DEU FMD 28(83) (2026) 244-255

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi
Dokuz Eylul University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering
Elektronik/Online ISSN: 2547-958X

ARAŞTIRMA MAKALESI / RESEARCH ARTICLE

Yenilenebilir Enerji Kaynakları Değerlendirme Faktörlerinin Bulanık PIPRECIA-Bilişsel Haritalama Yöntemiyle Modellenmesi ve Senaryo Analizi

Modeling and Scenario Analysis of Renewable Energy Resources Evaluation Factors Using Fuzzy PIPRECIA-Cognitive Mapping Method

Merve Güler

Galatasaray Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: mguler@gsu.edu.tr

Öz

Son yıllarda, yenilenebilir enerji üretme kapasitesi, çoğunlukla gelişmekte olan ülkelerden gelen artan enerji talepleri nedeniyle önemli ölçüde artmıştır. Bu çalışmanın amacı, yenilenebilir enerji yatırım planlaması yaparken dikkate alınması gereken unsurları analitik ve dinamik olarak inceleyecek bir yöntem sunmaktır. Bu çalışma, yenilenebilir enerji yatırım planlamasını etkileyen faktörleri araştırmak için bulanık PIPRECIA ve bilişsel haritalama metodolojilerini birleştiren yeni bir metodoloji kullanmaktadır. Faktörleri belirlemek için literatür araştırmasından, endüstri raporlarından ve uzman görüşlerinden faydalanılmıştır. On dört faktör belirlenmiş ve belirlenen bu faktörler ekonomik, teknik, sosyal, çevresel ve yasal olmak üzere beş ana boyut altında gruplandırılmıştır. Bu faktörleri ve ilişkilerini değerlendirmek için çalışma, hiyerarşik bir değerlendirme metodolojisi önermektedir. Sonuçlara göre, ekonomik faktörler en önemlisidir, bunu teknik faktörler takip ederken, sosyal, çevresel ve yasal faktörler daha az önemlidir. Teşvikler ve destekler en önemli faktör olarak bulunmuştur. Ayrıca, çeşitli senaryoların incelenmesi, bu değişkenlerdeki değişikliklerin yenilenebilir enerji sektöründe yapılan yatırımların sonuçları üzerinde nasıl dinamik bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji yatırım planlamasına ilişkin bilimsel yazındaki boşluklar doldurulmuştur. Öte yandan bu çalışma akademisyenlere, yöneticilere ve politikacılara faydalı tavsiyeler sunmaktadır. Çalışmanın bulgularının gelecekteki araştırmaları yönlendireceği ve yenilenebilir enerji sektöründe daha iyi kararlar almayı teşvik edeceği ön görülmektedir.

Anahtar Kelimeler*: Bulanık Mantık, Bilişsel Haritalama, PIPRECIA, Senaryo Analizi, Yenilenebilir Enerji*

Abstract

The capacity to produce renewable energy has grown significantly in recent years, mostly due to rising energy demands from developing nations. The aim of this study is to present a method that will analytically and dynamically examine the elements that should be considered when making renewable energy investment planning. This study uses a novel methodology that combines fuzzy PIPRECIA and cognitive mapping methodologies to investigate the factors influencing renewable energy investment planning. To identify the factors, a literature research and expert consultations were conducted. Fourteen factors are determined and grouped under the economic, technical, social, environmental, and legal domains. To evaluate these factors and their relationships, the study suggests a hierarchical evaluation methodology. According to the results, economic issues are the most important, followed by technical ones, while social, environmental, and legal aspects are less important. The incentives and supports are found as the most important factor. Furthermore, the examination of several scenarios shows how changes in these variables can have a dynamic impact on the results of investments made in the renewable energy industry. By filling in the gaps in the literature on renewable energy investment planning, this study adds to the body of knowledge and offers useful advice to scholars, managers, and policymakers. It is anticipated that the study's findings would direct future investigations and promote better decision-making in the renewable energy sector.

Keywords: *Cognitive Mapping, Fuzzy Logic, PIPRECIA, Scenario Analysis, Renewable Energy*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, renewable energy production capacity has grown strongly. More than 80% of the growth in global energy demand comes from developing and emerging economies. According to the World Electricity Agency's 2024 report, the largest share in the distribution of growth in energy came from renewable energy sources (38%), followed by natural gas (28%), coal (15%), oil (11%) and nuclear (8%) [1].

When the renewable energy and waste electricity production rate graph of Türkiye between 2010 and 2023 is examined, the renewable energy and waste usage rate increases.

Indeed, the increasing importance of renewable energy has motivated this study. This study aims to present a method that will analytically and dynamically examine the elements to be considered when making renewable energy investment planning. In this context, it is aimed to answer the following research questions:

• Research Question 1: What are the main factors affecting renewable energy investments, and under which categories can these factors be classified?

• Research Question 2: What are the causal relationships among these factors, and how can these relationships be modeled?

DOI: https://doi.org/10.21205/deufmd.2026288310

Geliş Tarihi / Received: 05.06.2025
Kabul Tarihi / Accepted: 27.09.2025

• Research Question 3: What are the dynamic responses of the identified model under different scenarios?

• Research Question 4: How can the model outputs be used to reveal possible scenarios in renewable energy planning in Türkiye?

This study is expected to make many contributions to the literature. First of all, the study presents the renewable energy resources evaluation model hierarchically and examines the causal relationships between the factors with the BBH method. Secondly, the fuzzy PIPRECIA-cognitive mapping method was used for the first time in this study. Thirdly, a case study was conducted with experienced experts in the sector, and the results of the study were presented. Finally, the behavior of the system under different scenarios related to renewable energy for Türkiye was examined for the first time. Therefore, this study contributes to the relevant literature in various ways. It is expected that policy implementers, managers, and academicians working in this field will benefit from the results of the study and that this study will guide and shed light on future studies.

The plan of the study is as follows. In the second section, a scientific literature review is given, and the gaps in the literature are identified. The methods used and the steps of the methods are given in the third section.

Materials and Methods

To answer the first research question, a renewable energy assessment model is presented by using a scientific literature review, industry reports, and expert opinions. This model consists of a total of 14 factors grouped under five main factors. In the second research question, the Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) method is used to model the interactions between factors (direct/indirect, positive/negative effects). FCM defines different aspects of the behavior of a complex system in terms of concepts; each concept represents a state or a feature of the system, and these concepts interact with each other to show the dynamics of the system [2], [3]. The Fuzzy PIPRECIA (Pivot Pairwise RElative Criteria Importance Assessment) method is used to account for the importance levels of the main factors. In real life, decision makers may have difficulty expressing the importance levels of the criteria with clear numbers. Fuzzy PIPRECIA is robust to indecision and uncertainty since linguistic expressions are modeled with fuzzy numbers [4]. In addition, it offers a practical method by reducing the confusion of experts since it only asks for ranking and relative importance coefficients from experts. The third research question aims to analyze the behavior of the system through simulation. Three different scenarios were prepared for Türkiye, and the system was examined dynamically. The fourth research question aims to interpret the results of the case study for potential renewable energy applications in Türkiye.

Results and Discussion

At the end of the fuzzy PIPRECIA method, as seen from Table 7, the most important main factor is economic factors with 0.334. Technical factors come second with 0.182. Social, environmental, and legal factors are ranked third, fourth, and fifth.

As a result of the BBH method, when we rank the factors according to the centrality value, the most important factor was found to be “Climate and Energy Goals (Ç1)”, the second and third most important factors were found to be “Energy Infrastructure (Production, Transmission, Distribution) (T2)” and “Environmental Impact (Carbon Emissions) (Ç3)”, respectively.

When we look at the factors that are highly dependent on other nodes and are greatly affected by them, “Energy Infrastructure (Production, Transmission, Distribution) (T2)” comes first.

When we examine the factors that affect other nodes, “Ç1. Climate and Energy Goals” comes first. Therefore, it is the factor that affects other factors the most.

As can be understood from Figure 6, considering the weights of the main factors affected the outputs of the model. In the current situation, “Incentives and Supports (E4)” is the most important factor, “Energy Prices (E2)” is the second important factor, and “Technology Cost (Installation, Investment, Equipment, Implementation) (E1)” is the third important factor.

When the results of the scenarios are examined, we can summarize the possible behaviors of renewable energy systems. In Figure 7, the changes in the values of the factors under three different scenarios are shown with a horizontal bar graph. In Scenario 1, it is seen that most variables have more negative values compared to the other scenarios. The observation of significant negative effects in all variables suggests that this scenario may be the riskiest in terms of the system. In particular, the Suitability of Land (Ç2), Labor, Education (S2), and Energy Supply-Demand Balance (E3) are negatively affected by the technological pessimism scenario to a large extent, with a decrease of 0.057, 0.044, and 0.043, respectively. When we look at Scenario 2, we can observe that the system responds at a much lower level and is more balanced compared to Scenario 1. In this scenario, the factor most affected by economic uncertainty and regulatory pressure is Labor and Education (S2), with a decrease of 0.008. In Scenario 3, more factors are affected compared to Scenario 2. In this scenario, where sustainability is pessimistic but social participation is high, the most negatively affected factor was Technology Cost (Installation, Investment, Equipment, Implementation) (E1), decreased by 0.017.

Conclusion

In summary, this study has used a novel methodology that combines fuzzy PIPRECIA and cognitive mapping methodologies to clarify the key determinants impacting investments in renewable energy. The study successfully discovered and categorized 14 critical elements, showing how they interact and how the system responds dynamically in different situations. According to the findings, incentives and supports are the most important factor, energy prices are the second important factor, and technology cost is the third important factor.

