
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ENERJİ KAYNAĞI SEÇİMİ PROBLEMİNE İLERİ ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI

Mine TURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mine TURAN

21/06/2023

ENERJİ KAYNAĞI SEÇİMİ PROBLEMİNE İLERİ ÇKKV YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mine TURAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin büyüme için enerjiye olan ihtiyaçları yüksek olduğundan bu ülkeler enerji sektörüne büyük ölçüde bağımlıdır. Ayrıca enerji talebi küresel çapta her geçen gün artmaktadır. Bu talebin artmasında nüfus ve sanayileşme gibi çeşitli faktörler etkilidir. Özellikle 2020 yılında ortaya çıkan Korona virüs (COVID-19) pandemisi sürecinde bu talep daha da artmıştır. Beklenmeyen durumların da olabileceği düşünüldüğünde enerjide daha uzun vadeli yatırımların yapılması elzemdir. Bütün bunlar göz önüne alındığında ülkelerin hem artan talebi karşılayabilmek hem arz güvenliğini sağlayabilmek adına sürdürülebilirliği yüksek enerji kaynaklarına yönelmeleri ya da hibrit enerji kaynağı portföyü oluşturmaları gerekir. Enerji kaynaklarının sistematik bir şekilde değerlendirilmesi ve sıralanması için çeşitli çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı optimum enerji kaynaklarının belirlenmesi olup bu kapsamda ÇKKV bazında belirsizliği daha iyi ele alabilen bulanık kümelerin yüksek derecesi olan q seviyeli bulanık sayılar (q-ROFs) benimsenmiştir. Çalışmada enerji planlamasına yönelik oluşturulan bir ÇKKV probleminde altı alternatif enerji kaynağı on kriter bazında, q-ROF MABAC (Çok Nitelikli Sınır Yakınlık Alanı Karşılaştırması) ve q-ROF TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlığa Göre Tercih Sıralama Tekniği) metotlarıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan vaka çalışmasından elde edilen sonuçlar her iki yöntem bazında hangi kaynağın en uygun olacağı yönünde bir sıralamaya tabi tutulmuştur. Sıralamada her iki metot için benzer sonuçlara ulaşılmış olup enerji planlamasında güneş ile rüzgâr enerjisi ilk seçenekler olurken fosil kaynaklardan elde edilen enerji son tercih olmuştur.

Bilim Kodu : 90607
Anahtar Kelimeler : Enerji Planlaması, Q Seviyeli Bulanık Kümeler, Çok Kriterli Karar Verme, MABAC, TOPSIS
Sayfa Adedi : 65
Danışman : Prof. Dr. Fatih Emre BORAN

APPLICATION OF ADVANCED MCDM METHODS TO THE PROBLEM OF ENERGY SOURCE SELECTION

(M. Sc. Thesis)

Mine TURAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Since developed and developing countries have a high need for energy for growth, these countries are highly dependent on the energy sector. In addition, energy demand is increasing every day globally. Various factors such as population and industrialization are effective in increasing this demand. Especially in the process of the Corona virus (COVID-19) pandemic that occurred in 2020, this demand has increased even more. Considering that unexpected situations may also occur, it is essential to make longer-term investments in energy. Considering all these, countries should turn to highly sustainable energy sources or create a hybrid energy source portfolio in order to meet the increasing demand and ensure security of supply. Various multi-criteria decision-making (MCDM) methods are used for the systematic evaluation and sorting of energy resources. The aim of this study is to determine the most appropriate energy sources and, in this context, q rung fuzzy numbers (q-ROFs), which are the high degree of fuzzy clusters that can better handle uncertainty on the basis of MCDM, was adopted. In a MCDM problem created for energy planning in the study, six alternative energy sources were evaluated on the basis of ten criteria, using q-ROF MABAC (Multi Attributive Border Approximation Area Comparison) and q-ROF TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity) methods. The results obtained from the case study conducted in this context were subjected to a ranking on the basis of which energy source would be the most appropriate based on both methods. Similar results were reached for both methods in the ranking, and solar energy and wind energy sources were the first options in energy planning, while energy obtained from fossil sources was the last choice.

Science Code : 90607
Key Words : Energy Planning, q-Rung Fuzzy Sets, Multi Criteria Decision Making, MABAC, TOPSIS
Page Number : 65
Supervisor : Prof. Dr. Fatih Emre BORAN

TEŞEKKÜR

Bu tezin yazılmasında bilgilerinden faydalandığım danışmanım Prof. Dr. Fatih Emre BORAN'a, anket kısmında yardımcı olan Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı personeline, tezimi okumaya vakit ayıran arkadaşlarıma ve yüksek lisans sürecimde bana destek olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR iv

1. GİRİŞ 1

2. ENERJİ PLANLAMASI ve ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME 5

2.1. Enerji Planlaması 5

2.2. Türkiye'nin Enerji Alternatifleri 6

2.1.1. Güneş enerjisi 7

2.1.2. Rüzgâr enerjisi 8

2.1.3. Hidroelektrik enerji 9

2.1.4. Biokütle enerjisi 11

2.1.5. Fosil kaynaklar 12

2.1.6. Nükleer enerji 13

3. ÇKKV YÖNTEMLERİ VE METODOLOJİ 17

3.1. Literatür Taraması 17

3.2. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri 21

3.2.1. Tekil çalışan ÇKKV yöntemleri 21

3.2.2. Entegre ÇKKV yöntemleri 23

3.3. MABAC Yöntemi 23

3.4. TOPSIS Yöntemi 27

4. BULANIK KÜMELER 29

4.1. Bulanık Küme Teorisi 29

4.2. q-Rung Ortopair Bulanık (q-ROF) MABAC Yöntemi 30

Sayfa

4.3. q-ROF TOPSIS Metodu 34

5. Q SEVİYELİ BULANIK ÇKKV YÖNTEMLERİNİN ENERJİ KAYNAĞI SEÇİMİ PROBLEMİNE UYGULANMASI 37

5.1. Uygulama 37

5.1.1. q-ROF MABAC yönteminin uygulanması 40

5.1.2. q-ROF MABAC yönteminin parametre analizi 46

5.1.3. q- ROF TOPSIS yönteminin uygulanması 46

5.1.4. q- ROF TOPSIS yönteminin parametre analizi 50

6. BULGULAR 51

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 53

KAYNAKLAR 57

ÖZGEÇMİŞ 65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Alternatifler ve Değerlendirme Kriterleri 38

Çizelge 5.2. Dilsel Değişkenler 39

Çizelge 5.3. Kriterlerin Bütünleştirilmiş Bulanık Ağırlıklarının Hesaplanması 40

Çizelge 5.4. Karar Vericilerin Dilsel Değişkenli Değerlendirme Sonuçları 41

Çizelge 5.5. Karar Vericilerin Dilsel Değişkenli Değerlendirme Sonuçlarının Bulanık Sayılara Dönüştürülmesi 41

Çizelge 5.6. Birleştirilmiş q-ROF Karar Matrisi (r_{ij}) 42

Çizelge 5.7. Normalleştirilmiş Matris (N_{ij}) 43

Çizelge 5.8. Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi (WN_{ij}) 44

Çizelge 5.9. Sınır Yakınlık Alanı (SYA) Matrisi 44

Çizelge 5.10. Sınır Yakınlık Alanına Uzaklıklar 45

Çizelge 5.11. Sınır Yakınlık Alanına Uzaklıklar-2 45

Çizelge 5.12. S_i Değerleri ve Karar Alternatiflerinin Sıralaması (q=3) 46

Çizelge 5.13. q-ROF MABAC metodunun parametre analizi 46

Çizelge 5.14. Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi (R) 47

Çizelge 5.15. Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi (R)-2 48

Çizelge 5.16. Ağırlıklı normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi ($R^{'}$) 49

Çizelge 5.17. q- ROFPIS (A^{*}) ve q- ROFNIS (A^{-}) ideal çözümleri 49

Çizelge 5.18. Yakınlık değerleri (C_i^{*}) ve alternatiflerin sıralanması (q=3) 50

Çizelge 5.19. q- ROF TOPSIS metodunun parametre analizi 50

Çizelge 7.1. Alternatif ve kriterler kümesi 53

Çizelge 7.2. TOPSIS metodunun parametre analizi 54

Çizelge 7.3. MABAC metodunun parametre analizi 55

Çizelge 7.4. Alternatiflerin metotlar bazında sıralanması 55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
v	Bulanık sayılarda üye olmama derecesi
π	Bulanık sayılarda tereddütlük derecesi
w_j	j. kriterin önem ağırlığı
λ_{KV}	Karar verici nitelik katsayısı
A*	Pozitif İdeal Çözüm
A⁻	Negatif İdeal Çözüm
$\mathbf{C_i^*}$	Pozitif ideal çözüme yakınlık değeri
g_j	Sınır Yakınlık Alanı değeri
G	Sınır Yakınlık Alanı matrisi
$\mathbf{G^+}$	Üst Yakınlık Alanı
$\mathbf{G^-}$	Alt Yakınlık Alanı
M	Bulanık sayılarda üyelik derecesi
N	Normalleştirilmiş Karar Matrisi
$\mathbf{S_i}$	Alternatiflerin SYA'ya olan uzaklıklarının toplamı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AÇY	Ağırlıklı Çarpım Yöntemi
AHP	Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)
ANP	Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process)
ATY	Ağırlıklı Toplam Yöntemi
BEPA	Biokütle Enerjisi Potansiyel Atlası
BK	Bulanık Kümeler
BWM	En iyi-en kötü yöntem (Best-Worst Method)
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme

Kısaltmalar	Açıklamalar
DEA	Veri Zarflama Analizi (Data Envelopment Analysis)
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Realite
GEPA	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
KV	Karar Verici
kW	Kilovatsaat
MABAC	Çok Nitelikli Sınır Yakınlık Alanı Karşılaştırması
MAUT	Çok Nitelikli Fayda Teorisi
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
m^2	Metrekare
NGS	Nükleer Güç Santrali
NS	Nötrosofik set
q-ROFNHD	Q-rung orthopair fuzzy normalized Hamming distance
q-ROFWA	Q-ROF sayılar için aritmetik birleştirme operatörü
q-ROFWG	Q-ROF sayılar için geometik birleştirme operatörü
q-RPFs	Q-rung picture fuzzy set
q-ROFPIS	Bulanık pozitif ideal çözüm
q-ROFNIS	Bulanık negatif ideal çözüm
SBK	Sezgisel Bulanık Küme
SVM	Shapley Değer Metotu (Shapley Value Method)
SYA	Sınır Yakınlık Alanı
PBK	Pisagor Bulanık Küme
SMART	Basit Çok Ölçütlü Sıralama Tekniği
REPA	Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
TOPSIS	İdeal Çözüme Yakınlığa Göre Tercih Sıralama Tekniği
VIKOR	Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü
WSM	Ağırlıklı Toplam Yöntemi (Weighted Sum Method)
WPM	Ağırlıklı Çarpım Yöntemi (Weighted Product Method)

1. GİRİŞ

İnsanlığın başlangıcından günümüze kadar özellikle sanayinin gelişmesiyle birlikte enerji kaynakları ülkelerin çevresel, sosyal ve ekonomik gelişimini büyük ölçüde etkilemiştir. Hem nüfusun hem de gelişmişlik düzeyinin artmasıyla birlikte enerjiye olan talep de gün be gün artmaktadır. Ülkeler bu talebi sadece yenilenebilir ve fosil enerji kaynaklarından karşılayamazlar. Bu noktada çeşitli kaynakların seçiminden oluşan bir portföy oluşturmak akılcı bir yaklaşımdır.

Enerji kaynağı seçiminde birçok faktör etkili olmakla birlikte, her bir kaynağın kendi içinde avantaj ve dezavantajları vardır. Bu nedenle enerji kaynağı planlamasında belirli bir eğilimden bahsetmek zordur. Örneğin bundan 30-40 yıl öncesine kadar nükleer enerji santrallerinin yapımına küresel çapta ağırlık verilmişken günümüzde bazı ülkeler uzun vadede mevcut nükleer santrallerini kapatmayı planlamaktadır.

Enerjide artan talebin karşılanması, özellikle yenilenemeyen kaynaklar nedeniyle insanlık tarafından çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Ülkelerin enerji talebini karşılayabilmek için fosil kaynaklarla birlikte yenilenebilir kaynaklara da başvurmaları gerekli hale gelmiştir. Çünkü fosil kaynaklı enerji kullanımı özellikle sera gazları nedeniyle çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Fosil yakıtlar, halen dünyanın toplam enerji ihtiyacının %81'ini karşılayan ve genellikle gelişmiş ya da gelişmekte olan ülkeler tarafından ithal edilen birincil enerji kaynağıdır. Fakat artan enerji talebi nedeniyle fosil enerji kaynakları hızla tükenmektedir.

Dünyada var olan fosil yakıtların er ya da geç sona ereceği açıktır. Ayrıca fosil kaynaklar doğada kısıtlı olarak bulunmasının yanında maliyetlidirler ve dışa bağımlılığa neden olabilirler. Bu nedenle günümüzde daha sürdürülebilir kaynaklara olan farkındalık artmıştır. Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, özellikle petrole bağımlı ve gelişmekte olan ülkeler için hayati önem taşımaktadır. Bu süreçte yenilenebilir enerji kaynakları gelecekteki enerji ihtiyacı ve fosil yakıt tüketimi göz önüne alındığında önemli bir alternatif olarak kabul edilmektedir.

Kullanılacak enerji kaynaklarının planlanmasında; ülkenin kaynak potansiyeli, kaynağın çevresel etkisi, maliyeti, kaynağa ulaşım, üretim yapılacak tesisin yaşam ömrü, politik faktörler gibi kriterler etkilidir. Bu kriterlerin yanı sıra değerlendirmede birçok farklı sosyal, ekonomik ve çevresel faktör de rol oynamaktadır. Politika belirleyiciler, bu

faktörleri göz önüne alarak en iyi planlamayı yapmaya ve optimum enerji kaynağını belirlemeye çalışırlar. Tercih edilen çeşitli kriterlere göre en uygun kaynakları seçmek, ülkelerin enerji arz ve taleplerinin uzun vadeli planlamasına katkı sağlar. Enerji planlamasına yönelik çalışmalarda sıklıkla çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri kullanılır.

ÇKKV teknikleri genellikle kriterlerin kesin değerler aldığı durumlarda kullanılırken son zamanlarda bu klasik yaklaşım yerine belirsizliğin olduğu durumları da ele alabilen bulanık mantık ÇKKV teknikleri geliştirilmiştir.

Çok kriterli karar vermede bulanık mantık tekniklerin ortaya çıkışından beri, son yıllarda bu alanda oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Bulanık mantık, çok kriterli karar vermede ağırlıklı olarak tedarikçi seçimi, enerji planlaması gibi problemlerde olmak üzere geniş bir alanda uygulanmaktadır. Zadeh'in öncülüğünü yaptığı bulanık kümeler (BK) ve bulanık mantık kavramı, enerji politikalarının seçiminde kapsamlı bir şekilde uygulanmıştır. Çünkü BK, insanoğlu tarafından alınan kararlardaki bilgi eksikliği ve belirsizlikle başa çıkmada kesin ve net sayılardan daha etkili bir yöntemdir. Mevcut bilgilerle ilgili erişilebilirlik ve belirsizlikler nedeniyle, BK son zamanlarda enerji planlamasının birçok karar alma sürecine uygulanmıştır. Bu alanda yürütülen çalışmalar sonucu yeni ve üst düzey metotlar geliştirildiği görülmektedir. Bunlardan bazıları; sezgisel bulanık küme (SBK), q-rung picture fuzzy set (q-RPFs), q-rung orthopair fuzzy set (q-ROFs) gibi bulanık yaklaşımlardır.

Bulanık küme teorisi, kesin kümelerin genelleştirilmiş hali olup bir elemanın bir kümeye ait olmasının üyelik derecesinin 0 veya 1'e eşit olması yerine, üyelik derecesinin 0 ile 1 arasında değişen bir değere eşit olabileceği dikkate alınan bir yaklaşım olarak 1965'te Zadeh tarafından önerilmiştir. Bulanık kümeler günümüzde karar verme sistemleri başta olmak üzere ses, hareket, görüntü algılama, teşhis, tahmin, yapay zekâ gibi birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Bulanık kümelerde parametre olarak üye olma derecesi esas alınmıştır. Atanassov ise 1986'da bulanık kümelerin üye olma derecesi yanında üye olmama ve tereddütlük derecelerini de tanımlayarak bulanık küme teorisine önemli bir katkı sağlamıştır. Atanassov'un SBK kavramı ile Zadeh'in bulanık kümesindeki üye olma derecesi dışında kalan alandaki bilgi daha kapsamlı olarak tanımlanmış ve üyeliği konusunda bilgi sahibi olunmayan kısım "tereddütlük derecesi" olarak ifade edilmiştir.

Yager tarafından 2013'te önerilen Pisagor Bulanık Küme (PBK) ile üye olma ve üye olmama derecelerinin karelerinin toplamlarının bire eşit alınması ile karar vericilerin karar verdikleri alan genişletilmiştir. Daha sonra Yager 2017'de "q seviyeli bulanık kümeler (q-ROFs)" ile, Atanassov'un sezgisel bulanık kümesi ile kendi Pisagor bulanık kümesinin genelleştirilmiş halini ortaya atmıştır. Yager bu yaklaşım ile, bahse konu bulanık kümelerin üye olma ve üye olmama derecelerinin 1. ve 2. seviye üslerinin yerine bu derecelerin sonsuz seviyede üslerinin alınabileceği geniş kapsamlı bir yaklaşım önermiştir (Eş. 1.1). Böylece q-ROFs ile bulanık kümelerde üyelik ve üye olmama derecelerinin ifade edilebileceği daha geniş bir alan elde edilmiştir [1].

$$(\mu A(x))^{q}+(\nu A(x))^{q} \leq 1 \qquad (1.1)$$

Sezgisel bulanık set ile Pisagor bulanık setinin genelleştirilmesiyle ortaya çıkan q seviyeli bulanık kümeler, çeşitli alanlardaki birden fazla kriterden oluşan karar verme sorununu çözmede daha anlamlı ve etkili bir araç olarak ortaya çıkmıştır.

Bu tez çalışmasında belirsizlik ortamında uygun enerji kaynağı seçimi problemi için q seviyeli bulanık kümeler kapsamında MABAC ile TOPSIS çok kriterli karar verme metotlarının uygulanması üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Çok Nitelikli Sınır Yakınlık Alanı Karşılaştırması (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison, MABAC) metodu, güncel ÇKKV yöntemlerinden biri olup son yıllarda çok sayıda araştırmacı tarafından çalışılmıştır. MABAC metodu, her bir alternatif ile sınır yakınlık alanı arasındaki mesafeyi hesaplayarak karmaşık ve belirsiz karar verme konularını ele alan bir yöntemdir [1].

Pamučar ve Ćirović tarafından 2015'te tanımlanarak literatüre kazandırılan MABAC metodu, alternatiflerin kriter fonksiyonlarının sınır yakınlık alanına uzaklıklarını elde ederek değerlendirme yapar ve birçok avantaja sahiptir. Mevcut literatürle karşılaştırıldığında MABAC'ın en önemli avantajı, alternatif ile Sınır Yaklaşım Alanı (SYA) arasındaki mesafeyi dikkate alması, karar vericilerin kararsızlığı ile karar ortamının belirsizliğini göz önünde bulundurmasıdır. Böylelikle bu metotla daha doğru ve etkili karar verme sonuçları elde edilir.

Çalışmada kullanılan diğer bir ÇKKV yöntemi olan TOPSIS ilk olarak 1981'de Hwang Yoon tarafından geliştirilmiş olup çok kriterli kararlar içerisinden pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözümden de en uzak mesafede değerlendirme yaparak çözüme

ulaşmayı sağlayan çok kriterli bir optimizasyon yaklaşımıdır. Bulanık TOPSIS yöntemi ise bulanık mantığın klasik TOPSIS yöntemine uyarlanarak bulanık sayılarla değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır [2].

Çalışmanın amacı enerji planlamasına yönelik olup belirli alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilerek, bulanık ÇKKV yöntemleriyle sıralanmasıdır. Çalışmanın ikinci bölümünde enerji kaynaklarının planlamasına değinilerek kaynak seçimi ele alınmıştır. Tezin üçüncü bölümünde çok kriterli karar verme yöntemleri açıklanarak bu yöntemler üzerine bir literatür taraması yapılmıştır. Dördüncü bölümde genel olarak bulanık küme teorisi ile Zadeh, Atanassov ve Yager tarafından önerilen bulanık kümelerle ilgili temel kavramlar açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca tezin uygulama kısmında q seviyeli bulanık kümeler kapsamında kullanılan MABAC metodu ile TOPSIS'in uygulama adımlarına yer verilmiştir.

Çalışmada kullanılan yöntemlerden MABAC yöntemi, güncel bir ÇKKV yöntemi olması sebebiyle tercih edilmiştir. Ayrıca literatür araştırmasında enerji planlamasına yönelik bu yöntemle yapılmış tez ya da makale çalışması bulunamamıştır. En eski ve bilindik ÇKKV yöntemlerinden olan TOPSIS yöntemi ise MABAC yönteminin tutarlılığını değerlendirebilmek amacıyla tercih edilmiş ve edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Tezin beşinci bölümünde q-ROF MABAC ve q-ROF TOPSIS yöntemleri ile enerji planlamasına yönelik sayısal bir uygulama yapılarak en uygun enerji alternatifleri belirlenmiştir. Sayısal uygulama uzmanların görüşlerine dayanan gerçek verilerle yapılmıştır. Bu bölümde ayrıca kullanılan yöntemlerin parametre analizi de yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde çalışmaya ilişkin yorumlara yer verilirken, son bölümde tez çalışmasının sonuç ve önerileri sunulmuştur.

