

**TÜRKİYE İÇİN EN UYGUN YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAĞININ ÇOK
KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ İLE BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Betül ULUTAŞ HASIRCIOĞLU

Eskişehir 2021

**TÜRKİYE İÇİN EN UYGUN YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAĞININ ÇOK
KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ İLE BELİRLENMESİ**

Betül ULUTAŞ HASIRCIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sayısal Yöntemler

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şenay LEZKİ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Sosyal Bilimler Enstitüsü

Haziran 2021

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Betül Ulutaş Hasırcıoğlu'nun "Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının çok kriterli karar verme teknikleri ile belirlenmesi" başlıklı tezi 09/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İşletme Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı Adı Soyadı

Üye (Tez Danışmanı)	: Dr. Öğr. Üyesi Şenay LEZKİ
Üye	: Prof. Dr. Fikret ER
Üye	: Dr.Öğr.Üy. Alper BEKKİ

Prof.Dr. Saime ÖNCE
Enstitü Müdürü

ÖZET

Türkiye İçin En Uygun Yenilenebilir Enerji Kaynağının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Belirlenmesi

Betül ULUTAŞ HASIRCIOĞLU

İşletme Anabilim Dalı

Sayısal Yöntemler Programı

Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Haziran 2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şenay LEZKİ

Her geçen gün artan enerji ihtiyacı ve geleneksel enerji kaynaklarının uzun vadede tükenecek olması sorunu, kullanılabilir yeni enerji kaynakları arayışını doğurmuştur. Gelişen teknolojinin de etkisiyle yenilenebilir enerji kaynakları, geleceğin enerji kaynakları olarak görülmeye başlanmıştır. Devletler de fosil yakıtlara bağlı halihazırdaki kurulu enerji güçlerini, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına devretmekte ve buna göre yeni enerji politikaları belirlemektedirler. Bu çalışmada çok kriterli karar verme tekniklerinden olan PROMETHEE, Multi-MOORA ve Tercih İndeksi (PSI) teknikleri kullanılarak, Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı tespit edilmeye çalışılmıştır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrolik ve jeotermal enerji alternatifleri; teknik, ekonomik, çevre, sosyal-politik, potansiyel ile üretim ve katkı ana kriterleri altında toplamda yirmi dört alt kriter ile değerlendirilmiştir. Her bir alternatif/kriter ikilisine ait değerlerin sözel olarak ifade edildiği durumlarda sözel ifadelerin sayısallaştırılması için bulanık küme teorisinden yararlanılmıştır. Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı seçimi problemi yukarıda sıralanan farklı tekniklerle çözülmüş ve her bir tekniğe göre elde edilen farklı sıralamalar Borda Sayım yöntemi ile birleştirilerek tek bir sıralama elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı hidrolik enerji olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla biyokütle enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji ve rüzgâr enerjisi izlemektedir.

Anahtar Sözcükler: Yenilenebilir enerji, Çok kriterli karar verme teknikleri, Borda sayım

ABSTRACT

Determination Of The Most Suitable Renewable Energy Source For Turkey Using
Multi-Criteria Decision-Making Techniques

Betül ULUTAŞ HASIRCIOĞLU

Department of Business Administration
Programme in Quantitative Methods

Anadolu University, Graduate School of Social Sciences, June 2021

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şenay LEZKİ

Increasing demand for energy in the recent decades and the fact that the traditional energy sources have been running out in the long term have led to a search for new energy sources. With the advancements in technology making them more usable than ever before, renewable energy sources have been started to be seen as the energy sources of the future. Governments transfer their existing installed energy power, which is dependent on fossil fuels, to renewable energy sources and make new energy policies accordingly. In this work, using PROMETHEE, Multi-MOORA, and Preference Selection Index (PSI) techniques, which are all multi-criteria decision-making techniques, the most suitable renewable energy source for Turkey is determined. Solar energy, wind energy, biomass energy, hydraulic and geothermal energy alternatives are evaluated by a total of twenty-four sub-criteria under the main criteria of technical, economic, environmental, social-political, potential, and production-contribution.. For the cases in which the values for each alternative/criterion pair are expressed verbally, the fuzzy set theory is used to make verbal expressions quantitative. The problem of choosing the most suitable renewable energy source for Turkey is solved by using the techniques listed above, separately. Then, the rankings obtained by these techniques are combined to determine the final ranking by using Borda count method. According to the results obtained, hydraulic energy is found to be the most suitable renewable energy source for Turkey. Hydraulic energy is followed by biomass energy, solar energy, geothermal energy, and wind energy, respectively.

Keywords: Renewable energy, Multi-criteria decision-making techniques, Borda count

Tarih: 17.05.2021

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Betül Ulutaş Hasırcıoğlu

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluşumundan tamamlanmasına kadar geçen sürede göstermiş olduğu desteği, verdiği zamanı, katkıları ve kıymetli fikirleri için değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şenay Lezki'ye,

Hayatımın her alanında beni daima destekleyen, bana güvenen ve hep arkamda olduklarını bildiğim annem Şükriye Ulutaş, babam Ömer Ulutaş ve canım kardeşim Beyza Ulutaş'a,

Bana daima ümit ve çalışma azmi veren, yoğun çalışma dönemlerimde beni destekleyen, kıymetli fikirleriyle çalışmanın tamamlanmasında yardımcı olan sevgili eşim Burak Hasırcıoğlu'na,

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden değerli fikirlerini ve desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ayşe Başaran Yıldız'a ve bu çalışmaya küçük büyük katkı sağlayan herkese,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

1. ENERJİ VE ENERJİ KAYNAKLARI.....	4
1.1. Fosil Kökenli Enerji Kaynakları	5
1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	5
1.2.1. Güneş enerjisi.....	6
1.2.2. Rüzgâr enerjisi	7
1.2.3. Biyokütle enerjisi	10
1.2.4. Hidrolik enerji.....	11
1.2.5. Jeotermal enerji	12
1.3. Enerji Kaynaklarının Kullanımı	13

İKİNCİ BÖLÜM

2. KARAR VE KARAR VERME İLE İLGİLİ KAVRAMSAL ÇERÇEVE.....	18
2.1. Karar Verme Kavramı ve Karar Süreci.....	18
2.2. Karar Problemlerinin Sınıflandırılması	19

2.2.1. Çevresel faktörlere ilişkin bilgi düzeyi açısından karar türleri	20
2.2.1.1. <i>Belirlilik ortamında karar</i>	21
2.2.1.2. <i>Belirsizlik ortamında karar</i>	21
2.2.1.3. <i>Risk ortamında karar</i>	25
2.2.2. Yönetim düzeyi açısından karar türleri.....	26
2.2.3. Yapıları açısından karar türleri	26
2.2.4. Bağlantılı olma durumu açısından karar türleri	27
2.2.5. Göz önünde bulundurulacak kriter açısından karar türleri	27
2.3. Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri	28
2.3.1. PROMETHEE tekniği.....	30
2.3.2. MOORA tekniği.....	35
2.3.3. Tercih indeksi tekniği (PSI)	40
2.4. Borda sayım tekniği	41
2.5. Bulanık Küme Teorisi	42
2.5.1. Üçgen bulanık sayılar	44
2.5.2. Sözel verilerin sayısallaştırılması	44
2.5.3. Bulanık sayıların durulaştırılması	45
2.6. ÇKKV Problemlerinde Kriter Ağırlıklandırma Teknikleri.....	46
2.6.1. Eşit ağırlıklandırma tekniği.....	46
2.6.2. Derece-Sıralama (Rank-Order) ağırlıklandırma teknikleri	46
2.6.2.1. <i>Entropi tekniği</i>	48

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. UYGULAMA: TÜRKİYE İÇİN EN UYGUN YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAĞININ BELİRLENMESİ.....	50
3.1. Amaç ve Kapsam	50
3.1.1. Teknik ana kriteri.....	52
3.1.2. Ekonomik ana kriteri	52
3.1.3. Çevre ana kriteri.....	53
3.1.4. Sosyal-politik ana kriteri.....	54
3.1.5. Potansiyel ana kriteri.....	55
3.1.6. Üretim ve katkı ana kriteri	56

3.2. Sözel Kriter Değerlerinin Sayısallaştırılması	57
3.3. Kriterlere Önem Derecesi Atanması.....	60
3.4. PROMETHEE Tekniği ile Problemin Çözümü	62
3.5. Multi-MOORA Tekniği ile Problemin Çözümü	68
3.6. Tercih İndeksi Tekniği (PSI) ile Çözüm	73
3.7. Borda Sayım Tekniği ile Sonuçların Sıralanması.....	74
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	77
KAYNAKÇA.....	79
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Ödemeler matrisi.....	20
Tablo 2.2. Fayda yönlü problemler için pişmanlık matrisi	24
Tablo 2.3. Maliyet yönlü problemler için pişmanlık matrisi	24
Tablo 2.4. PROMETHEE tekniği karar matrisi	34
Tablo 2.5. Üçgen bulanık sayı değerleri ve dilsel karşılıkları.....	45
Tablo 2.6. Ağırlıklandırma tekniklerinin sınıflandırılması	47
Tablo 3.1. Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı seçim modeli.....	51
Tablo 3.2. Teknik ana kriteri tablosu	52
Tablo 3.3. Ekonomik ana kriteri tablosu	53
Tablo 3.4. Çevre ana kriteri tablosu	54
Tablo 3.5. Sosyal-politik ana kriteri tablosu	55
Tablo 3.6. Potansiyel ana kriteri tablosu	56
Tablo 3.7. Üretim ve katkı ana kriteri tablosu	56
Tablo 3.8. Çevre ana kriterine ait sözel verilerinin ÜBS ile gösterimi	57
Tablo 3.9. Sosyal-politik ana kriterine ait sözel verilerinin ÜBS ile gösterimi	58
Tablo 3.10. Çevre ana kriterleri ÜBS değerlerinin durulaştırılmış gösterimi.....	59
Tablo 3.11. Sosyal-politik ana kriterleri ÜBS değerlerinin durulaştırılmış gösterimi ...	59
Tablo 3.12. Karar matrisi	60
Tablo 3.13. Standardize matris.....	61
Tablo 3.14. Entropi değerleri	61
Tablo 3.15. Farklılık derecesi değerleri	62
Tablo 3.16. Kriterlerin önem dereceleri.....	62
Tablo 3.18. Tercih fonksiyonları ve parametreler.....	64
Tablo 3.19. PROMETHEE tekniği C11 alt kriteri karşılaştırma tablosu.....	64
Tablo 3.20. PROMETHEE tekniği C11 alt kriteri ortak tercih fonksiyonları	65
Tablo 3.21. PROMETHEE tekniği C13 alt kriteri ortak tercih fonksiyonları	65
Tablo 3.22. PROMETHEE tekniği tercih indeksleri	66
Tablo 3.23. PROMETHEE tekniği pozitif ve negatif üstünlükler	66
Tablo 3.24. PROMETHEE tekniği net üstünlükler ve sıralamalar	67
Tablo 3.25. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi	69
Tablo 3.26. MOORA-Oran yaklaşımı performans skorları ve sıralamalar.....	70

Tablo 3.27. MOORA-Referans Noktası yaklaşımı sapma değerleri ve sıralamalar	71
Tablo 3.28. MOORA-Tam Çarpım yaklaşımı skor değerleri ve sıralamalar.....	71
Tablo 3.29. MOORA yaklaşımları ile elde edilen sıralamalar.....	72
Tablo 3.30. Multi-MOORA tekniği nihai sıralamalar	72
Tablo 3.31. PSI tekniği tercih indeks değerleri ve sıralamalar	74
Tablo 3.32. ÇKKV teknikleri ile elde edilen sıralamalar.....	75
Tablo 3.33. Borda Sayım tekniği puan tablosu	75
Tablo 3.34. Borda Sayım tekniği skorları ve nihai sıralamalar.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Türkiye güneş potansiyeli atlası	7
Şekil 1.2. Türkiye rüzgâr güç yoğunluğu haritası	9
Şekil 1.3. Türkiye rüzgâr hızı haritası	9
Şekil 1.4. Türkiye jeotermal kaynak ve uygulama haritası	13
Şekil 1.5. 2019 yılı enerji arzının kaynaklara göre dağılımı grafiği.....	15
Şekil 1.6. 2009-2019 yılları arası enerji arzının kaynaklara göre değişim grafiği	15
Şekil 1.7. 2009-2019 yılları yenilenebilir enerji arzının kaynaklara göre değişimi	16
Şekil 2.1. Çok kriterli karar verme tekniklerinin sınıflandırılması.....	29

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi
BD	: Beklenen Değer
BFKD	: Beklenen Fırsat Kaybı Değeri
Covid-19	: Korona Virüs Hastalığı, 2019
Çin	: Çin Halk Cumhuriyeti
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
g	: Gram
GAIA	: Geometrical Analysis for Interactive Aid
GD	: Geçerlilik Değeri
GSYİH	: Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
GW	: Ciga watt
GWh	: Ciga watt saat
KW	: Kilo watt
KWh	: Kilo watt saat
m ²	: Metre kare
Max	: Maksimum
Min	: Minimum
MOORA	: Multi-objective Optimization By Ratio Analysis
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü
Mtoe	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
MW	: Mega Watt

PROMETHEE: Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations

PSI : Preference Selection Index

TBBD : Tam Bilginin Beklenen Değeri

TBBK : Tam Bilgide Beklenen Kazanç

TDK : Türk Dil Kurumu

TEP : Ton Eşdeğeri Petrol

TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

ÜBS : Üçgen Bulanık Sayılar

vb. : Ve benzeri

YEGM : Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

GİRİŞ

Enerji insan yaşamında vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Bu nedenle insanoğlu doğada var olan enerjiyi her daim kendi çıkarlarına uygun olarak kullanma çabası içerisinde olmuştur. Bu anlamda önceleri yalnızca ısınmak, vahşi hayvanlardan korunmak ve yiyeceklerini pişirmek için ateşi kullanmıştır. Sanayi devrimiyle birlikte buharlı makineleri çalıştırabilmek amacıyla kömürden faydalanmıştır. Geçmişten günümüze dek teknolojik gelişme amacıyla atılan her bir adım enerjiye olan ihtiyacı perçinlemiş ve kullanılan enerji de teknolojiyi bir adım öteye taşımıştır. Özellikle 1973 yılında gerçekleşen birinci petrol krizinden sonra başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere tüm büyük devletler, enerji ihtiyaçlarını farklı kaynaklardan karşılamak için ciddi çalışmalar başlatmışlardır. 2000’li yılların başında teknolojinin artan bir hızla gelişmesi teknoloji kullanımını lüks olmaktan çıkartıp ihtiyaç haline getirmiştir. Enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtların ise bir gün tükeneceği net bir şekilde anlaşılmıştır. Bu nedenlerle yeni enerji kaynakları araştırmaları da ivme kazanmıştır (Yılmaz, 2012, s. 34).

