



## YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ HİBRİT KÜRESEL BULANIK ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Selen AVCI AZKESKİN<sup>1</sup>, Ezgi GÜLER<sup>2\*</sup>, Zerrin ALADAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Kocaeli  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7433-5696>

<sup>2</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Bilecik

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8789-8244>

<sup>3</sup>İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, İstanbul

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5986-7210>

### Anahtar Kelimeler

Yenilenebilir Enerji Kaynağı, Küresel Bulanık Küme, SF-DEMATEL, SF-SWARA, SF-TOPSIS,

### Öz

Enerji, ekonomik kalkınma ve toplumsal refahın sürdürülebilmesi açısından stratejik bir kaynaktır. Artan nüfus ve kentleşme, enerji talebini hızla artırmakta; bu durum, çevresel etkiler açısından avantajlı olan yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini daha da vurgulamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynağı seçimi, teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerin birlikte değerlendirildiği çok kriterli karar verme problemidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin enerji dönüşüm hedefleri doğrultusunda İstanbul ili için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 25 değerlendirme kriteri ve 5 alternatif (güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal) ele alınmıştır. Metodolojik olarak çalışma, karar verici görüşleri altında ele alınan SF-DEMATEL-SF-SWARA-SF-TOPSIS bütünlük yaklaşımına dayanmaktadır. İlk aşamada SF-DEMATEL yöntemiyle kriterler arasındaki neden-sonuç ilişkileri analiz edilmiş ve 25 kriter arasından 9 tanesi "etkileyen kriter" olarak belirlenmiştir. Bu kriterler, sonraki aşamada SF-SWARA yöntemine doğrudan girdi olarak alınmış ve sistemde belirleyici rol oynayan faktörler üzerinden ağırlıklandırma yapılmıştır. SF-SWARA yönteminin uygulanması aşamasında, küresel bulanık kümelerde fark

\*Sorumlu yazar; e-posta : [ezgi.guler@bilecik.edu.tr](mailto:ezgi.guler@bilecik.edu.tr)

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1812146>

*işleminin tanımlı olmaması problemine çözüm olarak "küresel bulanık kümeler arası mesafe" yaklaşımı önerilmiş ve bu doğrultuda yöntemin literatürde yer almayan özgün bir versiyonu geliştirilmiştir. Sonuçlara göre teknoloji karmaşıklığı ( $w=0,1622$ ), teknolojik olgunluk ( $w=0,1543$ ) ve teknolojinin bakım ve destek kolaylığı ( $w=0,1524$ ) en önemli kriterler olarak öne çıkmıştır. Son aşamada, elde edilen kriter ağırlıkları SF-TOPSIS yöntemine entegre edilerek alternatiflerin performans sıralaması elde edilmiştir. SF-TOPSIS ile pozitif ve negatif ideal çözümlere olan küresel bulanık uzaklıklar dikkate alınarak alternatifler için göreceli yakınlık katsayıları hesaplanmıştır. Bulgulara göre rüzgâr ( $\xi=0,1873$ ) İstanbul için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olarak belirlenmiştir. Çalışma, küresel bulanık küme teorisinin nedensel analiz, ağırlıklandırma ve sıralama yöntemleriyle entegrasyonunu sağlayarak belirsizlik altında enerji planlaması için güçlü, sistematik ve genellenebilir bir karar çerçevesi sunmaktadır.*

## **EVALUATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES USING HYBRID SPHERICAL FUZZY MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS: THE CASE OF İSTANBUL**

<b>Keywords</b>	<b>Abstract</b>
<p><i>Renewable Energy Source, Spherical Fuzzy Set, SF-DEMATEL, SF-SWARA, SF-TOPSIS..</i></p>	<p><i>Energy is a strategic resource for sustaining economic development and social welfare. The increasing population and urbanization are rapidly raising energy demand, which further highlights the importance of renewable energy sources due to their environmental advantages. The selection of a renewable energy source constitutes a multi-criteria decision-making (MCDM) problem that requires the simultaneous evaluation of technical, economic, environmental, and social factors. This study aims to identify the most suitable renewable energy source for the province of Istanbul, in line with Türkiye's energy transformation goals. A total of 25 evaluation criteria and five alternatives (solar, wind, hydroelectric, biomass, and geothermal) were considered. Methodologically, the study adopts an integrated SF-DEMATEL–SF-SWARA–SF-TOPSIS approach under the perspectives of decision-makers. In the first stage, the cause–effect relationships among the criteria were analyzed using the SF-DEMATEL method, and nine of the twenty-five criteria were identified as “influencing criteria.” These were subsequently used as direct inputs for the SF-SWARA method, where the criteria weights were determined based on the most influential factors within the system. During the implementation of the SF-SWARA method, to address the issue that the difference operation is not defined for spherical fuzzy sets, the “distance between spherical fuzzy sets” approach was introduced. Based on this, an original version of the SF-SWARA method—previously unavailable in the literature—was developed, representing the methodological novelty of this study. According to the results, technological complexity (<math>w = 0.1622</math>),</i></p>

*technological maturity ( $w = 0.1543$ ), and ease of maintenance and support ( $w = 0.1524$ ) were identified as the most significant criteria. In the final stage, the derived criteria weights were incorporated into the SF-TOPSIS method to obtain the performance ranking of the alternatives. Relative closeness coefficients were calculated considering the global fuzzy distances to both positive and negative ideal solutions within the SF-TOPSIS framework. The findings reveal that wind energy ( $\xi = 0.1873$ ) is the most suitable renewable energy source for Istanbul. Overall, the study offers a robust, systematic, and generalizable decision-making framework for energy planning under uncertainty by integrating spherical fuzzy set theory with causal analysis, weighting, and ranking methods.*

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 28.10.2025	Submission Date : 28.10.2025
Kabul Tarihi : 06.01.2026	Accepted Date : 06.01.2026

## 1. Giriş

Enerji; ısınma, aydınlatma ve ulaşım gibi temel ihtiyaçların karşılanması yanı sıra tüm ekonomik faaliyetlerde de yoğun biçimde kullanılan stratejik bir kaynaktır. Bu nedenle enerji, modern toplumların ekonomik, teknolojik ve sosyal kalkınmasının başlıca itici güçlerinden biri olarak görülmektedir. Dünya nüfusundaki hızlı artış ve sanayileşme sürecinin ivme kazanması enerji talebini sürekli olarak artırmaktadır (Topcu, 2024). ABD Enerji Bilgi İdaresi'nin (EIA) son tahminlerine göre küresel enerji talebi 2050 yılına kadar yaklaşık %50 oranında artacaktır. Bu denli büyük bir artış, ülkeleri yükselen enerji talebini karşılamak üzere yeni adımlar atmaya zorlamaktadır (Sevgi ve Figen, 2025). Söz konusu talebin sürdürülebilir yöntemlerle sağlanması çevresel, sosyal, siyasi ve ekonomik açıdan önemli faydalar sunacaktır (Brodny ve Tutak, 2023).

Enerji kaynakları genel olarak yenilenemez ve yenilenebilir olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), doğada kendini sürekli yenileyebilen güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik, dalga, hidrojen ve biyokütle gibi kaynaklardan oluşmakta ve yenilenebilirlik özelliğiyle çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik bir rol üstlenmektedir (Almutairi, Hosseini Dehshiri, Hosseini Dehshiri, Mostafaeipour, Hoa ve Techato, 2022). Bununla birlikte, günümüzde fosil yakıtlar hâlâ küresel enerji talebinin %80'inden fazlasını karşılamakta; bu kaynakların sürekli kullanımı CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %90'ına ve atmosferde sera gazı birikiminin artmasına yol açmaktadır (Aglia, Busato ve Presciutti, 2025). Bu durum, YEK'e geçişi bir tercih değil küresel ölçekte kaçınılmaz bir gereklilik haline getirmiştir. Ayrıca YEK'in düşük maliyetli yapısı, ülkelerin ekonomilerinin çeşitlenmesine katkı sağlamakta, yeni istihdam olanakları yaratmakta ve enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltmaktadır (Magableh, Mistarihi ve Dalu, 2025).

İlgili projeksiyonlara göre Türkiye'nin enerji talebinde 2040 yılına kadar %109'a

varan bir artış yaşanması öngörülmektedir. Bu artış, önceki 20 yılda elektrik arzında gerçekleşen %161'lik büyümeye karşılık gelmektedir (ETKB, 2021). Türkiye'nin, taraf olduğu Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşabilmesi için fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonları azaltması gerekmektedir (IEA, 2021). Ancak söz konusu enerji artışı beklentisi, bu hedeflere ulaşmada zorluklar yaşanabileceğine işaret etmektedir (TÜİK, 2022). Bu bağlamda, enerji tüketiminin yoğun olduğu İstanbul gibi mega kentlerde YEK geçişinin hızlandırılması, enerji hedeflerine ulaşmada stratejik bir adım olarak değerlendirilmektedir (Çolak ve Kaya, 2017).

Çok kriterli karar verme (ÇKKV), enerji planlamasında önemli bir araç olarak kullanılmakta ve birden fazla karar vericinin (KV) farklı faktörleri eşzamanlı olarak değerlendirmelerine olanak tanımaktadır. Bu yöntem sayesinde çevresel, sosyal, ekonomik, politik ve teknik unsurlar göz önünde bulundurularak sürdürülebilir enerji hedefleriyle uyumlu en uygun çözümler belirlenebilmektedir (Rahman, Ahmed, Rana, Hossain, Bhuiyan ve Alam, 2024). YEK seçimi ve değerlendirilmesi, çeşitli nicel ve nitel kriterlerin dikkate alınmasını gerektiren bir ÇKKV problemidir (Nguyen, 2022). Bu süreçte çoğu zaman birbirleriyle çelişen kriterler değerlendirilmekte, kriterlere belirli ağırlıklar atanmakta ve alternatifler nicel olarak puanlanıp sıralanarak en uygun seçenek ortaya konmaktadır.

ÇKKV uygulamaları, öznel önyargıların azaltılması amacıyla bulanık mantık yaklaşımlarıyla güçlendirilmektedir. Bulanık mantık tabanlı yöntemler, KV'lerin belirsizliği ifade etmek için kullandıkları dilsel yargıları nicel verilere dönüştürerek karar performansını artırmaktadır. Literatürde bu amaçla geliştirilmiş çeşitli bulanık küme yaklaşımları yer almaktadır. Klasik bulanık sayılar (Zadeh, 1965), sezgisel bulanık kümeler (Atanassov, 1999), Pisagor bulanık sayılar (Yager, 2013) ve nütrosifik bulanık yapılar (Smarandache, 2005) bunlar arasında sıralanabilir. Kutlu Gündoğdu ve Kahraman (2019) tarafından geliştirilen Küresel Bulanık Kümeler (SFS) ise klasik bulanık küme teorisinin geliştirilmiş bir versiyonu olarak, karar verme süreçlerinde daha esnek ve ayrıntılı bir temsil olanağı sağlamaktadır. Geleneksel bulanık kümelerde öğeler yalnızca üyelik dereceleri ile tanımlanırken; küresel bulanık yapılarda üyelik derecesine ek olarak üyelik karşıtı (üye olmama) ve bağımsız bir unsur olarak tereddüt derecesi de dikkate alınmaktadır. Bu özellik, özellikle karmaşık ve geniş ölçekli karar verme problemlerinde daha bütüncül analizler yapılmasına ve değerlendirme hassasiyetinin artmasına katkı sunmaktadır (Kocakaya, Engin, Tektaş ve Aydın, 2021; Özdemir, 2022).

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin İstanbul ili için en uygun YEK'in belirlenmesidir. Çalışma kapsamında, enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde KV'lerin belirsizlik içeren yargılarını daha gerçekçi biçimde modelleyebilmek amacıyla SFS kullanılmıştır. İlk aşamada kriterler arasındaki bağımlılıkları incelemek ve kriterleri "etkileyen" ve "etkilenen" olarak sınıflandırmak için Küresel Bulanık DEMATEL (SF-DEMATEL) kullanılmıştır. Ardından, küresel

bulanık kümelerde fark işleminin tanımlı olmaması nedeniyle, literatürde yer alan “küresel bulanık kümeler arası mesafe” yaklaşımından yararlanılarak Küresel Bulanık SWARA (SF-SWARA) yöntemi farklılaştırılmış ve etkileyen kriterler için kriter ağırlıkları bu yöntemle hesaplanmıştır. Son aşamada ise elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak Küresel Bulanık TOPSIS (SF-TOPSIS) yöntemi uygulanmış ve İstanbul için en uygun YEK alternatifinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Türkiye'nin enerji geçiş hedefleri doğrultusunda özellikle nüfus yoğunluğu ve enerji talebi yüksek bir şehir olan İstanbul'a odaklanması, çalışmaya hem ulusal hem de bölgesel düzeyde özgünlük kazandırmaktadır. Ayrıca, KV'lerin belirsiz yargılarını daha esnek ve bütüncül biçimde değerlendirmeye imkân veren SF-DEMATEL, geliştirilmiş SF-SWARA ve SF-TOPSIS yöntemlerinin birlikte uygulanması, metodolojik açıdan önemli bir yenilik sunmaktadır. Böylece çalışma, enerji planlaması ve yenilenebilir enerji seçimi alanında literatüre hem yönetsel hem de uygulamalı açıdan katkı sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, İstanbul ili özelinde YEK'lerin göreceli uygunluğunu değerlendirmeye yönelik konuma özgü bir karar destek modeli sunmaktadır. Elde edilecek sıralamaların bölgesel koşullara duyarlı olması çalışmanın kısıtlılığını olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, farklı coğrafi alanlarda önerilen metodolojinin yerel verilere dayalı olarak yeniden uygulanması gerekmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde bilimsel yazın taramasına yer verilmektedir. Üçüncü bölümde çalışma alanı, materyal ve kullanılan yöntemler detaylandırılmaktadır. Dördüncü bölüm elde edilen bulguları, beşinci bölüm tartışma ve sonuçları içermektedir.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

YEK seçiminde; güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi alternatiflerin; yatırım maliyeti, enerji verimliliği, teknolojik yeterlilik, bakım kolaylığı ve çevresel etki gibi çok sayıda kriter açısından kapsamlı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde, son 5 yılda YEK seçim problemi üzerine gerçekleştirilmiş bazı akademik çalışmalar sunulmuştur. Her bir çalışmada kullanılan ÇKKV yöntem(ler)i, değerlendirme kriterleri, alternatif enerji türleri ve seçilen alternatif(ler) özetlenmiştir. Tablo 1'de söz konusu çalışmalarda kullanılan yöntem(ler), ele alınan alternatifler ve seçilen alternatif(ler) verilmektedir.

