

SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ YÖNETİMİ İÇİN BWM YÖNTEMİ İLE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sezi BİLGİÇ¹, Belkız TORĞUL², Turan PAKSOY³

ÖZET

Amaç: Tüm dünyada artan enerji gereksinimiyle, mevcut durumdaki kaynakların önümüzdeki yıllarda tükenmesi öngörüldüğünden enerji sürdürülebilirliğinin sağlanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmaya başlamıştır. Bu çalışmada, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak üzere artan enerji talebinin karşılanması için yapılacak olan enerji kaynak yatırımlarının daha az maliyetle, daha temiz kaynaklar ile planlanmasının önemi doğrultusunda, özel bir enerji şirketi için İç Anadolu Bölgesi'nde yatırım yapmak üzere en uygun olan yenilenebilir enerji kaynağını belirlemek amaçlanmıştır.

Yöntem: Yenilenebilir enerji kaynak yatırım planlamasında etkili olan tüm kriterler araştırılarak Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden En İyi En Kötü Yöntemi (Best Worst Method-BWM) ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bulgular: Uygulamada kullanılan BWM'nin bu tür problemleri çözmek için güvenilir ve hızlı sonuç verdiği doğrulanarak yatırım için güneş enerjisinin en iyi yenilenebilir enerji alternatifi olduğu tespit edilmiştir.

Özgünlük: Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışan karar vericilere destek olacak bir uygulama olmasının yanı sıra farklı, yeni bir çözüm yöntemi (BWM) kullanılarak çözülmesiyle de literatüre katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Enerji Kaynakları, BWM, Sürdürülebilir Enerji, Yenilenebilir Enerji.

EVALUATION of RENEWABLE ENERGY RESOURCES with BWM for SUSTAINABLE ENERGY MANAGEMENT

ABSTRACT

Purpose: Renewable energy sources have started to increase in importance in order to ensure the sustainability of energy, since the current resources are projected to be depleted in the coming years with the increasing energy requirement all over the world. In this study, it is aimed to determine the most suitable renewable energy source for a private energy company to invest in the Central Anatolia region, in line with the importance of planning energy resource investments to meet the increasing energy demand with less cost and cleaner resources in order to ensure environmental sustainability.

Methodology: All the criteria effective in renewable energy resource investment planning are investigated and renewable energy resources are evaluated with the Best Worst Method (BWM), one of the multi-criteria decision making methods.

Findings: It is verified that the BWM method used in the study gives reliable and fast results to solve such problems and determined that solar energy is the best renewable energy alternative for the investment.

Originality: In addition to being an study that will support decision makers working on renewable energy resources in our country, it is expected to contribute to the literature by solving it using a different, new solution method (BWM).

Keywords: Multi-Criteria Decision Making Methods, Energy Resources, BWM, Renewable Energy, Sustainable Energy.

¹ İş Geliştirme Uzmanı, Meram Elektrik Perakende Satış A.Ş., seziozdemirkan@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-2345-6789

² Arş. Gör., Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, btorgul@ktun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7341-9334 (Sorumlu Yazar- *Corresponding Author*)

³ Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü, tpaksoy@erbakan.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8051-8560

1. GİRİŞ

Enerji, modern çağda bir ülkenin ekonomik ve sürdürülebilir kalkınmasında önemli bir rol oynar ve insan yaşamı için temel bir unsurdur. Ancak yüksek miktarda fosil yakıt tüketimiyle artan sera gazı emisyonları küresel ısınmaya ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Ahmad and Tahar, 2014; Lee and Chang, 2018). Bunun yanında dünyadaki enerji gereksiniminin giderek artmasıyla, mevcut durumdaki kaynakların önümüzdeki yıllarda tükenmesi öngörüldüğünden enerji sürdürülebilirliğinin sağlanması önem arz etmeye başlamıştır. Artan enerji talebinin hangi kaynaklardan karşılanacağı oldukça önemlidir. Enerji ihtiyacının, enerji arz güvenliğini sağlayarak daha az maliyetle ve daha temiz kaynaklarla karşılanması çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça önem taşımaktadır. Bu sebeple, birçok ülke, çevre krizleriyle başa çıkmak için aktif olarak yenilenebilir enerji veya sürdürülebilir enerji geliştirmektedir. 1997'deki Kyoto Protokolü müzakerelerinden 2015'in sonundaki Paris İklim Değişikliği Konferansı'na kadar birçok ülke, muazzam iklim değişikliği tehdidinin son derece farkındadır ve kendini karbon azaltma ve yeşil ekonomi geliştirmeye adanmıştır. Sonuç itibarıyla fosil kaynaklardan temiz enerjiye geçiş birçok ülke için önemli bir konudur. (Lee and Chang, 2018).

Dünyanın en büyük 17. ve Avrupa'nın 6. büyük ekonomisi olan Türkiye, 2023 yılına kadar enerji talebinde yılda % 4 - 6 civarında artış beklemektedir. Büyüklüğüne ve büyüme hızına rağmen elektrik üretimi çoğunlukla fosil yakıtlarla yürütüldüğünden, Türkiye ekonomisi büyük ölçüde ithal fosil yakıtlara bağlıdır. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için düşük maliyetli, temiz, yerli ve güvenli enerji kaynakları hedeflenmektedir. Bu doğrultuda Yenilenebilir Enerji Kaynakları bir çözüm olarak Türkiye'nin enerji gündemindeki önemli konulardan biri olmaya devam etmektedir (Büyükköçkan and Gülerüz, 2017).

Ülkemizin artan enerji talebini karşılamak üzere enerji politikalarının önceliği; enerji arz güvenliğini sağlamak, aynı zamanda da dışa bağımlılığı ortadan kaldırmaktır. Bu sebeple de enerji sürdürülebilirliği için hangi kaynakların kullanılması, hangi kaynaklara yatırım yapılması gerektiğine karar vermek, enerji politikasını gerçekleştirmek için en önemli adımdır.

Bu bağlamda çalışmanın amacı, özel bir enerji şirketi için İç Anadolu Bölgesi açısından hangi yenilenebilir enerji kaynağının daha uygun olduğunu belirleyerek ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarına bilimsel bir bakış açısı kazandırmaktır. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynak kullanımı ve yatırımları için geçmiş çalışmalar incelenerek uzmanlar ile birlikte gerekli kriterler belirlenmiş ve BWM kullanılarak alternatifler değerlendirilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi, sürdürülebilir enerji gelişimi daha güncel hale gelmekte ve her yıl sürdürülebilirlik değerlendirmesiyle ilgili artan sayıda çalışma yayınlanmaktadır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu da enerji sektöründe sürdürülebilirlik değerlendirmesi için ÇKKV yöntemlerini uygulamaktadır. Bu da, enerji sürdürülebilirliği problemlerini çözmek için ÇKKV yöntemlerinin önemini haklı çıkarmaktadır. (Siksnyte ve diğerleri, 2018).

BWM de karar verme problemlerini çözenin çeşitli aşamalarında kullanılabilen bir ÇKKV yöntemidir. Özellikle alternatifleri değerlendirmek için objektif ölçütlerin mevcut olmadığı durumlarda kriterlere göre alternatifleri değerlendirmek için kullanılabilir. Ayrıca problemin temel amaç(larını) karşılayacak bir çözüm bulmakta kullanılan kriterlerin önemini (ağırlığını) bulmak için de kullanılabilir (Rezaei, 2019).