Dünyamızda enerjiye olan ihtiyaç günden güne artarken devletler, refahlarının devamlılığı adına geleceğe dönük enerji politikalarını hazırlamak için çok yönlü çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalara bakıldığında ilginin hem doğal hem de sürdürülebilir kaynaklardan elde edilebilecek olan yenilenebilir enerjiye kaydığı görülmektedir. Türkiye’nin de önümüzdeki süreçte enerji ihtiyacını güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde karşılayabilmesi için yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili politikalarını yeniden şekillendirmesi ve yatırımlarına hız kesmeden devam etmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’nin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarının farklı kriterler baz alınarak değerlendirilmesi ve Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı sıralamasının yapılmasıdır. Elde edilen sonuçların Türkiye’nin yenilenebilir enerji politikalarında yararlanılacak verilere de katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmada en uygun yenilenebilir enerji kaynağı sıralamasını belirlemek amacıyla problemin yapısına uygun olarak çok kriterli karar verme tekniklerinden yararlanılmıştır.

Bu çalışmayı Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili olarak yapılan önceki çalışmalardan ayıran nokta, çalışmada kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniklerinin ve dikkate alınan değerlendirme kriterlerinin daha önceki çalışmalardan farklı ve daha kapsamlı olmasıdır.

Çalışmanın birinci bölümünde enerjinin ve enerji kaynaklarının tanımı yapılarak hem fosil kökenli enerji kaynakları hem de yenilenebilir enerji kaynakları açıklanmıştır. Bu bölümde son olarak enerji kaynaklarının dünyada ve Türkiye’de kullanımı ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde karar verme ve karar süreci kavramsal olarak açıklanmış ve farklı açılardan karar verme türleri ele alınmıştır. Problemde yer alan alternatiflerin değerlendirilebilmesi için birden fazla değerlendirme ölçütünün göz önünde bulundurulması gerektiğinden çözüm yaklaşımı olarak da çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniklerinin kullanımı uygun bulunmuştur. Bu nedenle yine ikinci bölümde önce çok kriterli karar verme teknikleri tanıtılmış daha sonra bu çalışmada ele alınan problemin çözümünde kullanılan teknikler olarak sırasıyla PROMETHEE, Multi-MOORA ve Tercih İndeksi (PSI) tekniklerinin ayrıntıları ayrı başlıklar altında açıklanmıştır. Uygulama sırasında sonuca çok yönlü bakabilmek amacıyla yukarıda sözü edilen farklı çok kriterli karar verme teknikleri kullanılmış ve bu tekniklerle elde edilen sonuçların rasyonelleştirilmesi için de Borda Sayım tekniğinden faydalanılmıştır. Borda Sayım tekniğine ilişkin bilgiler de yine ikinci bölüm içinde anlatılmıştır. Problemin yapısı gereği bazı kriterlere ilişkin değerler ancak sözel olarak tespit edilebilmiştir. ÇKKV teknikleri kullanılarak daha doğru ve rasyonel sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla bu sözel veriler sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırma işlemi yapılırken bulanık küme teorisinden faydalandığı için ikinci bölüm içinde bulanık küme teorisine de kısaca değinilmiş ve hem sayısallaştırma hem de durulaştırma işlemleri kavramsal olarak açıklanmıştır. Bu bölümde son olarak kriter ağırlıklandırma konusu ele alınmış ve uygulamada kullanılan Entropi yöntemi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde ise çalışmanın amacını oluşturan Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı seçimi bir karar problemi olarak çözülmeye çalışılmıştır. Problemde yenilenebilir enerji kaynağı alternatifleri; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji ve hidrolik enerji olarak belirlenmiş ve bu alternatifler teknik, ekonomik, çevre, sosyal-politik, potansiyel ile üretim ve katkı ana kriterleri altında toplamda 24 alt kriter ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme amacıyla, ikinci bölümde anlatılan ÇKKV teknikleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Uygulama sırasında yapılan matematiksel hesaplamaların tamamı Microsoft Excel 365 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PROMETHEE yöntemi uygulanmadan önce yöntemin gerektirdiği tercih fonksiyonları ve parametreler Visual PROMETHEE isimli programın

Academic Edition versiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Problemin çözümü ile elde edilen sonuçlar, sonuç ve değerlendirme başlığı altında paylaşılmış ve değerlendirme yapılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. ENERJİ VE ENERJİ KAYNAKLARI

Enerji, maddede var olan ve ısı, ışık biçiminde ortaya çıkan güç, erke olarak tanımlanmaktadır (TDK). Enerjinin sağlandığı kaynaklar hakkında çeşitli sınıflandırmalar mevcuttur. Bu sınıflandırmalardan ilki birincil (primer) kaynaklar ve ikincil (seconder) kaynaklar biçiminde olup, sınıflandırmada belirleyici olan unsur kaynakların elde ediliş biçimleridir. Birincil enerji kaynakları, kaynak elde edilirken herhangi bir işleme tabi tutulmayan kaynaklardır. Örnek olarak petrol, kömür, doğal gaz, nükleer enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji vb. sayılabilir. İkincil enerji kaynakları ise elde edilişinde belirli işlemlerden geçmiş olan kaynaklardır. Bunlar benzin, mazot, motorin, kok, hava gazı, sıvılaştırılmış petrol gazı vb. olarak sayılabilir (Koç vd., 2013, s. 33–34).

Enerjinin sağlandığı kaynaklar hakkında yapılan bir diğer sınıflandırma ise kaynakların ömürleriyle ilgilidir. Söz konusu sınıflandırmada kaynaklar; yenilenemez enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki başlık altında ele alınır. Bu çalışmanın konusu da bu sınıflandırma ile ilişkilidir.

Yenilenemez enerji kaynakları, bir diğer adıyla fosil kökenli enerji kaynakları, kömür, petrol ve doğal gazdır. Bu kaynaklar, miktarları sınırlı olduğundan ve hatta doğada tükenebileceğinden yenilenemez kaynaklar olarak adlandırılmışlardır. Sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilecek olan kaynaklar ise yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar doğal bir sürecin sonunda kendiliğinden oluşan kaynaklardır ve doğal döngü içerisinde kendilerini yenileyebilirler yani tükenmeyecek olan kaynaklardır.

Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji, hidrojen enerjisi, jeotermal enerji ve deniz kökenli enerji kaynakları şeklinde sıralanabilir. İzleyen kesimde fosil kökenli enerji kaynaklarına kısaca değinildikten sonra bu çalışmaya konu olan yenilenebilir enerji kaynakları konusunda ayrıntılı bilgi verilmiştir.

1.1. Fosil Kökenli Enerji Kaynakları

Fosil kökenli enerji kaynakları bir diğer adıyla yenilenemez enerji kaynakları, kömür, petrol ve doğal gazdır. Bu kaynakların rezervlerinin bir gün tükeneceği bilimsel çalışmalarla ispatlanmıştır.

Fosil kökenli enerji kaynaklarından en eskisi olan kömür, önceleri ısınma amacıyla ve sanayi devrimiyle birlikte de buharlı makinelerin çalıştırılmasında kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ve yeniden şekillenen ihtiyaçlar doğrultusunda sırasıyla petrol ve doğal gaz kullanımı da yaygınlaşmıştır. 2015-2016 yıllarında yapılan araştırmalar, kömürün yaklaşık 122 yıl, petrolün 52 yıl ve doğal gazın ise yaklaşık 61 yıl sonra eğer herhangi bir yeni rezerv bulunmazsa tükeneceğini göstermektedir. Her yıl tekrarlanan bu araştırmalar ile tükenme sürecinin hızlı bir ivme izlediği de dikkat çekmektedir (Strateji Geliştirme Başkanlığı, 2016, s. 6).

Uluslararası Enerji Ajansı'nın geleceğe yönelik yaptığı çalışmalarda da fosil kökenli yakıtların kullanımının ivmeli olarak azaldığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki payının arttığı görülmektedir (International Energy Agency (IEA), 2020b).

1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Kendi kendini yenileyebilen ve doğada tükenmeyecek olan enerji kaynaklarına yenilenebilir enerji kaynakları denilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları geleceğin önemli enerji kaynakları arasında gösterilmektedirler (Koç vd., 2013).

Yapılan yeni çalışmalar fosil kökenli enerji kaynaklarının hızla tükenmeye devam ettiğini aktarmaktadır. Her geçen yıl ise bu tükenmenin ivmesinin arttığı yapılan hesaplar ve çalışmalarla gösterilmektedir. Bu gelişmeler gelecek nesillerin enerji ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını ve ona uygun teknolojiler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Şimdiye kadar özellikle maliyeti nedeniyle çok da tercih edilmeyen yenilenebilir enerji kaynakları, teknolojik gelişmelerin söz konusu maliyetleri de düşürmesiyle makul enerji kaynakları olmuşlardır. Bunun yanında yeşil hareketler de insanları yenilenebilir enerji kullanmaya teşvik etmektedir (Soyu vd., 2016).

Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji, hidrojen enerjisi, jeotermal enerji ve deniz kökenli enerji kaynakları

şeklinde sıralanabilir. Çalışmanın devamında bu kaynaklardan ülkemizde halihazırda kullanılanları tek tek açıklanmıştır.

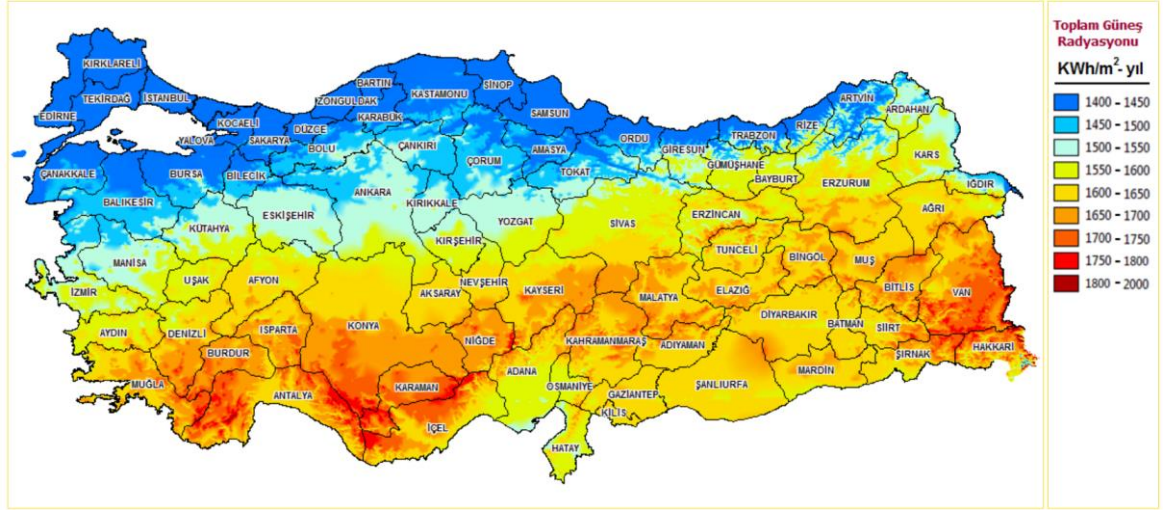
1.2.1. Güneş enerjisi

Güneşte yaşanan füzyon tepkimeleri sonucunda güneşin yaptığı ışıma güneş enerjisi olarak adlandırılmaktadır. Güneşten gelen ışınların yalnızca %50'si yeryüzüne düşmektedir. Buna rağmen gelen ışınlar bile çok yüksek miktarda enerji potansiyeline sahiptir.

Işık enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlere güneş hücreleri veya fotovoltatik hücreler denir. Güneş panelleri veya diğer adıyla güneş pilleri yani fotovoltatik sistemler sayesinde alınan enerji, elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Yüzeye çarpan güneş ışınlarının yarı-iletken malzemeler yardımıyla elektronlarından ayrıştırılması yöntemiyle elektrik enerjisine direkt olarak çevrilir. Tek bir hücrenin verimliliği %5-%30 arasındadır. Daha fazla enerji elde etmek için güneş hücreleri bir arada paralel veya seri olarak bağlanırlar. Çok sayıda hücrenin bir araya gelmesiyle güneş panelleri oluşturulur. Birçok farklı tipte malzeme ile yapılan çeşitli güneş panelleri mevcuttur (Oral, 2020, ss. 483–484).

Güneş enerjisi ilk olarak 1930'larda alternatif bir enerji kaynağı olarak görülmeye başlanmış ancak çalışmalar sadece araştırma düzeyinde kalmıştır. 1960'lı yıllarda ortaya çıkan petrol krizi sırasında ise ilk defa araştırmalar değerlendirmeye alınmıştır. Sonuç olarak, Dünya üzerine bir yılda düşen Güneş ışığı miktarından elde edilebilecek enerjinin yaklaşık değerinin bilinen petrol rezervlerinin 516 ve kömür rezervlerinin 156 katı olması nedeniyle bu potansiyelden yararlanma kararı alınmıştır. 1970'li yıllarda Türkiye de bu potansiyeli görüp araştırmalara başlamıştır (Alkan, 2016).

Dünya üzerinde potansiyel olarak en yüksek enerji üretiminin gerçekleşebileceği yenilenebilir enerji kaynağı güneş enerjisidir. Teorik hesaplara göre dünyadaki birincil enerji ihtiyacının yaklaşık yirmi katı güneş enerjisi sayesinde elde edilebilir. Türkiye açısından bakarsak günlük ortalama 7,5 saatten yıllık ortalama 2.741 saatlik güneşlenme süresi vardır. Yıllık toplam 1.527 kWh/m².yıl güneş enerjisi Türkiye'ye ulaşmaktadır (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2019). Şekil (1.1)'de Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli gösterilmiştir (<http1>).



Şekil 1.1. Güneş enerjisi potansiyel atlası

Haritadan da görülebileceği üzere güneş enerjisi potansiyeli en yüksek olan bölge Güneydoğu Anadolu bölgesidir. Güneydoğu Anadolu'nun hesaplanan yıllık güneşlenme süresi 2993 saat/yıl ve yıllık ortalama güneş ışıınımı $1.460 \text{ kWh/m}^2 \text{ yıl}$ 'dır (http-1).

Günümüzde güneş enerjisi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları binaların ısıtılması ve soğutulması, sıcak su elde edilmesi, deniz suyunun arıtılması yolu ile saf su ve tuz elde edilmesi, bitki, meyve ve sebze kurutulması, su buharı elde edilmesi ve elektrik üretilmesi olarak sayılabilir.