Tablo 1

## Literatür özeti

Yazar (Yıl)	Uygulama yeri	ÇKKV Yöntemi(leri)	Alternatifler	Seçim
Yılan, Kadirgan ve Çiftçioğlu (2020)	Türkiye	WSM, MAUT	Doğal Gaz, Kömür, Barajlı Hidroelektrik, Nehir Tipi Hidroelektrik, Karasal Rüzgâr, Jeotermal, Güneş PV	Barajlı Hidroelektrik
Ghenai, Albawab ve Bettayeb (2020)	Birleşik Arap Emirlikleri	Genişletilmiş SWARA-ARAS	Polisilikon Güneş, Kara Rüzgâr Fosforik Asit Yakıt Hücresi, Katı Oksit Yakıt Hücresi	Kara Rüzgâr
Wang, Xu ve Solangi (2020)	Pakistan – Sindh ve Baluchistan	Bulanık AHP ve SWOT analizi	Güneş, Rüzgâr, Biyokütle	Rüzgâr
Şahin (2021)	Türkiye	AHP, BWM, CRITIC, Entropi, ELECTRE, ORESTE, PROMETHEE, TOPSIS, VIKOR, WPM, WSM, Borda Sayım, Copeland, Ortalama Derecelendirme	Doğal gaz, Kömür, Hidroelektrik, Karasal Rüzgâr, Jeotermal, Güneş PV	Hidroelektrik
Abdel-Basset Gamal, Chakraborty ve Ryan (2021)	Mısır	Üçgensel nütrosifik sayı temelli AHP, VIKOR, TOPSIS	Hidroelektrik, Rüzgâr enerjisi, Güneş PV, Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi	Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi
Saraswat ve Digalwar (2021)	Hindistan	Shannon Entropisi ve Bulanık AHP	Termik enerji, Gaz enerjisi, Nükleer enerji, Güneş enerjisi, Rüzgâr enerjisi, Biyokütle, Hidroelektrik	Güneş
Bilgili, Zaralı, Ilgün, Dumrul ve Dumrul (2022)	Türkiye	Sezgisel Bulanık TOPSIS	Rüzgâr, Güneş, Jeotermal, Biyokütle, Hidrolik, Dalga, Hidrojen	Güneş
Karbin ve Rashidi Komijan (2022)	İran	PROMETHEE	Güneş Fotovoltaik, Rüzgâr, Jeotermal, Mikrohidroelektrik, Biyokütle	Mikrohidroelektrik
Stojčetrović, Petković ve Đurović, (2023)	Kosova	AHP	Fotovoltaik, Hidroelektrik, Biyokütle, Rüzgâr	Hidroelektrik
Zheng, Lee, Bing ve Lixiua (2023)	İran	TOPSIS, VIKOR, COPRAS, MOORA, MABAC	Güneş, Rüzgâr, Biyokütle, Jeotermal, Hidroelektrik	Güneş
Büyüközkan Karabulut ve Göçer (2024)	Türkiye	Küresel Bulanık DEMATEL, Küresel Bulanık ANP, Küresel Bulanık VIKOR	Güneş, Rüzgâr, Hidroelektrik, Biyogaz, Jeotermal	Rüzgâr ve Güneş (Kompromis çözüm)
Aydın ve Oruç (2024)	Türkiye	MAUT ve TAOV	Hidroelektrik, Rüzgâr, Güneş, Biyokütle, Jeotermal	Hidroelektrik
Li, Wang ve Lin (2024)	Malezya	Bulanık AHP + Kümülatif Beklenti Teorisi	Güneş, Biyokütle, Rüzgâr, Hidroelektrik	Güneş

Tablo 1’de görüldüğü üzere, YEK seçimi literatürde sıklıkla ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. Çalışmalarda, hidroelektrik, biyokütle, rüzgâr ve güneş başta olmak üzere çevre dostu ve düşük maliyetli YEK alternatifleri dikkate alınmıştır. Değerlendirme sürecinde kullanılan kriterler genellikle ekonomik, teknik, çevresel, sosyal ve politik boyutlar çerçevesinde ele alınmaktadır (Niu, Zhen, Yu, Wang, Sun ve Xu, 2020; Karaaslan, Adar ve Kılıç Delice, 2022; Kantoğlu ve Düzdar Argun, 2023; Büyüközkan ve diğ., 2024). Öne çıkan alt kriterler arasında ise güvenilirlik (Büyüközkan ve Güleriyüz, 2016; Sedady ve Beheshtinia, 2019), verimlilik (Çolak ve Kaya, 2017; Alshamrani, Majumder, Das, Hezam ve Božanić, 2023), enerji üretim kapasitesi (Zaralı, 2022; Nguyen, 2022), yatırım ve kurulum maliyeti (Alkan, 2024; Li ve diğ., 2024), enerji üretim maliyeti (Wang ve diğ., 2020; Özgüner ve Özgüner, 2021) ve sosyal kabul (Cesur, Taş ve Taş, 2024; Li ve diğ., 2024) sıralanabilir. YEK değerlendirmelerinde kullanılan bu kriterlerin çoğu, birbirleriyle etkileşim içinde olan çok boyutlu yapılara sahiptir. Örneğin, enerji üretim kapasitesi ile kurulum maliyeti arasında genellikle bir ilişki bulunur; kapasitesi yüksek sistemler, daha yüksek yatırım maliyetlerini beraberinde getirebilir. Benzer biçimde, teknolojik olgunluğun artması bakım kolaylığı, güvenilirlik ve ekonomik ömür gibi faktörlerde iyileşme sağlarken; daha az karmaşık teknolojiler çoğu zaman daha kısa kurulum süreleriyle avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, alan gereksinimi fazla olan teknolojiler tarım arzalarıyla rekabet ederek toplumsal kabul üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu çok boyutlu ilişkiler, karar ortamlarında doğrusal olmayan yapılar oluşturmakta ve kriterlerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımına dayanan yöntemlerin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Literatürde bu tür bağımlılıkları dikkate alabilen ÇKKV yaklaşımları geliştirilmiştir. Örneğin; Analitik Ağ Süreci (ANP), kriterler arasındaki geri besleme ilişkilerini modelleyebilirken; DEMATEL yöntemi kriterler arasındaki nedensellik ilişkilerini ortaya koyarak kriterleri “etkileyen” ve “etkilenen” gruplar şeklinde sınıflandırabilmektedir. Bu yönüyle DEMATEL, alternatiflerin sıralanmasından ziyade, karar modellerinde kriterlerin yapısal analizine katkı sağlamaktadır. Mevcut çalışmalar incelendiğinde, kriter bağımlılıklarını dikkate alan yöntemlerin sınırlı sayıda uygulandığı görülmektedir. Türkiye’de Kabak ve Dağdeviren (2014), Kuleli Pak, Albayrak ve Erensal (2017) ile Kantoğlu ve Düzdar Argun (2023) ANP yöntemini kullanmış; Büyüközkan ve Güleriyüz (2016) ile Büyüközkan ve diğ. (2024) ise DEMATEL, ANP ve bunların çeşitli bulanık uzantılarını entegre biçimde değerlendirmiştir. Uluslararası çalışmalarda Yazdani, Chatterjee, Zavadskas ve Streimikiene (2018) Avrupa Birliği ülkeleri için DEMATEL-ANP, COPRAS ve WASPAS yöntemlerini birlikte kullanırken; Li, Li ve Song (2021) Çin’in sekiz bölgesinde ANP, WSM, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE ve VIKOR yöntemlerini bir arada uygulamıştır.

Küresel bulanık küme (SFS) ve ÇKKV yaklaşımlarının yenilenebilir enerji literatüründe kullanıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazıları özetlenmiştir. Thanh (2022) çalışmasında Vietnam’daki sanayi kompleksleri için YEK seçimini çok kriterli ve belirsizlik içeren bir karar verme

problemi olarak ele almıştır. SF-AHP ve TOPSIS entegrasyonuna dayalı bir SF-ÇKKV modeli önererek sürdürülebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde sistematik bir yaklaşım sunmuş ve önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini bir vaka çalışmasıyla göstermiştir. Azim, Ali, Khan, Awwad, Ali ve Ismail (2023) çalışmalarında, yenilenebilir enerji saha seçimi problemi için CODAS yöntemini q-Spherical Fuzzy Rough Set teorisiyle bütünleştirerek q-SFR-CODAS adlı yeni bir ÇKKV modeli geliştirmişler ve uygulanabilirliğini bir vaka üzerinde duyarlılık analizi ile doğrulamışlardır. Dincer, Eti, Yüksel, Gokalp ve Celebi (2023) çalışmalarında hastaneler için yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik risk yönetimi stratejilerini önceliklendirmek amacıyla SF-TOP-DEMATEL modeli geliştirilmişlerdir. Çalışmada DEMATEL'e TOPSIS adımlarının entegre edilerek yöntemin tutarlı sonuçlar ürettiği gösterilmiş ve analiz bulgularına göre en kritik stratejinin devlet desteği, ardından teknolojik gelişmeler olduğu belirlenmiştir. Abdülvahitoğlu (2025) çalışmasında, ekonomik, teknik, çevresel ve sosyal kriterler arasındaki belirsizlik ve karşılıklı etkileşimleri dikkate alan SF-TOPSIS yaklaşımıyla alternatif yakıt türlerini bütüncül olarak değerlendirilmiş ve sürdürülebilir enerji politikalarına yön verecek en uygun seçeneklerin sistematik biçimde belirlenmesini amaçlamıştır. Mizrak ve Rodoplu Şahin (2025) çalışmalarında, ekonomik yapılabirlik, çevresel etki, teknolojik verimlilik, ölçeklenebilirlik ve operasyonel güvenilirlik ölçütlerini bütünlük biçimde değerlendirmek amacıyla yapay zekâ destekli hibrit SF-CRITIC-RATGOS modelini kullanarak İstanbul Havalimanı için sürdürülebilir enerji yatırım alternatiflerini önceliklendirmişlerdir. Analiz sonuçları; güneş mikro şebekeleri, atıktan enerji geri kazanımı ve yapay zekâ tabanlı enerji yönetiminin en uygulanabilir seçenekler olduğunu ortaya koymuştur.

Literatürde öne çıkan bir diğer önemli bulgu ise KV yargılarındaki belirsizlik ve öznelliğin modellenmesinde bulanık küme teorisinin yaygın biçimde kullanılmasıdır. Bu bağlamda, klasik bulanık sayılar, Tip-2 bulanık kümeler, sezgisel bulanık yaklaşımlar ve aralık değerli bulanık modeller sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yaklaşımlar, KV'lerin görüşlerini daha esnek biçimde ifade etmelerine olanak tanıyarak özellikle yüksek belirsizlik içeren karar ortamlarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak, literatüre son yıllarda kazandırılan SFS yaklaşımının uygulama alanı hâlâ oldukça sınırlıdır ve bu durum, gelecekteki araştırmalar açısından dikkate değer bir potansiyel ortaya koymaktadır. Bu çalışma, söz konusu araştırma boşluğunu gidermeyi amaçlamakta ve bu doğrultuda öncelikle kriterler arasındaki nedensel ilişkilerin SF-DEMATEL yöntemiyle belirlenmesine odaklanmaktadır.

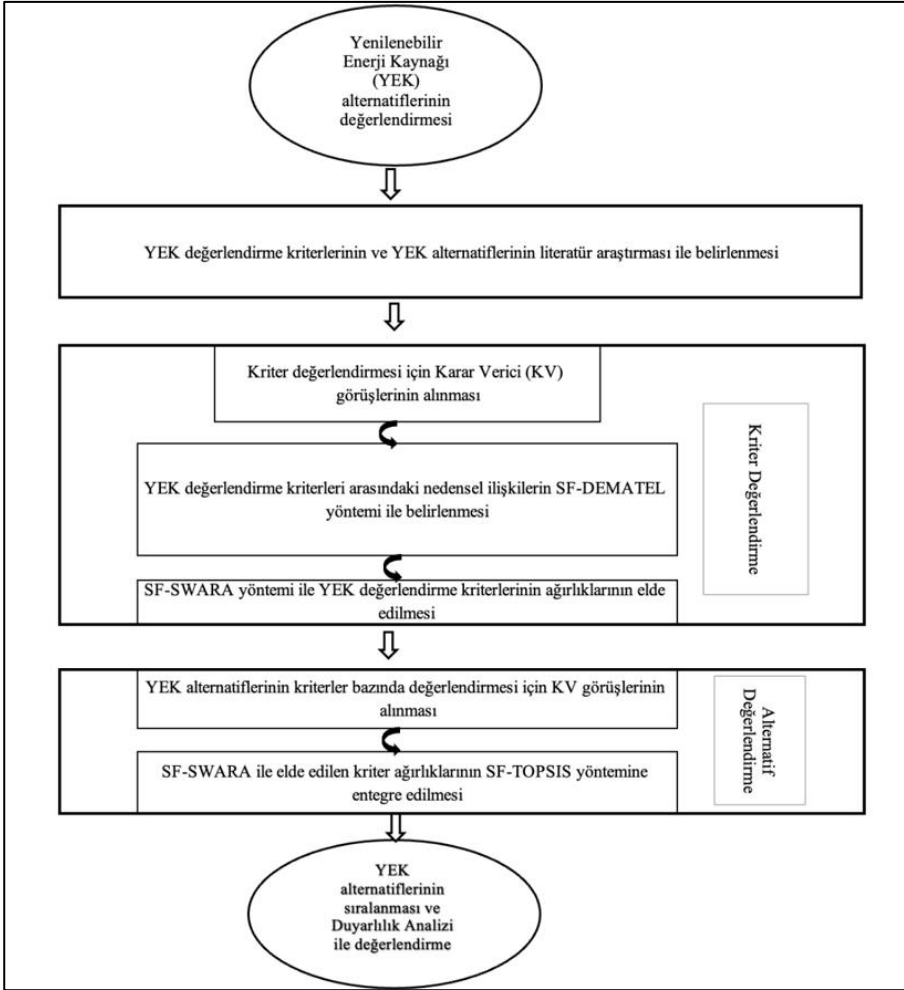
YEK seçiminin bölgesel koşullar dikkate alınarak yapılması, doğru ve uygulanabilir stratejilerin geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak Türkiye literatürü incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunluğunun ülke geneline yönelik makro düzeyli analizlere odaklandığı görülmektedir. Bölgesel ölçekte gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışmalarda ise farklı bölgeler için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Kaya ve Kahraman (2010) İstanbul için en

uygun YEK'i rüzgâr enerjisi olarak belirlemiş ve en uygun bölge olarak Çatalca'yı önermiştir. Algül, Koruk ve Erdebilli (2023) Ankara ili için güneş enerjisinin en uygun alternatif olduğunu ortaya koyarken, Ilbahar, Cebi ve Kahtaman (2020) İç Anadolu Bölgesi'nde biyokütle için güneş enerjisinin en uygun bölge olarak Çatalca'yı önermiştir. Aksoy (2019), Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesini kapsayan çalışmada rüzgâr ve güneş enerjisinin genel olarak öne çıktığını, ancak bölgesel bazda heterojen bir dağılımın söz konusu olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Karaaslan, Adar ve Kılıç Delice (2022) tarafından yapılan analizde Marmara ve Ege Bölgeleri için rüzgâr, İç Anadolu Bölgesi için ise güneş enerjisinin öncelikli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, Horasan ve Kılıç (2022) Türkiye'nin 21 elektrik dağıtım bölgesini inceledikleri çalışmalarında, bölgelerin büyük çoğunluğunda güneş ve hidroelektrik kaynaklarının öne çıktığını ifade etmişlerdir. Türkiye özelinde gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda, karar modellerinin ülkeyi homojen bir yapıda ele alması, bölgesel farklılıkların ve yerel dinamiklerin göz ardı edilmesi riskini beraberinde getirmektedir. Oysa enerji planlamasında önceliğin, enerji tüketimi yoğun bölgeler üzerine odaklanması; sınırlı kaynakların etkin kullanımı, yatırım önceliklerinin doğru belirlenmesi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından stratejik bir zorunluluk olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, Türkiye'nin enerji ihtiyacı en yüksek ve enerji dönüşüm politikaları açısından stratejik konumda bulunan ili olan İstanbul çalışma alanı olarak seçilmiştir.

### 3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada önerilen metodolojik çerçeve, ÇKKV yaklaşımlarının küresel bulanık mantık (spherical fuzzy sets) ile bütünleştirilmesine dayanmaktadır. Karar süreci, kriterler arasındaki nedensel ilişkilerin belirlenmesinden alternatiflerin nihai sıralanmasına kadar sistematik bir biçimde yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda öncelikle kriterler arası etkileşimler SF-DEMATEL yöntemiyle analiz edilmiş, ardından kriterlerin görece önem düzeyleri SF-SWARA yöntemi aracılığıyla hesaplanmıştır. Elde edilen ağırlıklar, alternatif YEK'lerin sıralanmasında SF-TOPSIS yöntemiyle bütünleştirilmiştir. Son olarak değişen kriter ağırlıklarının YEK alternatiflerinin sıralama sonuçlarına etkisi duyarlılık analizi ile irdelenmiştir. Çalışmanın genel akışı ve kullanılan yöntemlerin birbiriyle olan bağlantıları, araştırmanın metodolojik bütünlüğünü yansıtabilecek biçimde Şekil 1'de yer alan akış diyagramında görsel olarak sunulmuştur.

Çalışmanın genelinde araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Şekil 1. Çalışmanın Akış Diyagramı

ÇKKV yöntemlerinde KV görüşlerinin temsil gücü büyük önem taşımaktadır. Şekil 1 incelendiğinde KV görüşlerinin bilimsel karar sürecine desteği görülmektedir. Bu çalışmada karar verme sürecine katkı sağlayan üç KV (KV1, KV2 ve KV3), bir devlet üniversitesinin Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan ve yenilenebilir enerji sistemleri üzerine bilimsel çalışmaları bulunan akademisyenlerden oluşmaktadır. Her bir KV'nin eşit düzeyde uzmanlığa sahip olduğu varsayılmış ve görüşlerine eşit önem verilerek herhangi bir KV ağırlıklandırması planlanmamıştır. Böylece, bireysel yargılardan kaynaklanabilecek önyarguların etkisi azaltılarak grup temelli ve

dengeli bir karar ortamı hedeflenmiştir. Bu çalışmada amaç, İstanbul özelinde YEK'lerin makro ölçekte uygunluğunu değerlendirmek ve teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel kriterleri kullanarak stratejik düzeyde en uygun YEK alternatifini belirlemektir. Bu bağlamda YEK değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan KV takımı, enerji teknolojileri alanında hem akademik uzmanlığa hem de uygulama deneyimine sahip araştırmacılardan seçilmiştir. KV üyeleri akademik çalışmalarının yanı sıra yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik patentli araştırmalar yürütmekte olup, üyelerden biri yenilenebilir enerji teknolojileri geliştiren bir firmaya sahiptir. Bu durum, teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal kriterlerin değerlendirilmesinde uygulama bilgisinin akademik bir perspektifle bütünleşik biçimde kullanılmasına olanak sağlamıştır. KV takımı içerisinde şehir plancılığı, fotogrametri, harita mühendisliği ve coğrafi uygunluk analizleri alanlarında uzmanların yer almaması, çalışmanın metodolojik kapsamı ile doğrudan ilişkilidir. Uzamsal yer seçimi, bölgesel potansiyelin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı modellenmesi ve ayrıntılı fizibilite analizleri gibi mikro ölçekte ele alınması gereken süreçler bu araştırmanın kapsamına dahil edilmemiştir. Bu çalışma, öncelikle enerji kaynaklarının makro ölçekte bütüncül bir değerlendirmesini amaçlamakta olup seçilecek enerji kaynağı belirlendikten sonra yürütülmesi gereken mikro ölçekli yer seçimi analizleri kapsam dışında tutulmuştur. Çalışma sonunda belirlenen enerji kaynağı için en uygun alanların belirlenmesi, gelecekteki araştırma aşamalarında CBS tabanlı mekânsal analizlerin, çok katmanlı coğrafi veri entegrasyonunun, mekânsal çok ölçütlü karar verme tekniklerinin ve gerekirse matematiksel optimizasyon modellerinin kullanılmasını gerektirecektir. Bu tür ayrıntılı mekânsal ve planlama odaklı süreçlerin şehir plancıları, fotogrametri uzmanları ve harita mühendislerinin katkısıyla yürütülmesi planlanmakta olup, bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır. KV takım üyeleri doktora düzeyinde eğitime sahip olup, enerji üretim teknolojileri, sürdürülebilirlik planlaması ve çevresel etki analizi konularında uzmanlaşmıştır. Üyelerin İstanbul'da yürütülen enerji dönüşümü ve uygulama projelerinde akademik danışmanlık faaliyeti bulunmakta olup, bu deneyim şehir ölçeğinde YEK uygunluğuna ilişkin teknik değerlendirme yapabilmelerine olanak sağlamaktadır.