BWM, kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yapmadan önce en iyi ve en kötü kriterleri belirleyerek sadece bu kriterler ile diğer kriterler arasında karşılaştırmalar yapar ve böylece tek bir En İyi Modelinde iki zit referansa (en iyi ve en kötü) dayanarak oluşturulan sadece iki çift karşılaştırma vektörü kullanır. Basit Çok Nitelikli Değerlendirme Tekniği (SMART) gibi tek bir vektör kullanılan yöntemler, ikili karşılaştırma tabanlı çok veri olması durumunda zaman açısından avantajlı olmasına rağmen ikili karşılaştırmaların tutarlılığını kontrol edemez. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi tam bir matris kullanılan yöntemler, ikili karşılaştırmaların tutarlılığını kontrol etme olanağı sağlamasına rağmen çok veri olması durumunda zaman açısından verimsizdir. BWM ise her iki yapıdaki yöntemlere göre ortada durur. Bir başka ifadeyle,

ikili karşılaştırmaların tutarlılığını kontrol etme imkânı sağlarken aynı zamanda büyük miktarlarda veri olması durumunda zaman açısından verimli bir yöntemdir (Rezaei, 2019).

Problemin çözümü için BWM'nin seçilmesinin nedeni, enerji kaynak alternatiflerinin değerlendirilmesine yeni bir yöntem ile farklı bir bakış açısı kazandırmak ve literatüre katkı sağlamaktır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, geçmişte bu konuda yapılan çalışmalar incelenerek, literatür özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, enerji kaynak kullanım ve yatırım problemleri çözümünde yararlanılan karar verme teknikleri ve gerekliliklerinden bahsedildikten sonra bu çalışmada kullanılacak olan BWM, adımları ile birlikte açıklanmıştır. Dördüncü bölümde yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirme problemi tanımlanarak önerilen metod ilgili probleme uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına ise son bölümde yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR

Yenilenebilir enerji kaynakları seçimi sürecine ilişkin matematiksel modeller, ÇKKV teknikleri gibi yöntemler kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmıştır. Nicel ve nitel kriterlerin aynı anda sisteme dâhil edilememeleri, uzman görüşlerini dikkate alamamaları ve uygulama aşamasında karşılaşılan zorluklardan dolayı matematiksel modeller yaygın olarak kullanılmamaktadır. Birçok karar verme probleminde birden çok nitel ve nicel kriter ve alternatifler söz konusu olduğundan problem çözümünde bunların hepsini bir arada değerlendirebilmek için en uygun yöntemlerin ÇKKV teknikleri olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yapılan literatür çalışmalarında enerji alternatif seçim problemlerinde çözüm için ÇKKV yöntemlerinden AHP ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHP) yöntemlerinin ağırlıklı olarak kullanıldığı görülmüştür. Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında; Akash ve diğerleri (1999), Ürdün'de faaliyet gösteren farklı elektrik enerjisi üretim seçenekleri arasında bir karşılaştırma yapmak için AHP Yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada fosil yakıtlı enerji santrallerine ek olarak nükleer, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji üretim seçenekleri değerlendirmeye alınmıştır. Afgan ve Carvalho (2002), enerji santrallerindeki yeni ve yenilenebilir teknoloji potansiyellerinin çok kriterli yöntemlerle analizini yapmışlardır. Yeni enerji teknolojilerine bir değerlendirme sunmak için ölçülebilir özellikteki sürdürülebilirlik göstergeleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, enerji sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılan sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan enerji göstergelerini tanımlamaktır. Bu göstergeler de enerji kaynağı, kapasite, sosyal ve ekonomik göstergeler olarak dikkate alınmıştır. Kabir ve Shihan (2003), Bangladeş için yenilenebilir enerji ve teknolojileri seçimi için AHP Yöntemini uygulamıştır. Bangladeş için güneş, rüzgâr ve biyogaz enerjilerini teknik faktörler, birim maliyet, yer faktörleri, çevre faktörleri ve sosyal etki kriterlerine göre değerlendirmiştir. Topcu ve Ulengin (2004), Türkiye için yedi uygun elektrik üretimi alternatiflerinin seçimini sağlayacak enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde Zenginleştirilmiş Değerlendirme İçin Tercih Sıralaması Organizasyon Yöntemini (PROMETHEE) uygulamışlardır. Ayrıca, en uygun ÇKKV yönteminin seçimi için Entegre Bir Karar Desteği (IDEA) çerçevesi sağlamış ve yetkililere tavsiye olarak alternatiflerin ve sağlamlık analizlerinin sıralamasını sunmuşlardır. Nigim ve diğerleri (2004) yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının ön fizibilite sıralamasında AHP ve Sıralı İnteraktif Modelini (SIMUS) uygulamışlardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel yakıt kaynaklarıyla bütünleştirilmesi, ithal enerji kaynaklarına bağımlılığı en aza indirerek enerji güvenliğini artıracığı, ayrıca, enerji üretiminin olumsuz çevresel etkilerini ve ilgili sağlık etkilerini en aza indireceğini belirtmiştir.

Köne ve Büke (2007), Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma açısından elektrik üretmek için en iyi yakıt karışımını belirlemek amacıyla Analitik Ağ Süreci (ANP) Modelini kullanmışlardır. Önerilen model iki alternatif senaryoda uygulanmaktadır. Enerji üretiminin sürdürülebilirliğinin iki temel boyutunun; çevre koruma ve enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği olduğu ifade edilmiştir. Modelin sonuçları, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için kurulu kapasitede yenilenebilir yakıtların payının artırılması gerektiğini göstermektedir. Önüt ve diğerleri (2008), Türkiye'nin en büyük enerji tüketen sektörü olarak imalat sanayi üzerinde durmuş ve enerji kaynaklarını verimli kullanım açısından analiz etmiştir. Çalışmada, Türkiye imalat sanayinde en çok kullanılan enerji kaynakları yani akaryakıt, kömür, elektrik, LPG ve doğalgaz dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, imalat sanayine en uygun enerji kaynaklarını değerlendirmek için ANP

Yöntemi kullanılmıştır. Çalışmalarında tarım, nakliye, toplu konut ve endüstri alanlarının enerji tüketimlerini göz önüne alarak bunlardan en çok enerji tüketimini yapan sektörün endüstri olduğunu ifade etmişlerdir. Tsoutsosa ve diğerleri (2009) Yunanistan'daki Girit Adası'nda sürdürülebilir enerji planlaması için ÇKKV yöntemlerinden yararlanmışlardır. Çalışmada adaya yenilenebilir enerji kaynaklarının yerleştirilmesi uygulaması benimsenmiş ve enerji planlama arenasındaki aktörler tarafından belirlenen ekonomik, teknik, sosyal ve çevresel kriterlere göre değerlendirilmiştir. Kahraman ve diğerleri (2009) Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji alternatifi belirlemek için Bulanık Aksiyomatik Tasarımı (FAD) ve BAHF yaklaşımını uygulamışlardır. Atıcı ve Ulucan (2009) karar analizinin güncel tekniklerinden olan Gerçeği Yansıtan Eleme ve Seçim Yöntemi (ELECTRE) ve PROMETHEE Yöntemini Türkiye enerji sektöründe uygulayarak, karar verici yargısını aza indiren daha analitik kararlar alınabileceğini göstermeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, çeşitli hidroelektrik santral projelerinin ELECTRE ile sıralandığı ve çeşitli rüzgâr santrali projelerinin PROMETHEE Yöntemi ile sıralandığı iki adet uygulama yapmışlardır. Wang ve diğerleri (2010) hiyerarşik bir karar modeli kullanarak Çin'deki enerji alternatifleri olan kömür, petrol, doğalgaz, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmişlerdir. Enerji seçimi için en kritik ölçütün mevcut enerji altyapısı olduğu duyarlılık analizi ile saptanmıştır. Değerlendirmeler için kullanılan kriterler kullanılabilirlik (uygunluk), mevcut enerji altyapısı, fiyat, güvenlik, çevresel etkiler ve sosyal etkiler olarak belirlenmiştir. Amer ve Daim (2011), Pakistan'da elektrik üretimi için yenilenebilir enerji seçeneklerini teknik, ekonomik, sosyal, çevresel ve siyasi yönlerden incelemişlerdir. Pakistan enerji sektöründe, elektrik üretimi için çeşitli yenilenebilir enerji teknolojilerinin seçimi ve önceliklendirilmesi için AHP Yöntemini kullanmışlardır. Rüzgâr enerjisi, fotovoltaik enerji, solar termal enerji ve biyokütle enerjisi seçenekleri, karar modelinde alternatif olarak kullanılmıştır. Ayan ve Pabuççu (2013), Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki öncelik sıralamasının belirlenmesi için AHP Yöntemini kullanmışlardır. 2010-2014 T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Stratejik Planına bakılarak kaynak öncelik sıralamasının belirlenmesi için bir hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Erdoğan (2013: 10), Türkiye'de kullanılacak enerji alternatiflerinin seçimine yardımcı olmak amacıyla bir bütünleşik ÇKKV yöntemi uygulamıştır. Problem çözüm sürecindeki belirsizlikleri hesaplamalara dâhil edebilmek için de bulanık mantık kullanılmıştır. İlgili nitel ve nicel kriterler belirlenerek, ülkede kullanılan enerji kaynakları değerlendirilmiş, ilk sıralarda tercih edilmesi daha uygun alternatifler elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde aynı kriterler ve aynı yöntem kullanılarak bu kez yenilenebilir enerji alternatifleri değerlendirilmiştir. Kriterlere ait ağırlıkları hesaplamak için Tip-2 Bulanık AHP ve alternatiflerin sıralanması için ise Tip-2 Bulanık İdeal Çözüm Benzerliğine Dayanan Tercih Sıralama Tekniği (Tip-2 BTOPSIS) kullanılmıştır. Öncelikle ülkede kullanımda olan enerji kaynaklarının tümü değerlendirilerek ilk sıralarda yenilenebilir enerji alternatifleri yer almıştır. Ardından yenilenebilir enerji alternatifleri değerlendirilmiş ve ilk sırada kullanılması gereken enerji kaynağı alternatifi, rüzgâr enerjisi olmuştur.