Güneş enerjisinin genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Havanın bulutlu olmasından etkilenir
- İşletme maliyeti düşüktür
- Kullanım yeri kısıtlı değildir
- Bölgesel kullanım için elverişlidir
- İlk yatırım maliyeti yüksektir
- Kurulum alanı geniştir

1.2.2. Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerjisi, ana kaynağı güneş olan bir yenilenebilir enerji çeşididir. Güneşin her yeri homojen olarak ısıtamaması sonucunda meydana gelen basınç, nem ve sıcaklık

farklılıklarından dolayı rüzgarlar oluşur. Rüzgarların oluşturduğu kinetik enerji ise rüzgâr türbinleri sayesinde mekanik enerjiye ve bu yolla da elektrik enerjisine dönüştürülür.

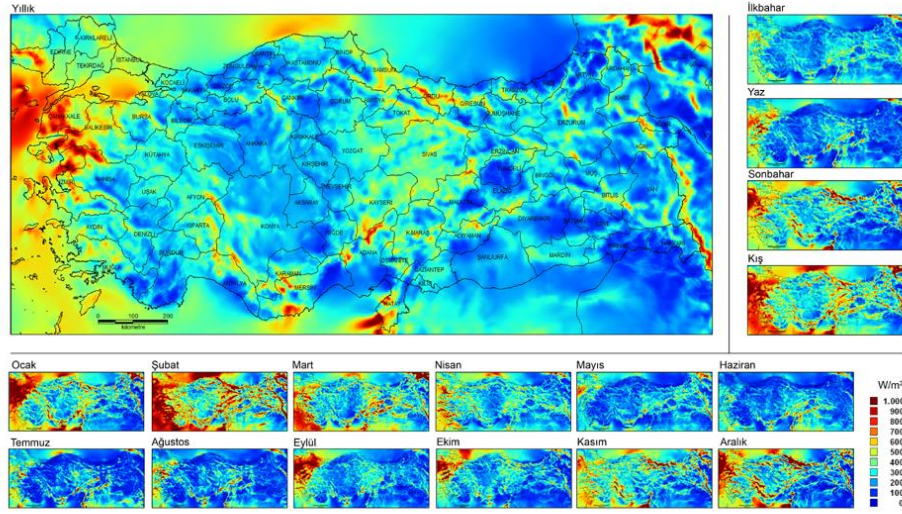
Genellikle üç kanatlı pervaneler, dişli kutusu, jeneratör, frenleme mekanizması, motor ve daha birçok mekanizmadan oluşan rüzgâr türbinlerinin bir arada bulunduğu alanlara ise rüzgâr enerji santralleri denilmektedir. Rüzgârı yakalamak için belirli yükseklik, açıklık ve farklı coğrafi unsurların bir arada olması gerektiğinden alan seçimi önemli ve zorlayıcıdır. Kara üzerine kurulan rüzgâr santralleri olduğu gibi özellikle Avrupa’da deniz üzerine kurulan santraller de görmek mümkündür. Kurulumu hızlı ancak maliyetlidir. Buna rağmen uzun ömürlü olmaları ve maliyetlerini hızlı bir şekilde karşılayabildiklerinden ötürü güzel bir yatırım aracı olarak düşünülmektedirler (Tezioğlu vd., 2019).

Rüzgârdan enerji üretme fikri çok eski hatta milattan önceki yıllara kadar dayanmaktadır. 1800’lü yılların sonunda ise modern tekniklere geçilmiş ve rüzgârdan elektrik üretimi başlamıştır. Türkiye’de ise 1960’lı yılların sonunda çalışmalar başlatılmıştır (Pınar vd., 2020).

Türkiye’nin mevcut durumdaki rüzgâr potansiyeli değerlendirildiğinde 2006 yılından 2015 yılına kadar yaklaşık 92 kat kurulu güç artımı sağlanmıştır. 2015 yılında rüzgâr ile üretilen toplam 11.543 GWh’lik enerji, elektrik ihtiyacının %4,4’ünü karşılayabilmiştir. Türkiye’nin toplam rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olup tümünün kullanılması, ülkenin elektrik ihtiyacının %44’ünün karşılanması anlamına gelmektedir. Yakın zamanda Türkiye için mevcut ve lisansı alınacak kaynaklar dahil edildiğinde elektrik ihtiyacının %12’sinin rüzgâr enerjisinden karşılanması beklenmektedir. Kurulu güç miktarı sıralandığında 2018 verilerine göre Türkiye, avrupa ülkeleri arasında 7.sıradadır (International Energy Agency (IEA), 2016).

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’ne göre rüzgâr enerjisinden yararlanmak için en az 50 m yükseklik ve 7 m/s’lik rüzgâr hızına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil (1.2) ve (1.3)’te 100 m yüksekliği esas alan Türkiye’nin rüzgâr enerji potansiyelini oluşturan rüzgâr yoğunluğu haritası ve rüzgâr hızı haritası gösterilmiştir (<http-2>).

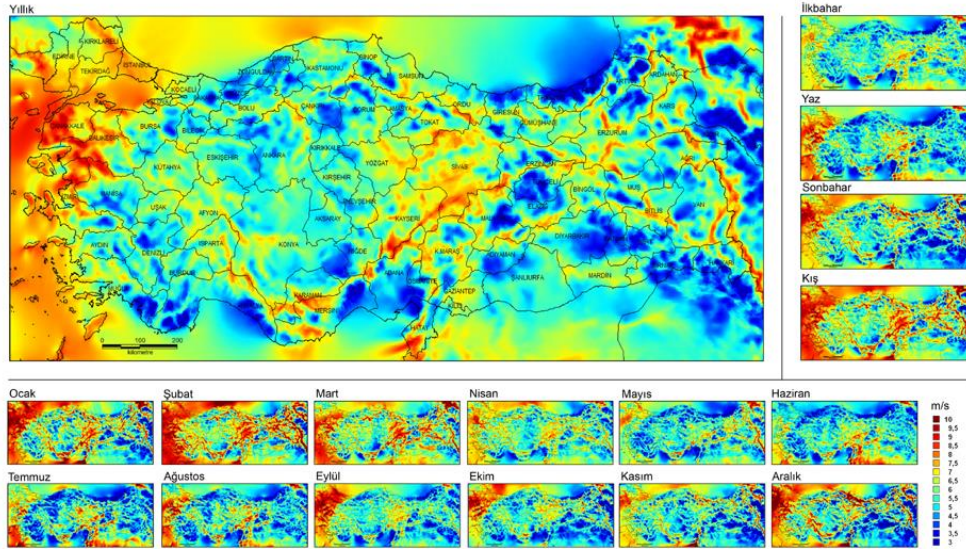
TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI
Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası
100 m Yükseklik



Bu haritalar 200m çözünürlükte rüzgar verileri ile oluşturulmuştur.

Şekil 1.2. Türkiye rüzgâr güç yoğunluğu haritası

TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI
Rüzgar Hızı Haritası
100 m Yükseklik



Bu haritalar 200m çözünürlükte rüzgar verileri ile oluşturulmuştur.

Şekil 1.3. Türkiye rüzgâr hızı haritası

Rüzgâr enerjisinin genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- İlk yatırım maliyeti yüksektir.
- Bakım ve onarım maliyetinin düşük olduğu söylenebilir.
- İstihdam kaynağıdır.
- Tüm diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi çevre dostudur.
- Atmosferde bolca bulunur.
- Zamanla fiyatının artma ihtimali yoktur çünkü kaynağı güvenilirdir.
- Kapasite faktörü düşüktür.
- Kurulumu hızlıdır.
- Kuşların göç yolu üzerine kurulmaması gerekir aksi durum ekolojik açıdan zarar oluşturabilir
- Coğrafik olarak yönergelerle belirtilen belli başlı kısıtları vardır. Santral kurulurken bölge seçimi ona göre yapılmalıdır.

1.2.3. Biyokütle enerjisi

Biyokütle, yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak tanımlanabilir. Aynı zamanda bir çeşit organik karbon olarak da adlandırmak mümkündür. 1546 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'un 3. maddesinde tanımlandığı şekliyle: "Biyokütle: İthal edilmemek kaydıyla; kentsel atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal atıkları dahil olmak üzere tarım ve orman ürünlerinden ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynakları ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurlarını ifade eder (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 2005 m.3)."

Tüm bu kaynaklardan elde edilen enerjiye ise biyokütle enerjisi denilmektedir. Kaynağını mısır, buğday, gibi özel olarak yetiştirilen bitkiler, otlar, yosunlar, algler, hayvan dışkıları, sanayi atıkları ve tüm organik ev atıklarından alan biyokütle, tükenmez bir kaynak olması ve özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle önemli bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (<http-3>).

Biyokütle enerjisinin genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Bölgesel ve modern işletilmesi mümkün bir enerji kaynağı olması nedeniyle kendi kendilerine yetecek enerjiyi elde edebilen bölgeler kurulmasına katkı sağlar.

- Enerjinin elde edilmesi için daha çok tarım işçiliğine gerek duyulduğundan kırsal kesimde yeni iş imkanları doğuran bir enerji türüdür.
- Çorak alanlardan elde edilebiliyor olması nedeniyle daha önce kullanılamaz durumda olan alanların da kullanılmasına olanak tanır.
- Sera etkisine yol açmayan bir enerji kaynağıdır.
- Üretim ve çevirim teknolojilerine hakimiyet yüksektir.
- Depolanabilirliği yüksektir.
- Çevre kirliliği oluşturmaz.

1.2.4. Hidrolik enerji

Hidrolik enerji veya hidroelektrik enerjisi en gelişmiş teknolojiye sahip olan ve kullanılan en eski yenilenebilir enerji çeşididir. Su akışının yarattığı kinetik enerjinin kanallar ve türbinler yardımıyla elektrik enerjisine çevrilmesiyle elde edilir. Hidrolik santraller akan suyun yahut barajda birikmiş suyun akış gücü yardımıyla elektrik enerjisi elde etmeyi sağlayan sistemlerdir. Yüksek bir yerden akıtılan su veya halihazırda akan bir su akış hızıyla türbinlerin dönmesini sağlar. Dönen türbinler jeneratörlere bağlanır ve türbinde oluşan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanır (Serdar, 2020).

Hidrolik enerji elde etmede en önemli unsurlar suyun akış hızı ve hangi yükseklikten düştüğüdür. Doğal ve yapay barajlara hidrolik santraller kurulması ile enerji çevrimi yapılmaktadır. Barajlarda durgun halde bekleyen ve potansiyel enerjiye sahip olan su, türbinlere gönderilerek kinetik enerji kazandırılır. Ardından türbinlerdeki kinetik enerji mekanik enerjiye çevrilir. Son olarak bu mekanik enerji, jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine çevrilir (Özdemir vd., 2020).

Dünya üzerinde enerji ihtiyacının karşılanmasında en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidrolik enerjidir. Türkiye’de kurulu enerji gücünün yaklaşık %32’si hidrolik santrallerden sağlanmaktadır (http-4).

Hidrolik enerjinin genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Çevre kirliliğine sebep olmaz.
- Santralleri istihdam sağlar.
- Enerjinin birim maliyeti düşüktür.
- Verim kaybı azdır

- Hızlı bir şekilde devreye alınabildiğinden acil enerji kesintilerinde kullanılabilir.
- Hızlı devreden çıkartılabilir.
- Yatırım maliyeti ve kurulum süresi fazladır.
- Teknik ömrü uzundur.
- Bakım onarım maliyetleri düşüktür.
- Yağışla enerji üretimi doğru orantılıdır.
- Ülkelere sosyo-ekonomik katkısı yüksektir.

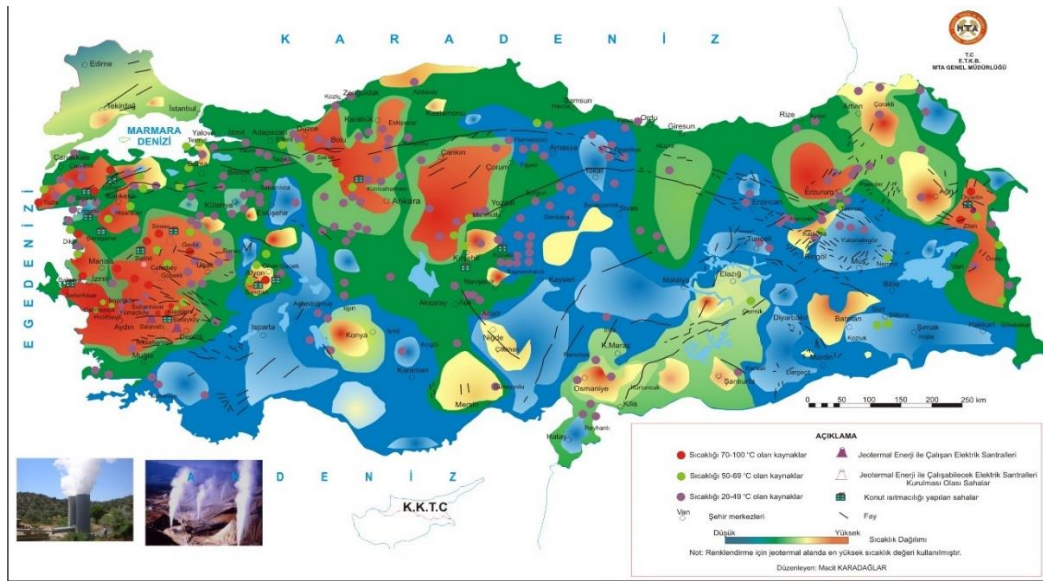
1.2.5. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yerden gelen ısı enerjisi anlamına gelmektedir. Kaynağını Dünya'nın alt katmanlarında bulunan termal enerjiden aldığı için bu şekilde isimlendirilmiştir. Yeraltında bulunan ve yeryüzündeki sularla beslenen havzalarda biriken ısıнын meydana getirdiği çeşitli mineral, tuz ve kayaçların da bulunduğu termal su kütleleri jeotermal enerjiyi meydana getirmektedir (Zaim vd., 2018).

Jeotermal enerji doğrudan veya dolaylı yollarla kullanılabilir. Isı seviyesine göre ise düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Düşük ve orta ısıdaki kaynaklar doğrudan kullanım için, yüksek ısıya sahip kaynaklar ise endüstriyel amaçlı olarak ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bu bağlamda ısıtma, endüstriyel kullanım ve turizm gibi amaçlarla doğrudan kullanılan jeotermal enerji, elektrik enerjisi üretmek için dolaylı yolla kullanılmış olur (http-5).

Jeotermal enerjinin elektrik enerjisine çevrimi için üç farklı tipte enerji santrali kullanılmaktadır. Bu santraller kullandıkları teknolojiye bakılarak kuru buhar, buhar püskürtmeli ve binary santraller olarak birbirlerinden ayrılmışlardır. Bu santrallerde temel olarak jeotermal enerji kaynağı kullanılarak öncelikle kinetik enerjiye çevrilen jeotermal enerji daha sonra elektrik enerjisine çevrilmektedir (Zaim vd., 2018, s. 50–52).

