

Denizli ili için yenilenebilir enerji kaynaklarının çok kriterli karar verme yöntemleriyle değerlendirilmesi

Evaluation of renewable energy sources for Denizli using multi-criteria decision-making methods

Ozan ÇAPRAZ^{1*}

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
ocapraz@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 05.04.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 24.06.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 14.06.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.15942
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Denizli ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklerini belirlemek amacıyla çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Türkiye genelinde yapılan çoğu yenilenebilir enerji kaynakları analizi ulusal düzeyde ya da daha geniş coğrafi bölgelere odaklanmıştır. Bu çalışmada ise, Denizli ilinin yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesi için detaylı bir analiz sunulması hedeflenmiş ve sonuçlar ilin coğrafi konumu, iklim özellikleri ve jeolojik yapısı göz önüne alarak yorumlanmıştır. Ekonomik, teknik, çevresel ve sosyo-politik kriterler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi için hibrit AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, Denizli ili için en uygun yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla güneş, jeotermal, rüzgâr, biyokütle ve hidroelektrik olarak belirlenmiştir. Çalışma bölgedeki enerji yatırımlarında riskleri değerlendirmek için çeşitli duyarlılık analizleri ile desteklenmiştir. Bulguların Denizli’de sürdürülebilir enerji yönetimi için karar alma ve stratejik planlama süreçlerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Denizli, Yenilenebilir enerji kaynakları, AHP-ARAS, SWARA-TOPSIS, Sürdürülebilir enerji yönetimi

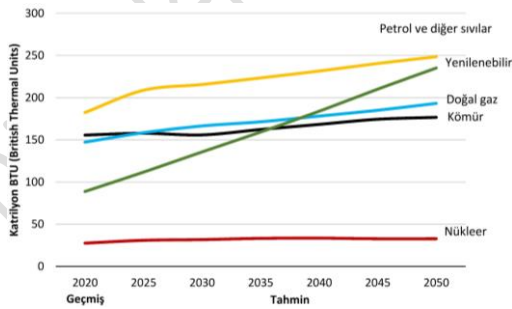
Abstract

In this study, multi-criteria decision-making methods were applied to determine the priorities of renewable energy sources for Denizli. While most analyses about renewable energy sources for Turkey have focused on a national level or broader geographical areas, in this study, it is aimed to provide a detailed analysis for renewable energy potential for Denizli considering its geographical location, climate characteristics, and geological structure. Hybrid AHP-ARAS and SWARA-TOPSIS methods were used to evaluate and rank renewable energy sources based on economic, technical, environmental, and socio-political criteria. As a result, the most suitable renewable energy sources for Denizli were determined in the following order: solar, geothermal, wind, biomass, and hydroelectric energy. In addition, sensitivity analyses were carried out to assess risks in energy investments in the province. Hence, it is believed that the findings of this study have potential to contribute to decision-making and strategic planning processes for sustainable energy management in Denizli.

Keywords: Denizli, Renewable energy sources, AHP-ARAS, SWARA-TOPSIS, Sustainable energy management

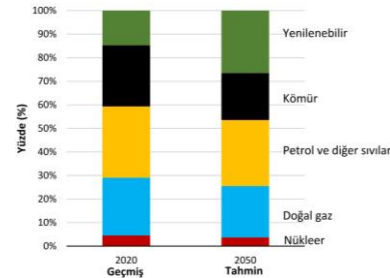
1 Giriş

Artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme sonucunda Dünya genelinde enerjiye olan talep giderek artmaktadır. ABD Enerji Bilgi Dairesi'nin (U.S. Energy Information Administration-EIA) 2021 yılında hazırladığı Uluslararası Enerji Görünümü 2021 raporuna göre, mevcut politikalarda ve teknolojilerde önemli değişiklikler olmadığında Dünya’da enerji tüketiminin gelecek 30 yılda yani 2020 ve 2050 yılları arasında yaklaşık %50 artacağı tahmin edilmiştir [1].



Şekil 1. Dünya’da birincil enerji tüketimi.
Figure 1. Primary energy consumption in the world.

Enerji sektörü Dünya’da önemli bir konumdadır ve gelecek adına gelişime açık bir potansiyeli bulunmaktadır [1]. Kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar birincil enerji kaynaklarıdır ve çevreye zararlı olan bu kaynaklar günümüzde Dünya’da birincil enerji tüketiminin yaklaşık %85’ini oluşturmaktadır (bk. Şekil 1) [1]. Uluslararası Enerji Görünümü 2021 raporunda Dünya’da birincil enerji tüketimine göre 2020 yılı gerçekleşen ve 2050 yılı tahminlerin değişimi Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir [1].



Şekil 2. Dünya’da birincil enerji tüketiminin payları.
Figure 2. Shares of primary energy consumption in the world.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Sürdürülebilir enerji, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını riske atmadan, bir taraftan yaşam kalitesini korurken diğer taraftan çevre üzerindeki zararların azaltılması hedefleyen enerji sistemlerinin kullanılmasıdır. Bu nedenle, mevcut birincil enerji kaynaklı sistemlerinin verimli kullanılması ve çevreye zarar vermeyen enerji teknolojilerinin tercih edilmesi sürdürülebilir enerji yönetiminde kritik bir öneme sahiptir [2]. Yenilenebilir enerji genellikle güneş ışığı, rüzgâr, jeotermal ısı vb. doğal olarak yenilenebilen kaynaklardan elde edilen enerji olarak kabul edilmektedir. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları hidroelektrik, biyokütle, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerjidir [3]. Sınırlı fosil yakıtların tükenebilir olması, fosil yakıtların yükselen fiyatları, nüfus artışı ve ekonomik gelişmeler ile enerji ihtiyacının artması, sera etkisi ve küresel ısınma gibi çevresel sorunlar nedeniyle enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kilit bir rol oynaması beklenmektedir [4],[5].

Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA) tarafından 2021 yılında yayımlanan Küresel Enerji İncelemesi 2021 raporuna göre, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebin enerji, ısınma, sanayi, ulaşım gibi çeşitli sektörlerde artacağı ve Dünya'da elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının da artacağı tahmin edilmiştir [6]. BP enerji görünümü 2022 raporunda, refah seviyesindeki sosyal ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak önümüzdeki yıllarda Dünya'da artan enerji talebi karşılanırken CO₂ emisyonlarının azaltılması senaryoları incelenmiştir [7]. Sonuç olarak, Türkiye'de dahil olmak üzere Dünya'da birçok ülkede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek CO₂ emisyonlarını azaltılması için çeşitli stratejiler önerilmiştir. Temiz ve yenilenebilir olması, fosil kaynaklı yakıtlara göre daha düşük seviyelerde sera gazı salınımı oluşturması göz önüne alındığında artan enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynakları önemli görülmektedir [8].

Enerji kaynakları genellikle iki grupta sınıflandırılmaktadır: (i) yenilenebilir ve (ii) yenilenemez kaynaklar. Yenilenebilir enerji kaynakları; rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle enerjisi vb. olmak üzere sınıflandırılırken yenilenemeyen enerji kaynakları kömür, petrol, doğalgaz, kömür, nükleer enerji vb. olarak sınıflandırılır. Hidroelektrik enerji, nehirler üzerine inşa edilen barajlarda biriktirilen suyun potansiyel enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisi üretilmesidir. Güneş enerjisi, Dünya'ya gelen güneş ışınlarının çeşitli paneller ile elektrığe dönüştürülmesinden elde edilen bir enerji türüdür. Rüzgâr enerjisi ise güneş ışınların geliş açısındaki farklılıklar nedeniyle atmosferde doğal olarak oluşan rüzgâr veya hava akımı kullanılarak elde edilen bir enerji türüdür. Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde birikmiş ısı potansiyelinden sağlanan bir enerji türüdür. Biyokütle enerjisi ise, bitkisel ve hayvansal kökenli çeşitli organik atıklardan elde edilen bir enerji türüdür. Her enerji türünün kendine özgü avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Örneğin; hidroelektrik enerji doğada CO₂ emisyonunu azaltılmasına katkı sağlarken biyolojik çeşitliliğin azaltılması, toprak erozyonuna sebep olabilme gibi çeşitli dezavantajları bulunmaktadır [9],[10].

Dünya'da ve Türkiye'de yapılan düzenlemeler ve teşvikler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının her geçen yıl artacağı öngörülmektedir. Sağır ve Doğanalp [11] çalışmasında Türkiye için en uygun enerji kaynağını belirlemeye çalışmış ve enerji üretimi için tercih edilmesi önerilen alternatifleri sırasıyla yenilenebilir enerji kaynakları, nükleer enerji kaynakları ve fosil enerji kaynakları olarak belirlenmiştir. Mevcut geleneksel enerji kaynaklarını yenilenebilir enerji

kaynakları ile değiştirmek isteyen birçok ülke bu alanda yatırımlar yapmaya başlamıştır [12]. Burada, hem yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajları ve dezavantajları olması hem de coğrafi konum, iklim özellikleri vb. sebeplerle yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli değişebilmekte ve bu kaynaklardan yüksek oranda yararlanabilmek için yatırım alternatiflerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Değerlendirme aşaması, karar verme sürecini etkileyen ve birbirleriyle çelişebilen somut ve soyut faktörler olduğu için zor ve karmaşık bir konudur. Uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının belirlenmesi, bu kaynakların sıralanması ve herhangi bir ülke için en uygun kaynağın seçilmesi; sosyal, teknik, ekonomik, çevresel ve/veya politik faktörleri içeren yatırım kararları için önemlidir [13],[14]. Bu nedenle, seçim ve sıralama süreci çok kriterli karar verme problemi olarak görülebilir [5]. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerjide çok kriterli karar verme uygulamaları hakkında detaylı bilgi için literatür araştırması çalışmaları [4],[15]-[19] incelenebilir.

Literatürde, çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak en iyi yenilenebilir enerji projesinin seçimini ele alan bazı çalışmalar [5],[20],[21] bulunmaktadır. Ayrıca, çeşitli ülkelerde en iyi yenilenebilir enerji kaynağını seçmek için bazı çalışmalar önerilmiştir. Örneğin; Birleşmiş Milletler için [22]; Cezayir için [23], Endonezya için [24], Hindistan için [25], Kuzey Kore için [26], Litvanya için [27], Malezya için [28], Pakistan için [29], Suudi Arabistan için [30] ve Ürdün için [31] çalışmaları incelenebilir. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynağının seçimi için yapılan çalışmaların özeti Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1'de verilen özet bilgilere göre Türkiye için yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve seçimi için çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanmış ve yenilenebilir enerji kaynağı sıralanması ve seçiminde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak Tablo 1'deki veriler göz önüne alındığında, 2004-2024 yılları arasında Türkiye için yapılan en iyi yenilenebilir enerji kaynağı seçimi çalışmalarında enerji kaynaklarının sıralamasında ilk üç sırada yer bulma sıklıkları Şekil 3'te ve uygun bir alternatif olarak ilk sırada yer bulma sıklıkları ise Şekil 4'te verilmiştir. 2004-2024 yılları arasında Türkiye'de en iyi yenilenebilir enerji kaynağının seçimi çalışmalarında rüzgâr, güneş ve hidroelektrik enerjileri, en çok tercih edilen enerji kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'nin yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline ve verimliliğine sahip olması, geniş coğrafi alanlarında güneş ışığından yıl boyu etkin bir şekilde faydalanabilmesi ve hidroelektrik kapasitesinin sürdürülebilir enerji üretimindeki uzun vadeli maliyet etkinliği ve enerji güvenliği açısından bu üç enerji kaynağının Türkiye'de yenilenebilir enerji yatırımlarında kritik bir öneme sahip olduğu görülmektedir. Rüzgâr, güneş ve hidroelektrik kadar sık tercih edilmese de jeotermal ve biyokütle enerjisi de bölgesel potansiyelleri nedeniyle enerji portföyünün çeşitlendirilmesinde ve sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılmasında önemli görevler üstlenmektedir.

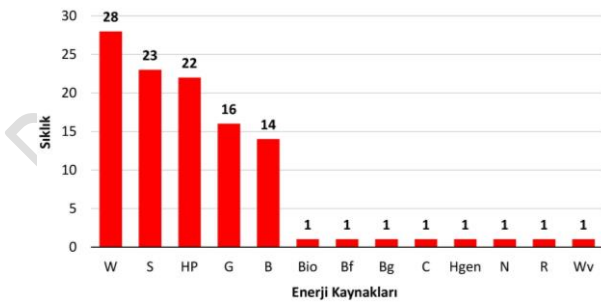
Literatürdeki makalelerin bulgularına göre, Türkiye'de uygun olduğu düşünülen yenilenebilir enerji kaynakları için farklı sonuçlar belirlenmiştir. Türkiye için uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenimin bile zor olduğu süreçte seçilen enerji kaynağının ülkenin tamamı için kullanılabilmesini varsaymak karar vermeyi zorlaştırmaktadır. Seçilen yenilenebilir enerji kaynağının ülkenin hangi bölgesinde kurulacağı ya da bölgesel olarak uygun alternatifin seçilmesi için değerlendirmenin yapılması yatırımcılar, karar vericiler, politika hazırlayıcılar açısından daha gerçekçi ve yönlendirici sonuçlar verebileceği literatürde tartışılmıştır.

Tablo 1. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının seçimi üzerine literatür tablosu.
Table 1. Literature table on the selection of renewable energy sources of Turkey.