Sağır ve Doğanalp (2016), Türkiye'de enerji üretimi için farklı enerji kaynaklarının (yenilenebilir enerji, fosil enerji ve nükleer enerji) değerlendirilmesi için Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) Metodunu kullanarak karar kriterlerinin önem ağırlıklarını belirlemiş ve bu enerji kaynaklarını saptanan karar kriterleri doğrultusunda değerlendirmiştir. Arıkan ve Aydın (2017), Bursa'da yatırım yapmayı plânlayan bir firmanın, yenilenebilir enerji kaynaklarından en uygun olanının seçilebilmesi için enerji verimliliği, enerji arz güvenliği, çevresel etkiler yatırım maliyetlerinin uygunluğu ve devlet teşviki kriterlerini belirlemiş, alternatifleri olarak da rüzgâr, hidroelektrik, güneş ve jeotermal enerji türlerini ele almışlardır. Özcan ve diğerleri (2017), literatür çalışmaları ile T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2015–2019 Stratejik Planını referans alarak ekonomik, teknik, sosyal ve çevresel faktörlerden oluşan 4 ana kriter ve bunlara bağlı 12 alt kriter belirlemiş ve ağırlıklarını ANP yöntemi ile hesaplamışlardır. Daha sonra bu kriterlere göre Türkiye'nin sahip olduğu hidroelektrik, rüzgâr, biyokütle, güneş ve jeotermal enerji kaynaklarını TOPSIS Yöntemi ile sıralamış ve bu kaynaklar ile yapılacak yatırım önceliklerini elde etmişlerdir. Madhuri ve Hıwarkar (2017), Hindistan için en iyi yenilenebilir enerji alternatifini bulmak için yenilenebilir enerjilerin önceliklerini değerlendirmişlerdir. AHP Modelinde; teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel olarak dört kriter seçilmiş ve güneş enerjisi, biyokütle ve rüzgâr olmak üzere üç yenilenebilir enerji alternatifi dikkate alınmıştır.

Doğan ve Uludağ (2018), Türkiye açısından en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi için Bulanık Gri İlişkisel Analiz (BGRA); en elverişli ilin tespit edilmesi için ise Gri İlişkisel Analiz (GRA)

ve AHP yöntemlerini kullanmışlardır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi aşamasında ÇED raporlarına uygunluk, zararlı madde ve gaz emisyonu, atık imha ihtiyacı; en elverişli ilin belirlenmesi aşamasında ise iklimsel özellikler en önemli kriterler olarak belirlenmiştir. Tolga ve Turgut (2018), Türkiye’de potansiyeli yüksek olan güneş, rüzgar, hidroelektrik ve LFG enerji santrallerini İnteraktif ve Çok Ölçütlü Karar Verme (TODIM) Yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında; teknik, ekonomik ve çevresel açıdan 22 değerlendirme kriteri belirlenmiş ve belirsiz durumlar için bulanık kümeler sisteme entegre edilmiştir. En önemli kriter teknik verimlilik olurken, devlet destek oranı, önlenilen sera gazı emisyonu ve ekosisteme etki ikinci sırada birlikte yer almış, üçüncü kriter ise yatırım maliyeti olmuştur. Çalışmanın sonunda, farklı durumların sonuçlara etkisini gözlemlemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Ayçin ve Arsu (2019), Türkiye’deki Düzey-1 bölgelerini Entropi ve Birleştirilebilir Mesafe Bazlı Değerlendirme (CODAS) yöntemlerini kullanarak yenilenebilir enerji kaynağı performanslarına göre değerlendirmişlerdir. Entropi Yöntemi sonuçlarına göre en önemli kriterler sırasıyla, güneş enerjisi kurulu gücü/toplam kurulu güç, rüzgar enerjisi kurulu güç ve güneş enerjisi kurulu güç kriterleri olarak belirlenmiş, CODAS Yöntemi sonuçlarına göre, sırasıyla TR5- Batı Anadolu, TR3- Ege ve TR7-Orta Anadolu Bölgeleri ilk üç sırada yer alırken, TRA- Kuzeydoğu Anadolu, TR1- İstanbul ve TR4- Doğu Marmara Bölgeleri son üç sırada yer almıştır. Karaaslan ve Aydın (2020), Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı alternatifini belirlemek üzere kriter ağırlıklandırması için AHP, kaynak alternatiflerin sıralaması için ise hem Karmaşık Oransal Değerlendirme (COPRAS) hem de Oran Analizi Temeline Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MULTIMOORA) yöntemlerini sırasıyla kullanarak sonuçları analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında 4 ana kriter, 17 alt kriter ve rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, hidrolik olmak üzere 5 alternatif enerji kaynağı belirlenmiştir. Kısa (2021), Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti (CRITIC) tabanlı GRA Yaklaşımını kullanarak, TR83 bölgesindeki yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmiştir. Rüzgar enerjisi kurulu gücünün toplam güç içindeki payının en önem verilen kriter olduğu ve Samsun ilinin yatırım için en iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 1. Enerji Alternatifi Seçim Problemleri İçin Literatür Özeti