2. ENERJİ PLANLAMASI ve ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME

Bu bölümde enerji planlaması konusuna değinilerek ÇKKV yöntemleriyle kaynak seçimi problemi ele alınmıştır. Ayrıca Türkiye'nin enerji alanındaki potansiyeli ile üretim ve tüketim verileri incelenmiştir.

2.1. Enerji Planlaması

Günümüzde enerji, herhangi bir devletin kalkınması ve refahını sürdürülebilir kılması için temel bir unsur haline gelmiştir. Sanayileşme, nüfus artışı ve yaşam standartlarının iyileştirilmesi nedeniyle enerji ve ilgili hizmetlere olan talebin artması, sera gazı emisyonlarının yükselmesine ve dolayısıyla küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. Fosil yakıtlara dayalı enerjinin sınırlamaları ve hoş olmayan çevresel etkileri dikkate alındığında, alternatif ve daha temiz enerji kaynakları sağlayarak ülkenin yaşam standartlarını iyileştirmek önemlidir. Bu bağlamda yenilenemeyen kaynakların yanında özellikle yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir enerjinin en düşük kirlilik düzeyiyle sağlanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir enerji kaynaklarının gelişimi ve bu kaynakların optimum şekilde planlaması, enerji talebini karşılamak, iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve kalkınma gereksinimini karşılamak için önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Sürdürülebilir olması ve ekonomik açılardan en uygun enerji kaynağının seçilmesi, bir ülkenin yalnızca ekonomik kalkınmasını iyileştirmekle kalmayacak, aynı zamanda iklim değişikliğinin ve çevresel yüklerin zararlı etkilerini en aza indirecektir. Öte yandan, uygun olmayan kaynak seçimi çevreye zarar verebilir ve ekonomik büyümeyi zayıflatabilir. Bu nedenle uygun enerji kaynaklarının planlanması, enerji şirketleri ve yatırımcılar için en önemli husustur.

Bu bağlamda, daha temiz enerji üretimini gerçekleştirmek için çevresel, sosyal, ekonomik, teknik ve kurumsal boyutlar gibi çeşitli yönler, sürdürülebilir enerji planlaması için kıyaslanabilir belirleyici faktörler olarak kullanılmalıdır. Çok sayıda maddi ve maddi olmayan değerlendirme faktörünün varlığı nedeniyle, uygun bir kaynak adayının seçimi ya da kaynakların sıralanması süreci ÇKKV problemi olarak değerlendirilebilir. Bu sorunu daha iyi araştırmak adına farklı ÇKKV yöntemleri kullanılabilir.

Günümüzde çok kriterli karar verme teknikleri sürdürülebilir enerji yönetiminde giderek popülerlik kazanmaktadır. ÇKKV teknikleri, çelişkili ve çoklu hedefleri içeren problemlere çözümler sunar. Enerjiye yönelik planlama kararlarında ağırlıklı ortalamalara, öncelik belirlemeye, sıralamaya, bulanık ilkelere ve bunların kombinasyonlarına dayanan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Son on yılda ÇKKV, pratik uygulamalarda en önemli faaliyetlerden biri haline gelmiştir. Literatürde çeşitli ÇKKV yaklaşımları kullanılarak enerji kaynaklarının değerlendirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Fakat geleneksel karar alma yaklaşımları, genellikle enerji planlama süreçlerinde ortaya çıkan belirsiz bilgilerin işlenmesi için yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda bulanık küme kavramı, mevcut bilgilerin eksik veya belirsiz olduğu durumlarla başa çıkmada esnekliği ve etkinliği nedeniyle küresel olarak araştırmacılara ilham vermiştir. Bulanık kümeler genelleştirilirken Atanassov, Zadeh'in bulanık küme önerisinden çok, bulanıklık ve belirsizlikle başa çıkmak için daha uygun olan SBK kavramına öncülük etmiştir.

Bununla birlikte, BK ve SBK kavramları yalnızca eksik ve belirsiz bilgilerle ilgilenebilir, ancak gerçekçi durumlarda ortaya çıkan tutarsız ve belirsiz bilgilerle ilgilenemez. Bu tür bilgileri daha doğru bir şekilde yönetmek için, Smarandache tarafından nötrosofik set (NS) tasarlanmıştır. NS, nötralitelerin kökenini, doğasını ve kapsamını ve bunların farklı düşünce spektrumları ile etkileşimlerini inceleyen nötrosofinin bir parçasıdır ve yukarıda belirtilen kümeleri felsefi açıdan basitleştiren güçlü bir genel biçimsel çerçevedir. "Nötrosofi" kelimesi "tarafsız düşünce bilgisini" tanımlar ve bu tarafsız düşünce bilgisi, BK, SBK ve bunların mantıkları arasındaki ana ayrımı sembolize eder [3].

2.2. Türkiye’nin Enerji Alternatifleri

Bir ülkenin enerji potansiyeli çoğunlukla o ülkenin coğrafi özelliklerine bağlıdır. Jeolojik konumu düşünüldüğünde Türkiye hem fosil kaynaklardan hem yenilenebilir enerjiden yararlanma kapasitesi yüksek bir ülkedir.

Bu bölümde Türkiye'deki en yaygın enerji türleri ile ülke için yeni bir enerji kaynağı olan nükleer enerji analiz edilerek mevcut kurulu güçleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.1.1. Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, çevre dostu olması ve zararlı atık oluşturmaması gibi özelliklere sahip olmasının yanında kurulum ve kullanım kolaylığı da olan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir.

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde hidrojen gazının helyuma dönüşmesi ile gerçekleşen füzyon süreci ile elde edilen enerjidir. Güneş, yaydığı yaklaşık 3,9x1026 W güç ile tüm dünyadaki enerji ihtiyacını karşılayabilen, temiz ve tükenmez bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş durmaksızın çok büyük miktarda enerjiyi güneş sistemine yaymaktadır. Fakat dünyaya bu enerjinin çok az bir miktarı ulaşmaktadır. Atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye ortalama 1367 W güç düşmektedir. Gelen bu ışımanın genellikle X ışınlarından ve ultraviyole ışınlardan oluşan kısmı atmosfer tarafından emilirken bir kısmı ise yansıtılır [4].

Güneş ışığından dünyanın yüzeyine ulaşan bir dakikalık enerji miktarı dünya genelinde bir yılda kullanılan enerjiden daha fazladır. Bu büyük miktardaki enerji kaynağının değerlendirilmesi adına yapılan çalışmalar son zamanlarda hız kazanmıştır. Ülkeler fosil kaynakların çevreye verdiği zararlardan kaçınmak amacıyla yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmıştır. Bu sayede güneş enerjisinden ısı ve elektrik üretimi ile ilgili araştırmalar yapılmakta ve güneş enerjisi kullanımı yıldan yıla artmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi için çok sayıda yöntem olsa da ağırlıklı olarak güneşten gelen ışığın doğrudan elektriğe çevrildiği fotovoltaik sistemler kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden enerji elde etme çalışmaları özellikle 1970'lerden sonra ivme kazanmıştır. Bu tarihten itibaren güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme göstermiş ve maliyetleri düşmüştür. Ayrıca bu enerji türü çevresel bazda temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Bilhassa temiz bir enerji kaynağı olması ve kurulumdan sonraki düşük maliyeti nedeniyle güneş enerjisinin önemi artmıştır [4].

<u>Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli</u>

Coğrafi konumundan dolayı ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli yüksektir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nca hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)' na göre, yıllık toplam güneşlenme süresi ortalama 2741,07 saat olup ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1527,46 kWh/m^2'tir [4].

Haziran 2022 sonu itibariyle güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz 8479 MW ve toplam kurulu güç içerisindeki payı %8,35 olup yıllara göre kurulu güç değişimi ve toplam elektrik üretimi içerisindeki payı 2014 yılından 2022 yılına kadar sürekli artmıştır [4].

2.1.2. Rüzgâr enerjisi

Güneş kaynaklı radyasyonun yer yüzeyini farklı ısıtmasının sonucu olarak rüzgâr oluşur. Yer yüzeyinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına neden olurken, bu farklı basınç da havanın hareket etmesini sağlar. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin rüzgâr enerjisine dönüşen kısmı yaklaşık yüzde ikidir [5].

Rüzgârın özellikleri, lokal coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün heterojen ısınmasına bağlı olarak mekâna ve zamana göre değişiklik gösterir. Rüzgârın yön ve hız olmak üzere iki parametresi vardır. Rüzgârın hızı yükseklikle orantılıyken teorik gücü hızının küpü ile artarak değişir. Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim uygulamalarının ilk yatırım maliyetinin yüksek, kapasite faktörlerinin düşük oluşu ve değişken enerji üretimi gibi dezavantajları vardır. Bu enerji kaynağının üstünlükleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir [5]:

- Çevre dostu, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır.
- Tükenme ihtimali ve zamanla maliyetinin artma riski yoktur.
- Maliyeti günümüzdeki mevcut güç santralleriyle rekabet edebilecek düzeydedir.
- Bakım ve işletme maliyetleri azdır.
- Teknolojisinin tesisi ve işletimi nispeten basittir.
- İşletmeye geçmesi kısa bir sürer.

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerji santrallerinin ana yapı elemanı olup sirkülasyondaki havanın kinetik enerjisini sırasıyla mekanik enerjiye ve elektrik enerjisine dönüştüren teçhizatlardır [5].

Rüzgâr türbinleri, enerji üretimine ancak rüzgâr hızı belli bir düzeydeyken başlayabilmektedir. Bir rüzgâr türbini cut-in ile cut-out rüzgâr hızları arasında enerji üretimini gerçekleştirir. Modern rüzgâr türbinlerinin cut-in hızları 2-4 m/s, nominal hızları 10-15 m/s ve cut out hızları ise 25-35 m/s arasındadır. Sistemden elde edilen güç her bir rüzgâr türbini için belirlenmiş bir rüzgâr hızında maksimum değere ulaşır. Bu maksimum güce nominal güç ve bu rüzgâr hızına nominal hız denir. Belirli bir rüzgâr hızından sonra

rüzgâr türbinlerinin durma konumuna geçmesi sistemin hasar görmemesi için otomatik olarak sağlanır. Bu maksimum hıza sistemin cut-out hızı adı denir [5].

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli

Genel kabul Türkiye'de yer seviyesinden 50 m yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda km başına 5 MW gücünde rüzgâr santralı kurulabileceğidir. Bu kabuller altında orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin yer aldığı Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Rüzgâr enerjisi potansiyeli Türkiye'de 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Türkiye yüz ölçümünün %1,30'una denk gelen alan da bu potansiyele karşılık gelen toplam alandır [5].

Türkiye'de Haziran 2022 sonu itibariyle rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 10976 MW olup, toplam elektrik üretimi içerisindeki oranı %10,81'dur. Kurulu güç, 2004-2022 periyodunda sürekli artan bir eğilim göstermiştir [5].

2.1.3. Hidroelektrik enerji

Üç yanı denizlerle çevrili olan ve ortalama 1100 m yükseklikte bulunan Türkiye, Akdeniz iklim bölgesinde yer almaktadır. Bunun sonucu olarak Türkiye'de birçok alt iklim tipi belirmiştir. Türkiye'nin sene boyunca, tropikal ve kutup kuşaklarından kaynaklanan çeşitli basınç sistemleri ve hava tiplerinin etki alanına giren bir geçiş bölgesi üzerinde bulunması iklim tiplerindeki bu çeşitlilikle ilişkilidir. Batı ve Güney bölgelerinde Akdeniz iklimi hâkim olduğundan yazlar kuru ve sıcakken kışlar yağışlı ve serindir. Karadeniz kıyısında iklim daha yağışlı ve soğuktur. Kuzeydoğu Anadolu'da karasal iklim özellikleri görülür, kışlar sert ve uzun, yazlarsa serin ve kısadır. Orta Anadolu'da ise step iklimi hâkim olup yazlar kuru ve sıcak, kışlar ise soğuk geçer [6].

Türkiye, su kaynakları kullanımı ve değerlendirilmesi konusundaki faaliyetleriyle, bulunduğu coğrafyada sorunsuz ülkelerden biri olarak gözükmesine rağmen, özellikle kişi başına kullanılabilir su potansiyeline bakıldığında, durumun farklı olduğu ortaya çıkmaktadır. Türkiye, kişi başına düşen kullanılabilir su varlığı endeksine göre su zengini olmayan ülkeler arasında yer almaktadır [6].

Türkiye'de yağışların bölgelere ve mevsimlere göre değişken olması ve akarsuların yatak eğimlerinin farklılık göstermesi nedenlerinden dolayı akarsuların akış hızları/rejimleri,

taşıdığı su miktarları, taşıdığı alüvyon miktarları ve aşındırma güçleri yıl içerisinde değişkenlik göstermektedir. Akarsuların yatak eğimlerinin fazla olmasından dolayı akarsulardan hidroelektrik enerji üretme potansiyeli bulunmaktadır. Akarsuların yatak eğiminin yüksek olmasından ve yatak morfolojisinden kaynaklı olarak akarsularımız ulaşım için elverişli değildir. Türkiye 25 büyük havzadan oluşmaktadır. Hidrolojik olarak bu havzalarda buharlaşma, ortalama yıllık yağışlar ve yüzeyden olan su akışları büyük farklılıklar gösterir. Havzalardaki yıl içi yağış miktarları ile toplam yıllık yağış miktarları büyük farklılıklar göstermektedir [6].

Suyun en verimli şekilde yönetilmesi ve kullanılması amacıyla Türkiye'de yer alan 25 havza için Havza Koruma Eylem Planları hazırlanmakta olup, daha sonra Nihai Havza Koruma Eylem Planları hazırlanıp uygulanması sağlanacaktır. Bu sayede bütün havzalar, havza bazında yönetilmiş olacaktır. Akdeniz Havzası Türkiye'nin de içinde bulunduğu havza olup iklim değişikliğinin etkilerinin en baskın hissedildiği yerlerden bir tanesidir. Yakın gelecekte Akdeniz'deki birçok nehir havzası su endişesiyle karşı karşıya kalacaktır. Türkiye'de 2030'dan itibaren iç bölgeler ile batıda en az %40 oranında su eksikliği yaşanacağı beklenmektedir. Güneydoğu ve doğu bölgelerinde ise %20-40 arası oranlar öngörülmektedir [6].

Türkiye İstatistik Kurumu'nun tahminlerine göre 2030 yılına kadar ülkemiz nüfusunun 100 milyona ulaşması durumunda, kişi başına kullanılabilir su miktar 1000 m^3'e düşecektir. Bu koşullarda Türkiye'de Trakya, İç Anadolu ve Batı Anadolu gibi bazı bölgelerde ciddi su sıkıntısı görülebilecektir. Türkiye su kaynakları yönünden sanıldığı gibi, su zengini bir ülke değildir. Eğer gerekli önlemler alınmaz ise, yakın gelecekte su sorunları yaşanmaya aday bir ülke konumundadır. Bunun başlıca nedenleri, ülke yüzey şekillerindeki düzensizlikler nedenleriyle, su kaynaklarının kontrol edilmeyişi, yağışların ve su kaynaklarının dengesiz dağılımı, su kaynaklarının havza bazında yaklaşımlarla uzun vadeli planlamalar yerine bölgesel, bağımsız ve kısa vadeli projelerin yapılmasına öncelik verilmesidir [6].

Ülkemizin teknik hidroelektrik enerji potansiyeli, 215 milyar kWh mertebesindedir. Ülkenin brüt hidroelektrik potansiyelinin hem teknik hem de ekonomik olarak değerlendirilebilir bölümüne ise "Teknik ve Ekonomik Potansiyel" denilmektedir. Yıldan yıla küçük farklılıklar göstermekle birlikte bugün için Türkiye'nin teknik ve ekonomik hidroelektrik potansiyeli 129,9 milyar kWh'dır. 2020 yılında Türkiye elektrik enerjisi

üretimi 305 TWh olup üretimde ilk 5 kaynak %34,8 payla kömür; %25,6 payla hidroelektrik, %22,7 payla doğalgaz; %8,1 payla rüzgâr ve %3,8 payla güneş olmuştur. Yıllık üretimin 78,1 milyar kWh'i hidroelektrik santrallerden; 24,7 milyar kWh'i rüzgâr enerji santrallerinden; 11,6 milyar kWh'i güneş enerji santrallerinden ve 9,3 milyar kwh'i jeotermal enerji santrallerinden sağlanırken bu değerli milli kaynakların elektrik üretiminde toplam payı %40'ı geçmiştir. Türkiye'de bulunan hidroelektrik santrallerinin toplam kurulu gücü 28.576,656 MW'dır. 2019 yılında hidroelektrik santralleri ile 98.878.547 GWh elektrik üretimi yapılmıştır. 2019 yılı itibariyle toplam 683 hidroelektrik santral mevcuttur [6].

Türkiye'de teorik hidroelektrik potansiyel 433 milyar kWh/yıl, teknik olarak değerlendirilebilir potansiyel ise 216 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Türkiye'nin teknik hidroelektrik potansiyeli dünya teknik hidroelektrik potansiyelinin %1,5'ine, Avrupa teknik hidroelektrik potansiyelinin ise %18'ine tekabül etmektedir. Türkiye, 2023 yılına kadar net su potansiyelini tam randımanlı şekilde kullanmayı amaçlamaktadır [6].

2.1.4. Biokütle enerjisi

Biokütle, bir türe veya çeşitli türlerden oluşan bir topluma ait yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak tanımlanabilir. Biokütle aynı zamanda bir organik karbon olarak da kabul edilmektedir. Biokütle kaynaklarından çeşitli yöntemler uygulanarak farklı yakıt türleri üretilebilmektedir [7].

Başlıca biokütle kaynakları aşağıda listelenmiştir [7]:

- Bitkisel biokütle Kaynakları

Tohumu yağlı bitkiler (ayçiçek, soya, kanola vb.)
Nişasta ve şeker ve bitkileri (şeker pancarı, buğday, mısır, patates vb.)
Elyaf bitkileri (sorgum, kenevir, keten vb.)
Protein bitkileri (fasulye, bezelye vb.)
Tarımsal ve bitkisel ve artıklar (kök, saman, kabuk, sap, dal vb.)

- Orman ve Orman Ürünlerinden Elde Edilen biokütle Kaynakları

Orman ve odun atıkları (çeşitli türdeki ağaçlar, enerji bitkileri ve enerji ormanları)

- Hayvansal biokütle Kaynakları

Hayvan dışkıları (koyun, sığır, tavuk, at gibi), hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar ve mezbahane atıkları

- Şehir ve Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen biokütle Kaynakları ve Organik Çöpler

Sanayi ve gıda sanayi atıkları, kâğıt atıkları, kanalizasyon çamurları, evsel ve endüstriyel atık sular, büyük sanayi tesislerinin ve belediyelerin atıkları

Biokütlenin tanımı 5346 sayılı Kanun'da ise şu şekilde yer almaktadır:

"İthal edilmemek şartıyla; kentsel atıklarla birlikte bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat atıkları da sayılmak üzere tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünler ile atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynakları ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurlarıdır" [8].

Türkiye'nin biokütle enerjisi potansiyeli

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri 3,9 MTEP/yıl civarındadır.

Çoğunlukla elektrik üretiminde kullanılan biokütleye dayalı kurulu güç Haziran 2022 sonu itibariyle 2172 MW, toplam elektrik üretimi içerisindeki payı %2,14 olup yıllara göre kurulu güç değişimi ve toplam elektrik üretimi içerisindeki payı yıldan yıla artan bir eğilim göstermektedir [8].

2.1.5. Fosil kaynaklar

Türkiye'de elektrik üretimi, üretimdeki paylarına göre sırasıyla doğalgaz, hidroelektrik, taş kömürü ve linyit, ithal kömür, rüzgâr, motorin ve fuel-oil gibi sıvı yakıtlar ile jeotermal, biyogaz ve güneş enerjisi ile yapılmaktadır. Listeye bakıldığında kaynakların ağırlıklı olarak fosil kökenli (kömür, linyit, doğalgaz, motorin ve fuel-oil) kaynaklardan oluştuğu görülmektedir. Fosil kaynaklı yakıtların yenilenemez enerji kaynağı olması, giderek artan maliyetleri ve yarattıkları olumsuz çevresel koşullardan dolayı, enerjide dışa bağımlı gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler gibi Türkiye de alternatif enerji kaynaklarına yönelmiş ve bu konuda araştırmalar yoğunlaşmıştır [9].

Fosil kaynaklı enerji üretiminde güncel duruma bakıldığında; Türkiye'nin elektrik üretiminde iklim krizine neden olan fosil yakıtların payı 2021'de artmış ve %64'ü geçmiştir. 2020 yılında yıl yaşanan kuraklık, hidroelektrik kaynaklı elektrik üretimini de 10 puana yakın oranda gerileterek doğalgazın payını ise aynı oranda artırmıştır [9].

Türkiye'nin brüt elektrik üretimi 2021 yılında bir önceki yıla göre %8 oranında artmıştır. TEİAŞ'ın verilerine göre geçen yıl üretilen 331 milyar kilovatsaati bulan elektriğin %32,71'lik kısmı doğalgaz çevrim santrallarından, yüzde 31,43'ü ise kömürlü termik santrallardan sağlanmıştır. Böylece elektrik üretiminde fosil yakıtla (petrol, kömür ve doğalgaz) çalışan santralların payı %64'ün üzerine çıkmıştır. 2020 yılında ise bu oran %58 idi [9].