İlk olarak 1900'lü yıllarda İtalya'da elektrik üretimi amaçlı kullanılmaya başlamıştır. Türkiye, aktif fay hatları ve Alp-Himalaya hattında bulunduğu için büyük bir jeotermal enerji potansiyeline sahiptir. Dünya üzerinde 2018 yılı itibariyle kurulu jeotermal enerji gücü 14.369 GW civarlarında olmakla birlikte jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üreten ilk 5 ülkenin içinde Türkiye de yer almaktadır (International Energy Agency (IEA), 2018). Türkiye'nin ne kadar fazla kaynağa sahip olduğu ise Şekil (1.4)'teki harita aracılığıyla görülebilir (http-6).



Şekil 1.4. Türkiye jeotermal kaynak ve uygulama haritası

Jeotermal enerjinin genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Kurulum maliyeti tüm yenilenebilir enerji santralleri arasında en düşüktür.
- Üretimden elde edilebilecek verim yüksektir.
- Çok kısa bir sürede kendini amorti edebilir.
- Yeni teknolojiler sayesinde çevreye zararı sifıra yaklaşmıştır.
- Re-enjeksiyon sayesinde yenilenebilir olma kapasitesi arttırılabilir.
- Kesintisiz bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

1.3. Enerji Kaynaklarının Kullanımı

Enerjiye olan ihtiyaç küresel büyüme ve nüfus artışı ile paralel olarak giderek çoğalmaktadır. 2018 yılı toplam enerji arzı 14.314 milyon TEP (Ton Eşdeğeri Petrol) olarak kaydedilmiştir. Enerji arzı kaynaklara göre sıralandığında ilk sırada 4.501 milyon TEP arza sahip olan petrol, ikinci sırada 3.821 milyon TEP arz ile kömür ve üçüncü sırada 3.273 milyon TEP arz ile doğal gaz bulunmaktadır. 2018 yılında dünya enerji tüketimi bir önceki yıla oranla %2,9 artmıştır. 2018 yılı kişi başına enerji tüketimi de 2010 yılından bu yana gözlemlenen en büyük sıçramayı yaşamış ve %1,8 oranında artmıştır (International Energy Agency (IEA), 2019).

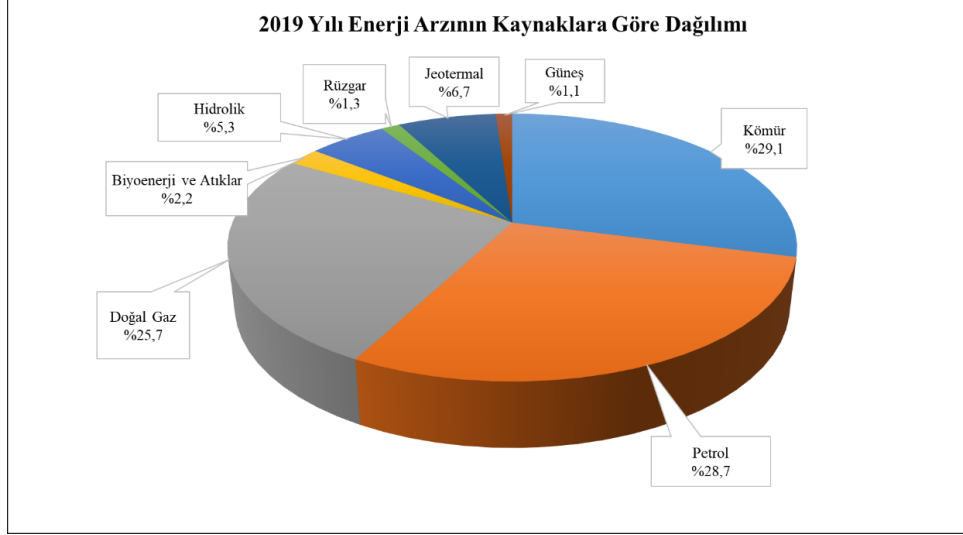
2019 yılına gelindiğinde ise 2018 yılına kıyasla söz konusu bu artışın ivmesinin yavaşladığı görülmektedir. Küresel enerji talebi 2019 yılında 120 milyon ton petrol eşdeğeri (Mtoe) olarak kaydedilmiştir. Küresel bazda yavaşlayan ekonomik büyüme ve değişen hava koşulları bu düşüşün temel nedenleri olarak gösterilmektedir. Küresel GSYİH büyümesi 2018'deki %3,6'dan 2019'da %2,9'a düşerek enerji talebindeki büyümeyi sınırlandırmıştır. Küresel enerji talebinin yarısından fazlası ABD, Çin ve Hindistan gibi ülkelerden gelmektedir. Ekonomik yavaşlama, özellikle ekonomik büyümenin 2018'de % 6,8'den 2019'da %4,8'e gerilediği Hindistan'da enerji talebindeki büyümeyi sınırlamıştır (International Energy Agency (IEA), 2020a).

Tüm dünyada 2018 yılında ortalama kışlardan daha soğuk bir kış ve ortalama yazlardan daha sıcak bir yaz yaşanmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın hazırladığı Dünya Enerji Görünümü 2019 Raporu'nda, bu durumun hem ısıtma hem de soğutma için enerji talebini artırdığı söylenmektedir. 2019 yılında daha ılıman yaşanan kış mevsiminin ve yine daha ılıman geçen yaz mevsiminin enerji talebindeki büyümeyi de azalttığı ve özellikle alan ısıtma ve soğutma ihtiyacıyla oluşan enerji talebinin azalmasının, tüm yakıtlara olan talebin azalmasına sebep olduğu vurgulanmıştır. Küresel anlamda 2019 yılında yaşanan bu talep azalması 2018-2019 arasındaki küresel enerji talebi büyümesini %0,8 baz puan azaltmıştır. Söz konusu yıllar arasında enerji talebinin artışında yaşanan bu düşüş orantısız bir şekilde kömür ve gaz tarafından hissedilirken yenilenebilir enerji kaynaklarındaki mutlak büyüme çok az miktarda etkilenmiştir (International Energy Agency (IEA), 2020a).

2020 yılının ilk çeyreğine bakıldığında da küresel çapta enerji talebinin önceki yıllara göre %3,8 azaldığı görülmektedir. Bu azalışta en büyük etken Covid-19 virüsünün yol açtığı pandemi ve bu süreçte devletlerin dönemsel karantinalar uygulaması olarak belirtilebilir. Covid-19'un 2020'de enerji talebi üzerindeki etkisinin, 2008 mali krizinin küresel enerji talebi üzerindeki etkisinden yedi kat daha fazla olacağı düşünülmektedir. Bu dönemde, yenilenebilir enerji kaynakları ise daha büyük kurulu kapasite ve öncelikli dağıtım sayesinde küresel ölçekte talepte artış gösteren tek kaynak olmuştur (International Energy Agency (IEA), 2020b).

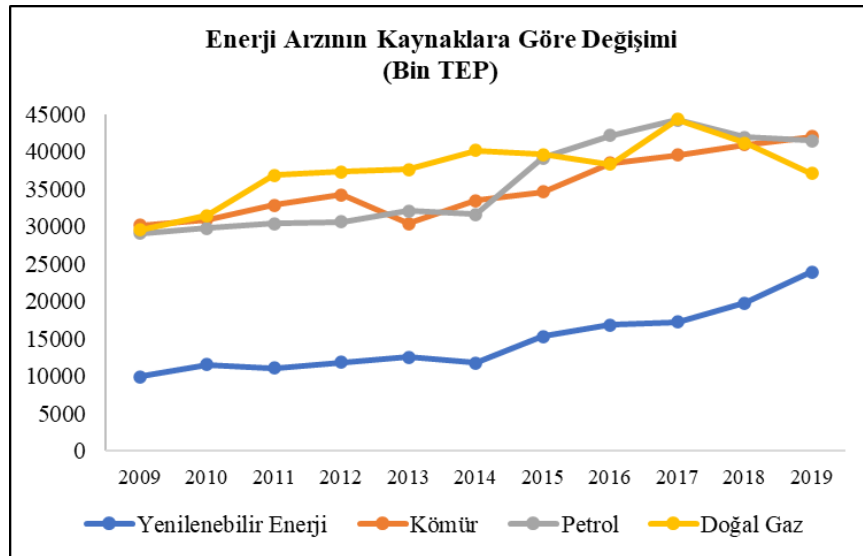
Türkiye özelinde bakıldığında ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre 2019 yılı toplam enerji arzı 144,40 milyon TEP'dir. Bu arzın kaynaklara göre dağılımına baktığımızda Şekil (1.5) ile de gösterildiği gibi Kömür 42,02 milyon TEP arzla ve %29'luk bir payla ilk sırada yer almaktadır. Onu 41,45 milyon TEP arz ile petrol

ve 37,13 milyon TEP arz ile doğal gaz izlemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam arzı ise 23,94 milyon TEP olarak kaydedilmiştir (http-7).



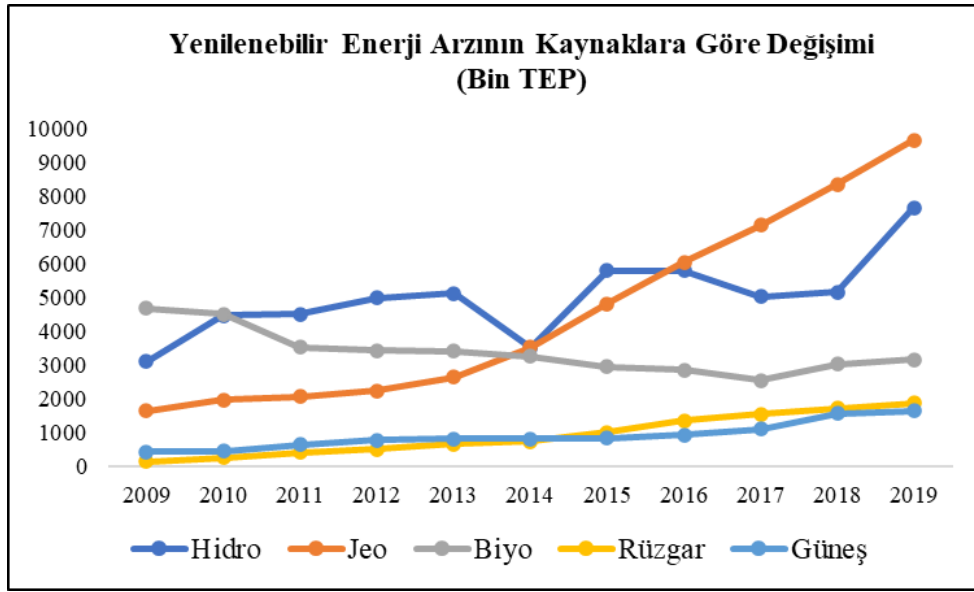
Şekil 1.5. 2019 yılı enerji arzının kaynaklara göre dağılımı grafiği

2009-2019 yılları arasındaki son 10 yılda Türkiye toplam enerji arzı, 45.768 bin TEP ile % 46,3 artarken, Şekil (1.6) ile de görülebileceği gibi petrol 12.363 bin TEP ile % 42,5; kömür 11.803 bin TEP ile % 31,1; doğal gaz 7.591 bin TEP ile % 25,7 artmıştır (http-7).



Şekil 1.6. 2009-2019 yılları arası enerji arzının kaynaklara göre değişim grafiği

Yenilenebilir enerji arzına bakıldığında ise yine 2009-2019 yılları arasındaki son 10 yılda toplam yenilenebilir enerji arzı 13.990 bin TEP ile %140,6 artmıştır. Bu artışta kaynaklara göre dağılıma bakıldığında Şekil (1.7)'den de izlenebileceği gibi hidrolik 4.546 bin TEP ile % 147; jeotermal 8.027 bin TEP ile % 491; güneş 1.193 bin TEP ile % 278,3 ve rüzgâr 1.740 bin TEP ile %1353,3 arterken; biyoenerji %32,5 oranında azalmıştır (http-7).



Şekil 1.7. 2009-2019 yılları yenilenebilir enerji arzının kaynaklara göre değişimi

Türkiye gibi enerji açısından dışa bağımlı ülkeler için yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla enerji üretmek ve bu enerjiyi birçok alanda kullanılabilir hale getirmek oldukça önem arz etmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilecek bu kaynakların yatırımcılar için uygun bir pazar olduğu aşikâr olmasına rağmen uzun süre bu konuda bir düzenleme yapılmamıştır (Bayrak, 2020). 2005 yılında bu ihtiyaç fark edilmiş ve 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun kabul edilmiştir. Bu kanunun amacı aşağıda yazıldığı gibidir.

Madde 4 - Bu kanunun amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç

duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 2005 m.4).

Söz konusu bu kanun kapsamında ve yürürlükte olan yasal düzenlemeye göre yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılarak elektrik üretilmesi için oluşturulan destek mekanizması sayesinde bir hayli yüksek teşvikler verilmektedir. Bu teşviklerin 2020 yılı sonu itibariyle sonlandırılması kararlaştırılmıştır. Ancak yatırımcıların kamuoyuna da yansıyan baskıları sonuç vermiş ve teşviklerin Haziran 2021 sonuna kadar uzatılmasına karar verilmiştir (Resmi Gazete, 2020). Bu da devletin yenilenebilir enerji yatırımlarını bir hayli önemseydiğini göstermektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

2. KARAR VE KARAR VERME İLE İLGİLİ KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi problemi farklı araç ve yaklaşımlar kullanılarak çözülebilecek bir problemdir. Bu çalışmada söz konusu problem çok kriterli karar verme teknikleri yardımıyla çözülmeye çalışılmıştır. Bu nedenle bu bölümde öncelikle karar verme kavramı ve karar süreci açıklanmış daha sonra karar vermede kullanılan farklı teknikler hakkında bilgi verilmiştir. Bu anlamda çalışmanın uygulama bölümünde kullanılan çok kriterli karar verme tekniklerinin teorik ayrıntıları da bu bölüm içinde ele alınmıştır.

2.1. Karar Verme Kavramı ve Karar Süreci

Temel olarak karar verme, en az iki farklı seçeneğin olduğu durumlarda bu seçenekler arasında seçim yapma işlemidir. Ancak bu işlem anlık gerçekleşmez aksine bir süreci kapsar. Bu nedenle karar verme, bir amaca ulaşabilmek için izlenebilecek farklı hareket biçimlerinden en uygun olanının belirlenmesi süreci olarak tanımlanabilir (Lezki vd., 2019, s. 4). Karar vericinin daha doğru kararlar alabilmesi için karar sürecinin tüm adımlarına hâkim olması ve süreci doğru yönetebilmesi de önem arz etmektedir. Karar sürecinin aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Can, 2018, s. 1–2).