Sonraki bölümlerde çalışma alanına ait bilgiler, YEK alternatifleri, değerlendirme kriterlerine ilişkin açıklamalar ve kullanılan yöntemler detaylandırılmaktadır.

### 3.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmanın araştırma sahası, Türkiye'nin en büyük metropolü ve enerji tüketim merkezi olan İstanbul'dur. TÜİK'in 2024 yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi sonuçlarına göre kentin nüfusu 15.701.602 kişiye ulaşmış olup, bu değer Türkiye toplam nüfusunun yaklaşık %18,3'ünü oluşturmaktadır (TÜİK, 2024). İstanbul'un hem Asya hem de Avrupa kıtalarında yer alan eşsiz konumu, onu yalnızca ülkenin ekonomik ve sosyal merkezi değil aynı zamanda enerji planlaması açısından stratejik bir odak haline getirmektedir. İstanbul, yoğun

sanayi bölgeleri, gelişmiş ulaşım altyapısı ve hızla artan konut talebiyle enerji tüketiminde ülke genelinde başı çekmektedir. Şehrin enerji profili incelendiğinde, elektrik talebinin sanayi başta olmak üzere ulaşım, hizmet sektörü ve konutlarda yoğunlaştığı görülmektedir (İstanbul Enerji, 2024). Öte yandan, yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımlar da giderek artmakta; rüzgâr, güneş ve atık bazlı enerji tesisleri İstanbul'da önemli örnekler sunmaktadır (İSTKA, 2024).

İstanbul'un coğrafi özellikleri, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi açısından dikkat çekicidir. Marmara Denizi ve Karadeniz'den etkilenen rüzgâr rejimi, kuzey bölgelerde rüzgâr enerjisi için uygun koşullar yaratmaktadır. Ayrıca yıllık ortalama 2.500 saate yaklaşan güneşlenme süresi, güneş enerjisi teknolojilerinin yaygınlaştırılması için ciddi bir potansiyel sunmaktadır (İnce, 2021). Bununla birlikte, artan nüfus ve yüksek enerji yoğunluğu, kentteki karbon emisyonlarını da artırmakta ve sürdürülebilir enerji politikalarının uygulanmasını kaçınılmaz hale getirmektedir (Brodny ve Tutak, 2023).

İstanbul üzerine yapılan güncel araştırmalar, YEK seçiminin yalnızca kentin enerji güvenliği ve çevresel sürdürülebilirliği için değil, aynı zamanda Türkiye'nin ulusal sera gazı azaltım hedeflerine ulaşabilmesi açısından da kritik olduğunu göstermektedir (Karakaya, 2016). Bu nedenle İstanbul, YEK seçimi konusunda yapılan analizler için hem ulusal hem de uluslararası ölçekte stratejik bir örnek niteliğindedir.

Bu çalışmada İstanbul'un tamamının tek bir mekânsal birim olarak değerlendirilmesinin temel nedeni, çalışmanın amaçlarının alt bölgesel bir YEK uygunluk haritalaması değil, bütünsel enerji planlama perspektifi sunmak olmasıdır. Bu yaklaşım, politika yapıcılarının şehrin genel yenilenebilir enerji potansiyelini karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirmesine ve farklı enerji senaryoları için üst düzey kararlar almasına olanak tanımaktadır. İstanbul her ne kadar topoğrafya, rüzgâr rejimi ve yapılaşma yoğunluğu açısından heterojen bir yapıya sahip olsa da çalışmanın amacı mikro düzey yer seçiminden ziyade makro düzey bir karar destek çerçevesi geliştirmektir. Ayrıca Türkiye genelini değerlendirmek yerine İstanbul'un seçilmesinin nedeni, kentin Türkiye'nin toplam enerji tüketiminde belirleyici bir paya sahip olması ve nüfus yoğunluğu, sanayi kümelenmeleri, ulaşım altyapısı ve sosyoekonomik dinamikleri ile ülke enerji dönüşümünde kritik stratejik bir rol üstlenmesidir. Dolayısıyla İstanbul, ulusal ölçekte sürdürülebilir enerji politikalarının uygulanabilirliğini test etmek için temsil niteliğinde bir pilot çalışma alanı oluşturmakta ve geliştirilen modelin diğer büyük kentlere uyarlanabilirliği açısından referans işlevi görmektedir. Bu nedenle bölgesel alt kırılımlar sonraki çalışmalar için önerilmiş olup mevcut değerlendirme, İstanbul'un tamamını kapsayan stratejik ölçekli bir analiz olarak tasarlanmıştır.

### 3.2. YEK Alternatiflerinin ve Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi

Karar verme sürecinin başlangıç noktası alternatiflerin ve değerlendirme kriterlerinin uygun biçimde belirlenmesidir. Kriterlerin ve alternatiflerin karar probleminde özgü, kapsamlı ve dengeli biçimde tanımlanması, analiz sonuçlarının güvenilirliği ve uygulanabilirliği açısından büyük önem taşır. Bu çalışma için YEK alternatifleri Tablo 1’de sıklıkla tercih edilen alternatifler göz önünde bulundurularak; güneş (A1), rüzgâr (A2), hidroelektrik (A3), biyokütle (A4) ve jeotermal (A5) şeklinde belirlenmiştir. YEK alternatiflerinin önceliklendirilmesine yönelik olarak belirlenen 25 kriter ise güncel literatür taramasından elde edilen bulgular dikkate alınarak; sürdürülebilirlik, verimlilik ve toplumsal kabul boyutlarını bütüncül biçimde yansıtacak şekilde yapılandırılmış, ayrıca KV konumundaki paydaşların öncelik ve beklentilerini karşılamaya yönelik biçimde düzenlenmiştir. Kriterler, kriterlere ilişkin kodlar, referans çalışmalar ve kriterlerin kısa açıklamaları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2

YEK Değerlendirme Kriterleri, Referanslar ve Kriter Açıklamaları

Kriter Kodu	Kriter Adı	Yazar/lar (Yıl)	Kriter Açıklaması
C1	Verimlilik	Çolak ve Kaya (2017); Alshamrani ve diğ. (2023)	YEK teknolojilerinde verimlilik, kaynağın potansiyeline göre üretilen enerji miktarını gösterir; yüksek verimlilik hem ekonomik hem çevresel sürdürülebilirliği artırır.
C2	Güvenilirlik	Büyüközkan ve Güleriyüz (2016); Sedady ve Beheshtinia (2019); Li ve diğ. (2024)	Bir enerji sisteminin uzun vadede kesintisiz ve kararlı şekilde çalışabilme yeteneğidir. Güvenilir sistemler arıza riskini azaltarak enerji arz güvenliğini güçlendirir.
C3	Teknolojik olgunluk	Li ve Hu (2022); Mohammad Husain, Hasan, Khan ve Asjad (2024)	Teknolojinin yaygınlığı ve uygulama deneyimi düzeyini yansıtır. Olgun teknolojiler düşük riskli, kolay bakım yapılabilir ve yatırımcı açısından daha öngörülebilirdir.
C4	Teknoloji karmaşıklığı	Çolak ve Kaya (2017); Solangi Tan, Mirjat, Valasai, Khan ve Ikram (2019)	Kurulum ve işletim süreçlerinde gereken teknik uzmanlık düzeyini tanımlar; düşük karmaşıklık, yerel iş gücüyle uygulanabilirliği kolaylaştırır.
C5	Kurulum süresi	Petrov (2022); Aydın ve Oruç (2024)	Enerji santralının tasarımdan devreye alınmasına kadar geçen süredir; kısa kurulum süresi, yatırım geri dönüşünü hızlandırır ve enerji arz açığını kısa vadede kapatır.
C6	Enerji üretim kapasitesi	Zaralı (2022); Nguyen (2022)	Bir santralin belirli bir dönemde sağlayabileceği maksimum enerji miktarıdır. Yüksek kapasite, şehir ölçeğinde enerji güvenliğini destekler.
C7	Ekonomik ömür (İşletme Ömrü)	Karbin ve Rashidi Komijan (2022); Algül ve diğ. (2023)	Tesisin ekonomik olarak verimli çalışabildiği süredir; uzun ekonomik ömür, yatırım geri dönüşünü kolaylaştırır.

Tablo 2

Devamı

C8	Teknolojinin bakım ve destek kolaylığı	Balin ve Baraçlı (2017); Büyüközkan ve diğ. (2024); Li ve diğ. (2024)	Teknolojik sistemin bakım-onarım erişilebilirliğini ifade eder; kolay bakım, kesintisiz enerji üretimini sürdürür.
C9	Sürdürülebilirlik ve öngörülebilirlik	Sağbaş, Deveci ve Polat (2023); Saeed ve diğ. (2024)	YEK sistemlerinin uzun vadede çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir olmasıdır; öngörülebilir sistemler yatırımcı güvenini artırır.
C10	Yatırım ve kurulum maliyeti	Alkan (2024); Li ve diğ. (2024)	Enerji tesisinin kurulumu için gerekli toplam sermaye harcamalarını kapsar; düşük maliyet, özellikle gelişmekte olan ülkelerde YEK yatırımlarını teşvik eder.
C11	Sabit işletme ve bakım maliyeti	Jameel, Riaz, Aslam ve Pamucar (2024); Mohammad Husain ve diğ. (2024)	Tesisin yaşam döngüsü boyunca yapılan düzenli harcamaları kapsar; düşük işletme maliyeti, YEK projelerini uzun vadede ekonomik hale getirir.
C12	Enerji üretim maliyeti	Wang ve diğ. (2020); Özgüner ve Özgüner (2021)	Birim enerji başına toplam üretim maliyetidir; YEK sistemlerinde düşük enerji üretim maliyet değeri, teknolojinin rekabet gücünü artırır.
C13	Geri ödeme periyodu	Algül ve diğ. (2023); Gouraizim, Mekan ve El Ouarghi (2023)	Yatırımın kendini amorti ettiği zaman aralığıdır; kısa süreli geri ödeme, finansal sürdürülebilirliği artırır.
C14	Yerel ekonomiye katkı	Boran, Boran ve Menlik (2012); Yontar (2023)	YEK yatırımlarının yerel istihdam, altyapı ve ekonomik kalkınmaya olan etkisidir; yerel katkı sosyal kabulü de güçlendirir.
C15	Yıllık eşdeğer maliyet	Oluklu ve İç (2023)	Farklı süreli projelerin maliyetlerinin yıllık bazda karşılaştırılmasını sağlar; ekonomik verimliliğin ölçümünde kullanılır.
C16	Ulusal ve uluslararası teşvikler	Yürek, Özyörük, Özcan ve Bulut (2023); Almutairi ve diğ. (2022)	Devlet veya uluslararası kurumlarca sağlanan mali desteklerdir; teşvikler, yatırım riskini azaltarak yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırır.
C17	İstihdam yaratma	Yazdani, Torkayesh, Santibanez-Gonzalez ve Otaghsara (2020); Yontar (2023)	YEK projeleri doğrudan (kurulum, bakım) ve dolaylı (tedarik, hizmet) yollarla istihdam sağlar; sosyal kalkınmayı destekler.
C18	Sosyal kabul	Cesur ve diğ. (2024); Li ve diğ. (2024)	Toplumun projeyi benimseme düzeyidir; yüksek sosyal kabul, sürdürülebilir enerji politikalarının uygulanabilirliğini artırır.
C19	Sosyal fayda	Büyüközkan ve Güleriyüz (2016); Gouraizim ve diğ. (2023)	YEK projelerinin yaşam kalitesi, erişilebilir enerji ve sosyal refah üzerindeki etkileridir.
C20	Ulusal ekonomi politikasına uygunluk	Kantoğlu ve Düzdar Argun (2023); Sahu, Srivastava, Kumar, Saxena, Gupta ve Verma (2023)	Projelerin ulusal enerji stratejileriyle tutarlılığını gösterir; politika uyumlu projeler öncelikli destek alır.
C21	Siyasi kabul	Bilgili ve diğ. (2022); Gouraizim ve diğ. (2023)	Projelerin politik otoriteler tarafından desteklenme düzeyidir; politik istikrar, yatırım riskini doğrudan etkiler.

Tablo 2

Devamı

C22	Ekolojik etki	Ali, Ma ve Nahian (2019); Eroğlu ve Şahin (2020)	Enerji tesislerinin çevresel ve ekosistem üzerindeki etkileridir; düşük ekolojik etki sürdürülebilir kalkınmanın ön koşuludur.
C23	Emisyon	Aydın ve Kaçtıoğlu, (2023); Mohammad Husain ve diğ. (2024)	Enerji üretiminde açığa çıkan sera gazı ve kirletici salımlarını ifade eder; düşük emisyon, çevresel performans açısından temel göstergedir.
C24	Alan gereksinimi	Kumar ve Samuel (2017) Aydın ve Kaçtıoğlu (2023)	Enerji tesisinin kurulumunda ihtiyaç duyulan arazi miktarıdır; geniş alan gereksinimi tarım veya yerleşim alanlarıyla çakışabilir.
C25	Atık ve çevre yönetimine katkı	Ayağ ve Samanlıoğlu (2020); Sahu ve diğ. (2023)	Üretim sürecinde oluşan atıkların yönetimi ve geri dönüşüm düzeyidir; etkin bertaraf çevresel sürdürülebilirliği destekler.

### 3.3. ÇKKV Yöntemleri

SFS yaklaşımı, üyelik, üyelik karşıtı ve tereddüt derecelerini aynı anda değerlendirme olanağı tanıyarak karar süreçlerindeki bilgi eksikliklerini minimize eder. Bu özellik, enerji planlaması gibi karmaşık ve çok boyutlu problemlerde KV'lerin değerlendirmelerini daha esnek ve gerçekçi biçimde modele dâhil etmeye olanak sağlar. Ayrıca, SFS teorisinin geometrik yapısı, bilgi kaybını azaltarak hesaplamalarda daha istikrarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sunar. Bu çalışmada, KV'lerin belirsiz, çelişkili veya kısmen tanımlı yargılarını klasik bulanık sistemlere göre daha kapsamlı biçimde temsil edebilmesi sebebiyle SFS tercih edilmiştir.

Bu bölümde, çalışmada kullanılan SF-DEMATEL, SF-SWARA ve SF-TOPSIS yöntemleri detaylandırılmaktadır.

#### 3.3.1. SF-DEMATEL

Küresel bulanık mantık ile bütünleştirilen DEMATEL yöntemi, belirsizliğin yüksek ve KV yargılarının öznel olduğu durumlarda daha esnek ve güvenilir bir analiz yapısı sunmaktadır. SF-DEMATEL, karar unsurları arasındaki neden-sonuç ilişkilerini ortaya koymak amacıyla geliştirilmiş olup, yöntemin temel aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

Adım 1. Kriterlerin ve KV grubunun belirlenmesi: Analiz kapsamında değerlendirilecek  $n$  adet kriter ve bunlara ilişkin görüş bildirecek  $m$  sayıda KV seçilir.

Adım 2. KV değerlendirmelerinin toplanması: KV'ler, kriterler arası etki seviyelerini dilsel ölçekler kullanarak değerlendirir. Kutlu Gündoğdu ve

Kahraman (2019) tarafından AHP temelli bir dilsel ölçek geliştirilmiş; bu ölçek, Gül (2020) tarafından SF-DEMATEL yapısına Skor İndeksi (SI) aracılığıyla uyarlanmıştır. Her bir dilsel terim için SFS bileşenleri ve karşılık gelen SI değerleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3

SF-DEMATEL için Dilsel Terimler ve Karşılık Gelen Küresel Bulanık Sayılar		
Dilsel Terim	SFS ( $\mu, \nu, \pi$ )	SI
Güçlü etki (S)	(0,85; 0,15; 0,45)	3
Orta etki (M)	(0,60; 0,20; 0,35)	2
Zayıf etki (W)	(0,35; 0,25; 0,25)	1
Etki yok (N)	(0,00; 0,30; 0,15)	0

Adım 3. Doğrudan etki matrisinin oluşturulması:  $i, j = 1, \dots, n$  ve  $e = 1, \dots, m$  olmak üzere her bir  $e$  numaralı KV tarafından  $i$ . kriterin  $j$ . kriter üzerindeki etkisi,  $d_{ij}^e = (\mu_{ij}^e, \nu_{ij}^e, \pi_{ij}^e)$  şeklinde ifade edilmektedir.  $e$ . KV'ye ait doğrudan etki değerlendirme matrisi, SFS'lerden oluşan bir matris olarak Denklem (1)'deki gibi tanımlanır:

$$D^e = [d_{ij}^e]_{n \times n} = [(\mu_{ij}^e, \nu_{ij}^e, \pi_{ij}^e)]_{n \times n} \quad (1)$$

Adım 4. KV ağırlıklarının hesaplanması: Bu çalışmada KV ağırlıkları toplam ağırlık değeri 1 olacak şekilde eşit ve skaler olarak belirlenmiştir.