2.1.6. Nükleer enerji

Nükleer enerji, 1789 yılında Uranyum'un keşfi ile başlayan ve 1934 yılında atomun parçalanması ile devam eden süreçte politikacılar, bilim insanları ve sanayicilerin gündemine girmiştir. Diğer birçok teknolojik gelişmede olduğu gibi önce askeri ve savunma amaçlı başlayan çalışmalar daha sonra ticari olarak devam etmiştir. Birçok ülke nükleer enerjiden faydalanılması yönünde yoğun çalışmalar gerçekleştirmiş, bu çalışmaların neticesinde atomların parçalanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürecek sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, diğer bir deyişle nükleer santraller, nükleer enerjinin güvenli, kontrollü ve sürdürülebilir bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır [10].

Kendilerine has çeşitli özelliklerinden dolayı nükleer santraller ülkeler tarafından tercih edilen bir enerji kaynağıdır. Diğer enerji alternatiflerine göre nükleer santralleri ön plana çıkaran özellikler; gelecek nesilleri, toplumu ve çevreyi göz önüne alan sürdürülebilir, ucuz ve güvenilir olmasıdır [10].

Nükleer santrallerde havasal şartlardan etkilenmeden 7/24 ve güvenli bir şekilde elektrik üretimi gerçekleşir. Nükleer yakıtın maliyeti, elektrik birim maliyet fiyatlandırmasında toplam maliyete oranla oldukça düşüktür. Bu nedenle yakıt fiyatlarında olası dalgalanmalar, elektrik üretim maliyetlerini etkilemez. Ayrıca nükleer yakıtın hammaddesi olan uranyum dünyada çeşitli yerlere yayılmıştır. Ek olarak nükleer santraller, enerji üretirken sera gazı salımı yapmazlar. Bundan dolayı enerji üretimi sırasında iklim değişikliğine ve iklim krizine gözle görülür bir etkisi yoktur. Diğer bir avantajı, nükleer

santrallerin birim elektrik üretimi başına kapladığı kurulum alanı diğer santrallere göre çok küçüktür. Bu sayede doğal hayata, yerleşime ve tarıma etkisi diğer seçeneklere göre de azdır. Nükleer santrallerin doğal radyasyon üzerindeki etkisi, sahip oldukları güvenlik sistemleri sayesinde sadece %1'dir. Bu sayede nükleer santrallerin çevresinde yapılan turizm, balıkçılık ve tarım gibi faaliyetler ile çevresinde yaşayan insanlar bu aktiviteden etkilenmez. Dünyanın önde gelen New York, Londra, Paris gibi yerleşim ve turizm merkezlerinin yakınındaki nükleer santraller yıllar boyunca işletme halindedir [10].

Temmuz 2020 itibariyle, 31 ülkede 440 nükleer reaktör işletmede, 19 ülkede 54 adet nükleer reaktör de inşa halindedir. Nükleer santrallerde üretilen elektrik dünya elektrik arzının yaklaşık %10'una denk gelmektedir. Ülke bazında bakılırsa Fransa elektrik talebinin yaklaşık %71'ini, Ukrayna %54 'ünü, İsveç %34'ünü, Belçika %48'ini, Avrupa Birliği %28'ini, Güney Kore %26'sını ve ABD %20'sini nükleer enerjiden karşılamaktadır. Almanya özellikle Fukuşima nükleer kazasından sonra nükleere karşı lobilerin olduğu ülkelerden olup mevcutta işletme halinde altı nükleer reaktörü bulunmaktadır. Toplam 23 nükleer güç reaktörü işletme ömrünü tamamlamakta olup işletmeden çıkarma işlemleri sürmektedir. Kalan altı reaktörün 2022 yılı sonuna kadar üretime devam edeceği bildirilmektedir. Fukuşima kazasının meydana geldiği Japonya, kaza sonrası tüm nükleer santrallerini güncellenen güvenlik koşullarına göre denetlemek için geçici süreyle durdurmuştur. Sırasıyla diğer nükleer santralleri de işletmeye almak için çalışmalarına devam etmekte olan Japonya 2020 yılında dokuz reaktörü tekrar çalıştırmaya başlamıştır. 18 nükleer reaktörün gözden geçirme çalışmaları işletmeye alınabilmesi için Japon nükleer düzenleme kurumu tarafından sürdürülmektedir [10].

Ülkemizin ilk nükleer santral projesi olan Akkuyu Nükleer Güç Santrali (NGS) konusunda, 12 Mayıs 2010'da Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Arasında Akkuyu Sahasında Bir Nükleer Güç Santralinin Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma'nın imzalanması, ülkemizin 50 yıllık nükleer güç santrali kurma hedefi için atılan çok önemli bir adıımdır. Proje Şirketi anlaşmanın imzalanmasından sonra13 Aralık 2010 tarihinde kurulmuş ve çalışmalarına başlanmıştır. Geçen sürede, 1 Aralık 2014 tarihinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığından olumlu ÇED kararı, 15 Haziran 2017 tarihinde ise EPDK'dan elektrik üretim lisansı alınmıştır [10].

Nükleer güç santralleri, sadece elektrik üretim tesisleri olarak değerlendirilmemelidir. Akkuyu NGS projesi ortlama 550 bin parçadan oluşmakta olup diğer sektörlere de

sağlayacağı iş imkânıyla birlikte Türkiye'nin sanayisine önemli derecede katma değer sunacaktır. Bununla birlikte kalifiye insan kaynağı konusunda da çalışmalar sürmektedir. Rusya'ya eğitimine gönderilen nükleer enerji mühendisliği öğrencilerinden mezun olanlar 2018 yılından itibaren ülkeye dönmüş ve proje şirketinde işe başlamıştır [10].

Türkiye 2010 yılı elektrik talep artışında, Avrupa'da birinci sırada yer alırken dünyada 1,5 milyar nüfuslu Çin'den sonra ikinci olmuştur. Diğer yandan, 2023 yılında 84 milyona ulaşması beklenmekte olup nüfus, elektrik enerjisine olan talebin artışını etkileyen önemli bir faktördür. Son on yılda milli gelirin dört kat, kişi başına milli gelirin ise üç kat arttığı Türkiye dünyanın en büyük 17. ekonomisi olmuştur. İstatistiklere göre elektrik tüketim talebi, ekonomik büyümeden her zaman %2 daha fazla artmıştır. Elektrik enerjisi talebinin, önümüzdeki on yıl boyunca %7 oranında yıllık artışla 2023 yılında 500 milyar kWh'e ulaşması beklenmektedir. Türkiye enerji kaynakları dağılımı bakımından dünya ile karşılaştırıldığında, Türkiye dünya ortalamasına göre yaklaşık iki kat fazla doğalgaz kullanmakta olup dünyanın ise Türkiye'ye göre 1,7 kat fazla kömür kullandığı görülmektedir. Dünya çapında elektrik ihtiyacı %13,5 oranında nükleer santrallerden karşılanmaktadır. Toplam enerji ihtiyacının yüzde %72'sini ithalattan sağlayan Türkiye enerjide dışa bağımlılığı oldukça yüksek bir ülkedir. Ülkede kömürün %20'si, petrolün %92'si ve doğalgazın %98'i dışarıdan sağlanmaktadır. Toplam elektrik ihtiyacının 2023'te 500 milyar kWh'a çıkması beklenmektedir. Fakat ülkenin güneş, hidrolik, jeotermal, biokütle ve rüzgârdaki bütün potansiyeli kullanılsa bile, söz konusu talebin sadece yarısı karşılanabilmektedir. Nükleer enerjinin kullanılmasının bu ihtiyacın bir kısmını gidereceği aşikardır [11].

Dört nükleer reaktörlü olarak tasarlanan Akkuyu NGS'nin birinci ünitesi 2023 yılında diğer ünitelerin de sonraki yıllarda birer yıl arayla işletmeye geçmesi planlanmakta olup 2026 yılında tam kapasite üretime geçecektir. Her biri 1200 MW kapasiteli dört reaktörlü Akkuyu santralinden, yılda ortalama 35 milyar kWh elektrik üretimi planlanmaktadır. 2016 yılında Türkiye'de 275 milyar kWh elektrik tüketimi gerçekleşmiştir. Ülkenin elektrik tüketiminin son yıllardaki artışı dikkate alındığında her yıl ortalama %5,1 arttığı görülmektedir. Talep artışı ile mevcut tüketim miktarı dikkate alındığında santralde tam kapasite üretimin başlayacağı 2026 yılında Türkiye'de yıllık 452 milyar kWh elektrik tüketimi hesaplanmaktadır. Akkuyu NGS 2026 yılında enerji ihtiyacının %7,7'sini karşılayacak olup tüketim talebinin aynı şekilde artacağı kabul edildiğinde 2030 yılında toplam ihtiyacın %6,3'ünü, 2040 yılında ise %3,9'unu karşılayacağı beklenmektedir [11].

3. ÇKKV YÖNTEMLERİ VE METODOLOJİ

Bu bölümde literatürden ÇKKV teknikleriyle enerji alanında yapılan çeşitli çalışmalara yer verilmiş ve tezin uygulama kısmında yararlanılan MABAC modeli ile TOPSIS yöntemlerine detaylı olarak değinilmiştir.

3.1. Literatür Taraması

Son yıllarda enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve seçimine yönelik birçok karar alma yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu bölümde değerlendirme ve seçim yapmak amacıyla seçilen kriterler dikkate alınarak karar verme yöntemlerinin uygulanmasına yönelik yapılan çalışmalara genel bir bakış sunulmaktadır.

Genel olarak çok kriterli karar verme alanında yapılan güncel çalışmalara bakıldığında; Aksoy, yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye'deki yedi coğrafi bölgeye göre etkin tahsisini belirlemek için entegre çok amaçlı, çok dönemli bir doğrusal programlama modeli sunmuştur [12].

Erdin ve Özkaya, Türkiye'nin 2023 RES hedeflerine ulaşmak için ELECTRE (ÉLimination et Choix Traduisant la REalité) yöntemini kullanarak her coğrafi bölge için en uygun RES alternatiflerini sunmayı amaçlamıştır [13].

Topçu ve ark.; Monte Carlo simülasyonu, entropi ve Borda sayım yöntemlerinin entegrasyonuna dayanan yeni bir ÇKKV yaklaşımı kullanarak Türkiye'deki enerji kaynaklarını değerlendirmiştir [14].

Al Garni ve ark.; solar PV, solar termal, rüzgâr, biokütle ve jeotermal kaynakları AHP yöntemi ile 14 farklı kritere göre değerlendirmişlerdir [15]. Haddad ve ark., Cezayir için 13 farklı kritere uygun olarak güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal ve hidroelektrik enerji kaynaklarını AHP tekniğini kullanarak değerlendirmiştir [16].

San Cristobal, İspanya'daki RES alternatiflerini değerlendirmek için VIKOR yöntemini kullanmıştır [17]. Atmaca ve Başar, ANP yöntemi ile Türkiye için rüzgâr, hidro, jeotermal kaynakları, kömür, doğalgaz ve nükleer enerji kaynakları ile birlikte değerlendirmiştir [18]. Büyüközkan ve Güleryüz, entegre DEMATEL-ANP yaklaşımını kullanarak Türkiye için alternatif bir RES seçim problemini araştırmıştır [19].

Özcan ve ark. ANP ve TOPSIS yöntemlerinin yanı sıra 4 ana kriter ile ekonomik, sosyal ve çevresel faktörlerinden oluşan 12 alt kriteri kullanarak Türkiye'deki yenilenebilir enerji yatırımlarına alternatifler getirmiştir [20].

Damgacı ve ark., sezgisel bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak Türkiye için rüzgâr enerjisi alternatiflerini değerlendirmiştir [21]. Daniel ve ark., Hindistan için rüzgâr enerjisi alternatiflerini maliyet, verimlilik, çevresel etki, kurulu kapasite, tahmini potansiyel, güvenilirlik ve sosyal kabul kriterlerine göre değerlendirmiştir [22].

Krishankumar ve ark., yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirirken q-seviyeli orthoper bulanık TODIM modelini kullanmıştır [23]. Albahri ve ark. tarafından bulanık ortamda, bulanık ağırlıklı sıfır tutarsızlık yönteminin bir uzantısı olarak bir q-seviyeli seti formulize edilmiştir [24].

Dewalkar ve Shastri'nin çalışması spesifik bir seçim problemi için F-AHP ile F-TOPSIS'in entegre kullanıldığı kapsamlı bir bulanık formüle edilmiş ÇKKV çerçevesi önermektedir [25]. Saraswat ile Digalwar, tarafından yürütülen çalışmada enerji kaynaklarının değerlendirilmesi için entegre bir Shannon'un entropi çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır [26].

Aghaloo ve ark., Covid-19 pandemisi gibi uzun süreli bir salgın sırasında enerji senaryolarını değerlendirmek için yeni bir entegre ÇKKV yaklaşımı önermiştir [27]. Goswami ve ark., yaptıkları çalışmada Hindistan'da yenilenebilir enerji santralinin doğru seçimi ile ilgili gerçek zamanlı bir karar verme problemi ele almıştır [28].

Li ve ark., Çin'de yenilenebilir enerji geliştirme ve kullanımının önceliğini sürdürülebilir kalkınma perspektifinden değerlendirmek için ÇKKV temelli yeni bir çerçeve üzerine çalışmıştır [29].

ÇKKV yöntemlerinden VIKOR yöntemiyle yapılan çalışmalara bakıldığında; Kaya ve Kahraman, entegre bir VIKOR-AHP metodolojisi kullanarak İstanbul için en iyi yenilenebilir enerji alternatifinin belirlenmesini amaçlamıştır [30].

Abdul ve ark., gelişmekte olan ülkelerde elektrik üretimi için uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklendirilmesi için VIKOR temelli bir değerlendirme modeli geliştirmiştir [31]. Yine Zheng ve ark. tarafından turistik tatil beldelerinde yenilenebilir

enerji sistem şemalarının seçimi için kurulan ÇKKV probleminde VIKOR yöntemi benimsenmiştir [32].

Song ve ark., yedi biyoenerji teknolojisinin performansını ölçmek ve sürdürülebilirlik sırasını belirlemek için entegre bir bulanık AHP-VIKOR yöntemi uygulamıştır [33].

Diğer bir ÇKKV yöntemi olan MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) modeli, ilk olarak Pamučar ile Ćirović tarafından önerilmiş olup lojistik merkezlerde taşıma ve elleçleme kaynaklarının seçiminde kullanılmıştır [34].

MABAC modeli enerji dahil çeşitli alanlardaki çalışmalarda kullanılmıştır. Bu yöntem üzerine yapılmış diğer çalışmalara bakıldığında; Wang ve grubunun q-seviyeli orthoper bulanık ortamında birden fazla öznitelik grubunda karar verme için MABAC'ı uyguladığı görülmüştür [35].

Liang ve Zhao spesifik risk seviyelerini elde etmek için üçgen bulanık sayılara karşılık gelen genişletilmiş bir MABAC yöntemi öne sürmüştür [36]. Sonar ile Kulkarni, elektrikli araç seçimi için entegre bir AHP-MABAC Yaklaşımı kullanmıştır [37].

Xue ve You, malzeme seçimi problemi için sezgisel bulanık MABAC yaklaşımını içeren hibrit bir grup karar verme modeli önermiştir [38]. Luo ile Liang'ın çalışmasında olasılık tabanlı MABAC yöntemiyle karayolu destek şemalarının optimizasyonu yapılmıştır [39].

Haşimizade ve Ju politika yapıcıların yenilenebilir enerji portföylerini optimize etmelerine yardımcı olmak için MABAC modelini karma tamsayı doğrusal programlama modeliyle birleştirmiştir [40].

Tez çalışmasının metodolojisini oluşturan yöntemlerden TOPSIS yöntemi ise oldukça popüler ÇKKV yöntemlerinden biridir. Literatür araştırmasında bu yöntem üzerine geçmişten günümüze sayısız çalışma yapıldığı görülmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda örneklenmiştir:

Solangi ve ark. Pakistan'ın sürdürülebilir enerji planlaması ve politika stratejilerini belirlemek ve önceliklendirmek için yaptıkları çalışmada Entegre SWOT, AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemi kullanmıştır [41].

Bilgili ve ark., Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınmasında en iyi yenilenebilir enerji seçeneklerini intuitionistic fuzzy-TOPSIS yöntemini kullanarak analiz etmiştir [42]. Alao

ve ark., Nijerya Lagos atık akışı kullanılarak atıktan enerjiye teknolojik seçenekler arasından en uygun teknolojiyi seçmek için TOPSIS uygulanmıştır [43].

Afrane ve ark., Gana'da yatırım amaçlı en tekno-ekonomik avantaja sahip alternatifi belirlemek için dört farklı atıktan enerjiye teknolojisi üzerinde bulanık TOPSIS yaklaşımı kullanılarak çok kriterli bir karar analizi gerçekleştirilmiştir [44].

Rani ve ark. tarafından yapılan çalışmada bulanık TOPSIS'e dayalı ÇKKV problemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının sıralanması ve seçimi için yeni bir sapma ölçüsü önerilmiş ve mevcut bazı yöntemlerle karşılaştırılmıştır [45].

Altintas ve Utlu, çalışmalarında üretim sektöründe kullanılan enerji ve çevre etkileşimlerini dikkate alarak elektrik üretim sektöründe kullanılan enerji açısından, çok kriterli karar destek çerçevesi geliştirmeye ve enerji yönetimi için en uygun seçenekleri bulanık TOPSIS ile belirlemeye odaklanmıştır [46].

Ligus ve Peternek tarafından Polonya'daki beş düşük emisyonlu enerji teknolojisi gelişimini değerlendirmek ve önceliklendirmek için F-AHP ve F-TOPSIS'e dayalı hibrit bir MCDM modeli önerilmiştir [47].

Sun ve Yu, çalışmalarında basit normalleştirme, entropi tabanlı TOPSIS ve K-ortalamalar yöntemini kullanarak şehir ölçeğinde ofis binası için geliştirilmiş, veriye dayalı, bina enerji performansı değerlendirme ve sıralama yaklaşımı önermektedir [48].

Alghassab, geliştirilmiş sistem korumasına sahip uzun vadeli bir yenilenebilir enerji kontrol sistemi oluşturmak için FAHP ve FTOPSIS metotlarını kullanmıştır [49].

Yapılan literatür taraması, enerji kaynaklarını değerlendirmek ve seçmek için kullanılan farklı kriterlerin dikkate alınması gerektiğini ve bunun için çeşitli yöntemler olduğunu göstermiştir. Genel olarak literatür araştırmasında Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)'nin en popüler teknik olduğu ve bunu TOPSIS, PROMETHEE ile ELECTRE tekniklerinin takip ettiği gözlenmiştir. Ayrıca sonuçların birden fazla yöntemle doğrulanması, entegre karar destek sistemlerinin geliştirilmesi ve verilerdeki belirsizliklerin giderilmesinde bulanık yöntemlerin uygulanmasının faydalı olacağı gözlenmiştir.

3.2. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Çok kriterli karar verme genel olarak,

- Birden çok amaç ve kriteri göz önünde bulundurarak
- Hem nicel hem de nitel parametreleri analiz ederek ve
- Birden çok ilgi ve bakış açısını göz önünde bulundurarak

değişkenlik sorununu ele alabilen yöntemlerden biridir. Ayrıca multidisipliner, nicel ve nitel kriterlerin entegrasyonu için gerekli metodolojik esnekliğin sağlanmasına katkıda bulunur. ÇKKV, karar verme problemlerinde çeşitli ve çelişkili kriterlerle karakterize edildiğinde yaygın olarak kullanılır.

ÇKKV terminolojisinde aşağıdaki anahtar tanımlar yer alır:

Öznitelik: Öznitelikler, alternatiflerin özellikleri, nitelikleri veya performans parametreleridir.

Amaç: Karar verici tarafından bir karar verme problemini iyileştirmek için tanımlanan alternatiflerin talimatlarıdır (örneğin, en aza indirmek veya en üst düzeye çıkarmak)

Hedef: Hedefler, uzay ve zamanda belirli bir durum olarak ifade edilen hedeflerin nicel temsilleridir.

Kriter: Kriterler, bir alternatifin uygulanabilirliğini değerlendirmek için yargı standartları veya kurallardır.

ÇKKV kavramı geçmişte ilk kez ele alındığından beri, çok kriterli problemleri ele almak için farklı türlerde ÇKKV metodu geliştirilmiştir. Bunlar; tekil çalışan ÇKKV yöntemleri ve entegre ÇKKV yöntemleri olarak iki kategoriye ayrılabilir. Alt bölümlerde bu yöntemlere genel bir bakış sunulmaktadır [50].

3.2.1. Tekil çalışan ÇKKV yöntemleri

Ağırlıklı toplam yöntemi (WSM) ile ağırlıklı çarpım yöntemi (WPM) en yaygın kullanılan ÇKKV yöntemi olarak kabul edilir ve ikili karşılaştırma sonuçlarının çarpılmasıyla hesaplanır [50].

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)'nde; araştırmacıların karmaşık bir ÇKKV problemini ilgili bir dizi hiyerarşiye ayırmasına olanak sağlayan çerçevesi ile uzman görüşleri ve

tercihleri sayısallaştırılır ve dikkate alınır. AHP yönteminde tüm değerlendirme kriterlerinin birbirinden bağımsız olduğu varsayılır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için 1990'larda analitik ağ süreci (ANP) yöntemi geliştirilmiştir ve bu yöntem, farklı kriterler arasındaki bağımlılık ilişkilerini dikkate alır [50].

PROMETHEE (Değerlendirmeyi Zenginleştirmek için Tercih Sıralamasının Organizasyonu Metodu) yönteminde, karar vericilerin tercihleri tercih işlevi ve tercih indeksi kullanılarak ölçülür [50].

ELECTRE (Gerçekliği Yansıtan Eleme ve Seçim), alternatif seçimleri analiz etme, sıralama ve sıralama sorunlarını ele alan geniş bir ÇKKV yöntem ailesidir. ELECTRE yöntemi, veri değişikliklerine karşı daha az duyarlı olarak da nitelendirilen ÇKKV sürecinde var olan belirsiz verileri işleyebilir [50].

TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlığa Göre Tercih Sıralama Tekniği) yönteminin çalışma prensibi basittir: ideal çözüme en yakın ve negatif çözüme en uzak olan alternatif en iyi alternatif olarak seçilir. TOPSIS yönteminin dezavantajı, ideal çözüme en yakın ve negatif çözüme en uzak arasındaki ağırlık dağılımının dikkate alınmamasıdır [50].

VIKOR yöntemi ise sadece ideal çözüme ve negatif çözüme göreli yakınlığı değil, aynı zamanda üç parametre ile karar vermede tanımlanmış kabul edilebilir avantaj ve kabul edilebilir kararlılığı da dikkate alır [50].

Veri Zarflama Analizi (DEA) uygulamasında her bir kriterin birbirinden bağımsız olduğu varsayılır. Genel olarak, tüm amaç fonksiyonlarını yerine getiren bir alternatif bulmak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, farklı amaç fonksiyonları açısından sıralamadan sonra, ÇKKV problemi için görece en iyi alternatifi belirlemek için bir dizi uzlaşma yapılmalıdır [50].

Çok Nitelikli Fayda Teorisi (MAUT), en iyi alternatif fonksiyonun belirsiz olduğu durumlarda ÇKKV problemlerini ele almak için uygundur. ÇNFT teorisi basit bir puanlama tekniği ile çalışır ve bir optimizasyon modeli hem nitel hem de nicel verileri dikkate alır [50].

Shapley Değer Yöntemi (SVM), işbirlikçi oyunları ele almak içindir, daha sonra ÇKKV problemine uygulanır. Uygulamasında bir parametre, yani Shapley değeri kullanılır ve her bir kriterin alternatiflerin puanlanmasına marjinal katkılarını dikkate alır. SVM, geleneksel

yöntemlerden çok daha karmaşıktır ve hesaplamalar için etkili bir algoritma henüz geliştirilmemiştir [50].

Matematiksel Programlama (MP) yönteminin amaç fonksiyonu, üretim hızı ve karlılık için maksimum bir fonksiyon veya harcamalar, zaman tüketimi ve çevresel etki için minimum bir fonksiyon olabilir. Değişken kısıtlamalar, bir ürün gereksinimi ve alternatif kapasiteler olabilecek farklı ÇKKV çalışma koşullarının özel gereksinimlerine dayalı olarak belirlenir [50].

SMART (Basit Çok Ölçütlü Sıralama Tekniği) yöntemi, ağırlıklı toplam yöntemine dayanır ve alternatiflerin performans puanları, sırasıyla her bir kriter için karşılık gelen ağırlıklarla çarpılan tüm kriterler için ağırlıklı değerlerin toplamıdır [50].

En iyi-en kötü yöntem (BWM), ikili karşılaştırmalarla başlar ve bu nedenle AHP yöntemine benzer. BWM yönteminde, farklı kriterlerin optimal ağırlıklarını bulmak için bir "minmaks (minmax)" işlevinden yararlanılır [50].

Farklı tekil çalışan ÇKKV yöntemlerinin kendi avantaj ve dezavantajları vardır. Hangi yöntemin kullanılacağı seçilirken ÇKKV yönteminin çalışma prensibi, gerekli bilgiler ve ana işlevi, üzerinde çalışılan problemin özellikleri birlikte dikkate alınmalıdır [50].

3.2.2. Entegre ÇKKV yöntemleri

Entegre ÇKKV yöntemleri, iki veya daha fazla tekil çalışan ÇKKV yönteminin bir kombinasyonu yoluyla geliştirilir. Entegre bir ÇKKV yöntemi, tekil çalışan bir ÇKKV yöntemini yardımcı algoritmalarla, örneğin genetik algoritma (GA) veya yapay sinir ağı (YSA) veya bulanık teori ve küme analizi ile birleştirerek de geliştirilebilir [50].

Tekil çalışan ÇKKV yöntemleriyle karşılaştırıldığında entegre ÇKKV yöntemleri, karar verme sürecinde daha iyi performanslarla özel işlevleri tamamlayabilir. Farklı tekil çalışan ÇKKV yöntemlerinin kendi avantajları ve dezavantajları olduğu için entegre ÇKKV yöntemleri bu dezavantajları azaltabilir, hatta tamamen ortadan kaldırabilir [50].

3.3. MABAC Yöntemi

MABAC yöntemi ilk olarak ÇKKV için Pamucar ve Cirovic tarafından geliştirilmiştir. Diğer ÇKKV modelleri ile karşılaştırıldığında, kazançların ve kayıpların potansiyel değerlerini hesaplayarak alternatiflerin sırasını elde etmek için MABAC yöntemi

kullanılır.

Bu yöntem çeşitli bulanık ortamlara doğru genişletilmiştir. Örneğin; Şahin ve Altun [51], MABAC'ı olasılıksal nötrosofik tereddütlü bulanık ortamla bütünleştirirken, Wei ve ark. [52], olasılıksal belirsiz dilsel MABAC'ı tanımlamıştır.

Guo ve ark., belirsiz olasılıksal dilbilimsel MABAC yöntemini tanımlamıştır [53]. Xu ve ark., MABAC'ı heterojen ölçüt bilgileriyle tasarlamıştır [54]. Liang ve ark., bazı yeni mesafe ölçümleri ortaya koymuş ve bunları ÇKKV sorunlarını çözmek için MABAC yöntemiyle birleştirmiştir [55].

Jia ve ark., sırasıyla IF-MABAC ve IFN-MABAC modeli olmak üzere iki model tasarlamıştır [56]. Liang ve ark., bulanık ortamda genişletilmiş bir MABAC yöntemi ile kaya patlamasının risk değerlendirmesini yapmıştır [57].

Pamučar ve Ćirović tarafından 2015'te tanımlanarak literatüre kazandırılan MABAC modeli, alternatiflerin değerlendirildiği kriterlerin kriter fonksiyonlarının sınır yakınlık alanına uzaklıklarının dikkate alındığı bir yöntemdir ve birçok avantaja sahiptir [34]:

- MABAC yöntemiyle hesaplama sonuçları kararlıdır.
- Denklemlerin hesaplanması basittir.
- Kazanç ve kayıpların gizli değerlerini dikkate alır.
- Bu modeli diğer yaklaşımlarla birleştirmek mümkündür.

Bu nedenlerle, MABAC yöntemi makul karar verme sonuçları elde etmede iyi bir araçtır. MABAC yöntemi yedi adımdan oluşan bir uygulama sürecine sahiptir [58]:

Adım (1) Karar Matrisinin Oluşturulması (X)

MABAC yönteminde ilk olarak Eş. 3.1'de yer alan karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi m sayıda karar alternatifi ile n sayıda kriterden meydana gelir:

$$X = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \tag{3.1}$$

Eşitlikte yer alan x_{ij} değerleri, j. değerlendirme kriterine göre i. alternatifin aldığı değerleri göstermektedir (i, karar alternatifi sayısı i =1,2, …, m; j ise değerlendirme kriteri sayısı j = 1,2, …, n sayısı).

Adım (2) Karar Matrisinin Normalizasyonu (N)

Karar matrisinde yer alan farklı birimlere sahip kriterlere ait veriler, normalizasyon işlemiyle [0,1] aralığında değer alacak şekilde Eş. 3.2'de gösterilen şekilde standart bir hale getirilmelidir.

$$N = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \tag{3.2}$$

Normalizasyon işlemi maksimizasyon yönlü kriterler için Eş. 3.3, minimizasyon yönlü kriterler için Eş. 3.4'ten yararlanılarak gerçekleştirilir:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \tag{3.3}$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^- - x_i^+} \tag{3.4}$$

3.3.3 ile 3.3.4 sayılı eşitliklerde yer alan x_i^+, sütunlardaki maksimum değerleri gösterirken; x_i^- ise sütunlardaki minimum değerleri ifade eder.

Adım (3) Karar Matrisinin Kriterler Açısından Ağırlıklandırılması

Kriter ağırlıkları Eş. 3.5'ten yararlanılarak bu adımda uygulama sürecine dahil edilir:

$$v_{ij} = w_i.(n_{ij} + 1) \tag{3.5}$$

Adım (4) Sınır Yakınlık Alanı Matrisinin Elde Edilmesi

Sınır Yakınlık Alanı değerleri tüm kriterler için Eş. 3.3.6'dan yararlanılarak belirlenir:

$$g_i = (\prod_{j=1}^{m} v_{ij})^{1/m} \tag{3.6}$$

Eş. 3.2.6'da yer alan v_{ij} değerleri bir önceki aşamada hesaplanan ağırlıklandırılmış değerleri, m ise karar alternatifi sayısını göstermektedir. Tüm kriterler için g_i değerlerinin hesaplanmasıyla Eş. 3.3.7'de gösterilen Sınır Yakınlık Alanı Matrisi (G) elde edilir.

$$\begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix}$$
$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_n \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Adım (5) Sınır Yakınlık Alanına Olan Uzaklıkların Hesaplanması(Q)

Karar matrisinde yer alan her değerin sınır yakınlık alanından uzaklıkları hesaplanır ve Q matrisi Eş. 3.8'de gösterilen şekilde elde edilir:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

Eş. 3.8'de yer alan q_{ij} değerleri, ağırlıklandırılmış karar matrisi elemanları ile ve sınır yakınlık matrisi elemanları arasındaki fark alınarak Eş. 3.9'da gösterilen şekilde elde edilir.

$$Q = V - G = \begin{bmatrix} v_{11} - q_1 & v_{12} - q_2 & \dots & v_{1n} - q_n \\ v_{21} - q_1 & v_{22} - q_2 & \dots & v_{2n} - q_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} - q_1 & v_{m2} - q_2 & \dots & v_{mn} - q_n \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Adım (6) Karar Alternatiflerinin Sınır Yakınlık Alanına Göre Durumlarının Belirlenmesi
Bir önceki aşamadaki q_{ij} değerlerine göre her karar alternatifi için (A_i), sınır yakınlık alanına göre durumlar Eş. 3.10'dan yararlanılarak belirlenir.

$$A_i \in \begin{Bmatrix} G^+ eğer\ g_{ij>0} \\ G\ eğer\ g_{ij>0} \\ G^- eğer\ g_{ij>0} \end{Bmatrix} \tag{3.10}$$

Eş. 3.2.10'da ifade edildiği üzere bir karar alternatifi; Sınır Yakınlık Alanında (G), Üst Yakınlık Alanında (G^+) ya da Alt Yakınlık Alanında (G^-) yer alabilir. Bir alternatifin en iyi

alternatif olabilmesi için, kriterlere ilişkin değerlerinin çoğunun G^+'da bulunması gerekmektedir.

A_i alternatifinin ideal alternatife yakınlığını $q_{ij}>0$ durumu gösterirken; A_i alternatifinin negatif ideal alternatife yakınlığını $q_{ij}<0$ durumu gösterir.

Adım (7) Karar Alternatiflerinin Sıralanması

Son adımda karar alternatiflerinin sınır yakınlık alanından uzaklık değerleri yani q_i değerleri kullanılır ve Eş. 3.11'den yararlanılarak her karar alternatifinin kriter fonksiyonları hesaplanır:

$$\begin{aligned} &X_{ij} = w_i.z_{ij} \\ &m^* = [x_1^*, x_2^*, ..., x_k^*] \quad , \quad j = 1, 2, ..., k \\ &m^- = [x_1^-, x_2^-, ..., x_k^-] \end{aligned} \tag{3.11}$$

3.4. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi 1992 yılında Chen ve Hwang tarafından Hwang ve Yoon'un 1981'de yaptıkları çalışmalar referans gösterilerek ortaya konulmuştur. TOPSIS yöntemi çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Yöntem kullanılarak alternatif seçeneklerin belirli kriterler doğrultusunda ve kriterlerin alabileceği maksimum ve minimum değerler arasında ideal duruma göre karşılaştırılması mantığına göre işler. Alternatifi n sayıda, kriterleri m tane olan ÇKKV problemi m boyutlu uzayda n noktaları ile gösterilebilir. Hwang ve Yoon TOPSIS yöntemini çözüm alternatifinin, pozitif ideal çözüm noktasına en kısa mesafe ve negatif- ideal çözüm noktasına en uzak mesafede olacağı varsayımına göre oluşturmuşlardır [59].

TOPSIS yönteminin aşamaları aşağıdaki şekilde ifade edilir [60]:

Yöntemin birinci aşamasında karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi içerisinde alternatifler (a_1, …, a_n) şeklinde alt alta sıralanır ve her bir kriterin alternatiflere göre gösterdikleri özellikler (y_1, …, y_{nk}) olarak listelenir.

İkinci aşamada karar matrisindeki kriterlere ait puan veya özelliklerin kareleri toplamının karekökü alınarak matrise ait normalizasyon işlemini gerçekleştirilir (Eş. 3.12).

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} (y_{ij})^2}} \; i = 1, 2, ..., n, \; j = 1, 2, ..., k \tag{3.12}$$

Yöntemin üçüncü aşamasında normalize edilmiş karar matrisinin elemanları kriterlere verilen önem doğrultusunda ağırlıklandırılır (Eş. 3.13). Burada ağırlıkların belirlenmesinde karar vericinin sübjektif görüşleri etkili olur.

$$X_{ij} = w_i . z_{ij} \quad , \quad i = 1, 2, ..., n, \; j = 1, 2, ..., k \tag{3.13}$$

Dördüncü aşamada m^* ve m^- ideal noktaları tanımlanır. Burada ağırlıklandırılmış matriste (D) her bir kolonda maksimum ve minimum değerler Eş. 3.4.3 ile tespit edilir:

$$m^* = [x_1^*, x_2^*, ..., x_k^*] \quad j = 1, 2, ..., k \quad \text{(Maksimum değerler)}$$

$$m^- = [x_1^-, x_2^-, ..., x_k^-] \quad j = 1, 2, ..., k \quad \text{(Minimum değerler)} \tag{3.14}$$

İdeal noktaların tanımlanmasının ardından beşinci aşamada maksimum ideal noktaya olan uzaklık aşağıdaki formülle hesaplanır (Eş. 3.4.4):

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} (x_{ij} - x_j^-)} \, , \; i = 1, 2, ..., n \tag{3.15}$$

Daha sonra altıncı aşamada minimum noktaya olan uzaklık aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Eş. 3.4.5):

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} (x_{ij} - x_j^-)} \, , \; i = 1, 2, ..., n \tag{3.16}$$

Son aşama olan yedinci aşamada ise her bir alternatifin göreceli sıralaması ve puanı aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır (Eş. 3.4.6):

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \; , \; 0 \le C_i^* \le 1 \, , \; i = 1, 2, ..., n \tag{3.17}$$

4. BULANIK KÜMELER

4.1. Bulanık Küme Teorisi

Asırlar boyu sadece olasılık teorisinin bir elementi olarak tanımlanan belirsizlik, bu çağlarda "rassallık" ile eşanlamda kullanılmıştır. Bu bakış açısı 1960'lı yıllara gelindiğinde olasılık teorisi haricinde belirsizliği farklı şekilde tanımlayan teorilerin gelişmesi sonucu değişmiştir. Belirsizlik önerilen yeni teoriler ile çok boyutlu bir kavram olarak ele alınmaya başlanmıştır. Rassallık ise belirsizlik kavramının sadece bir alt boyutu olarak kabul edilmiştir.

Günümüzde kabul edilense belirsizlik kavramının temelinin bilgi düzeyindeki yetersizlik ile eksikliğin oluşturduğudur. Zamanla dönüşen ve değişen insanlığın biyolojik olarak duyusal sistemindeki sınırlar, teknolojik yetersizlikler vb. birçok kısıtlama, belirsiz sistemlerin her alanda var olmasıyla sonuçlanmaktadır.

Zadeh tarafından geliştirilen Bulanık Küme (BK) kavramı, muğlaklığın üstesinden etkin bir araç olarak gelmektedir. Bulanık küme kavramı ayrıca yönetim, mühendislik ve ekonomi gibi farklı alanlarda başarıyla uygulanmıştır [61].

Bulanık Küme kavramının çıkış noktası gerçek dünya problemlerinde, insan düşünceleri ile kararlarının yer aldığı karmaşık sistemlerde ikili üyelik fonksiyonuyla ifade edilen klasik kümelerin yetersiz kalmasıdır. Bulanık kümelerin temelini oluşturan üyelik derecesi, niteliklerin dereceli üyelik fonksiyonları ile ifade edilmesini önerir. Üyelik derecesi klasik kümelerde sadece 0 veya 1 değerini alabilirken, bulanık kümelerde bu iki sayının aralığındaki bütün değerleri alabilmektedir.

Zadeh'in önermiş olduğu bulanık küme teorisi, geçtiğimiz 30-40 yıllık dönemde araştırmacıların çeşitli eklemeleri ile farklı yaklaşımlarla genişletilmiştir. Bu yaklaşımlar arasında bulunan Sezgisel Bulanık Küme (SBK) teorisi literatürde kabul gören, birçok alanda uygulamaları bulunan ve Atanassov tarafından geliştirilen bir teoridir. Yapılan çalışmalar ile belirsizliğin üstesinden gelmede geleneksel bulanık küme teorisinden daha iyi olduğu saptanmıştır [62].

Zadeh'in Bulanık Küme teorisi sadece [0,1] aralığında tanımlı üyelik derecesini kapsayacak şekilde oluşmuşken; Atanassov'un Sezgisel Bulanık Küme teorisinde, üyelik

derecesinden ayrı olarak “üye olmama” derecesi de vardır. Sezgisel bulanık küme teorisinde hem üyelik hem de üye olmama dereceleri [0,1] aralığında bulunur. Bu açıdan bakıldığında geleneksel bulanık küme teorisinde üyelik ve üye olmama derecelerinin toplamı 1 olarak hesaplanmaktadır. Ancak SBK teorisinde bu parametrelerin toplamı 1 olmak zorunda değildir. Atanassov bu toplamı 1'e tamamlamak üzere diğer bir parametre olarak “tereddütlük” derecesi (hesitancy degree) adında üçüncü bir parametre tanımlamıştır.

X’de tanımlı A sezgisel bulanık kümesi, X boş olmayan bir küme olmak üzere;

$A= \{x, \mu_A(x), \nu_A(x) \mid x \in X\}$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikte $\mu_A(x)$, x elamanının A sezgisel bulanık kümesine ait olma derecesi ifade ederken ait olmama derecesi $\nu_A(x)$ ifade eder. Daha önce de yer verildiği gibi sezgisel bulanık kümelerde bir elemanın bir kümeye ait olma ve olmama derecesinin toplamı 1’den az olabilmektedir:

$0 \leq \mu A(x)+\nu A(x) \leq 1$

SBK teorisinde $\mu A(x)+\nu A(x)$ toplamının 1’den farkı tereddütlük derecesi $\pi A(x)$ olarak tanımlanmıştır:

$\pi A(x) = 1-\mu_A(x)-\nu A(x),\ 0 \leq \pi A(x) \leq 1$

Pisagor bulanık kümeler (PBK) ise sezgisel bulanık kümelerin bir uzantısı olup daha geniş bir tanım aralığı sunar. Bu uzantıda, üye olma ve üye olmama derecelerinin karelerinin toplamı en fazla 1’dir.

4.2. q-Rung Ortopair Bulanık (q-ROF) MABAC Yöntemi

SBK ve PBK karar verme sorunlarının birçok alanında uygulanmış olsa da bu kümelerin başa çıkamayacağı bazı özel durumlar vardır. Örneğin, uzmanlar tarafından verilen bulanık bilgiler üyelik derecesinin 0,7 ve üye olmama derecesinin 0,8 olduğunu gösterdiğinde (0.7, 0.8) hem SBK hem de PBK bu durumu karşılayabilir. İki bulanık setin uzantısı olarak, q-ROFS daha karmaşık ve belirsiz sorunları çözmek için daha etkili ve bilimseldir. Geleneksel MABAC yöntemine ile q-rung orthopair bulanık (q-ROF) bilgilerine dayanarak; tüm değerlendirme bilgilerinin q-ROF sayılar tarafından gösterildiği q seviyeli orthopair bulanık MABAC modeli inşa edilebilir [63].

Q seviyeli orthopair bulanık değerlendirme matrisinin $R=[A_{ij}^{\lambda}]_{m\times n}=(\mu_{11}^{\lambda},\nu_{11}^{\lambda}), i=1,2,...m,\ j=1,2,...,n$ olduğu göz önüne alındığında diğer kabuller aşağıdaki gibidir [51]:

Bir elemanın bir kümeye ait olmasının üyelik derecesi; $\mu_{ij}^{\lambda}\in[0,1]$

Üye olmama derecesi; $\nu_{ij}^{\lambda}\in[0,1]$

m sayılı alternatif kümesi $(A_1, A_2,\ldots, A_m)$

n sayılı kriter kümesi $(G_1, G_2,\ldots, G_n)$

Ağırlık vektörü w_j (j= 1, 2, …, n)

Karar vericiler $\lambda\ (d_1, d_2, \ldots, d_\lambda)$

Daha sonra q-seviyeli orthopair bulanık MABAC modelinin karar verme adımları aşağıdaki gibi uygulanır:

Adım (1) Her bir karar verici için q-seviyeli orthopair bulanık değerlendirme matrisinin oluşturulması

Her bir karar vericiye ait değerlendirme matrisi aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$R=[A_{ij}^{\lambda}]_{m\times n}=(\mu_{11}^{\lambda},\nu_{11}^{\lambda}), i=1,2,...m,\ j=1,2,...,n$$

$$R=\begin{array}{c}A_1\\A_2\\\vdots\\A_m\end{array}\begin{bmatrix}\mu_{11}^{\lambda},\nu_{11}^{\lambda} & \mu_{12}^{\lambda},\nu_{12}^{\lambda} & \ldots & \mu_{1n}^{\lambda},\nu_{1n}^{\lambda}\\ \mu_{21}^{\lambda},\nu_{21}^{\lambda} & \mu_{22}^{\lambda},\nu_{22}^{\lambda} & \ldots & \mu_{2n}^{\lambda},\nu_{2n}^{\lambda}\\ \vdots & \vdots & \ldots & \vdots\\ \mu_{m1}^{\lambda},\nu_{m1}^{\lambda} & \mu_{m2}^{\lambda},\nu_{m2}^{\lambda} & \ldots & \mu_{mn}^{\lambda},\nu_{mn}^{\lambda}\end{bmatrix}$$

Burada; $A_{ij}^{\lambda}=(\mu_{ij}^{\lambda},\nu_{ij}^{\lambda})(i=1,2,...,m;\ j=1,2,...,n)$, alternatif A_i'nin (i=1, 2, ..., m) q-rung orthopair bulanık bilgisini, karar verici d_λ ile G_j (j = 1, 2, ..., n) kriterinde gösterir.