- Problemin belirlenmesi
- Problemin genel hatlarıyla tanımlanması
- Seçeneklerin belirlenmesi
- Seçeneklerin değerlendirilmesi
- En iyi seçeneğin belirlenmesi
- Belirlenen seçeneğin değerlendirilmesi

Bu aşamalar genel olarak karar verme tekniklerinde kullanılan adımlardır. Bununla birlikte karar probleminin yapısına göre değişiklik gösterebilir ve arttırılabilir. Önemli olan nokta karar probleminin sistematik olarak değerlendirilmesi ve problemin çözümü için uygun bir karar verme tekniğinin kullanılmasıdır.

Karar vermeyi gerektiren durum karar problemi olarak tanımlanır. Karar sürecinin başlayabilmesi için problemin tespit edilmesi ve tanımlanması gerekir. Karar probleminin öğeleri aşağıda sıralanmıştır (Lezki vd., 2019, s. 5-6).

- **Karar verici:** Problemin çözümü için ortaya atılan seçenekler arasında tercih yapması ve yaptığı tercihlerin sonuçlarından sorumlu olması beklenen kişi ya da kişilerdir.
- **Amaç:** Her karar probleminde, problemin çözümü ile ulaşılmak istenen belirli bir amaç ya da birden fazla amaç söz konusudur.
- **Hedefler ve Kriterler:** Hedefler, amaçlara paralel olarak belirlenen ve amaçları gerçekleştirmede yardımcı rol oynayan öğelerdir. Kriterler ise seçeneklerin bir diğer adıyla alternatiflerin hedefler içindeki etkinliğini belirleyen öğelerdir.
- **Seçenekler:** Bir problemin karar problemi olarak değerlendirilebilmesi için en az iki seçeneğin varlığı gerekir. Bu seçenekler karar vericinin sonuca ulaşmak için izleyebileceği farklı yolları ifade eder.
- **Çevresel Faktörler:** Karar verici tarafından kontrol edilemeyen değişkenleri ifade eder. Doğa olayları, küresel değişiklikler, salgın hastalıklar çevresel faktörler olarak gösterilebilir.
- **Olasılıklar:** Çevresel faktörlerle ilişkilidirler. Çevresel faktörlerin ortaya çıkmalarıyla ilgili belirsizlik düzeyini temsil eder.
- **Sonuçlar:** Seçilen alternatifin getirisi ya da kaybını gösteren değerler ya da durumlar da sonuçlar olarak adlandırılır.

Karar süreci içerisindeki en etkili öge her ne kadar karar verici gibi gözükse de bu süreç çevresel faktörler, karar süreci içerisinde yer alan paydaşlar, karar ile ulaşılmak istenen amaçlar gibi diğer farklı faktörlerden de etkilenir. Bu etkiyi en iyi şekilde yönetebilmek için karar problemi tanımlanırken problemin tüm özellikleri de iyi bir biçimde tespit edilmelidir (Aktaş vd., 2015).

Karar probleminin özelliklerini tespit edebilmek ve buna göre uygun teknikleri kullanarak karar verebilmek amacıyla literatürde karar problemleri farklı açılardan sınıflandırılmıştır. İzleyen kesimde bu sınıflandırmalara değinilmiştir.

2.2. Karar Problemlerinin Sınıflandırılması

Karar problemleri, karar türleri açısından beş sınıfa ayrılır. Bunlar sırasıyla çevresel faktörlere ilişkin bilgi düzeyi açısından, yönetim düzeyi açısından, yapıları açısından, bağlı olma durumu açısından, göz önünde bulundurulacak kriter açısından

kararlardır (Lezki vd., 2019, s. 10–12). Karar probleminin detaylı bir şekilde anlaşılabilmesi için hangi sınıfa ya da sınıflara ait olduğu tespit edilmeli ve ona göre bir çözüm yöntemi uygulanmalıdır (Işığışık, 2015, s. 12). Bu nedenle sırasıyla bu karar türleri açıklanmaya çalışılmıştır.

2.2.1. Çevresel faktörlere ilişkin bilgi düzeyi açısından karar türleri

Karar vericinin çevresel faktörlere ilişkin sahip olduğu bilgi düzeyi karar ortamının belirlenmesini sağlar. Karar ortamının belirlenmesi karar vermede kullanılacak tekniğin saptanması açısından önemlidir. Üç farklı karar ortamından bahsetmek mümkündür. Bunlar belirlilik ortamı, belirsizlik ortamı ve risk ortamı olarak sıralanabilir.

Her bir ortamda çeşitli karar verme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerin uygulanması için seçeneklerin ve bu seçenekleri etkileyen faktör veya faktörlerin tablolaştırılması gerekmektedir. Bu tablo literatürde ödemeler matrisi (Payoff Matrix), karar tablosu ya da kazanç matrisi olarak adlandırılmıştır (Bayram, 2015, s. 33-34). Ödemeler matrisi Tablo (2.1)'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Ödemeler matrisi

		Çevresel Faktörler			
		θ_1	θ_2	...	θ_j
Alternatifler	A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}
	A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}
	...	...	...	...	...
	A_i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}

Matristeki semboller ve açıklamaları aşağıda verildiği gibidir.

A_i : i . alternatif

θ_j : j . çevresel faktör

x_{ij} : i . alternatif ve j . çevresel faktörün ödeme değeri

İzleyen kesimde farklı karar ortamları ve bu karar ortamlarında kullanılan karar verme teknikleri aktarılmıştır.

2.2.1.1. Belirlilik ortamında karar

Belirlilik ortamında seçimlere ilişkin bilgiler tam olarak bilinir ve alternatiflerin sonucunda gerçekleşmesi beklenen olayların (çevresel faktörlerin) gerçekleşme olasılıkları 1'dir. Diğer bir ifadeyle karar vericinin geçmişte meydana gelen olaylara ve gelecekte meydana gelebilecek olaylara ait bilgisinin tam olduğu varsayılan ortamlar belirlilik ortamlarıdır (Can, 2018, s. 3).

Belirlilik ortamında verilecek kararlarda amaç doğrultusunda alternatiflerin “ne tarafından etkileneceği” ve “nasıl etkileneceği” kesindir. Bu doğrultuda seçim işlemi kolay bir şekilde yapılır. Değerlendirilmesi gereken belirsizlikler ya da olasılıklar bu tip ortamlarda yoktur. Diğer bir ifadeyle ödemeler matrisinde tek bir çevresel faktör vardır ve her alternatif için ortaya çıkacak sonuçlar bu çevresel faktör altında ortaya çıkacaktır. Karar verici tüm bilgiye sahip olduğu için ödemeler matrisinde en iyi sonucu veren alternatif en iyi karar olarak seçilir.

2.2.1.2. Belirsizlik ortamında karar

Belirsizlik ortamlarında ise belirlilik ortamının aksine geçmişten gelen bilgi ve çevresel faktörlere ilişkin bilgi sınırlıdır. Belirsizlik ortamında alternatiflerin sonuçlarının gerçekleşme olasılığı hakkında herhangi bir bilgi yoktur. Alternatiflerin hangi olaylar tarafından nasıl etkileneceği bilinmemektedir ya da tespit edilememektedir. İşte bu tip ortamlarda karar verme sürecinde karar vericinin kişisel özellikleri, deneyimleri ve içerisinde bulundukları çevre etkili olmaktadır (Lezki vd., 2019, s. 28).

Belirsizlik ortamında bir tercih yapılabilmesi için karar vericinin de aktif rol aldığı ve riske karşı tutumunun etkili olduğu çeşitli karar ölçütleri geliştirilmiştir. Bu ölçütler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- İyimserlik (PLUNGER) ölçütü
- Kötümserlik (WALD) ölçütü
- Uzlaşma (HURWICZ) ölçütü
- Eş Olasılık (LAPLACE) ölçütü
- Pişmanlık (SAVAGE) ölçütü

2.2.1.2.1. İyimserlik (PLUNGER) ölçütü

Plunger tarafından önerilen bu teknikte karar vericinin probleme iyimser bir şekilde yaklaştığı varsayılır. Bu yaklaşımla, ödemeler matrisinde her bir alternatife en iyi değeri seçilir ve seçilen değerler arasında da en iyi değere sahip alternatif tercih edilir (Bayram, 2015, s. 39). Burada en iyi değer problemin ve alternatiflerin yapısına göre en yüksek fayda ya da en düşük maliyet olabilir. Buna göre iyimserlik ölçütünde karar vericinin benimseyeceği karar alternatifi ödemeler matrisine göre, fayda yönlü problemlerde (2.1) numaralı formülde gösterildiği gibi tespit edilir. Maliyet yönlü problemlerde ise (2.2) numaralı formülde gösterildiği gibi tespit edilir.

$$\max_i \left\{ \max_j (x_{ij}) \right\} \quad (2.1)$$

$$\min_i \left\{ \min_j (x_{ij}) \right\} \quad (2.2)$$

2.2.1.2.2. Kötümserlik (WALD) ölçütü

İlk defa 1940'lı yılların sonunda Abraham Wald tarafından ortaya atılan bir ölçüttür (Wald, 1947). Kötümserlik ölçütünde ödemeler matrisinde bu kez her bir seçeneğin en kötü değeri seçilir. Bu seçilen değerler arasından ise en iyi sonucu veren seçenek tercih edilir. Burada minimum faydanın maksimuma ulaştırılması hedeflenir (Bayram, 2015, s. 35). Fayda yönlü problemlerde (2.3) numaralı formül kullanılırken, maliyet yönlü problemlerde (2.4) numaralı formülden yararlanılır (Lezki vd., 2019, s. 30).

$$\max_i \left\{ \min_j (x_{ij}) \right\} \quad (2.3)$$

$$\min_i \left\{ \max_j (x_{ij}) \right\} \quad (2.4)$$

2.2.1.2.3. Uzlaşma (HURWICZ) ölçütü

Uzlaşma ölçütü, ilk defa 1951 yılında Leonid Hurwicz tarafından ortaya atılmış (Hurwicz, 1951) ve ilerleyen yıllarda geliştirilmiş bir ölçüttür (Arrow vd., 1972). Karar vericinin ne tam anlamıyla iyimser ne de tam anlamıyla kötümser olamayacağı tezi ile ortaya çıkan bu ölçütte, karar vericiden 0 ile 1 arasında bir iyimserlik katsayısı (α) ve bir de kötümserlik katsayısı ($1-\alpha$) belirlenmesi istenir. Her bir alternatife en iyi değeri

iyimserlik katsayısı ve her bir alternatifin en kötü değeri kötümserlik katsayısı ile çarpılır ve çarpım değerleri toplanır. Hesaplama sonucunda bulunan değerler alternatifin gerçeklik değeri olarak ifade edilir ve bu değerler içinden en yüksek değere sahip alternatif tercih edilir (Bayram, 2015, s. 41–42).

Fayda yönlü problemlerde gerçeklik değeri her bir alternatif için denklem (2.5) yardımıyla belirlenirken; maliyet yönlü problemlerde denklem (2.6) kullanılır.

$$GD(A_i) = \alpha \cdot \max(x_{ij}) + (1 - \alpha) \cdot \min(x_{ij}) \quad (2.5)$$

$$GD(A_i) = \alpha \cdot \min(x_{ij}) + (1 - \alpha) \cdot \max(x_{ij}) \quad (2.6)$$

2.2.1.2.4. Eş olasılık (LAPLACE) ölçütü

Laplace ölçütü, ilk olarak Thomas Bayes tarafından ortaya atılan (Bayes, 1763) ve Simon de Laplace tarafından geliştirilen (Laplace, 1820) bir karar verme tekniğidir (Earman, 2002). Gerçekleşmesi beklenen olayların gerçekleşme olasılıkları karar verici tarafından bilinmediğinde bu kriter, olasılıkları eşit olarak kabul etmeyi önerir. Olasılıklar, denklem (2.7) yardımıyla hesaplanır. (Bayram, 2015, s. 44).

$$P(\theta_j) = \frac{1}{n} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

Gerçekleşme olasılıkları eşit kabul edildiğinde, karar ortamı risk ortamına dönüşmüş olur. Risk ortamında ise beklenen değer hesaplaması yapılarak seçim işlemi gerçekleştirilir. Beklenen değer denklem (2.8) kullanılarak hesaplanır.

$$BD(A_i) = \sum P(\theta_j) \cdot x_{ij} \quad (2.8)$$

Fayda yönlü problemlerde en büyük beklenen değere sahip olan alternatif tercih edilirken; maliyet yönlü problemlerde ise en küçük beklenen değere sahip olan alternatif tercih edilir.

2.2.1.2.5. Pişmanlık (SAVAGE) ölçütü

Leonard J. Savage tarafından 1954 yılında geliştirilmiş bir tekniktir (Savage, 1954). Bu teknikte ödemeler matrisinden yola çıkılarak bir pişmanlık matrisi oluşturulur ve bu matris üzerinde elde edilecek maksimum pişmanlık minimize edilir.

Burada karar vericiden tercih edeceği alternatifin sonucunda elde edeceği değer ile tercih etmediği diğer alternatiflerden dolayı kaybedeceği değerlerin karşılaştırması

istenir. Bu şekilde her bir seçenek için bir pişmanlık değeri elde edilir ve en az pişmanlık değerine sahip alternatif en iyi alternatif olarak seçilir (Bayram, 2015, s. 36-37).

Fayda yönlü problemlerde, pişmanlık matrisinin oluşturulması için ilk adım olarak her bir çevresel faktör için ilgili sütundaki maksimum değer belirlenerek matrise eklenen yeni bir satırda ilgili olduğu sütuna yazılır. Maliyet yönlü problemlerde ise her bir çevresel faktör için ilgili sütundaki minimum değer belirlenir ve matrise yeni eklenen satırda ilgili olduğu sütuna yazılır.

Daha sonra fayda yönlü problemler için belirlenen maksimum değerlerden ilgili sütundaki diğer alternatif değerleri çıkartılarak Tablo (2.2)'de verilen pişmanlık matrisi elde edilir.

Tablo 2.2. Fayda yönlü problemler için pişmanlık matrisi

Çevresel Faktörler					
		θ_1	...	θ_j	Pişmanlık Değerleri
Alternatifler	A_1	$\max(x_{i1}) - x_{11}$	...	$\max(x_{ij}) - x_{1j}$	$\max(x_{1j})$
	A_2	$\max(x_{i1}) - x_{21}$	...	$\max(x_{ij}) - x_{2j}$	$\max(x_{2j})$
	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
	A_i	$\max(x_{i1}) - x_{i1}$	...	$\max(x_{ij}) - x_{ij}$	$\max(x_{ij})$

Maliyet yönlü problemlerde ise ilk adımda belirlenen minimum değerlerden ilgili oldukları sütunlardaki diğer alternatif değerleri çıkartılarak Tablo (2.3)'te verilen pişmanlık matrisi elde edilir.

