzerinde yapısal bir etki yaratmamaktadır. Bunun temel nedeni, RMVC'de nihai ayrıştırmanın ikili üyelik aşamasında değil, göreceli üyeliklerin tüm aday–parametre uzayı üzerinde normalize edilerek hesaplanması aşamasında gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. RMVC'nin klasik soft küme yaklaşımlarından farklı olarak, ikili üyelik değerleri atama sonrasında oluşan 0 değerlerini eşdeğer kabul etmemesi; bu değerleri, tüm aday–parametre ilişkileri bağlamında yeniden değerlendirmesinden kaynaklanmatadır.

Dolayısıyla, ön-dönüşüm aşamasında uygulanan eşikleme yöntemi, RMVC için bir başlangıç temsili sağlamakta; nihai ayrıştırma gücü göreceli üyelik hesaplaması aracılığıyla elde edilmektedir.

4.5. Karar Matrisinin Soft Kümeye Uygun Hale Dönüşümü

Yukarıda tanımlanan adımlar sonucunda, ele alınan karar probleminde kriterlerin yönleri uyumlu hâle getirilmiş, göreceli performansa dayalı ve anlamlı parametre tanımları içeren bir ikili soft küme yapısına dönüştürülebilmiştir. Bu yapı, RMVC algoritmasının göreceli üyelik değerlerini hesaplaması için uygun bir girdi teşkil etmektedir.

Bu noktada ilk önce maliyet tipindeki verilerin en uygun dönüşüme tabi tutulup fayda tipine dönüştürülmeleri neticesinde elde edilen matris Tablo 3'te oluşturulmuştur.

Tablo 3. Maliyet yönlü kriterlerin dönüştürülmesi ile elde edilen verilerden oluşan matris

Alternatif	*Jeotermal*	*Rüzgâr*	*Güneş*	*HES*	*Doğal Gaz*	*İthal Kömür*	*Linyit*
C_1 - Verim (%)	67,185	32,266	45,15	26,362	29,268	81,405	46,388
C_2* - Değişkenlik	9,434	1,961	2,525	3,521	2,066	4,975	8
C_3 - Güvenlik	0,522	0,026	0,047	0,122	0,019	0,215	0,185
C_4* - Stres	71,428	7,042	10,869	32,258	11,904	15,384	37,037
C_5* - Arazi (m^2/MWh)	0,4	3,333	0,074	2	5	5	0,2
C_6* - Su (L/MWh)	1,429	100	10	0,056	2	0,667	0,5
C_7* - Maliyet (¢/kWh)	0,188	0,303	0,263	0,238	0,117	0,129	0,133
C_8* - Emisyon ($kgCO_2$/MWh)	33,333	100	25	50	2,041	1,053	0,87
C_9 - Yerlilik	1	1	1	1	0	0	1

Alternatiflerin her biri için ortalama değerler hesaplanarak Tablo 4'te verilmiştir. Ardından tüm hücrelerdeki değerler uygun biçimde doldurarak oluşturulan (0-1) matrisi Tablo 5'te inşa edilmiştir.

Tablo 4. Kriterlerin ortalama değerleri

Kriter	*Ortalama Değer*
C_1	46,8605
C_2	4,6403
C_3	0,1622
C_4	26,5602
C_5	2,2868
C_6	16,3787
C_7	0,1958
C_8	30,328
C_9	0,7143

Tablo 5. Eşik sonrası RMVC uygulanmadan önce elde edilen 1-0 matrisi

Alternatif	*Jeotermal*	*Rüzgâr*	*Güneş*	*HES*	*Doğal Gaz*	*İthal Kömür*	*Linyit*
C_1 Verim (%)	1	0	0	0	0	1	0
C_2 Değişkenlik	1	0	0	0	0	1	1
C_3* Güvenlik	1	0	0	0	0	1	1
C_4* Stres	1	0	0	1	0	0	1
C_5* Arazi (m^2/MWh)	0	1	0	0	1	1	0
C_6* Su (L/MWh)	0	1	0	0	0	0	0
C_7* Maliyet (¢/kWh)	0	1	1	1	0	0	0
C_8* Emisyon ($kgCO_2$/MWh)	1	1	0	1	0	0	0
C_9 Yerlilik	1	1	1	1	0	0	1

4.6. Adaylar ve Parametreler Kümesinin Tanımlanması

Önceki bölümlerde açıklanan kriterlerin yönlerinin birleştirilmesi ve göreceli eşikleme işlemleri sonucunda elde edilen ikili karar matrisi, RMVC çerçevesinde bir soft küme olarak temsil edilmiştir.

Bu bağlamda, karar problemine ait adayların kümesi 2. Bölümde tanımlandığı gibi $U = \{A_1, A_2, A_3, A_4\ , A_5, A_6, A_7\}$ olarak alınmıştır.

Benzer biçimde, karar probleminde dikkate alınan kriterler (parametreler) kümesi $E = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9\}$ olarak tanımlanmış olup, her bir C_i ilgili kriteri (verim, değişkenlik, güvenlik, stres, arazi kullanımı, su kullanımı, maliyet, emisyon ve yerlilik) ifade etmektedir.

4.7. Soft Küme Gösterimi ve Φ Eşleme Fonksiyonu

Elde edilen ikili karar matrisi doğrultusunda, her bir parametre için o parametreyi sağlayan adaylar kümesi belirlenir. Buna göre, soft küme yaklaşımında kullanılan eşleme fonksiyonu $\Phi : E \to P(U)$ şeklinde tanımlanır. Burada $P(U)$, adaylar kümesinin kuvvet kümesini göstermektedir.

