

Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Küresel Bulanık AHS ve TOPSIS Entegrasyonu Kullanarak Sıralanması: Alanya Örneği

Kaan Özdemir^{1*}, Fethullah Göçer², Muhammed Talal Elsellum¹, Nazmi Şener¹

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye.

*200201006@ogr.alanya.edu.tr

Özet

Bu çalışma, Alanya bölgesi için en uygun yenilenebilir enerji kaynağını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, enerji alternatiflerinin değerlendirilmesinde kriter ağırlıklarını belirlemek için Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), nihai sıralama için ise Küresel Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle olmak üzere dört yenilenebilir enerji seçeneği; ekonomik performans, teknik performans, çevresel ve sosyal etki başlıklarında analiz edilmiştir. Öncelikle Küresel Bulanık AHS ile kriterlerin önem düzeyleri belirlenmiş, ardından Küresel Bulanık TOPSIS yöntemi ile enerji alternatifleri sıralanmıştır. Sonuçlara göre, güneş enerjisi Alanya için en yüksek potansiyele sahip kaynak olarak öne çıkmıştır. Onu sırasıyla rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle enerjileri izlemiştir. Bu sonuçlar, bölgenin yenilenebilir enerji potansiyelini ortaya koymasından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, Küresel bulanık kümeler, Analitik hiyerarşi süreci (AHS), İdeal çözüme benzerliğe göre tercih sıralama tekniği (TOPSIS), Bölgesel enerji planlaması.

Ranking of Renewable Energy Alternatives by an Integrated Spherical Fuzzy AHP and TOPSIS: Case of Alanya

Abstract

This study aims to determine the most suitable renewable energy source for the Alanya region. In this context, the Global Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weights of the evaluation criteria, while the Global Fuzzy TOPSIS method was applied for the final ranking. Four renewable energy alternatives—solar, wind, hydroelectric, and biomass—were evaluated based on economic performance, technical performance, environmental impact, and social impact. First, the importance levels of the criteria were determined using the Global Fuzzy AHP method. Then, the energy alternatives were ranked according to their potential performance using the Global Fuzzy TOPSIS method. The results indicate that solar energy has the highest potential for the Alanya region. It is followed by wind, hydroelectric, and biomass energy, respectively. These findings are important in terms of revealing the renewable energy potential of the region.

Keywords: Renewable energy, Spherical fuzzy sets, Analytic hierarchy process (AHP), Technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS), Regional energy planning.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri, giderek artan bir endişe kaynağı hâline gelmektedir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerjinin önemi çevresel, ekonomik ve toplumsal açılardan büyük ölçüde artmıştır. Karbon emisyonlarının azaltılması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi çevresel faydalar, fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının temel nedenlerindendir. Böylece iklim değişikliğiyle mücadele edilirken, insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler de azaltılmaktadır. Ekonomik açıdan, yenilenebilir enerji kaynakları ülkelerin enerji bağımsızlığını artırmakta ve fosil yakıt ithalatına harcanan maliyetleri düşürmektedir. Ayrıca, bu sektörlerdeki teknolojik yenilikler ve artan istihdam fırsatları ekonomilerin canlanmasına katkı sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji tesislerinin düşük işletme maliyetleri ise uzun vadede önemli tasarruflar sağlamaktadır. Toplumsal açıdan ise yenilenebilir enerji kullanımı, hava kirliliğini azaltarak toplum sağlığını iyileştirmekte ve kırsal alanlarda enerjiye erişimi artırmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayan yenilenebilir enerji, teknolojik ilerlemeler sayesinde giderek daha verimli ve maliyet etkin hale gelmektedir. Bu nedenlerle, yenilenebilir enerjinin kullanımı küresel enerji politikalarının şekillenmesinde ve sürdürülebilir bir gelecek inşa etme çabalarında merkezi bir rol oynamaktadır.

Türkiye özelinde Alanya, coğrafi ve iklimsel özellikleri sayesinde çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Alanya, yüksek güneşlenme süresi ve yoğun güneş ışığı alması nedeniyle güneş enerjisi üretimi için ideal bir bölgedir; yıllık ortalama güneşlenme süresi oldukça uzun olan Alanya, güneş panelleri ve fotovoltaik sistemler için elverişli koşullar sunmaktadır. Ayrıca, sahil kesimleri ve yüksek rakımlı bölgeleri rüzgâr enerjisi üretimi için uygun olup, kıyı rüzgârlarının düzenli ve güçlü olması sayesinde rüzgâr türbinleriyle sürdürülebilir ve temiz enerji üretimi sağlanabilir. Alanya'nın tarım ve orman ürünleri açısından zengin olması da biyokütle enerjisi potansiyelini artırmaktadır; tarımsal atıklar, orman atıkları ve organik atıklar biyokütle enerjisi üretiminde kullanılabilir ve bu atıklar biyogaz tesislerinde enerjiye dönüştürülerek hem elektrik hem de ısı üretiminde değerlendirilebilir. Büyük nehirlerin olmamasına rağmen, Alanya'da küçük ölçekli hidroelektrik projeleri (mikro hidroelektrik santraller) için potansiyel bulunmaktadır. Bu tür projeler, yerel su kaynaklarının enerji üretiminde kullanılmasını sağlar ve özellikle kırsal alanlarda enerji erişimini artırabilir. Alanya'nın bu potansiyel kaynaklarının etkin şekilde değerlendirilmesiyle, bölgenin enerji ihtiyacı sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemlerle karşılanabilir.

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), karmaşık karar verme süreçlerinde birden fazla kriterin aynı anda değerlendirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçilmesinde ÇKKV'nin kullanılmasının çeşitli nedenleri vardır. Öncelikle, ÇKKV kapsamlı değerlendirme yapabilme özelliğiyle önemli bir avantaj sunar. Yenilenebilir enerji projeleri; teknik, ekonomik, çevresel ve toplumsal faktörler gibi farklı kriterlere bağlı olarak değerlendirilmelidir. ÇKKV, bu faktörlerin tamamını dikkate alarak kapsamlı ve sistematik bir analiz yapılmasını mümkün kılar. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle ve hidroelektrik gibi seçenekler farklı maliyetler, verimlilik oranları, çevresel etkiler ve toplumsal kabul düzeylerine sahiptir. ÇKKV, bu kriterleri sistematik bir şekilde değerlendirerek en uygun seçeneğin belirlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, ÇKKV çelişkili kriterlerin yönetimini de sağlar. Yenilenebilir enerji projelerinde bazı kriterler birbirleriyle çelişebilir; örneğin, en düşük maliyetli seçenek çevresel açıdan en zararlı olabilir. ÇKKV, bu tür çelişkileri dengeleyerek en uygun çözümü bulmak için sistematik bir yaklaşım sunar.

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), 1970'lerin sonlarında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, ÇKKV problemlerini çözmek amacıyla tasarlanmış olup, zamanla ÇKKV yöntemleri arasında önemli bir yer edinmiştir. AHS, karar verme sürecinde kriterlerin göreceli önemini belirlemeyi ve bu kriterlere dayalı olarak alternatifleri değerlendirmeyi sağlar [1]. AHS yöntemi, işletme yönetimi, mühendislik, sağlık, eğitim ve çevre yönetimi gibi çeşitli disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Küresel Bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS), Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, en iyi alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın

olanı seçme ilkesine dayanır; aynı zamanda, negatif ideal çözüme en uzak olan alternatif tercih edilir. TOPSIS, alternatiflerin tercih sıralamasını belirleme ve en uygun seçimi yapma konusunda yaygın şekilde kullanılan etkili bir metodolojidir [2].