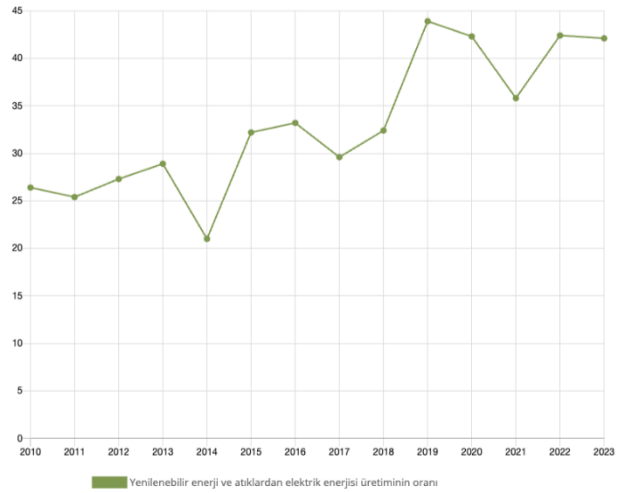
This study closes a large gap in the literature and offers useful information to academics, managers, and policymakers working in the renewable energy industry. Beyond its theoretical contributions, this research has practical implications for future investment planning and strategic decision-making in the renewable energy sector in Türkiye. Thus, our work provides a basis for further research and conversations to improve the sustainability of energy practices in the area.

1. Giriş

Son yıllarda yenilenebilir enerji üretim kapasitesi güçlü bir büyüme kaydetti. Küresel enerji talebindeki büyümenin %80'inden fazlası, gelişmekte olan ve yükselen ekonomilerden gelmektedir. Dünya Elektrik Ajansı’nın 2024 raporuna göre enerjideki büyümenin dağılımında en büyük pay yenilenebilir enerji kaynaklarından gelmiş (%38), bunu doğal gaz (%28), kömür (%15), petrol (%11) ve nükleer (%8) izlemiştir [1]. Örneğin, 2013 ile 2023 yılları arasındaki on yılda, temiz enerjiye olan talebin artması ve ölçek ekonomilerine olanak sağlayan ve talebi teşvik eden endüstriyel politikalar sayesinde güneş enerjisi

üretimi küresel olarak 10 kat artmıştır. Öte yandan, küresel enerji sistemleri ve altyapısı, sistem operatörleri ve enerji planlamacıları yeni gerçeklere uyum sağladıkça hem karmaşık zorluklarla hem de fırsatlarla karşı karşıya kalmaya devam etmektedir [5].

Türkiye'nin 2010-2023 yılları arasındaki yenilenebilir enerji ve atıklardan elektrik üretim oranı grafiği TÜİK'in sunmuş olduğu verilere göre Şekil 1'de sunulmuştur [6]. Grafikteki uzun vadeli trend incelendiğinde, yenilenebilir enerji ve atık kullanım oranının giderek arttığı görülmektedir. 2014 ve 2021 yıllarında düşüşler yaşanmış olsa da genel olarak ilerleyen yıllarda yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı artmıştır. Özellikle 2021 sonrası yükseliş, ülkelerin sürdürülebilir enerji politikalarına verdiği önemin arttığını göstermektedir.



Şekil 1. 2010-2023 yılları arasında yenilenebilir enerji ve atıklardan elektrik üretim oranı. [6]

Figure 1. Electricity generation rate from renewable energy and waste between 2010 and 2023. [6]

Nitekim, yenilenebilir enerjinin öneminin giderek artması bu çalışmanın motivasyon kaynağı olmuştur. Bu çalışmanın amacı yenilenebilir enerji yatırım planlaması yaparken göz önünde bulundurulması gereken unsurları analitik ve dinamik olarak inceleyecek bir yöntem sunmaktır. Bu bağlamda, aşağıdaki araştırma sorularına cevap vermek hedeflenmiştir:

- **Araştırma Sorusu 1:** Yenilenebilir enerji yatırımlarını etkileyen temel faktörler nelerdir ve bu faktörler hangi kategoriler altında sınıflandırılabilir?
- **Araştırma Sorusu 2:** Bu faktörler arasında nasıl nedensel ilişkiler bulunmaktadır ve bu ilişkiler nasıl modellenebilir?
- **Araştırma Sorusu 3:** Tanımlanan modelin farklı senaryolar altında gösterdiği dinamik tepkiler nelerdir?
- **Araştırma Sorusu 4:** Modelin çıktıları, Türkiye'de yenilenebilir enerji planlamasındaki olası senaryoları ortaya koymak açısından nasıl kullanılabilir?

İlk araştırma sorusunu yanıtlamak için bilimsel yazın taramasından, endüstri raporlarından ve uzman görüşlerinden yararlanarak bir yenilenebilir enerji değerlendirme modeli sunulmuştur. Bu model 5 ana faktör altında gruplanan toplam 14 faktörden oluşmaktadır. İkinci araştırma sorusunda faktörler arası etkileşimlerin (doğrudan/dolaylı, pozitif/negatif etkiler) modellenmesi amacıyla Bulanık Bilişsel Haritalama (BBH) yöntemi kullanılmıştır. BBH, karmaşık bir sistemin davranışının farklı yönlerini kavramlar açısından tanımlar; her kavram sistemin bir durumunu veya bir özelliğini temsil eder ve bu kavramlar birbirleriyle etkileşime girerek sistemin dinamiklerini gösterir [2], [3]. Ana faktörlerin önem derecelerini hesaba katmak için ise bulanık PIPRECIA (Pivot Pairwise RElative Criteria Importance Assessment) yöntemi kullanılmıştır. Gerçek hayatta karar vericiler, kriterlerin önem düzeyini net sayılarla ifade etmekte zorlanabilir. Bulanık PIPRECIA, dilsel ifadeleri bulanık sayılarla modellendiği için, kararsızlık ve belirsizliğe dayanıklıdır [4]. Ayrıca uzmanlardan yalnızca sıralama ve göreli önem katsayısı istediği için uzmanların kafa karışıklığını azaltarak pratik bir yöntem sunmaktadır. Üçüncü araştırma sorusunda simülasyon yoluyla sistemin davranışının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Türkiye için üç farklı senaryo hazırlanarak sistem dinamik olarak incelenmiştir. Dördüncü araştırma sorusunda ise Türkiye'deki potansiyel yenilenebilir enerji uygulanmaları için vaka çalışmasının sonuçlarının yorumlanması amaçlanmıştır.

Yenilenebilir enerji konusunda yapılan ve BBH yöntemini kullanan bilimsel çalışmalar incelendiğinde [7-19], hiyerarşik bir değerlendirme modeli sunan ve faktörlerin ağırlıklarını dikkate alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, Türkiye'de senaryo analizleri gerçekleştirerek yenilenebilir enerji ile ilgili faktörlerin davranışını dinamik olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın yazına birçok katkı sunması ön görülmektedir. Öncelikle, çalışma yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirme modelini hiyerarşik olarak sunmaktadır ve faktörler arası nedensel ilişkileri BBH yöntemi ile incelemektedir. İkinci olarak, bu çalışmada ilk kez bulanık PIPRECIA-bilişsel haritalama yöntemi ilk kez kullanılmıştır. Üçüncü olarak, sektörde deneyimli uzmanlarla vaka çalışması gerçekleştirilerek çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Son olarak, Türkiye için yenilenebilir enerji ile ilgili farklı senaryolar altında sistemin davranışı ilk kez incelenmiştir. Bu sebeple, bu çalışma ilgili yazına çeşitli yönlerden katkıda bulunmaktadır. Politika uygulayıcıların, bu alanda çalışan yöneticilerin ve akademisyenlerin çalışmanın çıktılarından yararlanması ve bu çalışmanın gelecek çalışmalara rehberlik ederek ışık tutması beklenmektedir.

Çalışmanın planı şu şekildedir. Gelecek bölümde bilimsel yazın taraması verilerek yazındaki boşluklar tespit edilmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan yöntemler ve yöntemlerin adımları verilmiştir. Dördüncü bölümde vaka çalışması ve beşinci bölümde senaryo analizi gerçekleştirilmiştir. Son bölümde ise tartışma ve sonuçların yorumlanması verilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Yazın taraması yenilenebilir enerji konusunu ve BBH tekniği ile beraber inceleyen ilgili yayınlarda yapılmıştır. Sürdürülebilirlik kavramının son 10 yılda gelişmesi nedeniyle yenilenebilir enerji ile ilgili yayınlar ağırlıklı olarak son yıllarda yoğunlaşmıştır. Bulanık bilişsel haritalama ile entegre edilen yayınlar ise özellikle son 5 yılda yoğunlaşmıştır. Kaynaklar "Web of Science", "Science Direct", "Scopus" ve "Google Scholar" veri tabanlarında "bulanık bilişsel haritalama", "yenilenebilir enerji", "enerji" anahtar kelimelerini İngilizce ve Türkçe tarayarak bulunmuştur. Kaynakların incelemesi Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1'deki çalışmalara bakıldığı zaman bulanık bilişsel haritalama tekniğinin çoğunlukla tercih edildiğini gözlemleyebiliriz. Çalışmaların bir kısmında ise moleküler bulanık [7] ve sezgisel bulanık [8], [9] yöntemlerin kullanıldığını söyleyebiliriz.

Ayrıca bulanık bilişsel haritalama tekniği Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan TOPSIS [9] ve WASPAS [10] yöntemleriyle birlikte kullanılmıştır. Konu dağılımı ise şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Enerji depolama ve kullanımıyla alakalı tahminleme çalışmaları [11], [12], [13], [14]
- Sürdürülebilir enerjiye geçiş ve planlamasıyla alakalı çalışmalar [7], [10], [15], [16]
- Yenilenebilir enerji yerleşim planlaması ve kullanımıyla alakalı yapan çalışmalar [8], [9], [17], [18].

Tablo 1. İncelenen yayınların özet tablosu.

Table 1. Summary of the reviewed studies.