Tablo 2.3. Maliyet yönlü problemler için pişmanlık matrisi

Çevresel Faktörler					
		θ_1	...	θ_j	Pişmanlık Değerleri
Alternatifler	A_1	$x_{11} - \min(x_{i1})$	...	$x_{1j} - \min(x_{ij})$	$\max(x_{1j})$
	A_2	$x_{21} - \min(x_{i1})$	...	$x_{2j} - \min(x_{ij})$	$\max(x_{2j})$
	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
	A_i	$x_{i1} - \min(x_{i1})$	...	$x_{ij} - \min(x_{ij})$	$\max(x_{ij})$

Burada belirtilmesi gereken önemli bir nokta, karar problemi ister fayda yönlü olsun ister maliyet yönlü olsun, yukarıda belirtilen hesaplamalarla elde edilen pişmanlık matrisi her iki problem yapısı için de maliyet yönlü bir matris olacaktır. Çünkü pişmanlık matrisi tercih edilmeyen alternatiflerden kaynaklanan varsayımsal kayıpları göstermektedir. Dolayısıyla karar verici pişmanlık matrisini değerlendirip en iyi alternatifi seçerken, en büyük pişmanlık değerleri içinden en küçük pişmanlık değerini belirleyecektir. Bu nedenle, her iki problem yapısında da elde edilen pişmanlık matrisinde her satırda yer alan maksimum değerler belirlenerek matrisin sonuna eklenen sütuna yazılır. Son adım olarak bu sütunda yer alan (en büyük pişmanlık) değerler içinden en küçüğü seçilerek bu değere ilişkin alternatif de en iyi alternatif olarak benimsenir.

2.2.1.3. Risk ortamında karar

Risk ortamında karar vermenin belirsizlik ortamında karar vermeden farkı, karar vericinin problemi etkileyen çevresel faktörlerin gerçekleşme olasılıklarını biliyor olmasıdır. Diğer bir ifadeyle, risk ortamları ölçülebilir belirsizliğin olduğu ortamlardır. Karar verme işlemi söz konusu bu olasılıklar dikkate alınarak yapılır (Can, 2018, s. 4). Karar verici çevresel faktörlerin belirli bir olasılıkla meydana gelebileceği bilgisini kabul eder ve olayların beklenenden farklı bir şekilde gerçekleşme ya da hiç gerçekleşmeme riskini göze alır.

Risk ortamlarında, alternatiflere ilişkin değerler çoğunlukla olasılık dağılımlarıyla belirlenir. Bu nedenle risk altında karar verme işlemi, alternatiflerin beklenen faydanın maksimizasyonu ya da beklenen zararın minimizasyonu amacıyla karşılaştırılması prensibine dayandırılarak yapılır (Oğuzlar, 2015 s. 50). İzleyen kesimde risk altında karar verme teknikleri sırayla açıklanmıştır.

2.2.1.3.1. Beklenen değer ölçütü

Beklenen değer ölçütü belirsizlik ortamında karar vermede kullanılan eş olasılık ölçütüne benzemektedir. Buradaki fark çevresel faktörlerin gerçekleşme olasılıklarının yani $P(\theta_j)$ değerlerinin bilinmesidir. Her bir alternatif için bu olasılıklar kullanılarak beklenen değerler daha önce tanımlanmış olan denklem (2.8)'de gösterildiği gibi hesaplanır ve fayda yönlü problemde maksimum; maliyet yönlü problemde ise minimum beklenen değere sahip olan alternatif tercih edilir (Oğuzlar, 2015, s. 51).

2.2.1.3.2. En büyük olasılık ölçütü

Bu ölçütte en yüksek gerçekleşme olasılığına sahip çevresel faktörün gerçekleşeceği görüşü karar verici tarafından benimsenir. Ödemeler matrisinde en yüksek olasılığa sahip çevresel faktör ile aynı sütunda yer alan alternatif değerleri arasından en yüksek ödeme değerine sahip alternatif seçilir (Oğuzlar, 2015, s. 54).

2.2.1.3.3. Beklenen fırsat kaybı ölçütü

Karar vericinin en az beklenen fırsat kaybı ile karar problemini çözüme kavuşturması esas alınır. Burada her bir karar sonucu için pişmanlık değerleri olasılıklarla çarpılarak beklenen fırsat kaybı değerleri elde edilir. Bunun için eğer problem fayda yönlü ise Tablo (2.2), eğer maliyet yönlü ise Tablo (2.3) kullanılarak bir pişmanlık matrisi oluşturulur. Bu matris ile elde edilen pişmanlık değerleri kriter olasılıklarıyla $P(\theta_j)$ çarpılarak beklenen fırsat kaybı değerleri hesaplanır. Hesaplanan beklenen fırsat kaybı değerleri, beklenen kaybı göstereceği için bunlar arasından en küçük değere sahip olan alternatif tercih edilir ve bu sayede fırsat kaybı en aza indirilmiş olur (Oğuzlar, 2015, s. 52).

2.2.2. Yönetim düzeyi açısından karar türleri

Yönetim düzeyi açısından kararlar üç başlık altında incelenmiştir. Bunlar stratejik kararlar, taktiksel kararlar ve operasyonel kararlardır (Lezki vd., 2019 s. 10). Yönetim düzeyi açısından karar türlerinin özellikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Stratejik karar: Etkileri uzun vadede ortaya çıkabilecek, belirsizlik ortamında üst yönetim tarafından verilen karmaşık ve sonuçları açısından önemli kararlardır.

Taktiksel karar: Stratejik kararların uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla risk ortamında orta düzey yönetim tarafından verilen ve genellikle faaliyete ilişkin kararlardır.

Operasyonel karar: Sonuçları kısa vadede görülebilecek olan belirlilik ortamında alt düzey yönetim tarafından verilen günlük, haftalık ya da aylık kararlardır.

2.2.3. Yapıları açısından karar türleri

Yapıları açısından ele alındığında karar türleri yapılandırılmış karar, yapılandırılmamış karar ve yarı yapılandırılmış karar olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır.

Bu sınıflandırma karar problemlerinin çözüm sürecinin programlanabilme özelliği temel alınarak yapıldığından bazı kaynaklarda programlanabilir karar, programlanamayan karar ve yarı programlanabilir karar olarak da yer bulmaktadır. Aşağıda bu karar türlerinin özellikleri kısaca açıklanmıştır.

Yapılandırılmış karar: Rutin kararlardır. Belirli bir programa bağlı ve düzenli olarak verilen kararlardır. Karar sürecinde kullanılacak teknik ve izlenilecek yol daha önceden belirlenmiştir. Yeniden bir çalışma yapılmasına gerek yoktur.

Yapılandırılmamış karar: Yapılandırılmış kararların aksine ilk defa ortaya çıkan problemlere ilişkin verilen kararlardır. İzlenecek yol ve kullanılacak teknik henüz belirlenmediği için ayrıntılı bir karar analizine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yarı yapılandırılmış karar: Karşılaşılan problemin belirli bir kısmının çözümü için uygulanması gereken teknik ve izlenmesi gereken yol daha önce belirlenmiştir ancak problemi tamamen çözmek için karar analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle orta kademe yönetimin verdiği kararları bu başlık altında göstermek mümkündür (Lezki vd., 2019, s. 10–11).

2.2.4. Bağlantılı olma durumu açısından karar türleri

Verilen bir kararın sonucunun başka bir kararı etkileyip etkilemediği dikkate alınarak yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmada karar türleri tek aşamalı karar ve çok aşamalı karar olmak üzere iki başlık altında ele alınmaktadır.

Tek aşamalı karar: Verilen kararın sonucunun başka kararları etkilemediği karar türüdür. Burada karar problemi ile ilgili tek bir karar verilmelidir ve söz konusu karar başka hiçbir kararı etkilemeden sonuca katkı sağlar.

Çok aşamalı karar: Verilen kararın sonucunun aynı anda veya daha sonra verilecek kararları etkilediği karar türüdür. Birbiriyle bağlantılı bir dizi kararın verilmesi gerektiği durumlar örnek olarak gösterilebilir (Lezki vd., 2019, s. 11).

2.2.5. Göz önünde bulundurulacak kriter açısından karar türleri

Göz önünde bulundurulacak kriter açısından karar sınıflandırması da tek kriterli karar ve çok kriterli karar olmak üzere iki başlık altında incelenir.

Tek kriterli karar: Tek bir amaca ulaşılmak istenen karar problemlerinde seçenekleri değerlendirmek için tek bir değerlendirme ölçütünün bulunduğu durumlarda tek kriterli karardan bahsedilir. Bu tarz karar problemlerinin sayısı oldukça azdır.

Çok kriterli karar: Birbiriyle çelişen pek çok değerlendirme ölçütünü içinde barındıran karar problemleri çok kriterli karar verme başlığı altında incelenir. Günümüzde karar problemlerinin büyük bir bölümü birden fazla kriter içerdiğinden çeşitli çok kriterli karar verme teknikleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir (Lezki vd., 2019, s. 11).

Bu çalışmanın konusunu oluşturan karar problemi de çok kriterli karar problemi olup uygulama bölümünde problemin yapısına uygun olarak çok kriterli karar verme tekniklerinden faydalanılmıştır. Bu nedenle izleyen kesimde öncelikle söz konusu karar teknikleri konusunda genel ve teorik bilgilere yer verilmiştir.

2.3. Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri, karar probleminde tanımlanan her bir alternatifi değerlendirmek için birden fazla ve genellikle birbirleriyle çelişen değerlendirme ölçütlerini göz önünde bulunduran tekniklerdir. Bu teknikleri kullanarak karar verici elindeki seçenekler arasından seçim yapabilir, bu seçenekleri sıralayabilir veya bu seçenekleri sınıflandırabilir (Gürsakal, 2015, s. 244).

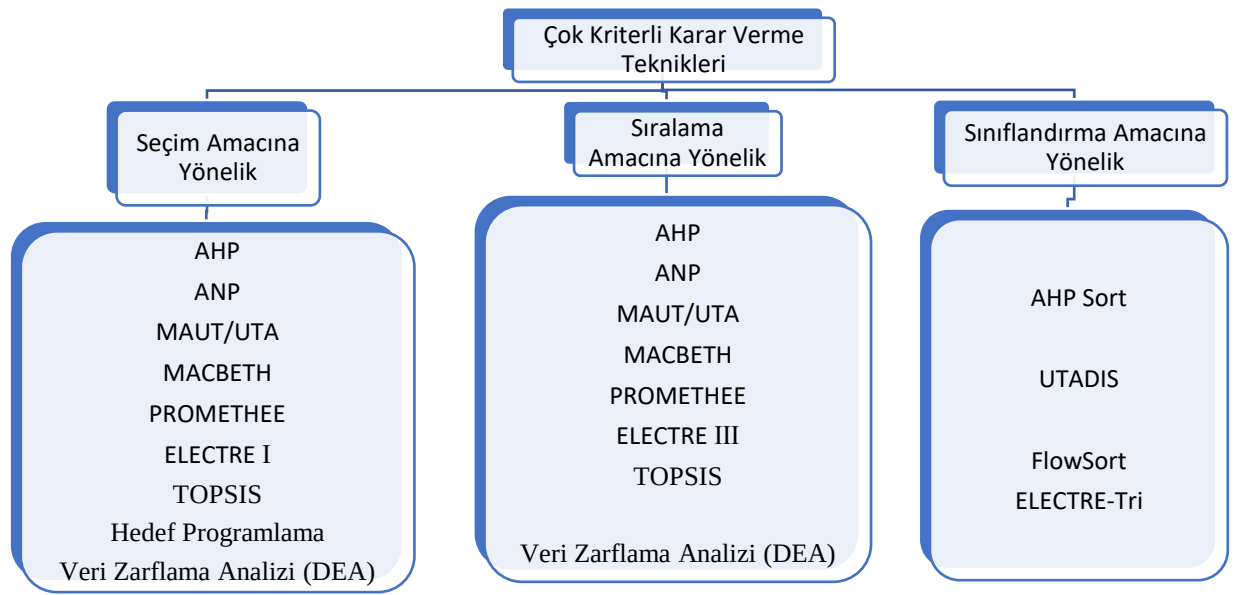
1960'lı yıllarda karar verme işlemine yardımcı olması amacıyla geliştirilmeye başlanan ÇKKV tekniklerinin temel hedefi alternatif ve kriter sayısı fazla olan karar problemlerini hızlı bir şekilde çözüme ulaştırmaktır (Turan, 2018, s. 16–18). ÇKKV teknikleri, probleme ait tüm bilgilerin sayısallaştırılarak modellenmesi temeline dayanır. Söz konusu durum, problemin yapısıyla birlikte tekniklerin de karmaşıklaşmasına ve işlem yükünün artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle tekniklerin kullanılmaya başlanması bilgisayar teknolojilerinin gelişmeye başlamasıyla doğru orantılı olmuştur (Aytaç vd., 2015).

Literatüre bakıldığında özellikle son yıllarda ÇKKV tekniklerinin kullanımının arttığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, sayısı bir hayli fazla olan tekniklerin birçok farklı alanda kullanılabiliyor olmasıdır.

Günümüzde karar verici ya da karar analisti karşılaştığı karar problemini çözmek için probleme en uygun karar verme tekniğini birçok farklı teknik arasından seçmek zorundadır. Burada karar vericinin ya da karar analistinin problemi tamamen anlaması ve

alternatifler ile kriterler bazında problemin amacına uygun olan tekniği belirlemesi gerekmektedir.

ÇKKV tekniklerinin farklı koşullar altında birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları olabilir. Bu durumda karar probleminin yapısı ve karar vericinin amaçları doğru bir teknik seçimi yapmak için çok önemlidir. ÇKKV tekniklerini problemlerin amaçları doğrultusunda seçim amacına yönelik, sıralama amacına yönelik ve sınıflandırma amacına yönelik olmak üzere üç ana başlık altında gruplandırmak mümkündür. Şekil (2.1)'de de görüleceği üzere ÇKKV tekniklerinin bazıları hem seçim hem sıralama amacına yönelik kullanılabilir. Bunun yanında bazı teknikler farklı amaçlara cevap verebilmeleri adına da yıllar içinde çeşitli aşamalar eklenerek geliştirilmişlerdir (Turan, 2018, s. 18–19).



Şekil 2.1. Çok kriterli karar verme tekniklerinin sınıflandırılması

Seçim amacına yönelik ÇKKV teknikleri: Birçok alternatifin olduğu karar problemlerinde, karar vericinin temel hedefi bu alternatifler arasından en iyi olanı seçmek ise seçim amacına yönelik çalışan bir veya birden fazla ÇKKV tekniğini kullanmalıdır. Bu teknikler karar vericiye alternatifler arasından problemin amacına en uygun seçeneği seçebilmesi için yardımcı olurlar.