Enerji üretiminin sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri, küresel ölçekte giderek daha fazla önem kazanan konular arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı, çevresel, ekonomik ve toplumsal faydaları nedeniyle enerji politikalarının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Ancak, belirli bir bölge için en uygun yenilenebilir enerji alternatifinin seçimi, çok sayıda ve çoğu zaman çelişen kriterlerin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir karar verme sürecidir. Bu çalışma, Türkiye'nin Alanya bölgesi için en uygun yenilenebilir enerji kaynağını belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, karar sürecinde belirsizlikleri daha etkin modellemek amacıyla Küresel Bulanık AHS yöntemi kriter ağırlıklarının belirlenmesinde; Küresel Bulanık TOPSIS yöntemi ise enerji alternatiflerinin sıralanmasında kullanılmıştır. Bu iki yöntem, uzman yargılarındaki belirsizlikleri küresel bulanık kümeler aracılığıyla daha esnek ve doğru biçimde temsil edebilme kapasiteleri nedeniyle tercih edilmiştir. Değerlendirme süreci, literatür doğrultusunda belirlenen ve yenilenebilir enerji planlamasında yaygın olarak kullanılan dört temel kriter seti üzerinden gerçekleştirilmiştir: ekonomik performans, teknik performans, çevresel etki ve sosyal etki. Bu çok boyutlu yapı sayesinde, enerji alternatifleri hem nicel hem de nitel faktörler ışığında kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Bu çalışmanın literatüre katkısı, küresel bulanık küme tabanlı ÇKKV yöntemlerinin bölgesel enerji planlamasında uygulandığı özgün bir model sunmasıdır. Aynı zamanda, Alanya özelinde yapılan bu uygulama, benzer coğrafi ve sosyoekonomik yapıya sahip bölgeler için de yol gösterici niteliktedir. Böylece çalışma, karar vericilere sürdürülebilir ve yerel koşullara uygun enerji stratejileri geliştirme konusunda metodolojik ve pratik katkılar sağlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yenilenebilir enerji kaynaklarının seçimi, çok sayıda ve birbirinden farklı kriterin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir karar verme sürecidir. Bu nedenle, son yıllarda ÇKKV yöntemleri, yenilenebilir enerji projelerinin değerlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Literatürde farklı ÇKKV tekniklerinin kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır; bu çalışmalar enerji kaynaklarının ekonomik, teknik, çevresel ve sosyal açılardan karşılaştırılmasını mümkün kılarak karar vericilere kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Özellikle bulanık mantık temelli yöntemler, belirsizliklerin ve uzman görüşlerindeki sübjektifliğin etkili bir şekilde modellenebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Örneğin, Küresel Bulanık AHS ve TOPSIS gibi entegre yaklaşımlar, kriter ağırlıklarının hassas şekilde belirlenmesi ve alternatiflerin performanslarının karşılaştırılmasında anlamlı sonuçlar sağlamaktadır. Literatürde yapılan incelemeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının seçiminde rüzgâr ve güneş enerjisinin ön plana çıktığını göstermektedir. Bununla birlikte, bölgesel özelliklere bağlı olarak hidroelektrik ve biyokütle gibi diğer alternatifler de önemli roller üstlenmektedir. Çalışmalar genellikle çok sayıda kriterin eş zamanlı değerlendirilmesini sağlayan yöntemlerle, enerji alternatiflerinin farklı boyutlardaki performanslarını ölçmekte ve önceliklendirmektedir. Bu bağlamda, bölgesel enerji planlamasında yerel koşulların dikkate alınması ve kapsamlı kriter setlerinin kullanılması önem taşımaktadır. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji seçimi konusunda yapılan bu tür çalışmalar, karar vericilerin sürdürülebilir ve ekonomik açıdan uygun enerji stratejileri geliştirmesine önemli katkılar sunmaktadır. Bu çerçevede, aşağıda değinilen mevcut literatürde bulunan çalışmalar, yenilenebilir enerji seçiminde uygulanan yöntemler ve ulaşılan sonuçlar hakkında kapsamlı bir perspektif sunmaktadır.

Büyükközkın vd. (2024) çalışmasında, Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynakları arasında en uygun seçeneği belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, karar verici belirsizliklerini daha iyi yansıtabilen Küresel Bulanık Küme temelli entegre bir Çok Kriterli Karar Verme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Yöntem, kriterler arası nedensel ilişkileri belirlemek için Küresel Bulanık-DEMATEL, kriter ağırlıklarını hesaplamak için KB-Analitik Ağ Süreci (AAS) ve alternatifleri sıralamak için KB-VIKOR tekniklerini grup karar verme (GDM) ortamında birleştirmektedir. Çalışmada, çevresel, teknik, ekonomik ve sosyo-politik

olmak üzere dört ana başlık altında toplanan toplam 15 kriter kullanılarak biyogaz, jeotermal, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik olmak üzere beş alternatif değerlendirilmiştir. Uygulama sonucunda, Türkiye için güneş ve rüzgâr enerjisinin birlikte en uygun yenilenebilir enerji kaynakları olduğu belirlenmiştir [3]. Bu yöntem, karar vericilerin görüşlerini daha doğru yansıtarak karar sürecini geliştirmekte ve benzer enerji seçimi problemlerine de uygulanabilir nitelikte bulunmuştur.

Rani vd. (2019) çalışmalarında, Hindistan'daki yenilenebilir enerji teknolojileri arasında en uygun olanı belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, karar verici belirsizliklerini daha iyi yansıtmak amacıyla Pisagorcu bulanık kümelerle dayalı yeni bir VIKOR yaklaşımı geliştirmişlerdir. Çalışmada, biyokütle, rüzgâr, jeotermal, güneş ve hidroelektrik olmak üzere beş yenilenebilir enerji alternatifi, ekonomik, çevresel ve teknik boyutları kapsayan toplam 13 kriter kullanılarak analiz edilmiştir. Kriter ağırlıkları entropi yöntemiyle belirlenmiş, alternatiflerin değerlendirilmesinde ise aykırılık ölçütlerinden yararlanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, Hindistan koşullarında rüzgâr enerjisi en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olarak öne çıkmış, ardından sırasıyla güneş, biyokütle, jeotermal ve hidroelektrik alternatifleri gelmiştir [4]. Çolak ve Kaya (2017) çalışmalarında, Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynakları arasında en uygun olanı belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, karar verici belirsizliklerini daha etkili yansıtabilmek amacıyla, Aralık Tip-2 bulanık kümelerle dayalı Analitik Hiyerarşi Süreci ve Tereddütlü Bulanık TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu ile oluşturulan bütünlük birçok kriterli karar verme (ÇKKV) modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada, hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, dalga ve hidrojen olmak üzere yedi yenilenebilir enerji alternatifi; teknik, ekonomik, çevresel, teknolojik, sosyo-politik ve enerji kaynağının niteliği olmak üzere altı ana kriter ve yirmi dokuz alt kriter çerçevesinde değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları, Aralık Tip-2 Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemiyle hesaplanmış; alternatiflerin önceliklendirilmesi ise Tereddütlü Bulanık TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir [5]. Gerçek bir uygulama kapsamında uzman görüşleriyle yapılan analiz sonucunda, Türkiye koşullarında en uygun yenilenebilir enerji kaynağı belirlenmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda enerji politikalarının şekillendirilmesine katkı sağlayacak öneriler sunulmuştur.

Ünlüsoy vd. (2017) çalışmalarında, Türkiye'nin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynakları arasında elektrik üretimi açısından hangi kaynaklara öncelik verilmesi gerektiğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere dört ana kriter ve bunlara bağlı toplam on iki alt kriter belirlenmiş; kriter ağırlıkları Analitik Ağ Süreci yöntemi ile hesaplanmış, yenilenebilir enerji kaynakları olan hidroelektrik, rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal ise TOPSIS yöntemiyle sıralanmıştır. Yapılan analiz sonucunda, Türkiye koşullarında yatırım önceliğinin rüzgâr enerjisine verilmesi gerektiği ortaya konulmuş; bunu sırasıyla hidroelektrik, biyokütle, jeotermal ve güneş enerjisi takip etmiştir [6]. Büyükoçkan ve Güler (2016) çalışmalarında, yatırımcı bakış açısından Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynakları arasında en uygun olanı belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, karar kriterleri arasındaki neden-sonuç ilişkilerini analiz etmek için DEMATEL yöntemi ile bu kriterler arasındaki içsel bağımlılıkları dikkate alarak ağırlıklandırma yapmak için Analitik Ağ Süreci yöntemini entegre ettikleri çok kriterli bir karar verme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada, rüzgâr, güneş, jeotermal, hidroelektrik ve biyokütle olmak üzere beş yenilenebilir enerji alternatifi; teknik, ekonomik, politik, sosyal ve çevresel olmak üzere beş ana başlık altında toplanan toplam 21 alt kriter kullanılarak değerlendirilmiştir. Gerçek bir vaka çalışması kapsamında yürütülen analiz sonucunda, Türkiye koşullarında rüzgâr enerjisinin en uygun yenilenebilir enerji alternatifi olduğu belirlenmiştir [7].