Çalışma	Yöntem	Sonuç
Akash ve diğerleri (1999)	AHP	En iyi elektrik üretim sisteminin güneş enerji santralleri olduğu ortaya çıkmıştır ve bu sonucu sırasıyla rüzgâr ve hidroelektrik santralleri izlerken, en kötü seçenek olarak ise yine sırasıyla nükleer elektrik ve fosil yakıt elektrik gücü olmuştur.
Kabir ve Shihan (2003)	AHP	Teknolojik sınırlamalara rağmen güneş enerjisinin en iyi alternatif olduğu ve bu enerji kaynağını biyogaz ve rüzgârın takip ettiği sonucu bulunmuştur.
Topçu ve Ulengin (2004)	PROMETHEE	Yenilenebilir enerjinin çoğu formları, bir yerden diğerine büyük ölçüde değişen coğrafi ve çevresel faktörlere bağlı olduğundan her ülkenin kendi politikalarını coğrafi ve politik koşullarına uygun olarak planlaması gerektiği belirtilmiştir.
Nigim ve diğerleri (2004)	AHP, SIMUS	Vaka çalışmasına dayanarak, hem AHP hem de SIMUS aynı sıralama (güneş enerjisi, güneş fotovoltaik, jeotermal, rüzgâr, micro-hidro) ile sonuçlanmıştır. Her iki yöntemin de etkili olduğu ve karar alma süreçlerine destek vermelerini sağlayan şeffaf ve bilimsel prosedürlerde grup karar alma sürecini kolaylaştırdığı kanıtlanmıştır.
Köne ve Büke (2007)	ANP	Çalışma modelinin tüm alternatif senaryoları içinde, en yüksek değer bulan alternatifi hidroelektriktir.
Önüt ve diğerleri (2008)	ANP	Yapılan çalışma sonucunda endüstri sektörü için en iyi enerji alternatifinin fosil yakıtlar olduğu sonucuna varılmıştır.
Tsoutsos ve diğerleri (2008)	PROMETHEE	Enerji planlama arenasındaki aktörler (yerel yetkililer, potansiyel yatırımcılar, yerel topluluklar, akademik kurumlar, çevre grupları, hükümetler ve Avrupa Birliği) tarafından belirlenen ekonomik, teknik, sosyal ve çevresel kriterlere göre alternatifler değerlendirilmiş ve her aktör için farklı bir sıralama elde edilmiştir.
Kahraman ve diğerleri (2009)	FAD ve BAHP	Değerlendirme sonucunda en uygun yenilenebilir enerji alternatifi rüzgâr enerjisi olmuştur.
Atıcı ve Ulucan (2009)	ELECTRE ve PROMETHEE	Her iki uygulamanın da çeşitli alternatiflerin seçilen kriterler açısından analitik bir yöntem ile sıralandığı ve karar vericilere yol gösterici olduğu sonucuna varılmıştır.
Wang ve diğerleri (2010)	AHP	Sonuçlar, kömürün hâlâ en çok tercih edilen enerji alternatifi olmasına rağmen yenilenebilir enerji ile yakından takip edildiğini göstermektedir.
Amer ve Daim (2011)	AHP	Karar modelinde alternatif olarak, rüzgâr enerjisi, güneş fotovoltaik, güneş termal ve biyokütle enerjileri olarak sıralanmıştır.
Ayan ve Pabuççu (2013)	AHP	Analiz sonucunda; sırası ile hidroelektrik, rüzgâr, biyoyakıt, jeotermal enerji ve son olarak da güneş enerjisi yatırımlarının uygun olabileceği tespit edilmiştir. Bu sonuçlarda ekonomik faktörler, enerji ile ilgili faktörler, çevresel faktörler ve kurumsal faktörler etkili olmuştur.
Erdoğan (2011)	Tip-2 BAHP ve Tip-2 BTOPSIS	Değerlendirme sonucunda da ilk sırada kullanılması gereken enerji kaynağı alternatifi rüzgâr enerjisi olmuştur.
Sağır ve Doğanalp (2016)	BTOPSIS	Enerji kaynakları alternatiflerinin sıralaması, yenilenebilir enerji kaynakları, nükleer enerji kaynakları ve fosil enerji kaynakları olarak belirlenmiştir.
Kargı ve Aydın (2017)	BAHP	Değerlendirme sonucunda en uygun yenilenebilir enerji kaynakları hidroelektrik enerji ve rüzgâr enerjisi olmuştur.
Özcan ve diğerleri (2017)	ANP ve TOPSIS	Bu çalışma sonucunda, Türkiye'nin yenilenebilir enerji yatırımlarını sırasıyla rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal ve güneş santrallerine yapması gerektiği tespit edilmiştir.
Madhuri ve Hıwarkar (2017)	AHP	Çalışmada ele alınan güneş enerjisi, biyokütle ve rüzgâr olmak üzere üç yenilenebilir enerjiden güneş enerjisi en iyi enerji alternatifi olmuştur.
Doğan ve Uludağ (2018)	AHP, GRA ve BGRA	Türkiye açısından en uygun yenilenebilir enerji kaynağının güneş enerjisi, güneş enerjisi için en elverişli ilin ise Mardin olduğu sonucuna varılmıştır.
Tolga ve Turgut (2018)	BTODIM	Uygulamada yenilenebilir enerji sıralaması için farklı θ değerleriyle farklı sıralama sonuçları ortaya çıkmıştır. Genel olarak güneş enerjisi ve LFG enerjisi en iyi alternatif olarak değerlendirilirken, hidroelektrik enerji tüm sıralamalarda en son sırada yer almıştır.
Ayçin ve Arsu (2019)	Entropi ve CODAS	Değerlendirme sonuçlarına göre, bölgeler performanslarına göre TR5- Batı Anadolu, TR3- Ege ve TR7-Orta Anadolu ,TRA- Kuzeydoğu Anadolu, TR1- İstanbul ve TR4- Doğu Marmara şeklinde sıralanmıştır.
Karaaslan ve Aydın (2020)	AHP, COPRAS ve MULTIMOORA	Analiz sonucunda COPRAS ve MULTIMOORA yöntemlerinin her ikisi ile de sırasıyla hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütlenin en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olduğu tespit edilmiştir.
Kısa (2021)	GRA, CRITIC	Değerlendirme sonucunda bölgesel düzeyde yenilenebilir enerji yatırımları açısından en iyi düzeyde olan ilin Samsun olduğu gözlemlenmiştir. Onu sırasıyla Çorum, Amasya ve Tokat illeri takip etmiştir.

3. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ

Karar verme, mevcut alternatiflerin arasından amaca en uygun ve mümkün olan bir veya birkaçının seçilmesi sürecidir. Yapılan bilimsel çalışmalarda, belirsiz ve karmaşık bir karar ortamında karar verme durumunda karar vericinin, tecrübe ve bilgisi sistematik bir şekilde değerlendirilerek, en iyi çözüme nasıl ulaşılabileceğine ilişkin yaklaşımlar geliştirilmiştir. Karar verme sürecinde birbiriyle çelişen birden çok kriter bir arada olduğundan geleneksel seçim yöntemlerinin kullanılması çözümü gerçekçilikten uzaklaştırır, bu şekildeki karar verme durumlarında ise ÇKKV tekniklerinin kullanımı gerekir. Çok Kriterli Analiz, genel adıyla ÇKKV, çoklu hedeflerin bir arada olduğu karar verme süreciyle ilgilenen yöneylem araştırması modellerinin genel bir alt sınıfıdır. Bu yöntemler, nicel ve nitel kriterleri ele alabilir, ölçülemeyen birimleri ve çelişen kriterleri göz önünde bulundurabilir ve alternatiflerin seçimindeki zorluklarla başa çıkabilir (Gülenç ve Aydın, 2010).

1960'lı yıllarda karar verme işlerine yardımcı olacak araçlara gerek duyulmasıyla geliştirilmeye başlanan ÇKKV yöntemlerinin amaçları, karar verme sürecindeki amaçlarla tutarlı olunarak karar vericiye yardımcı olmak, şeffaf değerlendirme süreçleri ve temsili veriler kullanmak, karar süreçlerini tamamlayarak verimliliği artırmaya çalışmak olarak sıralanabilir. ÇKKV, birçok ölçülebilir ve ölçülemeyen operasyonel ve stratejik faktörü aynı anda değerlendirme imkânı sağlayan analitik bir süreçtir. Süreçte en önemli konu, modelin uygun şekilde kurulmasıdır. ÇKKV'de, en çok tercih edilen yöntemler şunlardır; AHP, ANP, TOPSIS, PROMETHEE ve ELECTRE'dir. Karar vericinin sayılabilir veya sayılamaz sayıda birçok alternatiften en az iki kritere dayalı değerlendirme yaparak seçim yapmasını sağlar (Basar, 2011: 18).