Yıl	Yazar(lar)	Konu	Yöntem	Senaryo analizi (+/-)	Sonuç
2025	Shen et al. [7]	İklim değişikliğinin yenilenebilir enerjiye olan negatif etkilerinin analizi	Moleküler bulanık bilişsel haritalama	-	Farklı türden yenilenebilir enerji kaynağını entegre etmek negatif etkileri azaltmak için önemli bir stratejidir.
2024	Adabavazeh et al. [14]	Gaz enerjisinde korozyonla ilişkili riskleri etkili bir şekilde yönetmek	Bulanık bilişsel haritalama	-	Bulgular, katodik koruma faktörünün korozyon üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.
2024	Dolge et al. [13]	Belediyelerdeki enerji depolama kurulumlarında etkili olan faktörleri incelemek	Bulanık bilişsel haritalama	-	Çalışma, etkili politika ve altyapı gelişimini yönlendirmek için ortak bir zemine ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.
2024	Kamali Saraji and Streimikiene [9]	Düşük karbonlu enerji geçişinin zorlukları	Sezgisel bulanık bilişsel haritalama-TOPSIS yöntemi	+	En önemli zorluk yatırımken kısa vadecilik ve reformasyon diğer önemli zorluklardır.
2024	Li et al. [11]	Saatlik enerji ihtiyacını tahminlemek	Bulanık bilişsel haritalama	-	Sunulan yöntemin etkin olduğu vaka analizi ile kanıtlanmıştır.
2023	Eftekhar et al. [15]	Sürdürülebilir enerjiye geçiş	Bulanık bilişsel haritalama	+	Şehirlerde başarılı dönüşüm, yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya eylemlerin bir kombinasyonuna dayanmalıdır.
2023	Ilbahar et al. [10]	Sürdürülebilir enerji planlaması	Bulanık bilişsel haritalama - WASPAS	+	Etkili bir enerji planlaması için daha az çaba gerektiren ve etkisi nispeten yüksek senaryolar belirlenir.
2023	Ioannou et al. [16]	Su-enerji-gıda ve sürdürülebilir kalkınma amaçları (SKA) arasındaki etkileşimin incelenmesi	Bulanık bilişsel haritalama	-	Analiz sonucunda, SKA 2 (Gıda), SKA 6 (Su) ve SKA 7 (Enerji) olmak üzere üç SKA'nın, WEF bağlantısından en çok etkilenenler olduğu gösterilmiştir.
2022	Ghaboulian et al. [17]	Rüzgar enerjisi kurulum yollarının analizi	Bulanık bilişsel haritalama	+	Bulgular, sektörün, aralarında güçlü bağlantılar bulunan ekonomik ve politik kavramların baskın olduğu altı ana faktör grubu tarafından yönetildiğini ortaya koymuştur.
2022	Poczeta et al. [12]	Enerji kullanımının tahminlenmesi	Bulanık bilişsel haritalama – yapay sinir ağları	-	Deneyler aracılığıyla, iç içe geçmiş yapının enerji talebi tahminindeki faydası gösterilmiştir.
2019	Alipour et al. [18]	Güneş enerjisi kullanımının analizi	Bulanık bilişsel haritalama	+	Senaryo analizlerinin sonucu, sektörün dış ekonomik ve politik faktörlerden derinden etkilendiğini göstermektedir.
2017	Çoban ve Onar [8]	Yenilenebilir enerji kullanımının modellenmesi	Sezgisel bulanık bilişsel haritalama	-	Simülasyon süreçleri, hükümetlerin desteğine ve uluslararası yükümlülüklerine atıfta bulunan teşviklerin ve düzenlemelerin güneş ve rüzgar enerjisi üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
2014	Kyriakarakos et al. [19]	Yenilenebilir enerji yerleşim planlaması	Bulanık bilişsel haritalama	+	Bu makalede sunulan gibi bilgi karar destek sistemleri, bir yenilenebilir enerji yatırımının tutarlı bir şekilde değerlendirilmesine yardımcı olabilir.

Öte yandan PIPRECIA veya bulanık PIPRECIA yöntemini kullananan çalışmalara bakıldığı zaman bu yöntemlerin birçok farklı ÇKKV yöntemiyle birlikte kullanıldığını gözlemleyebiliriz. Örneğin, Bakır vd. [20] PIPRECIA ile MAIRCA (MultiAttributive Ideal-Real Comparative Analysis) yöntemini havacılık sektöründe performans değerlendirmesi için kulanmıştır. Ulutaş

vd. [21] bu yöntemi gri bulanık ortamda geliştirerek OCRA (OperationalCompetitiveness Rating) yöntemi ile birleştirmiş ve personel seçiminde kullanmıştır. Xu vd. [22] ise MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking According to Compromise Solution) yöntemi ile PIPRECIA yöntemini trapezoidal aralıklı tip 2 bulanık (trapezoidal interval type-2 fuzzy) ortamda geliştirerek trafik yönetimi alanında uygulamıştır. Görçün vd. [23] ise WISP (Simple Weighted Total-Product) ile PIPRECIA yöntemlerini aralık değerli Fermatean bulanık (interval-valued Fermatean fuzzy) ortamda entegre ederek teleskopik forklift seçimi gerçekleştirmiştir. Son olarak, Alnoor vd. [24] ise CoCoSo yöntemi ile PIPRECIA yöntemini ileri bulanık (Z-cloud rough numbers fuzzy) bir ortamda ilerleterek tarım alanındaki karar verme problemleri için bilimsel yazına sunmuştur. Yazına baktığımızda, PIPRECIA ile entegre edilen ÇKKV yöntemlerinin genellikle son yıllarda geliştirilen yöntemler olduğunu söylemek mümkündür. Havacılık, personel seçimi, trafik yönetimi, teknoloji seçimi ve tarım gibi alanlarda entegre bulanık PIPRECIA-ÇKKV yöntemleri ile uygulamalar yapılmıştır, ancak yenilenebilir enerji alanında bir boşluk tespit edilmiştir. Ayrıca yazında daha önce PIPRECIA veya bulanık PIPRECIA yöntemi ile BBH yöntemini birlikte kullanan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

İncelenen çalışmalardan yola çıkarak yazında yer alan boşluklar tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirme modelini hiyerarşik olarak değerlendiren, ana faktörlerin ağırlıklarını bulanık ÇKKV yöntemlerini kullanarak hesaplayan ve faktörlerin ağırlıklandırmasında dikkate alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Senaryo analizlerini yapan çalışmalar olsa da Türkiye için farklı senaryolar altındaki yenilenebilir enerji ile ilgili faktörlerin davranışını inceleyen çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenlerle, bu çalışmada ilk kez bulanık PIPRECIA-bilişsel haritalama yöntemiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının yatırımında etkili olan faktörler arası nedensel ilişkiler incelenerek farklı senaryolar altında sistemin davranışı analiz edilmiştir. Bulanık PIPRECIA yönteminin kullanılma sebebi bu yöntemin hızlı, etkin ve tutarlı olması ve belirsizliği göz önünde bulundurmasıdır. Ayrıca bu çalışmada sunulan hiyerarşik değerlendirme modelinde ağırlıkların hesaplanmasında kullanım pratikliği sunmaktadır. BBH yöntemi ise neden sonuç ilişkilerini dikkate aldığı, belirsizliği göz önünde bulundurduğu ve sistemin simülasyonunu gerçekleştirme imkanı sunduğu için tercih edilmiştir. Öte yandan, gerçekleştirilen senaryo analizleri sayesinde yenilenebilir enerji yatırımları için sistemin davranışı incelenmiştir. Dolayısıyla, bulanık PIPRECIA ve BBH yöntemlerinin birlikte kullanımı, faktörlerin önemini hiyerarşik olarak ele alıp belirsizliği gözeterek belirlerken, aynı zamanda sistemin nedensel ilişkilerini ve senaryo bazlı davranışını analiz ederek karar süreçlerini güçlendirir.

3. Yöntem

3.1. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, Zadeh [25] tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bulanık kümelerde nesnelerin bir kümeye ait olup olmaması üyelik derecesi ile ifade edilir. Nesnelerin farklı üyelik dereceleri alması karar vermede belirsizlikle başa çıkmada yardımcı olmuştur. Dilsel terimler ise karar vermede uzmanların kendilerini nitel olarak ifade etmelerine yaramıştır. Bu sayede, yazında karar verme problemlerinde uzmanların değerlendirmelerini nicel sayılarla ifade etmek yerine kelimelerle ifade etmelerini sağlamıştır. Nitekim bu çalışmada üçlü bulanık sayılar kullanılmıştır.

Üçlü bulanık sayıların üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\mu_{\tilde{A}(x)} = \begin{cases} 0, & x < l \ \ ve\, x > u \\ \frac{(x-l)}{(m-l)}, & l \le x < m \\ \frac{(u-x)}{(u-m)}, & m \le x \le u \end{cases} \quad (1)$$

3.2. Bulanık PIPRECIA

Klasik PIPRECIA yöntemi, Stanujkic vd. [26] tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin temel avantajı, kriterlerin öneme göre önceden sıralanmadan değerlendirilmesine olanak sağlamasıdır. PIPRECIA yöntemi, geleneksel ÇKKV yöntemlerinden daha etkin ve pratik olması, daha az karşılaştırma gerektirmesi sebebiyle seçilmiştir. Bulanık PIPRECIA, belirsizlik ortamında gerçekçi sonuçlar üretmektedir. Dolayısıyla bu yöntem, tutarlı, yorumlanabilir ve güvenilir kriter ağırlıkları sağladığı için karmaşık problemler için oldukça uygundur. Bulanık PIPRECIA yöntemi aşağıda gösterilen 11 adımdan oluşur [4].

Adım 1. Uzmanlar faktörleri değerlendirmek için Tablo 2 ve Tablo 3 'te verilen bulanık dilsel ölçekleri kullanır.