Karaaslan ve Aydın (2020) çalışmalarında, Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, karar kriterlerinin ağırlıklarını belirlemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemi kullanılmış; alternatiflerin değerlendirilmesinde ise COPRAS ve MULTIMOORA yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmada; ekonomik, çevresel, teknik ve sosyal olmak üzere dört ana başlık altında toplanan on yedi alt kriter ile beş yenilenebilir enerji alternatifi (rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, hidroelektrik) analiz edilmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'ndan uzmanların

görüşlerine dayalı olarak yapılan analizler sonucunda, her iki yöntemle de hidroelektrik enerjisinin Türkiye koşullarında en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olduğu belirlenmiştir [8].

Tasri ve Susilawati (2014) çalışmalarında, Endonezya’da elektrik üretimi için en uygun yenilenebilir enerji kaynağını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, uzman görüşlerinin belirsizliğini daha doğru yansıtmak amacıyla bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) temelli yeni bir seçim metodolojisi geliştirmişlerdir. Analizde, enerji kaynağının kalitesi, sosyo-politik, ekonomik, teknolojik ve çevresel olmak üzere beş ana kriter ve bunlara bağlı on beş alt kriter dikkate alınmış; hidroelektrik, jeotermal, güneş, rüzgâr ve biyokütle olmak üzere beş yenilenebilir enerji alternatifi değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, hidroelektrik enerjisi Endonezya koşullarında en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olarak belirlenmiş; bunu sırasıyla jeotermal, güneş, rüzgâr ve biyokütle izlemiştir [9].

Yapılan literatür incelemesi, yenilenebilir enerji seçimi problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Belirsizliklerin modellenmesi ve kriterler arası etkileşimlerin dikkate alınması, karar sürecinin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamızda kullanılacak yöntem ve kriter seti, mevcut literatürdeki güçlü yönler dikkate alınarak yapılandırılmıştır.

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yenilenebilir enerji, doğanın sürekli olarak sağladığı ve tükenmeyen enerji çeşididir. Bu enerji, doğal süreçlerde var olan ve kendini yenileyebilen enerji kaynaklarından elde edilir. Yenilenebilir enerji, doğal kaynakların kalıcı olarak zarar görmesine veya bitmesine neden olmaz. Enerji üretimi için kullanılan kaynaklar, tüketim hızından daha hızlı bir şekilde yenilenebilen kaynaklardır. Bu yüzden, yenilenebilir enerji, sürdürülebilir enerji olarak da adlandırılır. Yenilenebilir enerji kaynağı ise, bu enerji türünü sağlayan doğal kaynaklara denir. Bu kaynaklar, hidroelektrik, jeotermal, güneş, rüzgâr, odun, bitkisel atık, biyokütle, gelgit ve dalga enerjisi gibi çeşitli şekillerde bulunur [10].

Alanya bölgesi için yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçimi, bölgenin iklimsel, coğrafi ve ekonomik özellikleri göz önünde bulundurularak titizlikle gerçekleştirilmiştir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi dört ana yenilenebilir enerji kaynağı, bölgenin enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

3.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, Güneş’ten gelen ısı ve ışık enerjisidir. Güneş’in merkezinde hidrojen atomları helyuma dönüşerek füzyon reaksiyonu gerçekleştirir. Bu reaksiyon sonucunda büyük miktarda ısı enerjisi açığa çıkar. Güneş enerjisi ile elektrik üretmek için güneş enerjisi santralleri inşa edilir. Güneş enerjisi santralleri, güneş ışınlarını yakalayıp elektriğe çeviren özel paneller kullanır. Güneş enerjisi santralleri, fotovoltaik ve termal olmak üzere iki türdür. Fotovoltaik santraller, güneş ışınlarını doğrudan elektriğe çevirir. Termal santraller ise güneş ışınlarını ısıya dönüştürüp buhar oluşturur. Buhar, türbinleri döndürerek elektrik üretir [11].

Alanya bölgesi, yıl boyunca yoğun güneş ışığına maruz kalan bir konumdadır. Bu durum, güneş enerjisi sistemlerinin yüksek verimlilikle çalışmasını sağlar. Ayrıca, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve bakımı nispeten düşük maliyetlidir, bu da Alanya’nın ekonomik açıdan sürdürülebilir enerji çözümlerine olanak sağlar.

3.2 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, rüzgârın kinetik enerjisini (hareket enerjisi) mekanik veya elektrik enerjisine dönüştüren bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinin kaynağı güneştir, çünkü güneş ışınları yeryüzünü ısıtmayan şekilde ısıtır ve soğutur. Bu da basınç farklarına ve hava hareketlerine neden olur. Rüzgâr

türbinleri, rüzgârın döndürdüğü kanatlı pervanelerden oluşur. Pervaneler, bir jeneratörü çalıştıran bir mil ile bağlantılıdır. Jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir [12].

Alanya bölgesinde rüzgâr potansiyeli oldukça yüksektir, özellikle kıyı bölgelerinde bu potansiyel daha da belirgindir. Rüzgâr enerjisi, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra, bölgedeki doğal koşulların da elverişli olması nedeniyle tercih edilmiştir. Alanya'nın yıllık ortalama rüzgâr hızı 4,006 m/s'dir [13].

3.3 Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik enerji, suyun hareketinden elektrik enerjisine dönüşen bir yenilenebilir enerji türüdür. Hidroelektrik enerji üretmek için, suyun akışını ve yüksekliğini kullanan çeşitli hidroelektrik santralleri (HES) inşa edilir. Hidroelektrik santralleri, suyun gücünü elektrığe çeviren türbinler, jeneratörler, barajlar, rezervuarlar, pompalar, kanallar ve borular gibi parçalardan oluşur. Hidroelektrik enerji, elektrik üretiminin dışında sulama, taşkın önleme, içme suyu temini, balıkçılık, turizm ve rekreasyon gibi alanlarda da faydalıdır [14].

Alanya'da bulunan akarsu ve nehirler, hidroelektrik potansiyeli taşır. Hidroelektrik enerji, sürekli ve düşük işletme maliyetlerine sahip olması bakımından çekici bir seçenektir. Ayrıca, hidroelektrik santrallerinin su depolama kapasitesi, enerji talebinin dalgalanmalarını dengelemek için ideal bir çözüm sunar.

3.4 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, organik atıkların enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen temiz ve yenilenebilir bir kaynaktır. Bitkisel ve hayvansal atıklar, orman sektörü artıkları, enerji ormanlarından gelen atıklar ve evsel/endüstriyel atıklar biyokütlenin kaynakları arasındadır. Piroliz, fermentasyon, gazlaştırma gibi çeşitli tekniklerle bu atıklar enerjiye dönüşür. Modern ısı-güç kombine santralleri, aynı anda ısı ve elektrik üreterek enerji kaynaklarının verimli kullanımını sağlar. Bu yaklaşım, atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemlidir. Biyokütle enerjisi, sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir rol oynamaktadır. Atıkların yeniden değerlendirilmesi ve enerjiye dönüştürülmesi, çevresel kirliliği azaltırken, yerel ekonomiye de katkı sağlar [15].

Alanya bölgesi tarım ve ormancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu bir bölgedir. Bu nedenle, tarımsal atıklar, odun artıkları ve biyokütle kaynakları, enerji üretimi için potansiyel bir kaynak oluşturur.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Kriterlerin Belirlenmesi

ÇKKV yöntemlerini kullanarak bir karar verme sürecine başlamadan önce, literatürü tarayarak ve benzer çalışmaları inceleyerek hangi kriterlerin önemli olduğunu belirlemek önemlidir. Bu süreç, mevcut bilimsel çalışmaların ve akademik literatürün gözden geçirilmesini gerektirir. Literatürdeki araştırmalar, çevresel etkilerin yanı sıra ekonomik, teknik ve sosyal faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Örneğin, çevresel etkileri değerlendirmek için sera gazı emisyonları, su kullanımı ve biyolojik çeşitlilik gibi kriterlerin kullanılması önerilmektedir. Ekonomik performans ölçmek için ise yatırım maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kriterlerin belirlenmesinde literatürden yararlanmak, karar verme sürecinde objektif ve bilgiye dayalı bir yaklaşım benimsemeyi sağlar. Yapılan çalışma için belirlenen kriterler Tablo 1.'de verilmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalara bakıldığında, yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçiminde dört ana boyutun önemli olduğu görülmektedir. Bu boyutlar, ekonomik performans, çevresel etki, teknik performans ve sosyal etkiyi içerir [5]. Ekonomik performans, sürdürülebilirlik, dayanıklılık, enerji üretim kapasitesi, kurulu kapasite, fizibilite, hazırlık aşaması süreci ve uygulama süresi alt kriterlerini içerir. Çevresel etki boyutu sera gazı emisyonu, arazi gereksinimi, atık yönetimi ve ekolojik etki alt kriterlerini içerir. Teknik

performans kriterleri kullanıcı yakınlığı, verimlilik, güvenilirlik, operasyonel süreklilik ve tahmin edilebilirlik ve teknolojik yeterlilik alt kriterlerini içerir. Son olarak sosyal etki boyutu altındaysa risk ve yerel teknik bilgi ve beceri kriterleri dikkate alınır.