Adım (2) Karar vericilerin karar matrislerinin birleştirilmesi

q-ROFWA (q-seviyeli orthopair bulanık ağırlıklı ortalama) veya q-ROFWG (q-seviyeli orthopair bulanık ağırlıklı geometrik) birleştirme operatörleri kullanılarak karar vericilerin değerlendirme matrisleri birleştirilir. Birleştirilmiş karar matrisi r ile gösterilir:

$$r=[A_{ij}]_{m\times n}=\begin{matrix}A_1\\A_2\\\vdots\\A_m\end{matrix}\begin{bmatrix}\mu_{11},\nu_{11} & \mu_{12},\nu_{12} & \dots & \mu_{1n},\nu_{1n}\\ \mu_{21},\nu_{21} & \mu_{22},\nu_{22} & \dots & \mu_{2n},\nu_{2n}\\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots\\ \mu_{m1},\nu_{m1} & \mu_{m2},\nu_{m2} & \dots & \mu_{mn},\nu_{mn}\end{bmatrix}$$

Bulanık sayıların listesine $p_{ij} = (\mu_j, \nu_j)\ (j=1,2, \dots, n)$ denirse, q-ROFWA veya q-ROFWG birleştirme operatörleri Eş. 4.1 ve 4.2 ile ifade edilebilir:

$$q-ROFWA_{(p_1,p_2,\dots,p_n)}=\sum_{j=1}^{n}w_j p_j=\left(\sqrt[q]{1-\prod_{j=1}^{n}(1-(\mu_{p_j})^q)^{w_j}},\prod_{j=1}^{n}(\nu_{p_j})^{w_j}\right) \tag{4.1}$$

$$q-ROFWG_{(p_1,p_2,\dots,p_n)}=\prod_{j=1}^{n}(p_j)^{w_j}=\left(\prod_{j=1}^{n}(\mu_{p_j})^{w_j},\sqrt[q]{1-\prod_{j=1}^{n}(1-(\nu_{p_j})^q)^{w_j}}\right) \tag{4.2}$$

Burada w_j, $0\le w_j\le 1, \sum_{j=1}^{n}w_j=1$ eşitliğini karşılayan $p_j(j=1,2, \dots, n)$'nin ağırlık vektörüdür.

Adım (3) Birleştirilmiş karar matrisinin normalizasyonu.

$r=[A_{ij}]_{m\times n}$ matrisi Eş. 4.3 ve 4.4 ile her kriter bazında normalleştirilir:

Fayda kriterleri için; $N_{ij}= A_{ij}=(\mu_{ij},\nu_{ij});i=1,2, \dots ; m; j=1,2, \dots , n$ (4.3)

Maliyet kriterleri için; $N_{ij}= (A_{ij})^c=(\nu_{ij}, \mu_{ij}); i=1,2, \dots ; m; j=1,2, \dots , n$ (4.4)

Adım (4) Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması.

Normalleştirilmiş matris N_{ij} ve kriterlerin ağırlık vektörü $w_j(j=1,2,\dots,n)$'ye göre ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi $WN_{ij}=(\mu_{ij}^{'},\nu_{ij}^{'})(i=1,2,\dots,m;\ j=1,2,\dots,n)$ Eş. 4.5 ile hesaplanır:

$$WN_{ij}=w_j\otimes N_{ij}=\left(\sqrt[q]{1-(1-\mu_{ij}^{q})^{w_j}},\nu_{ij}^{w_j}\right)(i=1,2,\dots,m;\ j=1,2,\dots,n) \tag{4.5}$$

Adım (5) Sınır Yakınlık Alanı (SYA)'nın hesaplanması

Sınır yakınlık alanının değerleri ile SYA matrisi $G=[g_j]_{1\times n}$ Eş. 4.6 ile hesaplanır:

$$g_j = (\prod_{i=1}^{m} WN_{ij})^{1/m} = \left\{ (\prod_{i=1}^{m} \mu_{ij}^{'})^{1/m}, \sqrt[q]{1-\prod_{j=1}^{n}(1-(\nu_{ij}^{'q})^{1/m}} \right\} \quad (4.6)$$

Adım (6) Alternatifler ile SYA arasındaki uzaklığın hesaplanması

Eş. 4.7'de verilen ifadeler yoluyla alternatifler ile SYA arasındaki $D=[d_{ij}]_{m\times n}$ uzaklığı hesaplanır.

$$d_{ij} = \begin{Bmatrix} d(WN_{ij}, g_j), if WN_{ij} > g_j \\ 0, if WN_{ij} = g_j \\ -d(WN_{ij}, g_j), if WN_{ij} < g_j \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Burada $d(WN_{ij}, g_j)$ ifadesi, WN_{ij} ile g_j arasındaki uzaklıktır.

Uzaklığı ölçmek için q-rung orthopair fuzzy normalized Hamming distance (q-ROFNHD) ölçüsü kullanılmıştır. q-seviyeli orthopair bulanık normalleştirilmiş Hamming uzaklığı Eş. 4.8 ile hesaplanır:

$$d_{q-ROFNHD_{(p_1,p_2)}} = \frac{1}{2}(\left|(\mu_1)^q - (\mu_2)^q\right| + \left|(\nu_1)^q - (\nu_2)^q\right| + \left|(\gamma_1)^q - (\gamma_2)^q\right|)$$

$$d_{q-ROFNHD_{(WN_{ij},g_j)}} = \frac{1}{2}\left\{\left|(\mu_{WN_{ij}})^q - (\mu_{g_j})^q\right| + \left|(\nu_{WN_{ij}})^q - (\nu_{g_j})^q\right| + \left|(\gamma_{WN_{ij}})^q - (\gamma_{g_j})^q\right|\right\} \quad (4.8)$$

Belirsizlik derecesi $\gamma_p(x)$, Eş. 4.9 ile türetilir:

$$\gamma_p(x) = \sqrt[q]{1-((\mu_p(x))^q + (\nu_p(x))^q)} \quad (4.9)$$

Adım (7) Alternatiflerin d_{ij} uzaklık değerlerinin toplanması

Son adımda Eş. 4.10 ile her alternatifin d_{ij} uzaklık değerleri toplanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} d_{ij} \; ; \; i = 1, 2, ..., n \quad (4.10)$$

Kapsamlı değerlendirme S_i sonucu dikkate alınarak tüm alternatiflerin sıralaması yapılabilir; kapsamlı değerlendirme sonucu S_i ne kadar büyükse, seçim o kadar iyi demektir.

4.3. q-ROF TOPSIS Metodu

Klasik ÇKKV tekniklerinde kriter ağırlıklarının ve karar verici değerlendirmelerinin net şekilde bilindiği farz edilir. Fakat reel hayatın bazı durumlarında her zaman kesin ifadeler kullanılamaz. Bu problemi aşmaya Fayed (1965) tarafından geliştirilen bulanık mantık teorisine dayalı bulanık kümeler yardımcı olur. Net ifade edilemeyen değişkenler bu sayede dilsel değerler yardımıyla problemin çözümüne dahil edilebilir. BK teorisi ÇKKV tekniklerinde kullanılmaya başlanarak bulanık ÇKKV teknikleri geliştirilmiştir. Bu tekniklerden biri de q-ROF TOPSIS tekniğidir. Q- ROF TOPSIS, değerlendirme sonucunda elde edilen bulanık karar matrisinin kullanıldığı sekiz adım içeren bir çözümden oluşmaktadır [75]. Çözüm aşamasında, m tane kriter, n tane alternatif ve k sayıda karar verici belirlenir:

Adım (1) Karar vericilerin ağırlıkları belirlenir (KV).

Karar vericilerin sıralaması, dilsel terimlerin q-rung orthopair bulanık sayılarla ifade edilmesiyle elde edilir. $D_k = (\mu'_{ij}, \nu'_{ij}, \pi'_{ij}) = [\mu_k(x), \nu_k(x), \pi_k(x)]$, l adet karar vericinin k. performansını değerlendirmek için bir q-ROF sayısı olsun. k. karar vericiyi derecelendirmek için aşağıdaki Eş. 4.11 kullanılabilir:

$$\lambda_k = \frac{(1+\mu_k^q(x_i)-\nu_k^q(x_i))}{\sum_{k=1}^{l}(1+\mu_k^q(x_i)-\nu_k^q(x_i))} \text{ ve } \sum_{k=1}^{l}\lambda_k = 1 \tag{4.11}$$

Adım (2) Normalleştirilmiş karar matrisi KV'lerin görüşleri baz alınarak oluşturulur.

KV'ler, başlangıçta alternatifleri dilsel değişkenlerle derecelendirir. Daha sonra, bu terimler bir q-ROF sayısına dönüştürülür. $A_k = [\mu_k(x), \nu_k(x)](k = 1,2,3,...,l)$'nın, q-ROFWA birleştirme operatörü ile KV ağırlıkları (λ_k) ile toplanmış q-ROF sayılarının bir koleksiyonu olduğu varsayılırsa:

$$q-ROFWA_{(A_1,A_2,...,A_n)} = [\sqrt[q]{1-\prod_{k=1}^{l}(1-\mu_k^q)^{\lambda_k}}, \prod_{k=1}^{l}(\nu_k)^{\lambda_k}] \tag{4.12}$$

Birleştirilmiş q-ROF karar matrisi (R) Eş. 4.13 ile tanımlanabilir:

$R=[r_{ij}]_{m\times n}$, *i=1,2, ..., m; j=1,2, ..., n*

$$R=\begin{bmatrix} \mu_{A_1}(x_1),\nu_{A_1}(x_1),\pi_{A_1}(x_1) & \mu_{A_1}(x_2),\nu_{A_1}(x_2),\pi_{A_1}(x_2) & \dots & \mu_{A_1}(x_n),\nu_{A_1}(x_n),\pi_{A_1}(x_n) \\ \mu_{A_2}(x_1),\nu_{A_2}(x_1),\pi_{A_2}(x_1) & \mu_{A_2}(x_2),\nu_{A_2}(x_2),\pi_{A_2}(x_2) & \dots & \mu_{A_2}(x_n),\nu_{A_2}(x_n),\pi_{A_2}(x_n) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mu_{A_m}(x_1),\nu_{A_m}(x_1),\pi_{A_m}(x_1) & \mu_{A_m}(x_2),\nu_{A_m}(x_2),\pi_{A_m}(x_2) & \dots & \mu_{A_m}(x_n),\nu_{A_m}(x_n),\pi_{A_m}(x_n) \end{bmatrix}$$

(4.13)

Adım (3) Değerlendirme kriterlerinin önem ağırlıklarının belirlenmesi (*W*).

Kriterler farklı önem derecelerine sahip olabilir. *W* önem derecesini gösterir. *W*'yi elde etmek için tüm KV'lerin derecelendirmeleri tek tek dilsel olarak alınır, q-ROF sayılarına dönüştürülür ve aşağıdaki (4.14) eşitliği ile puan fonksiyonları hesaplanır:

$$W_j=\frac{\sum_{k=1}^{l}\lambda_k(1+\mu_k^q(x_j)-\nu_k^q(x_j))}{\sum_{j=1}^{n}W_j\sum_{k=1}^{l}\lambda_k(1+\mu_k^q(x_j)-\nu_k^q(x_j))}$$
$$W=[w_1+w_2+w_3,\dots,w_j] \qquad (4.14)$$
$$w_j=(\mu_j,\nu_j,\pi_j)(j=1,2,3,\dots,n)$$

Adım (4) Ağırlıklı normalleştirilmiş q-ROF karar matrisinin oluşturulması.

q-ROF karar matrisine ağırlıklar uygulandıktan sonra, birleştirilmiş ağırlıklı q-ROF karar matrisi (R') aşağıdaki gibi oluşturulur (Eş. 4.15):

$$w_kA_1=[\sqrt[q]{1-(1-\mu_1^q(x))^{w_k}},\nu_1(x)^{w_k}]$$
$$\pi_{A_1}(x_j)=(1-\mu_{Ai}^q(x_j)-\nu_{Ai}^q(x_j) \qquad (4.15)$$

$r_{ij}^{'}=(\mu'_{ij},\nu'_{ij},\pi'_{ij})=[\mu_{A_iw}(x_j),\nu_{A_iw}(x_j),\pi_{A_iw}(x_j)]$, birleştirilmiş ağırlıklı q-ROF karar matrisinin bir öğesidir (i = 1,2,3, . . ., m; j = 1,2,3, . . ., n).

Adım (5) q-ROF Pozitif İdeal Çözümün (q- ROFPIS, A^*) ve q-ROF Negatif İdeal Çözümün (q- ROFNIS, A^-) tanımlanması.

$$A^*=(\mu_{A^*w}(x_j),\nu_{A^*w}(x_1))$$
$$A^-=(\mu_{A^-w}(x_j),\nu_{A^-w}(x_1)) \qquad (4.16)$$

$$\begin{aligned}
\mu_{A^*w}(x_j) &= ((\max \mu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_1), (\min \mu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_2)) \\
\nu_{A^*w}(x_j) &= ((\min \nu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_1), (\max \nu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_2)) \\
\mu_{A^-w}(x_j) &= ((\min \mu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_1), (\max \mu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_2)) \\
\nu_{A^-w}(x_j) &= ((\max \nu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_1), (\min \nu_{A_iw}(x_j),\ j \in J_2))
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Adım (6) Pozitif ve negatif ideal çözümler için ayırma ölçüleri hesaplanır.

q-ROF'larda alternatifler arasındaki ayrımı hesaplamak için, q-ROF sayıları için yeni mesafe ölçüsü kullanılır. q-ROFPIS ve q-ROFNIS'den her bir alternatifin ayırma ölçüleri, S^* ve S_i, Eş. 4.18 ve 4.19 ile hesaplanır:

$$S^* = \sqrt[p]{\frac{1}{2n}\sum_{j=1}^{n}\left\{\begin{array}{l}\left|(1-k)(\mu_{A_iw}(x_j)-\mu_{A^*w}(x_j))+k(\sqrt[q]{1-\nu^q_{A_iw}}(x_j)-\sqrt[q]{1-\nu^q_{A^*w}}(x_j)\right|^p + \\ \left|(1-k)(\nu_{A_iw}(x_j)-\nu_{A^*w}(x_j))+k(\sqrt[q]{1-\mu^q_{A_iw}}(x_j)-\sqrt[q]{1-\mu^q_{A^*w}}(x_j)\right|^p\end{array}\right\}} \tag{4.18}$$

$$S^- = \sqrt[p]{\frac{1}{2n}\sum_{j=1}^{n}\left\{\begin{array}{l}\left|(1-k)(\mu_{A_iw}(x_j)-\mu_{A^-w}(x_j))+k(\sqrt[q]{1-\nu^q_{A_iw}}(x_j)-\sqrt[q]{1-\nu^q_{A^-w}}(x_j)\right|^p + \\ \left|(1-k)(\nu_{A_iw}(x_j)-\nu_{A^-w}(x_j))+k(\sqrt[q]{1-\mu^q_{A_iw}}(x_j)-\sqrt[q]{1-\mu^q_{A^-w}}(x_j)\right|^p\end{array}\right\}} \tag{4.19}$$

Burada p=1,2, …, n iken k değeri Eş. 4.20 ile hesaplanır:

$$k = (\frac{1}{2}q^2 + \frac{3}{2}q - \frac{1}{3}) / (q^2 + 3q + 1), \quad k \in [\frac{1}{3}, \frac{1}{2}] \tag{4.20}$$

Adım (7) q-ROF ideal çözümü için bağıl yakınlık katsayısı C_i değeri aşağıdaki gibi hesaplanır (Eş. 4.3.11):

$$C_{i^*} = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \ \ 0 \le C_{i^*} \le 1 \tag{4.21}$$

Adım (8) Bu aşamada alternatifler sıralanır.

Karar vermek için göreli yakınlık katsayıları belirlendikten sonra, alternatifler azalan bir C_i sıralaması kullanarak sıralanır.

5. Q SEVİYELİ BULANIK ÇKKV YÖNTEMLERİNİN ENERJİ KAYNAĞI SEÇİMİ PROBLEMİNE UYGULANMASI

Bu bölümde, önceki bölümde aşamalı olarak detaylarına yer verilen q seviyeli orthopair bulanık (q-ROF) sayılı MABAC ve TOPSIS karar verme metotları ile enerji kaynağı seçimine yönelik gerçek verilerden oluşan veri seti ile uygulama yapılmıştır. Uygulama sonunda iki metotta ulaşılan sonuçların karşılaştırması yapılmıştır.

5.1. Uygulama

Tezin uygulama kısmında enerji kaynaklarının planlanmasına yönelik çeşitli alternatifler, ÇKKV temelinde yukarıda değinilen iki yöntem ile değerlendirilerek en uygun alternatif belirlenmeye çalışılmıştır.

ÇKKV probleminde alternatiflerin (A_1, A_2, ..., A_m) kümesinden oluştuğu ve n tane kriter (G_1, G_2, …, G_n) olduğu varsayılırsa diğer kabuller aşağıdaki gibi olur:

Ağırlık vektörü:

w_j (j= 1, 2, …, n)

Karar vericiler:

λ (d_1, d_2,…, d_λ)

Bir elemanın bir kümeye ait olmasının üyelik derecesi:

$$\mu_{ij}^{\lambda} \in [0,1]$$

Üye olmama derecesi:

$$\nu_{ij}^{\lambda} \in [0,1]$$

q seviyeli orthopair bulanık değerlendirme matrisi:

$$R = [A_{ij}^{\lambda}]_{m\times n} = (\mu_{ij}^{\lambda}, \nu_{ij}^{\lambda})$$

ÇKKV problemlerinin en önemli hususlarından biri değerlendirme kriterlerinin doğru belirlenmesidir. Bu çalışmada öncelikle karar vericiler tarafından gözden geçirilen enerji kaynaklarını değerlendirmeye yönelik kriterlerin seçilmesi için literatürden faydalanılmıştır. Literatür araştırmasında enerji kaynaklarını sürdürülebilirlik ve uygunluk açısından değerlendirmek için dikkat edilmesi gereken kriterlerin listesi belirlenmiştir. Seçilen kriterler referanslarıyla birlikte Çizelge 5.1'de yer almaktadır:

Çizelge 5.1. Alternatifler ve değerlendirme kriterleri

Alternatif A_i ($i=1, \ldots, 6$)	Kriter G_j (j= 1, …, 10)	Tanım	Referans
A_1 Güneş Enerjisi A_2 Rüzgâr Enerjisi A_3 HES A_4 Biyokütle A_5 Fosil Kaynaklar A_6 Nükleer Enerji	G_1 Alan ihtiyacı	Bir yatırımın temel unsurlarından biri arazi gereksinimidir. Ayrıca, iyi bir arazi çağrısı parasal kayıpları değerlendirecektir.	[65, 66]
	G_2 CO_2 yayılımı	Bu seçim kriteri CO_2 emisyonlarını ve atık arıtımı ile ilgili maliyetleri dikkate alır.	[67-69]
	G_3 Atık bertaraf yönetimi	Bu alternatif yaklaşım, bu kriter dikkate alınarak yaşam kalitesine verilen zararı azaltmak ve sürdürülebilirliği artırmak için ölçülebilir.	[68, 69]
	G_4 Risk	Başarısızlık olasılığını ölçer.	[68-70]
	G_5 Uygulanabilirlik	Enerji senaryosu uygulama olasılığını ölçer.	[71,72]
	G_6 Güvenilirlik	Bir yapının tasarlanan koşullara göre çalışma kapasitesidir.	[73, 74, 86]
	G_7 İstihdam	Enerji politikaları, doğrudan ve dolaylı olarak işlere bakılarak ölçülen işgücü etkisi dikkate alınarak ölçülür.	[84-86]
	G_8 Yatırım maliyeti	Bu kriter makine, insan gücü, inşaat ve altyapı maliyetlerini kapsayan bir enerji santralinin kurulması boyunca yapılan ortak harcamalardan oluşur.	[75-77]
	G_9 Siyasi kabul	Bu kriter, liderlerin planlanan enerji politikası hakkındaki görüşlerinin çoğu arasında fikir birliği olmayabileceğini incelemektedir.	[78-81]
	G_{10} Sosyal kabul	Sosyal kabul, şirketin algılanan girişim anlayışını değerlendirmeyi ve müşterinin görüşlerini ölçmeyi içerir.	[78, 79, 82, 83]

Kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi ve alternatiflerin kriterler bazında değerlendirilmesi için alanında uzman 3 kişilik bir karar verici grup oluşturulmuştur. Daha sonra bir anket hazırlanarak bu gruba gönderilmiştir. İncelenen literatür doğrultusunda Çizelge 5.1'de gösterilen karar kriterleri belirlenmiştir.

Karar vericiler Çizelge 5.2'deki dilsel değişkenleri referans alarak tüm kriterleri tek tek değerlendirmiştir. Dilsel değişkenler ve bu değişkenlerin karşılıkları bulanık sayılar olarak tanımlanır. Dilsel değişkenler kriter ağırlıklarını belirlemek ve alternatifleri

derecelendirmek için kullanılır. Uygulamada ele alınan problem kapsamında Çizelge 5.2'deki dilsel değişkenlerden faydalanılmıştır [1].