Tablo 5'e göre doğrudan elde edilen (E, Φ) soft kümesi Eşitlik 28 de verildiği gibidir.

$$\Phi(C_1) = \{A_1, A_6\}, \Phi(C_2) = \{A_1, A_6, A_7\}, \Phi(C_3) = \{A_1, A_6, A_7\}, \Phi(C_4) = \{A_1, A_4, A_7\}, \Phi(C_5) = \{A_2, A_5, A_6\},$$
$$\Phi(C_6) = \{A_2\}, \Phi(C_7) = \{A_2, A_3, A_4\}, \Phi(C_8) = \{A_1, A_2, A_4\}, \Phi(C_9) = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_7\} \quad (28)$$

Bu noktada $\Phi(C_i)$ kümesinde olmayan bir A_k adayı için göreceli üyelik değeri Eşitlik 29'daki formül kullanılarak bulunur.

$$\Theta_{C_i}(A_k) = \frac{1}{|\Phi(C_i)| \cdot (m-1)} \sum_{C_t \in E \setminus \{C_i\}} \sum_{A_j \in \Phi(C_i)} \delta_{C_t}(A_k, A_j) \quad (29)$$

Bu örnek özelinde; $U = \{A_1, A_2, A_3, A_4\ , A_5, A_6, A_7\}$ olduğundan $m = 7$ ve $1 \le j, k \le 9\ , 1 \le i, t \le 7$ olmak üzere $C_t \in E \setminus \{C_i\}$ için Kronecker delta fonksiyonu $\delta_{C_t} : [U \setminus \Phi(C_i)] \times \Phi(C_i) \to \{0,1\}$ olacak biçimde tanımlanır ki burada Eşitlik 30'da verildiği gibi

$$\delta_{e_t}(A_k, A_j) = \begin{cases} 1; & A_k \in \Phi(e_t) \wedge A_j \in \Phi(e_t) \\ 0; & aksi\ hâlde \end{cases} \quad (30)$$

klasik manasıyla yorumlanmaktadır.

Yukarıda açık biçimde tanımlanan $\Phi(E)$ kümesi, Tablo 1'de verilen sayısal karar matrisinin RMVC algoritmasına uygun bir soft küme temsiline dönüştürüldüğünü göstermektedir. RMVC çerçevesinde 0 olan

hücreler için göreceli üyelik değerleri hesaplanarak ham veri yeniden değerlendirilmiş ve karar sürecine dolaylı biçimde dâhil edilmiştir. (Tablo 6)

Tablo 6. RMVC ile göreceli üyelik değerleri hesaplanmış son matris

Alternatif	*Jeotermal*	*Rüzgâr*	*Güneş*	*HES*	*Doğal Gaz*	*İthal Kömür*	*Linyit*
C_1 - Verim (%)	1	0,1875	0,0625	0,1875	0,0625	1	0,3750
C_2 - Değişkenlik	1	0,1667	0,0833	0,2083	0,0417	1	1
C_3* - Güvenlik	1	0,1667	0,0833	0,2083	0,0417	1	1
C_4* - Stres	1	0,25	0,1667	1	0	0,2083	1
C_5* - Arazi (m^2/MWh)	0,2083	1	0,0833	0,125	1	1	0,125
C_6* - Su (L/MWh)	0,25	1	0,25	0,375	0,125	0,125	0,125
C_7* - Maliyet (¢/kWh)	0,25	1	1	1	0,0417	0,0417	0,1667
C_8* - Emisyon ($kgCO_2$/MWh)	1	1	0,2083	1	0,0417	0,1667	0,2917
C_9 - Yerlilik	1	1	1	1	0,025	0,15	1

Ayrıca Tablo 7'de RMVC skoru ve sıralamaları verilmiştir.

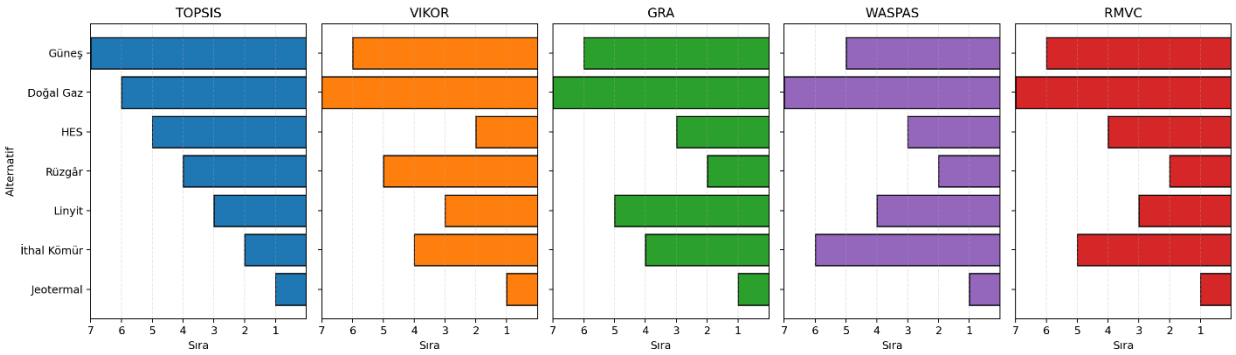
Tablo 7. RMVC skoru ve sıralamaları

Aday	*RMVC Skoru*	*Sıralama*
Jeotermal	6.7083	1
Rüzgâr	5.7708	2
Güneş	2,9375	6
HES	5,1042	3
Doğal Gaz	1.3792	7
İthal Kömür	4,6917	5
Linyit	5,0833	4

Enerji üretim modellerinin çok kriterli bir karar verme problemi çerçevesinde sıralanması amacıyla uygulanan RMVC yaklaşımı, klasik üyelik fonksiyonlarının ötesine geçerek kriterler arasındaki ilişkisel yapıyı da nicel olarak dikkate alan bir değerlendirme sunmaktadır. Geometrik tabanlı yöntemlerin aksine, RMVC'nin sunduğu bu ilişkisel yapı, karar vericilere sadece 'kimin kazandığını' değil, 'neden kazandığını' (pozitif/negatif ağ ilişkileri üzerinden) göreceli üyelik değerleri vasıtasıyla göstererek şeffaf bir politika izleme imkânı sunmaktadır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, enerji üretim alternatiflerinin yalnızca tekil kriter performanslarına göre değil, aynı zamanda bu kriterlerin adaylar arasında birlikte görülme biçimlerine göre de ayrıştığını göstermektedir. RMVC algoritması tarafından hesaplanan toplam bağıl üyelik değerlerine göre enerji üretim modelleri;

Jeotermal > Rüzgar > HES > Linyit > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz

biçimindedir. Şekil 3'te bütün değerlendirmeye alınan yöntemlerin sıralamalarının görüldüğü çubuk grafikten genel durum daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Farklı MCDM yöntemleri için sıralamalar

4.8. Duyarlılık Analizi ve Bazı Yöntemlerin Karşılaştırmalı Kararlılığı

Çok Kriterli Karar Verme problemlerinde elde edilen sonuçların, karar vericilerin sübjektif yargılarına (kriter ağırlıklarına) ne derece bağımlı olduğunu test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz aynı zamanda, literatürdeki klasik ÇKKV yöntemlerinin (TOPSIS, WASPAS vb.) farklı ağırlık kombinasyonları altında, çalışmada önerilen RMVC algoritmasının sunduğu çözüm uzayını kapsayıp kapsayamayacağını sınamak için tasarlanmıştır. Bu kapsamda, Türkiye'nin farklı makro enerji politikalarını yansıtan dört farklı senaryo kurgulanmıştır:

1. Senaryo olarak tüm kriterlerin karar sürecine eşit (1/9) etki ettiği, politik tarafgirliğin minimize edildiği durum, 2. Senaryo olarak Çevre ve İklim Odaklı, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon Vizyonu doğrultusunda, çevresel kriterlerin (C_5 Arazi Kullanımı, C_6 Su Ayak İzi, C_8 Karbon Emisyonu) toplam ağırlığının %50'ye çıkarıldığı, diğer kriterlerin kalan %50'yi paylaştığı senaryo, 3. Senaryo olarak Ekonomi Odaklı LCOE (C_7) ve Kapasite Faktörü (C_1) ağırlıklarının toplam %50 olarak belirlendiği, maliyet ve üretim verimliliğinin maksimize edilmeye çalışıldığı senaryo, 4. Senaryo olarak Şebeke Esnekliği ve Arz Güvenliği Odaklı dinamik saatlik verilerden elde edilen Şebeke Stresi (C_4) ve Arz Güvenliği (C_3) kriterlerinin toplam %50 ağırlığa sahip olduğu, kesintili kaynakların sisteme etkisinin merkeze alındığı senaryo göz önüne alınacaktır.

Senaryo 1: Temel durum senaryosu altında yöntemlerin ürettiği sıralamalar incelendiğinde; RMVC, TOPSIS, VIKOR, GRA ve WASPAS yöntemlerinin tamamında *Jeotermal* enerji en iyi alternatif olarak öne çıkarken, *Doğal Gaz* son sıralarda yer almıştır. Ancak, eşit ağırlık koşullarında dahi RMVC ile klasik yöntemler arasında yöntemsel karakter farklılıkları gözlemlenmiştir. Örneğin TOPSIS, Linyit ve İthal Kömür gibi yüksek emisyonlu (C_8) kaynakları salt LCOE (C_7) avantajından dolayı ortalarda derecelendirirken; RMVC, soft küme tabanlı ilişkisel modeli sayesinde bu kaynakların çevresel dezavantajlarını maskeleme yapmadan değerlendirmiş ve daha dengeli bir sıralama (Jeotermal > Rüzgâr > HES > Linyit > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz) sunmuştur. Bu referans sıralama, sonraki asimetrik ağırlık senaryolarındaki sapmaları ölçmek için temel alınacaktır.

Senaryo 2: Bu senaryoda, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon vizyonu ve küresel iklim krizinin etkileri göz önüne alınarak çevresel kriterlerin karar sürecindeki ağırlığı artırılmıştır. Karbon Emisyonu (C_8) 0,25, Su Ayak İzi (C_6) 0,15 ve Arazi Kullanımı (C_5) 0,10 ağırlığa yükseltilerek çevresel faktörlerin toplam etkisi %50 düzeyine çıkarılmıştır. Kalan 6 kriter ise geriye kalan %50'lik payı eşit (0,0833) paylaşmıştır.

Klasik ÇKKV yöntemlerinin farklı ağırlık senaryolarında RMVC algoritmasının sunduğu dengeli çözüm uzayını kapsayıp kapsayamayacağını test etmek amacıyla, TOPSIS ve WASPAS yöntemleri bu asimetrik ağırlıklarla yeniden hesaplanmıştır. . TOPSIS için elde edilen değerler aşağıdaki gibidir:

1) *Jeotermal*: 0,2625 / (0,0217 + 0,2625) = 0.9236
2) *Rüzgâr*: 0,2551 / (0,0980 + 0,2551) = 0.7225
3) *Güneş*: 0,2358 / (0,1212 + 0,2358) = 0.6605
4) *Doğal Gaz*: 0,2017 / (0,1253 + 0,2017) = 0.6168
5) *HES*: 0,2114 / (0,1628 + 0,2114) = 0.5649
6) *İthal Kömür*: 0,1775 / (0,1637 + 0,1775) = 0.5202
7) *Linyit*: 0,1625 / (0,1934 + 0,1625) = 0.4566

WASPAS için elde edilen değerler aşağıdaki gibidir:

1) *Rüzgâr*: 0.5(0.6959) + 0.5(0.4994) = 0.5977
2) *Jeotermal*: 0.5(0.5472) + 0.5(0.3001) = 0.4237
3) *HES*: 0.5(0.4290) + 0.5(0.1748) = 0.3019
4) *Güneş*: 0.5(0.3233) + 0.5(0.2312) = 0.2773
5) *Linyit*: 0.5(0.3178) + 0.5(0.0768) = 0.1973
6) *İthal Kömür*: 0.5(0.3187) + 0 = 0.1594
7) *Doğal Gaz*: 0.5(0.2055) + 0 = 0.1028

Elde edilen bulgular aşağıda karşılaştırılmıştır:

- *TOPSIS Sıralaması:* Jeotermal > Rüzgâr > Güneş > Doğal Gaz > HES > İthal Kömür > Linyit
- *WASPAS Sıralaması:* Rüzgâr > Jeotermal > HES > Güneş > Linyit > İthal Kömür > Doğal Gaz
- *Orijinal RMVC Sıralaması*: Jeotermal > Rüzgâr > HES > Linyit > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz

Çevre Odaklı bu ağırlıklar uygulandığında TOPSIS algoritması, beklentilerin aksine çevresel dezavantajı Rüzgâr'dan daha yüksek olan Jeotermal'i yine birinci sıraya yerleştirmiştir. Ancak bu durum Jeotermal'in bağlamsal üstünlüğünden değil, TOPSIS'in kullandığı Vektör Normalizasyonu yönteminden kaynaklanmaktadır. Karbon Emisyonu (C_8) sütununda yer alan Linyit (1.15) ve İthal Kömür (0.95) gibi uç aykırı değerler, vektör normalizasyon paydasını yapay bir şekilde büyüterek, temiz enerji kaynakları (Jeotermal ve Rüzgâr) arasındaki göreceli çevre farkını matematiksel olarak 0.003 gibi anlamsız bir aralığa sıkıştırmıştır. Bir başka deyişle klasik yöntemler; aykırı değerlerin varlığında duyarlılığını tamamen yitirmekte, kriter ağırlıkları %50'ye çıkarılsa dahi alternatifler arasındaki ince çevresel farkları algılayamamaktadır. Önerilen RMVC algoritması ise Soft Küme yaklaşımıyla alternatifleri mutlak uçlara göre değil, kendi aralarındaki ikili ilişkilere göre değerlendirdiği için bu 'matematiksel körlüğü' ortadan kaldırmaktadır.