Tablo 1. Ana ve alt kriterler

Ana Kriterler	Alt Kriterler
(C1) Ekonomik Performans	(C11) Sürdürülebilirlik
	(C12) Dayanıklılık
	(C13) Enerji Üretim Kapasitesi
	(C14) Kurulu Kapasite
	(C15) Fizibilite
	(C16) Hazırlık Aşaması Süreci
	(C17) Uygulama Süresi
(C2) Çevresel Etki	(C21) Sera Gazı Emisyonu
	(C22) Arazi Gereksinimi
	(C23) Atık Yönetimi
	(C24) Ekolojik Etki
(C3) Teknik Performans	(C31) Kullanıcı Yakınlığı
	(C32) Verimlilik
	(C33) Güvenilirlik
	(C34) Operasyonel Süreklilik ve Tahmin Edilebilirlik
	(C35) Teknolojik Yeterlilik
(C4) Sosyal Etki	(C41) Risk
	(C42) Yerel Teknik Bilgi ve Beceri

4.2 Bulanık Mantık

Gerçek dünya her zaman karmaşık ve belirsizdir. İnsanlar, sosyal, ekonomik ve teknik konularda tam anlamıyla net düşüncelere sahip olmadıkları için belirsizlik kaçınılmazdır. Bilgisayarlar, bu belirsizlikleri işleme yeteneğine sahip olmadıkları için sayısal bilgilere ihtiyaç duyarlar. Tam bir anlayışa ulaşmak, insan bilgisinin sınırlılıkları nedeniyle her zaman mümkün olmayabilir. Bu yüzden, insan düşünce sistemi ve zihninde, bu tür olayları yaklaşık olarak değerlendirme ve eksik veya belirsiz verilerle çalışabilme yeteneği bulunmaktadır. Genel olarak, karmaşıklık ve belirsizlik gibi kesin olmayan bilgi kaynaklarına "bulanık kaynaklar" adı verilir. Bu gibi tam ve kesin olmayan bilgilerden yola çıkarak tutarlı ve doğru kararlar verme yeteneğine sahip olan düşünme ve karar verme mekanizmasına "bulanık mantık" denir[16]. Bulanık mantık, modelleme ve hesaplama süreçlerinde günlük dildeki sözel belirsizlikleri içselleştirmek için bir araç sunar. Gerçek hayatta insan kararları genellikle belirsiz ve karmaşıktır ve kesin sayısal değerlerle açıklamak zordur. Bu nedenle, insan kararlarını modellemede, sözel değişkenlerin kullanılması daha gerçekçi bir yaklaşım sunar. Bulanık mantığı diğer mantık sistemlerinden ayıran önemli bir özellik, sözel değişkenlere esnek bir şekilde izin vermesidir [17]. Ayrıca, bulanık mantığın diğer mantık sistemlerinden farklılaşan bir diğer özelliği, üçüncünün olmazlığı ilkesi ve çelişmezlik ilkesi gibi diğer mantık sistemlerinin temel

kurallarının bulanık mantık için geçerli olmamasıdır. Bulanık mantıkta bir önerme, aynı anda hem doğru hem de yanlış olamaz. Bu durum, belirsizlikten kaynaklanır ve "ve" bağlaçlarına yüklenen anlamın belirsizliği temsil etmesinden kaynaklanır. Bu yaklaşım, gerçek dünyadaki karmaşıklığı ve belirsizliği daha etkili bir şekilde ele alabilmek için güçlü bir araç sağlar [18].

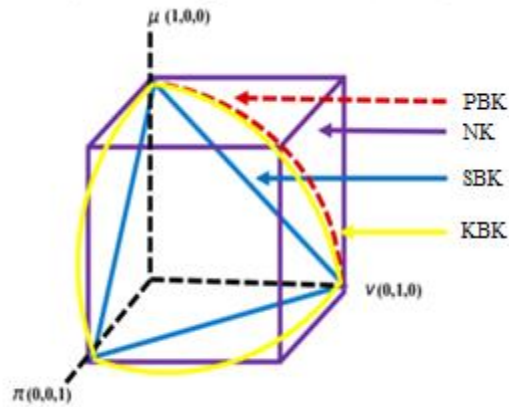
Bulanık mantık kavramı, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1956 yılında düzenlenen bir konferansta ilk defa gündeme geldi. Ancak, bu alandaki ilk önemli adım, 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yayımlanan bir makalede atıldı. Zadeh, bu makalesinde insan düşüncesinin genellikle belirsiz ve kesin olmadığını vurgulayarak bulanık mantık veya bulanık küme kuramı kavramını tanıttı. Boolean mantığın 0 ve 1 ile temsil ettiği kesin ifadelerin, insan düşüncesindeki karmaşıklığı yeterince ifade edemediğini belirtir.

İnsan düşüncesi, sadece açık, kapalı, sıcak, soğuk gibi kesin ifadelerle sınırlı kalmaz; aynı zamanda az açık, az kapalı, serin, ılık gibi ara değerleri de içerir. Bu nedenle, bulanık mantık klasik mantıktan farklı olarak, çok seviyeli işlemleri benimser. Zadeh, insanların kontrol alanında mevcut makinelerden daha iyi olduklarını ve kesin olmayan dilsel bilgileri kullanarak etkili kararlar alabildiklerini savunmuştur[19].

Bulanık küme teorisi, geleneksel küme teorisine göre bir elemanın kavramla ilişkisini daha esnek bir şekilde ifade eder. Geleneksel küme teorisi, bir elemanın ya bir kümenin içinde (1) ya da dışında (0) olduğunu belirtirken, bulanık küme teorisi bu ilişkiyi bir üyelik derecesiyle ifade eder. Bu üyelik derecesi 0 ile 1 arasında değişir ve elemanın kavramla olan ilişkisini daha hassas bir şekilde yansıtır. Örneğin, 0.8 üyelik derecesi, elemanın kavramla yüksek derecede ilişkili olduğunu ifade ederken, 0.2 üyelik derecesi daha düşük bir ilişkiyi gösterir. Bu sayede, bulanık küme teorisi, belirsizlik ve esneklikle başa çıkmak için geleneksel küme teorisine göre daha uygun bir model sunar [20].

4.2.1 Küresel bulanık mantık

Küresel Bulanık Kümeler (KBK), üyelik derecelerini küresel bir düzlem üzerinde tanımlayarak, iki KBK arasındaki mesafeyi küresel yay mesafesi ölçümünü kullanarak hesaplayan bir bulanık küme uzantısıdır. SFS ile bazı diğer bulanık küme uzantıları, örneğin Sezgisel Bulanık Küme (SBK), Nötrdoğruluksal Küme (NK), ve Pisagor Bulanık Küme (PBK) arasındaki ölçüm farklarına ilişkin geometrik temsiller Şekil 1.'de gösterilmektedir [21].