Çizelge 5.2. Dilsel değişkenler

Dilsel Değişkenler	μ	ν
Çok aşırı iyi (Aİ) veya Aşırı yüksek (AY)	0,95	0,15
Çok iyi (Çİ) veya Çok yüksek (ÇY)	0,85	0,25
İyi (İ) veya Yüksek (Y)	0,75	0,35
Ortanın üzerinde (OÜ)	0,65	0,45
Orta seviyede (O)	0,55	0,55
Ortanın altında (OA)	0,45	0,65
Düşük (D)	0,35	0,75
Çok düşük (ÇD)	0,25	0,85
Aşırı derecede düşük (AD)	0,15	0,95

Karar vericilerin (*KV*) uzmanlıkları ise şu şekilde değerlendirilmiştir:

KV_1 = Çok aşırı iyi (0,95; 0,15),
KV_2 = Çok aşırı iyi (0,95; 0,15) ve
KV_3 = İyi (0,75; 0,35)

Yukarıdaki şekilde skorlanan her bir karar verici 5.1 no'lu eşitlik yardımıyla değerlendirilmiştir:

$$\lambda_k = \frac{(1+\mu_k^q-\nu_k^q)}{\sum_{k=1}^{l}(1+\mu_k^q-\nu_k^q)} \quad \text{ve} \quad \sum_{k=1}^{l}\lambda_k = 1 \tag{5.1}$$

5.2 no'lu eşitlikle örnek olarak birinci karar vericinin skoru hesaplanmıştır (q=3 olarak kabul edilmiştir.):

$$\lambda_{KV_1} = \frac{(1+0,95^3-0,15^3)}{(1,854+1,854+1,379)} = 0,364 \tag{5.2}$$

Diğer karar vericilerin skorları da belirlendikten sonra hesaplanan kriter ağırlıkları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Kriterlerin bütünleştirilmiş bulanık ağırlıklarının hesaplanması

KV'nin Ağırlığı (λ_k) Kriterler	Karar Vericilerin Değerlendirmesi						
	KV_1 0,364		KV_2 0,364		KV_3 0,271		Ağırlık (W_j)
Arazi Gereksinimi	0,65	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,0831
CO_2 Yayılımı	0,95	0,15	0,85	0,25	0,95	0,15	0,1371
Atık Bertaraf Yönetimi	0,85	0,25	0,75	0,35	0,85	0,25	0,1182
Risk	0,55	0,55	0,75	0,35	0,95	0,15	0,1066
Uygulanabilirlik	0,95	0,15	0,95	0,15	0,85	0,25	0,1389
Güvenilirlik	0,55	0,55	0,65	0,45	0,65	0,45	0,0869
İstihdam	0,75	0,35	0,65	0,45	0,55	0,55	0,0938
Yatırım Maliyeti	0,95	0,15	0,95	0,15	0,85	0,25	0,1389
Siyasi Kabul	0,25	0,85	0,35	0,75	0,55	0,55	0,0501
Sosyal Kabul	0,35	0,75	0,25	0,85	0,45	0,65	0,0462

Kriter ağırlıkları 5.3 no'lu eşitlik yardımıyla hesaplanarak bütünleştirilmiş bulanık ağırlıklar elde edilmiştir (Çizelge 5.3):

$$W_j = \frac{\sum_{k=1}^{l} \lambda_k (1 + \mu_k^q - \nu_k^q)}{\sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{l} \lambda_k (1 + \mu_k^q - \nu_k^q)} \tag{5.3}$$

Kriter ağrılıkları belirlendikten sonra MABAC ve Bulanık VIKOR yöntemleri için sırasıyla problemin diğer uygulama adımlarına geçilmiştir.

5.1.1. q-ROF MABAC yönteminin uygulanması

Alternatifleri ve kriter ağırlıkları yukarıda verilen enerji planlaması problemine q-seviyeli orthopair bulanık MABAC modelinin uygulanış adımları bu bölümde sırasıyla verilmiştir.

Adım (1) Her bir karar verici için q-seviyeli orthopair bulanık değerlendirme matrisinin oluşturulması

İlk olarak, anket yapılan uzmanlardan (KV) enerji kaynakları üzerine dilsel değişkenli değerlendirme sonuçları elde edilerek Çizelge 5.4'te toplanmıştır.

Çizelge 5.4. Karar vericilerin dilsel değişkenli değerlendirme sonuçları

		Kriterler									
KV	Alt.	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}
KV_1	A_1	Aİ	D	İ	D	Aİ	Aİ	ÇD	O	Çİ	OÜ
	A_2	İ	D	İ	OA	Aİ	Aİ	ÇD	O	Çİ	O
	A_3	Çİ	D	İ	OA	Aİ	Aİ	D	İ	İ	OA
	A_4	OA	Aİ	O	İ	Çİ	Çİ	OA	İ	OA	ÇD
	A_5	OA	Aİ	O	İ	Çİ	Çİ	6	İ	OA	ÇD
	A_6	D	ÇD	İ	İ	İ	İ	O	Çİ	Çİ	OA
KV_2	A_1	OÜ	D	OÜ	D	Çİ	Çİ	Çİ	OA	Aİ	Çİ
	A_2	O	ÇD	İ	O	İ	İ	Çİ	O	Aİ	OÜ
	A_3	İ	OA	O	İ	OÜ	OÜ	OÜ	Çİ	Çİ	ÇD
	A_4	OA	ÇD	Çİ	ÇD	Çİ	Çİ	OÜ	OA	OÜ	O
	A_5	D	OÜ	OA	OÜ	Çİ	OÜ	OÜ	ÇD	Çİ	OA
	A_6	D	ÇD	D	Çİ	OÜ	O	OÜ	Çİ	Çİ	OA
KV_3	A_1	Aİ	AD	O	D	İ	Çİ	OÜ	İ	İ	Çİ
	A_2	Çİ	AD	D	O	O	OÜ	OÜ	OÜ	İ	Çİ
	A_3	İ	AD	ÇD	OÜ	OÜ	OÜ	OÜ	O	İ	İ
	A_4	O	Çİ	OÜ	O	O	OA	OA	O	O	OÜ
	A_5	OÜ	Aİ	OA	OÜ	İ	İ	OÜ	O	OÜ	O
	A_6	ÇD	AD	İ	İ	OA	Aİ	İ	Çİ	Çİ	İ

Çizelge 5.5. Karar vericilerin dilsel değişkenli değerlendirme sonuçlarının bulanık sayılara dönüştürülmesi

		Kriterler									
		G_1		G_2		G_3		G_4		G_5	
KV_1	A_1	0,95	0,15	0,35	0,75	0,75	0,35	0,35	0,75	0,95	0,15
	A_2	0,75	0,35	0,35	0,75	0,75	0,35	0,45	0,65	0,95	0,15
	A_3	0,85	0,25	0,35	0,75	0,75	0,35	0,45	0,65	0,95	0,15
	A_4	0,45	0,65	0,95	0,15	0,55	0,55	0,75	0,35	0,85	0,25
	A_5	0,45	0,65	0,95	0,15	0,55	0,55	0,75	0,35	0,85	0,25
	A_6	0,35	0,75	0,25	0,85	0,75	0,35	0,75	0,35	0,75	0,35
KV_2	A_1	0,65	0,45	0,35	0,75	0,65	0,45	0,35	0,75	0,85	0,25
	A_2	0,55	0,55	0,25	0,85	0,75	0,35	0,55	0,55	0,75	0,35
	A_3	0,75	0,35	0,45	0,65	0,55	0,55	0,75	0,35	0,65	0,45
	A_4	0,45	0,65	0,25	0,85	0,85	0,25	0,25	0,85	0,85	0,25
	A_5	0,35	0,75	0,65	0,45	0,45	0,65	0,65	0,45	0,85	0,25
	A_6	0,35	0,75	0,25	0,85	0,35	0,75	0,85	0,25	0,65	0,45
KV_3	A_1	0,95	0,15	0,15	0,95	0,55	0,55	0,35	0,75	0,75	0,35
	A_2	0,85	0,25	0,15	0,95	0,35	0,75	0,55	0,55	0,55	0,55
	A_3	0,75	0,35	0,15	0,95	0,25	0,85	0,65	0,45	0,65	0,45
	A_4	0,55	0,55	0,85	0,25	0,65	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55
	A_5	0,65	0,45	0,95	0,15	0,45	0,65	0,65	0,45	0,75	0,35
	A_6	0,25	0,85	0,15	0,95	0,75	0,35	0,75	0,35	0,45	0,65

Çizelge 5.5. (devam) Karar vericilerin dilsel değişkenli değerlendirme sonuçlarının bulanık sayılara dönüştürülmesi

		Kriterler									
		G_6		G_7		G_8		G_9		G_{10}	
KV_1	A_1	0,95	0,15	0,25	0,85	0,55	0,55	0,85	0,25	0,65	0,45
	A_2	0,95	0,15	0,25	0,85	0,55	0,55	0,85	0,25	0,55	0,55
	A_3	0,95	0,15	0,35	0,75	0,75	0,35	0,75	0,35	0,65	0,65
	A_4	0,85	0,25	0,45	0,65	0,75	0,35	0,45	0,65	0,25	0,85
	A_5	0,85	0,25	0,65	0,45	0,75	0,35	0,45	0,65	0,25	0,85
	A_6	0,75	0,35	0,55	0,55	0,85	0,25	0,85	0,25	0,45	0,65
KV_2	A_1	0,85	0,25	0,85	0,25	0,45	0,65	0,95	0,15	0,85	0,25
	A_2	0,75	0,35	0,85	0,25	0,55	0,55	0,95	0,15	0,65	0,45
	A_3	0,65	0,45	0,65	0,45	0,85	0,25	0,85	0,25	0,25	0,85
	A_4	0,85	0,25	0,65	0,45	0,45	0,65	0,65	0,45	0,55	0,55
	A_5	0,65	0,45	0,65	0,45	0,25	0,85	0,85	0,25	0,45	0,65
	A_6	0,55	0,55	0,65	0,45	0,85	0,25	0,85	0,25	0,45	0,65
KV_3	A_1	0,85	0,25	0,65	0,45	0,75	0,35	0,75	0,35	0,85	0,25
	A_2	0,65	0,45	0,65	0,45	0,65	0,45	0,75	0,35	0,85	0,25
	A_3	0,65	0,45	0,65	0,45	0,55	0,55	0,75	0,35	0,75	0,35
	A_4	0,45	0,65	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,65	0,45
	A_5	0,75	0,35	0,65	0,45	0,55	0,55	0,65	0,45	0,55	0,55
	A_6	0,95	0,15	0,75	0,35	0,85	0,25	0,85	0,25	0,75	0,35

Dilsel değişkenli değerlendirme sonuçları Dilsel Değişkenler çizelgesi (Çizelge 5.2) yardımıyla bulanık sayılara dönüştürülerek Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Adım (2) Birleştirilmiş karar matrisi karar vericilerin görüşleri dikkate alınarak oluşturulur.

Üç uzmanın görüşleri Eş. 4.1'de verilen q-ROFWA birleştirme operatörü ile birleştirilerek Çizelge 5.6'daki Birleştirilmiş q-ROF Karar Matrisi elde edilmiştir.

Çizelge 5.6. Birleştirilmiş q-ROF karar matrisi (r_{ij})

	G_1		G_2		G_3		G_4		G_5	
A_1	0,905	0,224	0,319	0,800	0,674	0,434	0,350	0,750	0,888	0,227
A_2	0,742	0,377	0,282	0,837	0,696	0,430	0,519	0,585	0,851	0,291
A_3	0,794	0,310	0,369	0,759	0,619	0,525	0,650	0,470	0,843	0,302
A_4	0,482	0,621	0,854	0,324	0,733	0,391	0,608	0,547	0,806	0,310
A_5	0,505	0,620	0,905	0,224	0,492	0,612	0,693	0,411	0,829	0,274
A_6	0,329	0,776	0,231	0,876	0,673	0,462	0,794	0,310	0,662	0,454

Çizelge 5.6. (devam) Birleştirilmiş q-ROF karar matrisi (r_{ij})

	G_6		G_7		G_8		G_9		G_{10}	
A_1	0,901	0,208	0,709	0,458	0,605	0,517	0,888	0,227	0,801	0,310
A_2	0,858	0,275	0,709	0,458	0,582	0,521	0,888	0,227	0,709	0,413
A_3	0,843	0,302	0,582	0,542	0,766	0,350	0,794	0,310	0,556	0,606
A_4	0,801	0,324	0,546	0,568	0,628	0,496	0,567	0,543	0,528	0,610
A_5	0,771	0,339	0,650	0,450	0,608	0,547	0,721	0,415	0,441	0,685
A_6	0,818	0,328	0,656	0,452	0,850	0,250	0,850	0,250	0,581	0,550

Adım (3) Birleştirilmiş karar matrisinin normalizasyonu.

Eş. 4.2.3 ve 4.2.4 ile her bir kriterin türüne göre karar matrisi r_{ij} normalleştirilir. Çizelge 5.1'deki G_1, G_2, G_4 ve G_8 kriterleri maliyet tipi kriterlerdir. Normalleştirilmiş karar matrisi çizelgede 5.7'de yer almaktadır:

Çizelge 5.7. Normalleştirilmiş matris (N_{ij})

	G_1		G_2		G_3		G_4		G_5	
A_1	0,224	0,905	0,800	0,319	0,674	0,434	0,750	0,350	0,888	0,227
A_2	0,377	0,742	0,837	0,282	0,696	0,430	0,585	0,519	0,851	0,291
A_3	0,310	0,794	0,759	0,369	0,619	0,525	0,470	0,650	0,843	0,302
A_4	0,621	0,482	0,324	0,854	0,733	0,391	0,547	0,608	0,806	0,310
A_5	0,620	0,505	0,224	0,905	0,492	0,612	0,411	0,693	0,829	0,274
A_6	0,776	0,329	0,876	0,231	0,673	0,462	0,310	0,794	0,662	0,454
	G_6		G_7		G_8		G_9		G_{10}	
A_1	0,901	0,208	0,709	0,458	0,517	0,605	0,888	0,227	0,801	0,310
A_2	0,858	0,275	0,709	0,458	0,521	0,582	0,888	0,227	0,709	0,413
A_3	0,843	0,302	0,582	0,542	0,350	0,766	0,794	0,310	0,556	0,606
A_4	0,801	0,324	0,546	0,568	0,496	0,628	0,567	0,543	0,528	0,610
A_5	0,771	0,339	0,650	0,450	0,547	0,608	0,721	0,415	0,441	0,685
A_6	0,818	0,328	0,656	0,452	0,250	0,850	0,850	0,250	0,581	0,550

Adım (4) Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması

Normalleştirilmiş matris N_{ij} ve kriter ağırlıkları w_j baz alınarak, ağırlıklı normalleştirilmiş matris WN_{ij}'in ögeleri Eş. 4.5 ile bulunur.

Örneğin WN_{11} değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır (Eş. 5.4):

$$WN_{11} = (\sqrt[3]{1-(1-0,224^3)}^{0,083}; 0,905^{0,083}) = (0,098; 0,992) \quad (5.4)$$

Benzer hesaplama ile üretilen ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi WN_{ij} Çizelge 5.8'de sunulmuştur:

Çizelge 5.8. Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi (WN_{ij})

	G_1		G_2		G_3		G_4		G_5	
A_1	0,098	0,992	0,387	0,909	0,311	0,933	0,354	0,916	0,457	0,884
A_2	0,166	0,975	0,413	0,900	0,323	0,932	0,264	0,947	0,425	0,902
A_3	0,136	0,981	0,360	0,921	0,281	0,948	0,208	0,965	0,418	0,905
A_4	0,282	0,941	0,142	0,987	0,344	0,925	0,245	0,960	0,391	0,907
A_5	0,282	0,945	0,098	0,992	0,219	0,960	0,181	0,970	0,407	0,898
A_6	0,371	0,912	0,446	0,885	0,310	0,938	0,136	0,981	0,304	0,936
	G_6		G_7		G_8		G_9		G_{10}	
A_1	0,469	0,878	0,330	0,937	0,231	0,959	0,457	0,884	0,388	0,907
A_2	0,430	0,898	0,330	0,937	0,233	0,956	0,457	0,884	0,330	0,929
A_3	0,418	0,905	0,263	0,950	0,154	0,978	0,383	0,907	0,250	0,959
A_4	0,387	0,911	0,245	0,954	0,221	0,962	0,255	0,951	0,236	0,960
A_5	0,367	0,914	0,297	0,936	0,245	0,960	0,337	0,930	0,195	0,969
A_6	0,400	0,912	0,301	0,936	0,109	0,987	0,424	0,891	0,262	0,951

Adım (5) Sınır Yakınlık Alanı (SYA)'nın hesaplanması

SYA değerleri Eş. 4.2.6'ya göre hesaplanarak Sınır Yakınlık Alanı matrisi $G=[g_j]_{1xn}$ aşağıdaki gibi oluşturulur. Örneğin g_1 değeri, aşağıda verilen Eş. 5.5 ile hesaplanır:

$$
\begin{aligned}
g_1 &= \left(\prod_{i=1}^{6} WN_{ij}\right)^{1/6} \\
&= \left\{ \begin{array}{l} (0,0098x0,0166x0,136x0,282x0,282x0,371)^{(1/6)}, \\ \sqrt[3]{1-((1-0,992)^{(1/6)}x(1-0,975)^{(1/6)}x(1-0,981)^{(1/6)}x(1-0,941)^{(1/6)}x(1-0,945)^{(1/6)}x(1-0,371)^{(1/6)}} \end{array} \right\} \qquad (5.5) \\
&= (0,247;0,968)
\end{aligned}
$$

Benzer hesaplama ile üretilen diğer g_j sonuçları Çizelge 5.9'da yer almaktadır:

Çizelge 5.9. Sınır Yakınlık Alanı (SYA) matrisi

Kriterler	G_1		G_2		G_3		G_4		G_5	
g_j	0,200	0,968	0,266	0,956	0,295	0,941	0,221	0,961	0,397	0,907
Kriterler	G_6		G_7		G_8		G_9		G_{10}	
g_j	0,411	0,904	0,292	0,942	0,191	0,970	0,378	0,912	0,270	0,950

Adım (6) Alternatifler ile SYA arasındaki uzaklığın hesaplanması

Alternatifler ile SYA arasındaki D mesafesi Eş. 4.2.8 ile hesaplanır. Örneğin d_{11} için hesaplama sonucu Eş. 5.6'da gösterilmiştir:

$$d_{11} = d_{q-ROFNHD_{(wN_{11},g_1)}} = \frac{1}{2}(\left|0,098^3 - 0,247^3\right| + \left|0,992^3 - 0,968^3\right| + \left|0,287^3 - 0,438)^3\right|) = 0,068 \quad (5.6)$$

Daha sonra diğer hesaplama sonuçları elde edilir. Alternatifler ile SYA arasındaki $D=[d_{ij}]_{mxn}$ mesafeleri Çizelge 5.10'da yer almaktadır.

Çizelge 5.10. Sınır Yakınlık Alanına uzaklıklar

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}
A_1	0,068	0,468	0,815	0,919	0,695	0,683	0,813	0,916	0,718	0,874
A_2	0,021	0,473	0,814	0,892	0,685	0,670	0,813	0,920	0,718	0,857
A_3	0,036	0,459	0,815	0,881	0,687	0,673	0,819	0,915	0,710	0,848
A_4	0,074	0,479	0,820	0,877	0,685	0,672	0,823	0,913	0,736	0,848
A_5	0,064	0,487	0,851	0,898	0,756	0,741	0,845	0,921	0,773	0,878
A_6	0,150	0,481	0,834	0,912	0,767	0,745	0,844	0,933	0,774	0,858

$D=[d_{ij}]_{mxn}$ mesafelerinin Eş. 4.7'ye göre yeniden düzenlenmiş hali Çizelge 5.11'de sunulmuştur.

Çizelge 5.11. Sınır Yakınlık Alanına uzaklıklar-2

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}
A_1	-0,068	0,468	0,815	0,919	0,695	0,683	0,813	0,916	0,718	0,874
A_2	-0,021	0,473	0,814	0,892	0,685	0,670	0,813	0,920	0,718	0,857
A_3	-0,036	0,459	-0,815	-0,881	0,687	0,673	-0,819	-0,915	0,710	-0,848
A_4	0,074	-0,479	0,820	0,877	-0,685	-0,672	-0,823	0,913	-0,736	-0,848
A_5	0,064	-0,487	-0,851	-0,898	0,756	-0,741	0,845	0,921	-0,773	-0,878
A_6	0,150	0,481	0,834	-0,912	-0,767	-0,745	0,844	-0,933	0,774	-0,858

Adım (7) Alternatiflerin d_{ij} uzaklık değerlerinin toplanması

Son olarak Eş. 4.10 ile elde edilen her alternatifin d_{ij} uzaklık değerinin toplamı ve sıralaması Çizelge 5.12'de sunulmuştur:

Çizelge 5.12. S_i değerleri ve karar alternatiflerinin sıralaması (q=3)

Alternatif	S_i	Sıralama
Güneş Enerjisi	6,8334	1
Rüzgâr Enerjisi	6,8224	2
Hidroelektrik Enerji	-1,7859	5
Biokütle	-1,5599	4
Fosil Kaynaklar	-2,0417	6
Nükleer Enerji	-1,1324	3

5.1.2. q-ROF MABAC yönteminin parametre analizi

Bu bölümde q-ROF MABAC metodunda kullanılan q parametresi analiz edilmiştir. Alt bölüm 5.1.1'de yapılan hesaplamalar q parametresi 3 kabul edilerek yapılmış olup parametre analizi için alternatifler q=2 ila 10 aralığında yer alan tüm değerler için yeniden değerlendirilmiştir. Hesaplamaların bu aralıktaki değerler için de yapılmasının nedeni, q parametresi değiştiğinde alternatiflerin sıralamasının ne yönde etkileneceğini görmektir. Farklı q değerleri ile yapılan hesaplamanın sonuçları Çizelge 5.13'te yer almaktadır.