Senaryo 2 ağırlıklarıyla çalıştırılan WASPAS algoritması beklenilebileceği gibi Rüzgâr enerjisini birinci sıraya taşımıştır. Ancak WASPAS skorlarının (Q_i) iç dinamiği incelendiğinde, yöntemin veri setindeki aykırı değerlere ve sınır noktalara karşı son derece kırılgan olan doğrusal normalizasyon ve ağırlıklı çarpım (WPM) felsefesinden kaynaklı bir çöküş yaşadığı tespit edilmiştir. Örneğin Su Ayak İzi (C_6) kriterinde matrisin minimum değeri 0.01 (Rüzgâr) iken HES'in değeri 18'dir. WASPAS'ın doğrusal orantı formülü, HES'in bu kriterdeki normalize skorunu 0.0005 gibi bir değere sıkıştırarak, HES'i tek bir kriter üzerinden aşırı derecede cezalandırmıştır. Oysa bu çalışmada önerdiğimiz RMVC algoritması, alternatifleri birbirleri ile girdikleri ilişkileri incleyen üyelik fonksiyonu ile derecelendirdiği için; ekstrem dezavantajların ya da 0 gibi mutlak sınırların diğer kriterlerdeki başarıları doğrusal veya çarpımsal olarak 'yok etmesine' izin vermez. RMVC sonucumuz bu senaryo için, WASPAS'ın gösterdiği bu matematiksel duyarlılık zafiyetini Soft Küme mantığıyla bertaraf ederek çok daha adil ve kararlı bir sıralama sunmaktadır.

Senaryo 3: Bu senaryoda karar vericilerin ekonomik kaygıları merkeze aldığı simüle edilerek; LCOE/Maliyet (C_7) ağırlığı 0.3'e, Kapasite Faktörü/Verim (C_1) ağırlığı ise 0.2'ye yükseltilmiş, geri kalan 7 kriterin ağırlığı 0.0714 olarak belirlenmiştir. Belirttiğimiz yöntemler bu ağırlıklarla yeniden hesaplandığında klasik ÇKKV algoritmalarının veri setindeki yapısal handikaplara karşı gösterdiği reaksiyonlar açıkça ortaya çıkmıştır. TOPSIS için elde edilen değerler aşağıdaki gibidir:

1) *Jeotermal*: 0,1578 / (0,0444 + 0,1578) = 0.7804
2) *Rüzgâr*: 0,1494 / (0,1086 + 0,1494) = 0.5790
3) *İthal Kömür*: 0,1315 / (0,1064 + 0,1315) = 0.5527
4) *Güneş*: 0,1317 / (0,1077 + 0,1317) = 0.5501
5) *HES*: 0,1268 / (0,1202 + 0,1268) = 0.5133
6) *Linyit*: 0,1041 / (0,1174 + 0,1041) = 0.4699
7) Doğal Gaz: 0,1012 / (0,1482 + 0,1012) = 0.4057

WASPAS için elde edilen değerler aşağıdaki verilmiştir.

1) *Rüzgâr*: 0.5(0.6664) + 0.5(0.4853) = 0.5758
2) *Jeotermal*: 0.5(0.6678) + 0.5(0.4587) = 0.5632
3) *Güneş*: 0.5(0.5052) + 0.5(0.3179) = 0.4115
4) *HES*: 0.5(0.5116) + 0.5(0.3060) = 0.4088
5) *Linyit*: 0.5(0.4440) + 0.5(0.2275) = 0.3357
6) *İthal Kömür*: 0.5(0.4835) + 0 = 0.2417
7) *Doğal Gaz*: 0.5(0.2926) + 0 = 0.1463

Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- *TOPSIS Sıralaması*: Jeotermal > Rüzgâr > İthal Kömür > Güneş > HES > Linyit > Doğal Gaz
- *WASPAS Sıralaması*: Rüzgâr > Jeotermal > Güneş >HES > Linyit > İthal Kömür > Doğal Gaz
- *Orijinal RMVC Sıralaması*: Jeotermal > Rüzgâr > HES > Linyit > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz

Ekonomi Odaklı bu ağırlıklar uygulandığında TOPSIS algoritması, literatürde maskeleme olarak adlandırılan yanılgıya bir kez daha düşmüştür. İthal Kömür, Kapasite Faktöründeki (C_1=81.40) ezici üstünlüğü sayesinde, karesel uzaklık formülünde kendi Karbon Emisyonu (C_8=0.95) felaketini matematiksel olarak maskeleyerek üst sıralara sıçramıştır. TOPSIS, ağırlığı düşürülen kriterlerdeki hayati riskleri (çevre tahribatını) yüksek ağırlıklı kriterlerdeki başarılarla telafi etmeye izin vermiştir.

Buna karşın WASPAS algoritması bambaşka bir matematiksel açmaza sürüklenmiştir. İthal Kömür ekonomi yönlü kriterlerde çok güçlü olsa da, Yerlilik (C_9) kriterindeki mutlak '0' değeri, WASPAS'ın Ağırlıklı Çarpım (WPM) formülündeki 'yutucu eleman' etkisini tetiklemiştir. Ekonomi ağırlıkları toplam %50 olmasına rağmen İthal Kömür ve Doğal Gaz, tek bir sıfır değeri yüzünden WPM adımında tamamen sıfırlanarak sıralamanın en sonuna itilmiştir. WASPAS, uç değerler karşısında ekonomiyi ödüllendirmek yerine 'sıfır tuzağına' kurban gitmiştir. Önerilen RMVC algoritması ise her iki yöntemin de zafiyetlerini bertaraf etmiştir. RMVC, fosil yakıtların ekonomik cazibesinin çevresel yıkımı 'maskelemesine' izin vermediği gibi; Yerlilik kriterindeki '0' değerinin tüm ekonomik başarıyı doğrusal dışı bir şekilde 'yok etmesine'de müsaade etmez. Adayları birbirlerine olan esnek üyelik dereceleriyle kıyaslayan RMVC yöntemimiz, asimetrik ağırlık manipülasyonlarına karşı rasyonelliğini kaybetmeyerek kararlı ve tutarlı temel çözüm topolojisini bu senaryoda altında da korumayı başarmıştır.