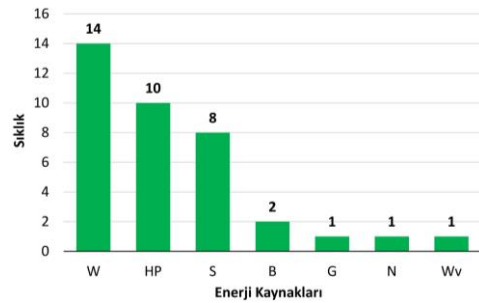
| Yazar(lar) | Yıl | Yöntem* | Türkiye için enerji kaynaklarının sıralaması** |
|------------------------------|------|------------------------------|--|
| Topcu ve Ulengin [32] | 2004 | PROMETHEE | W > HP > S > B > N > NG > FF |
| Ulutas [33] | 2005 | ANP, BOCR | B > G > C > W > HP > S > P > N > NG |
| Kahraman vd. [14] | 2009 | F-AD, F-AHP | W > S > B > G > HP |
| Kahraman ve Kaya [34] | 2010 | F-AHP | W > S > B > G > HP > NG > C&L > N > P |
| Kaya ve Kahraman [35] | 2011 | F-AHP, MF-TOPSIS | W > B > S > CHP > HP > N > Con |
| Uysal [36] | 2011 | GT, MA | S > W > B > HP > G |
| Boran vd. [37] | 2012 | IF-TOPSIS | HP > W > G > PV |
| Demirtas [38] | 2013 | AHP | W > B > G > S > HP |
| Ertay vd. [13] | 2013 | MACBETH, F-AHP | W > S > B > G > HP |
| Ayan ve Pabuççu [39] | 2013 | AHP | HP > W > Bf = G > S |
| Kabak ve Dağdeviren [40] | 2014 | ANP, BOCR | HP > S > W > G > B |
| Erdogan ve Kaya [41] | 2015 | IT2F-AHP, IT2F-TOPSIS | W > S > G > Bf > HP > NG > C > P |
| Pak vd. [42] | 2015 | ANP, TOPSIS | HP > W > B > G > S |
| Şengül vd. [43] | 2015 | ISE, F-TOPSIS | HP > G > R > W |
| Büyüközkan ve Güleriyüz [44] | 2016 | DEMATEL, ANP | W > S > B > HP > G |
| Çelikkalek ve Tüysüz [45] | 2016 | G-ANP, G-DEMATEL, G-VIKOR | S > W > HP > B > G |
| Balin ve Baraçlı [46] | 2017 | IT2F-AHP, IT2F-TOPSIS | W > S > B > G > HP > Hgen |
| Büyüközkan ve Güleriyüz [47] | 2017 | DEMATEL, ANP, TOPSIS, LIFPR | G > Bg > HP > S > W |
| Çolak ve Kaya [48] | 2017 | IT2F-AHP, HF-TOPSIS | W > S > HP > B > G > Wv > Hgen |
| Damgacı vd. [49] | 2017 | IF-TOPSIS | B > G > Hgen > HP > Wv > S > W |
| Karaca vd. [50] | 2017 | COPRAS | W > HP > G > S > B |
| Özcan vd. [51] | 2017 | ANP, TOPSIS | W > HP > B > G > S |
| Doğan ve Uludağ [52] | 2018 | AHP, F-GRA | S > W > HP > B > G |
| Karaca ve Ulutaş [53] | 2018 | Entropi, WASPAS | HP > G > W > B > S |
| Tolga ve Turgut [54] | 2018 | F-TODIM | S > LFG > W > HP |
| Karakaş ve Yıldırım [55] | 2019 | MF-AHP | S > W > G > HP > B |
| Ayağ ve Samanlıoğlu [56] | 2020 | F-AHP, F-GRA | N > Bio > HP > W > NG > S > G |
| Derse ve Yontar [57] | 2020 | SWARA, TOPSIS | HP > B > G > Hgen > S > W > Wv |
| Karaaslan ve Aydın [58] | 2020 | AHP, COPRAS, MULTIMOORA | HP > S > W > G > B |
| Kayahan Karakul [59] | 2020 | F-AHP | S > HP > B > W > G |
| Karatop [60] | 2021 | F-AHP, EDAS, F-FMEA | W > HP > S > B > G |
| Ecer [61] | 2021 | IRN, LBWA, CODAS | HP > S > G > B > W |
| Şahin [62] | 2021 | BWM, ARAS | HP > S > W > B > G |
| Bilgili [63] | 2022 | IF-TOPSIS | S > W > G > Hgen > B > HP > Wv |
| Yontar [64] | 2023 | SEM, COPRAS | S > HP > G > B > W |
| Aydın ve Kaçtoğlu [65] | 2024 | CRITIC, WASPAS | Wv > W > G > HP > S > B |
| Büyüközkan vd. [66] | 2024 | SF-DEMATEL, SF-ANP, SF-VIKOR | W > S > HP > G > Bg |

* AD: Axiomatic Design, AHP: Analytic Hierarchy Process, ANP: Analytic Network Process, ARAS: Additive Ratio Assessment, BOCR: Benefits, Opportunities, Costs and Risks, BWM: Best Worst Method, COPRAS: Complex Proportional Assessment, CODAS: Combinative Distance-Based Assessment, CRITIC: Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, DEMATEL: Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, EDAS: Evaluation Based on Distance from Average Solution, FMEA: Failure Mode and Effect Analysis, F-: Fuzzy-, G-: Grey-, GRA: Grey Relational Analysis, GT: Graph Theory, HF-: Hesitant Fuzzy-, IF-: Intuitionistic Fuzzy, IRN: Interval Rough Number, ISE: Interval Shannon’s Entropy, IT2F-: Interval Type-2 Fuzzy-, LBWA: Level Based Weight Assessment, LIFPR: Linguistic Interval Fuzzy Preference Relations, MA: Matrix Approach, MACBETH: Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique, MARCOS: Measurement of Alternatives and Ranking according to the Compromise Solution, MF-: Modified Fuzzy-, MOORA: Multi- Objective Optimization by Ratio Analysis, MULTI-MOORA: Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis Plus the Full Multiplicative Form, PROMETHEE: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, SEM: Structural Equation Modeling, SF-: Spherical Fuzzy-, SWARA: Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis, TODIM: Tomada de Decisão Iterativa Multicritério, TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, VIKOR: Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, WASPAS: Weighted Aggregated Sum Product Assessment

** B: Biyokütle (Biomass), Bf: Biyoyakıt (Biofuel), Bg: Biyogaz (Biogas), C: Kömür (Coal), Con: Geleneksel (Conventional), CHP: Kombine Isı ve Güç (Combined Heat and Power), FF: Fosil Yakıtlar (Fossil Fuels), G: Jeotermal (Geothermal), Hgen: Hidrojen (Hydrogen), HP: Hidroelektrik Enerji (Hydropower), L: Linyit (Lignite), LFG: Çöp Gazı (Landfilled gas), N: Nükleer (Nuclear), NG: Doğal Gaz (Natural gas), O: Petrol (Oil), P: Petrol (Petroleum), PV: Fotovoltaik (Photovoltaic), R: Düzenleyici (Regulator), S: Güneş (Solar), W: Rüzgar (Wind), Wv: Dalga (Wave)



Şekil 3. Türkiye için yapılan enerji kaynağı seçimi çalışmalarında kaynakların ilk üç sırada yer bulma sıklıkları.
Figure 3. The frequencies of energy sources ranking in the top three positions in energy source selection studies for Turkey.



Şekil 4. Türkiye için yapılan enerji kaynağı seçimi çalışmalarında kaynakların ilk sırada yer bulma sıklıkları.
Figure 4. The frequencies of energy sources ranking first in energy source selection studies for Turkey.

Ayçin ve Arsu [67], Türkiye'deki istatistiki bölge birimleri sınıflandırmasına göre Düzey-1 bölgelerini yenilenebilir enerji kaynağı performanslarına göre değerlendirmek için Entropi ve CODAS yöntemlerini kullanmıştır. Alkan ve Albayrak [68], Türkiye'deki istatistiki bölge birimleri sınıflandırmasına göre 26 bölge için bulanık entropi, bulanık COPRAS, bulanık MULTIMOORA yöntemlerini kullanarak yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmiş ve sıralamıştır. Elde edilen sonuçların bölgesel olarak yatırımcılara yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırım kararı vermelerinde destek sağlayacağı belirtilmiştir. Darende vd. [69], Türkiye'nin 7 coğrafi bölgesi için sezgisel TOPSIS yöntemini kullanarak yenilenebilir enerji kaynaklarının seçimi üzerine çalışmıştır. Türkiye'de yenilenebilir enerji üzerine çalışmaların bütün ülkeyi kapsadığı belirtilmiş ancak yedi bölgenin dinamiklerinin ve özelliklerinin farklı olması sebebiyle değerlendirmenin bölgesel olarak yapılması gerektiğinden bahsetmiştir. Bilgiç vd. [70], Türkiye'nin İç Anadolu bölgesinde BWM yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirmesini yapmıştır. Gök Kısa [71], TR83 bölgesinde (Samsun, Tokat, Amasya ve Çorum) yenilenebilir enerji yatırımlarını CRITIC tabanlı GRA kullanılarak değerlendirmeye çalışmıştır. Karaaslan vd. [72], Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarını AHP ve MARCOS yöntemleri ile bölgesel olarak değerlendirmiştir. Çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları 7 farklı coğrafi bölge için değerlendirilmiş ve sıralanmıştır. Literatürde Türkiye için yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklendirilmesine yönelik çok çalışma olduğu ancak farklı özelliklere sahip bölgelerden oluşan Türkiye için her bölge için ayrı ayrı değerlendirilmesinin daha mantıklı olacağı düşüncesini vurgulamışlardır.

Bu çalışma, Türkiye'nin güney batısında yer alan Denizli ili için yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklendirilmesine yönelik çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanıldığı bir değerlendirme sunmaktadır. Literatürde, Türkiye için yenilenebilir enerji kaynaklarının analiz edildiği çalışmaların büyük çoğunluğu ya ulusal ölçekte yapılmış ya da genellikle geniş coğrafi bölgelere odaklanmıştır. Bu çalışmada ise, Denizli ilinin yenilenebilir enerji potansiyeli göz önüne alındığında sürdürülebilir enerji üretimi için en uygun enerji kaynağının belirlenmesi ve önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Ekonomik, teknik, çevresel ve sosyo-politik kriterler açıdan enerji alternatiflerinin değerlendirilmesinde hibrit AHP-ARAS ve hibrit SWARA-TOPSIS yöntemleri kullanılmış olup enerji yatırımlarında fırsatları ve riskleri değerlendirmek için çeşitlik duyarlılık analizleri yapılmıştır.

AHP ve SWARA yöntemleri kriter ağırlıklarının belirlenmesi için ARAS ve TOPSIS yöntemleri ise yenilenebilir enerji kaynaklarının sıralanması için kullanılmıştır. Bu çalışmada, AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS yöntemleri birleştirilmiştir. AHP ve SWARA yöntemleri, literatürde uzman görüşlerine dayalı olarak güvenilir sonuçlar vermeleri ile bilinmekte olup, bu sebeple tercih edilmiştir. ARAS ve TOPSIS yöntemleri ise alternatiflerin sıralanmasındaki performansları ve hesaplama kolaylıkları nedeniyle seçilmiştir. AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS yöntemlerinin birleştirilmesi ile iki çok kriterli karar verme yönteminin güçlü yanları bir araya getirilerek güvenilir sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Farklı yöntemlerin kombinasyonu sonucunda her bir yöntemin farklı açılardan değerlendirme yapılması sonucunda karar verme sürecinin zenginleştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, hibrit yöntemlerde kullanılan kriter ağırlıklarındaki değişimlerin çeşitli senaryolar

altında incelenmesi, karar verme sürecinin güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Çalışmada, aşağıdaki araştırma sorularına cevap aranmıştır:

- Denizli ili için mevcut yenilenebilir enerji potansiyeli ve enerji kaynaklarının dağılımı nedir?
- Denizli ili için yenilenebilir enerji kaynakları önceliklerine göre nasıl sıralanabilir ve en uygun enerji kaynağı nasıl seçilebilir?
- Denizli ili için yenilenebilir enerji yatırımlarında riskler nasıl ele alınabilir?
- Denizli ili için yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgesel ve ulusal enerji hedefleri ile uyumu nasıl değerlendirilebilir?

Bu çalışma ile, Türkiye genelinde yapılan ulusal ölçekli ya da coğrafi bölgelere odaklanan analizlere daha detaylı bir bakış açısıyla Denizli ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarının belirlenmesi ve değerlendirilmesine yönelik literatürdeki boşluk doldurulmaya çalışılmıştır. Çalışmada yapılan analizler ile sürdürülebilir enerji üretimi için Denizli'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik stratejik planlama ve karar verme süreçlerine katkıda bulunulması hedeflenmiştir. Sunulan bulgular ve takip edilen metodolojik yaklaşım, Türkiye'deki iller ya da bölgeler için benzer çalışmaların yapılmasını teşvik edecek niteliktedir.

Çalışmanın geri kalanı aşağıdaki şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde, Türkiye'de ve Denizli'de yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut durumu ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, kullanılan yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, uygulama ve duyarlılık analizlerinin sonuçları sunulmuştur. Son olarak, beşinci bölüm sonuçlar ve tartışma, genel değerlendirme ve gelecekteki araştırmalar için önerileri içermektedir.