Adım 5. KV görüşlerinin birleştirilmesi: Tüm KV'lere ait doğrudan etki matrisleri, Denklem (2)'de verilen SWAM (Küresel Ağırlıklı Aritmetik Ortalama) operatörü kullanılarak birleştirilir. Bu işlem sonucunda elde edilen matris birleştirilmiş doğrudan etki matrisi ( $D^{agg}$ ) olarak adlandırılır. Birleştirme işlemi Denklem (3)'te; elde edilen matrisin yapısal gösterimi Denklem (4)'te verilmektedir.

SWAM: Ağırlık vektörü  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  olmak üzere, her bir ağırlık  $w_i \in [0,1]$  ve  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  koşullarını sağlamaktadır. Bu koşullar altında,  $\widetilde{A}_{S1}, \widetilde{A}_{S2}, \dots, \widetilde{A}_{Sn}$  SFS'lerinin küresel ağırlıklı aritmetik ortalaması Denklem (3)'teki gibi tanımlanır:

$$SWAM_w(\widetilde{A}_{S1}, \dots, \widetilde{A}_{Sn}) = \left\{ \frac{\sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\widetilde{A}_{S1}}^2)^{w_i}}, \prod_{i=1}^n \nu_{\widetilde{A}_{S1}}^{w_i}}{\sqrt{\prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\widetilde{A}_{S1}}^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\widetilde{A}_{S1}}^2 - \pi_{\widetilde{A}_{S1}}^2)^{w_i}}} \right\} \quad (2)$$

$$D^{agg} = SWAM_w(D^1, D^2, \dots, D^m) = \omega_1 D^1 + \omega_2 D^2 + \dots + \omega_m D^m = \left( \mu_{ij}^{agg}, \nu_{ij}^{agg}, \pi_{ij}^{agg} \right)$$

$$D^{agg} = \left[ \left[ 1 - \prod_{e=1}^m (1 - (\mu_{ij}^e)^2)^{\omega_e} \right]^{\frac{1}{2}}, \prod_{e=1}^m (v_{ij}^e)^{\omega_e}, \left[ \prod_{e=1}^m (1 - (\mu_{ij}^e)^2)^{\omega_e} - \prod_{e=1}^m (1 - (\pi_{ij}^e)^2)^{\omega_e} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

$$D^{agg} = \begin{bmatrix} 0 & \langle \mu_{12}^{agg}, v_{12}^{agg}, \pi_{12}^{agg} \rangle & \dots & \langle \mu_{1n}^{agg}, v_{1n}^{agg}, \pi_{1n}^{agg} \rangle \\ \langle \mu_{21}^{agg}, v_{21}^{agg}, \pi_{21}^{agg} \rangle & 0 & \dots & \langle \mu_{2n}^{agg}, v_{2n}^{agg}, \pi_{2n}^{agg} \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \mu_{n1}^{agg}, v_{n1}^{agg}, \pi_{n1}^{agg} \rangle & \langle \mu_{n2}^{agg}, v_{n2}^{agg}, \pi_{n2}^{agg} \rangle & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 6. Başlangıç doğrudan etki matrisinin ( $X$ ) oluşturulması: Birleştirilmiş doğrudan etki matrisi  $D^{agg}$ , her kriter çifti için üç farklı bileşen (üyelik, üyelik olmama ve tereddüt dereceleri) içerdiğinden, öncelikle bu bileşenler alt matrislere ayrıştırılır. Elde edilen bu alt matrisler sırasıyla  $\mu$ ,  $v$  ve  $\pi$  değerlerini temsil eder ve her biri üzerinde bağımsız matris işlemleri gerçekleştirilebilir. Daha sonra, bu üç alt matris kendi içlerinde normalize edilir ve normalleştirme tamamlandıktan sonra yeniden birleştirilerek  $X$  elde edilir. Normalizasyon işlemi, Denklem (5)'te verilen yöntemle uygun şekilde uygulanır. Bu adımın sonucunda oluşan matris yapısı Denklem (6)'da gösterilmektedir.

$$s = \min \left[ \frac{1}{\max_i \sum_{j=1}^n |d_{ij}|}, \frac{1}{\max_j \sum_{i=1}^n |d_{ij}|} \right] \quad X = sD \quad (5)$$

$$X^\mu = \begin{bmatrix} 0 & \mu_{12} & \dots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & 0 & \dots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}; X^v = \begin{bmatrix} 0 & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & 0 & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}; X^\pi = \begin{bmatrix} 0 & \pi_{12} & \dots & \pi_{1n} \\ \pi_{21} & 0 & \dots & \pi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{n1} & \pi_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Adım 7. Toplam etki matrisinin ( $T$ ) hesaplanması: Başlangıç doğrudan etki matrisi  $X$ , toplam etki matrisinin  $T$ 'nin oluşturulmasında temel girdiyi oluşturmaktadır. Bu kapsamda,  $X$  matrisine ait alt bileşenler Denklem (7)'de verilen matematiksel işlem uygulanarak, toplam etkiyi temsil eden yeni alt matrislere dönüştürülür. Ancak bulanık sayılarla yapılan matris hesaplamaları bazı durumlarda bulanık olmayan sonuçlar üretebileceği için, elde edilen alt matrislerin bulanık küme mantığına uygun biçimde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, söz konusu alt matrisler Öklid temelli bir normalizasyon sürecine tabi tutulur. Böylece, elde edilen  $T$  matrisi, kriterler arasındaki tüm doğrudan ve dolaylı ilişkileri yansıtacak biçimde Denklem (8)'de gösterilmiştir.

$$T = X + X^2 + X^3 + \dots + X^\infty = X(1 - X)^{-1} \quad (7)$$

$$T = \begin{bmatrix} \langle \mu_{11}^T, v_{11}^T, \pi_{11}^T \rangle & \langle \mu_{12}^T, v_{12}^T, \pi_{12}^T \rangle & \dots & \langle \mu_{1n}^T, v_{1n}^T, \pi_{1n}^T \rangle \\ \langle \mu_{21}^T, v_{21}^T, \pi_{21}^T \rangle & \langle \mu_{22}^T, v_{22}^T, \pi_{22}^T \rangle & \dots & \langle \mu_{2n}^T, v_{2n}^T, \pi_{2n}^T \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \mu_{n1}^T, v_{n1}^T, \pi_{n1}^T \rangle & \langle \mu_{n2}^T, v_{n2}^T, \pi_{n2}^T \rangle & \dots & \langle \mu_{nn}^T, v_{nn}^T, \pi_{nn}^T \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

Adım 8. Satır ve sütun toplamlarının belirlenmesi: Bir kriterin diğer kriterler üzerindeki toplam etkisi satır toplamı-  $r_i$ , diğer kriterlerden aldığı etki ise sütun toplamı-  $c_j$  ile gösterilmektedir.  $r_i$  ve  $c_j$  Denklem (9)–(11) ile hesaplanır:

$$r_i = \sum_{j=1}^n \langle \mu_{ij}^T, v_{ij}^T, \pi_{ij}^T \rangle \quad (9)$$

$$c_j = \sum_{i=1}^n \langle \mu_{ij}^T, v_{ij}^T, \pi_{ij}^T \rangle \quad (10)$$

$$\langle \mu_{11}^T, v_{11}^T, \pi_{11}^T \rangle \oplus \langle \mu_{12}^T, v_{12}^T, \pi_{12}^T \rangle = \left\langle \left( (\mu_{11}^T)^2 + (\mu_{12}^T)^2 - (\mu_{11}^T)^2 (\mu_{12}^T)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, v_{11}^T v_{12}^T, \left( (1 - (\mu_{12}^T)^2) (\pi_{11}^T)^2 + (1 - (\mu_{11}^T)^2) (\pi_{12}^T)^2 - (\pi_{11}^T)^2 (\pi_{12}^T)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\rangle \quad (11)$$

Her iki toplam da SFS olarak elde edilir. Kriterlerin göreceli önem düzeylerinin ve etki yönlerinin belirlenebilmesi için SFS'lerin durulaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla Denklem (12)'de tanımlanan **skor fonksiyonu** uygulanır.

$$\text{Skor} = (2\mu - \pi)^2 - (v - \pi)^2 \quad (12)$$

Adım 9. Kriterlerin önem ve ilişki düzeylerinin hesaplanması: Her bir kriter için önem derecesi ( $r_i + c_i$ ) ve ilişki yönü ( $r_i - c_i$ ) ile ifade edilir. Pozitif ( $r_i - c_i$ ) değerine sahip kriterler “neden (etkileyen)” grubunda, negatif değere sahip olanlar ise “sonuç (etkilenen)” grubunda yer alır.

Bu çalışmada, etkileyen kriter grubunda yer alan YEK değerlendirme kriterlerine ilişkin kriter ağırlıkları, bir sonraki bölümde açıklanan SF-SWARA yöntemi ile elde edilmiştir.

### 3.3.2. SF-SWARA

Ghoushchi ve diğ. (2021), tıbbi atık bertaraf alanlarının seçimi üzerine yürüttükleri çalışmalarında SWARA ve WASPAS yöntemlerini küresel bulanık ortamda genişleterek uygulamışlardır. SF-SWARA yöntemi, KV'lerin belirsizlik içeren değerlendirmelerini daha esnek biçimde modellemeye olanak

tanıldığından kriter ağırlıklarının belirlenmesinde güçlü bir araçtır. Yöntemin temel aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

Adım 1. Kriterlerin tanımlanması: İlk aşamada, karar problemine uygun değerlendirme kriterleri belirlenir. Tanımlanan kriter kümesi  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  şeklinde gösterilir.

Adım 2. Karar matrisinin oluşturulması: KV'ler, kriterlerin göreceli önemini dilsel değişkenler kullanarak değerlendirir. Bu sözel ifadeler, Tablo 4'te verilen karşılıklar dikkate alınarak SFS biçimine dönüştürülür.

Tablo 4

SF-SWARA için Dilsel Terimler ve Karşılık Gelen Küresel Bulanık Sayılar

Dilsel Terim	SFS' $(\mu, \nu, \pi)$
Kesinlikle Daha Önemli (KDÖ')	(0,9; 0,1; 0,1)
Çok Yüksek Önemli (ÇYÖ')	(0,8; 0,2; 0,2)
Yüksek Önemli (YÖ')	(0,7; 0,3; 0,3)
Biraz Daha Önemli (BDÖ')	(0,6; 0,4; 0,4)
Eşit Önemli (EÖ')	(0,5; 0,5; 0,5)
Biraz Az Önemli (BAÖ')	(0,4; 0,6; 0,4)
Az Önemli (AÖ')	(0,3; 0,7; 0,3)
Çok Az Önemli (ÇAÖ')	(0,2; 0,8; 0,2)
Kesinlikle Az Önemli (KAÖ')	(0,1; 0,9; 0,1)

Adım 3. KV değerlendirmelerinin birleştirilmesi: Birden fazla KV olması durumunda, KV değerlendirmeleri Denklem (4)'te de verilen SWAM operatörü aracılığıyla bütünleştirilir. Böylece, toplulaştırılmış karar matrisi elde edilir.

Adım 4. Skor değerlerinin hesaplanması ve kriter sıralaması: Her bir kriter için küresel bulanık skor değeri Denklem (13) yardımıyla hesaplanır. Bu skorlar, kriterlerin önem düzeyine göre büyükten küçüğe sıralanır ve bu sıralama,  $s_j$  katsayılarının belirlenmesinde kullanılır. En yüksek skor, en önemli kriteri temsil eder.

$$\text{Skor}(\widetilde{A}_s) = (\mu_{\widetilde{A}_s} - \pi_{\widetilde{A}_s})^2 - (\nu_{\widetilde{A}_s} - \pi_{\widetilde{A}_s})^2 \quad (13)$$

Adım 5.  $k_j$  katsayılarının belirlenmesi: Kriterlerin birbirlerine göre göreceli önem farkı Denklem (14) kullanılarak hesaplanır. İlk kriter için  $k_j = 1$ , diğer kriterler için  $k_j = s_j + 1$  şeklinde tanımlanır.

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (14)$$

Adım 6. Geçici ağırlıkların hesaplanması: Her bir kriterin geçici ağırlığı Denklem (15)'e göre hesaplanır. İlk kriterin ağırlığı 1 olarak alınır, diğerleri ise ardışık olarak hesaplanır.

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{k_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (15)$$

Adım 7. Nihai kriter ağırlıklarının elde edilmesi: Son aşamada, geçici ağırlıklar normalleştirilerek her bir kriterin nihai ağırlığı Denklem (16) kullanılarak belirlenir. Böylece, kriterlerin göreceli önem dereceleri bulanık ortamda objektif biçimde belirlenmiş olur.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (16)$$

Yukarıdaki adımlardan da anlaşılacağı üzere literatürdeki SF-SWARA uygulamalarında, SFS yalnızca KV değerlendirmelerinin toplanması ve birleştirilmesi aşamalarında kullanılmaktadır. Bu aşamadan sonra, elde edilen bulanık değerler kesin değerlere dönüştürülmekte ve diğer adımlarda klasik SWARA adımları devam ettirilmektedir. Bu uygulamanın temel nedenlerinden biri, SFS yapısında fark işleminin tanımlı olmamasıdır. Dolayısıyla, küresel bulanık ortamda kriterler arasındaki farkların doğrudan hesaplanması mümkün olmamaktadır. Bu sınırlılığı aşmak amacıyla, bu çalışmada SF-SWARA yöntemi, Kahraman, Onar ve Öztaysi (2021) tarafından önerilen küresel bulanık uzaklık ölçüsüne dayalı olarak mesafe tabanlı bir yapı ile yeniden tasarlanmıştır. İlk olarak, SWAM operatörü kullanılarak her bir kriter için ortalama küresel bulanık değerlendirmeler hesaplanmıştır. Ardından, Denklem (13) ile kriterler skor değerlerine göre sıralanmıştır. Burada, skor değerleri yalnızca SFS'lerin büyükten küçüğe sıralanmasında dikkate alınmıştır. Ardışık iki kriter arasındaki fark, Denklem (17)'de verilen iki küresel bulanık küme arasındaki uzaklık kullanılarak hesaplanmış ve  $s_j$  olarak kullanılmıştır. Diğer adımlar ( $k_j$ ,  $q_j$  ve  $w_j$ ) yukarıda yer alan adımlar doğrultusunda hesaplanmıştır.

$$D^S(\tilde{A}, \tilde{B}) = 1 - \frac{\mu_A^2 \cdot \mu_B^2 + v_A^2 \cdot v_B^2 + \pi_A^2 \cdot \pi_B^2}{\mu_A^4 v_B^4 + v_A^4 v_B^4 + \pi_A^4 v_B^4 + \pi_A^4 v_B^4} \quad (17)$$

### 3.3.3. SF-TOPSIS

SF-TOPSIS yöntemi, klasik TOPSIS yaklaşımının SFS teorisiyle genişletilmiş biçimi olup karar süreçlerinde belirsizliği dikkate alarak daha esnek bir değerlendirme çerçevesi sunar. Yöntemde  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  alternatif kümesini,  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  ise kriter kümesini ifade etmektedir. Kriter ağırlıklarını temsil eden  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  vektörü,  $0 \leq w_j \leq 1$  ve  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$  koşullarını sağlar. Yöntemin temel aşamaları aşağıda özetlenmiştir (Kutlu Gündoğdu ve Kahraman, 2019):

Adım 1. Alternatiflerin değerlendirilmesi: KV'ler, Tablo 5'teki dilsel terimleri kullanarak her bir alternatifin kriterlere göre performansını değerlendirir ve böylece bireysel karar matrisleri oluşturulur.