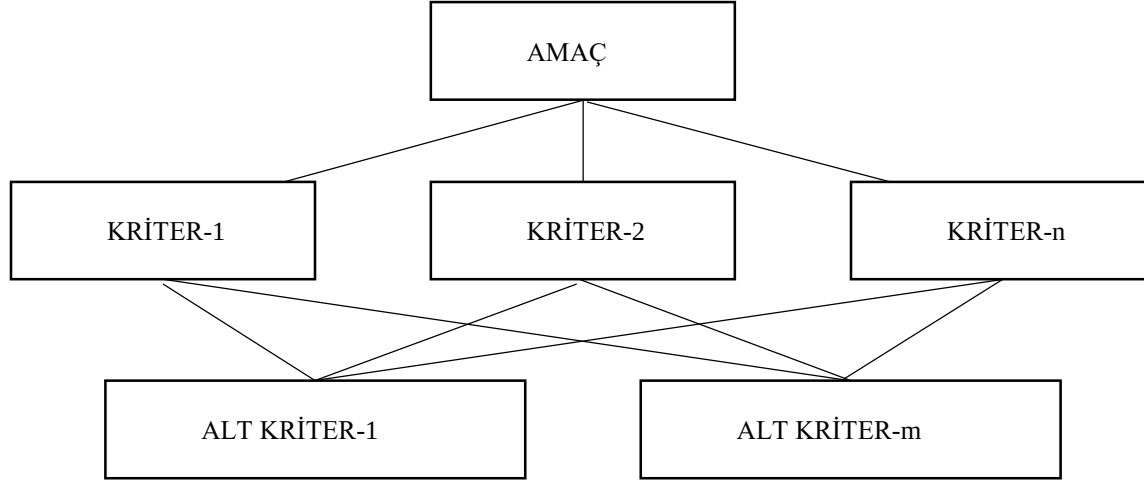


Şekil 1. Bulanık küme uzantılarının uzay geometrisinde gösterim şekli

Küresel Bulanık Kümeler, üyelik dereceleri μ , v ve π toplamının 1'den küçük olmasını destekleyerek Nötrdoğruluksal Kümelerdeki bağımsızlık kavramını iyileştirmiştir. Ayrıca, Görüntü Bulanık Kümelerindeki kararsız üyelik derecesinin bağımsızlığını ortadan kaldırmak amacıyla bir formül sunmuştur. Eğer μ üye olma derecesi ve v üyelik olmama derecesi biliniyorsa, kararsız üyelik derecesi küresel yay mesafesi hesaplaması ile belirlenebilir [22].

4.3 Küresel Bulanık AHS Yöntemi

Küresel Bulanık Kümelerin literatüre eklenmesiyle, ÇKKV yöntemlerine entegre edilerek kullanılmaları mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada kullanılan Küresel Bulanık AHS yöntemi, dilsel değerlendirmeleri temel alarak karar verme sürecini desteklemektedir. Küresel Bulanık AHS yöntemi için tanımlanan adımlar ise aşağıda açıklanmıştır [22]. Küresel bulanık AHS metodunun hiyerarşik yapısı Şekil 2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Küresel bulanık AHS metodu hiyerarşik yapısı

Adım 1: Öncelikle problemin ana kriter ve alt kriterlerini içeren hiyerarşik yapı oluşturulur.

Adım 2: Daha sonra Küresel Bulanık ikili karşılaştırmalar matrisi Tablo 2.'de gösterilen dilsel terimler ve küresel bulanık sayıların yardımıyla oluşturulur.

Tablo 2. Küresel bulanık dilsel terimler ve karşılık gelen sayılar [22]

DİLSEL DEĞERLER	(μ, ν, π)	Skor İndeksi (SI)
Mutlak Önemli (MÖ)	(0.9, 0.1, 0.0)	9
Çok Önemli (ÇÖ)	(0.8, 0.2, 0.1)	7
Önemli (Ö)	(0.7, 0.3, 0.2)	5
Biraz Daha Önemli (BDÖ)	(0.6, 0.4, 0.3)	3
Eşit Derecede Önemli (EDÖ)	(0.5, 0.4, 0.4)	1
Biraz Az Önemli (BAÖ)	(0.4, 0.6, 0.3)	1/3
Az Önemli (AÖ)	(0.3, 0.7, 0.2)	1/5
Çok Az Önemli (ÇAÖ)	(0.2, 0.8, 0.1)	1/7
Mutlak Önemsiz (MÖS)	(0.1, 0.9, 0.0)	1/9

Adım 3: Bu aşamada, her bir ikili karşılaştırma matrisi için matrisler birleştirilmeden önce tutarlılık kontrolü gerçekleştirilir. Dilsel terimlere karşılık gelen puanlar, Tablo 3.'te belirtildiği şekilde Denklem (1) ve (2)'ye göre hesaplanarak tutarlılık incelenir. Tutarlılık oranının (CR) 0,10'dan küçük olması beklenir, aksi takdirde değerlendirmeler yeniden gözden geçirilir.

$$SI = \sqrt{100 * \left[(\mu_{\bar{A}_S} - \pi_{\bar{A}_S})^2 - (\nu_{\bar{A}_S} - \pi_{\bar{A}_S})^2 \right]} \quad (1)$$

MÖ, ÇÖ, Ö ve BDÖ terimler için Denklem (1) kullanılmaktadır.

$$\frac{1}{SI} = \frac{1}{\sqrt{100 * \left[(\mu_{\tilde{A}_S} - \pi_{\tilde{A}_S})^2 - (\vartheta_{\tilde{A}_S} - \pi_{\tilde{A}_S})^2 \right]}} \quad (2)$$

EDÖ, BAÖ, AÖ, ÇAÖ ve MÖS dilsel terimleri içinse Denklem (2) kullanılır.

Adım 4: Kabul edilebilir tutarlılığa sahip olan karşılaştırmaların matrisleri birleştirilir. Farklı karar vericilerden gelen ikili karşılaştırmalar matrisi, Denklem (3)'te gösterilen SWGM operatörü kullanılarak bir araya getirilir. Bu operatördeki ağırlık katsayısı w_i yerine, n =karar verici sayısı olmak üzere $1/n$ katsayısı kullanılır.

$$w = (w_1, \dots, w_n); w_i \in [0,1]$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \text{ olmak üzere;}$$

$SWGM_W = \tilde{A}_{S_1}^{w_1} + \tilde{A}_{S_2}^{w_2} + \dots + \tilde{A}_{S_n}^{w_n}$ olur ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$SWGM = \left\{ \begin{array}{c} \prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i}, \\ (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \vartheta_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i})^{1/2}, \\ \left[\prod_{i=1}^n (1 - \vartheta_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i}) - \prod_{i=1}^n (1 - \vartheta_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i} - \pi_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i})^{1/2} \right] \end{array} \right\} \quad (3)$$

Adım 5: Bu aşamada, değerlendirilen öğeler için küresel bulanık yerel ağırlıklar hesaplanır. Bir önceki adımda birleştirilmiş küresel bulanık karşılaştırma matrisleri, her bir kriter için SWAM operatörü kullanılarak Denklem (4) doğrultusunda hesaplanır. SWAM operatörü içerisinde yer alan ağırlık katsayısı w_i yerine, kriter sayısı olan n için $1/n$ katsayısı kullanılır.

$SWAM_W = w_1 \tilde{A}_{S_1} + w_2 \tilde{A}_{S_2} + \dots + w_n \tilde{A}_{S_n}$ olur ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$SWAM = \left\{ \begin{array}{c} (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i})^{1/2}, \\ \prod_{i=1}^n \vartheta_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i}, \\ \left[\prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i}) - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i} - \pi_{\tilde{A}_{S_i}}^{w_i})^{1/2} \right] \end{array} \right\} \quad (4)$$

Adım 6: Bu aşamada, küresel bulanık yerel ağırlıklar, Denklem (5)'te verilen durulaştırma operatörü kullanılarak sıralanır ve hiyerarşik düzende düzenlenir. Bu durulaştırma işlemi, verilerin daha anlamlı ve yönetilebilir hale gelmesini sağlar.

$$S(\tilde{w}_j^S) = \sqrt{100 * \left[(3\mu_{\tilde{A}_S} - \frac{\pi_{\tilde{A}_S}}{2})^2 - (\frac{\vartheta_{\tilde{A}_S}}{2} - \pi_{\tilde{A}_S})^2 \right]} \quad (5)$$

Adım 7: Bu aşamada, durulaştırılmış değerler normalize edilmiş net ağırlıklara dönüştürülür. Bu süreçte, klasik AHS yönteminde kullanılan normalizasyon uygulanır. Her bir öğe, sütun toplamına bölünerek normalize edilmiş net ağırlıklara dönüştürülür, Denklem (6)'da olduğu gibi. Bu adım, verilerin daha işlenebilir ve karşılaştırılabilir hale gelmesini sağlar.

$$\bar{w}_j^S = \frac{S(\tilde{w}_j^S)}{\sum_{j=1}^n S(\tilde{w}_j^S)} \quad (6)$$

4.4 TOPSIS Yöntemi

TOPSIS, 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından literatüre kazandırılan bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntem, karar alternatiflerinin pozitif ideale en yakın olanı seçme ve negatif ideale en uzak olanı belirleme mantığına dayanır. TOPSIS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [23]:

Adım 1: Karar matrisinin normalize edilmiş versiyonu r_{ij} , öklid mesafeleri kullanılarak hesaplanır. Burada, m alternatif sayısı ve n kriter sayısı olmak üzere;

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad (i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n) \quad (7)$$

Adım 2: Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur. Bu matris, Denklem (8)'deki formül kullanılarak hesaplanır.