2 Türkiye'de ve Denizli'de Yenilenebilir Enerji

Nüfusun artması ve sanayileşmenin hız kazanmasıyla beraber son 30 yılda hem Dünya genelinde hem de Türkiye'de enerji ihtiyacı giderek yükselmektedir [73]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) 2022 yılında yayınladığı Ulusal Enerji Planında, 2020-2035 döneminde Türkiye enerji sektörüne ilişkin tahminlerde bulunmuştur. Bu çalışmada, Türkiye'nin birincil enerji tüketimi, elektrik tüketimi ve elektrik kurulu gücü gibi göstergeler için gelecek gelişme senaryoları ele alınmış olup özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki artışa vurgu yapılmıştır [74]. Tablo 2, 2020-2035 döneminde Türkiye'de kaynaklara göre kurulu gücün dağılımını göstermektedir [74].

Tablo 2. 2020-2035 döneminde Türkiye’de kaynaklara göre kurulu gücün dağılımı [74].
Table 2. The distribution of installed capacity in Turkey by energy sources for 2020-2035 period [74].

| Kaynak | 2020 | | 2025 | | 2030 | | 2035 | |
|---------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| | Kurulu güç (GW) | Toplam içindeki payı (%) | Kurulu güç (GW) | Toplam içindeki payı (%) | Kurulu güç (GW) | Toplam içindeki payı (%) | Kurulu güç (GW) | Toplam içindeki payı (%) |
| Kömür | 20.3 | 21.2 | 21.1 | 18.2 | 22.8 | 15.3 | 24.3 | 12.8 |
| Gaz | 25.7 | 26.8 | 24.2 | 20.8 | 30.3 | 20.3 | 35.5 | 18.7 |
| Nükleer | 0.0 | 0.0 | 2.4 | 2.1 | 4.8 | 3.2 | 7.2 | 3.8 |
| Hidrolik | 31.0 | 32.3 | 33.0 | 28.4 | 35.1 | 23.5 | 35.1 | 18.5 |
| Rüzgâr | 8.8 | 9.2 | 13.1 | 11.3 | 18.1 | 12.1 | 29.6 | 15.6 |
| Güneş | 6.7 | 7.0 | 17.9 | 15.4 | 32.9 | 22.1 | 52.9 | 27.9 |
| Diğer | 3.4 | 3.5 | 4.5 | 3.9 | 5.1 | 3.4 | 5.1 | 2.7 |
| Toplam | 95.9 | 100.0 | 116.2 | 100.0 | 149.1 | 100.0 | 189.7 | 100.0 |

Fosil yakıtların orta ve uzun vadede tükenerek olması göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli kaynaklar olarak görülmektedir. ETKB [74] planına göre, Türkiye'nin birincil enerji tüketimi 2020 yılında 147.2 Mtep iken bu değer 2035 yılına kadar yıllık ortalama %2.2 oranında artışla 205.3 Mtep seviyesine ulaşması öngörülmektedir. Elektrik tüketimi açısından ise, 2020 yılında 306.1 TWh olan tüketimin 2035 yılına kadar yıllık ortalama %3.5 artışla artarak 510.5 TWh seviyesine ulaşacağı tahmin edilmiştir. Tablo 2’de gösterilen kaynaklara göre elektrik kurulu gücüne yönelik tahminlerde, 2020 yılında 95.9 GW olan kurulu gücün 2035 yılına kadar 189.7 GW seviyesine yükseleceği raporlanmıştır. Buradaki artışın önemli bir bölümünün yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanacağı ve kurulu güç içindeki payının %52’den %64.7’ye ulaşacağı beklenmektedir. Özellikle rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 8.8 GW’dan 29.6 GW’a ve güneş enerjisi kurulu gücünün 6.7 GW’dan 52.9 GW’a yükseleceği tahmin edilmiştir. Hidroelektrik santrallerde kurulu gücünün 31 GW’dan 35.1 GW’a, diğer başlığı altında verilen jeotermal ve biyokütle enerjisinin toplam kurulu gücünün de 3.4 GW’dan 5.1 GW seviyesine yükseleceği tahmin edilmiştir [74]. Dolayısıyla hem Türkiye’nin kurulu gücünün hem de kurulu güç içerisindeki yenilenebilir kaynaklarının oranı yıllar itibarıyla artacağı tahmin edilmiştir.

Tablo 3. Denizli ilindeki lisanslı elektrik üretim dağılımı.
Table 3. The distribution of licensed electricity generation in Denizli.

| Tesis türü | Tesis sayısı | İşletmedeki kapasite (MW) | İnşa halindeki kapasite (MW) | Toplam kurulu güç (MW) | İşletme kapasitesinin toplam içindeki oranı (%) |
|---------------|--------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|---|
| Biyokütle | 1 | 0.635 | 0 | 0.635 | 0 |
| Güneş | 1 | 10 | 0 | 10 | 1 |
| Rüzgâr | 1 | 0 | 66 | 66 | 0 |
| Jeotermal | 8 | 296.257 | 5.52 | 301.777 | 18 |
| Termik | 10 | 1,133.244 | 3.25 | 1,136.494 | 70 |
| Hidroelektrik | 15 | 180.664 | 7.068 | 187.732 | 11 |
| Toplam | 36 | 1,620.8 | 81.838 | 1,702.638 | 100 |

Denizli ili, Türkiye’nin güney batısında bulunmaktadır ve coğrafi konumu, jeolojik yapısı ve iklim yapısı bakımından yenilenebilir enerji potansiyeli ile önemli fırsatlar sunmaktadır. Denizli ilinin önemli yenilenebilir enerji kaynakları ve potansiyelleri aşağıda incelenmiştir.

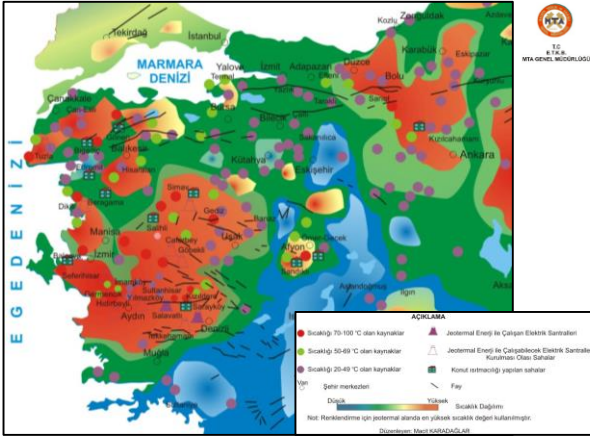
Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa ve Dünya’da zengin ülkeler arasında yer alırken, bu potansiyeli gösteren alanların %78’si Batı Anadolu bölgesinde bulunmaktadır [78]. Mart 2022 sonu yapılan değerlendirmeler sonucunda, Denizli ili jeotermal enerji kurulu gücünde 379.4 MW ile Türkiye’de ikinci sırada yer alırken 165 MW kurulu gücü ile en büyük

ETKB’nin 2019-2023 Stratejik Planı’nda sürdürülebilir enerji arz güvenliği için yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik kurulu gücünün toplam kurulu güce oranının yükseltilmesi hedeflenmiştir [75]. Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği bakımında uygun bir konuma sahiptir. Hem enerjide dışa bağımlılığın azaltılması hem de sera gazı salımının en aza indirgenmesi bakımından yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların teşvik edilmesi ve bu alandaki kapasitenin artırılması büyük önem taşımaktadır [76].

Denizli İklim Değişikliği Eylem Planı 2016-2030 raporuna göre, Denizli ilindeki lisanslı elektrik üretiminin yaklaşık %30’unun yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığı belirtilmiştir. Tablo 3’ten görülebileceği üzere, bu üretimin yaklaşık %11’inin hidroelektrik santraller, %18’inin jeotermal enerji tesisleri ve %70’inin termik santraller tarafından karşılanmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinden yapılan üretimin düşük düzeyde kaldığı ifade edilmiştir. Özetle, Denizli ilinin sera gazı emisyonlarının azaltılması için Denizli’nin yenilenebilir enerji potansiyeli göz önüne alındığında fosil yakıtların kullanımının azaltılması, enerji verimliliği uygulamaları ile yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının teşvik edilmesi ve enerji üretiminde kapasitesinin artırılması konuları vurgulanmıştır [77].

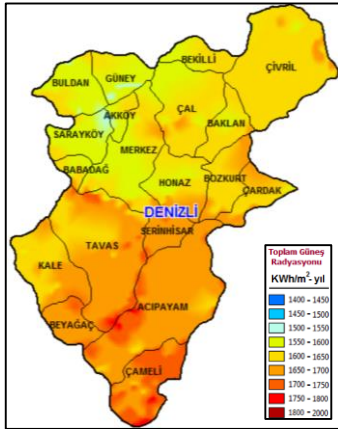
jeotermal tesis olan Kızıldere 3 santralinde 2020 yılında toplam 866 GWh elektrik üretilmiştir [79].

Şekil 5’te verilen Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan jeotermal kaynaklar ve uygulama haritasına göre, Denizli’nin yüksek jeotermal kaynak potansiyeli görülmektedir [80]. Özellikle Sarayköy ve Kızıldere bölgeleri hem sera ısıtıcılığı, konut ısıtıcılığı, kuru buz üretimi ve termal turizm alanlarındaki uygulamalar hem de elektrik üretimi için zengin jeotermal kaynaklara sahiptir [81].



Şekil 5. Denizli jeotermal kaynak potansiyeli.
Figure 5. Denizli geothermal resource potential.

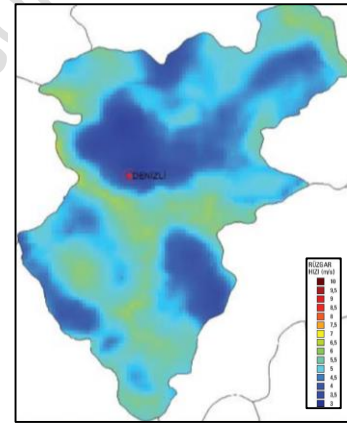
Türkiye yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. ETKB Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün hazırladığı Güneş Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2,741 saat ve ortalama yıllık toplam güneş radyasyonu değeri 1,527.46 kWh/m² olup ortalama günlük toplam güneşlenme süresi 7.5 saat ve ortalama günlük toplam güneş radyasyonu değeri 4.18 kWh/m²-gün olarak belirlenmiştir [82]. Denizli ili, coğrafi konumu ve iklim yapısı sebebiyle Türkiye'de güneş enerjisi açısından potansiyeli yüksek illerden biridir (bk. Şekil 6).



Şekil 6. Denizli güneş enerjisi potansiyeli atlası.
Figure 6. Denizli solar energy potential atlas.

GEPA verilerine göre Denizli'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2,930.04 saat ve ortalama yıllık toplam güneş radyasyonu değeri 1,591.40 kWh/m²'dir. Denizli ili toplam güneş radyasyonu değerlerinin ve güneşlenme süresinin Türkiye ortalaması üzerinde olduğu görülmektedir. En yüksek güneşlenme süresi temmuz ayında 11.83 saat ve en düşük aralık ayında 4.23 saat olarak belirlenmiştir. Güneş radyasyonu açısından bakıldığında, en yüksek değer haziran ayında 6.73 kWh/m²-gün ve en düşük değer aralık ayında 1.79 kWh/m²-gün olarak karşımıza çıkmaktadır [83]. Güneş radyasyonu ve güneşlenme süresi, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği ve üretim kapasitesi açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, sahip olduğu hem güneşlenme süresi ve hem de güneş radyasyonu değerleri ile Denizli ilinin güneş enerjisi potansiyeli [84] hem yerel hem de ulusal enerji ihtiyaçlarının karşılanması için önemli fırsatlar barındırmaktadır [85].

Türkiye'nin sahip olduğu rüzgâr enerjisi potansiyeline paralel olarak son yıllarda rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü artış göstermiş olup özellikle Ege bölgesi bu potansiyelin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. ETKB Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün hazırladığı Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası (REPA) verilerine göre; yerden 50 metre yükseklikte, yıllık ortalama rüzgâr hızları 7.5 m/s'yi geçen kullanılabilir alanlarda ve kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr enerji santrallerinin kurulabileceği varsayıldığında Türkiye'de kurulabilecek rüzgâr enerjisi elektrik santrallerinin toplam kapasitesinin 47,849.44 MW olduğu tespit edilmiştir [86]. Denizli ilinde ise kurulabilecek rüzgâr enerjisi santralleri için toplam alan 47.71 km² ve rüzgâr enerjisi potansiyeli 238.56 MW olarak belirlenmiştir [87]. Günümüzde ticari ölçekte kullanılan rüzgâr türbinlerinin kule yükseklikleri 80 ile 120 metre arasında değişmektedir. Rüzgâr enerjisi yatırımlarının ekonomik olabilmesi için ortalama rüzgâr hızlarının 7-7.5 m/s'nin üzerinde ve kapasite faktörünün %35'in üzerinde olması gerekmektedir [88]. REPA verilerine göre, Denizli için 100 metrede ortalama rüzgâr hızı 4.13 m/s ve ortalama kapasite faktörü %15 olarak hesaplanmıştır [87]. Denizli ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelinin (bk. Şekil 7) ilk bakışta sınırlı olduğunu gösterse de ildeki rüzgâr enerjisi santrali kurulabilir alanlar üzerinde kapsamlı meteorolojik analizlerle uygun bölgelerin tespit edilmesi mümkündür [84].



Şekil 7. Denizli rüzgâr hızı dağılımı - 50 m.
Figure 7. The distribution of wind speed in Denizli - 50 m.