Tablo 5

SF-TOPSIS için Dilsel Terimler ve Karşılık Gelen Küresel Bulanık Sayılar

Dilsel Terim	SFS $(\mu, \nu, \pi)$
Kesinlikle Daha Önemli (KDÖ)	(0,9; 0,1; 0,1)
Çok Yüksek Önemli (ÇYÖ)	(0,8; 0,2; 0,2)
Yüksek Önemli (YÖ)	(0,7; 0,3; 0,3)
Biraz Daha Önemli (BDÖ)	(0,6; 0,4; 0,4)
Eşit Önemli (EÖ)	(0,5; 0,5; 0,5)
Biraz Az Önemli (BAÖ)	(0,4; 0,6; 0,4)
Az Önemli (AÖ)	(0,3; 0,7; 0,3)
Çok Az Önemli (ÇAÖ)	(0,2; 0,8; 0,2)
Kesinlikle Az Önemli (KAÖ)	(0,1; 0,9; 0,1)

Adım 2. KV değerlendirmelerinin bütünleştirilmesi: Birden fazla KV varsa, KV görüşleri Denklem (2)'de verilen SWAM operatörleriyle birleştirilir. Alternatif  $x_i$ 'nin ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) kriter  $C_j$ 'ye ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) göre değerlendirmesi SFS olarak  $C_j(x_i) = (\mu_{ij}, \nu_{ij}, \pi_{ij})$  şeklinde ifade edilir ve oluşturulan karar matrisi  $D = [C_j(x_i)]_{m \times n}$  Denklem (18)'deki gibi oluşturulur.

$$D = \begin{pmatrix} (\mu_{11}, \nu_{11}, \pi_{11}) & (\mu_{12}, \nu_{12}, \pi_{12}) & \dots & (\mu_{1n}, \nu_{1n}, \pi_{1n}) \\ (\mu_{21}, \nu_{21}, \pi_{21}) & (\mu_{22}, \nu_{22}, \pi_{22}) & \dots & (\mu_{2n}, \nu_{2n}, \pi_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mu_{m1}, \nu_{m1}, \pi_{m1}) & (\mu_{m2}, \nu_{m2}, \pi_{m2}) & \dots & (\mu_{mn}, \nu_{mn}, \pi_{mn}) \end{pmatrix} \quad (18)$$

Adım 3. Ağırlıklı küresel bulanık karar matrisinin oluşturulması: Kriter ağırlıkları ile alternatiflerin değerlendirme değerleri birleştirilerek ağırlıklı karar matrisi oluşturulur. Bu çalışmada SF-SWARA yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları modele skaler olarak dahil edilmiştir. Bir skaler ile çarpım işlemi,  $\lambda > 0$  olmak üzere Denklem (19)'da tanımlanmıştır.

$$\lambda \cdot \widetilde{A}_s = \left\{ \sqrt{1 - \left(1 - \mu_{A_s}^2\right)^\lambda}, v_{A_s}^\lambda, \sqrt{\left(1 - \mu_{A_s}^2\right)^\lambda - \left(1 - \mu_{A_s}^2 - \pi_{A_s}^2\right)^\lambda} \right\} \quad (19)$$

Her alternatifin kriter bazlı ağırlıklı performans değerlerini içeren ağırlıklı küresel bulanık karar matrisi  $D = [C_j(x_{iw})]_{m \times n}$  olarak Denklem (20) ile tanımlanır.

$$\begin{pmatrix} (\mu_{11w}, v_{11w}, \pi_{11w}) & (\mu_{12w}, v_{12w}, \pi_{12w}) & \cdots & (\mu_{1nw}, v_{1nw}, \pi_{1nw}) \\ (\mu_{21w}, v_{21w}, \pi_{21w}) & (\mu_{22w}, v_{22w}, \pi_{22w}) & \cdots & (\mu_{2nw}, v_{2nw}, \pi_{2nw}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mu_{m1w}, v_{m1w}, \pi_{m1w}) & (\mu_{m2w}, v_{m2w}, \pi_{m2w}) & \cdots & (\mu_{mnw}, v_{mnw}, \pi_{mnw}) \end{pmatrix} \quad (20)$$

Adım 4. Durulaştırma işlemi: Elde edilen ağırlıklı karar matrisi, Denklem (21)'deki skor fonksiyonu yardımıyla durulaştırılır. Böylece her bir SFS değeri tek bir sayısal karşılığa dönüştürülür ve karar matrisi kesin değerlere indirgenir.

$$\text{Skor}(\widetilde{A}_s) = (\mu_{A_s} - \pi_{A_s})^2 - (v_{A_s} - \pi_{A_s})^2 \quad (21)$$

Adım 5. İdeal çözümlerin tanımlanması: Durulaştırılmış skorlar temel alınarak her kriter için Denklem (22)'de yer alan Küresel Bulanık Pozitif İdeal Çözüm (SF-PIS) ve Denklem (23)'te yer alan Küresel Bulanık Negatif İdeal Çözüm (SF-NIS) belirlenir.

$$X^* = \left\{ C_j \mid \max_i \left( \text{Skor} \left( C_j(x_{iw}) \right) \right) \right\}, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$X^* = \{ C_1, (\mu_1^*, v_1^*, \pi_1^*), C_2, (\mu_2^*, v_2^*, \pi_2^*), \dots, C_n, (\mu_n^*, v_n^*, \pi_n^*) \}$$

$$X^- = \left\{ C_j \mid \min_i \left( \text{Skor} \left( C_j(x_{iw}) \right) \right) \right\}, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$X^- = \{ C_1, (\mu_1^-, v_1^-, \pi_1^-), C_2, (\mu_2^-, v_2^-, \pi_2^-), \dots, C_n, (\mu_n^-, v_n^-, \pi_n^-) \}$$

SF-PIS ve SF-NIS değerleri, durulaştırılmış veriler üzerinden hesaplandığında, alternatiflerden birinin her zaman SF-PIS ile bir diğerinin ise SF-NIS ile tam olarak eşleşme olasılığı ortaya çıkmaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla, çalışmada söz konusu aşama yeniden yapılandırılmıştır. En iyi çözümün belirlenmesinde, ağırlıklı toplu küresel bulanık karar matrisinde yer alan küresel bulanık sayılar doğrudan kullanılmış; üyelik derecelerinin maksimum, üyelik karşıtı (üye olmama) ve tereddüt derecelerinin ise minimum değerleri esas alınmıştır. Buna karşılık, en kötü çözüm bu mantığın tersine uygulanarak oluşturulmuştur. Bu sayede, herhangi bir alternatifin en iyi veya en

kötü çözüme olan uzaklığının tam olarak sıfır olmasının önüne geçilmiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın olası bir dezavantajı, elde edilen küresel bulanık sayıların küresellik koşulunu ihlal etme riskidir. Bu durumu engellemek için her bir küresel sayının  $0 \leq \mu^2 + v^2 + \pi^2 \leq 1$  eşitsizliğinin sağladığı ayrıca kontrol edilmiştir.

Adım 6. Alternatiflerin SF-PIS ve SF-NIS değerlerine olan uzaklıklarının hesaplanması: Her alternatifin SF-PIS ve SF-NIS değerlerine olan uzaklıkları normalize edilmiş Öklid uzaklığı yöntemiyle hesaplanır. SF-NIS için Denklem (24), SF-PIS için Denklem (25) uygulanır. Bu ölçüm, alternatiflerin ideal çözümlere ne kadar yakın olduğunu gösterir.

$$D(X_i, X^-) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left[ (\mu_{x_i} - \mu_{x^-})^2 + (v_{x_i} - v_{x^-})^2 + (\pi_{x_i} - \pi_{x^-})^2 \right]} \quad (24)$$

$$D(X_i, X^*) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left[ (\mu_{x_i} - \mu_{x^*})^2 + (v_{x_i} - v_{x^*})^2 + (\pi_{x_i} - \pi_{x^*})^2 \right]} \quad (25)$$

Adım 7. Maksimum ve minimum uzaklıkların belirlenmesi: Alternatiflerin SF-NIS'e olan maksimum uzaklıkları ile SF-PIS'e olan minimum uzaklıkları sırasıyla Denklem (26) ve (27) ile belirlenir. Bu değerler, görelî yakınlık katsayısının hesaplanmasında referans olarak kullanılır.

$$D_{\max}(X_i, X^-) = \max_{1 \leq i \leq m} D(X_i, X^-) \quad (26)$$

$$D_{\min}(X_i, X^*) = \min_{1 \leq i \leq m} D(X_i, X^*) \quad (27)$$

Adım 8. Revize edilmiş görelî yakınlık katsayısının hesaplanması: Her alternatifin SF-PIS ve SF-NIS'e göre revize edilmiş yakınlık katsayısı Denklem (28) ile hesaplanır. Bu katsayı, her alternatifin ideal çözüme olan görelî yakınlığını temsil eder.

$$\xi(X_i) = \frac{D(X_i, X^*)}{D_{\min}(X_i, X^*)} - \frac{D(X_i, X^-)}{D_{\max}(X_i, X^-)} \quad (28)$$

Adım 9. Alternatiflerin sıralanması: Son aşamada, elde edilen görelî yakınlık ( $\xi(X_i)$ ) değerlerine göre alternatifler sıralanır. En yüksek yakınlık oranına sahip alternatif en uygun seçenek olarak belirlenir.

## 4. Bulgular

### 4.1. YEK Değerlendirme Kriterlerinin SF-DEMATEL ve SF-SWARA Yöntemleri ile Analizi

Şekil 1'de verilen akış diyagramından hareketle, üç KV görüşü ile elde edilen dilsel değerlendirmeler, Tablo 3'te belirtilen SFS karşılıklarına dönüştürülmüş ve böylece her bir KV için doğrudan etki değerlendirme

matrisleri oluşturulmuştur. KV'ler için birleştirilmiş doğrudan ilişki matrisi Ek-1'de yer almaktadır.

Bu çalışmanın ilk aşamasında kriterler arasındaki olası bağımlılık ilişkileri ve etkileşim yönleri, SF-DEMATEL yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntem, kriterler arasındaki nedensel ilişkileri bulanık bir ortamda değerlendirmeye olanak sağlamış; hangi kriterlerin "etkileyen" ve hangilerinin "etkilenen" yapıda olduğu sistematik biçimde ortaya konmuştur. Bu analiz sonucunda yalnızca "etkileyen" konumunda bulunan kriterler karar modelinin ağırlıklandırma ve değerlendirme aşamalarında kullanılarak, kriter bağımlılığı ve nedensel yönlülük dikkate alınmış, bağımlı kriterlerin modele dahil edilmesiyle oluşabilecek çift sayımlama veya ağırlık sapsması gibi metodolojik sorunlar önlenmiştir. Belirsizlik düzeyleri ise uzman değerlendirmelerine dayalı karar süreçlerinde kaçınılmaz olan yorum farklılıklarını ve belirsizlikleri temsil etmek amacıyla küresel bulanık sayıların yapısı içinde modellenmiştir. Dolayısıyla çalışmanın nihai modelinde kriterlerin tamamen bağımsız olduğu varsayılmamış; aksine bağımlılık ilişkileri SF-DEMATEL ile analiz edilerek etkileyen kriterler seçilmiş, belirsizlik düzeyleri ise kullanılan küresel bulanık yaklaşım ile modele dahil edilmiştir. Doğrudan etki değerlendirme matrisleri, Denklem (2)'de tanımlanan SWAM operatörü ile birleştirilmiştir. Birleştirilmiş doğrudan etki matrisi, üç ayrı alt matrise  $(\mu)$ ,  $(\nu)$ ,  $(\pi)$ - ayrılmış; her bir alt matris Denklem (5) yardımıyla normalleştirilerek normalize doğrudan etki matrisleri elde edilmiştir.  $X$ 'in alt matrisleri, Denklem (7) uyarınca işlem görmüş, böylece toplam etki matrisi  $T$ 'nin alt bileşenleri oluşturulmuş ve bu bileşenler Öklid normalizasyonuna tabi tutulmuştur. Birleştirilmiş toplam etki matrisi üzerinden Denklem (9)-(11) aracılığıyla satır ve sütun toplamları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda SFS'lerin birleşme özelliği esas alınmıştır. Satır ve sütun toplamlarının hesaplama detayları yüksek işlem yükü nedeniyle sunulamamıştır. Satır ve sütun toplamları Denklem (12)'de tanımlanan skor fonksiyonu yardımıyla durulaştırılmış, elde edilen skor değerleri ve kriter yönleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6

## SF-DEMATEL Satır ve Sütun Toplamları

Kriter Kodu	Kriter Adı	Satır Toplamları-R	Sütun Toplamları-C	$r_i + c_i$	$r_i - c_i$	Kriter Yönü
C4	Teknoloji karmaşıklığı	1,0729	3,1071	4,1800	2,0342	Etkileyen
C3	Teknolojik olgunluk	1,0234	2,7374	3,7608	1,7139	Etkileyen
C8	Teknolojinin bakım ve destek kolaylığı	0,9984	2,5839	3,5823	1,5855	Etkileyen
C2	Güvenilirlik	0,9981	2,3879	3,3860	1,3898	Etkileyen
C6	Enerji üretim kapasitesi	1,0281	2,1888	3,2169	1,1607	Etkileyen
C1	Verimlilik	1,0767	2,1958	3,2725	1,1190	Etkileyen
C25	Atık ve çevre yönetimine katkı	1,0500	1,5757	2,6257	0,5257	Etkileyen
C17	İstihdam yaratma	1,0030	1,4678	2,4708	0,4647	Etkileyen
C24	Alan gereksinimi	1,0231	1,0826	2,1057	0,0595	Etkileyen
C9	Sürdürülebilirlik ve öngörülebilirlik	1,0236	0,8143	1,8378	-0,2093	Etkilenen
C11	Sabit işletme ve bakım maliyeti	0,9994	0,5639	1,5633	-0,4355	Etkilenen
C23	Emisyon	1,0007	0,5575	1,5582	-0,4432	Etkilenen
C21	Siyasi kabul	1,0234	0,5221	1,5455	-0,5013	Etkilenen
C20	Ulusal ekonomi politikasına uygunluk	1,0045	0,4406	1,4451	-0,5639	Etkilenen
C12	Enerji üretim maliyeti	1,0140	0,3825	1,3965	-0,6315	Etkilenen
C19	Sosyal fayda	1,0433	0,3795	1,4227	-0,6638	Etkilenen
C18	Sosyal kabul	1,0266	0,2883	1,3150	-0,7383	Etkilenen
C15	Yıllık eşdeğer maliyet	1,0260	0,2875	1,3135	-0,7385	Etkilenen
C22	Ekolojik etki	1,0988	0,2846	1,3834	-0,8141	Etkilenen
C13	Geri ödeme periyodu	1,0962	0,2030	1,2992	-0,8931	Etkilenen
C10	Yatırım ve kurulum maliyeti	1,0974	0,2032	1,3006	-0,8942	Etkilenen
C14	Yerel ekonomiye katkı	1,0046	0,0943	1,0990	-0,9103	Etkilenen
C16	Ulusal ve uluslararası teşvik	1,1038	-0,0276	1,0762	-1,1313	Etkilenen
C7	Ekonomik ömür (işletme ömrü)	1,0885	-0,1929	0,8956	-1,2814	Etkilenen
C5	Kurulum süresi	0,9978	-0,3347	0,6631	-1,3325	Etkilenen

SF-DEMATEL yönteminden elde edilen bulgular doğrultusunda, kriterlerin sistemdeki etki düzeyleri belirlenmiş ve  $r_i-c_i$  değerleri üzerinden hangi kriterlerin sistemin yapısını şekillendirdiği ortaya konmuştur. Tablo 6'ya göre en yüksek etkili kriter olarak öne çıkan teknoloji karmaşıklığı (C4), diğer birçok kriter üzerinde yönlendirici bir yapıya sahiptir.  $r_i-c_i$  değeri negatif olan kriterler sistemde "etkilenen" kriterler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu kriterler, karar verme sistematğinde kendi başlarına belirleyici olmaktan ziyade diğer kriterlerin etkisiyle şekillenen ve sonuç niteliği taşıyan unsurlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kurulum süresi (C5) en fazla etkilenen kriter olarak öne çıkmaktadır. SF-DEMATEL yönteminin çıktuları bütüncül bir şekilde yorumlandığında nihai olarak sistemde etkileyen kriterler; verimlilik (C1), güvenilirlik (C2), teknolojik uygunluk (C3), teknoloji karmaşıklığı (C4), enerji üretim kapasitesi (C6), teknolojinin bakım ve destek kolaylığı (C8), istihdam yaratma (C17), alan gereksinimi (C24) ve atık ve çevre yönetimine katkı (C25) olarak belirlenmiştir. SF-SWARA yöntemi ile kriter ağırlıklandırma işlem adımları bu dokuz kriter üzerinden yürütülmüş; bu sayede hem doğrudan sebep kriterleri üzerinden çalışılmış hem de kriterlerde anlamlı bir sadeleşme sağlanmıştır. YEK seçiminde etkili olan kriter ağırlıklarını belirlemek amacıyla üç KV'den elde edilen görüşlere yer verilmiştir. Her KV, Tablo 4'te sunulan sözel terimleri kullanarak Tablo 7'de gösterilen değerlendirmeleri gerçekleştirmiştir. Bu ifadeler daha sonra SFS karşılıklarına çevrilmiştir. Tablo 8'de dilsel değerlendirmelerin SFS karşılıkları sunulmuştur.