Senaryo 4: Bu senaryoda kesintili yenilenebilir kaynakların şebeke entegrasyon zorlukları ve jeopolitik konumumuz dikkate alınarak Arz Güvenliği (C_3) ve Şebeke Stresi (C_4) ağırlıkları eşit biçimde 0.25 yapılarak güvenlik bazlı kriterler toplam %50'ye çıkartıldığı ve diğer 7 kriterin ağırlığı da 0.0714 (%7.14) olarak belirlendiği zaman, klasik ÇKKV algoritmalarının uç değerlere verdiği dramatik tepkiler bir kez daha doğrulanmıştır. TOPSIS için elde edile değerler aşağıda sunulmuştur:

1) *Jeotermal*: 0,2826 / (0,0164 + 0,2826) = 0.9452
2) *Linyit*: 0,1792 / (0,1529 + 0,1792) = 0.5396
3) *İthal Kömür*: 0,1589 / (0,1519 + 0,1589) = 0.5113
4) *HES*: 0,1689 / (0,1828 + 0,1689) = 0.4802
5) *Doğal Gaz*: 0,1218 / (0,2316 + 0,1218) = 0.3447
6) *Güneş*: 0,1139 / (0,2285 + 0,1139) = 0.3326
7) *Rüzgâr*: 0,1157 / (0,2599 + 0,1157) = 0.3080

WASPAS için elde edilen değerler aşağıdaki verilmiştir.

1) *Jeotermal*: 0.5(0.7767) + 0.5(0.5422) = 0.6595
2) *HES*: 0.5(0.4129) + 0.5(0.2526) = 0.3328
3) *Linyit*: 0.5(0.4261) + 0.5(0.2285) = 0.3273
4) *Rüzgâr*: 0.5(0.4134) + 0.5(0.2148) = 0.3141
5) *Güneş*: 0.5(0.2788) + 0.5(0.1678) = 0.2233
6) *İthal Kömür*: 0.5(0.3691) + 0 = 0.1846
7) *Doğal Gaz*: 0.5(0.1941) + 0 = 0.0971

değerleri bulundu. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- *TOPSIS Sıralaması*: Jeotermal > Linyit > İthal Kömür > HES > Doğal Gaz > Güneş > Rüzgâr
- *WASPAS Sıralaması*: Jeotermal > HES > Linyit > Rüzgâr > Güneş > İthal Kömür > Doğal Gaz
- *Orijinal RMVC Sıralaması*: Jeotermal > Rüzgâr > HES > Linyit > İthal Kömür > Güneş > Doğal Gaz

Tablo 1 değerleri incelendiğinde; TOPSIS algoritması, Rüzgâr enerjisinin zayıf Arz Güvenliği (0.026) ve yüksek Şebeke Stresi (0.142) dezavantajlarını geometrik uzaklık hesabında o kadar şiddetli cezalandırmıştır ki, çevre ve maliyet açısından son derece avantajlı olan Rüzgâr enerjisini en sona itmiştir. Daha da tehlikelisi, şebekeye baz yük sağladıkları için Linyit ve İthal Kömür gibi yüksek emisyonlu (1.15 ve 0.95 $kgCO_2/MWh$) fosil yakıtlar, sırf kesintili olmadıkları için TOPSIS tarafından yapay bir şekilde 2. ve 3. sıraya yerleştirilmiştir.

WASPAS algoritmasında ise durum daha farklı bir açmaza sürüklenmiştir. Doğal Gaz ve İthal Kömür baz yük sağlasa da Yerlilik (C_9) kriterindeki '0' değerleri yüzünden Ağırlıklı Çarpım Modelinde (WPM) yine sıfıra maruz kalarak en son iki sırayı almışlardır. Oysa çalışmada önerilen RMVC, adayları ekstrem uzaklıklara göre doğrusal/karesel cezalandırmak yerine bağlamsal üyelik dereceleri ile değerlendirdiği için; Rüzgâr enerjisinin kesintili doğasını kabul etmekle birlikte, çevresel üstünlüğünü sıfırlamayarak Rüzgâr'ı listenin en sonuna atacak mantıksız savrulmaları önler. Aynı şekilde Linyit gibi bir emisyon 'felaketini' de şebekeye güven veriyor gerekçesiyle üst sıralara taşıyarak sürdürülebilirlik vizyonunu zedelemez.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Elde edilen sıralama, Türkiye'nin Ulusal Enerji Eylem Planı ve 2053 Net Sıfır Emisyon hedefleriyle birebir örtüşmektedir. RMVC, yenilenebilir kaynakları (Jeotermal, Rüzgâr, Hidroelektrik) üst sıralara taşıyarak, operatörlere mevcut 'maliyet odaklı' piyasa yapısından 'sürdürülebilirlik odaklı' yapıya geçişte matematiksel bir güvence sağlamıştır. Bu sıralama, jeotermal enerji seçeneğinin birçok kriterde doğrudan eşik üstü performans sergilemesinin yanı sıra, bazı kriterlerde eşik altında kalmasına rağmen sistem genelinde diğer güçlü kriterlerle birlikte yer alması nedeniyle en yüksek göreceli üyelik skorunu elde ettiğini ortaya koymaktadır. Rüzgâr ve HES enerji kaynaklarının birbirine yakın skorlar üretmesi, bu alternatiflerin farklı kriter kümelerinde güçlü performanslar göstermesine karşın, kriterler arası ilişkisel yoğunluk bakımından jeotermal seçeneğin gerisinde kaldığını göstermektedir. Doğal gaz ve güneş enerjisi seçenekleri, hem doğrudan ikili üyelikler hem de ilişkisel destek düzeyi açısından daha zayıf bir yapı sergilemiş ve sıralamanın alt basamaklarında yer almıştır.

Bulgular, RMVC algoritmasının klasik yöntemlerden (TOPSIS, VIKOR, GRA, WASPAS) farklılaştığı noktaları net bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle Linyit (A_7) ve Rüzgâr (A_2) alternatiflerinin üst sıralardaki konumu; bu adayların sadece kendi bireysel performanslarıyla değil, sistemin 'ideal' olarak tanımladığı özellik kümeleriyle (baz yük, yerlilik vb.) kurdukları güçlü ilişkisel topoloji ile açıklanabilir. RMVC, adayın 'ne kadar iyi olduğu' sorusundan öte, 'sistemin geneliyle ne kadar uyumlu olduğu' sorusuna yanıt vererek karar vericiye daha bütüncül bir perspektif sunmuştur.