Türkiye geniş tarım alanlarına, zengin iklim çeşitliliğine ve biyolojik çeşitliliğe sahip olması sayesinde önemli bir biyokütle enerji potansiyeli barındırmaktadır. Biyokütle enerjisi genel olarak; tarımsal, hayvansal, kentsel ve endüstriyel, orman ve orman ürünleri atıklarının çeşitli dönüşüm yöntemlerini ile enerji üretiminde değerlendirilmesini kapsamaktadır [89]. ETKB Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün hazırladığı Biyokütle Enerji Potansiyeli Atlası (BEPA) verilerine göre; Türkiye'de yılda yaklaşık 194 milyon ton hayvansal atık, 62 milyon ton bitkisel atık ve 32 milyon ton belediye atığı üretilmektedir. Bu atıklar, yaklaşık 34 Mtep/yıl teorik enerji eşdeğerine karşılık gelmektedir. Denizli, tarım ve hayvancılık bakımından zengin ve çeşitli sanayi faaliyetlerine ev sahipliği yapan bir ildir. BEPA verilerine göre, Denizli'de yılda yaklaşık 3,5 milyon ton hayvansal atık, 900 bin ton bitkisel atık ve 435 bin ton belediye atığı üretilmektedir. Bu atıkların toplamı yaklaşık 490 bin Tep/yıl enerji eşdeğerine sahiptir [90]. Denizli'nin biyokütle potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu potansiyelin tam olarak değerlendirilmesi için teknolojik yatırımlar ile altyapının geliştirilmesi önem taşımaktadır [91].

Türkiye, sahip olduğu çok sayıda akarsu ve bu akarsular üzerine kurulu barajlar ile önemli ölçüde hidroelektrik enerji üretmektedir. Türkiye'nin hidroelektrik enerji potansiyeli teknik ve ekonomik olarak kullanılabilir düzeyde oldukça yüksektir. Hidroelektrik potansiyeli teorik yaklaşık olarak 433 TWh, teknik olarak kullanılabilir 216 TWh ve ekonomik olarak ise yılda 140 TWh olarak belirlenmiştir [92]. Türkiye'nin hali hazırda elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük paya hidroelektrik enerji sahiptir. ETKB verilerine göre, Haziran 2022 sonu itibari ile hidroelektrik enerjisine dayalı kurulu güç 31,558 MW ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı %31 olarak belirlenmiştir [93]. Denizli ili hidroelektrik enerji potansiyeli bakımından değerlendirilebilir bir bölgedir. Denizli'de bazı akarsular (Büyük menderes, Gökçay deresi, Akçay çayı ve Çürüksu çayı) üzerinde kurulu küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santraller ile bu potansiyelden yararlanılmaktadır [94]. Devlet Su İşleri 2022 yılı verilerine göre, Denizli'de hidroelektrik santrallerden yıllık 320.38 GWh enerji üretimi sağlanmaktadır [95].

3 Yöntem

En genel haliyle karar verme, bir problemin çözümünde belirli bir amaç ya da amaçlara ulaşmak için bireylerin veya grupların mevcut seçenekler arasından seçim, sıralama veya sınıflandırma yapmasını kapsayan bir süreçtir. Bu süreç, (i) problemin tanımlanması, (ii) alternatiflerin belirlenmesi, (iii) alternatiflerin değerlendirilmesi, (iv) en uygun alternatifin seçilmesi ve (v) seçimin uygulanması aşamalarını kapsar. Çok kriterli karar verme ise birbiriyle çelişen birden fazla kriterin göz önünde bulundurulduğu karar verme sürecidir [96].

Bu çalışmada, Denizli ili için uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklerini belirlemek amacıyla AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS yöntemleri hibrit bir şekilde kullanılmıştır. AHP ve SWARA gibi uzman görüşlerine dayanan yöntemler, kriterlerin ağırlıklandırılmasında literatürde birçok alanda sıklıkla tercih edilmektedir. ARAS ve TOPSIS gibi yöntemler ise alternatiflerin sıralanması için kullanılan etkili yöntemlerdir ve değerlendirme yapabilmek için girdi olarak kriter ağırlıklarına ihtiyaç duyarlar. Çok kriterli karar verme problemlerinde, farklı yöntemlerin ihtiyaçlara göre bir araya getirilerek hibrit olarak kullanılması hem sonuçların güvenilirliğini hem de değerlendirmenin esnekliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca iki farklı hibrit yöntem ile elde edilen bulgular, daha detaylı bir bakış açısı sunarak karar verme sürecini zenginleştirmektedir. Hibrit yöntemlerde kullanılan kriter ağırlıklarındaki değişimlerin sonuçlar üzerindeki etkisinin duyarlılık analizleri ile incelenmesi ise, karar verme sürecinin güçlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu bölümde çalışmada kullanılan AHP, ARAS, SWARA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleri ve uygulama adımları açıklanmıştır.

3.1 AHP yöntemi

1970'li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen AHP (Analytic Hierarchy Process), çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemlerden biridir. AHP, çok kriterli karar problemlerini kriterler ve varsa alt kriterler ve alternatiflerden oluşan bir hiyerarşik yapı altında ele alır. Problemlerin çözümünde ise karar vericinin kişisel değerlendirmelerini ön planda tutarak her kriterin ağırlıklarının belirlenip alternatifler arasında seçim yapılması için belirli matematiksel ve mantıksal ifadelerin kullanıldığı

aşamaları takip etmektedir [97],[98]. AHP yönteminin aşamaları aşağıdaki gibidir [99],[100]:

1) Ele alınan problem detaylı bir şekilde tanımlanır. Problem; en tepede amaç, orta seviyede kriterler ve varsa alt kriterler ve en alt seviyede alternatifler olacak şekilde hiyerarşik bir yapı ile ifade edilir.

2) Hiyerarşinin her seviyesinde ağırlıkların belirlenmesi için kriterlerin kendi arasında ve kriterlere göre alternatiflerin kendi arasında ikili karşılaştırılması sonucunda ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. n kriter bulunan bir karar verme problemi için ikili karşılaştırma matrisi (A) Denklem (1)'de gösterilmiştir. $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere;

$$A = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ C_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ C_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{matrix} = [a_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

C_i , i . kriteri ve a_{ij} , i . kriter ile j . kriterin ikili karşılaştırma değerini göstermektedir. İkili karşılaştırmalar matrisi Tablo 4'te verilen değerlendirme ölçeği [97],[98] ile doldurulur.

Tablo 4. AHP değerlendirme ölçeği.

Table 4. AHP rating scale.

| Önemi | Tanım |
|---------|-------------------|
| 1 | Eşit öneme sahip |
| 3 | Biraz önemli |
| 5 | Fazla önemli |
| 7 | Çok fazla önemli |
| 9 | Son derece önemli |
| 2,4,6,8 | Ara değerler |

3) Denklem (2) yardımıyla A ikili karşılaştırma matrisinin her bir ögesi ilgili sütun toplamına bölünerek Denklem (3)'te verilen normalize edilmiş matris (B) elde edilmektedir.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

$$B = \begin{matrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{matrix} = [b_{ij}]_{n \times n} \quad (3)$$

4) Denklem (4) yardımıyla normalize edilmiş matriste her bir satırdaki değerlerin ortalaması alınarak Denklem (5)'teki öncelik vektörü (W) hesaplanmaktadır. Burada w_i , i . kriterin önem ağırlığını temsil etmektedir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (4)$$

$$W = \begin{matrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{matrix} = [w_i]_{n \times 1} \quad (5)$$

5) Karar vericilerinin değerlendirmelerinin subjektif olması sebebiyle ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlı olup olmadığını belirleyebilmek için Denklem (6)'da verilen tutarlılık oranı (CR) hesaplanmalıdır. CR değerinin en fazla 0.10 olması istenmektedir. CR değeri 0.10'un üzerinde olan ikili karşılaştırma matrislerinde verilen cevaplar tekrar incelenip değerlendirilir.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Burada, tutarlılık indeksi (CI) katsayısı Denklem (7) yardımıyla hesaplanmaktadır. İhtiyaç duyulan rassal indeks (RI) değerleri için Tablo 5 kullanılmaktadır [97],[98].

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

Tablo 5. AHP yöntemi için RI değerleri.
Table 5. The RI values for AHP method.

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

λ_{max} değeri Denklem (8) ve (9) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$D = A \times W = [a_{ij}]_{n \times n} \times [w_i]_{n \times 1} = [d_i]_{n \times 1} \quad (8)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{w_i} \right)}{n} \quad (9)$$

6) Hiyerarşik yapının tüm seviyeleri için ikili karşılaştırma matrislerinden yola çıkarak önceki aşamalar uygulanarak m tane alternatifin n tane kriterden her birine göre ağırlıklarını ifade eden öncelik vektörleri elde edilir. Elde edilen öncelik vektörlerinin birleştirilmesi ile Denklem (10)'da verilen karar matrisi (DW) elde edilmektedir.

$$DW = [v_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

v_{ij} , i . kritere göre j . alternatifin ağırlığını göstermektedir. Karar matrisinin kriterlerin öncelik vektörü (W) ile çarpılması sonucunda Denklem (11)'de verilen sonuç vektörü (R) elde edilir. Burada, r_j , j . alternatifin final skorunu göstermektedir. Bu vektörde en yüksek skora sahip olan alternatif problemin çözümü için tercih edilmesi gereken alternatif olarak belirlenir.

$$R = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (11)$$

3.2 SWARA yöntemi

SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemi, birden fazla kriterin olduğu karar verme süreçlerinde uzman görüşlerine dayanarak kriter ağırlıklarının belirlenmesi için kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. SWARA yöntemi kullanım kolaylığı sayesinde birçok alanda kriter ağırlıklarını ve önem sırasını belirlemek için kullanılmıştır [101]. SWARA yönteminin aşamaları aşağıda verilmiştir [101]-[103]:

1) İlk olarak karar problemi tanımlanır ve problem hakkında bilgi ve deneyime sahip uzman(lar) belirlenir. Tanımlanan karar verme problemi için kullanılacak kriterler belirlenir.

2) Kriterler, uzman(lar) tarafından önemlerine göre azalan bir şekilde sıralanır. En önemli kriter ilk sırada yer alırken en az önemli kriter son sırada yer alır. Arada kalan kriterler ise önemlerine göre sıralanırlar.

3) İkinci kriterden başlayarak, uzman(lar) her kriterin göreceli önem düzeyini belirlemek için ($j - 1$). kriter ile j . kriter karşılaştırılır. Bu oran ortalama değer karşılaştırmalı önemi (s_j) olarak ifade edilir [101].

4) k_j katsayıları Denklem (12)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (12)$$

5) Düzeltilmiş ağırlıklar (q_j) Denklem (13)'teki gibi hesaplanır.

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (13)$$

6) Göreceli kriter ağırlıkları Denklem (14)'te verildiği şekilde belirlenir. Burada, w_j , j . kriterin göreceli ağırlığını temsil eder.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad (14)$$

3.3 TOPSIS yöntemi

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi karar verme problemlerinde birden fazla kriteri dikkate alarak alternatifler arasından en uygun olanı seçmede kullanılan karar verme yöntemlerinden biridir [104].

TOPSIS yöntemi karar vericilerin değerlendirmelerine dayanarak alternatiflerin hem pozitif ideal çözüme olan yakınlığını hem de negatif ideal çözümden olan uzaklığını aynı anda değerlendirerek sıralama yapar. TOPSIS değerlendirme yapabilmek için her bir kriterin ağırlığına ve her bir alternatifin her kriter açısından performans derecesine ihtiyaç duyar [105]. TOPSIS yönteminin aşamaları şöyledir [106],[107]:

1) İlk olarak Denklem (15)'te verildiği gibi karar matrisi (D) oluşturulur. $i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere;

$$D = \begin{bmatrix} A_1 & X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (15)$$

Burada, A_i , i . alternatifi ifade ederken X_j , j . kriteri temsil etmektedir. Ayrıca, x_{ij} , i . alternatifin j . kritere göre performans derecesini göstermektedir.

2) Denklem (16)'da verilen normalize edilmiş karar matrisi (R) Denklem (17) yardımıyla hesaplanır.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = [r_{ij}]_{m \times n} \quad (16)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (17)$$

3) Denklem (18)'deki ağırlıklı normalize karar matrisi (V) elde edilir. Denklem (19)'daki gibi her bir kriterin ağırlığı normalize karar matrisine yansıtılarak ağırlıklı normalize değerler (v_{ij}) elde edilir. Burada, w_j , j . kriterin ağırlığını gösterir ve önceden bilinmektedir.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = [v_{ij}]_{m \times n} \quad (18)$$

$$v_{ij} = r_{ij} \times w_j \quad (19)$$

4) Sırasıyla, Denklem (20) ve (21) kullanılarak pozitif ideal çözümler (A^*) ve negatif ideal çözümler (A^-) belirlenir. A^* ağırlıklı normalize karar matrisi üzerinde her bir kriter için en iyi performans değerini ve A^- en kötü değeri gösterir. J fayda kriterine ve J' maliyet kriterine karşılık gelmektedir.

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\} = \left\{ \left(\max_i v_{ij} | j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} | j \in J' \right) \right\} \quad (20)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \left\{ \left(\min_i v_{ij} | j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} | j \in J' \right) \right\} \quad (21)$$

5) Sırasıyla, Denklem (22) ve (23) kullanılarak alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözümlere uzaklığı hesaplanır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (22)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (23)$$

6) Her bir alternatif için yakınlık indeksi (C_i^*) Denklem (24) kullanılarak hesaplanır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad (24)$$

7) C_i^* , 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Ayrıca C_i^* değerinin büyük olması ilgili alternatifin daha iyi performans gösterdiği anlamına gelir. Alternatifler yakınlık indekslerine göre sıralanır ve en yüksek değere sahip alternatif en uygun olarak seçilir.