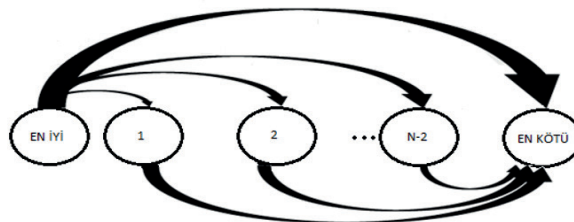
ELECTRE Yönteminde her bir değerlendirme kriteri için alternatifler arasında ikili üstünlük kıyaslamalarına dayanarak çözüm yapılır. TOPSIS Yöntemi, alternatif noktaların ideal çözüme yakınlığı prensibine dayanan, ELECTRE Yönteminin temel yaklaşımlarını kullanan ancak daha kısa bir yöntemdir. PROMETHEE Yöntemi, Brans tarafından 1982 yılında mevcut önceliklendirme yöntemlerinin uygulanmasında yaşanan zorluklardan yola çıkılarak geliştirilmiştir. AHP ve ANP yöntemlerinde ise amaç, alternatif ve kriter sayılarının fazla olduğu karmaşık karar sürecinde, sürecin kontrol altında tutularak, sonuçların kolay elde edilmesidir (Basar, 2011: 18).

Bu çalışmada ise 2015 yılında Rezaei tarafından geliştirilmiş ÇKKV yöntemi olan BWM kullanılmıştır.

3.1. En İyi En Kötü Yöntemi (Best Worst Method)

BWM, işletme ve ekonomi, sağlık, bilişim, mühendislik ve tarım gibi çeşitli karar alma alanlarında kullanılabilir. Prensip olarak, amaç bir dizi alternatif arasından bir alternatif veya alternatif grubu seçmek için bir karar verici veya bir grup karar verici tarafından kullanılabilir (Rezaei, 2019). Bu yöntemin belirgin özellikleri, mevcut ÇKKV yöntemlerinin çoğuna kıyasla; (i) daha az karşılaştırma verisi gerektirmesi, (ii) daha tutarlı, daha güvenilir sonuçlar üretmesidir (Rezaei, 2015).

Bir ÇKKV probleminde, en iyi alternatifleri seçmek için bir dizi kritere göre çeşitli alternatifler değerlendirilir. BWM'ye göre, en iyi (örneğin en çok istenen, en önemli) ve en kötü (örneğin en az istenen, en az önemli) kriterler ilk önce karar veren tarafından belirlenir. Daha sonra bu iki kriterden her biri (en iyi ve en kötü) ve diğer kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yapılır. Çeşitli alternatif ve kriter setlerine ağırlık tanımlanarak son puanlar belirlenmekte ve en iyi alternatif seçilmektedir (Rezaei, 2015).



Şekil 1. BWM Referans Karşılaştırma (Rezaei, 2015)

En İyi En Kötü Metodu 6 adımda gerçekleştirilmektedir (Rezaei, 2015; Rezaei, 2016; Işıldar, 2018: 39).

Adım 1. Bir dizi karar kriteri belirlenir. Karar problemine etkisi olan kriterler c_1, c_2, \dots, c_n belirlenir.

Adım 2. N adet kriter arasından en iyi (en önemli, en çok istenen) ve en kötü (en önemsiz, en az istenen) kriterler belirlenir. Bu aşamada, karar vericiler en iyi ve en kötü kriterleri tanımlarlar. Ancak bu adımda karşılaştırma yapılmaz.

Adım 3. Bu adımda belirlenen en iyi kriterin diğer kriterlere göre tercihi 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenir. Eşit öneme sahip olan 1 ile, çok önemli olan ise 9 ile belirtilmektedir. En iyi kriter göre Diğerleri Vektörü: $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ burada, a_{Bj} , kriter j üzerinde en iyi kriterin B tercihini belirtir. $a_{BB} = 1$ 'dir.

Adım 4. Bu aşamada ise en kötü kriterin diğer kriterlerle 1 ile 9 arasında bir sayı kullanarak karşılaştırması yapılır. Diğerlerine göre En Kötü Vektörü: $A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$ burada a_{jw} , ölçüt j'nin en kötü kriter W üzerindeki tercihini belirtir. $a_{wW} = 1$ dir.

Adım 5. En iyi ağırlıklar bulunur ($W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$). Kriterler için en uygun ağırlık, her bir $W_B = W_j$ ve $W_j = W_w$ çifti için $W_B/W_j = a_{Bj}$ ve $W_j/W_w = a_{jw}$.

Tüm j için bu koşulları yerine getirmek için burada en büyük mutlak farklılıkların en küçüklendiği bir çözüm bulunmalıdır:

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \quad \left| \frac{W_j}{W_w} - a_{jw} \right|$$

Ağırlıkların negatif olmamasına ve toplam koşuluna bakıldığında, aşağıdaki problem modeli ortaya çıkmaktadır (Model 1):

$$\min \max \{ |W_B - W_j a_{Bj}|, |W_j - W_w a_{jw}| \} \quad (1)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (2)$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

Model (1) doğrusal hale aşağıdaki gibi çevrilebilir (Model 2):

$$\min \xi \quad (4)$$

$$|W_B - W_j a_{Bj}| \leq \xi \quad (5)$$

$$|W_j - W_w a_{jw}| \leq \xi \quad (6)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (7)$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

Model 2'nin çözümü ile kriter ağırlıkları ve ξ elde edilir.

4. UYGULAMA

Çalışmada, enerji sürdürülebilirliği için yenilenebilir enerji kaynaklarının yatırım önceliğine göre karar verme problemi ele alınmıştır. Uygulama, Konya'daki özel bir enerji şirketinde 2019 yılı 2. çeyrek verileri ile İç Anadolu Bölgesi için değerlendirme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle enerji yatırım bölümü ve GES mühendislerinden oluşan beş kişilik uzman bir araştırma ekibi oluşturulmuş ve probleme BWM yaklaşımı uygulanmıştır. İlk aşamada, literatürdeki geçmiş çalışmalar ve uzman görüşleri de göz önüne alınarak konuyla ilgili 13 kriter ve güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle enerjileri olmak üzere beş alternatif belirlenmiş ve bu doğrultuda puanlama formları hazırlanmıştır. Hazırlanan formların

uzman ekip tarafından puanlanması istenmiştir. Puanlama yapılırken tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının aynı güçte olduğu ve uygun şartlar altında çalıştığı varsayılmıştır.

BWM uygulanarak yenilenebilir enerji kaynak kullanım ve yatırımları için gerekli olan 13 kritere göre beş yenilenebilir enerji kaynak alternatifinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Çözüm için BWM'nin seçilmesinin nedeni enerji kaynak alternatiflerinin değerlendirilmesine farklı, yeni bir bakış açısı kazandırmaktır. Bu yöntem de AHP gibi ikili karşılaştırma esasına dayanmaktadır ancak daha az ikili karşılaştırma yapmakta ve daha tutarlı sonuçlar ürettiği belirtilmektedir (Rezaei, 2015).

4.1. Kriterlerin Tespit Edilmesi

Temel kriterlerin belirlenmesi için literatür taranarak kullanılabilir kriterlere yönelik bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırmanın sonuçları uzmanlarla paylaşılarak görüşleri doğrultusunda 13 kriterin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kriterler aşağıda açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.

Yatırım Maliyeti (C₁): Enerji santrallerinin kurulumu ve üretim faaliyetine geçmesi için gerekli olan parasal miktarın değerlendirilmesidir. Her tesis yatırımı için değerlendirilen kriterlerin başında maliyet gelmektedir. Büyük altyapı yatırımları olan enerji santrallerinin de her tesisinin kurulumunda olduğu gibi yatırımları için kapsamlı bir fizibilite çalışmasının yapılması gereklidir (Özcan ve diğerleri, 2017).

İşletme Maliyeti ve Bakım Maliyeti (C₂): Enerji santrallerinin işletilmesi için ihtiyaç duyulan malzeme, personel, tesis arıza ve bakımı gibi maliyet giderleridir.

İstihdam (C₃): Kurulacak santralin sağlayacağı istihdamın değerlendirilmesidir. Enerji santralinin işletilmesi esnasında ihtiyaç duyulan kalifiye elemanı belirten kriterdir. Enerji santralleri kurulum aşamasında istihdam yarattığı gibi, işletme ve bakım işleri için de istihdam olanağı oluşturmaktadır.