Bu çalışmamızda, enerji kaynaklarının performansını herhangi bir dışsal önyargı olmaksızın "yalın" haliyle kıyaslayabilmek adına Eşit Ağırlık stratejisi benimsenmiştir. Ancak Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi ve güncellenen Ulusal Katkı Beyanı gibi politika belgeleri, çevresel kriterlerin karar süreçlerindeki stratejik öneminin giderek artacağını göstermektedir.

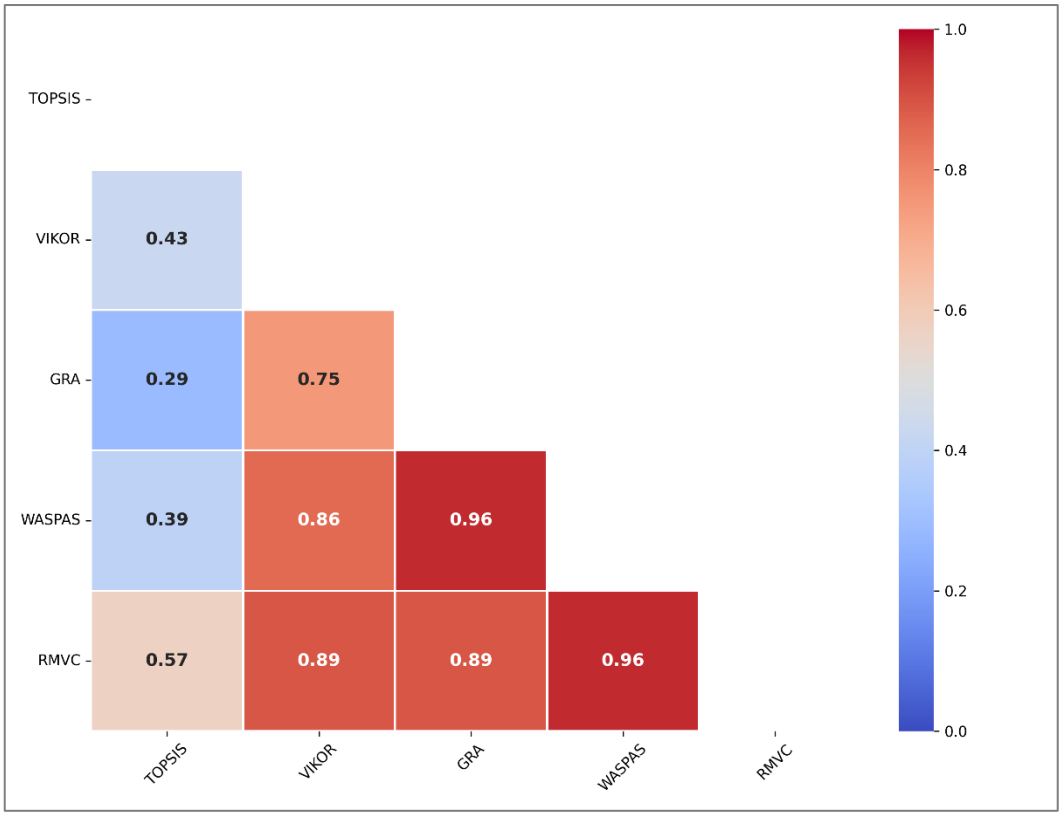
Çevresel kriterlerin yani (C_5): Arazi, (C_6): Su, (C_8): Karbon Emisyonu kriterlerinin ağırlıklarının artırıldığı bir senaryoda, RMVC algoritmasının aşağıdaki dinamikleri tetiklemesi öngörülmektedir:

- RMVC halihazırda Jeotermal, Rüzgâr ve HES gibi kaynakları üst sıralara taşımaktadır. Çevresel kriterlerin ağırlığının artması, bu kaynakların düşük emisyon (C_8), düşük su ayak izi (C_6) gibi parametreler üzerinden kurduğu pozitif ilişkisel ağı daha da güçlendirecektir.
- Klasik yöntemlerin (özellikle TOPSIS) aksine RMVC, yüksek verimliliğe sahip fosil kaynakların çevresel dezavantajlarını "maskelemesine" izin vermez. Çevresel ağırlıkların artırılması, RMVC'nin bu kaynaklar ile "yüksek emisyon" ve "dışa bağımlılık" parametreleri arasında kurduğu negatif topolojik bağları daha belirgin hale getirerek, bu adayların sıralamanın en altına itilmesini hızlandıracaktır.
- RMVC, ağırlık katsayılarını sadece matematiksel bir çarpan olarak değil, verinin kendi içindeki ilişkisel topolojisini yönlendiren bir kılavuz olarak kullanır. Bu sayede, ağırlık senaryoları değişse bile RMVC, aykırı değerlerin yarattığı kararsızlıktan arınmış, politika olarak daha yorumlanabilir sonuçlar üretmeye devam eder.

Buradan da anlaşılabileceği gibi RMVC, sadece bir hesaplama algoritması değil, aynı zamanda değişen politika önceliklerine (çevrecilik, yerlilik vb.) göre esneyebilen ancak bilimsel nesnelliğini koruyan bir stratejik doğrulama aracı olarak değerlendirilebilir.

Farklı matematiksel altyapılara sahip (vektör tabanlı, uzlaşık çözüm tabanlı ve topolojik) yöntemlerin ürettiği sıralamalar arasındaki ilişkiyi analiz etmek amacıyla Spearman katsayısı hesaplanarak sonuçlar Şekil 4 'te ısı haritasında sunulmuştur.