Tablo 7

Dilsel KV Değerlendirmeleri

Kriter kodu	KV1	KV2	KV3
C4	KDÖ	ÇYÖ	ÇYÖ
C3	ÇYÖ	KDÖ	ÇYÖ
C8	YÖ	KDÖ	YÖ
C2	ÇYÖ	ÇYÖ	YÖ
C6	ÇYÖ	YÖ	EÖ
C1	EÖ	EÖ	EÖ
C25	BAÖ	BDÖ	BAÖ
C17	EÖ	BAÖ	EÖ
C24	YÖ	YÖ	YÖ

Tablo 8

## KV Değerlendirmelerinin SFS Karşılıkları

KV	KV1			KV2			KV3		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
C4	0,9	0,1	0,1	0,8	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2
C3	0,8	0,2	0,2	0,9	0,1	0,1	0,8	0,2	0,2
C8	0,7	0,3	0,3	0,9	0,1	0,1	0,7	0,3	0,3
C2	0,8	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,7	0,3	0,3
C6	0,8	0,2	0,2	0,7	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
C1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
C25	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,6	0,4
C17	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5
C24	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3

KV tercihleri, Denklem (2)'de sunulan SWAM operatörü ile toplulaştırılmış ve sonuçlar Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9

## KV Değerlendirmelerinin Birleştirilmesi

Kriter kodu	$\mu$	$\nu$	$\pi$
C4	0,84	0,16	0,16
C3	0,84	0,16	0,16
C8	0,80	0,21	0,22
C2	0,77	0,23	0,23
C6	0,70	0,31	0,33
C1	0,50	0,50	0,50
C25	0,48	0,52	0,40
C17	0,47	0,53	0,47
C24	0,70	0,30	0,30

Tablo 9’da sunulan birleştirilmiş karar matrisi kullanılarak kriterlere ait skor değerleri (SC) Denklem (13) ile bulunarak hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 10

YEK Değerlendirme Kriterlerine İlişkin Skor Değerleri (SC)

Kriter kodu	SC	Sıra
C4	0,5717	1
C3	0,4800	2
C8	0,4563	3
C2	0,4168	4
C24	0,2800	5
C6	0,2565	6
C1	0,0384	7
C17	0,0244	8
C25	0,0105	9

Ardından, kriterlerin bir önceki kritere göre uzaklığı Denklem (17) aracılığıyla belirlenmiş ve Tablo 11’de gösterildiği gibi  $s_j$  olarak kullanılmıştır.

Tablo 11

YEK Değerlendirme Kriterleri için İki Bulanık Küme Arasındaki Uzaklıklar

Kriterler	İki Bulanık Küme Arasındaki Uzaklık ( $s_j$ )
C4	-
C4-C3	0,0512
C3-C8	0,0124
C8-C2	0,0598
C2-C24	0,1875
C24-C6	0,3113
C6-C1	0,4378
C1-C17	0,1069
C17-C25	0,1214

Sonrasında, Denklem (14), (15) ve (16) kullanılarak sırasıyla  $k_j$ ,  $q_j$  ve  $w_j$  hesaplanmıştır. SF-SWARA bulguları Tablo 12’de sunulmuştur.

Tablo 12

## SF-SWARA Yöntemi ile Elde Edilen Kriter Ağırlıkları

Kriter kodu	$s_j$	$k_j$	$q_j$	$w_j$
C4	-	1,0000	1,0000	0,1622
C3	0,0512	1,0512	0,9513	0,1543
C8	0,0124	1,0124	0,9397	0,1524
C2	0,0598	1,0598	0,8866	0,1438
C6	0,1875	1,1875	0,7466	0,1211
C1	0,3113	1,3113	0,5694	0,0923
C25	0,4378	1,4378	0,3960	0,0642
C17	0,1069	1,1069	0,3578	0,0580
C24	0,1214	1,1214	0,3190	0,0517

Tablo 12 incelendiğinde YEK alternatiflerinin önceliklendirilmesini konu alan karar problemi için en yüksek önem derecesine sahip kriter 0,1622 ağırlık değeri ile teknoloji karmaşıklığı (C4) olarak elde edilmiştir. En düşük önem derecesine sahip kriter ise 0,0517 ağırlık değeri ile alan gereksinimi (C24)’dir. YEK alternatiflerinin SF-TOPSIS yöntemi ile sıralanmasında kullanılan kriter ağırlıkları Tablo 12’deki  $w_j$  sütununda yer almaktadır.

#### 4.2. YEK Alternatiflerinin SF-TOPSIS Yöntemi ile Sıralanması

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle KV’ler tarafından İstanbul için her bir YEK alternatifi kriterlere göre değerlendirilmiş ve elde edilen dilsel tercihler Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13

## KV'lerin Alternatif Değerlendirmeleri

KV	Alternatifler/ Kriterler	C4	C3	C8	C2	C1	C17	C25	C24	C6
KV1	Güneş (A1)	KDÖ	ÇYÖ	ÇYÖ	KDÖ	BDÖ	ÇYÖ	KDÖ	ÇYÖ	ÇYÖ
	Rüzgâr (A2)	KDÖ	KDÖ	KDÖ	KDÖ	ÇYÖ	BDÖ	KDÖ	KDÖ	KDÖ
	Hidroelektrik (A3)	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	KAÖ	AÖ	AÖ	AÖ
	Biyokütle (A4)	YÖ	ÇYÖ	YÖ	YÖ	BAÖ	BDÖ	YÖ	YÖ	YÖ
	Jeotermal (A5)	KAÖ	KAÖ	KAÖ	AÖ	ÇAÖ	AÖ	AÖ	KAÖ	KAÖ
KV2	Güneş (A1)	KDÖ	KDÖ	ÇYÖ	KDÖ	BDÖ	ÇYÖ	BDÖ	YÖ	KDÖ
	Rüzgâr (A2)	KDÖ	KDÖ	KDÖ	KDÖ	BDÖ	ÇYÖ	KDÖ	KDÖ	KDÖ
	Hidroelektrik (A3)	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	KAÖ	AÖ	AÖ	AÖ
	Biyokütle (A4)	ÇYÖ	ÇYÖ	ÇYÖ	YÖ	BAÖ	BDÖ	YÖ	ÇYÖ	ÇYÖ
	Jeotermal (A5)	KAÖ	KAÖ	KAÖ	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	KAÖ	KAÖ
KV3	Güneş (A1)	KDÖ	ÇYÖ	ÇYÖ	KDÖ	BDÖ	ÇYÖ	KDÖ	KDÖ	ÇYÖ
	Rüzgâr (A2)	KDÖ	KDÖ	KDÖ	KDÖ	BDÖ	BDÖ	KDÖ	KDÖ	KDÖ
	Hidroelektrik (A3)	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	AÖ	KAÖ	AÖ	AÖ	AÖ
	Biyokütle (A4)	ÇYÖ	ÇYÖ	YÖ	ÇYÖ	BAÖ	BDÖ	YÖ	ÇYÖ	ÇYÖ
	Jeotermal (A5)	KAÖ	KAÖ	KAÖ	AÖ	KAÖ	AÖ	AÖ	KAÖ	KAÖ

Tablo 13'te verilen dilsel değerlendirmeler Tablo 5'te sunulan SFS karşılıklarına dönüştürülmüştür. Ardından KV değerlendirmeleri Denklem (2)'de verilen SWAM operatörü ile toplulaştırılmış ve Tablo 14'te gösterilmiştir.

Tablo 14

## KV Görüşlerinin Birleştirilmesi

Alternatifler/Kriterler	C4			C3			C8		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
A1	0,900	0,100	0,100	0,842	0,159	0,164	0,800	0,200	0,200
A2	0,900	0,100	0,100	0,900	0,100	0,100	0,900	0,100	0,100
A3	0,300	0,700	0,300	0,300	0,700	0,300	0,300	0,700	0,300
A4	0,772	0,229	0,232	0,800	0,200	0,200	0,739	0,262	0,266
A5	0,100	0,900	0,100	0,100	0,900	0,100	0,100	0,900	0,100

Alternatifler/Kriterler	C2			C6			C1		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
A1	0,900	0,100	0,100	0,600	0,400	0,400	0,800	0,200	0,200
A2	0,900	0,100	0,100	0,687	0,317	0,330	0,687	0,317	0,330
A3	0,300	0,700	0,300	0,300	0,700	0,300	0,100	0,900	0,100
A4	0,739	0,262	0,266	0,400	0,600	0,400	0,600	0,400	0,400
A5	0,300	0,700	0,300	0,217	0,796	0,220	0,300	0,700	0,300

Alternatifler/Kriterler	C25			C17			C24		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
A1	0,280	0,890	0,090	0,250	0,910	0,080	0,250	0,910	0,070
A2	0,320	0,860	0,060	0,300	0,870	0,050	0,290	0,890	0,050
A3	0,080	0,980	0,080	0,070	0,980	0,080	0,070	0,980	0,070
A4	0,210	0,930	0,110	0,230	0,920	0,090	0,210	0,930	0,080
A5	0,080	0,980	0,080	0,020	0,990	0,020	0,020	0,990	0,020

SF-SWARA yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlıkları, Denklem (19) doğrultusunda modele dahil edilmiş ve buna bağlı olarak ağırlıklı toplu küresel karar matrisi Tablo 15'te sunulmuştur. Bu adımdan sonra SF-PIS ve SF-NIS Tablo 16'daki gibi elde edilmiştir.

Tablo 15

## Ağırlıklı toplu küresel karar matrisi

Alternatifler/Kriterler	C4			C3			C8		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
A1	0,486	0,688	0,082	0,416	0,753	0,111	0,380	0,782	0,123
A2	0,486	0,688	0,082	0,475	0,701	0,080	0,473	0,704	0,080
A3	0,123	0,944	0,128	0,120	0,946	0,125	0,119	0,947	0,125
A4	0,370	0,787	0,141	0,382	0,780	0,124	0,337	0,815	0,150
A5	0,040	0,983	0,041	0,039	0,984	0,040	0,039	0,984	0,039
Alternatifler/Kriterler	C2			C6			C1		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
A1	0,461	0,718	0,078	0,229	0,895	0,180	0,300	0,862	0,099
A2	0,461	0,718	0,078	0,273	0,870	0,160	0,239	0,900	0,141
A3	0,116	0,950	0,121	0,107	0,958	0,111	0,030	0,990	0,031
A4	0,328	0,825	0,146	0,145	0,940	0,157	0,201	0,919	0,159
A5	0,116	0,950	0,121	0,076	0,973	0,079	0,093	0,968	0,097
Alternatifler/Kriterler	C25			C17			C24		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
A1	0,278	0,889	0,088	0,251	0,906	0,081	0,249	0,909	0,068
A2	0,318	0,863	0,056	0,303	0,875	0,053	0,287	0,888	0,051
A3	0,078	0,977	0,081	0,074	0,980	0,077	0,070	0,982	0,073
A4	0,206	0,926	0,109	0,226	0,918	0,089	0,214	0,927	0,084
A5	0,078	0,977	0,081	0,024	0,994	0,024	0,023	0,995	0,023

Tablo 16

## En İyi ve En Kötü Çözümlerin Belirlenmesi

Kriterler	C4			C3			C8		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
SF-PIS	0,486	0,688	0,041	0,475	0,701	0,040	0,473	0,704	0,039
SF-NIS	0,040	0,983	0,141	0,039	0,984	0,125	0,039	0,984	0,150
Kriterler	C2			C6			C1		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
SF-PIS	0,461	0,718	0,078	0,273	0,870	0,079	0,300	0,862	0,031
SF-NIS	0,116	0,950	0,146	0,076	0,973	0,180	0,030	0,990	0,135
Kriterler	C25			C17			C24		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
SF-PIS	0,318	0,863	0,056	0,303	0,875	0,024	0,480	0,700	0,040
SF-NIS	0,078	0,977	0,109	0,024	0,994	0,089	0,023	0,995	0,084

Bu işlem sonrasında her bir alternatifin SF-NIS ve SF-PIS'e uzaklıkları için Denklem (24) ve Denklem (25) kullanılmıştır. Her bir YEK alternatifinin Öklid uzaklıkları SF-NIS için Tablo 17'de, SF-PIS için Tablo 18'de yer almaktadır.

Tablo 17

## En kötü çözüme olan (SF-NIS) Öklid uzaklıkları

Alternatif er/Kriterler	C4	C3	C8	C2	C6	C1	C25	C17	C24
A1	0,2889	0,1958	0,1573	0,1773	0,0294	0,0904	0,0486	0,0591	0,0585
A2	0,2889	0,2722	0,2715	0,1773	0,0494	0,0518	0,737	0,0932	0,0822
A3	0,0086	0,0079	0,0085	0,0006	0,0059	0,0110	0,0008	0,0028	0,0025
A4	0,1467	0,1589	0,1170	0,0604	0,0062	0,0347	0,0191	0,0466	0,0411
A5	0,0101	0,0074	0,0123	0,0006	0,0102	0,0059	0,0008	0,0041	0,0037

Tablo 18

En iyi çözüme olan (SF-PIS) Öklid uzaklıkları

Alternatifler/Kriterler	C4	C3	C8	C2	C6	C1	C25	C17	C24
A1	0,0017	0,0112	0,0219	0,0000	0,0127	0,0047	0,0033	0,0069	0,0980
A2	0,0017	0,0017	0,0016	0,0000	0,0065	0,0173	0,0000	0,0008	0,0726
A3	0,2046	0,1938	0,1912	0,1745	0,0363	0,0891	0,0716	0,0663	0,2486
A4	0,0334	0,0222	0,0432	0,0338	0,0274	0,0294	0,0194	0,0119	0,1240
A5	0,2854	0,2702	0,2666	0,1745	0,0490	0,0584	0,0716	0,0919	0,2959

SF-TOPSIS yönteminde son olarak, Denklem (28) ile revize edilmiş görelî yakınlık katsayıları ( $\xi(X_i)$ ) hesaplanmıştır. İstanbul ili için alternatif YEK sıralamaları Tablo 19'da verilmiştir.

Tablo 19

Geliştirilen SF-SWARA ile Hesaplanan Kriter Ağırlıklarına Göre YEK Alternatiflerinin SF-TOPSIS ile Elde Edilen Sıralama Sonuçları

Alternatifler	$\xi(X_i)$	Sıralama
A1	0,7564	2
A2	0,1873	1
A3	12,4448	4
A4	2,9077	3
A5	15,2521	5

Tablo 19'a göre YEK alternatiflerinin sıralaması  $\xi(X_i)$  değerleri baz alınarak  $A2 > A1 > A4 > A3 > A5$  şeklinde elde edilmiştir.

### 4.3. Duyarlılık Analizi

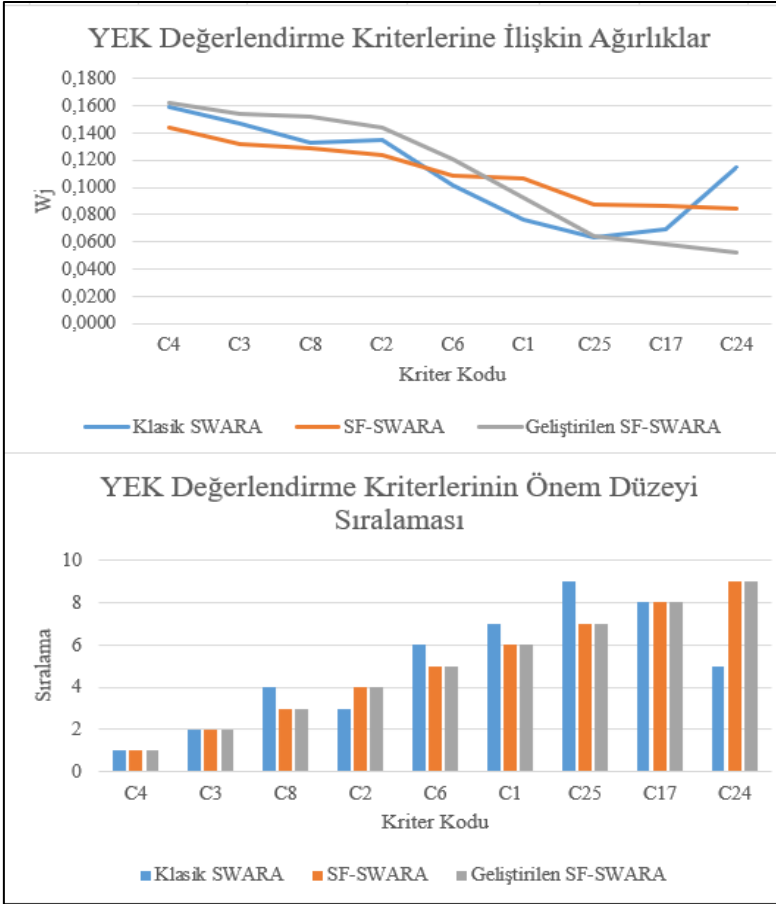
Duyarlılık analizi için klasik SWARA, Ghoushchi ve diğ. (2021) tarafından önerilen SF-SWARA ve bu çalışma kapsamında geliştirilen SF-SWARA yöntemleri kullanılarak YEK değerlendirme kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Yöntemlerden elde edilen sonuçlar Tablo 20'de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 20

Duyarlılık Analizi için Üç Farklı SWARA Yöntemi ile Elde Edilen Kriter Ağırlıkları