Sıralama amacına yönelik ÇKKV teknikleri: Sıralama amacı güden ÇKKV teknikleri, karar vericiye problemdeki alternatifleri en iyiden en kötüye ya da en kötüden en iyiye

doğru sıralamasında yardımcı olurlar. Böylece karar verici alternatiflerin birbirleri karşısındaki yerini daha iyi bir şekilde görebilir.

Sınıflandırma amacına yönelik ÇKKV teknikleri: Karar vericinin öncelikli amacı problemde yer alan alternatifleri belirli kriterler veya tercihler doğrultusunda sınıflandırmak ise sınıflandırma amacına yönelik ÇKKV tekniklerini kullanabilir. Söz konusu teknikler farklı tasnif şekilleri kullanıyor olabilirler. Bu nedenle kullanılacak tekniğin özümsemesi önemlidir.

Bu çalışmanın konusunu oluşturan karar probleminde temel amaç, Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağını belirlemektir. Söz konusu karar sürecinin sonunda alternatiflerin en iyiden en kötüye doğru sıralanması ve böylece en iyi alternatifin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle çok kriterli karar verme tekniklerinden hem seçim hem de sıralama amacına yönelik olanların problemin amacına daha uygun olduğuna karar verilmiş ve uygulamada PROMETHEE, Multi-MOORA ve PSI teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca farklı tekniklerin uygulanması ile elde edilen sonuçlar da birbirleriyle karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Söz konusu tekniklerin teorik ayrıntıları izleyen kesimde aktarılmıştır.

2.3.1. PROMETHEE tekniği

Açık adı “The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evulation” olan PROMETHEE tekniği ilk defa 1982 yılında Brans tarafından ortaya atılmış, 1985 yılında Brans ve Vincke tarafından daha da geliştirilmiştir (Brans vd., 1985). PROMETHEE tekniği çok kriterli bir sıralama tekniğidir. Bu tekniği diğer ÇKKV tekniklerinden ayıran temel özelliği, ikili karşılaştırmalar sırasında kullandığı ve karar vericinin amaçları ve istekleri doğrultusunda farklılaşan fonksiyonlar kullanmasıdır. Teknik, altı farklı tercih fonksiyonundan faydalanarak karar vericinin sıralamak istediği seçenekleri her kriter için farklı bir fonksiyon kullanarak değerlendirmesine olanak tanır. Bu sayede karar verici her kriter için ayrı ayrı göz ardı etmek istediği sonuçları elimine edebilir veya değerlendirmeye almak istediği noktaları gözlemleyebilir (Brans vd., 2005). Ancak AHP, TOPSIS vb. tekniklerin aksine PROMETHEE tekniği ağırlık belirlemede yol gösterici niteliğe sahip değildir. Teknik uygulayıcısının farklı teknikler yardımıyla kriter ağırlıklarını ayrıca belirlemesi gerekmektedir (Dağ vd., 2018).

Teknik en başında PROMETHEE-I ve PROMETHEE-II olarak tanıtılmış, akabinde III, IV, V ve VI olarak geliştirilerek çeşitlendirilmiştir. Kısaca PROMETHEE-I tekniği kısmi, PROMETHEE-II tekniği ise tam sıralama yapmaktadır (Brans vd., 1985, s. 228). Bu iki ana adımı takiben geliştirilen PROMETHEE-III, aralıkları temel alarak sıralama işlemini gerçekleştirmektedir. PROMETHEE-IV, sürekli durumlar için sıralama yaparken V, bölümlendirme kısıtlarına sahip sıralama yapar ve son olarak geliştirilen PROMETHEE-VI ise insan beyninin temsilinin yapıldığı sıralama olarak kendine literatürde yer bulmuştur (Dağ vd., 2018, s. 184).

PROMETHEE tekniğinde alternatifler sıralanırken, alternatifler arasındaki ilişkiler de dikkate alınmıştır. İki alternatif karşılaştırılarak tercih belirlenmek istendiğinde, karşılaştırılacak ilk alternatifin ilgili kriterdeki değeri a ile ikinci alternatifin ilgili kriterdeki değeri b ile temsil edilsin. İki alternatifin karşılaştırılması sonucunun tercih açısından ifadesi tercih fonksiyonu P ile tanımlanır. Bu fonksiyon a ve b alternatifleri arasındaki üstünlük durumunu ya da farksızlığı gösterir. Uygulamada, bu tercih fonksiyonu genellikle iki alternatif değeri arasındaki farktır ve üstünlük ilgili kriterin fayda yönlü ya da maliyet yönlü olmasına bağlı olarak sırasıyla (2.9) ve (2.10) numaralı denklemler ile gösterilir (Brans vd., 2005, s. 169).

$$P(a, b) = F_j[d(a, b)] \quad 0 \leq P(a, b) \leq 1 \quad (2.9)$$

$$P(a, b) = F_j[-d(a, b)] \quad 0 \leq P(a, b) \leq 1 \quad (2.10)$$

$P(a, b)$ fonksiyonu azalmayan bir fonksiyon olmalıdır. Bu nedenle fayda yönlü kriterlere ait alternatif değerleri karşılaştırılırken $d(a, b) = f(a) - f(b)$ şeklinde hesaplanan (d) değeri pozitif sonuç verdiğinde a alternatifinin b alternatifinden üstün olduğu anlaşılır. (d) değeri negatif olduğunda ise b alternatifi a alternatifinden üstün olup $P(a, b)$ tercih fonksiyonu 0 değerini alır.

Eğer kriter maliyet yönlü ise o kritere ait alternatif değerleri karşılaştırılırken $d(a, b) = f(a) - f(b)$ biçimindeki hesaplama sonucu negatif bir değer olduğunda a alternatifinin b alternatifinden üstün olduğu anlaşılır. Tersine (d) değeri pozitif olduğunda ise b alternatifinin a alternatifinden üstün olduğu kabul edilir ve $P(a, b)$ tercih fonksiyonu 0 değerini alır (Vinodh vd., 2012, s. 5305).

PROMETHEE tekniğinin adımlarına geçilmeden önce tekniği aynı sınıfta yer aldığı diğer sıralama tekniklerinden ayıran, altı tercih fonksiyonu tipi açıklanmıştır.

Birinci tip (Olağan) fonksiyon, tüm fonksiyonlar arasında en kolayıdır. PROMETHEE tekniğinde, alternatifler arasındaki en küçük farklılıkların bile kararı etkileyeceği savunulur. Pratikte alternatifler arasındaki küçük farklılıkları tespit etmek zor olabileceğinden yalnızca karar vericinin alternatifler arasından en üstün olanını seçme yönünde kesin bir tercihi olduğu durumlarda kullanılır. Karar verici herhangi bir parametre tanımlamak zorunda değildir (Brans vd., 2005, s. 170). Olağan tip tercih fonksiyonu denklem (2.11) ile gösterilmiştir.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

İkinci tip (U Tipi) fonksiyon, pratikte kullanımı sınırlı olan bir fonksiyondur. Bu tip fonksiyon kullanılmak istendiğinde karar verici yalnızca farksızlık değeri olarak adlandırılan ve (q) ile temsil edilen bir parametreyi belirlemek zorundadır. Bu parametre, karşılaştırılan alternatifler için öyle büyük bir değer olmalıdır ki bu değer altındaki tüm alternatif değerleri karar verici için farksız olmalıdır. Bu fonksiyonda karşılaştırılan iki alternatif söz konusu bu farksızlık değerini aşmadığı sürece karar verici için farksızdır. Diğer bir ifadeyle, iki alternatife ait tercih değerleri arasındaki fark (d), farksızlık değerini (q), aşmadığı sürece alternatifler farksızdır. Ancak bu değer aşıldığında kesin tercih söz konusu olur (Brans vd., 2005, s. 170). Bu fonksiyon denklem (2.12) ile gösterilmiştir.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases} \quad (2.12)$$

Üçüncü tip (V Tipi) fonksiyon, karar vericiye $f(a)$ ve $f(b)$ arasında kademeli olarak büyüyen farklar için yine kademeli olarak a alternatifini b alternatifine tercih etmesine yardımcı olur (J. P. Brans vd., 1985, s. 650). Bu tip fonksiyonda karar verici kesin tercih değeri olarak adlandırılan ve (p) ile temsil edilen bir parametre belirlemek zorundadır. İki tercih değeri arasındaki fark (d), kesin tercih parametresi (p)'ye ulaşana kadar karar vericinin üstün alternatifi seçme yoğunluğu (d) ile doğru orantılı olarak artar. Aradaki fark, (p) değerini aştığında artık kesin tercihten söz edilebilir. Kesin tercih değeri, ilgili kriterdeki alternatif değerleri için öyle düşük bir değer olmalıdır ki bu değer üzerindeki her değer karar verici için ilgili kriterde kesin tercih olmalıdır (Brans vd., 2005, s. 170). V tipi tercih fonksiyonu denklem (2.13) ile gösterilmiştir.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ d/p, & 0 \leq d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases} \quad (2.13)$$

Dördüncü tip (Seviyeli) fonksiyon, $f(a)$ ve $f(b)$ arasındaki farkın karar verici tarafından belirlenen farksızlık değerini geçmediği durumlarda a ve b alternatiflerinin farksız olduğu görüşünü temel alır. Bu fonksiyon için karar verici hem farksızlık değerini (q) hem de kesin tercih değerini (p) aynı anda belirlemelidir. Eğer alternatiflerin ilgili kriterdeki karşılaştırma değeri bu iki parametre değerinin arasında kalırsa karşılaştırıldığı alternatife göre üstün olan alternatif de karar verici tarafından zayıf tercih olarak değerlendirilir (Brans vd., 2005, s. 170). Seviyeli tip tercih fonksiyonu denklem (2.14) ile gösterilmiştir.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1/2, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases} \quad (2.14)$$

Beşinci tip (Doğrusal) fonksiyon, karar vericinin farksızlık değeri q ve kesin tercih değeri p belirlemesi gereken bir diğer fonksiyon tipidir. Burada karar verici farksızlık ve kesin tercih parametrelerini belirler ve karar vericinin tercihi farksızlık değeri q ve kesin tercih değeri p arasında seviyeli tip tercih fonksiyonundan farklı olarak doğrusal bir uzanım izler (Brans vd., 2005, s. 170). Doğrusal tip tercih fonksiyonu denklem (2.15) ile gösterilmiştir.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q}, & q < |d| \leq p \\ 1, & d > p \end{cases} \quad (2.15)$$

Altıncı tip (Gaussian) fonksiyon, ilgili değerlendirme kriteri açısından eğer karar verici alternatiflerin ortalamadan sapma değerlerini önemsiyorsa kullanılır. Burada karar vericinin σ standart sapma parametresini hesaplaması gerekmektedir. Bu fonksiyon süreksizlik içermez ve sonucun kararlılığını garanti eder (Brans vd., 2005, s. 170; Özdağoğlu, 2013, s. 307). Fonksiyon denklem (2.16) ile gösterilmiştir.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{\{-\frac{d^2}{2\sigma^2}\}}, & d > 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

PROMETHEE tekniği yedi adımlı bir algorithmadan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıda sıralanmıştır.

1. adım: Probleme ilişkin alternatifler, kriterler ve ağırlıklar tespit edilerek Tablo (2.4)'te verilen karar matrisi oluşturulur. Bu teknik, kriter ağırlıklandırmayla ilgili herhangi bir yol önermediğinden karar verici literatürde önerilen ağırlıklandırma tekniklerinden herhangi birini seçerek kriterleri ağırlıklandırır.

Tablo 2.4. PROMETHEE tekniği karar matrisi

	<i>Kriter₁ (f₁)</i>	<i>Kriter₂ (f₂)</i>	...	<i>Kriter_j (f_j)</i>
<i>Alternatif a</i>	$f_1(a)$	$f_2(a)$	...	$f_j(a)$
<i>Alternatif b</i>	$f_1(b)$	$f_2(b)$	...	$f_j(b)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
<i>Alternatif n</i>	$f_1(n)$	$f_2(n)$	...	$f_j(n)$
<i>Ağırlıklar</i>	w_1	w_2	...	w_j

2. adım: Her bir kriter için, karar vericinin o kriter üzerindeki tercihlerini yansıtmaya aracı olacak tercih fonksiyonları belirlenir.

3. adım: Alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılır ve kriterler için seçilen tercih fonksiyonları kullanılarak ortak tercih fonksiyonları $P_j(a, b)$ hesaplanır.

4. adım: Ortak tercih fonksiyonları kullanılarak her bir alternatif çiftine ait tercih indeksleri belirlenir (Özdağoğlu, 2013, s. 308). Bu işlem gerçekleştirilirken denklem (2.17)'den faydalanılır.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j * P_j(a, b) \quad (2.17)$$

Burada indeks değeri olarak hesaplanan $\pi(a, b)$ değerinin 0'a yakın olması a alternatifinin b 'ye göre zayıf bir tercih olduğunu gösterirken ilgili indeks değerinin 1'e yakın olması ise a alternatifinin b alternatifine göre güçlü bir tercih olduğunu gösterir (Dağ vd., 2018, s. 185).

5. adım: Alternatiflerin pozitif üstünlükleri denklem (2.18) ve negatif üstünlükleri denklem (2.19) kullanılarak belirlenir. Burada, a alternatifinin diğer herhangi bir alternatife göre tercih edilme derecesi a alternatifinin pozitif üstünlüğünü ve tam tersi, herhangi bir x alternatifinin a alternatifine göre tercih edilme derecesi de a alternatifinin

negatif üstünlüğünü verir. Burada “ x ”, a alternatifi dışındaki herhangi bir alternatifi temsil eder.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (2.18)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (2.19)$$

6. adım: Alternatiflerin kısmi sıralamaları belirlenir. Kısmi sıralamalar alternatiflerin birbirlerine göre tercih edilme durumlarının, birbirlerinden farksız olan alternatiflerin ve birbirleriyle karşılaştırılamayacak olan alternatiflerin tespit edilmesini sağlar (Özdağoğlu, 2013, s. 308). Buna göre, (2.20) numaralı eşitlikler a alternatifinin b 'den üstün olduğu durumları temsil eder. (2.21) numaralı eşitlik a alternatifi ve b alternatifinin farksız olduğu durumları ve son olarak (2.22) numaralı eşitlikler ise alternatif çiftinin karşılaştırılamaz olduğunu gösterir (Dağ vd., 2018, s. 186).

$$\begin{aligned} \Phi^+(a) &> \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) &> \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) &= \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \Phi^+(a) &> \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) > \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) &< \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{aligned} \quad (2.22)$$

7. adım: Net üstünlükler belirlenir ve bu net üstünlüklerden faydalanılarak tam sıralamalar yapılır. Alternatiflerin tam sıralamasının yapılmasını sağlayacak olan net üstünlüklerin hesaplanması denklem (2.23) yardımıyla gerçekleşir. Net üstünlük değerleri -1 ile 1 arasında değer alır (Dağ vd., 2018, s. 186).

$$\Phi^{net} = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (2.23)$$

2.3.2. MOORA tekniği

Açık adı “Multi-Objective Optimization By Ratio Analysis” olan ve 2006 yılında Willem Karel M. Brauers ve Edmundas Kazimieras Zavadskas tarafından tanıtılan teknik (W. Brauers vd., 2006), kısa zaman içerisinde gerek yerel gerekse de yabancı yazında sıklıkla yer bulmuştur. Bu teknik de tıpkı PROMETHEE tekniği gibi bir ağırlıklandırma

tekniki içermemektedir. Bununla birlikte ağırlık değeri kullanılmadan ya da eşit ağırlıklarla çalışıldığında da başarılı sonuçlar elde edilmektedir (Basar vd., 2019, s. 393–394).