3.4 ARAS yöntemi

ARAS (Additive Ratio Assessment) yöntemi, çok kriterli karar verme projelerinde birden fazla kriterle göre alternatiflerin değerlendirilmesi ve en uygun alternatifin belirlenmesi için kullanılır [108]. ARAS yöntemi değerlendirme için kriterlerin önem derecesine ve bu kriterlere göre alternatiflerin performanslarına gerek duyar [109]. ARAS yönteminin aşamaları aşağıda verilmiştir [110]-[112]:

1) Alternatiflerin her bir kriterle göre değerlendirilmesiyle Denklem (25)'te verilen karar matrisi (X) oluşturulur. Burada, alternatif sayısı $i = 1, 2, \dots, m$ ile kriter sayısı $j = 1, 2, \dots, n$ ile gösterilmektedir. $i = 0, 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere;

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \dots & x_{0j} & \dots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

x_{ij} , j . kriterle göre i . alternatifin performans değerini ifade ederken x_{0j} , j . kriterin en uygun değerini göstermektedir. Karar probleminde, j . kriterin en uygun değeri bilinmediği durumlarda fayda kriterlerinin (maksimizasyon yönlü olanların) en uygun değeri Denklem (26) ve maliyet kriterlerinin (minimizasyon yönlü olanların) en uygun değeri Denklem (27) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Eğer } \max_i x_{ij} \text{ ise } x_{0j} = \max_i x_{ij} \text{ tercih edilebilir.} \quad (26)$$

$$\text{Eğer } \min_i x_{ij}^* \text{ ise } x_{0j} = \min_i x_{ij}^* \text{ tercih edilebilir.} \quad (27)$$

2) Denklem (28)'de gösterilen normalize karar matrisi (\bar{X}) hesaplanır. Normalize karar matrisi \bar{x}_{ij} değerlerinden oluşur.

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{01} & \dots & \bar{x}_{0j} & \dots & \bar{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{i1} & \dots & \bar{x}_{ij} & \dots & \bar{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \dots & \bar{x}_{mj} & \dots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (28)$$

\bar{x}_{ij} değerleri hesaplanırken kriter fayda özelliği göstererek maksimizasyon yönlü ise Denklem (29) kullanılır. Kriter maliyet özelliği göstererek minimizasyon yönlü ise Denklem (30)'da verildiği gibi performans değerleri ilk olarak fayda durumuna getirilir ve daha normalizasyon işlemi yapılır.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (29)$$

$$x_{ij} = \frac{1}{x_{ij}^*}; \quad \bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=0}^m x_{ij}^*} \quad (30)$$

3) Normalize karar matrisinin ağırlıklandırma işlemi yapılır. w_j , j . kriterin ağırlığını göstermek üzere Denklem (31) kullanılarak Denklem (32)'de verilen ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilir. Ağırlıklı normalize karar matrisi ise \hat{x}_{ij} değerlerinden oluşmaktadır.

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} w_j \quad (31)$$

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{01} & \dots & \hat{x}_{0j} & \dots & \hat{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{i1} & \dots & \hat{x}_{ij} & \dots & \hat{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{m1} & \dots & \hat{x}_{mj} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Kriter ağırlıkları için $0 < w_j < 1$ ve $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ koşulları yerine getirilmelidir.

4) Her bir alternatif için optimallik fonksiyonu (S_i) değerleri Denklem (33) ile hesaplanır ve alternatifler değerlendirilir. S_i , i . alternatifin optimallik fonksiyon değerini göstermektedir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} \quad (33)$$

Hesaplanan S_i değerinin büyüklüğü alternatifin etkinliği ile doğru orantılıdır.

5) Alternatiflerin K_i fayda değerleri hesaplanır ve alternatifler sıralanır. Denklem (34)'teki gibi K_i değerinin hesaplanması için alternatifin sahip olduğu S_i yani optimallik fonksiyonu değeri ile S_0 yani en iyi optimallik fonksiyonu değerinden faydalanılır.

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} \quad (34)$$

Hesaplanan K_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak alternatiflerin değerlendirilir.

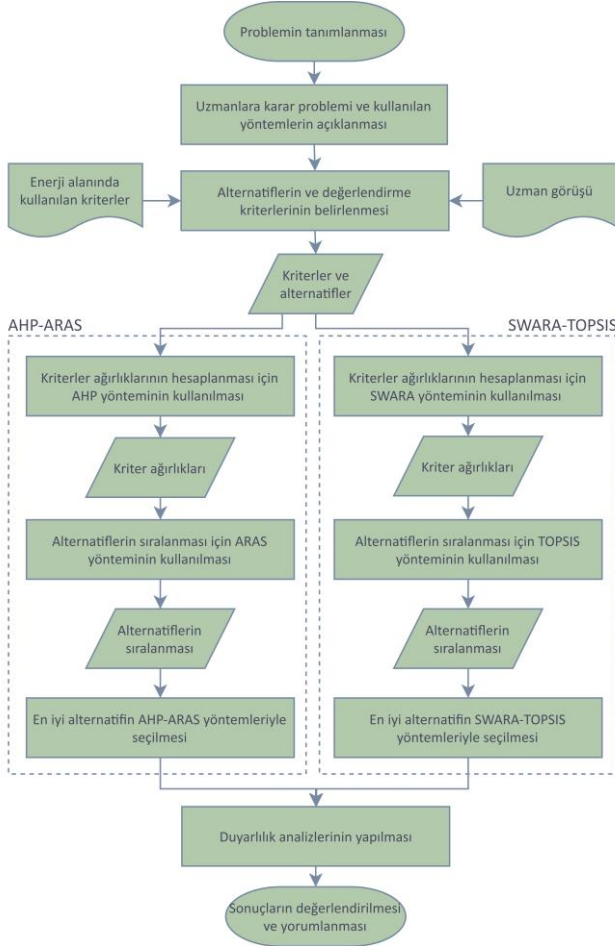
4 Uygulama

Denizli'de sürdürülebilir enerji üretimi için uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının belirlenmesi ve önceliklendirilmesi amacıyla çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada takip edilen aşamalar Şekil 8'de verilmiştir.

Yenilenebilir enerji alanında deneyim ve bilgi birikimine sahip üç akademisyen bu çalışmada uzman olarak yer alarak görüş

bildirmiştir. Uzmanlar araştırma konusu ve kullanılacak yöntemler ile ilgili önceden bilgilendirilmiş ve çalışmaya katılma konusunda onay vermiştir.

Karar verme sürecinde doğru kararların alınması uzmanların bilgi ve deneyimi ile direkt ilgili olup kriterlerin ve alternatiflerin doğru belirlenmesi de oldukça önemlidir. Bu nedenle bölgenin coğrafi, iklim ve jeolojik özellikleri konusunda yenilenebilir enerji durumunu değerlendirebilecek uzmanlar çalışmaya dahil edilmiştir. İlk aşamada, literatür ve uzman görüşlerine göre değerlendirme kriterleri ve yenilenebilir enerji alternatifleri belirlenmiştir. Ardından, uzman görüşleri ile AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS gibi çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanmıştır. AHP ve SWARA yöntemleri belirlenen kriter ağırlıklarının tespit edilmesi için uygulanırken ARAS ve TOPSIS yöntemleri yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanması için kullanılmıştır. Son olarak, Denizli ilindeki sürdürülebilir enerji üretiminde uygun stratejilerin belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar çeşitli duyarlılık analizleri ile incelenerek tartışılmıştır.



Şekil 8. Çalışmada takip edilen aşamalar.
Figure 8. Steps followed in the study.

4.1 Kriterlerin belirlenmesi

Karar verme sürecine etki eden kriterleri belirlemek amacıyla literatür araştırması sonucunda Tablo 6'da verilen 30'dan fazla kriter elde edilmiştir [13],[14],[19],[34],[113].

Tablo 6. Enerji alanında kullanılan değerlendirme kriterleri.
Table 6. Evaluation criteria used in the energy field.

| Ana başlık | Kriter |
|---------------|--|
| Teknik | Verimlilik, uygulanabilirlik, güvenilirlik, olgunluk, kurulum süresi, uygulama aşamasının süresi, performansın sürekliliği ve öngörülebilirliği, yerel teknik bilgi birikimi, rezerv miktarı vb. |
| Ekonomik | Yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, devlet teşviki, fonların kullanılabilirliği, ekonomik değer, hizmet ömrü, geri ödeme süresi, net bugünkü değer vb. |
| Sosyo-politik | İşgücü etkisi, siyasi kabul, toplumsal kabul, ulusal enerji politikası hedefleriyle uyumluluk, toplumsal fayda vb. |
| Çevresel | Kirlenici emisyonlar, sera gazı salınımı, arazi gereksinimleri, risk, atık bertarafı gereksinimi, gürültü, sürdürülebilirliğe katkı vb. |

Uzmanlar ilk olarak Tablo 6'da verilen kriterleri göz önüne alarak 12 tane kriter belirlemiştir. Ekonomik kriterler altında K1. yatırım maliyeti [51],[53],[70], K2. operasyon ve bakım maliyeti [53],[70], K3. devlet teşviki [51],[70], K4. ekonomik ömür [51],[53],[70]; teknik kriterler altında K5. kurulum süresi [51],[114], K6. verimlilik [51],[115], K7. rezerv miktarı [11],[115]; çevresel kriterler altında K8. sera gazı salınımı [51],[70], K9. sürdürülebilirliğe katkı [11],[116], K10. risk [11],[115] ve sosyo-politik kriterler altında K11. çalışan sayısı [70],[115], K12. sosyal kabul faktörü [51],[115] seçilmiştir. Yontar [115] çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının seçiminde kullanılan kriterlerin tanımını yapmıştır. Bu çalışmada, K1, K2, K5, K8 ve K10 minimizasyon kriteri iken K3, K4, K6, K7, K9, K11 ve K12 maksimizasyon kriteri olarak tanımlanmıştır.

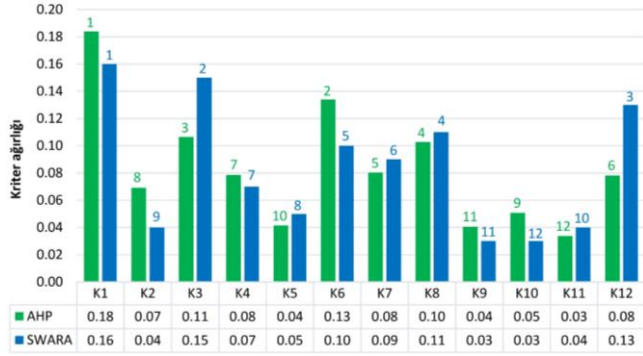
4.2 Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması

SWARA yöntemine göre, ilk olarak her bir uzman belirlenen kriterleri önem sırasına göre yukarıdan aşağıya sıralamıştır. Bu sıralamanın ardından her bir uzman ortalama değerini karşılaştırmalı önemi (s_j) değerlerini bildirmiştir ve bu değerler kullanılarak k_j , q_j ve w_j değerleri hesaplanmıştır. SWARA yönteminin uygulanması sonucunda her bir kriterin her bir uzman tarafından belirlenen kriter ağırlıkları ortaya çıkmıştır. Belirlenen kriter ağırlıklarının aritmetik ortalaması alınarak nihai kriter ağırlıkları bulunmuştur.

AHP yöntemine göre ise, her bir uzman ilk olarak kriterler arasında ikili karşılaştırma matrislerini hazırlamıştır. AHP yöntemi birden fazla değerlendirmenin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bir grubu oluşturan üyelerin kişisel değerlendirmeleri; tartışma yoluyla konu üzerinde uzlaşma sağlamak, üyelerin değerlendirmelerinden bir uzlaşma çıkarma görevini alacak bir aracıya başvurmak ya da her ikili değerlendirmeyi geometrik ortalama gibi matematiksel bir ifade yoluyla toplamak gibi çeşitli yöntemler ile birleştirilebilir. Bu çerçevede, üç uzmanın ikili karşılaştırma matrisleri geometrik ortalama yöntemi ile birleştirilmiş ve elde edilen ikili matrisi kullanılarak nihai kriter ağırlıkları belirlenmiştir. AHP ve SWARA yöntemleriyle elde edilen kriter ağırlıkları Şekil 9'da verilmiştir.

SWARA yöntemine göre en önemli yatırım maliyeti (0.16) kriteri olurken sırasıyla devlet teşviki (0.15) ve sosyal kabul faktörü (0.13) kriterleri takip etmiştir. SWARA yöntemine göre en az önemli kriter ise risk (0.03) olarak belirlenmiştir. AHP yöntemine göre ise, en önemli kriter yatırım maliyeti (0.18) olurken hemen ardından verimlilik (0.13) ve devlet teşviki (0.11) kriterleri gelmiştir. En az önemli kriter ise çalışan sayısı (0.03) olarak belirlenmiştir. AHP hesaplamalarında kullanılan

ikili karşılaştırma matrisi için CR değeri 0.08 olarak hesaplanmıştır yani kabul edilebilir sınırın ($CR < 0.1$) altında tespit edilmiştir.



Şekil 9. AHP ve SWARA ile belirlenen kriter ağırlıkları.
Figure 9. Criteria weights determined by AHP and SWARA.

4.3 Yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanması

Çalışmada alternatif olarak, Denizli ilinde potansiyeli bulunan güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları belirlenmiştir. Denizli ilinde en uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının belirlenmesi için uzmanlar tarafından belirlenen kriterler kullanılmıştır. AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları ARAS yöntemiyle, SWARA yönteminde elde edilen kriter ağırlıkları ise TOPSIS yöntemiyle birleştirilmiştir. Her bir uzmandan, belirlenen kriterlere göre alternatifleri puanlaması istenmiş ve verilen puanların aritmetik ortalaması alınarak ARAS ve TOPSIS yöntemlerindeki karar matrislerinde kullanılmıştır.