Klasik SWARA				
Kriter kodu	$s_j$	$k_j$	$w_j$	$W_j$
C4	-	1,0000	1,0000	0,1595
C3	0,0856	1,0856	0,9211	0,1470
C2	0,0931	1,0931	0,8427	0,1344
C8	0,0107	1,0107	0,8338	0,1330
C24	0,1635	1,1635	0,7166	0,1143
C6	0,1224	1,1224	0,6385	0,1019
C1	0,3284	1,3284	0,4806	0,0767
C17	0,1018	1,1018	0,4362	0,0696
C25	0,0945	1,0945	0,3986	0,0636
<b>Toplam</b>			6,2681	1,0000
Ghoushchi ve diğ. (2021) tarafından önerilen SF-SWARA				
Kriter kodu	$s_j$	$k_j$	$w_j$	$W_j$
C4	-	1,0000	1,0000	0,1436
C3	0,0917	1,0917	0,9160	0,1315
C8	0,0237	1,0237	0,8948	0,1285
C2	0,0395	1,0395	0,8608	0,1236
C6	0,1368	1,1368	0,7572	0,1087
C1	0,0235	1,0235	0,7398	0,1062
C25	0,2181	1,2181	0,6074	0,0872
C17	0,0140	1,0140	0,5990	0,0860
C24	0,0139	1,0139	0,5908	0,0848
<b>Toplam</b>			6,9658	1,0000
Bu çalışma kapsamında geliştirilen SF-SWARA				
Kriter kodu	$s_j$	$k_j$	$w_j$	$W_j$
C4	-	1,0000	1,0000	0,1622
C3	0,0512	1,0512	0,9513	0,1543
C8	0,0124	1,0124	0,9397	0,1524
C2	0,0598	1,0598	0,8866	0,1438
C6	0,1875	1,1875	0,7466	0,1211
C1	0,3113	1,3113	0,5694	0,0923
C25	0,4378	1,4378	0,3960	0,0642
C17	0,1069	1,1069	0,3578	0,0580
C24	0,1214	1,1214	0,3190	0,0517
<b>Toplam</b>			5,1664	1,0000

Tablo 20'de görüldüğü üzere üç yöntemde de C4 (teknoloji karmaşıklığı) ve C3 (teknolojik olgunluk) en yüksek ağırlık değerleri ile YEK değerlendirme sürecinde belirleyici kriterler olarak öne çıkmıştır. Kriter ağırlıklarının değişimine ilişkin grafikler Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. Duyarlılık Analizi için Üç Farklı SWARA Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlara İlişkin Grafikler

Şekil 2 incelendiğinde Klasik SWARA yönteminin daha geniş aralıklı bir çizgi düzlemine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca kriterlerin önem sıralamaları bakımından Klasik SWARA diğer yöntemlerden farklı sonuçlar vermiştir. Her üç yöntemde de ağırlıklar C4 > C3 > C8 > C2 şeklinde güçlü bir azalış eğilimi izlemekte, diğer kriterler ise benzer biçimde daha düşük ağırlık seviyelerinde yer almaktadır. Klasik SWARA yönteminde ağırlıklar daha keskin düşüş

gösterirken, SF-SWARA ve geliştirilen SF-SWARA yöntemleri özellikle orta önem düzeyindeki kriterlerde (C6, C1, C25, C17 ve C24) daha yumuşak bir azalış ile daha dengeli bir dağılım sağlamaktadır. Bu durum, bulanık yaklaşımların belirsiz yargıları daha ılımlı ağırlıklandırdığını göstermektedir.

Çalışmada Şekil 1’de verilen akış sırası gözetilerek Tablo 20’deki kriter ağırlıkları SF-TOPSIS yöntemine entegre edilmiş ve YEK alternatiflerine ilişkin sıralama sonuçları Tablo 21’deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 21

Farklı Yöntemler ile Hesaplanan Kriter Ağırlıklarına Göre YEK Alternatiflerinin SF-TOPSIS ile Elde Edilen Sıralama Sonuçları

YEK Alternatif Kodu	Klasik SWARA		SF-SWARA		Geliştirilen SF-SWARA	
	$\xi(X_i)$	Sıralama	$\xi(X_i)$	Sıralama	$\xi(X_i)$	Sıralama
A1	0,8972	2	0,5671	2	0,7564	2
A2	0,1748	1	0,1619	1	0,1873	1
A3	25,0748	4	15,7885	4	12,4448	4
A4	4,8552	3	3,2925	3	2,9077	3
A5	31,4232	5	19,2639	5	15,2521	5

Tablo 21 incelendiğinde üç farklı SWARA yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlıkları SF-TOPSIS yöntemine entegre edildiğinde alternatiflerin sıralaması  $A2 > A1 > A4 > A3 > A5$  şeklinde elde edilmiştir. Bu bağlamda kriter ağırlıklandırma yaklaşımları değişse de görel tercih sırası hiçbir yöntemde değişmemiş, sadece  $\xi(X_i)$  skor değerleri farklılaşmıştır. Bu durum, çalışma kapsamında geliştirilen SF-SWARA modelinin duyarlılık analizinde yüksek kararlılık sağladığını göstermektedir.

## 5. Tartışma ve Sonuçlar

Enerji yönetiminde YEK geçişi, enerji arz güvenliğini güçlendirirken sera gazı emisyonlarını düşürme, dışa bağımlılığı azaltma ve yerel istihdamı artırma gibi çok boyutlu kazanımlar sunmaktadır. Kent ölçeğinde artan enerji talebi, arazi kısıtları ve esneklik gereksinimi, YEK teknoloji seçiminde ekonomik göstergelerin yanı sıra teknolojik olgunluk, bakım-destek altyapısı, toplumsal kabul ve çevresel etkiler gibi ölçütleri de dikkate almayı zorunlu kılmaktadır. Türkiye’nin enerji dönüşüm hedefleri, büyükşehirler için YEK’in güvenilir ve ölçeklenebilir çözümlerle devreye alınmasını gerektirmektedir. Bu çerçevede

İstanbul, yüksek talep yoğunluğu ve farklı kentsel sınırlılıklarıyla YEK alternatiflerinin teknik/ekonomik uygulanabilirliğinin sistematik biçimde değerlendirilmesi gereken kritik bir örnek alandır. Bu çalışmada, İstanbul için en uygun YEK'in belirlenmesi ve YEK alternatiflerinin sıralanması amacıyla geliştirilen SF-DEMATEL-SF-SWARA-SF-TOPSIS temelli bütünleşik bir karar modeli uygulanmıştır. Analiz süreci, kriterler arası etkileşimlerin ortaya konulması, ağırlıklandırma sürecinin nesnel temellere dayandırılması ve alternatiflerin performanslarının çok boyutlu olarak değerlendirilmesi üzerine yapılandırılmıştır.

Çalışmada, Şekil 1'de yer alan akış diyagramından hareketle her bir karar süreci için KV görüşleri alınmıştır. SF-DEMATEL yönteminin sonuçlarına göre, sistemde en yüksek etkiye sahip kriterin  $r_i - c_i = 2,0342$  değeriyle teknoloji karmaşıklığı (C4) olduğu tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla teknolojik olgunluk (C3) ( $r_i - c_i = 1,7139$ ) ve teknolojinin bakım ve destek kolaylığı (C8) ( $r_i - c_i = 1,5855$ ) kriterleri izlemektedir. Bu durum, İstanbul gibi yoğun nüfuslu ve yüksek enerji talebine sahip bir şehirde teknolojik altyapının ve sürdürülebilir bakım mekanizmalarının enerji yatırımlarının başarısında belirleyici olduğunu göstermektedir. Benzer biçimde Ramezanzade ve diğ. (2021), çalışmasında gelişmiş enerji altyapısına sahip bölgelerde teknoloji odaklı kriterlerin karar sürecinde baskın olduğunu ortaya koymuştur. YEK değerlendirme kriterleri için Tablo 6'da verilen etkileyen kriterler sisteme dahil edilerek SF-SWARA yöntemi ile ağırlıklandırma yapılmıştır. En yüksek ağırlığa sahip kriter  $w_j = 0,1622$  değeriyle teknoloji karmaşıklığı (C4) olarak elde edilirken, teknolojik olgunluk (C3) ( $w_j = 0,1543$ ) ve teknolojinin bakım ve destek kolaylığı (C8) ( $w_j = 0,1524$ ) kriterleri onu takip etmiştir. En düşük önem derecesine sahip kriter ise  $w_j = 0,0517$  değeriyle alan gereksinimi (C24) olarak belirlenmiştir. Bu dağılım, İstanbul gibi arazi kullanımında sınırlılıklar bulunan metropollerde dahi teknolojik faktörlerin çevresel veya sosyo-ekonomik göstergelerden daha baskın bir rol oynadığını göstermektedir. Elde edilen bulgular aynı zamanda Abdel-Basset ve diğ. (2020) ile Kutlu Gündoğdu ve Kahraman (2019) tarafından yapılan çalışmalardaki sonuçlarla da paraleldir. Her iki çalışmada da bulanık tabanlı DEMATEL ve SWARA modellerinin enerji planlamasında belirsizliği azaltma ve KV önyargılarını dengelemekte etkili olduğu ortaya konmuştur.

SF-SWARA yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları SF-TOPSIS yöntemine entegre edilerek, İstanbul için YEK alternatifleri değerlendirilmiştir. Revize edilmiş göreceli yakınlık katsayıları ( $\xi(X_i)$ ) sonuçlarına göre rüzgâr (A2),  $\xi(X_i) = 0,1873$  değeriyle en uygun YEK olarak belirlenmiştir. Güneş (A1) ikinci, biyokütle (A4) ise üçüncü sırada yer alan alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın sırasıyla hidroelektrik (A3) ve jeotermal (A5) alternatifleri en düşük performansı göstermiştir. Rüzgâr (A1) alternatifinin ilk sırada yer alması, literatürdeki diğer çalışmalarla da örtüşmektedir. Bu araştırmalarda, Marmara Bölgesi ve özellikle İstanbul çevresinin rüzgâr hızları, kapasite faktörleri ve altyapı olanakları bakımından Türkiye'nin en avantajlı bölgeleri arasında yer

aldığı belirtilmiştir. Güneş enerjisinin ikinci sırada yer alması, İstanbul'un yıl boyunca sahip olduğu yüksek ve istikrarlı güneşlenme potansiyeline rağmen, kentsel ölçekteki arazi kısıtları ve yüksek yatırım maliyetleriyle ilişkili olabilir. Bu durum, güneş enerjisinin teknik olarak elverişli olmasına karşın, ekonomik ve mekânsal sınırlılıkların uygulanabilirliğini azaltabileceğini göstermektedir. Jeotermal (A5) enerjinin son sırada yer alması, İstanbul'un jeolojik yapısının düşük jeotermal potansiyele sahip olmasından ve yüksek sondaj maliyetlerinin ekonomik uygulanabilirliği azaltmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, yoğun kent dokusu içinde jeotermal tesislerin kurulumu için uygun alanların sınırlı olması, bu alternatifin pratikte tercih edilme olasılığını düşürmüştür.

Duyarlılık analizi dahilinde Klasik SWARA, SF-SWARA ve Geliştirilen SF-SWARA yaklaşımlarından elde edilen kriter ağırlıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, SF-SWARA ve Geliştirilen SF-SWARA modelinin belirsizlik içeren karar ortamlarında daha dengeli ve tutarlı ağırlık dağılımı sağladığı görülmüştür. Geliştirilen SF-SWARA modeli; üyelik, üyelik dışılık ve tereddüt derecelerini birlikte ele alarak kriter ağırlıklarının duyarlılığını artırmakta ve YEK alternatifleri için daha gerçekçi bir önceliklendirme sunmaktadır. Bu ağırlıklar doğrultusunda yapılan alternatif değerlendirmesinde yüksek verimlilik ve çevresel fayda sağlayan YEK alternatifleri üst sıralarda yer almıştır. Duyarlılık analizi sonuçları, farklı ağırlıklandırma yaklaşımları uygulandığında alternatif sıralamasının genel olarak korunduğunu ve modelin kritik kriter değişimlerine karşı istikrarlı sonuç ürettiğini göstermektedir. Bu bulgu, geliştirilen SWARA yönteminin hem kriter ağırlıklandırmada hem de YEK alternatiflerinin değerlendirilmesinde güvenilir ve kararlı bir karar destek aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmada bazı kısıtlar bulunmaktadır. Elde edilen YEK sıralaması, İstanbul ili özelinde belirlenen kriter ağırlıkları ve alternatif değerlendirme puanları üzerinden oluşturulmuştur. Dolayısıyla, aynı kriter seti ve ÇKKV yaklaşımı farklı bir il veya coğrafi konuma uygulandığında sıralamanın değişmesi beklenmektedir. Bu durum; bölgesel kaynak potansiyeli, güneşlenme süresi, rüzgâr rejimi, jeotermal rezerv durumu, arazi kullanımı, çevresel hassasiyetler, yatırım maliyetleri ve yerel enerji politikalarındaki farklılıklar nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Başka bir deyişle, İstanbul için optimum görünen bir YEK seçeneği, farklı fiziksel ve sosyoekonomik koşullara sahip bir bölgede aynı öncelik düzeyine sahip olmayabilir. Bu nedenle çalışma sonuçları, İstanbul ili için konumsal ve teknik karar desteği sunmakta olup, yöntemin diğer illere uygulanması halinde bölgeye özgü veri ile yeniden değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan kriter seti, kavramsal çerçeve ve ÇKKV metodolojisi farklı illere veya coğrafi bölgelere uygulanabilir niteliktedir. Başka bir bölgede gerçekleştirilecek analizlerde, yalnızca kriterlere ilişkin uzman görüşleri, ağırlıklandırmalar ve alternatif puanlamaları o bölgenin koşullarına uygun olarak güncellenecek; yöntemsel yapı aynen korunabilecektir. Böylece çalışma, hem İstanbul özelinde özgün bir sıralama üretmekte hem de başka illerde bölgesel verilerle tekrar uygulanabilir bir karar destek yaklaşımı

sunmaktadır. Ayrıca çalışmada grup karar verme yaklaşımı kapsamında oluşturulan KV takımının, aynı akademik disiplinden gelen ve eş düzeyde uzmanlığa sahip üyelerden oluşturulması, disiplinler arası bakış açısının sınırlı temsil edilmesine yol açabilmektedir. İlerleyen çalışmalar için farklı uzmanlık alanlarına sahip KV'lerin sürece dahil edilmesi, özellikle mekânsal uygunluk, çevresel planlama ve sosyoekonomik etkiler gibi boyutların daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayabilecektir.

Sonuç itibarıyla bu çalışma, İstanbul özelinde rüzgâr enerjisinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan en uygun YEK olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Türkiye'nin 2023–2035 Ulusal Enerji Planı hedefleriyle uyumlu olup, kentsel ölçekli enerji dönüşüm politikalarına yön verici niteliktedir. Özellikle teknolojik olgunluk, bakım kolaylığı ve güvenilirlik kriterlerinin yüksek ağırlıklara sahip olması, enerji yatırımlarında uzun vadeli sürdürülebilirlik için teknolojik yeterliliğin önceliklendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Çalışmanın metodolojik katkısı, SFS yaklaşımının DEMATEL–SWARA–TOPSIS entegrasyonu ile birlikte kullanılarak karar verme süreçlerindeki belirsizliği azaltmasıdır. Ayrıca, SF-SWARA yönteminin uygulanması aşamasında, “küresel bulanık kümeler arası mesafe” yaklaşımı önerilmiş ve böylece erken durulaştırmanın önüne geçilerek yöntemin özgün bir versiyonu geliştirilmiştir. Sonuç olarak hem kriterler arası ilişkilerin hem de alternatif performanslarının bütüncül biçimde analiz edilmesi mümkün olmuştur. Gelecek çalışmalarda, bu model farklı şehir veya bölgelerde uygulanarak karşılaştırmalı analizler yapılabilir. Ayrıca, modele sosyo-ekonomik belirsizlikler, karbon fiyatlaması veya iklim değişikliği senaryoları dahil edilerek enerji politikalarına yönelik öngörüler güçlendirilebilir. Makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon teknikleriyle (ör. XGBoost, ANN, GA) modelin adaptif yapısı daha da geliştirilebilir.

### **Araştırmacıların Katkısı**

Selen AVCI AZKESKİN, konunun tasarımı, literatür araştırması, veri analizi, yöntem geliştirilmesi ve uygulaması, kontrol-yazım; Ezgi GÜLER, giriş ve literatür araştırması, taslak oluşturma, kontrol-yazım; Zerrin ALADAĞ, konunun tasarımı, yöntem geliştirilmesi ve uygulaması, kontrol-yazım konularında katkı sağlamışlardır.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.