$\sum w_i = 1$ olmak üzere;

$$v_{ij} = w_i * r_{ij} \quad (8)$$

Adım 3: Pozitif ideal (A^+) ve negatif ideal (A^-) çözümler oluşturulur.

$$A^+ = \{(i^{max} v_{ij} | j \in J), (i^{min} v_{ij} | j \in J^1), i = 1, 2, 3, \dots, m\} = \{V_{1+}, V_{2+}, \dots, V_{n+}\} \quad (9)$$

$$A^- = \{(i^{min} v_{ij} | j \in J), (i^{max} v_{ij} | j \in J^1), i = 1, 2, 3, \dots, m\} = \{V_{1-}, V_{2-}, \dots, V_{n-}\} \quad (10)$$

$$J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n \text{ ve } j \text{ fayda kriteri ile birleştirilmiş}\} \quad (11)$$

$$J^1 = \{j = 1, 2, 3, \dots, n \text{ ve } j \text{ maliyet kriteri ile birleştirilmiş}\} \quad (12)$$

Adım 4: Ayırım ölçüleri hesaplanırken, öklid uzaklık yaklaşımı kullanılarak pozitif ideal ve negatif ideal arasındaki uzaklıklar belirlenir.

Pozitif ideal çözümden uzaklık;

$$S_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j+})^2}, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (13)$$

Negatif ideal çözümden uzaklık;

$$S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j-})^2}, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (14)$$

Adım 5: İdeal çözüme görece uzaklık hesaplanır.

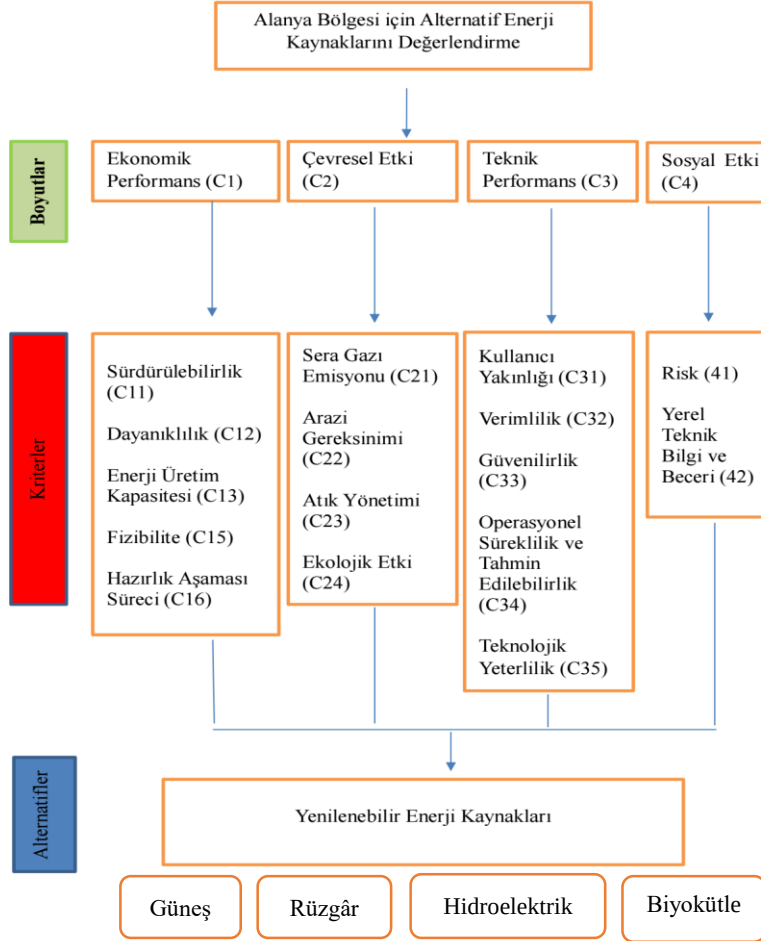
$$C_{i+} = \frac{S_{i-}}{S_{i+} + S_{i-}} \quad (15)$$

C_{i+} değeri, 0 ile 1 arasında değer alır. $C_{i+} = 1$ ise ilgili kararın ideal çözüme olan mutlak yakınlığını ifade ederken, $C_{i+} = 0$ negatif çözüme olan mutlak yakınlığını gösterir.

Adım 6: Tercihler üzerinde sıralama yapılır. Pozitif çözüme en çok yaklaşan alternatif ayrıca negatif çözüme en uzak alternatif olacaktır. C_{i+} değerleri büyükten küçüğe sıralanarak nihai sıra oluşturulur.

5. UYGULAMA

Bu çalışmanın amacı Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci temelli ÇKKV metotlarından yararlanarak Alanya bölgesinde kullanılabilir alternatif enerji kaynaklarını, potansiyel faydaları açısından sıralamak olarak belirlenmiştir. İlk etapta Küresel Bulanık AHS yöntemi için kriterler belirlenirken literatür taraması yapılmış ve araştırmalar sonucunda literatürde en sık kullanılan kriterler bir arada toplanmıştır. Kriterler, literatür taraması sonucunda ekonomik performans, teknik performans, çevresel etki ve sosyal etki boyutları altında kümelendirilmiştir ve problemin hiyerarşik yapısı oluşturulmuştur. Hiyerarşik yapı Şekil 3.'de verilmiştir.



Şekil 3. Problemin hiyerarşik yapısı

5.1 Kriter Ağırlıklarının Küresel Bulanık AHS ile Hesaplanması

Ana ve alt kriterler için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş ve bunlar uzmanlara tanıtılmıştır. Kriterler içerik açısından da uzmanlara tanıtıldıktan sonra uzmanların değerlendirmeleri alınmıştır. Değerlendirmelere ait örnek dilsel karar matrisleri Tablo 3.'te verilmiştir.

Tablo 3. Uzmanlara ait dilsel değerlendirme matrisleri

K ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	K ₂	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	EDÖ	Ö	BDÖ	Ö	C ₁	EDÖ	BDÖ	Ö	Ö
C ₂	AÖ	EDÖ	AÖ	BDÖ	C ₂	BAÖ	EDÖ	ÇAÖ	EDÖ
C ₃	BAÖ	Ö	EDÖ	ÇÖ	C ₃	AÖ	ÇÖ	EDÖ	Ö
C ₄	AÖ	BAÖ	ÇAÖ	EDÖ	C ₄	AÖ	EDÖ	AÖ	EDÖ
K ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	K ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	EDÖ	AÖ	BDÖ	Ö	C ₁	EDÖ	ÇÖ	EDÖ	Ö
C ₂	Ö	EDÖ	ÇAÖ	EDÖ	C ₂	ÇAÖ	EDÖ	ÇAÖ	BDÖ
C ₃	BAÖ	ÇÖ	EDÖ	Ö	C ₃	EDÖ	ÇÖ	EDÖ	ÇÖ
C ₄	AÖ	EDÖ	AÖ	EDÖ	C ₄	AÖ	BAÖ	ÇAÖ	EDÖ

Benzer şekilde dört karar verici için de alt kriter matrisleri de oluşturulduktan sonra her bir matris için Tablo 2.'de verilen skor indekslerinden yararlanarak Tutarlılık Oranı (CR) değerleri hesaplanır. Tutarlılık oranı (CR) < 0,1 olan durumlar, değerlendirmelerin tutarlı olduğu şeklinde kabul edilmiştir. Değerlendirmelere ait skor indeksleri ve tutarlılık oranlarının bir örneği Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 4. Ana kriter karşılaştırmalarının skor indeksi ve tutarlılık oranları

K ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	K ₂	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	1	5	3	5	C ₁	1	3	5	5
C ₂	0.14	1	0.2	3	C ₂	0.33	1	0.14	1
C ₃	0.33	5	1	7	C ₃	0.2	7	1	5
C ₄	0.2	0.33	0.14	1	C ₄	0.2	1	0.2	1
CR	0,0132954				CR	0,0329164			
K ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	K ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	1	7	1	5	C ₁	1	0.2	3	5
C ₂	0.14	1	0.14	3	C ₂	5	1	0.14	1
C ₃	1	7	1	7	C ₃	0.33	7	1	5
C ₄	0.2	0.33	0.14	1	C ₄	0.2	1	0.2	1
CR	0,010659				CR	0,0929224			

Değerlendirmelerin tamamına tutarlılık kontrolü yapıldıktan sonra dilsel değerlere karşılık gelen küresel bulanık sayılar kullanılarak küresel bulanık sayılar matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan matrislerden bir kesit Tablo 5.'te verilmiştir.