Çok kriterli karar verme problemlerinde, AHP ve SWARA kriter ağırlıklarının elde edilmesinde kullanılırken ARAS ve TOPSIS alternatiflerin sıralanmasında tercih edilen yöntemlerdir. Üçüncü bölümde belirtildiği gibi, her yöntemin farklı matematiksel hesaplaması ve değerlendirme yaklaşımı vardır. AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS gibi iki farklı hibrit yöntemle elde edilen sonuçların değerlendirmeye dahil edilmesi, sonuçların karşılaştırılmasına olanak tanıyarak karar verme sürecinin kapsamlı olmasına katkı sağlayacaktır.

ARAS yönteminin aşamalarının uygulanmasının ardından Tablo 7’de verildiği gibi her bir alternatif için optimalite fonksiyonu ve fayda değerleri hesaplanmış ve yenilenebilir enerji kaynakları sıralanmıştır.

Tablo 9. Kriter ağırlıkları için hazırlanan senaryolar.

Table 9. Scenarios prepared for criterion weights.

| Senaryo | Tanım | Kriterler | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | K9 | K10 | K11 | K12 |
|-----------|--|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Senaryo 0 | Mevcut senaryo | AHP | 0,16 | 0,04 | 0,15 | 0,07 | 0,05 | 0,1 | 0,09 | 0,11 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,13 |
| | | SWARA | 0,16 | 0,04 | 0,15 | 0,07 | 0,05 | 0,10 | 0,09 | 0,11 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,13 |
| Senaryo 1 | Ekonomik kriterler göz ardı edilmiştir. | AHP | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,23 | 0,14 | 0,18 | 0,07 | 0,09 | 0,05 | 0,14 |
| | | SWARA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,17 | 0,16 | 0,19 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,22 |
| Senaryo 2 | Teknik kriterler göz ardı edilmiştir. | AHP | 0,24 | 0,09 | 0,15 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,05 | 0,07 | 0,04 | 0,11 |
| | | SWARA | 0,21 | 0,05 | 0,20 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,17 |
| Senaryo 3 | Çevresel kriterler göz ardı edilmiştir. | AHP | 0,22 | 0,09 | 0,14 | 0,10 | 0,05 | 0,16 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,10 |
| | | SWARA | 0,19 | 0,05 | 0,18 | 0,08 | 0,06 | 0,12 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,16 |
| Senaryo 4 | Sosyo-politik kriterler göz ardı edilmiştir. | AHP | 0,20 | 0,08 | 0,12 | 0,09 | 0,05 | 0,15 | 0,09 | 0,11 | 0,05 | 0,06 | 0,00 | 0,00 |
| | | SWARA | 0,19 | 0,05 | 0,18 | 0,08 | 0,06 | 0,12 | 0,11 | 0,13 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |

Tablo 9’da verilen senaryolara göre Denizli ili için yenilenebilir enerji kaynaklarının sıralamalarındaki değişimler Şekil 10 ve Şekil 11’de sunulmuştur. Buradan görülebileceği üzere Denizli

Tablo 7. Enerji kaynaklarının AHP-ARAS ile sıralanması.

Table 7. Ranking of energy sources with AHP-ARAS.

| Enerji kaynakları | AHP-ARAS | | |
|-------------------|----------|---------|----------|
| | S_i | K_i | Sıralama |
| Optimum | 0.26335 | 1.00000 | |
| A1. Hidroelektrik | 0.16186 | 0.61462 | 5 |
| A2. Güneş | 0.24108 | 0.91545 | 1 |
| A3. Rüzgâr | 0.20323 | 0.77170 | 3 |
| A4. Jeotermal | 0.22044 | 0.83707 | 2 |
| A5. Biyokütle | 0.17339 | 0.65840 | 4 |

TOPSIS yönteminin aşamalarının uygulanmasının ardından Tablo 8’de verildiği gibi alternatiflerin pozitif ideal çözümlere ve negatif ideal çözümlere uzaklıkları ile alternatiflerin yakınlık indeksleri hesaplanmış ve yenilenebilir enerji kaynakları sıralanmıştır.

Tablo 8. Enerji kaynaklarının SWARA-TOPSIS ile sıralanması.

Table 8. Ranking of energy sources with SWARA-TOPSIS.

| Enerji kaynakları | SWARA-TOPSIS | | |
|-------------------|--------------|---------|---------|
| | S_i^+ | S_i^- | C_i^* |
| A1. Hidroelektrik | 0.09471 | 0.04324 | 0.31345 |
| A2. Güneş | 0.02717 | 0.10226 | 0.79004 |
| A3. Rüzgâr | 0.05152 | 0.06778 | 0.56815 |
| A4. Jeotermal | 0.03645 | 0.07687 | 0.67832 |
| A5. Biyokütle | 0.07017 | 0.07287 | 0.50944 |

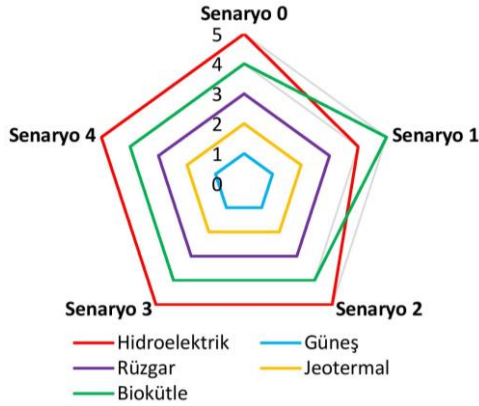
Tablo 7 ve Tablo 8’de verilen AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS yöntemlerinin sonuçlarına dayanarak, yenilenebilir enerji kaynakları en çok tercih edilenden en az tercih edilene doğru azalan bir şekilde sıralanmıştır. K_i ve C_i^* değerlerine göre Denizli ili için en uygun yenilenebilir enerji ve birincil yatırım alanı güneş enerjisi olarak belirlenmiştir. Jeotermal enerji ikinci en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olarak tespit edilmiştir. Değerlendirmede geri kalan enerji kaynakları ise sırasıyla rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi ve hidroelektrik enerji olarak sıralanmıştır. Denizli ili için ortaya çıkan sıralamanın, karar vericilerin ve strateji belirleyicilerin yatırım önceliklerini belirlemesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

4.4 Duyarlılık analizi

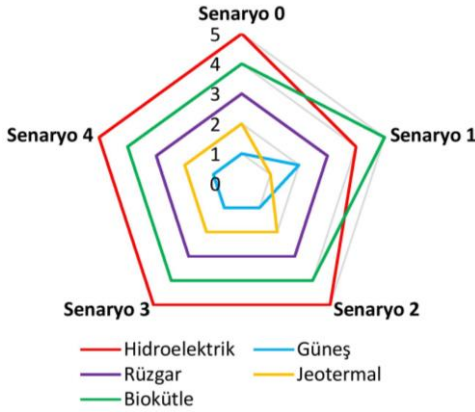
Bu bölümde, AHP ve SWARA yöntemlerinden elde edilen kriterler ağırlıkları değiştirilerek çeşitli duyarlılık analizleri yapılmıştır. Kriter ağırlıklarının önem düzeyinin değişmesi durumunda yenilenebilir enerji kaynaklarının sıralamasında ve önceliklerinde değişme olup olmayacağını belirlemek için dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Hali hazırda elde edilen kriter ağırlıklarının kullanıldığı durumu ifade eden Senaryo 0 ve hazırlan dört farklı senaryo için incelenen kriter ağırlıkları Tablo 9’da verilmiştir.

ili için Güneş enerjisi neredeyse tüm senaryolarda ilk sırada yer alırken jeotermal enerji ikinci sırada ve rüzgâr enerjisi üçüncü sırada bulunmaktadır. Ancak SWARA-TOPSIS yönteminde

Senaryo 1’de yani ekonomik kriterler göz ardı edildiğinde jeotermal enerji güneş enerjisinin önüne geçmiştir.



Şekil 10. AHP-ARAS için senaryo bazlı sıralama.
Figure 10. Scenario-based ranking for AHP-ARAS.



Şekil 11. SWARA-TOPSIS için senaryo bazlı sıralama.
Figure 11. Scenario-based ranking for SWARA-TOPSIS.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency-IRENA) tarafından hazırlanan 2022 yılı yenilenebilir enerji üretim maliyetleri raporuna göre jeotermal enerji için toplam kurulum maliyeti 3,478 \$/kWh iken güneş enerjisi için 876 \$/kWh olarak değerlendirilmiştir. Aynı raporda, birim elektrik üretim maliyeti jeotermal enerji için 0.056 \$/kWh iken güneş enerjisi için 0.049 \$/kWh olarak ifade edilmiştir [117]. Birçok kaynakta güneş ve jeotermal enerjisi santrallerinin ekonomik ömrünün 25 yıl olduğu kabul edilmektedir [118]. Aynı ekonomik ömre sahip iki yenilenebilir enerji kaynağından, jeotermal enerji santrallerinin toplam kurulum maliyetinin güneş enerjisi santrallerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Sektördeki teknolojik gelişmelerin ve pazarın yavaş yavaş olgunluğa ulaşmasının sonuçları olarak yenilenebilir enerji sistemlerindeki toplam kurulum maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri ve birim elektrik maliyetlerindeki düşüş eğilimleri ortaya çıkmaktadır. Hatta, ölçek ekonomisinin beraberinde getirdiği avantajlar bu düşüşlere katkı sağlamaktadır [117].

Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı projelere göre yatırım maliyetleri çok daha yüksek olan jeotermal enerjiye dayalı üretim tesisleri için Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) taban fiyatı 9.45 \$-cent/kWh, YEKDEM tavan fiyatı ise 11.55 \$-cent/kWh, YEKDEM mekanizması fiyat uygulama süresi 15 yıl olarak belirlenmiştir. Güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinde

YEKDEM taban fiyatı 4.95 \$-cent/kWh, YEKDEM tavan fiyatı ise 6.05 \$-cent/kWh, YEKDEM mekanizması fiyat uygulama süresi 10 yıl olarak belirlenmiştir [119]. Dolayısıyla, gelecek senaryolarda, güneş enerji sistemlerinin jeotermal enerji sistemlerine göre ekonomik açıdan daha cazip olup olmayacağını belirlemek için enerji sistemlerinin toplam kurulum maliyetlerinin yanı sıra maliyetleri direkt etkileyen teknolojik ilerlemelerin ve verimlilik oranlarının, enflasyon ve kur değişimlerindeki risklerin, devlet politikalarının ve teşviklerinin dikkatle izlenmesi ve yönetilmesi yatırım kararları için stratejik seviyede önem taşımaktadır.

4.5 Yönetimsel çıkarımlar

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin sonuçları daha belirgin hissedilmeye başlamış ve gelecek ile ilgili ekonomik kararlarda iklim etkisinin göz önünde bulundurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durum, araştırma ve geliştirme çalışmalarının hızlanması, çevresel etkiyi azaltan yatırımlara yönelme ve yenilenebilir enerjiye olan ilginin artması gibi gelişmelere yol açmıştır. Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki maliyetlerin düşme ve verimliliklerinin artma eğilimi bu enerji kaynaklarını çevresel ve ekonomik olarak daha da önemli getirmiştir.

Denizli Sera Gazı Envanteri raporuna göre 2020 yılında Denizli’de tüketilen elektrik miktarı 3,434 GWh ve üretilen elektrik miktarı 6,660 GWh olarak belirtilmiştir. Bu verilere göre Denizli’de tüketilen elektriğin yaklaşık 2 katı kadar elektrik üretimi yapılmaktadır. Aynı raporda, Denizli’nin toplam sera gazı salınımları 6.9 milyon ton CO₂e olarak hesaplanmıştır. Bu salınımların yaklaşık %42’si sabit kaynaklardan ve sabit kaynaklı salınımların ise %53’ü sanayi bina ve tesisleri kaynaklı, %28’i konut kaynaklı salınımlardan oluşmaktadır [79]. Denizli İklim Değişikliği Eylem Planında sera gazı salınımlarının 2030 yılında %21 azaltılması hedeflenmiştir [77]. Denizli doğalgaz ve kömür santrallerinin yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı açısından da potansiyeli olan bir ildir. Dolayısıyla, elektrik üretimi ve tüketimi kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile mümkündür.

Denizli ilinin toplam güneş radyasyonu değerlerinin ve güneşlenme süresinin Türkiye ortalamasının üzerindedir. Hatta, güneşlenme süresi yaz aylarında 12 saate ulaşmaktadır. Araştırmalar gelecek 15-20 yılda güneş enerjisinin en ucuz enerji kaynaklarından bir olacağını göstermektedir [120],[121]. Dolayısıyla, fotovoltaik paneller (PV), konsantre güneş enerjisi (CSP), güneş pili vb. güneş enerjisi dönüşüm teknolojileri için fırsatlar sunmaktadır. Denizli’de güneş enerjisine dayalı projelerin geliştirilmesi hem elektrik üretiminde çeşitlilik sağlayarak arz güvenliğinin artırılmasına hem de sera gazı salınımlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Tablo 3 verilerine bakıldığında Denizli ilindeki lisanslı elektrik üretiminin yaklaşık %11’i hidroelektrik santrallerden ve %18’i jeotermal enerji santrallerinden gelmektedir. Ör. iklim değişikliği ile gelecekte hidroelektrik santrallerin etkilenmesi durum söz konusu olabilir. Dolayısıyla elektrik arzında güvenliği ve çeşitliliği sağlamak açısından güneş enerjisi yatırımları potansiyel vadetmektedir.