Tablo 2. Bulanık dilsel ölçek 1-2 -Bulanık PIPRECIA. [4]

Table 2. Fuzzy linguistic scale 1–2 for Fuzzy PIPRECIA. [4]

Dilsel Terim	Üçlü Bulanık Sayı	Durulaştırılmış Değer
Zayıf bir şekilde daha az önemli	(0.667, 1.000, 1.000)	0.944
Orta derecede daha az önemli	(0.500, 0.667, 1.000)	0.694
Daha az önemli	(0.400, 0.500, 0.667)	0.511
Gerçekten daha az önemli	(0.333, 0.400, 0.500)	0.406
Çok daha az önemli	(0.286, 0.333, 0.400)	0.337
Baskın olarak daha az önemli	(0.250, 0.286, 0.333)	0.288
Kesinlikle daha az önemli	(0.222, 0.250, 0.286)	0.251

Kriter bir öncekinden daha önemli olduğunda, değerlendirme yapılırken Tablo 2'deki ölçek kullanılır. Karar vericilerin kriterleri değerlendirmesini kolaylaştırmak için, tablo her karşılaştırma için durulaştırılmış değeri gösterir.

Kriter bir öncekinden daha az önemli olduğunda, değerlendirme yapılırken Tablo 3'teki ölçek kullanılır.

Tablo 3. Bulanık dilsel ölçek 0-1 -Bulanık PIPRECIA. [4]

Table 3. Fuzzy linguistic scale 0–1 for Fuzzy PIPRECIA. [4]

Dilsel Terim	Üçlü Bulanık Sayı	Durulaştırılmış Değer
Neredeyse eşit değer	(1.000, 1.000, 1.050)	1.008
Biraz daha önemli	(1.100, 1.150, 1.200)	1.150
Orta derecede daha önemli	(1.200, 1.300, 1.350)	1.292
Daha önemli	(1.300, 1.450, 1.500)	1.433
Çok daha önemli	(1.400, 1.600, 1.650)	1.575
Baskın olarak daha önemli	(1.500, 1.750, 1.800)	1.717
Kesinlikle daha önemli	(1.600, 1.900 ,1.950)	1.858

Adım 2. İlk kriter hariç diğer kriterlerin r. uzman tarafından değerlendirmesi $\overline{s_j^r}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\overline{s_j^r} = \begin{cases} > \bar{1} \text{ eğer } C_j \succ C_{j-1} \text{ ise}, \\ = \bar{1} \text{ eğer } C_j = C_{j-1} \text{ ise}, \\ < \bar{1} \text{ eğer } C_j \prec C_{j-1} \text{ ise}. \end{cases} \quad (2)$$

Adım 3. $\overline{k_j}$ katsayısının değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\overline{k_j} = \begin{cases} = \bar{1} \text{ eğer } j = 1 \text{ ise}, \\ 2 - \overline{s_j} \text{ eğer } j > 1 \text{ ise}. \end{cases} \quad (3)$$

Adım 4. Bulanık ağırlık $\overline{q_j}$ değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\overline{q_j} = \begin{cases} = \bar{1} \text{ eğer } j = 1 \text{ ise}, \\ \frac{\overline{q_{j-1}}}{\overline{k_j}} \text{ eğer } j > 1 \text{ ise}. \end{cases} \quad (4)$$

Adım 5. Faktörlerin göreceli ağırlıkları ($\overline{w_j}$) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\overline{w_j} = \frac{\overline{q_j}}{\sum_{j=1}^{n} \overline{q_j}}. \quad (5)$$

Aşağıdaki adımlarda, bulanık PIPRECIA yönteminin ters metodolojisinin uygulanması gerekir [4].

Adım 6. Yukarıda tanımlanan uygulama ölçeğinin değerlendirilmesinin gerçekleştirilmesi bu sefer sondan bir önceki kriterden başlanarak yapılır. $\overline{s_j^{r\prime}}$, r. karar vericinin kriterleri değerlendirmesini ifade eder:

$$\overline{s_j^{r\prime}} = \begin{cases} > \bar{1} \text{ eğer } C_j \succ C_{j+1} \text{ ise}, \\ = \bar{1} \text{ eğer } C_j = C_{j+1} \text{ ise}, \\ < \bar{1} \text{ eğer } C_j \prec C_{j+1} \text{ ise}. \end{cases} \quad (6)$$

Adım 7. $\overline{k_j}'$ katsayısının değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\overline{k_j}' = \begin{cases} = \bar{1} \text{ eğer } j = n \text{ ise}, \\ 2 - \overline{s_j}' \text{ eğer } j > n \text{ ise}. \end{cases} \quad (7)$$

n, kriter sayısını ifade etmektedir.

Adım 8. Bulanık ağırlık $\overline{q_j}'$ değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\overline{q_j}' = \begin{cases} = \bar{1} \text{ eğer } j = n \text{ ise}, \\ \frac{\overline{q_{j+1}\prime}}{\overline{k_j}'} \text{ eğer } j > n \text{ ise}. \end{cases} \quad (8)$$

Adım 9. Faktörlerin göreceli ağırlıkları ($\overline{w_j}'$) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\overline{w_j}' = \frac{\overline{q_j}'}{\sum_{j=1}^{n} \overline{q\prime_j}}. \quad (9)$$

Adım 10. Kriterlerin nihai ağırlıklarını belirlemek için, öncelikle wj ve wj′ bulanık değerlerinin durulaştırılması gerekir:

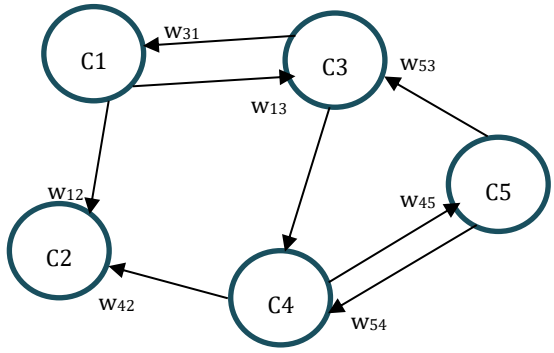
$$\overline{w_j}'' = \frac{1}{2}(\overline{w_j} + \overline{w_j}') \quad (10)$$

Adım 11. Spearman ve Pearson korelasyon katsayılarını uygulayarak elde edilen sonuçların kontrol edilmesi gereklidir.

3.3. Bulanık Bilişsel Haritalar

BBH metodolojisi, karmaşık sistemlerin tanımlanması ve modellenmesi için sembolik bir temsildir. Bazı çalışmalar [2], [3], bilişsel haritanın kavramları için bulanık değerler ve kavramlar arasındaki bulanık ilişki derecelerini dikkate alarak bilişsel haritaların gücünü artırdı. Bu öncü çalışmadan sonra, BBH birçok alandan bilim insanının dikkatini çekti ve çeşitli bilimsel problemlerde kullanıldı [27].

Bir sistemin işleyişi ve davranışı hakkında yıllarca biriktirilen bilgi, BBH kullanılarak yeterince açıklanabilir. Şekil 2, beş kavramdan (C1 ila C5) ve ilgili ağırlıklardan (wji) (kavramlar arasındaki neden-sonuç ilişkileri) oluşan bir BBH'ın grafiksel bir temsilini göstermektedir [28].



Şekil 2. Örnek bir bulanık bilişsel harita.

Figure 2. An example of a fuzzy cognitive map.

BBH metodolojisinde, iki kavram (C_j ve C_i) arasındaki neden-sonuç bağlantısı, -1 ile 1 aralığında bir değer alır ve bu değer w_{ji} ifadesi ile tanımlanır. Üç olası nedensel ilişki türü vardır:

- $w_{ji} > 0$ C_j ve C_i arasında pozitif nedensellik olduğunu gösterir,
- $w_{ji} < 0$ C_j ve C_i arasında negatif nedensellik olduğunu gösterir,
- $w_{ji} = 0$ C_j ve C_i arasında ilişki olmadığını gösterir.

Adım 1. Kavram düğümleri belirlenir, tanımlanır ve i = 1, 2, . . . , N ile C_i olarak gösterilir.

Bu çalışmada, kavramlar yenilenebilir enerji yatırımını etkileyen faktörlerdir.

Adım 2. Uzmanlar, kavramlar arasındaki nedensel bağlantıların yönünü belirlemek için üç kategori kullanır: pozitif, negatif ve sıfır. Bilişsel harita, nedensel ilişkileri gösteren kavram düğümlerini ve okları içerir.

Adım 3. Uzmanlar, ilişkilerin ağırlıklarını değerlendirmek için Tablo 4'te verilen dilsel terimleri kullanırlar.

Tablo 4. Bulanık dilsel ölçek-Bulanık Bilişsel Haritalama. [29]

Table 4. Fuzzy linguistic scale for Fuzzy Cognitive Mapping. [29]

Dilsel Terim	Üçlü Bulanık Sayı
Çok çok düşük (ÇÇD)	(0,0.1,0.2)
Çok düşük (ÇD)	(0.1,0.2,0.35)
Düşük (D)	(0.2,0.35,0.5)
Orta (O)	(0.35,0.5,0.65)
Yüksek (Y)	(0.5,0.65,0.8)
Çok yüksek (ÇY)	(0.65,0.8,0.9)
Çok çok yüksek (ÇÇY)	(0.8,0.9,1)

Adım 4. Uzmanların değerlendirmeleri, bulanık ağırlıkların aritmetik ortalaması kullanılarak toplanır.