Tablo 5. C_{11} ve C_{12} kodlu alt kriterlerin ikili karşılaştırmalarından bir kesit

		C_{11}			C_{12}		
		μ	ν	π	μ	ν	π
C_{11}	K_1	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,7
	K_2	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,7
	K_3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,7
	K_4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,3
C_{12}	K_1	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
	K_2	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
	K_3	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
	K_4	0,6	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4
C_{13}	K_1	0,4	0,6	0,3	0,4	0,6	0,3
	K_2	0,3	0,7	0,2	0,3	0,7	0,2
	K_3	0,3	0,7	0,2	0,6	0,4	0,3
	K_4	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,4

Ardından küresel bulanık değerler matrisi SWGM operatörü kullanılarak farklı karar vericilerden gelen değerlendirmelere bir araya getirilmiştir. Örnek matris Tablo 6.'da verilmiştir.

Tablo 6. C_{11} ve C_{12} kodlu alt kriterlerin birleştirilmiş matrisi

ORTAK MATRİS	C_{11}			C_{12}		
	μ	ν	π	μ	ν	π
C_{11}	0,01563	0,99903	0,03331	0,0027	0,99889	0,0446
C_{12}	0,01875	0,99903	0,03199	0,01563	0,99903	0,03331

Sonrasında elde edilen ortak matrislerdeki değerler ile Denklem (4) kullanılarak küresel bulanık yerel ağırlıklar hesaplanır. Ardından küresel bulanık değerler Denklem (5) kullanılarak durulaştırılır ve son olarak durulaştırılmış değerler klasik AHS yönteminde de kullanılan Denklem (6) ile normalize edilerek çalışmamızın devamında kullanılacak olan nihai ağırlıklar elde edilir. Küresel bulanık yerel ağırlıklar, durulaştırılmış değerler ve normalize edilmiş nihai ağırlıklardan oluşan bir kesitin örneği Tablo 7.'de verilmiştir.

Tablo 7. Ana kriterlerin ağırlık değerleri

Ağırlıklar	μ	ν	π	$S(w_j^s)$	w_j^s
C_1	0,998046	0,24954	0,002623	29,90332	0,250008
C_2	0,99805	0,249105	0,003356	29,90015	0,249981
C_3	0,998047	0,249617	0,002105	29,90572	0,250028
C_4	0,998059	0,248837	0,003358	29,90049	0,249984

5.2 TOPSIS Yöntemiyle Alternatiflerin İdeal Çözüme Yakınlıklarının Hesaplanması

Alanya bölgesi için belirlenen yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanması için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin kullanılabilmesi için karar vericilerin, belirlenen kriterlerde enerji alternatiflerinin potansiyel performanslarını puanlaması istenmiştir. Ardından karar vericilerin verdikleri puanların ortalaması alınarak TOPSIS yönteminin kullanılabilmesi için gereken performans indeksi matrisi oluşturulmuştur. Puanlama, her bir kriter için 1 ve 10 arasında bir tam sayı ile ifade edilmiş olup 1 puan ilgili alternatifin ilgili kriterde çok zayıf performansa sahip olduğunu, 10 puan ise ilgili alternatifin ilgili kriterde çok yüksek performansa sahip olduğunu gösterir. Puanlamalara ait örnek matrisi Tablo 8.'de verilmiştir.

Tablo 8. Performans puanlaması ve kriter ağırlıkları örnekleri

Ağırlıklar		0,055586	0,055586	0,055586	0,055586
Kriterler		C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
Alternatifler	Güneş	9	8	9	8
	Rüzgâr	8	9	7	7
	Hidroelektrik	7	8	7	6
	Biyokütle	7	7	6	6

Karar matrisi Denklem (7) ile normalize edildikten sonra Denklem (8) ile ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulmuştur. Ardından her bir kriter için pozitif ve negatif ideal çözümler oluşturulup Denklem (13) ile pozitif ideal çözümden uzaklık ve Denklem (14) ile negatif ideal çözümden uzaklık hesaplanmıştır. Bulunan pozitif ve negatif ideal çözümden uzaklık değerleriyle Denklem (15) yardımıyla ideal çözüme görece uzaklık hesaplanmıştır. Pozitif ideal çözümden uzaklık, negatif ideal çözümden uzaklık ve görece uzaklık değerleri Tablo 9.'da verilmiştir.

Tablo 9. Negatif ideal, pozitif ideal ve ideal çözüme görece uzaklık değerleri

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	C_i^+
Güneş	0,003460633	0,033785917	0,907088491
Rüzgâr	0,020829513	0,01729303	0,453616914
Hidroelektrik	0,031171374	0,007681563	0,197708684
Biyokütle	0,031480136	0,007207059	0,186290554

Tablo 9.'da alternatif enerji kaynaklarına ilişkin pozitif ideal çözüme uzaklık (Si^+), negatif ideal çözüme uzaklık (Si^-) ve ideal çözüme görece yakınlık (Ci^+) değerleri verilmiştir. Bu değerler, karar verme sürecinde TOPSIS yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Si^+ değeri bir alternatifin pozitif ideal çözüme olan uzaklığını, Si^- değeri ise negatif ideal çözüme olan uzaklığını göstermektedir. Ci^+ değeri ise alternatifin ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu ifade eder; bu değer 0 ile 1 arasında olup, 1'e yaklaştıkça alternatifin tercih edilebilirliği artar. Tabloda yer alan değerlere göre: Güneş enerjisi alternatifi, $Si^+ = 0,00346$ ve $Si^- = 0,03379$ ile en düşük pozitif ideal uzaklık ve en yüksek negatif ideal uzaklığa sahiptir. Bu da, $Ci^+ = 0,9071$ değeriyle, alternatifler arasında en ideal seçenek olduğunu göstermektedir. Rüzgâr enerjisi alternatifi, $Ci^+ = 0,4536$ değeriyle orta seviyede tercih edilebilirliğe sahiptir. Hidroelektrik ve biyokütle alternatifleri ise sırasıyla 0,1977 ve 0,1863 Ci^+ değerleri ile ideal çözüme en uzak seçeneklerdir. Bu sonuçlara göre, yapılan değerlendirmeler sonucunda Güneş enerjisi TOPSIS yöntemine göre en uygun yenilenebilir enerji alternatifi olarak öne çıkmaktadır.

6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yenilenebilir enerjinin günümüzdeki önemi, çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Karbon emisyonlarının azaltılması, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve doğal kaynakların korunması gibi çevresel faydalarının yanı sıra, enerji arz güvenliği, ekonomik kalkınma ve uzun vadeli maliyet avantajları gibi birçok olumlu etki literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının Alanya özelinde değerlendirilmesi için Küresel Bulanık AHS ve TOPSIS ÇKKV yöntemleri birlikte kullanılmış ve bölgeye en uygun enerji alternatifleri belirlenmiştir.

Küresel Bulanık AHS yöntemi ile yapılan kriter ağırlıklandırma analizinde, kriterler arasında minimal düzeyde ağırlık farklarının bulunması, literatürde belirtilen çok boyutlu değerlendirme gerekliliğini desteklemektedir [24]. Teknik performans kriterinin (C_3) az bir farkla da olsa ön plana çıkması, özellikle uygulama sürecinde teknolojik uygunluğun ve kullanıcı beklentilerinin önemine dikkat çekerken, bu bulgu çeşitli çalışmalarda belirtilen teknik güvenilirlik ve kullanıcı kabullenme ilişkisi ile de örtüşmektedir [24, 25]. Teknik performans alt kriterlerinden kullanıcı yakınlığının (C_{31}) öne çıkması ise, enerji projelerinin başarılı şekilde hayata geçirilmesinde yerel halkın desteğinin belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır [27].