İşletme Ömrü (C₄): Santral kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle yatırımın ekonomik ömrü, kârlılığı belirleyen önemli bir faktördür.

Enerji Verimliliği (C₅): Üretim aşamasında birim enerji kaynağından elde edilen verim, enerji verimliliğini ifade eder. Üretim sürecinde en az girdi ile en fazla çıktıyı sağlama oranı ne kadar fazla ise enerji verimliliği o kadar yüksektir.

Ekonomik Potansiyel (C₆): Yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğu potansiyelin ne kadarının ekonomik açıdan düşük maliyet ile üretilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir (Karaca ve Ulutaş, 2018).

Alan Gereksinimi (C₇): Enerji santrali için toplam alan kullanımı ve birim m²'de üretilen enerji miktarı önemli bir faktördür.

Elektrik Üretim Maliyeti (C₈): Enerji santralinin üretim yapması için hesaplanan enerji birim maliyetidir.

Çevresel Etkiler ve Sera Gazı Salınımı (C₉): Çevresel etkiler enerji üretiminde kullanılan yenilenebilir kaynakların insan sağlığına ve çevreye verdiği zararları göstermektedir. Ancak her enerji kaynağının neden olabileceği sorunlar aynı ölçüde değildir. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynaklarının neden olacağı etki ile fosil yakıtların kullanımının çevreye etkisi aynı boyutta olmayacaktır (Sağır ve Doğanalp, 2016).

Fosil yakıtlı elektrik üretim santralleri baca gazlarını oluşturmakta, bu gazlar ise CO, CO₂, SO₂ ve NOx'den oluşan zararlı molekülleri içermektedir. Bu moleküller, hava, çevre ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Ancak yenilenebilir kaynak kullanılan santrallerde bu gazların emisyon oranları değişiklik göstermekle birlikte, çevre ve insan sağlığını etkilemeyecek seviyede çok düşüktür (Özcan ve diğerleri, 2017).

Geri Ödeme Süresi (C_{10}): Bir santral yatırımı için harcanan toplam sermayenin ne kadar zaman sonra geri alınabildiğini gösteren sayısal değerdir. Hangi kaynağa yatırım yapılması gerektiği kararı verilmeden önce diğer kriterlerle beraber yatırımdan beklenen geri ödeme süresinin de diğer yatırım yapılacak seçeneklerle karşılaştırılması gerekmektedir (Karaca ve Ulutaş, 2018).

Santral İnşa Süresi (C_{11}): Yapımına başlanan santralin bitirilmesi ile üretime başlanabilmesi ve diğer hedeflerin de gerçekleşebilmesi için bu kriter ön şarttır (Özcan ve diğerleri, 2017).

Devlet Teşviki (C_{12}): Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda hükümet özellikle son yıllarda birçok teşvik vermektedir. Gümrük vergisi muafiyeti, katma değer vergisi, üretilen enerjinin alım garantisi ve hibe/kredi vb. bunlara örnektir (Özcan ve diğerleri, 2017).

Dışa Bağımlılık (C_{13}): Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretim içindeki payının artırılması ile dışa bağımlılığın azaltılmasının sağlanması önemli bir stratejik hedefdir (Özcan ve diğerleri, 2017).

4.2. En İyi ve En Kötü Kriterlerin Tespit Edilmesi

Uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucunda yatırım planlaması için en iyi kriteri “Geri Ödeme Periyodu (C_{10})” ve en kötü kriteri “Çevresel Etkiler Sera Gazı Salınımı (C_9)” olarak belirlenmiştir. Uzmanlara göre yatırımcı gözü ile bakıldığında kriter önceliğinde ilk sorulan geri ödeme periyodudur. Yatırımcı finanse ettiği bir tesisin yatırım planlaması için ilk olarak göz önünde bulundurduğu kriter olması sebebiyle geri ödeme periyodu en iyi kriter seçilmiştir.

4.3. En İyi Kriteria Göre Diğer Kriterlerin Önceliğini Belirleme

En iyi kriter olan geri ödeme periyodunun diğer kriterler ile ikili karşılaştırmaları uzmanlarla birlikte yapılmış olup, a_{Bj} değerleri Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. En İyi Kriteria Göre Değerlendirme Tablosu

En İyi Kriter (C_{10})	Kriterler	Geri Ödeme Periyodu
Yatırım Maliyeti	C_1	2
İşletme Maliyeti ve Bakım Maliyeti	C_2	3
Kurulum İşletme ve Bakım İstihdam	C_3	8
İşletme Ömrü	C_4	4
Enerji Verimliliği	C_5	4
Ekonomik Potansiyel	C_6	4
Alan Gereksinimi	C_7	5
Elektrik Üretim Maliyeti	C_8	3
Çevresel Etki Sera Gazı Salınımı	C_9	9
Geri Ödeme Periyodu	C_{10}	1
Santral İnşa Süresi	C_{11}	6
Devlet Teşviki	C_{12}	4
Dışa Bağımlılık	C_{13}	8

4.4. En Kötü Kriterin Diğer Kriterlere Göre Önceliğini Belirleme

En kötü kriter olan çevresel etkiler ve sera gazı salınımı; diğer kriterler ile ikili karşılaştırmaları uzmanlarla birlikte yapılmış olup, a_{jw} değerleri Çizelge 3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3. En Kötü Kriteria Göre Değerlendirme Tablosu

En Kötü Kriter (C _j)	Kriterler	Çevresel Etkiler Sera Gazı Salınımı
Yatırım Maliyeti	C ₁	8
İşletme Maliyeti ve Bakım Maliyeti	C ₂	7
Kurulum İşletme ve Bakım İstihdam	C ₃	5
İşletme Ömrü	C ₄	4
Enerji Verimliliği	C ₅	4
Ekonomik Potansiyel	C ₆	5
Alan Gereksinimi	C ₇	3
Elektrik Üretim Maliyeti	C ₈	4
Çevresel Etki Sera Gazı Salınımı	C ₉	1
Geri Ödeme Periyodu	C ₁₀	9
Santral İnşa Süresi	C ₁₁	4
Devlet Teşviki	C ₁₂	8
Dışa Bağımlılık	C ₁₃	4

4.5. En İyi Ağırlıkları Bulma

Metodun son adımında, son ağırlıkları elde etmek için bir model sunulmuştur. Adım 5'te verilen eşitlikte kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$j = 1, 2, \dots, 13$ için

$a_{Bj} = a_{10j}$: En iyi kriterin diğer kriterlere göre önceliği

$a_{jw} = a_{j9}$: En kötü kriterin diğer kriterlere göre önceliği

$W_B = W_{10}$: En iyi kriter geri ödeme periyodu ağırlığı

$W_w = W_9$: En kötü kriter çevresel etki sera gazı salınımı ağırlığı

W_j : j . kriterin ağırlığı

Karar değişkenleri Model 2'ye göre yazıldığında modelin son hali aşağıdaki gibidir:

$$\min \xi \quad (9)$$

$$|W_{10} - W_j a_{10j}| \leq \xi \quad (10)$$

$$|W_j - W_9 a_{j9}| \leq \xi \quad (11)$$

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_8 + W_9 + W_{10} + W_{11} + W_{12} + W_{13} = 1 \quad (12)$$

$$W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8, W_9, W_{10}, W_{11}, W_{12}, W_{13} \geq 0 \quad (13)$$

Modelin çözüm sonucunda ağırlıklar ve ξ bulunmaktadır. ξ , sıfıra yaklaştıkça tutarlılık artmaktadır. Değişen hücreler ağırlık değerleri, hedef hücre tutarlılık değeri (ξ) olacak şekilde yukarıdaki model GAMS 24.0 programı ile çözülmüş ve tutarlılığı (ξ) en küçükleyen ağırlıklar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. ξ Tutarlılık ve W Ağırlık Değerleri