Adım 5. Merkez noktası yöntemi, niteliklerin bulanık ağırlıklarını sayısallaştırmak için kullanılır. Üçgensel bulanık sayının

$\widetilde{A}$=(*l,m,u*), En İyi Bulanık Olmayan Performansı-The Best Non-fuzzy Performance (BNP) değeri hesaplanır [30]:

$$BNP_i = \frac{[(u_i - l_i) + (m_i - l_i)]}{3} + l_i, \ \forall_i \quad (11)$$

Adım 6. Her simülasyon adımında, kavram C_i'nin A_i değeri, aşağıdaki kurala göre belirli kavram C_j üzerindeki diğer kavram C_i''lerin etkisinin hesaplanmasıyla hesaplanır [28]:

$$A_i^{(k+1)} = f(A_i^{(k)} + \sum_{j \neq i}^{N} A_j^{(k)} \ . \ w_{ji}) \quad (12)$$

burada $A_i^{(k+1)}$, k + 1 simülasyon adımında kavram C_i 'nin değeridir, burada $A_j^{(k)}$, k simülasyon adımında kavram C_j nin değeridir, w_{ji} C_j kavramından C_i kavramına olan bağlantının ağırlığıdır ve f, bir sigmoid eşik fonksiyonudur [28]:

$$f = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}} \quad (13)$$

burada $\lambda > 0$, dikliğini belirleyen bir parametredir.

4. Vaka Çalışması

4.1. Problem Tanımı

Bu bölümde, Türkiye için yenilenebilir enerji yatırımlarında etkili olan faktörlerin analizi yapılmıştır. REN21'in 2024 yılında yayınladığı rapora göre [5]:

- Yenilenebilir enerjiye yapılan küresel yatırım ve dağıtım, yüksek faiz oranlarına ve hammaddelerin daha yüksek maliyetlerine rağmen 2023'te tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaştı.
- Küresel olarak, yenilenebilir enerji 2023'te elektriğin %30'unu, ısının %10'unu ve yakıtın %3,5'ini sağladı.
- 2030 yılına kadar 11 TW'lik küresel hedefe ulaşmak için küresel yenilenebilir kapasite eklemelerinin yılda yaklaşık 1 teravat (TW) seviyesine ulaşması gerekiyor.
- Yenilenebilir enerjiye ve teknoloji üretimine yatırım, esas olarak güneş ve PV pillerde olmak üzere 2023'te %70 arttı.
- 2023'te 24 ülke, elektrik tedarikinde yenilenebilir enerjinin payına ilişkin hedeflerini güncelledi.

Küresel olarak yenilenebilir enerji yatırımlarının bu denli önemli olduğu bir ortamda Türkiye özelinde bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ana faktörlerin ağırlıkları bulanık PIPRECIA yöntemi ile hesaplanmıştır. Faktörler arası doğrudan veya dolaylı, pozitif veya negatif etkiler etkileşimlerin modellenmesi için ise BBH yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada değerlendirme modelinin oluşturulmasında ve değerlendirilmesinde enerji alanında deneyimli uzmanların görüşlerinden faydalanılmıştır. Uzmanların bilgileri Tablo 5'te verilmiştir.

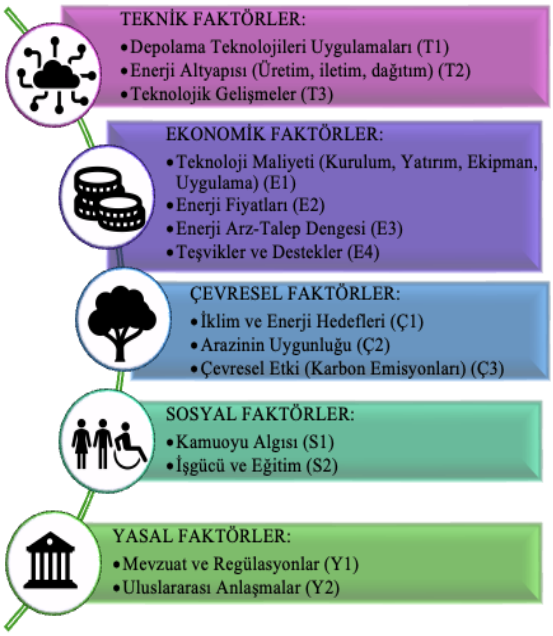
Yenilenebilir enerji yatırımlarını etkileyen temel faktörler belirlenirken yazın taramasından, endüstri raporlardan ve uzman görüşlerinden faydalanılmıştır. Değerlendirme modelinde Şekil 3'te görüldüğü gibi teknik, ekonomik, çevresel, sosyal ve yasal ana faktörleri altında 14 adet faktör yer almaktadır. Belirlenen faktörlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir [13], [9], [8], [19], [31], [5]:

- **Depolama Teknolojileri Uygulamaları (T1):** Enerji üretiminde dalgalanmaları dengelemek ve arz güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan batarya sistemleri, hidrojen depolama, pompa depolamalı hidroelektrik gibi çözümleri göz önünde bulundurmak gerekir.
- **Enerji Altyapısı (Üretim, iletim, dağıtım) (T2):** Yenilenebilir enerji yatırımlarında mevcut enerji altyapısının modernizasyonu, akıllı şebekeler, mikro şebekeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu önemlidir.

Tablo 5. Uzmanların bilgileri.

Table 5. Information about the experts.

No	Konum	Uzmanlık Alanları	Deneyim	Özel/kamu
U1	CEO	Enerji Politikası;Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, Ekonomi /Finans;Petrol Endüstrisi, Elektrik Sektörü, Karbonsuzlaşma, Sürdürülebilirlik, Yeni Enerji Teknolojileri	6 yıl ve üzeri	Özel
U2	Yönetici	Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, Sürdürülebilirlik	6 yıl ve üzeri	Özel
U3	Akademisyen	Enerji Politikası, Yenilenebilir Enerji, Karbonsuzlaşma, Sürdürülebilirlik, Yeni Enerji Teknolojileri	6 yıl ve üzeri	Kamu



Şekil 3. Değerlendirme modeli.

Figure 3. Evaluation model.

- **Teknolojik Gelişmeler (T3):** Yeni enerji üretim teknolojileri (örneğin perovskit güneş hücreleri, küçük modüler nükleer reaktörler), otomasyon, yapay zekâ destekli enerji yönetimi sistemleri yapılacak olan yatırımların verimliliğini ve etkinliğini etkiler.
- **Teknoloji Maliyeti (Kurulum, Yatırım, Ekipman, Uygulama) (E1):** Kurulum, bakım, ekipman ve işletme maliyetleri; maliyetlerin zamanla düşmesi yatırım kararlarını etkiler.

- **Enerji Fiyatları (E2):** Elektrik ve fosil yakıt fiyatları, yeni yatırımların ekonomik fizibilitesini doğrudan etkiler.
- **Enerji Arz-Talep Dengesi (E3):** Bölgesel veya ulusal bazda enerji tüketimi ile üretim arasındaki ilişki, arz güvenliği açısından kritiktir.
- **Teşvikler ve Destekler (E4):** Devletin sağladığı finansal destekler (vergi indirimleri, sübvansiyonlar, alım garantileri), yatırımları teşvik eder.
- **İklim ve Enerji Hedefleri (Ç1):** Paris Anlaşması gibi uluslararası taahhütler kapsamında karbon nötr hedeflerine ulaşma çabaları yatırım kararlarında etkin rol oynamaktadır.
- **Arazinin Uygunluğu (Ç2):** Enerji tesislerinin kurulacağı alanların jeolojik, iklimsel ve ekolojik uygunluğu temel unsurlardan biridir.
- **Çevresel Etki (Karbon Emisyonları) (Ç3):** Karbon emisyonları, su kullanımı, doğal yaşam üzerindeki etkiler gibi çevresel değerlendirmeler ve sürdürülebilirlik konusunda alınması gereken önlemlere duyulan ihtiyaç önemlidir .
- **Kamuoyu Algısı (S1):** Yenilenebilir enerjiye olan güven, nükleer enerjiye karşı tutum, projelere yönelik toplumsal kabul yatırım kararlarında etkilidir.
- **İşgücü ve Eğitim (S2):** Nitelikli iş gücü bulunabilirliği, eğitim programlarının mevcudiyeti ve mesleki yeterlilik düzeyi gereklidir.
- **Mevzuat ve Regülasyonlar (Y1):** Lisans süreçleri, çevre izinleri, enerji piyasası düzenlemeleri gibi yasal çerçevelerin geliştirilmesi kararlarda etkin bir rol oynar.
- **Uluslararası Anlaşmalar (Y2):** Enerji üretimi ve emisyonlarla ilgili küresel sorumluluklar, sınır ötesi enerji iş birlikleri destekleyici bir unsurdur.

4.2. Çalışmanın Adımları ve Veri Toplama

Mevcut çalışmada, Türkiye'nin yenilenebilir enerji geçişine doğru ilerlemesini araştırmak için entegre bulanık PIPRECIA-BBH yaklaşımı uygulanmıştır. Çalışmanın adımları şu şekildedir:

1. Adım. Yenilenebilir enerji geçişine yönelik faktörleri literatür taraması, endüstriyel raporlar ve uzmanlara danışarak bulmak,

2. Adım. Uzmanlardan ana faktörleri bulanık kümeler altında değerlendirmelerini istemek,

3. Adım. Uzmanların görüşlerini entegre ederek bulanık PIPRECIA ile ana faktörlerin ağırlıklarını belirlemek,

4. Adım. Uzmanlardan bulanık kümeler altında zihin haritalarını çizmelerini istemek,

5. Adım. Bireysel haritaları entegre etmek ve FCMapper ile toplu bulanık haritaların sonucunda faktörlerin özelliklerini belirlemek,

6. Adım. Faktörlerin ağırlıklarını ana faktör ağırlıklarını hesaba katarak belirlemek,

7. Adım. Türkiye örneği için senaryo planlamak,

8. Adım. Türkiye'nin farklı senaryolar altındaki davranışını değerlendirmek.

İlk adımda yapılan çalışma bir önceki bölümde verilmiştir. Bu bölümde çalışmanın 2. adımında ve 4. adımında gerçekleştirilen veri toplama bölümü özetlenecektir.