Bu harita, karar verme sürecindeki metodolojik uzlaşma ve yapısal ayrışma noktalarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Analiz edilen tüm yöntemler (TOPSIS, VIKOR, GRA, WASPAS ve önerilen RMVC), birinci aday olan Jeotermal enerjinin 1. sırada olduğu konusunda tam bir mutabakat içindedir. Farklı normalizasyon tekniklerine (Vektörel, Lineer, Min-Max) rağmen Jeotermal'in liderliğini koruması, bu adayın veri setindeki üstünlüğünün yöntemden bağımsız ve sağlam olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4. Farklı MCDM yöntemleri için Spearman korelasyon ısı haritası

Isı haritasında dikkat çeken en önemli bulgu, TOPSIS yöntemi ile diğer yöntemler arasındaki korelasyonun görece düşük (soğuk renkler) seyretmesidir. TOPSIS, ideal çözüme olan geometrik mesafeyi esas alır. Veri setinde altıncı aday olan İthal Kömür, %81,4 gibi çok yüksek bir Verim (C_1) değerine sahiptir. Bu tekil parametredeki aşırı yüksek skor, Öklid mesafesi hesaplamasında karesel olarak büyüyerek, kömürün yüksek maliyet ve emisyon dezavantajlarını matematiksel olarak "maskelemiştir". Bu nedenle TOPSIS, fosil yakıtları üst sıralara taşımıştır. Bu durum, TOPSIS sıralamasının RMVC gibi ilişkisel yöntemlerle olan korelasyon katsayısını düşürmüştür. Bu bir yöntemsel duyarlılıktır.

Önerilen RMVC (Relational Membership Value Calculation) yöntemi; ısı haritasında VIKOR, GRA ve WASPAS yöntemleri ile yüksek pozitif korelasyon (sıcak renkler) sergilemiştir. RMVC; adayları sadece geometrik mesafelerle değil, özellikler arasındaki ilişkisel ağ üzerinden değerlendirdiği için bu algoritma, İthal Kömürün "yüksek verim" avantajını görmüş ancak "yüksek emisyon" ve "dışa bağımlılık" parametreleriyle kurduğu negatif ilişki ağı nedeniyle bu adayı alt sıralara itmiştir.

RMVC'nin sıralaması, WASPAS'ın (Lineer Normalizasyon + Ağırlıklı Toplam) ürettiği "Yeşil Enerji Öncelikli" sıralama ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Ancak RMVC, bu sonucu ağırlık katsayılarına ihtiyaç duymadan, verinin kendi içindeki ilişkisel topolojiyi kullanarak elde etmiştir.

Isı haritasındaki renk dağılımı, literatürdeki "tek bir yönteme güvenilmemeli" ilkesini doğrulamaktadır. TOPSIS'in sayısal büyüklüklere odaklanan yapısı ile RMVC'nin ilişkisel örüntülere (pattern) odaklanan yapısı arasındaki fark, karar vericiye problemin iki farklı yüzünü göstermiştir. RMVC, TOPSIS'in düştüğü "tek kriter baskınlığı" tuzağına düşmeyerek, sürdürülebilir enerji hedefleriyle daha uyumlu ve dengeli bir sıralama üretmiştir.

Sonuç olarak; çalışmanın başında belirlenen araştırma soruları ışığında; (i) RMVC'nin ürettiği sıralamanın, klasik MCDM yöntemlerinin (TOPSIS) aksine, aykırı değerlerin (outliers) yarattığı maskeleme etkisinden arınmış olduğu ve daha kararlı bir karar seti sunduğu görülmüştür. (ii) Yöntem, fosil yakıtların (özellikle İthal Kömür ve Linyit) yüksek kapasite faktörü avantajını, çevresel ve ekonomik risklerle başarılı bir şekilde dengelemiş; (iii) ortaya çıkan sıralama, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon vizyonu ile tam bir tutarlılık sergilemiştir. Bu durum, RMVC'nin sadece bir matematiksel algoritma değil, aynı zamanda ulusal enerji politikalarının uygulanabilirliğini denetleyen stratejik bir doğrulama aracı olduğunu kanıtlamaktadır.

Yazar Katkıları /*Author Contributions*

Abdurrahman Dayıoğlu: Literatür Taraması, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Veri Madenciliği (Python/Pandas), Analiz, Makale Yazımı-orijinal taslak.
Basri Çelik: Matematiksel Modelleme, İstatistiksel Doğrulama, Makale İnceleme ve Düzenleme.
Abdurrahman Dayıoğlu: Literature Review, Conceptualization, Methodology, Data Mining (Python/Pandas), Analysis, Writing-original draft.
Basri Çelik: Mathematical Modeling, Statistical Validation, Writing-review and editing.

Çatışma Beyanı /*Conflict of Interest*

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.
The authors declare no conflict of interest.

Fon Desteği / *Funding*

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.
This study received no funding from any governmental, commercial or non-profit organisation.

Etik Standartlara Uygunluk / *Compliance with Ethical Standards*

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.
It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / *Ethical Statement*

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.
It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.

Veri Erişilebilirliği Beyanı

Çalışmada kullanılan saatlik üretim ve değerlendirme verileri EPİAŞ ve TEİAŞ sitelerindeki şeffaflık platformu gibi ortamlardan elde edilmiş ve https://github.com/DrDayioglu/Enerji_Verileri-Verimlilik.git adresinde tarafımızca derlenerek açık erişime sunulmuştur.

Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.
The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

Acar, S., Kat, B., Rogner, M., Saygın, D., Taranto, Y. ve Yeldan, A.E. (2023). "Transforming Türkiye's Power System: An Assessment of Economic, Social, and External Impacts of an Energy Transition by 2030", *Cleaner Energy Systems*, 4, 100064. https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100064

Ağbulut, Ü., Yıldız, G., Bakır, H., Polat, F., Biçen, Y., Ergün, A. ve Gürel, A. E. (2023). "Current Practices, Potentials, Challenges, Future Opportunities, Environmental and Economic Assumptions for Türkiye's Clean and Sustainable Energy Policy: A Comprehensive Assessment", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103019. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103019

Başoğlu Kabran, F. ve Ünlü, K.D. (2025). "Univariate Deep Learning Models for Short-Term Electricity Load Forecasting from Renewables", *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, 74(4), 670-686. https://doi.org/10.31801/cfsuasmas.1643466

Baykasoğlu, A. ve Gölcük, İ. (2015). "Development of a Novel Multiple-Attribute Decision Making Model via Fuzzy Cognitive Maps and Hierarchical Fuzzy TOPSIS", *Information Sciences*, 301, 75-98. https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.12.048

Baykasoğlu, A., ve Gölcük, İ. (2020). "Revisiting Ranking Accuracy within WASPAS Method", *Kybernetes*, 49(3), 885-895. https://doi.org/10.1108/K-01-2019-0052

Brown, P.R., Cole, W.J. ve Mai, T. (2025). "An Interregional Optimization Approach for Time Series Aggregation in Continent-Scale Electricity System Models", *Energy*, 324, 135830. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135830