W_1	0,138	W_8	0,092
W_2	0,092	W_9	0,017
W_3	0,035	W_{10}	0,213
W_4	0,069	W_{11}	0,046
W_5	0,069	W_{12}	0,069
W_6	0,069	W_{13}	0,035
W_7	0,055	ξ	0,064

Uzman görüşü eşliğinde değerlendirilen karar matrisi Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Karar Matrisi

Kriterler/Alternatifler	Güneş Enerjisi	Rüzgâr Enerjisi	Hidroelektrik Enerjisi	Jeotermal Enerjisi	Biyokütle Enerjisi
Yatırım Maliyeti (dolar/kW)	10	6	6	4	6
İşletme Maliyeti ve Bakım Maliyeti (dolar/MW-yıl)	10	6	6	5	6
Kurulum İşletme ve Bakım İstihdam (MW başına)	6	9	9	10	6
İşletme Ömrü (yıl)	7	7	10	7	9
Enerji Verimliliği	5	7	9	10	9
Ekonomik Potansiyel (GW/yıl)	7	8	10	4	2
Alan Gereksinimi m ² /kWs	8	10	5	5	8
Elektrik Üretim Maliyeti (dolar/kW-saat)	10	10	9	10	9
Çevre Etkisi Sera Gazı Salınımı (g/MWs)	5	8	10	9	3
Geri Ödeme Periyodu (yıl)	8	8	8	8	8
Santral İnşa Süresi (yıl)	10	8	8	8	8
Devlet Teşviki (dolar/kWh)	10	8	8	8	10
Dışa Bağımlılık (Kaynak pot.GWh/yıl)	10	10	10	10	10

Karar matrisindeki değerler, hesaplanmış olan ağırlık değerleriyle çarpılmış ve Çizelge 6'daki matris hazırlanmıştır.

Çizelge 6. Ağırlıklı Karar Matrisi

Kriterler/Alternatifler	Güneş Enerjisi	Rüzgâr Enerjisi	Hidroelektrik Enerjisi	Jeotermal Enerjisi	Biyokütle Enerjisi
Yatırım Maliyeti (dolar/kW)	1,38	0,828	0,828	0,552	0,828
İşletme Maliyeti ve Bakım Maliyeti (dolar/MW-yıl)	0,92	0,552	0,552	0,46	0,552
Kurulum İşletme ve Bakım İstihdam (MW başına)	0,21	0,315	0,315	0,35	0,21
İşletme Ömrü (yıl)	0,483	0,483	0,69	0,483	0,621
Enerji Verimliliği	0,345	0,483	0,621	0,69	0,621
Ekonomik Potansiyel (GW/yıl)	0,483	0,552	0,69	0,276	0,138
Alan Gereksinimi m ² /kWs	0,44	0,55	0,275	0,275	0,44
Elektrik Üretim Maliyeti (dolar/kW-saat)	0,92	0,92	0,828	0,92	0,828
Çevre Etkisi Sera Gazı Salınımı (g/MWs)	0,085	0,136	0,17	0,153	0,051
Geri Ödeme Periyodu (yıl)	1,704	1,704	1,704	1,704	1,704
Santral İnşa Süresi (yıl)	0,46	0,368	0,368	0,368	0,368
Devlet Teşviki (dolar/kWh)	0,69	0,552	0,552	0,552	0,69
Dışa Bağımlılık (Kaynak pot.GWh/yıl)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Toplam	8,47	7,793	7,943	7,133	7,401

Alternatiflerin kritere göre aldığı tüm değerler toplanarak sonuç değerleri bulunmuştur. Güneş enerjisi alternatifi için kriterlerin ağırlık oranıyla çarpılmış değer sonucu aşağıdaki gibidir:

$$\text{Güneş E. Skoru} = 1,38+0,92+0,21+0,483+0,345+0,483+0,44+0,92+0,085+1,704+0,46+0,69+0,35 \\ = 8,47$$

Diğer bütün alternatifler için de bu işlem yapılmış ve Çizelge 7'deki sıralama elde edilmiştir.

Çizelge 7. Alternatiflerin Sıralaması

Alternatifler	Skorlar	Sıralama
Güneş Enerjisi	8,47	1
Hidroelektrik Enerjisi	7,943	2
Rüzgâr Enerjisi	7,793	3
Biyokütle Enerjisi	7,401	4
Jeotermal Enerjisi	7,133	5

Toplam değerler büyüken küçüğe doğru sıralanarak BWM çözümüne göre alternatifler sıralanmıştır. Alternatif arasındaki sıralama en iyiden en kötüye; güneş, hidroelektrik, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal şeklindedir.

5. SONUÇ

Dünyadaki enerji gereksiniminin giderek artmasıyla birlikte enerji kaynaklarının önemi de giderek artmaya başlamıştır. Bu talebin karşılanması için kullanılan kaynakların çoğunlukla tükenebilir olması sebebiyle enerji sürdürülebilirliğinin sağlanması için bugün verilecek kararlar; çevresel, ekonomik, teknolojik ve sosyal etkileriyle geleceğin Türkiye'sini oluşturması bakımından oldukça önemlidir. Türkiye'nin enerji politikası; artan enerji talebini karşılarken enerji arz güvenliğini sağlamak, aynı zamanda da dışa bağımlılığı ortadan kaldırmaktır. Bu sebeple de enerji sürdürülebilirliği için hangi kaynaklara yatırım yapılması gerektiğine karar vermek, enerji politikasını gerçekleştirmek için en önemli adımdır.

Enerji kaynak planlama problemleri, çok fazla alternatifin, kriterin ve karar vericinin olduğu karmaşık problemlerdir. Bu problemlerin çözümünde çoğunlukla birbirleriyle çelişen kriterlere dayalı alternatifler arasında hiyerarşik kıyaslamalardan elde edilen seçenekler kullanılır. Karar verme sürecinin çözümlenmesinde çok sayıda değişken rol oynar. Çevresel etkiler, fayda maliyet analizi gibi değişkenler sayısal modeller tarafından ele alınabilir. Diğer değişkenler ise siyasi güçlükler, sosyal ve kültürel değişkenler niteliksel şekilde veya öznel yargı ile değerlendirilebilir. Birden çok nitel ve nicel kriter ve alternatifler söz konusu olduğundan problem çözümünden bunların hepsini bir arada değerlendirebilmek için ÇKKV teknikleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi, ÇKKV yöntemlerinden olan BWM ile yapılmıştır. Belirlenen beş yenilenebilir enerji kaynak alternatiflerinin değerlendirilmesi için yenilenebilir enerji kaynağının çevreye uyumu ve enerji devamlılığını etkileyen 13 kriter kullanılmış ve günümüz şartları dikkate alınarak uzmanlarca kriter kıyaslamaları yapılmıştır. Ardından alternatifler kriterlere göre değerlendirilerek sıralanmıştır. Çalışmanın amacı, özel bir enerji şirketi için İç Anadolu Bölgesi'nde yatırım yapmak üzere en uygun olan yenilenebilir enerji kaynağını belirlemektir. Ayrıca, ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışan karar vericilere destek olacak bir uygulama olması ve problemin yeni bir çözüm yöntemi (BWM) ile değerlendirilerek literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bu bağlamda işletmelerin, yatırım planlarına karar vermek, daha kârlı ve avantajlı bir şekilde gerçekleştirebilmek için bilimsel yöntemlerden yararlanmaları önerilmektedir.

Uygulamada kullanılan BWM ile yenilenebilir enerji alternatiflerinin en iyiden en kötüye doğru sıralaması; güneş enerjisi, hidroelektrik enerji, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji şeklindedir. Sonuç olarak yatırım için güneş enerjisi, en iyi yenilenebilir enerji alternatifi olarak önerilebilir. Yenilenebilir enerji kaynak alternatiflerinin değerlendirilmesinde sonuçların yorumlanması, çalışmanın sınırlılıkları dahilinde tüm bağlı kriterlerin günümüz şartlarına göre eş değer güçleri göz önüne alınarak yapılmış olup, hızla değişen, gelişen ekonomi ve teknoloji şartlarına bağlı olarak enerji alternatif sıralamasının da gün geçtikçe değişiklik göstereceği ayrıca farklı kriterlerin kullanılması, farklı uzmanlar ile uygulama yapılması veya farklı çözüm yöntemlerinin tercih edilmesinin de daha farklı sonuçlar ortaya koyabileceği göz ardı edilmemelidir.