2. ve 4. Adım: Veri toplamak için uzmanlara çevrim içi anket gönderilerek öncelikle Tablo 2 ve Tablo 3'teki dilsel terimleri kullanarak ana faktörlerin değerlendirmelerini yapmaları sonrasında ise verilen alt faktörler ile bulanık zihin haritalarını Tablo 4'teki dilsel terimleri kullanarak oluşturmaları istenmiştir.

4.3. Faktörlerin Sıralanması

Mevcut çalışmada, Türkiye'nin yenilenebilir enerji geçişine doğru ilerlemesini araştırmak için entegre bulanık PIPRECIA-BBH yaklaşımı uygulanmıştır. İlk olarak ana faktörlerin ağırlıkları bulanık PIPRECIA yöntemi ile hesaplanmıştır. Uzmanların bulanık PIPRECIA ve ters bulanık PIPRECIA yöntemi için yaptığı değerlendirmeler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Uzmanların ana faktör değerlendirmesi.

Table 6. Experts' evaluations of the main factors.

	U1	**U2**	**U3**
Teknik	-	-	-
Ekonomik	Orta derecede daha az önemli	Zayıf bir şekilde daha az önemli	Daha az önemli
Çevresel	Daha az önemli	Daha az önemli	Orta derecede daha az önemli
Sosyal	Gerçekten daha az önemli	Daha az önemli	Daha az önemli
Yasal	Daha az önemli	Gerçekten daha az önemli	Daha az önemli
	U1	**U2**	**U3**
Yasal	-	-	-
Sosyal	Biraz daha önemli	Baskın olarak daha önemli	Biraz daha önemli
Çevresel	Neredeyse eşit değer	Neredeyse eşit değer	Biraz daha önemli
Ekonomik	Baskın olarak daha önemli	Baskın olarak daha önemli	Çok daha önemli
Teknik	Biraz daha önemli	Neredeyse eşit değer	Biraz daha önemli

*3. Adım. Bölüm 3.2.'*de verilen bulanık PIPRECIA yönteminin adımları uygulanarak ana faktörlerin ağırlıkları Tablo 7'deki gibi bulunmuştur.

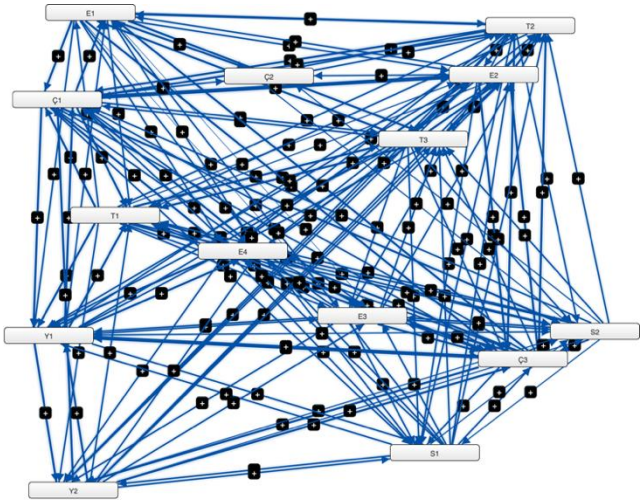
Tablo 7. Ana faktör ağırlıkları.

Table 7. Weights of the main factors.

	PIPRECIA (*w*)	**Ters PIPRECIA (*w*)**	**Ağırlıklar**	**Normalize Ağırlıklar**
Teknik	0.24	0.27	0.25	0.182
Ekonomik	0.20	0.73	0.47	0.334
Çevresel	0.19	0.25	0.22	0.159
Sosyal	0.17	0.30	0.24	0.170
Yasal	0.19	0.24	0.22	0.156

Tablo 7'den de görüldüğü üzere en önemli ana faktör 0.334 ile ekonomik faktörler bulunmuştur. İkinci sırada ise 0.182 ile teknik faktörler gelmektedir. Sosyal, çevresel ve yasal faktörler ise üçüncü, dördüncü ve beşinci olarak sıralanmaktadır.

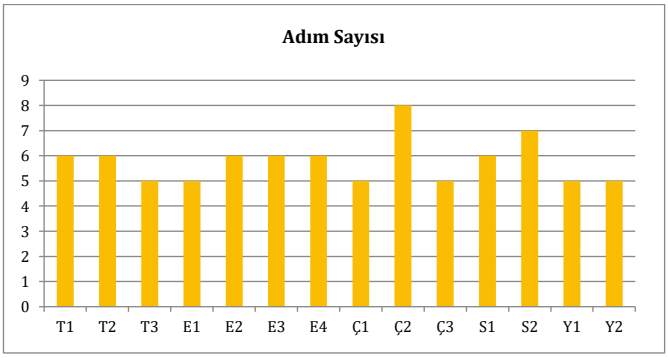
4. Adım. Bulanık BBH yönteminde ilk olarak uzmanlardan alınan bulanık zihin haritaları entegre edilmiştir. Şekil 4'te entegre edilen haritanın Mental Modeler ile görselleştirilen hali verilmiştir.



Şekil 4. Entegre BBH.

Figure 4. Integrated fuzzy cognitive map.

5. Adım. Bölüm 3.3.'te verilen BBH yönteminin adımları FCMapper ile uygulanarak faktörlerin özellikleri belirlenmiştir. Çözümü bulmak için FCMapper yazılımında entegre matris kullanılır. 20 yinelemeden sonra simülasyon tamamlanır ve tüm değişkenler sabitlenir ve sabit bir noktaya yakınsar. Sabit bir durum oluşturmak için gereken adım sayısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Adım sayısı.

Figure 5. Number of iterations.

Tablo 8'de faktörlerin derece dışı, iç derece, merkezilik değerleri, ve sıralamaları listelenmiştir.

Eşik fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu, fonksiyon değerlerinin aralığını [0,1] ile sınırlar. 150 bağlantı ve 14 kavram modeli oluşturur. Hesaplanan yoğunluk endeksi 0.765 olarak ortaya çıkar. Tüm faktörler sıradandır, alıcı veya verici faktör yoktur. Bir faktörün iç derece değeri, derece dışı değeri ve merkezilik değeri şu şekilde özetlenebilir:

- Bir düğümün iç derece değeri, son durumdaki kararlılığını veya etkisini gösterir. Yüksek iç derece değerine sahip bir düğüm, diğer düğümlere oldukça bağımlıdır ve onlardan büyük ölçüde etkilenir.
- Yüksek derece dışı değerine sahip bir düğüm, diğer düğümleri etkiler, birçok çıktısı vardır ve durumunu korumak için diğer düğümlere o kadar güvenmez. Daha yüksek derece dışı kavramları durum değişikliklerine daha yatkındır.
- Toplam derece değeri veya merkezilik, derece dışı ve iç derece değerlerinin çarpımıdır. Ayrıca bir düğümün göreceli önemi, merkezilik değeri kullanılarak belirlenebilir.

BBH yönteminin sonucunda merkezilik değerine göre faktörleri sıraladığımızda en önemli faktör "İklim ve Enerji Hedefleri (Ç1)", en önemli ikinci ve üçüncü faktörler ise sırasıyla "Enerji Altyapısı (Üretim, iletim, dağıtım) (T2)" ve "Çevresel Etki (Karbon Emisyonları) (Ç3)" olarak bulunmuştur. Diğer düğümlere oldukça bağımlı olan ve onlardan büyük ölçüde etkilenen faktörlere baktığımız zaman ise "Enerji Altyapısı (Üretim, iletim, dağıtım) (T2)" ilk sırada gelmektedir. Diğer düğümleri etkileyen faktörlere baktığımızda ise "İklim ve Enerji Hedefleri (Ç1)" ilk sıradadır. Dolayısıyla diğer faktörleri en çok etkileyen faktör konumundadır.

Tablo 8. BBH yönteminin sonuçları.

Table 8. Results of the fuzzy cognitive mapping method.

Faktörler	Derece Dışı Değer	İç Derece Değeri	Merkezilik Değeri	Sıra
T1	8.23	8.23	16.47	6
T2	9.35	10.13	19.48	2
T3	7.70	7.70	15.40	8
E1	7.57	6.67	14.23	11
E2	8.20	8.20	16.40	7
E3	6.92	6.92	13.83	12
E4	8.92	8.92	17.83	4
Ç1	9.95	9.95	19.90	1
Ç2	1.35	2.90	4.25	14
Ç3	9.53	9.53	19.07	3
S1	7.08	7.22	14.30	10
S2	6.18	6.30	12.48	13
Y1	8.87	8.08	16.95	5
Y2	7.70	6.80	14.50	9

6. Adım. Faktörlerin merkezi değerine göre belirlenen ağırlıkları bulanık PIPRECIA ile belirlenen ana faktör ağırlıkları ile çarpılarak güncellenmiştir. Tablo 9'da güncel faktör ağırlıkları ve Şekil 6'da faktörlerin sıralamalarındaki değişimler verilmiştir.

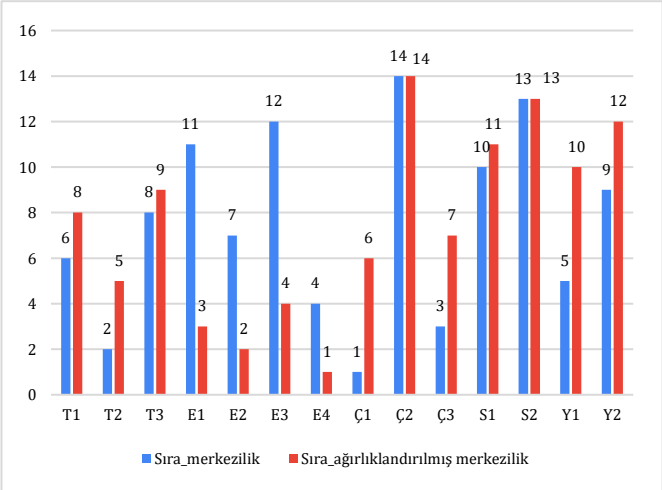
Tablo 9. Güncel faktör ağırlıkları.