Bu kapsamda, Denizli İklim Değişikliği Eylem Planında da sanayi tesislerinin çatılarında güneş paneli sistemlerinin kurulması ile elektrik tüketiminden kaynaklı salınımların azaltılması amaçlanmıştır [77]. Bu sayede, işletmeler kendi elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilir ve fazla enerjiyi şebekeye satarak şehirdeki elektrik talebini de azaltabilir. Denizli sanayisinde PV güneş enerjisi sistemlerinin kullanımının

önünde yatırım maliyetlerinin barındırdığı riskler ve verimliliklerin henüz düşük olması gibi engeller bulunmaktadır. Bu nedenle, sanayide PV güneş sistemlerine yapılan yatırımın teşvik edilmesi ve yaygınlaştırılması için paydaşlar tarafından da desteklenen teşvik ve finansal destek programlarının artırılması, özendirici koşulların hazırlanması gereklidir [122]. Ek olarak, Denizli'nin bölgelerindeki uygun alanlara güneş enerjisi santrallerinin kurulması teşvik edilebilir. Partigöç ve Tanrıkkulu [123] Denizli ilinde güneş enerjisi santrali projeler için arazi uygunluk haritası oluşturmuş ve Tavas, Bekilli, Çal, Baklan, Çivril, Kale ve Beyağaç ilçelerinde güneş enerji santrali kurulumu için uygun alanların olduğunu belirlemiştir. Bu alandaki yatırımları teşvik etmek için güneş enerjisi sistemlerinin avantajları ve kullanımı hakkında eğitimlerle toplumun bilinçlendirilmesi önemlidir.

Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, ekonomik ve çevresel avantajları nedeniyle Dünya genelinde kabul görmektedir. Literatürde birçok rapor ve makale, bu yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara göre daha az çevresel etkiye sahip olduğunu ve ekonomik olarak daha avantajlı olduğunu vurgulamaktadır [124]. Kullanım ömrünü tamamlayan güneş panelleri ve hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan bataryalar vb. teknolojilerin atık yönetimi ve geri dönüşümü, özellikle gelişmekte olan ülkelerde önemli sorunlar ortaya çıkarabilmektedir [125]. Duran vd. [126], güneş paneli kurulum maliyetlerindeki düşüşün ve verimliliklerindeki iyileşmelerin sektörde hızlı bir büyümeye yol açtığını ve güneş enerjisi sistemlerin kullanım ömürlerinin erken tamamlanması sonucunda ortaya çıkan atıkların güneş enerjisi maliyetlerini yaklaşık iki katına çıkarabileceğini belirtmiştir. Dolayısıyla, Türkiye ve Denizli ili için yenilenebilir enerji sistemlerin kullanımı her geçen gün artsa da yakın gelecekte bu sistemlerden ortaya çıkan atıklarla karşı karşıya kalınacağı bir gerçektir. Bu nedenle, uluslararası ve ulusal mevzuatlar, örneğin WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) direktifi [127] ve RoHS (Restriction of Hazardous Substances) direktifi [128] ile AEEE (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü) yönetmeliği [129] dikkate alınarak, ortaya çıkan atıkların yönetimi ve geri dönüşümü için döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda geri dönüşüm altyapılarının kurulması ve geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu tür yaklaşımların uygulanması, Denizli ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğinin artırılmasına ve bu kaynakların olumsuz çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, Denizli ilinin sürdürülebilir enerji üretimi ve yönetimine katkı sağlamak amacıyla çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının bir analizi sunulmuştur. Hibrit AHP-ARAS ve SWARA-TOPSIS yöntemlerinin kullanılması sonucunda, Denizli ili için uygun yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla Güneş enerjisi > Jeotermal enerji > Rüzgâr enerjisi > Biyokütle enerjisi > Hidroelektrik enerji olarak tespit edilmiştir. Bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve jeotermal kaynaklara yakın olması bu kaynakların öncelikli olarak değerlendirilmesi çıktısını desteklemektedir. Ayrıca, diğer iki enerji kaynağına göre daha düşük bir öncelik sırasına sahip olsa da rüzgâr enerjisi potansiyelinin de bölgedeki uygun alanlarda dikkate değer bir potansiyele sahip olduğu göz ardı edilmemelidir.

Çalışmada, ekonomik, çevresel, teknik ve sosyo-politik kriterler üzerinde çeşitli duyarlılık analizleri gerçekleştirilerek yatırım kararlarında ekonomik kriterlerin dikkatle takip edilmesi

gerektiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Ulusal Enerji Planı, Denizli İklim Değişikliği Eylem Planı ve Denizli Sera Gazı Envanterinde yer alan stratejilerle birleştirilerek bölgesel enerji politikalarının belirlenmesine destek olabilir. Bulgular ve kullanılan metodolojik yaklaşım, Türkiye'deki diğer illerde ya da bölgelerde benzer çalışmaların yapılmasını teşvik edebilir.

Çalışmada kullanılan yöntemler uzman görüşlerine bağlı olduğundan alternatiflerin değerlendirilmesine ilişkin uzman bilgisi kritiktir. Bu nedenle uzman seçimi dikkatle yapılmalıdır. Çalışmanın devamında, veri toplama aşamasında karar verme mekanizması içindeki daha fazla paydaşın katılımı sonuçları güçlendirmek adına önemlidir.

6 Conclusions

In this study, in order to contribute to sustainable energy production and management in Denizli, an analysis of renewable energy sources was conducted using multi-criteria decision-making methods. As a result of Hybrid AHP-ARAS and SWARA-TOPSIS methods, the suitable renewable energy sources for Denizli were determined as Solar energy > Geothermal energy > Wind energy > Biomass energy > Hydroelectric energy. The high solar energy potential of Denizli and its proximity to geothermal resources support the conclusion why these resources should be prioritized for the evaluation. Additionally, although having a lower priority, it should not be overlooked that wind energy potential has a remarkable potential in suitable areas in the region.

Several sensitivity analyses were also carried out based on economic, environmental, technical, and socio-political criteria, and it was highlighted that economic criteria should be carefully followed in investment decisions. The findings could support the determination of regional energy policies by combining them with strategies included in the National Energy Plan, Denizli Climate Change Action Plan, and Denizli Greenhouse Gas Inventory. The findings and methodological approach used in this study may encourage similar research in other provinces or regions of Turkey.

Since the methods used in the study depend on expert opinions, expert knowledge regarding the evaluation of alternatives is critical, thus requiring careful selection of experts. Moreover, involving more stakeholders in the decision-making mechanism during the data collection phase is crucial to strengthen and enhance the results.

7 Teşekkür

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, elde edilen sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

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

10 Kaynaklar

- [1] EIA. "International Energy Outlook 2021". U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, 2021.

- [2] Taha RA, Daim T. *Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review*. Editors: Daim T, Oliver T, Kim J. Research and Technology Management in the Electricity Industry, Green Energy and Technology, 17-30, Springer London, 2013.
- [3] Prasad S, Sheetal KR, Venkatramanan V, Kumar S, Kannoja S. *Sustainable Energy: Challenges and Perspectives*. Editors: Shah S, Venkatramanan V, Prasad R. Sustainable Green Technologies for Environmental Management, 175-197, Springer Singapore, 2019.
- [4] Demirbaş A. "Global Renewable Energy Resources". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(8), 779-792, 2006.
- [5] Yazdani-Chamzini A, Fouladgar MM, Zavadskas EK, Moini SHH. "Selecting the optimal renewable energy using multi criteria decision making". *Journal of Business Economics and Management*, 14(5), 957-978, 2013.
- [6] IEA. "Global Energy Review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021". International Energy Agency, Paris, 2021.
- [7] BP. "Energy Outlook 2022 Edition". British Petroleum Company, London, 2022.
- [8] Heydari A, Astiaso Garcia D, Keynia F, Bisegna F, De Santoli L. "Hybrid intelligent strategy for multifactor influenced electrical energy consumption forecasting". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 14(10-12), 341-358, 2019.
- [9] Koç E, Kaya K. "Enerji Kaynakları - Yenilenebilir Enerji Durumu". *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47, 2015.
- [10] Yılmaz M. "Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi". *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54, 2012.
- [11] Sağır H, Doğanalp B. "Bulanık Çok-Kriterli Karar Verme Perspektifinden Türkiye için Enerji Kaynakları Değerlendirmesi". *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(1), 233-256, 2016.
- [12] İlbarhar E, Kahraman C, Çebi S. "Evaluation of sustainable energy planning scenarios with a new approach based on FCM, WASPAS and impact effort matrix". *Environment, Development and Sustainability*, 25, 11931-11955, 2023.
- [13] Ertay T, Kahraman C, Kaya İ. "Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey". *Technological and Economic Development of Economy*, 19(1), 38-62, 2013.
- [14] Kahraman C, Kaya İ, Çebi S. "A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process". *Energy*, 34(10), 1603-1616, 2009.
- [15] Kumar A, Sah B, Singh A, Deng Y, He X, Kumar P, Bansal RC. "A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609, 2017.
- [16] Pohekar SD, Ramachandran M. "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365-381, 2004.
- [17] Shao M, Han Z, Sun J, Xiao C, Zhang S, Zhao Y. "A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection". *Renewable Energy*, 157, 377-403, 2020.
- [18] Siksnelyte I, Zavadskas EK, Streimikiene D, Sharma D. "An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues". *Energies*, 11(10), 2754, 2018.
- [19] Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, Zhao JH. "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278, 2009.
- [20] Haralambopoulos DA, Polatidis H. "Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework". *Renewable Energy*, 28(6), 961-973, 2003.
- [21] San Cristóbal JR. "Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method". *Renewable Energy*, 36(2), 498-502, 2011.
- [22] Büyüközkan G, Karabulut Y, Mukul E. "A novel renewable energy selection model for United Nations' sustainable development goals". *Energy*, 165, 290-302, 2018.
- [23] Haddad B, Liazid A, Ferreira P. "A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system". *Renewable Energy*, 107, 462-472, 2017.
- [24] Tasri A, Susilawati A. "Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 34-44, 2014.
- [25] Rani P, Mishra AR, Pardasani KR, Mardani A, Liao H, Streimikiene D. "A novel VIKOR approach based on entropy and divergence measures of Pythagorean fuzzy sets to evaluate renewable energy technologies in India". *Journal of Cleaner Production*, 238, 117936, 2019.
- [26] Yi SK, Sin HY, Heo E. "Selecting sustainable renewable energy source for energy assistance to North Korea". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 554-563, 2011.
- [27] Štreimikienė D, Šliogerienė J, Turskis Z. "Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania". *Renewable Energy*, 85, 148-156, 2016.
- [28] Ahmad S, Tahar RM. "Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia". *Renewable Energy*, 63, 458-466, 2014.
- [29] Amer M, Daim TU. "Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan". *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 420-435, 2011.
- [30] Al Garni H, Kassem A, Awasthi A, Komljenovic D, Al-Haddad K. "A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137-150, 2016.
- [31] Akash BA, Mamlook R, Mohsen MS. "Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process". *Electric Power Systems Research*, 52(1), 29-35, 1999.
- [32] Topcu YI, Ulengin F. "Energy for the future: An integrated decision aid for the case of Turkey". *Energy*, 29(1), 137-154, 2004.
- [33] Ulutaş BH. "Determination of the appropriate energy policy for Turkey". *Energy*, 30(7), 1146-1161, 2005.
- [34] Kahraman C, Kaya İ. "A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives". *Expert Systems with Applications*, 37(9), 6270-6281, 2010.