Bir sonraki aşamada, BWM bulanık bir ortamda kullanılabilir ve diğer yöntemler veya matematiksel modellerle entegre edilerek elde edilen sonuçlar iyileştirilebilir. Gelecek çalışmalarda uygulama alanı genişletilip farklı bölgeler için daha kapsamlı bir inceleme yürütülebilir. Ayrıca alanındaki uzmanların önerilebileceği farklı kriterler dikkate alınarak, farklı ÇKKV yöntemleri uygulanabilir ve sonuçlar uygunluk açısından karşılaştırılabilir.

KAYNAKÇA

- AHMAD, S. ve TAHAR, R. M. (2014), **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, DOI: 10.1016/j.renene.2013.10.001.
- AFGAN, N. H. ve CARVALHO, M. G. (2002), **Multi-Criteria Assessment of New and Renewable Energy Power Plants**, Energy 27, 739-755.
- AKASH, B. A., MAMLOOK, R. ve MOHSENA, M. S. (1999), **Multi-Criteria Selection of Electric Power Plants Using Analytical Hierarchy Process**, Electric Power Systems Research, 29-35.
- AMER, M. ve DAİM, T. U. (2011), **Selection of Renewable Energy Technologies for a Developing County: A Case of Pakistan**, Energy for Sustainable Development Portland State University, Portland, USA, 420-435.
- ARIKAN KARGI, V. S. ve AYDIN, Z. B. (2017), **Bulanık AHP Yönteminin Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Seçiminde Kullanılması: Bursa Örneği**, Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi, Sayı: 55, 60-74.
- ATICI, K. B. ve ULUCAN, A. (2009), **Enerji Projelerinin Değerlendirilmesi Sürecinde Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları ve Türkiye Uygulamaları**, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 27 (1), 161-186.
- AYAN, T. Y. ve PABUÇCU, H. (2013), **Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yatırım Projelerinin Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemi İle Değerlendirilmesi**, Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 18 (3), 89-110.
- AYÇİN, E. ve ARSU, T. (2019), **CODAS ve Entropi Yöntemleri İle Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Düzey 1 Bölgelerine Göre İncelenmesi**, Avrasya Uluslararası Araştırmalar Dergisi, 7 (18), 425-447.
- BASAR, H. B. (2011), **Enerji Santrallerinin Çok Kriterli Değerlendirilmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- BÜYÜKÖZKAN, G. ve GÜLERYÜZ, S. (2017), **Evaluation of Renewable Energy Resources in Turkey Using an Integrated MCDM Approach with Linguistic Interval Fuzzy Preference Relations**, Energy, 123, 149-163, DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.137.
- DOĞAN, H. ve ULUDAĞ, A. S. (2018), **Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Değerlendirilmesi ve Uygun Tesis Yeri Seçimi: Türkiye’de Bir Uygulama**, Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 14 (2), 157-180.
- ERDOĞAN, M. (2013), **Enerji Alternatiflerinin Bulanık Çok Ölçütlü Değerlendirilmesi ve Türkiye İçin Bir Yol Haritası**, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- GÜLENÇ, F. İ. ve BİLGİN AYDIN, G. (2010), **Yatırım Kararları İçin Bir Model Önerisi: AHP Yöntemi**, 9 (34), 97-107.
- İŞILDAR, A. (2018), **Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Katı Atık Bertaraf Yöntemi Seçimi**, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- KABIR, A. B. M. Z. ve SHIHAN, S. M. A. (2003), **Selection of Renewable Energy Sources Using Analytic Hierarchy Process**, International Symposium on Analytic Hierarchy Process ISAHP, Bali, Endonezya, 267-276.
- KAHRAMAN, C., KAYA, İ., ve CEBİ, S. (2009), **A Comparative Analysis for Multiattribute Selection Among Renewable Energy Alternatives Using Fuzzy Axiomatic Design and Fuzzy Analytic Hierarchy Process**, Energy, 34 (10), 1603-1616.
- KARAASLAN, A. ve AYDIN, S. (2020), **Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri İle Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği**, Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 34 (4), 1351-1375.
- KISA, A. C. G. (2021), **TR83 Bölgesinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının CRITIC Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yaklaşımı İle Değerlendirilmesi**, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, DOI: 10.5505/pajes.2021.99389.
- KARACA, C. ve ULUTAŞ, A. (2018), **Entropi ve Waspas Yöntemleri Kullanılarak Türkiye İçin Uygun Yenilenebilir Enerji Kaynağının Seçimi**, Ege Akademik Bakış, 18 (3), 483-494.

- KÖNE, A. Ç. ve BÜKE, T. (2007), **An Analytical Network Process (ANP) Evaluation of Alternative Fuels for Electricity Generation in Turkey**, *Energy Policy*, 35 (10), 5220-5228.
- LEE, H. C. ve CHANG, C. T. (2018), **Comparative Analysis of MCDM Methods for Ranking Renewable Energy Sources in Taiwan**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 883–896, DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.007.
- MADHURI, Y. S. ve HIWARKAR, A. D. (2017), **Selection of Appropriate Renewable Energy Resources for Uttar Pradesh by Using Analytical Hierarchy Process (AHP)**, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 6 (2), 2580-2587.
- NIGIM K., MUNIER N. ve GREEN, J. (2004), **Pre-Feasibility MCDM Tools to Aid Communities in Prioritizing Local Viable Renewable Energy Sources**, *Renewable Energy*, 29 (11), 1775-1791.
- ÖNÜT, S., TUZKAYA, U. R. ve SAADET, N. (2008), **Multiple Criteria Evaluation of Current Energy Resources for Turkish Manufacturing Industry**, *Energy Conversion and Management*, 49 (6), 1480-1492.
- ÖZCAN, E. C., ÜNLÜSOY, S. ve EREN, T. (2017), **ANP ve TOPSIS Yöntemleriyle Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi**, *Konya Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 5 (2), 204-216.
- PETROL, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Petrol>, (Erişim Tarihi: 18.05.2018).
- REZAEI, J. (2015), **Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method**, *Omega*, 53, 49-50, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>.
- REZAEI, J. (2016), **Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method: Some Properties and a Linear Model**, *Omega*, 64, 126-130, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>.
- REZAEI, J. (2019), **Best Worst Method**, <http://bestworstmethode.com>, (Erişim Tarihi: 13.03.2019).
- SAĞIR, H. ve DOĞANALP, B. (2016), **Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Perspektifinden Türkiye İçin Enerji Kaynakları Değerlendirmesi**, *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11, 234-256.
- SIKSNELYTE, I., ZAVADSKAS, E. K., STREIMIKIENE, D. ve SHARMA, D. (2018), **An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues**, *Energies*, 11 (10), 2754.
- TOLGA, A. Ç. ve TURGUT, Z. K. (2018), **Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Bulanık TODIM Yöntemiyle Değerlendirilmesi**, *Alphanumeric Journal*, 6 (1), 49-68.
- TOPCU, Y. I. ve ULENGİN, F. (2004), **Energy for the Future: An Integrated Decision Aid for the Case of Turkey**, *Energy*, 137-154.
- TSOUTSOSA, T., DRANDAKI, M., FRANTZESKAKI, N., IOSIFIDISA, E. ve KIOSSESA I. (2009), **Sustainable Energy Planning by Using Multi-Criteria Analysis Application in the Island of Crete**, *Energy Policy*, 1587-1600.
- WANG, B., KOCAOĞLU, D. F., DAİM, T. U. ve YANG, J. (2010), **A Decision Model for Energy Resource Selection in China**, *Energy Policy*, 7130-7141.