Table 9. Updated factor weights.

Faktörler	Merkezilik	Sıra_merkezilik	Ağırlıklandırılmış merkezilik	Sıra_ağırlıklandırılmış merkezilik
T1	16.47	6	3.002	8
T2	19.48	2	3.552	5

Tablo 9 (devam)

T3	15.40	8	2.808	9
E1	14.23	11	4.750	3
E2	16.40	7	5.473	2
E3	13.83	12	4.617	4
E4	17.83	4	5.952	1
Ç1	19.90	1	3.159	6
Ç2	4.25	14	0.675	14
Ç3	19.07	3	3.027	7
S1	14.30	10	2.424	11
S2	12.48	13	2.116	13
Y1	16.95	5	2.639	10
Y2	14.50	9	2.258	12



Şekil 6. Ağırlıklandırılmış faktör sıralaması.

Figure 6. Weighted ranking of factors.

Şekil 6'dan da anlaşıldığı gibi ana faktörlerin ağırlıklarını hesaba katmak modelin çıktılarını etkilemiştir. Güncel durumda "Teşvikler ve Destekler (E4)" en önemli faktör iken, "Enerji Fiyatları (E2)" ikinci önemli faktör ve "Teknoloji Maliyeti (Kurulum, Yatırım, Ekipman, Uygulama) (E1)" üçüncü önemli faktör olmuştur.

5. Senaryo Analizi

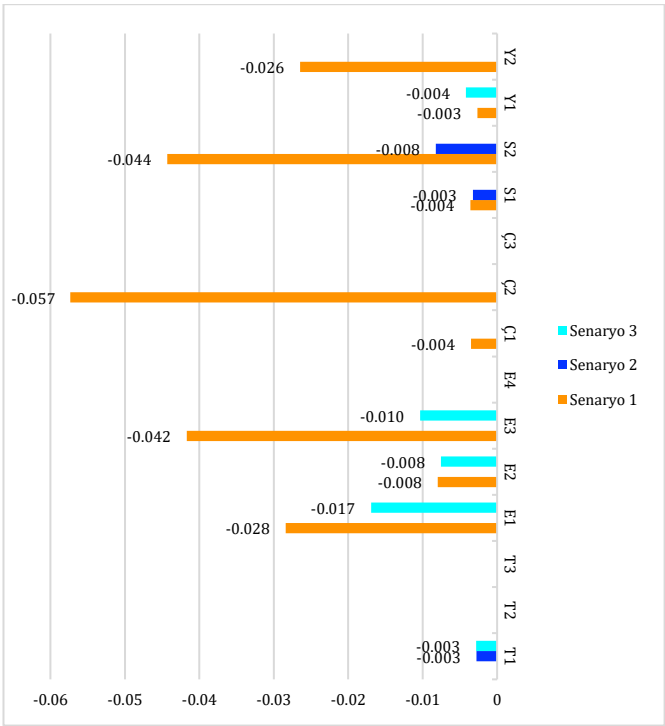
Bu bölümde sistemin teşvik artışı veya kur dalgalanması gibi değişimlere gösterdiği dinamik tepkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Simülasyon yoluyla sistemin davranışı analiz edilmiştir.

7. Adım. Türkiye için örnek senaryolar şu şekilde planlanmıştır:

- **Senaryo 1 - Yüksek Teknoloji Kötümserliği:** Bu senaryoda teknoloji odaklı küçülme modellenerek kötümser bir yaklaşım incelenmiştir. Bu senaryoda teknik faktörler engelleyici rol oynamaktadır. Bu sebeple T1, T2 ve T3'ün başlangıç değerleri -1 olarak değiştirilmiştir.
- **Senaryo 2 - Ekonomik Belirsizlik ve Regülasyon Baskısı:** Bu senaryoda küresel enerji krizleri, ekonomik dalgalanmalar ve sıkı yasal düzenlemeler baskın unsurlardır. E2 ve E3 değişken ve baskılayıcıdır (fiyatlar artar, arz-talep dengesiz). Y1 ve Y2 daha katı hale gelir, yatırım ortamını zorlaştırır. E1 yükselir, E4 ise azalır. E1, E2, Y1 ve Y2'nin başlangıç değeri 1, E3 ve E4'ün başlangıç değeri ise -1 olarak değiştirilmiştir.
- **Senaryo 3 - Kötümser Sürdürülebilirlik ve Toplumsal Katılım:** Bu senaryoda çevresel kaygılar ve sosyal faktörler yön vericidir; kamuoyu baskısı, eğitim ve istihdam gibi sosyal faktörlerle sürdürülebilirlik birleşir. Ç1, Ç2 ve Ç3 çok yüksek öneme sahiptir. S1 ve S2 (kamuoyu ve işgücü) aktif ve destekleyicidir. Ç1, Ç2, Ç3 -1 olarak, S1 ve S2 ise 1 olarak değiştirilmiştir.

8. Adım. Türkiye'nin farklı senaryolar altındaki davranışları FCMapper ile hesaplanmıştır. Bu senaryoların sonuçları Şekil 7'da gösterilmektedir.

Senaryoların sonuçlarına bakıldığı zaman yenilenebilir enerji sistemlerinin olası davranışlarını özetleyebiliriz. Şekil 7'de üç farklı senaryo altında faktörlerin değerlerindeki değişimler yatay çubuk grafiği ile gösterilmektedir. Senaryo 1'de çoğu değişkenin diğer senaryolara kıyasla daha negatif değerlere sahip olduğu görülmektedir. Tüm değişkenlerde belirgin negatif etkilerin gözlemlenmesi bu senaryonun sistem açısından en riskli senaryo olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle Arazinin Uygunluğu (Ç2), İşgücü ve Eğitim (S2) ve Enerji Arz-Talep Dengesi (E3) teknoloji kötümserliği senaryosundan sırasıyla 0.057, 0.044, 0.043 azalma ile çok büyük oranda olumsuz etkilenmiştir. Senaryo 2'ye baktığımız zaman, Senaryo 1'e göre sistemin çok daha düşük seviyede tepki verdiğini ve daha dengeli olduğunu gözlemleyebiliriz. Bu senaryoda ekonomik belirsizlik ve regülasyon baskısından en çok etkilenen faktör, 0.008 azalmayla İşgücü ve Eğitim (S2) olmuştur. Senaryo 3'te ise Senaryo 2'ye göre daha fazla faktör etkilenmiştir. Sürdürülebilirliğin kötümser olduğu ancak toplumsal katılımın yüksek olduğu bu senaryoda ise en olumsuz etkilenen faktör 0.017 azalma ile Teknoloji Maliyeti (Kurulum, Yatırım, Ekipman, Uygulama) (E1) olmuştur.



Şekil 7. Senaryo analizi.

Figure 7. Scenario analysis.

6. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımları etkileyen temel belirleyicileri açıklamak için bulanık PIPRECIA ve bilişsel haritalama metodolojilerini birleştiren yeni bir metodoloji kullanılmıştır. Çalışmada, yenilenebilir enerji değerlendirme modeli için 14 faktör belirlenip kategorize edilerek bunların nasıl etkileşime girdiği ve sistemin farklı durumlarda nasıl dinamik olarak yanıt verdiği gösterilmiştir. Bulgulara göre, teşvikler ve destekler en önemli faktördür, enerji fiyatları ikinci önemli faktördür ve teknoloji maliyeti üçüncü önemli faktördür. Bu bulgular ışığında, hükümetlerin yenilenebilir enerjiye yatırımları artırmak için teşvik mekanizmalarını çeşitlendirmesi ve enerji piyasalarındaki fiyat dalgalanmalarına karşı koruyucu politikalar geliştirmesi önerilmektedir.

Çalışmanın sonuçları yazındaki bazı çalışmaların sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Örneğin, Eftekhar et al. [15]'ın çalışmasındaki Senaryo B'nin sonuçları, güncel kentsel sorunlar hakkında eğitim, bilgi ve farkındalığın, yerel girişimlerin güçlenmesine ve özellikle yenilenebilir enerjiyle ilgili işletmelerin çekilmesi açısından yerel ekonominin iyileşmesine yol açabileceğini göstermektedir. Senaryo 3'te bulduğumuz sonuçlara göre ekonomik belirsizlik ve regülasyon baskısından en çok etkilenen faktörün işgücü ve eğitim olduğunu gözlemlemiştik. Öte yandan, Alipour et al. [18]'nın çalışmasının bulgularına göre güneş enerjisi, yüksek merkeziliğe sahip olan devlet yatırımına ve benzer diğer parametrelere dayanmaktadır. Bulgularımızda da teşvikler ve desteklerin en önemli faktör olarak öne çıkması, yenilenebilir enerjiye geçişin piyasa dinamiklerinden bağımsız olarak politika yapıcıların stratejik müdahaleleriyle hızlandırılabileceğini göstermektedir. Kamali Saraji and Streimikiene [9] 'ye göre en iyi senaryo, karar vericilerin politika yapımında teknolojik gelişmeyi ve insanların ihtiyaçlarını aynı anda dikkate almaları gerektiğini gösteren düet senaryodur; ancak, insanların ihtiyaçlarını karşılamak politika yapımında daha önemlidir, çünkü "önce insanlar" olarak adlandırılan senaryo ikinci sırada yer almaktadır. Bunun da ötesinde, en etkili kavram "yatırım"dır ve bu da finansal yatırımın düşük karbonlu bir enerji geçişi geliştirmede oyun değiştirici bir zorluk olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, yüksek enerji fiyatları, tüketicileri ve yatırımcıları alternatiflere yönlendirirken, devletin sağladığı teşvikler bu geçişi daha cazip hale getirerek teknoloji maliyetlerinin yarattığı başlangıç engelini aşmalarına yardımcı olmaktadır. Nitekim, bu sonuçlar bu çalışmanın senaryo analizlerinin sonucuyla paralellik göstermektedir.