## Kaynaklar

- Abdel-Basset, M., Gamal, A., Chakraborty, R. K. & Ryan, M. J. (2021). Evaluation approach for sustainable renewable energy systems under uncertain environment: a case study. *Renewable Energy*, 168, 1073-1095. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.124>
- Abdulahitoğlu, A. (2025). A symmetry-based spherical fuzzy MCDM approach for the strategic assessment of alternative fuels toward sustainable energy policies. *Symmetry*, 17(7), 1089. Doi: <https://doi.org/10.3390/sym17071089>
- Agliata, R., Busato, F. & Presciutti, A. (2025). MCDM-based analysis of site suitability for renewable energy community projects in the Gargano District. *Sustainability*, 17(14), 6376. Doi: <https://doi.org/10.3390/su17146376>
- Aksoy, A. (2019). Integrated model for renewable energy planning in Turkey. *International Journal of Green Energy*, 16(1), 34-48. Doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1531872>
- Algül, F., Koruk, M. N. & Erdebilli, B. (2023). Evaluation of renewable energy alternative for Ankara and selection of appropriate power plant location. *Journal of Optimization and Decision Making*, 2(2), 357-362. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jodm/issue/81776/1281798>
- Ali, T., Ma, H. & Nahian, A. J. (2019). Justification of solar home system in rural bangladesh based on risk indicators: an integrated multi-criteria decision making approach. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(4), 1948-1956. Doi: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i4.9941.g7800>
- Alkan, N. (2024). Evaluation of sustainable development and utilization-oriented renewable energy systems based on CRITIC-SWARA-CODAS method using interval valued picture fuzzy sets. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 38, 101263. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101263>
- Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. J., Hosseini Dehshiri, S. S., Mostafaeipour, A., Hoa, A. X. & Techato, K. (2022). Determination of optimal renewable energy growth strategies using SWOT analysis, hybrid MCDM methods, and game theory: A case study. *International Journal of Energy Research*, 46(5), 6766-6789. Doi: <https://doi.org/10.1002/er.7620>
- Alshamrani, A., Majumder, P., Das, A., Hezam, I. M. & Božanić, D. (2023). An integrated BWM-TOPSIS-I approach to determine the ranking of alternatives and application of sustainability analysis of renewable energy. *Axioms*, 12(2), 159. Doi: <https://doi.org/10.3390/axioms12020159>
- Atanassov, K. T. (1999). Intuitionistic fuzzy sets. In *Intuitionistic fuzzy sets*. Physica, Heidelberg. Erişim adresi : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-7908-1870-3>

- Ayağ, Z. and Samanlıoğlu, F. (2020). Fuzzy AHP-GRA approach to evaluating energy sources: a case of Turkey. *International Journal of Energy Sector Management*, 14(1), 40-58. Doi: <https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2018-0012>
- Aydın, T. and Kaçtıoğlu, S. (2023). CRITIC ve WASPAS yöntemleri kullanılarak türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 6(2), 53-80. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3198688>
- Aydın, B. and Oruç, Ö. E. (2024). Determining the most useful renewable energy alternative for Turkey by combining MAUT and TAOV methods. *International Journal of Energy Studies*, 9(2), 291-308. Doi: <https://doi.org/10.58559/ijes.1437059>
- Azim, A. B., Ali, A., Khan, A. S., Awwad, F. A., Ali, S., & Ismail, E. A. (2024). Applications of q-spherical fuzzy rough CODAS to the assessment of a problem involving renewable energy site selection. *IEEE Access*, 12, 114100-114122. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3412193>
- Balin, A. and Baraçlı, H. (2017). A fuzzy multi-criteria decision making methodology based upon the interval type-2 fuzzy sets for evaluating renewable energy alternatives in Turkey. *Technological and Economic Development of Economy*, 23(5), 742-763. Doi: <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1056276>
- Bilgili, F., Zaralı, F., Ilgün, M. F., Dumrul, C. & Dumrul, Y. (2022). The evaluation of renewable energy alternatives for sustainable development in Turkey using intuitionistic fuzzy-TOPSIS method. *Renewable Energy*, 189, 1443-1458. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.058>
- Boran, F. E., Boran, K. & Menlik, T. (2012). The evaluation of renewable energy technologies for electricity generation in Turkey using intuitionistic fuzzy TOPSIS. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(1), 81-90. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567240903047483>
- Brodny, J. and Tutak, M. (2023). Assessing the energy security of European Union countries from two perspectives—A new integrated approach based on MCDM methods. *Appl. Energy*, 347, 121443. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121443>
- Büyüközkan, G. and Güleriyüz, S. (2016). A fuzzy multi-criteria decision making approach for evaluating sustainable energy technology alternatives. *International Journal of Renewable Energy Sources*, 1(1), 1-12. Erişim adresi: <https://www.ijares.org/ijares/filedownloads/ijres/2016/020-0001.pdf>
- Büyüközkan, G., Karabulut, Y. & Göçer, F. (2024). Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for

- renewable energy selection in Turkey. *Applied Soft Computing Journal*, 158, 111465. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111465>
- Cesur, F., Taş, N. & Taş, M. (2024). A decision-making model proposal for the use of renewable energy technologies in buildings in Turkey. *Energies*, 17(10), 2354. Doi: <https://doi.org/10.3390/en17102354>
- Çolak, M. and Kaya, İ. (2017). Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 80, 840–853. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.194>
- Dincer, H., Eti, S., Yüksel, S., Gokalp, Y., & Celebi, B. (2022). strategy generation for risk minimization of renewable energy technology investments in hospitals with SF Top-Dematel methodology. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 3(1), 58-66. Doi: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE32021141>
- Eroğlu, H. and Şahin, R. (2020). A neutrosophic VIKOR method-based decision-making with an improved distance measure and score function: case study of selection for renewable energy alternatives. *Cognitive Computation*, 12, 1338–1355. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12559-020-09765-x>
- ETKB (2021). Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- Ghenai, C., Albawab, M. & Bettayeb, M. (2020). Sustainability indicators for renewable energy systems using multi-criteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. *Renewable Energy*, 146, 580–597. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.157>
- Ghoushchi, S. J., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., Tomaskova, H. & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2021). Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set. *Sustainability*, 13(24), 13950. Doi: <https://doi.org/10.3390/su132413950>
- Gouraizim, M., Makan, A. & El Ouarghi, H. (2023). A Car-PROMETHEE-Based multi-criteria decision-making framework for sustainability assessment of renewable energy technologies in Morocco. *Operations Management Research*, 16, 1343–1358. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00361-4>
- Gül, S. (2020). Spherical fuzzy extension of DEMATEL (SF-DEMATEL). *International Journal of Intelligent Systems*, 35(9), 1329-1353. Doi: <https://doi.org/10.1002/int.22255>
- Horasan, M. B. and Kılıç, H. S. (2022). A multi-objective decision-making model for renewable energy planning: the case of Turkey. *Renewable Energy*, 193, 484-504. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.158>
- IEA (2021). World Energy Outlook 2021. International Energy Agency, Paris.

- İlbahar, E., Cebi, S. & Kahraman, C. (2020). Prioritization of renewable energy sources using multi-experts pythagorean fuzzy WASPAS. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 39, 6407–6417. Doi: <https://doi.org/10.3233/IIFS-189106>
- İnce, İ. T. (2021). Güneş enerjisi ile elektrik üretiminde örnek uygulamalar. *Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 1-10. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/dyad/issue/65949/1029484>
- İstanbul Enerji (2024). 2024 Faaliyet Raporu. İstanbul Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.
- İSTKA (2024). İstanbul'da Yenilenebilir Enerji Teknolojileri Ekosistemi – Mevcut Durum ve Beklentiler Raporu. İstanbul Kalkınma Ajansı.
- Jameel, T., Riaz, M., Aslam, M. & Pamucar, D. (2024). Sustainable renewable energy systems with entropy based step-wise weight assessment ratio analysis and combined compromise solution. *Renewable Energy*, 235, 121310. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121310>
- Kabak, M. and Dağdeviren, M. (2014). Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy Conversion and Management*, 79, 25–33. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.036>
- Kantoğlu, B. and Düzdar Argun, İ. (2023). Evaluation of renewable energy source alternatives prioritization. *Turkish Journal of Engineering*, 7(1), 1-8. Doi: <https://doi.org/10.31127/tuje.1001488>
- Karaaslan, A., Adar, T. & Kılıç Delice, E. (2022). Regional evaluation of renewable energy sources in Turkey by new integrated AHP-MARCOS methodology: a real application. *International Journal of Sustainable Energy*, 41(2), 103-125. Doi: <https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1897126>
- Karakaya, E. (2016). Paris iklim anlaşması: içeriği ve Türkiye üzerine bir değerlendirme. *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1-12. Doi: <https://doi.org/10.30803/adusobed.188842>
- Karbin, H., Rashidi Komijan, A. (2022). An MCDM-based approach for renewable energy planning in Iran. *Journal of Energy and Economic Development*, 1(3), 60–79. Doi: <https://doi.org/10.30503/jeedev.2024.410584.1029>
- Kaya, T., Kahraman, C. (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR and AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35(6), 2517–2527. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.051>
- Kocakaya, K., Engin, T., Tektaş, M., ve Aydın, U. (2021). Türkiye’de bölgesel havayolları için uçak tipi seçimi: küresel bulanık AHP-TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 27-58. Doi: <https://doi.org/10.51513/jitsa.903996>

- Kuleli Pak, B., Albayrak, Y. E. & Erensal, Y. C. (2017). Evaluation of sources for the sustainability of energy supply in Turkey. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 36(2), 627–637. Doi: <https://doi.org/10.1002/ep.12507>
- Kumar, M., Samuel, C. (2017). Selection of best renewable energy source by using VIKOR method. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 2(8), 2017. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40866-017-0024-7>
- Kutlu Gündoğdu, F., Kahraman, C. (2019). Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 36(1), 337–352. Doi: <https://doi.org/10.3233/JIFS-181401>
- Li, T., Li, A. & Song, Y. (2021). Development and utilization of renewable energy based on carbon emission reduction—evaluation of multiple MCDM methods. *Sustainability*, 13(17), 9822. Doi: <https://doi.org/10.3390/su13179822>
- Li, S., Hu, Y. (2022). A multi-criteria framework to evaluate the sustainability of renewable energy: a 2-tuple linguistic grey relation model from the perspective of the prospect theory. *Sustainability*, 14(8), 4419. Doi: <https://doi.org/10.3390/su14084419>
- Li, T., Wang, H. & Lin, Y. (2024). Selection of renewable energy development path for sustainable development using a fuzzy MCDM based on cumulative prospect theory: the case of Malaysia. *Scientific Reports*, 14, 15082. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65982-6>
- Magableh, G. M., Mistarihi, M. Z. & Dalu, S. A. (2025). Innovative hybrid fuzzy MCDM techniques for adopting the appropriate renewable energy strategy. *Resources, Environment and Sustainability*, 21, 100234. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2025.100234>
- Mizrak, F., Şahin, D. R. (2025). Investment strategies for renewable energy technologies and harvesting systems in airport operations using spherical fuzzy MCDM models. *Scientific Reports*, 15(1), 24075. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08480-7>
- Mohammad Husain, A., Hasan, M. M., Khan, Z. A. & Asjad, M. (2024). A robust decision-making approach for the selection of an optimal renewable energy source in India. *Energy Conversion and Management*, 301, 117989. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117989>
- Nguyen, V. T. (2022). Sustainable energy source selection for industrial complex in Vietnam: a fuzzy MCDM approach. *IEEE Access*, 10, 50691–50701. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173609>
- Niu, D., Zhen, H., Yu, M., Wang, K., Sun, L. & Xu, X. (2020). Prioritization of renewable energy alternatives for China by using a hybrid FMCDM methodology with uncertain information. *Sustainability*, 12(11), 4649. Doi: <https://doi.org/10.3390/su12114649>

- Özdemir, Y. S. (2022). Stok yönetimi için ABC-küresel bulanık AHS-ELECTRE tabanlı melez grup karar verme yöntemi ve bir uygulama. *Journal of Turkish Operations Management*, 6(1), 928-942. Erişim adresi: <https://acikerisim.aybu.edu.tr/items/18f694fc-915a-47d3-9b83-a3bc2000b129>
- Özgüner, M., Özgüner, Z. (2021). The evaluation of renewable energy resources in Turkey using Entropy-TOPSIS method. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 56(4), 2213-2227. Doi: <http://dx.doi.org/10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.21.10.1618>
- Petrov, I. (2022). MCDM for renewable energy projects: criteria weighting with traditional entropy and novel hierarchy in combination with conventional and structured in blocks AHP approaches. *9th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, Mashrad, İran, 23-24 Şubat 2022.
- Rahman, M. A., Ahmed, T., Rana, M. M., Hossain, B., Bhuiyan, M. R. & Alam, M. J. (2024, December). A comparative analysis of MCDM methods for selecting the optimal renewable energy source for Rajshahi, Bangladesh. In *2024 International Conference on Recent Progresses in Science, Engineering and Technology (ICRPSET)* (pp. 1-5). IEEE.
- Ramezanzade, M., Karimi, H., Almutairi, K., Xuan, H. A., Saebi, J., Mostafaeipour, A. & Techato, K. (2021). Implementing MCDM techniques for ranking renewable energy projects under fuzzy environment: A case study. *Sustainability*, 13(22), 12858. Doi: <https://doi.org/10.3390/su132212858>
- Saeed, M. H., Saeed, M., Rahman, A. U., Ahsan, M., Mohammed, M. A., Marhoon, H. A., ... Martinek, R. (2024). Renewable energy resource management using an integrated robust decision making model under entropy and similarity measures of fuzzy hypersoft set. *Heliyon*, 10, E33464. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33464>
- Sağbaşı, A., Devci, M. & Polat, U. (2023). A decision support system based on hybrid approach with COPRAS and interval type-2 fuzzy TOPSIS for evaluation of renewable energy alternatives. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(2), 61-73. Doi: <https://doi.org/10.55581/ejeas.1392881>
- Sahu, K., Srivastava, R. K., Kumar, S., Saxena, M., Gupta, B. K. & Verma, R. P. (2023). Integrated hesitant fuzzy-based decision-making framework for evaluating sustainable and renewable energy. *International Journal of Data Science and Analytics*, 16, 371-390. Doi: <https://doi.org/10.1007/s41060-023-00426-4>
- Saraswat, S. K., Digalwar, A. K. (2021). Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multi-criteria decision approach. *Renewable Energy*, 171, 58-74. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.068>

- Sedady, F., Beheshtinia, M. A. (2019). A novel MCDM model for prioritizing the renewable power plants' construction. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 30(2), 383–399. Doi: <https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2018-0102>
- Sevgi, E., Figen, A. Z. (2025). Determination of renewable energy growth using cluster analysis and multi-criteria decision-making methods. *Applied Sciences*, 15(3), 1575. Doi: <https://doi.org/10.3390/app15031575>
- Smarandache, F. (2005). A unifying field in logics: neutrosophic logic, neutrosophic set, neutrosophic probability and statistics. *Infinite Study*. Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.49174>
- Solangi, Y. A., Tan, Q., Mirjat, N. H., Valasai, G. D., Khan, M. & Ikram, M. (2019). An integrated Delphi-AHP and Fuzzy TOPSIS approach toward ranking and selection of renewable energy resources in Pakistan. *Processes*, 7(2), 118. Doi: <https://doi.org/10.3390/pr7020118>
- Stojčetović, B., Petković, M. & Đurović, S. (2023). Assessment of renewable energy sources using mcdm method: case study. *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, 36(3), 353-363. Doi: <https://doi.org/10.2298/FUEE2303353S>
- Şahin, M. (2021). A comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1591-1616. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02922-7>
- Van Thanh, N. (2022). Sustainable energy source selection for industrial complex in Vietnam: A Fuzzy MCDM Approach. *IEEE Access*, 10, 50692-50701. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.317360>
- Topcu, B. A. (2024). Türkiye’de sürdürülebilir çevre: finansal gelişme, yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji tüketimi ve doğal kaynak gelirlerinin rolü. *The Journal of Academic Social Science*, 129(129), 43-60. Doi: <http://dx.doi.org/10.29228/ASOS.61995>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2023). Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023–2035. Ankara: ETKB Yayınları. Erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/>
- TÜİK (2022). Türkiye Sera Gazı Envanteri Raporu 1990–2020. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.
- TÜİK (2024). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları 2024. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.
- Wang, Y., Xu, L. & Solangi, Y. A. (2020). Strategic renewable energy resources selection for Pakistan: based on SWOT-fuzzy AHP approach. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101861. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101861>

- Yager, R. R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. In 2013 joint IFSA world congress and NAFIPS annual meeting (IFSA/NAFIPS) (pp. 57-61). IEEE.
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K. & Streimikiene, D. (2018). A Novel integrated decision-making approach for the evaluation and selection of renewable energy technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 403-420. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1488-4>
- Yazdani, M., Torkayesh, A. E., Santibanez-Gonzalez, E. & Otaghsara, S. K. (2020). Evaluation of renewable energy resources using integrated Shannon Entropy-EDAS model. *Sustainable Operations and Computers*, 1, 35-42. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2020.12.002>
- Yılan, G., Kadirgan, M. N. & Çiftçioğlu, G. A. (2020). Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: the case of Turkey. *Renewable Energy*, 146, 519-529. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.164>
- Yontar, E. (2023). Selection of suitable renewable energy sources for Turkey: SEM-COPRAS method integrated solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 6131-6146. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04943-4>
- Yürek, Y. T., Özyörük, B., Özcan, E. & Bulut, M. (2023). Socio-political evaluation of renewable energy resources under uncertain environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106881. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106881>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (3), 338-353. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zaralı, F. (2022). The selection of terrestrial renewable energy power plants in an intuitionistic fuzzy environment: the case of Turkey. *International Journal of Management Economics and Business*, 18(4), 1230-1249. Doi: <http://dx.doi.org/10.17130/ijmeb.1133596>
- Zheng, X. Y., Lee, H. C., Bing, P. & Lixiua, Z. (2023). Application of MCDM method in selecting renewable energy. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*, 5(3), 23-26. Doi: <https://doi.org/10.22034/ijieor.v5i3.49>