- [35] Kaya T, Kahraman C. "Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology". *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6577-6585, 2011.
- [36] Uysal F. "Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Seçimi için Graf Teori ve Matris Yaklaşım". *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, 13 (12. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması, İstatistik Sempozyumu Özel Sayısı), 23-40, 2011.
- [37] Boran FE, Boran K, Menlik T. "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, 2012.
- [38] Demirtas O. "Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning". *International Journal of Energy Economics and Policy*, 3(Special Issue for International Conference on Energy Economics and Policy), 22-33, 2013.
- [39] Ayan TY, Pabuçcu H. "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yatırım Projelerinin Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemi ile Değerlendirilmesi". *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 89-110, 2013.
- [40] Kabak M, Dağdeviren M. "Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology". *Energy Conversion and Management*, 79, 25-33, 2014.
- [41] Erdogan M, Kaya I. "An integrated multi-criteria decision-making methodology based on type-2 fuzzy sets for selection among energy alternatives in Turkey". *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 12(1), 1-25, 2015.
- [42] Pak BK, Albayrak YE, Erensal YC. "Renewable Energy Perspective for Turkey Using Sustainability Indicators". *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(1), 187-197, 2015.
- [43] Şengül Ü, Eren M, Eslamian Shiraz S, Gezder V, Şengül AB. "Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey". *Renewable Energy*, 75, 617-625, 2015.
- [44] Büyüközkan G, Gülerüz S. "An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey". *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448, 2016.
- [45] Çelikkbilek Y, Tüysüz F. "An integrated grey based multi-criteria decision making approach for the evaluation of renewable energy sources". *Energy*, 115, 1246-1258, 2016.
- [46] Balin A, Baraçlı H. "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, 2017.
- [47] Büyüközkan G, Gülerüz S. "Evaluation of Renewable Energy Resources in Turkey using an integrated MCDM approach with linguistic interval fuzzy preference relations". *Energy*, 123, 149-163, 2017.
- [48] Çolak M, Kaya İ. "Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 840-853, 2017.
- [49] Damgacı E, Boran K, Boran F.E. "Sezgisel Bulanık TOPSIS Yöntemi Kullanarak Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi". *Politeknik Dergisi*, 20(3), 629-637, 2017.
- [50] Karaca C, Ulutaş A, Eşgünoğlu M. "Türkiye'de Optimal Yenilenebilir Enerji Kaynağının COPRAS Yöntemiyle Tespiti ve Yenilenebilir Enerji Yatırımlarının İstihdam Artırıcı Etkisi". *Maliye Dergisi*, (172), 111-132, 2017.
- [51] Özcan EC, Ünlüsoy S, Eren T. "ANP ve TOPSIS yöntemleriyle Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi". *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 204-219, 2017.
- [52] Doğan H, Uludağ AS. "Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Değerlendirilmesi ve Uygun Tesis Yeri Seçimi: Türkiye'de Bir Uygulama". *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 14(2), 157-180, 2018.
- [53] Karaca C, Ulutaş A. "Entropi ve Waspaş Yöntemleri Kullanılarak Türkiye İçin Uygun Yenilenebilir Enerji Kaynağının Seçimi". *Ege Akademik Bakış*, 8(3), 483-494, 2018.
- [54] Tolga AÇ, Turgut ZK. "Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Bulanık TODIM Yöntemiyle Değerlendirilmesi". *Alphanumeric Journal*, 6(1), 49-68, 2018.
- [55] Karakaş E, Yıldırım OV. "Evaluation of Renewable Energy Alternatives for Turkey via Modified Fuzzy AHP". *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(2), 31-39, 2019.
- [56] Ayağ Z, Samanlıoğlu F. "Fuzzy AHP-GRA approach to evaluating energy sources: a case of Turkey". *International Journal of Energy Sector Management*, 14(1), 40-58, 2020.
- [57] Derse O, Yontar E. "SWARA-TOPSIS Yöntemi ile En Uygun Yenilenebilir Enerji Kaynağının Belirlenmesi". *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 31(3), 389-410, 2020.
- [58] Karaaslan A, Aydın S. "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği". *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 34(4), 1351-1375, 2020.
- [59] Kayahan Karakul A. "Bulanık AHP Yöntemi ile Yenilenebilir Enerji Kaynağı Seçimi". *Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (19), 127-150, 2020.
- [60] Karatop B, Taşkan B, Adar E, Kubat C. "Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach". *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106958, 2021.
- [61] Ecer F, Pamucar D, Mardani A, Alrasheedi M. "Assessment of renewable energy resources using new interval rough number extension of the level based weight assessment and combinative distance-based assessment". *Renewable Energy*, 170, 1156-1177, 2021.
- [62] Şahin M. *Chapter 4: Evaluation of Renewable Energy Options based on Integrated Best-Worst and Additive Ratio Assessment*. Editors: Kalkancı M, Günday A. Research & Reviews in Engineering, 1st Edition, 77-92. Ankara, Gece Publishing, 2021.
- [63] Bilgili F, Zaralı F, İlgün MF, Dumrul C, Dumrul Y. "The evaluation of renewable energy alternatives for sustainable development in Turkey using intuitionistic fuzzy-TOPSIS method". *Renewable Energy*, 189, 1443-1458, 2022.
- [64] Yontar E. "Selection of suitable renewable energy sources for Turkey: SEM-COPRAS method integrated solution". *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6131-6146, 2023.

- [65] Aydın T, Kaçtıoğlu S. "The Selection of Appropriate Renewable Energy Source For Turkey by Using CRITIC and WASPAS Methods". *Istanbul Commerce University Journal of Technologies and Applied Sciences*, 6(2), 53-80, 2024.
- [66] Büyüközkan G, Karabulut Y, Göçer F. "Spherical Fuzzy Sets based Integrated DEMATEL, ANP, VIKOR Approach and its application for Renewable Energy Selection in Turkey". *Applied Soft Computing*, 111465, 2024.
- [67] Ayçin E, Arsu T. "CODAS ve Entropi Yöntemleri ile Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Düzey 1 Bölgelerine Göre İncelenmesi". *Avrasya Uluslararası Araştırmalar Dergisi*, 7(18), 425-447, 2019.
- [68] Alkan Ö, Albayrak ÖK. "Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA". *Renewable Energy*, 162, 712-726, 2020.
- [69] Darende P, Rouyendegh BD, Khaniyev T. *Regional Examination of Energy Investments in Turkey Using an Intuitionistic Fuzzy Method*. Editors: Topcu YI, Özaydın Ö, Kabak Ö, Önsel Ekici Ş. Multiple Criteria Decision Making: Beyond the Information Age, 175-201, Springer International Publishing, 2021.
- [70] Bilgiç S, Torğul B, Paksoy T. "Sürdürülebilir Enerji Yönetimi için BWM Yönetimi ile Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi". *Verimlilik Dergisi*, (2), 95-110, 2021.
- [71] Gök Kısa AC. "Evaluation of renewable energy sources in TR83 region by CRITIC based grey relational analysis approach". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 542-548, 2021.
- [72] Karaaslan A, Adar T, Delice EK. "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, 2022.
- [73] Baris K, Kucukali S. "Availability of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective". *Energy Policy*, 42, 377-391, 2012.
- [74] ETKB. "Türkiye Ulusal Enerji Planı". T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2022.
- [75] ETKB. "2019-2023 Stratejik Planı". T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2019.
- [76] Güray BŞ, Merdan E. "Türkiye Yenilenebilir Enerji Görünümü 2022". Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi, İstanbul, Türkiye, 2022.
- [77] DBB, "Denizli İklim Değişikliği Eylem Planı 2016-2030". Denizli Büyükşehir Belediyesi, Denizli, Türkiye, 2019.
- [78] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Jeotermal". <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal> (19.03.2024).
- [79] DBB, "Denizli Sera Gazı Envanteri 2020". Denizli Büyükşehir Belediyesi, Denizli, Türkiye, 2022.
- [80] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). "Enerji haritaları: Jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası". <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita> (20.03.2024).
- [81] Kozak M. "Denizli İli Jeotermal Enerji Kaynakları ve Kullanım Alanlarının Araştırılması". *Yekarum*, 5(1), 1-11, 2020.
- [82] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Güneş". <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (23.03.2024).
- [83] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. "Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)". <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (24.03.2024).
- [84] GEKA. "Güney Ege Bölgesi (Aydın-Denizli-Muğla) Yenilenebilir Enerji Çalışma Raporu". Güney Ege Kalkınma Ajansı, 2011.
- [85] Güven Ş. "Fotovoltaik Panel Yüzey Sıcaklığının Denizli İli için Çıkış Gücü ve Verim Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi". *Mühendis ve Makina*, 63(707), 429-442, 2022.
- [86] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Rüzgâr". <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> (24.03.2024).
- [87] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. "Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA)". <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/> (24.03.2024).
- [88] Yıldırım HH. "Rüzgâr enerjisi santral yatırımlarında geri ödeme süresinin monte carlo simülasyonu ile belirlenmesi". *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 28(82), 76-104, 2017.
- [89] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Biyokütle". <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-biyokutle> (24.03.2024).
- [90] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. "Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası (BEPA)". <https://bepa.enerji.gov.tr/> (24.03.2024).
- [91] Işık S, Yavuz S. "Biyokütleden Elde Edilen Biyoyakıtlara Genel Bir Bakış". *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 193-201, 2022.
- [92] Yaşar M. "Investigation of hydropower energy potential and policy shift from natural gas to hydropower energy in Turkey". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1014-1023, 2018.
- [93] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Hidrolik". <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik> (25.03.2024).
- [94] Enerji Atlası. "Denizli HES Potansiyeli Haritası". <https://www.enerjiatlas.com/hes-haritasi/denizli> (25.03.2024).
- [95] Devlet Su İşleri. "Son 19 Yılda Denizli'de 75 Adet Sulama Tesisini Tamamladık". Devlet Su İşleri (DSİ). <https://www.dsi.gov.tr/Haber/Detay/5613> (25.03.2024).
- [96] Triantaphyllou E, Kovalerchuk B, Mann L, Knapp GM. "Determining the most important criteria in maintenance decision making". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(1), 16-28, 1997.
- [97] Saaty RW. "The analytic hierarchy process—what it is and how it is used". *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176, 1987.
- [98] Saaty TL. *What is the Analytic Hierarchy Process?*. Editors: Mitra G, Greenberg HJ, Lootsma FA, Rijkaert MJ, Zimmermann HJ. Mathematical Models for Decision Support, 109-121, Springer Berlin Heidelberg, 1988.
- [99] Xia W, Wu Z. "Supplier selection with multiple criteria in volume discount environments". *Omega*, 35(5), 494-504, 2007.
- [100] Saaty TL, Vargas LG. *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [101] Keršulienė V, Zavadskas EK, Turskis Z. "Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (Swara)". *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243-258, 2010.
- [102] Karabašević D, Stanujkić D, Urošević S. "The MCDM Model for Personnel Selection Based on SWARA and ARAS Methods". *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 20(77), 43-52, 2015.
- [103] Zavadskas EK, Stević Ž, Tanackov I, Prentkovskis O. "A novel multicriteria approach-rough step-wise weight assessment ratio analysis method (R-SWARA) and its application in logistics". *Studies in Informatics and Control*, 27(1), 97-106, 2018.
- [104] Hwang CL, Yoon K. *Methods for Multiple Attribute Decision Making*. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-Art Survey, 58-191, Springer Berlin Heidelberg, 1981.
- [105] Chen MF, Tzeng GH. "Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country". *Mathematical and Computer Modelling*, 40(13), 1473-1490, 2004.
- [106] Monjezi M, Dehghani H, Singh TN, Sayadi AR, Gholinejad A. "Application of TOPSIS method for selecting the most appropriate blast design". *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 95-101, 2012.
- [107] Marzouk M, Sabbah M. "AHP-TOPSIS social sustainability approach for selecting supplier in construction supply chain". *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100034, 2021.
- [108] Zavadskas EK, Turskis Z. "A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making". *Ukio Technologinis ir Ekonominis Vystymas*, 16(2), 159-172, 2010.
- [109] Dadelo S, Turskis Z, Zavadskas EK, Dadelienė R. "Multiple criteria assessment of elite security personal on the basis of ARAS and expert methods". *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 46(4), 65-88, 2012.
- [110] Sliogerienė J, Turskis Z, Streimikiene D. "Analysis and Choice of Energy Generation Technologies: The Multiple Criteria Assessment on the Case Study of Lithuania". *Energy Procedia*, 32, 11-20, 2013.
- [111] Adalı EA, Işık AT. "Air conditioner selection problem with COPRAS and ARAS methods". *Manas Journal of Social Studies*, 5(2), 124-138, 2016.
- [112] Kenger MD, Organ A. "Banka Personel Seçiminin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden Entropi Temelli ARAS Yöntemi ile Değerlendirilmesi". *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(4), 152-170, 2017.
- [113] Kahraman C, Cebi S, Kaya İ. "Selection among Renewable Energy Alternatives Using Fuzzy Axiomatic Design: The Case of Turkey". *Journal of Universal Computer Science*, 16(1), 82-102, 2010.
- [114] Erdem S, Gencer C, Atmaca E, Karaca T, Kızılkaya Aydoğan E. "Türkiye'de enerji santrallerinin AHP yöntemi ile seçimi". *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (EYİ 2013 Özel Sayısı), 243-252, 2014.
- [115] Yontar E. "Yenilenebilir Enerji Çalışmalarında Bölge Seçimi Problemlerini Etkileyen Kriterlerin Önem Sıralarının Belirlenmesi". *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 475-491, 2022.
- [116] Kurt MB, Türkan YS. "Bulanık Topsis Uygulaması ile Güneş Enerji Sistemleri Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi". *Eurasian Academy of Sciences Social Sciences Journal*, (45), 160-174, 2022.
- [117] IRENA. "Renewable Power Generation Costs in 2022". International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, BAE, 2023.
- [118] Kaya K, Koç E. "Enerji üretim santralleri maliyet analizi". *Mühendis ve Makina*, 56, 660, 61-68, 2015.
- [119] Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM). "1/7/2021 Tarihinden 31/12/2030 Tarihine Kadar İşletmeye Giren/Girecek YEK Belgeli Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretim Tesisleri İçin Uygulanacak Fiyatlar ve Süreler ile Fiyatların Güncellenmesine İlişkin Karar (Karar Sayısı: 7189)". Resmi Gazete, 32177, 01 Mayıs 2023.
- [120] Kannan N, Vakeesan D. "Solar energy for future world: - A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105, 2016.
- [121] Kabir E, Kumar P, Kumar S, Adelodun AA, Kim KH. "Solar energy: Potential and future prospects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900, 2018.
- [122] Türkmen MA, Bayhan M, Duran Z. "Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi: Denizli ili uygulanabilirlik araştırması". *The Journal of Academic Social Science*, (25), 151-165, 2019.
- [123] Partigöç NS, Tanrıku YS. "Güneş Enerjisi Santrallerinin (GES) Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Yöntemi ile Yer Seçimi: Denizli İli Örneği". *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (60), 401-418, 2024.
- [124] Capraz O, Gungor A, Mutlu O, Sagbas A. "Optimal sizing of grid-connected hybrid renewable energy systems without storage: a generalized optimization model". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-34, 2020.
- [125] UNEP. "Africa Waste Management Outlook". United Nations Environment Programme, Nairobi, 2018.
- [126] Duran AS, Atasu A, Van Wassenhove LN. "Cleaning after solar panels: applying a circular outlook to clean energy research". *International Journal of Production Research*, 60(1), 211-230, 2022.
- [127] European Parliament and Council of the European Union. "Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)". *Official Journal of the European Union*, L 197/38, 2012.
- [128] European Parliament and Council of the European Union. "Directive 2011/65/EU on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)". *Official Journal of the European Union*, L 174/88, 2011.
- [129] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği". Resmi Gazete, 28300, 2012.