Çevresel etki (C_2) kriterinin ve alt kriterlerinden ekolojik etkinin (C_{24}) nispeten düşük ağırlıkta kalması, karar vericilerin değerlendirmelerinde kısa ve orta vadeli teknik ve ekonomik beklentileri daha öncelikli gördüklerini düşündürmektedir. Oysa literatürde, uzun vadede çevresel etkinin göz ardı edilmemesi gerektiği, aksi halde enerji yatırımlarının sürdürülebilirlikten uzaklaşabileceği ifade edilmektedir [28]. Bu nedenle bu kriterin ağırlığının düşük olması, politika yapıcılar için bir uyarı niteliği taşıyabilir.

TOPSIS yöntemiyle yapılan analiz sonucunda, Alanya özelinde en uygun yenilenebilir enerji türü güneş enerjisi olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, Alanya'nın coğrafi yapısı, yıllık güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu açısından yüksek potansiyele sahip olması ile uyumludur. Ayrıca güneş enerjisinin bakım maliyetlerinin düşük olması ve modüler sistemlerle küçük ölçekli uygulamalara da olanak sağlaması, bölge için uygunluğunu pekiştirmektedir [29].

İkinci sırada yer alan rüzgâr enerjisinin, Alanya'da hâlihazırda ciddi yatırımların bulunmadığı bir alan olması dikkat çekicidir. Oysa kıyı bölgesinde yer alan Alanya, rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından değerlendirilmemiş bir kaynak olabilir. Benzer şekilde, Türkiye'nin Ege ve Marmara bölgelerinde başarılı rüzgâr yatırımları gerçekleştirilmiş ve bu yatırımların yerel kalkınma üzerinde olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Alanya'da rüzgâr enerjisinin düşük kullanımında, turizm merkezli arazi rekabeti, yüksek yatırım maliyetleri ve görsel kirlilik gibi sosyo-ekonomik faktörler etkili olmuş olabilir. Bu bulgular, enerji planlamasında sadece teknik verilerin değil, sosyal ve mekânsal faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Hidroelektrik ve biyokütle alternatiflerinin ise sırasıyla en az uygun görülen enerji türleri olarak değerlendirilmesi, özellikle su kaynaklarının mevsimsel azlığı ve biyokütle temininin lojistik zorlukları gibi

bölgeye özgü kısıtlamaları yansıtabilir. Literatürde, biyokütle enerjisinin tedarik zinciri, arazi kullanımı ve sera gazı emisyonları bakımından bazı dezavantajlara sahip olduğu belirtilmektedir.

Sonuç olarak, Alanya'nın yenilenebilir enerji stratejisinde güneş enerjisinin yaygınlaştırılması, rüzgâr enerjisi potansiyelinin detaylı şekilde incelenmesi ve bu alanda yatırımların teşvik edilmesi öncelikli öneriler olarak sunulmuştur. Ayrıca, mevcut hidroelektrik santrallerin verimliliğinin artırılması ve bölgeye özgü enerji politikalarının geliştirilmesi, hem sürdürülebilirlik hem de enerji güvenliği açısından katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, ÇKKV yöntemleriyle yapılan yerel ölçekli enerji planlamalarının, bölgesel kalkınma ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında değerli katkı ve desteklerinden dolayı dört uzman karar vericiye teşekkürlerimizi sunuyoruz.

REFERANSLAR

- [1] D. Vural, E. Köse, and B. Bayam, "AHP ve VIKOR Yöntemleri ile Personel Seçimi," Yalova Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 10, no. 21, pp. 70–89, 2020.
- [2] A. Kelemenis and D. Askounis, "A new TOPSIS-based multi-criteria approach to personnel selection," Expert Systems with Applications, vol. 37, pp. 4999–5008, 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2009.12.013.
- [3] G. Büyüközkan, Y. Karabulut, and F. Göçer, "Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Turkey," Applied Soft Computing, vol. 158, 2024, doi: 10.1016/j.asoc.2024.111465.
- [4] P. Rani, A. R. Mishra, K. R. Pardasani, A. Mardani, H. Liao, and D. Streimikiene, "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, vol. 238, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117936.
- [5] M. Çolak and İ. Kaya, "Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 840–853, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.194.
- [6] S. Ünlüsoy, T. Eren, and E. Özcan, "ANP ve TOPSIS Yöntemleriyle Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi," Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 5, no. 2, pp. 204–219, 2017, doi: 10.15317/scitech.2017.82.
- [7] G. Büyüközkan and S. Gülleryüz, "An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey," International Journal of Production Economics, vol. 182, pp. 435–448, 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.09.015.
- [8] A. Karaaslan and S. Aydın, "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği," Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, vol. 34, no. 4, pp. 1351–1375, 2020, doi: 10.16951/atauniiibd.749466.
- [9] A. Tasri and A. Susilawati, "Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 7, pp. 34–44, 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.02.008.

- [10] C. Lamnatou, C. Cristofari, and D. Chemisana, “Renewable energy sources as a catalyst for energy transition: Technological innovations and an example of the energy transition in France,” *Renewable Energy*, p. 119600, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119600.
- [11] O. O. Yolcan and R. Köse, “Türkiye'nin güneş enerjisi durumu ve güneş enerjisi santrali kurulumunda önemli parametreler,” *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, vol. 6, no. 2, pp. 196–215, 2020, doi: 10.34186/klujes.793471.
- [12] S. Sekin, “Rüzgar enerjisi,” *Öneri Dergisi*, vol. 2, no. 12, pp. 113–117, 1999, doi: 10.14783/maruoneri.691197.
- [13] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “REPA,” [Online]. Available: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/iller/ANTALYA-REPA.pdf>. [Accessed: Dec. 6, 2023].
- [14] M. Onüçyıldız, N. Büyükkaracıgan, and M. E. Erksen, “Küçük hidroelektrik santrallerin enerji potansiyelleri ve çevresel etkileri,” *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, vol. 3, no. 6, pp. 37–59, 2013.
- [15] C. E. Zeller-Powell, “Defining biomass as a source of renewable energy: The life-cycle carbon emissions of biomass energy and a survey and analysis of biomass definitions in states’ renewable portfolio standards, federal law, and proposed legislation,” M.S. thesis, Univ. of Oregon, Eugene, OR, 2011.
- [16] N. Karakaşoğlu, “Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri ve uygulama,” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli, 2008.
- [17] D. F. Li and J. B. Yang, “Fuzzy linear programming technique for multiattribute group decision making in fuzzy environments,” *Information Sciences*, vol. 158, no. 1–4, pp. 263–275, 2004, doi: 10.1016/j.ins.2003.08.007.
- [18] N. Baykal and T. Beyan, *Bulanık Mantık, İlke ve Temelleri*. İstanbul: Papatya Yayıncılık, 2004.
- [19] D. Kuşçu, “Karar verme süreçlerinde bulanık mantık yaklaşımı,” Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [20] H. İşci, Z. Baykara, and B. Tülüce, “Bulanık TOPSIS ve Bulanık AHP Yöntemleri ile Risk Analizi Örneği,” *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 28–45, 2024, doi: 10.46740/alku.1316669.
- [21] F. Kutlu Gündoğdu and C. Kahraman, “A novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application,” *Soft Computing*, vol. 24, pp. 4607–4621, 2020, doi: 10.1007/s00500-019-04222-w.
- [22] D. Kara, “Küresel bulanık karar verme yaklaşımı ile Türkiye’deki illerin yaşam endeksleri açısından değerlendirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun, 2023.
- [23] C. L. Hwang and K. Yoon, “Methods for multiple attribute decision making,” in *Multiple Attribute Decision Making*, vol. 186. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981, pp. 58–191. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9_3.
- [24] T. L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process,” *Int. J. Services Sci.*, vol. 1, pp. 83–98, 2008, doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- [25] M. Bilgili and S. E. Bilgili, “Wind energy potential and turbine installations in Turkey,” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 7, no. 2, pp. 140–151, 2011.
- [26] P. A. Owusu and S. Asumadu-Sarkodie, “A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation,” *Cogent Engineering*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1167990.

- [27] B. Wang, D. F. Kocaoglu, T. Daim, and J. Yang, “A decision model for energy resource selection in China,” *Energy Policy*, vol. 38, pp. 7130–7141, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.07.031.
- [28] M. Stojanovic, “Multi-criteria decision-making for selection of renewable energy systems,” *Safety Engineering*, vol. 3, no. 3, 2013, doi: 10.7562/se2013.3.02.02.
- [29] R. Wüstenhagen, M. Wolsink, and M. J. Bürer, “Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2683–2691, 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.12.001.