Çizelge 5.13. q-ROF MABAC metodunun parametre analizi

		2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_1	Güneş Enerjisi	7,060	6,833	3,656	3,709	3,404	3,276	3,150	3,028	2,909
S_2	Rüzgâr Enerjisi	7,492	6,833	6,729	6,563	6,062	5,758	5,472	5,204	4,952
S_3	HES	0,168	-1,786	-3,060	-3,121	-2,846	-2,742	-2,641	-2,544	-2,449
S_4	Biyokütle	-0,086	-1,560	-1,542	-1,533	-1,209	-0,046	-0,005	0,033	0,067
S_5	Fosil Kaynaklar	-0,322	-2,042	-1,920	-1,969	-1,708	-1,610	-1,518	-1,432	-1,351
S_6	Nükleer Enerji	0,564	-1,132	-1,023	-1,083	-0,841	-0,765	-0,697	-0,636	-0,581

Hesaplama sonuçlarına göre, belirlenen q aralığında hangi q değerlerinin daha tutarlı olduğu sorusuna net bir cevap verilemez. Çizelge 5.13'e bakıldığında alternatiflerin S_i değerlerinin birbirinden farklı değerler aldığı görülmektedir.

5.1.3. q- ROF TOPSIS yönteminin uygulanması

Tez kapsamında ele alınan enerji kaynağı seçimi problemine uygulanan q- ROF TOPSIS yöntemi alt bölüm 4.3'te yer aldığı gibi sekiz adımdan oluşan bir süreçtir. TOPSIS metodunda kullanılacak alternatifler kümesi A= (A_1, A_2, …, A_m), kriterler kümesi de G= (G_1, G_2, …, G_n)'dir. Q- ROF TOPSIS, parametrik ÇKKV metotlarından biri olup q ve p değerleri bu metodun ana parametreleridir. Pınar ve Boran [52] tarafından q-ROF TOPSIS

metoduna parametre analizi yapılarak en iyi değerler q=3 ve p=1 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada da yapılan hesaplamalarda p ve q parametreleri sırasıyla 1 ve 3 olarak alınmıştır.

Adım (1) Karar vericilerin ağırlıklarının belirlenmesi (KV).

Problem için belirlenmesi gereken alternatif ve kriterler Çizelge 5.1'te verilmiştir. Dilsel değişkenler (Çizelge 5.2) ve dilsel değişkenlerle yapılan alternatif değerlendirmeleri de dikkate alınarak elde edilen karar vericilerin ağırlıkları ise Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Adım (2) KV'lerin görüşleri baz alınarak normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması.

Dilsel değişkenlerin dönüştürülmesiyle elde edilen bulanık sayılar (Çizelge 5.3) ile önceki adımda bulunan KV ağırlıkları Eş. 4.3.1 kullanılarak bu aşamada normalleştirilir. Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisinde yer alan π_k değeri Eş. 5.7 ile hesaplanmıştır:

$$\pi_{A_i}(x_j) = (1 - \mu_{Ai}^{q}(x_j) - \nu_{Ai}^{q}(x_j))^{1/q} \tag{5.7}$$

Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi Çizelge 5.14'te sunulmuştur:

Çizelge 5.14. Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi (R)

	G_1			G_2			G_3			G_4		
A_1	0,905	0,224	0,627	0,318	0,800	0,770	0,674	0,434	0,849	0,350	0,750	0,812
A_2	0,742	0,377	0,814	0,282	0,837	0,731	0,696	0,431	0,835	0,519	0,585	0,871
A_3	0,794	0,310	0,777	0,369	0,759	0,800	0,905	0,525	0,484	0,650	0,470	0,853
A_4	0,482	0,621	0,865	0,854	0,325	0,701	0,733	0,391	0,818	0,608	0,547	0,849
A_5	0,505	0,620	0,859	0,905	0,224	0,627	0,492	0,612	0,867	0,692	0,411	0,843
A_6	0,329	0,776	0,792	0,231	0,876	0,680	0,673	0,462	0,842	0,794	0,310	0,777

	G_5			G_6			G_7		
A_1	0,888	0,228	0,661	0,888	0,228	0,661	0,888	0,228	0,661
A_2	0,851	0,291	0,711	0,851	0,291	0,711	0,851	0,291	0,711
A_3	0,843	0,302	0,720	0,843	0,302	0,720	0,843	0,302	0,720
A_4	0,806	0,310	0,764	0,806	0,310	0,764	0,806	0,310	0,764
A_5	0,829	0,274	0,743	0,829	0,274	0,743	0,829	0,274	0,743
A_6	0,662	0,454	0,851	0,662	0,454	0,851	0,662	0,454	0,851

	G_8			G_9			G_{10}		
A_1	0,604	0,517	0,862	0,888	0,228	0,661	0,801	0,310	0,770
A_2	0,582	0,521	0,871	0,888	0,228	0,661	0,709	0,413	0,830
A_3	0,766	0,350	0,798	0,794	0,310	0,777	0,619	0,606	0,814
A_4	0,627	0,496	0,858	0,567	0,544	0,869	0,528	0,611	0,855
A_5	0,608	0,547	0,849	0,720	0,416	0,821	0,441	0,685	0,840
A_6	0,850	0,250	0,718	0,850	0,250	0,718	0,581	0,550	0,861

G_1, G_2, G_4 ve G_8 kriterleri maliyet kriterleri olduğu için normalleştirilmiş karar matrisi bu şekilde kullanılamaz, karar matrisine Eşitlik 4.4 uygulanır. Matrisin son hali aşağıdaki gibidir (Çizelge 5.15):

Çizelge 5.15. Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi (R)-2

	G_1			G_2			G_3			G_4		
A_1	0,224	0,905	0,627	0,800	0,318	0,770	0,674	0,434	0,849	0,750	0,350	0,812
A_2	0,377	0,742	0,814	0,837	0,282	0,731	0,696	0,431	0,835	0,585	0,519	0,871
A_3	0,310	0,794	0,777	0,759	0,369	0,800	0,905	0,525	0,484	0,470	0,650	0,853
A_4	0,621	0,482	0,865	0,325	0,854	0,701	0,733	0,391	0,818	0,547	0,608	0,849
A_5	0,620	0,505	0,859	0,224	0,905	0,627	0,492	0,612	0,867	0,411	0,692	0,843
A_6	0,776	0,329	0,792	0,876	0,231	0,680	0,673	0,462	0,842	0,310	0,794	0,777

	G_5			G_6			G_7		
A_1	0,888	0,228	0,661	0,901	0,208	0,638	0,708	0,458	0,818
A_2	0,851	0,291	0,711	0,857	0,276	0,704	0,708	0,458	0,818
A_3	0,843	0,302	0,720	0,843	0,302	0,720	0,582	0,542	0,863
A_4	0,806	0,310	0,764	0,800	0,324	0,768	0,546	0,515	0,888
A_5	0,829	0,274	0,743	0,771	0,340	0,795	0,650	0,450	0,859
A_6	0,662	0,454	0,851	0,818	0,328	0,747	0,656	0,453	0,855

	G_8			G_9			G_{10}		
A_1	0,517	0,604	0,862	0,888	0,228	0,661	0,801	0,310	0,770
A_2	0,521	0,582	0,871	0,888	0,228	0,661	0,709	0,413	0,830
A_3	0,350	0,766	0,798	0,794	0,310	0,777	0,619	0,606	0,814
A_4	0,496	0,627	0,858	0,567	0,544	0,869	0,528	0,611	0,855
A_5	0,547	0,608	0,849	0,720	0,416	0,821	0,441	0,685	0,840
A_6	0,250	0,850	0,718	0,850	0,250	0,718	0,581	0,550	0,861

Adım (3) Değerlendirme kriterlerinin önem ağırlıklarının belirlenmesi.

Eş. 5.3 yardımıyla hesaplanan bütünleştirilmiş bulanık ağırlıklar Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Adım (4) Ağırlıklı normalleştirilmiş q-ROF karar matrisinin oluşturulması (R').

Normalleştirilmiş q-ROF karar matrisine Eş. 4.14 uygulanarak ağırlıklandırılmış q-ROF karar matrisi elde edilir (Eş. 5.8):

$$r'_{ij} = (\mu'_{ij}, \nu'_{ij}, \pi'_{ij}) = (\mu_{A_w}(x_j), \nu_{A_w}(x_j), \pi_{A_w}(x_j))$$

$$i = 1, 2, ...m,\ j = 1, 2, ..., n \tag{5.8}$$

Çizelge 5.16. Ağırlıklı normalleştirilmiş q-ROF karar matrisi ($R^{'}$)

	G_1			G_2			G_3			G_4		
A_1	0,098	0,992	0,627	0,770	0,348	0,770	0,397	0,894	0,849	0,814	0,098	0,812
A_2	0,166	0,975	0,814	0,731	0,362	0,731	0,287	0,932	0,835	0,842	0,166	0,871
A_3	0,136	0,981	0,777	0,800	0,529	0,800	0,226	0,955	0,484	0,847	0,136	0,853
A_4	0,282	0,941	0,865	0,701	0,386	0,701	0,266	0,948	0,818	0,850	0,282	0,849
A_5	0,282	0,945	0,859	0,627	0,246	0,627	0,197	0,962	0,867	0,835	0,282	0,843
A_6	0,371	0,912	0,792	0,680	0,348	0,680	0,148	0,976	0,842	0,896	0,371	0,777

	G_5			G_6			G_7		
A_1	0,855	0,770	0,661	0,476	0,872	0,638	0,929	0,324	0,818
A_2	0,841	0,731	0,711	0,436	0,894	0,704	0,929	0,311	0,818
A_3	0,872	0,800	0,720	0,424	0,901	0,720	0,944	0,430	0,863
A_4	0,979	0,701	0,764	0,393	0,907	0,768	0,940	0,338	0,888
A_5	0,986	0,627	0,743	0,373	0,910	0,795	0,928	0,326	0,859
A_6	0,818	0,680	0,851	0,405	0,908	0,747	0,928	0,498	0,855

	G_8			G_9			G_{10}		
A_1	0,388	0,929	0,862	0,947	0,476	0,661	0,343	0,929	0,770
A_2	0,388	0,929	0,871	0,960	0,436	0,661	0,343	0,929	0,830
A_3	0,325	0,943	0,798	0,977	0,424	0,777	0,273	0,944	0,814
A_4	0,216	0,970	0,858	0,977	0,393	0,869	0,255	0,940	0,855
A_5	0,285	0,957	0,849	0,983	0,373	0,821	0,309	0,928	0,840
A_6	0,360	0,933	0,718	0,973	0,405	0,718	0,313	0,928	0,861

Adım (5) İdeal çözümlerin ve yakınlık değerlerinin bulunması.

q-ROFPIS (A^*) ile q-ROFNIS (A^-) değerleri Çizelge 5.17'deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 5.17. q- ROFPIS (A^*) ve q- ROFNIS (A^-) ideal çözümleri

A^*			A^-		
0,371	0,912	0,627	0,098	0,992	0,792
0,522	0,818	0,627	0,116	0,986	0,680
0,529	0,927	0,484	0,246	0,944	0,867
0,397	0,894	0,777	0,148	0,976	0,812
0,536	0,814	0,661	0,359	0,896	0,851
0,476	0,872	0,638	0,373	0,910	0,795
0,343	0,929	0,818	0,255	0,940	0,888
0,498	0,825	0,718	0,311	0,913	0,871
0,388	0,929	0,661	0,216	0,970	0,869
0,320	0,947	0,770	0,161	0,983	0,840

Her alternatifin ideal çözümlerle arasındaki mesafeyi ifade eden S_i^* ve S_i^- ayrım ölçüleri Eş. 4.18 ve Eş. 4.19 ile bulunurken ayrım ölçülerinin ideal çözüme yakınlığı olarak ifade edilen C_i^* değeri de Eş. 4.21 ile hesaplanmıştır (Çizelge 5.18).

Çizelge 5.18. Yakınlık değerleri (C_i^*) ve alternatiflerin sıralanması (q=3)

Alternatif	S_i^*	S_i^-	C_i^*	Sıralama
A_1	0,0428	0,0950	0,6896	1
A_2	0,0500	0,0885	0,6391	2
A_3	0,0542	0,0798	0,5957	3
A_4	0,0629	0,0627	0,4992	5
A_5	0,0731	0,0534	0,4220	6
A_6	0,0600	0,0847	0,5855	4

5.1.4. q- ROF TOPSIS yönteminin parametre analizi

Bir önceki bölümde sayısal uygulaması yapılan q- ROF TOPSIS metoduna bu bölümde parametre analizi yapılarak q= (2-10) değerleri için sonuçlar yeniden hesaplanmıştır. Farklı q değerleri ile yapılan hesaplamanın sonuçları Çizelge 5.19'da yer almaktadır.

Çizelge 5.19. q- ROF TOPSIS metodunun parametre analizi

q		2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_i^* (Yakınlık Değeri)	A_1	0,751	0,729	0,764	0,767	0,467	0,497	0,524	0,506	0,500
	A_2	0,778	0,684	0,811	0,815	0,472	0,480	0,574	0,515	0,507
	A_3	0,668	0,612	0,711	0,719	0,409	0,448	0,574	0,476	0,466
	A_4	0,548	0,551	0,524	0,529	0,401	0,406	0,574	0,468	0,461
	A_5	0,463	0,484	0,504	0,511	0,413	0,419	0,559	0,441	0,442
	A_6	0,649	0,589	0,683	0,689	0,431	0,477	0,552	0,503	0,488

Çizelge 5.19'e bakıldığında q=2-5 arasında alternatiflerin q=6-10 aralığına göre yüksek değerler aldığı görülmektedir. Ayrıca q=2-5 aralığında alternatiflerin C_i^* yakınlık değerleri birbirlerinden uzak değerler alırken diğer aralıkta alternatiflerin C_i^* değerleri nispeten birbirine yakın çıkmıştır. Sonuç olarak q seviyesi düştükçe alternatiflerin yakınlık değerlerinin belli bir oranda farklılaştığı görülmekte olup bu da alternatifleri birbirinden ayırt etme ve sıralama açısından bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Düşük q değerinin avantajlı olduğu düşünüldüğünde TOPSIS metodunun sayısal uygulamasının yapıldığı bir önceki alt bölümde (Bölüm 5.1.3) q değerinin 3 kabul edilmesi de yerinde bir karar olmuştur.

6. BULGULAR

Uygun ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının seçimi, özellikle son yıllarda ekonomik büyümeyi ve çevrenin korunmasını etkileyen son derece önemli bir konudur. Araştırmacılar bu probleme çözüm bulabilmek adına temel ilkesi alternatifleri önceden belirlenen kriterlere göre sıralamak olan çok kriterli karar verme konusuna odaklanmıştır. Uygun enerji kaynakları tercih edilirken belirsizlik altında daha iyi sonuçlar veren bulanık küme yöntemlerine entegre çok kriterli karar verme yaklaşımları da tercih edilmektedir. Bu kapsamda tezde bulanık kümelere entegre çok kriterli karar verme problemlerinde enerji kaynaklarının sıralanması ve seçimi için MABAC ve TOPSIS yöntemlerine dayalı bir çalışma yapılmıştır.

Tez çalışmasında öncelikle çeşitli ÇKKV metotları incelenerek söz konusu metotların enerji planlamasında kullanımına yönelik literatür taraması yapılmıştır. Çalışmada klasik ÇKKV konusuna ek olarak bulanık kümeler teorisine değinilmiştir. Ayrıca Zadeh'in bulanık sayıları ile son yıllarda Yager tarafından önerilmiş olan q seviyeli bulanık sayılara da yer verilmiştir.

Yapılan literatür çalışmasında enerji planlaması alanında klasik ÇKKV yöntemleriyle yapılan çalışmaların çokluğu dikkat çekerken bulanık kümeler kapsamında özellikle q seviyeli bulanık sayılarla yapılan çalışmaların daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun q seviyeli bulanık sayıların ÇKKV problemlerine uygulanışının yeni olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Bu çalışma q-ROF MABAC ile q-ROF TOPSIS metotlarının karşılaştırmalı bir çalışması olup q seviyeli bulanık sayılar dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda özellikle güncel bir yöntem olan q-ROF MABAC ile bulanık kümelere entegre ÇKKV literatürüne katkı sağlanması amaçlanmıştır. MABAC metodu açısından literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğundan bu çalışmada önemli bir konu olan enerji planlamasının q-ROF MABAC metodu ile ele alınmasının gerekli olduğu değerlendirilmiştir.

Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar sayesinde literatürde çok sayıda ÇKKV metodu bulunmaktadır. Karar vericinin birden fazla seçenek arasından tercih yapması gerektiğinde daha geniş bir perspektifle seçim yapmasını sağlayan q seviyeli bulanık sayıların gelecek çalışmalarda diğer ÇKKV metotlarına da uygulanmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca sonuçların birden fazla yöntemle doğrulanması, entegre

ÇKKV yöntemlerinin kullanılması ve verilerdeki belirsizliklerin giderilmesinde bulanık yöntemlerin uygulanmasının tutarlı ve gerçekçi sonuçlar elde etme açısından faydalı olacağı gözlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasının amacı Türkiye için çeşitli enerji kaynaklarının uygunluk açısından sıralanması ve optimum enerji kaynağının seçilmesidir. Bu amaçla, belirli yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji alternatifleri q seviyeli bulanık sayılar temelli MABAC ve TOPSIS karar verme metotları ile ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

MABAC ve TOPSIS, çok kriterli karar verme teknikleri olup bu çalışmada bulanık kümeler yaklaşımı her iki tekniğe de entegre edilerek kullanılmıştır. Söz konusu iki yöntem de ideal çözüme olan uzaklığa dayalı yöntemler olup alternatifleri buna göre sıralarlar. Aynı zamanda iki yöntem de karar vericiye herhangi bir alternatifin tercih edilebileceği çözüm seti sunmaktadır. Sonuçlarının yorumsal açıdan aynı olmasının yanında iki yöntemin de uygulama aşamasında benzerlikler mevcuttur.

Çalışmanın sayısal uygulama kısmında karar vericilerden elde edilen gerçek veriler kullanılmıştır. ÇKKV probleminde Türkiye'deki mevcut ya da gelecekte kullanılması düşünülen enerji kaynakları ele alınmış ve enerji planlaması için alternatif olarak altı enerji kaynağı ile on kriter belirlenmiştir (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. Alternatif ve kriterler kümesi

Alternatifler	Kriterler kümesi
A_1 Güneş Enerjisi A_2 Rüzgâr Enerjisi A_3 HES A_4 Biyokütle A_5 Fosil Kaynaklar A_6 Nükleer Enerji	G_1 Alan ihtiyacı G_2 CO_2 yayılımı G_3 Atık bertaraf yönetimi G_4 Risk G_5 Uygulanabilirlik G_6 Güvenilirlik G_7 İstihdam G_8 Yatırım maliyeti G_9 Siyasi kabul G_{10} Sosyal kabul

Enerji alanında çalışan uzmanlar arasından seçilen üç karar vericiye alternatiflerin belirlenen kriterlere göre değerlendirilmesi amacıyla anket uygulanmıştır. Ayrıca karar vericilerin ağırlığı ile kriterlerin önemi de hesaplanmıştır (Çizelge 5.3).

Karar vericiler tarafından alternatiflerin değerlendirildiği anket aşamasında dilsel değişkenler kullanılmış ve elde edilen veriler bulanık değerlere dönüştürülerek bulanık

karar matrisi elde edilmiştir. Elde edilen bulanık karar matrisine yukarıda bahsi geçen iki metodun aşamaları adım adım uygulanmıştır. Sayısal uygulama sonucunda metotlar bazında alternatif sıralaması yapılmış ve en uygun alternatifler belirlenmeye çalışılmıştır.

Karar vericilerin alternatifleri değerlendirirken baz aldıkları kriterler literatür araştırmasında enerji planlaması alanında sıkça tercih edilen kriterler arasından seçilmiş kriterlerdir. Söz konusu kriterlere bakıldığında; yatırım maliyeti ile uygulanabilirlik kriterleri karar vericiler tarafından eşit derecede öneme sahip ve en önemli kriterler olarak belirlenmiştir. CO_2 yayılımının da karar vericiler için önemli olduğu görülmüştür. En az önem atfedilen kriterler ise sosyal kabul ile siyasi kabul kriterleri olmuştur. Genel olarak eşit öneme sahip kriterler söz konusu olduğu için enerji planlamasında tek bir kriter baz alınarak yapılan değerlendirmelerin çok güvenilir olmayacağı ve çok sayıda kriterin dikkate alındığı değerlendirmelerin daha sağlıklı olacağı değerlendirilmektedir.

Uygulamada kullanılan metotların sonuçlarına bakıldığında, iki metotta da sonuç kısmında alternatifler birbirinden farklı skorlar aldığından sıralama yapılırken zorluk yaşanmamıştır. Sayısal uygulamada kullanılan metotlarda q parametresi yer aldığından sonuçlara ayrıca parametre analizi yapılmıştır. Parametre analizinde q değeri 2 ila 10 arasında değiştirilerek alternatifler yeniden değerlendirilmiştir. q değeri değiştirilerek yapılan parametre analizinde TOPSIS metodunun parametre değişikliğinde nispeten istikrarlı sonuçlar elde edilirken skorların birbirine paralel artıp azaldığı görülmüştür. Alternatiflerin sıralandığı Çizelge 7.2'ye bakıldığında sadece iki q değerinde Alternatif 1'in (güneş enerjisi) birinci sırada yer aldığı ve diğer q değerlerinde Alternatif 2'nin (rüzgâr enerjisi) birinci olduğu görülmektedir. Genel olarak bütün q değerlerinde ilk iki sırayı değişen sırada Alternatif 1 ve 2 almıştır. Diğer dört alternatif q=2-5 aralığında kendi aralarında benzer sıralamalar oluştururken q=6-10 aralığında da başka bir benzer sıralama oluşturmuştur.