Cumhurbaşkanı Kararı. (2023). "1/7/2021 Tarihinden 31/12/2030 Tarihine Kadar İşletmeye Giren/Girecek YEK Belgeli Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretim Tesisleri İçin Uygulanacak Fiyatlar ve Süreler ile Fiyatların Güncellenmesine İlişkin Karar (Karar Sayısı: 7189)", Resmî Gazete, 1 Mayıs 2023, Sayı: 32177. https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/20.5.7189.pdf

Çolak, Z. (2024). "A Hybrid MCDM Method for Enhancing Site Selection for Wind Power Plants in Turkey", *Energy for Sustainable Development*, 82, 101536. https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101536

Dayioglu, A., Erdogan, F. O., ve Celik, B. (2025). "RMVC: A Validated Algorithmic Framework for Decision-Making Under Uncertainty", *Mathematics*, 13(16), 2693. https://doi.org/10.3390/math13162693

EPİAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş). (2025). https://seffaflik.epias.com.tr/home (Erişim Tarihi: 02.01.2026)

Haugen, M., Farahmand, H., Jaehnert, S. ve Fleten, S.-E. (2023). "Representation of Uncertainty in Market Models for Operational Planning and Forecasting in Renewable Power Systems: A Review", *Energy Systems*. https://doi.org/10.1007/s12667-023-00600-4

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2025). Renewable Power Generation Costs in 2024. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024 (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories". https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

JESDER (Jeotermal Elektrik Santral Yatırımcıları Derneği). (2026). "Tarihçemiz (Kurulu Güç)", https://jesder.org/wp-content/uploads/2025/09/JESDERGI-28.sayi_.pdf (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

Karamollaoğlu, H. (2025). "Hybrid Deep Learning Framework for Short-Term Electricity Generation Forecasting in Türkiye Using Multi-Source Data", *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 5(3), 152-160. https://doi.org/10.5152/tepes.2025.25029

Kat, B. (2023). "Clean Energy Transition in the Turkish Power Sector: A Techno-Economic Analysis with a High-Resolution Power Expansion Model", *Utilities Policy*, 82, 101538. https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101538

Kat, B., Şahin, Ü., Teimourzadeh, S., Tör, O., Voyvoda, E. ve Yeldan, A.E. (2024). "A New Energy-Economy-Environment Modeling Framework: Insights from Decarbonization of the Turkish Power Sector towards Net-Zero Emission Targets", *Energy*, 302, 131760. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131760

Kaya, T. ve Kahraman, C. (2010). "Multicriteria Renewable Energy Planning Using an Integrated Fuzzy VIKOR & AHP Methodology: The Case of Istanbul", *Energy*, 35(6), 2517-2527. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.051

LAZARD. (2024). Levelized Cost of Energy+ (LCOE+). https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

Levin, T., Blaisdell-Pijuan, P.L., Kwon, J. ve Mann, W.N. (2024). "High Temporal Resolution Generation Expansion Planning for the Clean Energy Transition", *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 5, 100072. https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100072

Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G. ve Macknick, J. (2013). "Life Cycle Water Use for Electricity Generation: A Review and Harmonization of Literature Estimates", *Environmental Research Letters*, 8(1), 015031. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015031

Molodtsov, D. "Soft set theory first results", Computers & Mathematics with Applications 1999, 37, 817, 19–31. https://doi.org/10.1016/S0898-1221(99)00056-5

Mongird, K. and Rice, J. (2024). "An Integrated and Iterative Multiscale Modeling Framework for Robust Capacity Expansion Planning", Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 11, 77-84. https://doi.org/10.1007/s40518-024-00238-5

NREL (National Renewable Energy Laboratory). (2025). https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

Önenli, O., Ercan, H., Açıkgöz, S. ve Kat, B. (2023). "Emission Reduction Pathways for Satisfying Türkiye's Future Electricity Demand: A Cross-Country Dynamic Panel Analysis with Linear Programming Scenarios", *Cleaner Energy Systems*, 6, 100085. https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100085

Roy, A.R., ve Maji, P.K. (2007). A Fuzzy Soft Set Theoretic Approach to Decision Making Problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 203(2), 412–418. https://doi.org/10.1016/j.cam.2006.04.008

Samal, S. and Dash, R. (2022). "An Empirical Comparison of TOPSIS and VIKOR for Ranking Decision-Making Models", Intelligent and Cloud Computing (Editörler: Mishra, D., Buyya, R., Mohapatra, P. ve Patnaik, S.), *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 286, Springer, Singapore, 429-437. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9873-6_39

Sałabun, W., Wątróbski, J. and Shekhovtsov, A. (2020). "Are MCDA Methods Benchmarkable? A Comparative Study of TOPSIS, VIKOR, COPRAS, and PROMETHEE II Methods", Symmetry, 12(9), 1549. https://doi.org/10.3390/sym12091549

Selçuklu, S. B., Coit, D. W. ve Felder, F. A. (2023). "Electricity Generation Portfolio Planning and Policy Implications of Turkish Power System Considering Cost, Emission, and Uncertainty", *Energy Policy*, 173, 113393. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113393

SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi. (2023). Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası. Sabancı University. https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/SHURA-2023-02-Rapor-Net-Sifir-2053_04052023.pdf (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

Türkiye Cumhuriyeti İletişim Başkanlığı. (2023). "Cumhurbaşkanı Erdoğan: 2053 Yılı İtibarıyla Hedefimiz Net Sıfır Emisyondur.", https://www.iletisim.gov.tr/turkce/haberler/detay/cumhurbaskani-erdogan-2053-yili-itibariyla-hedefimiz-net-sifir-emisyondur (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.). (2025a). 2024 Yılı Faaliyet Raporu. https://www.teias.gov.tr/faaliyet-raporlari (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.). (2025b). Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2024 İstatistikleri. https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2021). "Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options". United Nations, Geneva. https://unece.org/sed/documents/2021/10/reports/life-cycle-assessment-electricity-generation-options (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2022). "Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-Cycle Assessment of Electricity Sources" (ECE/ENERGY/141). United Nations, Geneva. https://digitallibrary.un.org/record/4020227 (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

UNFCCC. (2024). "Türkiye Long Term Climate Strategy," https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Turkiye_Long_Term_Climate_Strategy.pdf, (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F. ve Zhao, J.-H. (2009). "Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-Making", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021

World Bank Group. (2022). Türkiye - Country Climate and Development Report. https://www.ifc.org/en/insights-reports/2022/turkiye-country-climate-and-development-report (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy Sets", *Information and Control*, 8(3), 338-353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X