Bu çalışma, literatürdeki büyük bir boşluğu kapatmakta ve yenilenebilir enerji sektöründe çalışan akademisyenlere, yöneticilere ve politika yapıcılara yararlı bilgiler sunmaktadır. Teorik katkılarının ötesinde, bu araştırmanın Türkiye'deki yenilenebilir enerji sektöründe gelecekteki yatırım planlaması ve stratejik karar alma için pratik çıkarımları vardır. Bu nedenle de bölgedeki enerji uygulamalarının sürdürülebilirliğini iyileştirmek için daha fazla araştırma ve görüşme için bir temel sağlamaktadır.

Her çalışmada olduğu gibi bu çalışmanın da kısıtları vardır. Öncelikle, çalışmanın bulguları, uzman görüşlerine güvenilmesi ve bulanık PIPRECIA ve bilişsel haritalama metodolojilerinde yer alan nitel değerlendirmelerin öznel doğası nedeniyle kısıtlanmış olabilir. Ek olarak, yenilenebilir enerji teknolojilerinin ve piyasa koşullarının hızla gelişen manzarası, sonuçların zaman içinde uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Örneğin, yenilenebilir enerji alanında ileri güneş panelleri, enerji depolama çözümleri ve akıllı şebeke teknolojisi gibi ortaya çıkan teknolojiler üzerine devam eden araştırmalar, bu teknolojilerin yatırım kararları üzerindeki potansiyel etkileri konusunda ışık tutabilir. Gelecekteki araştırmalar, nicel yöntemleri dahil ederek ve verileri güncel eğilimleri yansıtacak şekilde sürekli güncelleyerek bu sınırlamaları ele almalıdır. Gelecek çalışmalarda yenilenebilir enerji yatırımları ile ulaşım, tarım ve kentsel gelişim gibi diğer sektörler arasındaki kesişimler incelenerek, genel sürdürülebilirlik sonuçlarını iyileştirebilecek sinerjiler belirlenebilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmadaki modelin doğrulanması ve değerlendirilmesine değerli katkılarından dolayı Nynas şirketi CEO'su değerli Güney Devrim İldiri'ye teşekkürlerimizi sunarız. Makalenin kalitesini artıran değerli yorum ve önerileri için editöre ve isimsiz hakemlere içtenlikle teşekkür ederiz.

Bu çalışma, Galatasaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından FBA-2024-1252 numaralı hibe kapsamında desteklenmiştir.

Yazar katkılarının beyanı

Merve Güler: Fikir oluşturma, yazın taraması, model oluşturma, metodoloji, veri toplama ve derleme, analizlerin gerçekleştirilmesi, görselleştirme, orijinal taslak yazımı, inceleme ve düzenleme.

Üretken yapay zeka beyanı

Bu çalışmada üretken yapay zekâ araçları kullanılmamıştır.

Kaynaklar

[1] International Energy Agency (IEA). Global Energy Review 2025. 2025. Available from: www.iea.org.
[2] Kosko B. Fuzzy cognitive maps. Int J Man Mach Stud 1986;24(1):65-75.
[3] Kosko B, Burgess JC. Neural networks and fuzzy systems. Acoustical Society of America; 1998.
[4] Stević Ž, Stjepanović Ž, Božičković Z, Das DK, Stanujkić D. Assessment of conditions for implementing information technology in a warehouse system: A novel fuzzy PIPRECIA method. Symmetry (Basel) 2018;10(11). doi:10.3390/sym10110586.
[5] REN21. Renewables Global Status Report. 2024.
[6] TÜİK. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları. Available from: https://sdg.tuik.gov.tr/7-2-1/ [Accessed 1 May 2025].
[7] Shen Y, Liu W, Dinçer H, Yüksel S. Hybrid molecular fuzzy recommender systems for impact of climate change on renewable energy performance. Renew Energy 2025;245. doi:10.1016/j.renene.2025.122799.
[8] Çoban V, Onar SÇ. Modeling renewable energy usage with hesitant Fuzzy cognitive map. Complex & Intelligent Systems 2017;3(3):155-166. doi:10.1007/s40747-017-0043-y.
[9] Kamali Saraji M, Streimikiene D. An analysis of challenges to the low-carbon energy transition toward sustainable energy development using an IFCM-TOPSIS approach: A case study. Journal of Innovation and Knowledge 2024;9(2). doi:10.1016/j.jik.2024.100496.
[10] Ilbahar E, Kahraman C, Cebi S. Evaluation of sustainable energy planning scenarios with a new approach based on FCM, WASPAS and impact effort matrix. Environ Dev Sustain 2023;25(10):11931-11955. doi:10.1007/s10668-022-02560-8.
[11] Li S, Wang J, Zhang H, Liang Y. Enhancing hourly electricity forecasting using fuzzy cognitive maps with sample entropy. Energy 2024;298. doi:10.1016/j.energy.2024.131429.
[12] Poczeta K, Papageorgiou EI. Energy Use Forecasting with the Use of a Nested Structure Based on Fuzzy Cognitive Maps and Artificial Neural Networks. Energies (Basel) 2022;15(20). doi:10.3390/en15207542.
[13] Dolge K, Gravelsins A, Vicmane LK, Blumberga A, Blumberga D. What drives energy storage deployment in local energy transitions? Stakeholders' perspective. Smart Energy 2024;15. doi:10.1016/j.segy.2024.100146.
[14] Adabavazeh N, Nikbakht M, Amindoust A, Hassanzadeh-Tabrizi SA. The identification and analysis of pivotal factors influencing the corrosion of

natural gas pipelines using fuzzy cognitive map. Eng Fail Anal 2024;166. doi:10.1016/j.engfailanal.2024.108806.
[15] Eftekhar A, Dero QY, Esfehani AZ. Sustainable Energy Transition for Cities Based on Long-Term Planning Supported by a Fuzzy Cognitive Map. Pollution 2023;9(4):1880-1894. doi:10.22059/poll.2023.360531.1940.
[16] Ioannou AE, Laspidou CS. Cross-Mapping Important Interactions between Water-Energy-Food Nexus Indices and the SDGs. Sustainability (Switzerland) 2023;15(10). doi:10.3390/su15108045.
[17] Ghaboulian Zare S, Alipour M, Hafezi M, Stewart RA, Rahman A. Examining wind energy deployment pathways in complex macro-economic and political settings using a fuzzy cognitive map-based method. Energy 2022;238. doi:10.1016/j.energy.2021.121673.
[18] Alipour M, Hafezi R, Papageorgiou E, Hafezi M, Alipour M. Characteristics and scenarios of solar energy development in Iran: Fuzzy cognitive map-based approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019;116. doi:10.1016/j.rser.2019.109410.
[19] Kyriakarakos G, Patlitzianas K, Damasiotis M, Papastefanakis D. A fuzzy cognitive maps decision support system for renewables local planning. Elsevier Ltd; 2014. doi:10.1016/j.rser.2014.07.009.
[20] Bakir M, Akan Ş, Kiraci K, Karabasevic D, Stanujkic D, Popovic G. Multiple-Criteria Approach of the Operational Performance Evaluation in the Airline Industry: Evidence from the Emerging Markets. 2020. Available from: https://www.apqc.org.
[21] Ulutaş A, Popovic G, Stanujkic D, Karabasevic D, Zavadskas EK, Turskis Z. A new hybrid MCDM model for personnel selection based on a novel grey PIPRECIA and grey OCRA methods. Mathematics 2020;8(10):1-14. doi:10.3390/math8101698.
[22] Xu W, Das DK, Stević Ž, Subotić M, Alrasheedi AF, Sun S. Trapezoidal Interval Type-2 Fuzzy PIPRECIA-MARCOS Model for Management Efficiency of Traffic Flow on Observed Road Sections. Mathematics 2023;11(12). doi:10.3390/math11122652.
[23] Görçün ÖF, Ulutaş A, Topal A, Ecer F. Telescopic forklift selection through a novel interval-valued Fermatean fuzzy PIPRECIA-WISP approach. Expert Syst Appl 2024;255. doi:10.1016/j.eswa.2024.124674.
[24] Alnoor A, Muhsen YR, Husin NA, Chew XY, Zolkepli MB, Manshor N. Z-cloud Rough Fuzzy-Based PIPRECIA and CoCoSo Integration to Assess Agriculture Decision Support Tools. International Journal of Fuzzy Systems 2025;27(1):190-203. doi:10.1007/s40815-024-01771-7.
[25] Zadeh LA. Fuzzy sets. Information and Control 1965;8(3):338-353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
[26] Stanujkic D, Kazimieras Zavadskas E, Karabasevic D, Smarandache F, Turskis Z. The Use of the Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment Method for Determining the Weights of Criteria.
[27] Stylios CD, Groumpos PP. Mathematical formulation of fuzzy cognitive maps. Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation 1999:2251-2261.
[28] Markinos A, Papageorgiou E, Stylios C, Gemtos T. Introducing Fuzzy Cognitive Maps for decision making in precision agriculture. Precision Agriculture 2007 - Papers Presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2007 2007:223-231.
[29] Baykasoŧlu A, Gölcük I. Development of a novel multiple-attribute decision making model via fuzzy cognitive maps and hierarchical fuzzy TOPSIS. Inf Sci (N Y) 2015;301:75-98. doi:10.1016/j.ins.2014.12.048.
[30] Hsieh TY, Lu ST, Tzeng GH. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. International Journal of Project Management 2004;22(7):573-584. doi:10.1016/j.ijproman.2004.01.002.
[31] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı İKA. İstanbul'da Yenilenebilir Enerji