Çizelge 7.2. TOPSIS metodunun parametre analizi

q	Sıralama
2	$A_2 > A_1 > A_3 > A_6 > A_4 > A_5$
3	$A_1 > A_2 > A_3 > A_6 > A_4 > A_5$
4	$A_2 > A_1 > A_3 > A_6 > A_5 > A_4$
5	$A_2 > A_1 > A_3 > A_6 > A_4 > A_5$
6	$A_2 > A_1 > A_6 > A_5 > A_3 > A_4$
7	$A_1 > A_2 > A_6 > A_3 > A_5 > A_4$
8	$A_2 > A_3 > A_4 > A_5 > A_6 > A_1$
9	$A_2 > A_1 > A_6 > A_3 > A_4 > A_5$
10	$A_2 > A_1 > A_6 > A_3 > A_4 > A_5$

MABAC yönteminde ise farklı parametreler (q=2-10) ile yapılan uygulamanın sonuçları dikkate alındığında; güneş ile rüzgâr enerjileri (Alternatif 1 ve 2), çoğunlukla enerji planlamasında tercih edilen birincil kaynaklardır; hidroelektrik santrallerden (Alternatif 3) elde edilen enerji çoğunlukla son tercih olmuştur. Q değerinin değiştirilmesi sonuçlarda major değişikliklere neden olmamıştır ve çoğunlukla benzer sıralamalar elde edilmiştir.

Çizelge 7.3. MABAC metodunun parametre analizi

q	Sıralama
2	$A_2 > A_1 > A_6 > A_3 > A_4 > A_5$
3	$A_1 > A_2 > A_6 > A_4 > A_3 > A_5$
4	$A_2 > A_1 > A_6 > A_4 > A_5 > A_3$
5	$A_2 > A_1 > A_6 > A_4 > A_5 > A_3$
6	$A_2 > A_1 > A_6 > A_4 > A_5 > A_3$
7	$A_2 > A_1 > A_4 > A_6 > A_5 > A_3$
8	$A_2 > A_1 > A_4 > A_6 > A_5 > A_3$
9	$A_2 > A_1 > A_4 > A_6 > A_5 > A_3$
10	$A_2 > A_1 > A_4 > A_6 > A_5 > A_3$

MABAC metodunda yapılan parametre değişikliğinde TOPSIS metoduna göre sonuçların daha farklı seyrettiği görülmüştür. Genel olarak parametre analizinde q seviyesi q=2'den 10'a doğru arttıkça alternatiflerin sırasının değiştiği görülmektedir. Şekle bakıldığında TOPSIS'te olduğu gibi iki alternatifin ayrı, diğer dört alternatifin de ayrı ayrı birbirine yakın kümelendiği görülmektedir.

Her iki yöntemde de q parametresi 3 kabul edilerek yapılan hesaplamalarda kaynaklar açısından benzer bir sıralama elde edilmiş olup sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu değerlendirilmiştir (Çizelge 7.4).

Çizelge 7.4. Alternatiflerin metotlar bazında sıralanması

Sıralama	Metotlar	
	q-ROF MABAC (q=3)	q-ROF TOPSIS (q=3)
1	A_1	A_1
2	A_2	A_2
3	A_6	A_3
4	A_4	A_6
5	A_3	A_4
6	A_5	A_5

Çizelge 7.4'e göre çalışmada uygulanan yöntemlerin birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. İki yöntemde de güneş ve rüzgâr enerjileri (Alternatif 1) ve (Alternatif 2) ilk tercihler olurken fosil kaynaklar (Alternatif 5) son tercih olmuştur. Biokütle, hidroelektrik ve nükleer enerji alternatifleri ise iki yöntem içinde farklı dağılımlar göstermektedir. Sonuçların benzer çıkmasının nedeni, bu iki yöntemin de ideale yakınlığı ölçmeye çalışan yöntemler olması olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar daha önce konu bazında yapılmış çalışmaların sonuçlarıyla da uyumludur. Literatüre bakıldığında; Kaya ve Kahraman [87] tarafından yapılan enerji kaynaklarının sıralanmasına yönelik çalışmada rüzgâr enerjisi ilk sırada yer almaktadır. Turgut'un "Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Bulanık VIKOR ve Bulanık TODIM Teknikleriyle Değerlendirilmesi" konulu yüksek lisans tezinde; duyarlılık analizinde güneş enerjisi çoğunlukla ilk tercih olmuştur [88]. Tayşı'nın yakıt türlerinin değerlendirilmesine yönelik yürüttüğü yüksek lisans tez çalışmasında, Türkiye"nin elektrik üretim ihtiyacına çözüm niteliğinde biyokütle enerji kaynağı ilk tercih olarak belirlenirken ikinci sırada yer alan Hidroelektrik enerji onu takip etmektedir [89]. Tayşı'nın çalışmasında da yine yenilenebilir kaynaklar ilk sıralarda yer aldığı görülmektedir. Ervural'ın çok amaçlı karar verme yaklaşımlarını kullanarak yaptığı yenilenebilir enerji yatırım planlama modeline yönelik çalışmasında; 2050 yılında elektrik tüketiminin %70'inin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması önerilmiştir [90]. Örnek verilen çalışmaların sonuçları baz alındığında yenilenebilir enerjinin daha sürdürülebilir bir yaklaşım olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca rüzgar ve güneş enerji alternatiflerinin çoğunlukla bu tez çalışmasında elde sonuçlarla benzer şekilde sıralamada ilk tercihlerde yer aldığı görülmektedir. Yenilenebilir enerjinin bazı türleri iklim şartlarından etkilense de Türkiye genel olarak elverişli iklim koşullarına sahip bir ülkedir.

Sonuç olarak karar vericilerin planlama yaparken birincil enerji kaynağı olarak güneş veya rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını tercih ederek fosil kaynak kullanımını azaltmalarının sürdürülebilir bir yaklaşım olacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca sıralama sonuçları dikkate alınarak çeşitli kaynaklardan oluşan hibrit bir enerji planlaması da yapılabilir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar baz alındığında, hibrit planlama stratejisinde yenilenebilir kaynaklara ağırlık verilmesi uygun bir yaklaşım olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Pınar, A. (2020). *Q Seviyeli Bulanık Küme Temelli Tedarikçi Performans Değerlendirmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 29-36.

2. Gök Kısa A., Perçin S. (2017). Bütünleşik bulanık dematel-bulanık Vıkor yaklaşımının makine seçimi problemine uygulanması. *Journal of Yasar University*, 12/48, 249-256.

3. Krishankumar R., Rani P., Ali J., Mishra A. R., Cavallaro F., Ravichandran K.S. (2021). An ıntegrated single-valued neutrosophic combined compromise solution methodology for renewable energy resource selection problem. *Energies*, 14, 45-94.

4. İnternet: Yenilenebilir Enerji-Kaynaklar-Güneş, Web: https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes. Son Erişim Tarihi: 10.04.2023.

5. İnternet: Yenilenebilir Enerji-Kaynaklar-Rüzgâr, Web: https://enerji.gov.tr/eigm-6. Son Erişim Tarihi: 10.04.2023.

6. Emin M., Kapluhan E. (2021), Türkiye hidroelektrik enerjinin gelişimi ve mevcut durumu. *Yeni Türkiye*, 118, 91-107.

7. İnternet: Biyokütle Enerjisi, Web: http://ekb.gov.tr/Icerik-218-BiyokutleEnerjisi. Son Erişim Tarihi: 10.04.2023.

8. İnternet: Yenilenebilir Enerji-Kaynaklar-Biyokütle, Web: https://enerji.gov.tr/eigm-9. Yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokütle. Son Erişim Tarihi: 10.04.2023.

9. İnternet: 2021'de Türkiye'nin Elektrik Üretiminde Fosil Yakıtların Payı Arttı, Web: https://www.iklimhaber.org/2021de-turkiyenin-elektrik-uretiminde-fosil-yakitlarin-payi-artti/#:~:text=T%C3%BCrkiye'nin%20br%C3%BCt%20elektrik%20%C3%BCretimi,ise%20k%C3%B6m%C3%BCrl%C3%BC%20termik%20santrallardan%20sa%C4%9Fland%C4%B1. Son Erişim Tarihi: 10.04.2023.

10. İnternet: Nükleer Enerjisi, Web: https://enerji.gov.tr/nukleer-enerji-ve-uluslararasi-projeler-genel-mudurlugu-nukleer-enerji. Son Erişim Tarihi: 26.05.2022.

11. İnternet: Nükleer Enerji Santralleri, Akkuyu Nükleer Santrali, Web: https://www.enerjiatlasi.com/nukleer/akkuyu-nukleer-santrali.html. Son Erişim Tarihi: 26.05.2022.

12. Aksoy A., (2019). Integrated model for renewable energy planning in Turkey. *International Journal Green Energy*, 16, 34-48.

13. Erdin C., Ozkaya G. (2019). Turkey's 2023 energy strategies and investment opportunities for renewable energy sources: site selection based on ELECTRE. *Sustainability*, 11, 21-36.

14. Topcu I., Ülengin F., Kabak O., Isik M., Unver B., Onsel Ekici S. (2019). The evaluation of electricity generation resources: the case of Turkey. *Energy*, 167, 417-427.

15. Al Garni H., Kassem A., Awasthi A., Komljenovic D. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137-150.

16. Haddad B., Liazid A., Ferreira P. (2017). A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system. *Renewable Energy*, 107, 462-472.

17. San Cristobal J.R. (2011). A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy. *Technologies*, 36, 2742-274.

18. Atmaca E., Basar H.B. (2012). Evaluation of power plants in Turkey using analytic network process (ANP). *Energy*, 44, 555-563.

19. Büyükozkan G., Güleryüz S. (2016) An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448.

20. Büyükozcan E.C., Ünlüsoy S., Tamer E. (2017). ANP ve TOPSIS yöntemleriyle Türkiye'de yenilenebilir enerji yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi. *SUJEST*, 5, 204-219.

21. Damgaci E., Boran K., Boran F.E. (2017). Sezgisel Bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20, 629-637.

22. Daniel J., Vishal N.V.R., Albert B., Selvarsan I. (2008). *Evaluation of the significant renewable energy resources in India using analytical hierarchy process*. 19th Internatıonal Conference on Multiple Criteria Decision, New Zealand,13-26.

23. Krishankumar R., Supraja Nimmagaddaa S., Rani P., Mishra A.R., Ravichandrana K.S., Gandomi A.H. (2021) Solving renewable energy source selection problems using a q-rung orthopair fuzzy-based integrated decision-making approach. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123-329.

24. Albahri A.S., Albahri O.S., Zaidan A.A., Alnoor A., Alsattar H.A. (2022). Integration of fuzzy-weighted zero-inconsistency and fuzzy decision by opinion score methods under a q-rung orthopair environment: A distribution case study of COVID-19 vaccine doses. *Computer Standards & Interfaces*, 80, 103-572.

25. Dewalkar S. V., Shastri S. S. (2022). Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Assessment based fuzzy multi-criteria decision-making approach for selection of appropriate wastewater treatment system. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102-476.

26. Saraswat S.K., Digalwar A. K. (2021). Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multi-criteria decision approach. *Renewable Energy*, 171, 58-74.

27. Ali T., Aghaloo K., Chiu Y., Ahmad M. (2022). Lessons learned from the COVID-19 pandemic in planning the future energy systems of developing countries using an integrated MCDM approach in the off-grid areas of Bangladesh. *Renewable Energy*, 189, 25-38.

28. Goswami S.S., Mohanty S. K., Behera D. K. (2022). Selection of a green renewable energy source in India with the help of MEREC integrated PIV MCDM tool. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1153-1160.

29. Li T., Li A., Guo X. (2020). The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry:A comprehensive analysis of MCDM methods. *Energy*, 212 (17), 118-694.

30. Kaya T., Kahraman C., (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35, 2517-2527.

31. Abdul D., Wenqi J., Tanveer A. (2022). Prioritization of renewable energy source for electricity generation through AHP-VIKOR integrated methodology. *Renewable Energy* 184, 1018-1032.

32. Zheng G., Wang X. (2020). The comprehensive evaluation of renewable energy system schemes in tourist resorts based on VIKOR method. *Energy*, 193,116-676.

33. Song J.,Wang B., Renc J., Li K., Duan H., Wang X. (2019). Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP-VIKOR based prioritization from life cycle perspective. *Resources, Conservation & Recycling*, 142,78–87.

34. Pamučar D., Ćirović G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centres using Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 42, 3016–3028.

35. Jia F., Liua Y., Wang W. (2019). An extended MABAC method for multi-criteria group decision making based on intuitionistic fuzzy rough numbers. *Expert Systems with Applications*, 127, 241–255.

36. Liang W., Zhao W., Wu H., Dai B. (2019). Risk assessment of rockburst via an extended MABAC method under fuzzy environment. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 533–544.

37. Sonar H.C., Kulkarni S.D. (2021). An Integrated AHP-MABAC Approach for Electric Vehicle Selection. *Research in Transportation Business & Management*, 41,100-665.

38. Xue Y., You J. (2016). An interval-valued intuitionistic fuzzy MABAC approach for material selection with incomplete weight information. *Applied Soft Computing*, 38, 703-713.

39. Luo S., Liang W. (2019). Optimization of roadway support schemes with likelihood-based MABAC method, *Applied Soft Computing Journal*, 80, 80–92.

40. Hashemizadeh A., Ju Y. (2021). Optimizing renewable energy portfolios with a human development approach by fuzzy interval goal programming, *Sustainable Cities and Society*. 75, 103-396.

41. Solangi Y.A., Tan Q., Mirjat N., Ali S. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. *Journal of Cleaner Production*, 236 (1), 117-655.

42. Bilgili F., Zarali F., Ilgün M. F. (2022). The evaluation of renewable energy alternatives for sustainable development in Turkey using intuitionistic fuzzy-TOPSIS method. *Renewable Energy*, 189, 1443-1458.

43. Alao M.A., Ayodele T.R., Popoola O.M. (2020). Multi-criteria decision-based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos Nigeria. *Energy*, 201, 117-675.

44. Afrane S., Ampah J., Jin C. (2021). Techno-economic feasibility of waste-to-energy technologies for investment in Ghana: A multicriteria assessment based on fuzzy TOPSIS approach. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128515.

45. Rani P., Mishra A., Mardani A. (2020). A novel approach to extended fuzzy TOPSIS based on new divergence measures for renewable energy sources selection. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120352.

46. Altintas E., Utlu Z. (2022). Planning energy usage in electricity production sector considering environmental impacts with fuzzy TOPSIS method & game theory. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100-283.

47. Ligus M., Peternek P. (2018). Determination of most suitable low-emission energy technologies development in Poland using integrated fuzzy AHP-TOPSIS method. *Energy Procedia*, 153, 101-106.

48. Sun F., Yu J. (2021). Improved energy performance evaluating and ranking approach for office buildings using Simple-normalization. Entropy-based TOPSIS and K-means method, *Energy Reports*, 7, 1560–1570.

49. Alghassab M. (2022). Quantitative assessment of sustainable renewable energy through soft computing: Fuzzy AHP-TOPSIS method. *Energy Reports*, 8, 12139–12152.

50. Ma W., Du Y., Liu X., Shen Y. (2022). Literature review: multi-criteria decision-making method application for sustainable deep-sea mining transport plans, *Ecological Indicators*. 140, 109049.

51. Şahin R., Altun F. (2020). Decision making with MABAC method under probabilistic single-valued neutrosophic hesitant fuzzy environment. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11 (5).

52. Wei G., He Y., Lei F., Wu J., Wei C. (2020). MABAC method for multiple attribute group decision making with probabilistic uncertain linguistic information. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39 (3), 3315–3327.

53. Wei G. W., He Y., Lei F., Wu J., Wei C., Guo Y. F. (2020). Green supplier selection in steel industry with intuitionistic fuzzy Taxonomy method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39 (5), 7247–7258.

54. Xu X. G., Shi H., Zhang L. J., Liu H. C. (2019). Green supplier evaluation and selection with an extended MABAC method under the heterogeneous information environment. *Sustainability*, 11, p. 16.

55. Liang R. X., He S. S., Wang J. Q., Chen K., Li L. (2019). An extended MABAC method for multi-criteria group decision making problems based on correlative inputs of intuitionistic fuzzy information, *Computational & Applied Mathematics*. 38, 28.

56. Jia F., Liu Y., Wang X. (2019). An extended MABAC method for multi-criteria group decision making based on intuitionistic fuzzy rough numbers. *Expert Systems with Applications*, 127, 241–255.

57. Liang W., Zhao G., Wu H., Dai B. (2019). Risk assessment of rockburst via an extended MABAC method under fuzzy environment. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 533–544.

58. Ayçin E., Çakin E. (2019). Ülkelerin İnovasyon Performanslarının Ölçümünde Entropi ve MABAC Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Bütünleşik Olarak Kullanılması. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 19(2), 326-351.

59. Ömürbek N., Demirci N. (2013). Analitik ağ süreci ve TOPSIS yöntemleri ile bilim dalı seçimi. *Journal of Academic Researches and Studies*, 5(9).

60. Demireli E. (2010). TOPSIS çok kriterli karar verme sistemi: Türkiye'deki kamu bankaları üzerine bir uygulama. *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, 5(1).

61. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.

62. Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20 (1), 87-96.

63. Wang J., Wei G., Wei C, Wei Y. (2020). MABAC method for multiple attribute group decision making under qrung orthopair fuzzy environment. *Defence Technology*, 16, 208-216.

64. Pınar A. (2021). Üçüncü parti lojistik firma seçiminde q seviyeli bulanık TOPSIS uygulaması. *Journal of Turkish Operations Management*, (5)1, 588-597.

65. Amer M., Daim T. (2011). Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy for Sustainable Development*, 15, 420–435.

66. Balin A., Baraçli H. (2017). A fuzzy multi-criteria decision-making methodology based upon the interval type-2 fuzzy sets for evaluating renewable energy alternatives in Turkiye. *Technological and Economic Development of Economy*, 23, 742–763.

67. Kahraman C., Cebi S., Kaya I. (2010). Selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design: The case of Türkiye. *Journal of Universal Computer Science*, 16, 82–102.

68. Kahraman C., Kaya I. (2010). A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*, 37, 6270–6281.

69. Kahraman C., Kaya I., Cebi S. (2009). A comparatve analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic desgn and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34, 1603–1616.

70. Ribeiro F., Ferreira P., Araújo M. (2013). Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case. *Energy*, 52, 126–136.

71. Adhikary P., Roy P.K., Mazumdar A. (2014). Multidimensional feasibility analysis of small hydropower project in India: a case study. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 80–84.

72. Abu-Taha, R. (2011). *Multi-criteria applications in renewable energy analysis: A literature review*, In Proceedings of the 2011 Proceedings of PICMET'11: Technology. Management in the Energy Smart World (PICMET), 1-8.

73. Mousavi M., Gitinavard H., Mousavi S. (2017). A soft computing based-modified ELECTRE model for renewable energy policy selection with unknown information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 774–787.

74. Schröder T., Lauven L.P., Beyer B., Lerche N., Geldermann J. (2019). Using PROMETHEE to assess bioenergy pathways. *Central European Journal of Operations Research*, 27, 287–309.

75. Hatefi S., Torabi S. (2018). A slack analysis framework for improving composite indicators with applications to human development and sustainable energy indices. *Econometric Reviews*, 37, 247–259.

76. Solangi Y.A., Tan Q., Mirjat N.H., Ali S. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117-655.

77. Fleten S.E., Maribu K.M. (2007). Wangensteen I., Optimal investment strategies in decentralized renewable power generation under uncertainty. *Energy*, 32, 803–815.

78. Kaya İ., Çolak M., Terzi F. (2019). A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making. *Energy Strategy Reviews*, 24, 207–228.

79. Çolak M., Kaya İ. (2017). Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 840–853.

80. R. Vavrek, J. Chovancová (2019). Assessment of economic and environmental energy performance of EU countries using CV-TOPSIS technique. *Ecological Indicators*, 106, 105-519.

81. Sharma D., Pandey A., Kumar C., Ranjan R. (2019). Assessment & anthology of sustainable sources of energy using an approach of PROMETHEE. *Materials Science and Engineering*, 691, 12-40.

82. Løken E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 11, 1584–1595.

83. Ilbahar E., Çebi S., Kahraman C. (2019). A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Reviews*, 25, 18–33.

84. Sala S., Ciuffo B., Nijkamp P. (2015). A systemic framework for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 119, 314–325.

85. Boggia A., Cortina C. (2010). Measuring sustainable development using a multi-criteria model: A case study. *Journal of Environmental Management*, 91, 2301–2306.

86. Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., Kumar P. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609.

87. Kaya T., Kahraman, C. (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: the case of Istanbul. *Energy*, 35 (6), 2517-2527.

88. Turgut K. Z. (2017). *Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Bulanık VIKOR ve Bulanık TODIM Teknikleriyle Değerlendirilmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Galatasaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 35-58.

89. Tayşı Ş. (2012). *Türkiye'de Elektrik Üretiminde Kullanılacak Yakıt Türlerinin Değerlendirilmesine Yönelik Bir Karar Modeli,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 53-69.

90. Ervural Ç. B. (2018). *Yenilenebilir Enerji Planlaması İçin Bütünleşik Çok Amaçlı Bir Karar Modeli Önerisi,* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65-123.



Gazili olmak ayrıcalıktır