MOORA tekniği içinde barındırdığı birçok farklı yaklaşımla sıralama yapılmasına olanak sağlayan bir tekniktir (Brauers vd., 2008, s. 184–185). Bu tekniğin özelliklerinden biri de işlem ağırlığının diğer tekniklerden görece az olmasıdır (Önay, 2018, s. 233). Söz konusu nedenle tekniğin tercih edilebilirliğinin arttığı söylenebilmektedir. Teknik, belirli kriterlere göre sıralanması istenen alternatiflerin sıralamasını yapmak suretiyle çalışır. Bu sıralamayı yaparken de kriterlerin fayda yönlü mü yoksa maliyet yönlü mü olduğunu doğru bir şekilde belirlemek önemlidir. Bu sayede teknik, tüm amaçları dikkate almış olur. MOORA tekniği alternatif ve kriter etkileşimlerini parça parça değil bir arada ele alır (Brauers vd., 2012 s. 5).

Yukarıda belirtildiği gibi teknik, içerisinde çeşitli yaklaşımlar barındırır. Bu yaklaşımlar sırasıyla Oran, Referans Noktası, Tam Çarpım formu ve Multi-MOORA yaklaşımlarıdır (Brauers vd., 2012 s. 8). Bu yaklaşımlar ilerleyen kesimde açıklanmıştır.

Teknik dört adımlı bir aloritmadan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıda sıralanmıştır.

1. adım: Alternatifler ve kriterler belirlenir. Kriterlerin yönleri tespit edilir ve tercih ediliyorsa kriterlerin ağırlık değerleri farklı teknikler aracılığı ile hesaplanır. Kriterlere ağırlık atamasının yapılması bu teknikte şart değildir ve karar vericinin tercihinin bırakılmıştır. Tüm veriler hazır olduğunda karar matrisi oluşturulur.

2. adım: Normalizasyon işlemi yapılarak birimlerinden arındırılmış değerler elde edilir. Bu işlem denklem (2.24) kullanılarak gerçekleştirilir. Normalizasyon işlemi, farklı birimlerdeki verilerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi için yapılmaktadır. Bu işlem sayesinde farklı ölçüm birimlerindeki kriter değerleri $[0 - 1]$ aralığına indirgenir (Ecer, 2020, s. 29-30). Denklemden i , i . alternatifi ve j , j . kriteri temsil eder. Burada X_{ij}^* , i . alternatifi, j . kriter için olan değerinin birimlerinden arındırılmış halidir.

$$X_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.24)$$

3. adım: MOORA-Oran, MOORA- Referans Noktası ve MOORA-Tam Çarpım formu yaklaşımları sırayla ya da içlerinden herhangi biri veya ikisi seçilerek uygulanır. Kullanılan yaklaşımların sonucunda alternatif sıralamaları elde edilir.

4. adım: Eğer birden fazla yaklaşım kullanılmışsa elde edilen sıralamalar Multi-MOORA yaklaşımı yardımıyla karşılaştırılarak nihai sıralamalar elde edilir ve teknik sonlandırılır. Eğer teknik uygulanırken tek bir yaklaşım aracılığıyla sıralama yapıldıysa bu teknik 3. adımda sonlanır.

2.3.2.1.1. MOORA- oran yaklaşımı

MOORA tekniğinin ilk iki adımı uygulanır ve normalize edilmiş karar matrisi elde edilir. Eğer ilk adımda kriterler için ağırlık değerleri belirlendiyse bu değerler, normalize edilmiş karar matrisinin elemanları ile çarpılır ve her bir alternatifin ağırlıklı normalize matris değerleri elde edilir. Eğer ağırlık değerleri belirlenmediyse normalize matrisin değerleri olduğu gibi alınır. Elde edilen bu değerlerden fayda yönlü kriterlerin değerleri kendi içlerinde toplanır. Yine elde edilen bu değerlerden maliyet yönlü kriterlerin değerleri de kendi içlerinde toplanır ve fayda yönlü kriter değerlerinin toplamından maliyet yönlü kriter değerleri toplamı çıkartılarak alternatiflerin performans skorları hesaplanır. Bu işlem için denklem (2.25)'den faydalanılır (Ecer, 2020, s. 234). Burada performans skorları, y_i^* değerleridir.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g X_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^m X_{ij}^* \quad (2.25)$$

Eşitlik (2.27) kullanılarak elde edilen performans skorları büyükten küçüğe doğru azalan şekilde sıralanır ve en yüksek skora sahip olan alternatif tercih edilir (Brauers vd., 2008, s. 184). Eğer MOORA tekniği içerisindeki diğer yaklaşımlar da kullanılmak isteniyorsa, bu yaklaşım performans skorları sıralandıktan sonra sonlandırılır.

2.3.2.1.2. MOORA- referans noktası yaklaşımı

MOORA tekniğinin referans noktası yaklaşımında, referans noktası Tchebycheff'in min-max metrik değeri kullanılarak seçilir (Brauers vd., 2008, s. 185). Bu yaklaşımda referans noktaları olarak kriterlerin en iyi değerleri tespit edilir ve bir referans serisi elde edilir. En iyi değer, fayda yönlü bir kriterde en büyük değer iken maliyet yönlü bir kriterde en küçük değerdir (Ecer, 2020, s. 235).

Referans noktası yaklaşımında MOORA tekniği ile önerilen ilk iki adım gerçekleştirilir ve normalize edilmiş karar matrisi elde edilir. Eğer kriterler için ağırlık

değerleri kullanılıyorsa bu ağırlık değerleri ile normalize matris değerleri çarpılır ve ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur. Yukarıda açıklandığı şekilde referans değeri (r_i) (eğer ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi kullanılacaksa referans değerleri bu matris içerisinde) belirlenir ve bu değerlerden normalize edilmiş karar matrisine (ya da ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisine) ait değerler çıkartılarak matris değerlerinin referans değerden sapmaları (d_{ij}) hesaplanır. Bu hesaplama için denklem (2.26)'den faydalanılır.

$$d_{ij} = |r_i - x_{ij}^*| \quad (2.26)$$

Sapma değerleri belirlendikten sonra denklem (2.27)'den faydalanılarak alternatif sıralamaları elde edilir. Diğer bir ifadeyle elde edilen değerlerden en küçük değere sahip olan alternatif tercih edilir.

$$P_i = \min_j \{ \max_i (d_{ij}) \} \quad (2.27)$$

Referans noktası yaklaşımı tek başına kullanılıyorsa seçim işlemi gerçekleştirilir. Eğer diğer yaklaşımlarla bir arada kullanılacaksa yalnızca sıralama işlemi yapılır ve yaklaşım sonlandırılır.

2.3.2.1.3. MOORA- tam çarpım formu yaklaşımı

Bu yaklaşımda normalize edilmiş değerler matrisi ve ağırlık değerleri kullanılmaz (Brauers vd., 2012, s. 15) MOORA tekniğinin birinci adımında oluşturulan karar matrisi kullanılır. Matris değerleri kriterin fayda ya da maliyet yönlü olmasına göre (2.28) numaralı denklemde ilgili yerlere yazılır. Fayda yönlü kriter değerlerinin çarpımları A_i , maliyet yönlü kriter değerlerinin çarpımları ise B_i ile ifade edilir. Fayda yönlü kriter değerlerinin çarpımlarının maliyet yönlü kriter değerlerinin çarpımına bölünmesi ile her alternatif için tek bir değer (U_i) belirlenir. Sonrasında bu belirlenen değerlerin artan yönlü sıralanması ile yaklaşım sonlanır (Brauers vd., 2011, s.179-180).

$$U_i = \frac{A_i}{B_i} = \frac{\prod_{g=1}^l x_{gi}}{\prod_{k=l+1}^n x_{ki}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad l = \text{maliyet yönlü kriter sayısı} \quad (2.28)$$

2.3.2.1.4. Multi- MOORA yaklaşımı

Bu yaklaşım sıra baskınlık teorisi dikkate alınarak MOORA tekniğinin çeşitli yaklaşımlarıyla bulunan sıralamaları nihai bir sıralama olarak karar vericiye sunan bir tekniktir (Tian vd., 2017, s.587-589). Sıra baskınlık teorisi, belirli bir ordinal sıralama ölçeği ile başka ordinal sıralama ölçeğinin değiştirilebileceğini ortaya koyan bir teoridir. Bu teoride yer alan mutlak baskınlık, genel baskınlık, geçişlilik, eşitlilik ve döngüsel muhakeme özellikleri kullanılarak; Oran Metodu yaklaşımı, Referans Noktası yaklaşımı ve Tam Çarpım Formu yaklaşımı ile elde edilen sıralamalar karşılaştırılır ve tek bir Multi-MOORA sıralaması elde edilmiş olur (Brauers vd., 2011, s. 181–182; Ecer, 2020, s. 236–237).

Baskınlık teorisinin uygulanması için alternatiflerin her bir yaklaşım ile yerleştirildikleri sıralamalar $(x_O - x_R - x_T)$ olarak gösterilir. Bir alternatifin oran yaklaşımı sonucunda elde ettiği sıralaması x_O , referans noktası yaklaşımı sonucunda elde ettiği sıralaması x_R , tam çarpım formu yaklaşımı sonucunda elde ettiği sıralaması ise x_T şeklinde ifade edilir. Her bir yaklaşım için sıra değerlerinin $a < b < c < d < e$ gibi devam eden şekilde sıralandığı varsayılır.

Bir alternatif MOORA tekniğinde kullanılan yaklaşımlar ile elde edilen sıralamalarda diğer alternatiflerden baskınsa yani baskınlık teorisiyle gösterimi (a-a-a) ise bu alternatif mutlak baskındır ve a sırasında yer alır. Bir alternatifin sırası üç tekniğin ikisinde aynı ise genel baskınlık durumu doğar. Bir alternatifin sıralaması (c-a-a) ve ikinci bir alternatifin sıralaması (b-d-d) olduğunda birinci alternatif ikinci alternatife genel baskındır. Kendisinden daha baskın bir alternatif yoksa birinci alternatif a sırasında yer alır.

Geçişlilik özelliğinde eğer a, b'ye baskın ve b de c'ye baskınsa a'nın aynı zamanda c'ye baskın olduğu kabul edilir. Eşitlilik özelliği ise mutlak eşitlilik ve kısmi eşitlilik olmak üzere ikiye ayrılır. İki alternatifin de sıralamasının (c-c-c) olması mutlak eşitliği ifade ederken yalnızca bir yaklaşımda aynı sırayı almaları da kısmi eşitliği ifade eder. Eğer alternatifler geçişlilik ve baskınlık koşullarını sağlamıyorlarsa döngüsel muhakeme özelliği devreye girer. Birinci alternatif, ikinci alternatife genel baskın ve ikinci alternatif, üçüncü alternatife genel baskın iken geçişlilik özelliği gereği birinci alternatifin üçüncü alternatife genel baskın olması gerekir. Ancak üçüncü alternatif, birinci alternatife genel baskın ise bu durumda döngüsel muhakeme özelliğinden dolayı her üç alternatife de aynı sıra verilir (Brauers vd., 2011, s. 181–182; Ecer, 2020, s. 236–237). Multi-MOORA

yaklaşımı ile elde edilen sıralamalarda ilk sıraya yerleşen alternatif tercih edilir (Brauers vd., 2012, s. 19)

2.3.3. Tercih indeksi tekniği (PSI)

Kriterlerin görece önemlerini belirlemeye ihtiyaç duymayan tercih indeksi, kısa adıyla PSI (Preference Selection Index) tekniği 2010 yılında Maniya ve Bhatt tarafından önerilmiştir (Maniya vd., 2010). Teknik, karmaşık hesaplamalar barındırmaması nedeniyle uygulama kolaylığı sağlamaktadır.

PSI tekniğinde her bir alternatif için tercih indeksi belirlenir ve değeri en yüksek olan alternatif tercih edilir (Maniya vd., 2010).

Teknik beş adımlı bir algorithmadan oluşmaktadır.

1. adım: Karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi n alternatif ve m kriterden oluşmak üzere $n \times m$ şeklindedir.

2. adım: Karar matrisinin normalizasyonu ilgili kriterin fayda yönlü ya da maliyet yönlü olmasına göre sırasıyla denklem (2.29) ya da denklem (2.30) yardımıyla gerçekleştirilir. Normalize değerler r_{ij} ile ifade edilir.

$$r_{ij} = x_{ij}/x_j^{max} \quad (2.29)$$

$$r_{ij} = x_j^{min} / x_{ij} \quad (2.30)$$

3. adım: Tercih varyans değeri (PV_j) denklem (2.31) kullanılarak her bir kriter için hesaplanır.

$$PV_j = \sum_{i=1}^n [r_{ij} - \bar{R}_j]^2 \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)'te kullanılan $\bar{R}_j$ ifadesi kritere ait ortalaması alınmış normalize değerdir ve denklem (2.32) yardımıyla hesaplanır.

$$\bar{R}_j = 1/n * \sum_{i=1}^n r_{ij} \quad (2.32)$$

4. adım: Denklem (2.33) ve (2.34) yardımıyla genel tercih değeri (ψ_j) hesaplanır. Bu adımda her bir kriterin genel tercih değerinin belirlenmesi için önce tercih değerlerindeki sapmalar (Φ_j) hesaplanır. Burada tercih değerlerinin toplamı 1'e eşit olmalıdır.

$$\Phi_j = |1 - PV_j| \quad (2.33)$$

$$\psi_j = \Phi_j / \sum_{j=1}^m \Phi_j \quad (2.34)$$

5. adım: Son adımda tercih indeksi hesaplanır. Karar verici alternatiflerini bu indekse göre sıralar ve ilk sıradaki alternatif tercih edilir. Tercih indeksi (2.35) numaralı denklem yardımıyla hesaplanır.

$$I_i = \sum_{j=1}^m (R_{ij} \times \psi_j) \quad (2.35)$$

2.4. Borda sayım tekniği

Bu teknik, 1784 yılında Jean- Charles Borda tarafından önerilmiştir (Borda, 1781). Alternatifleri, farklı karar vericilerin bireysel tercihlerinin toplamına göre sıralamayı hedefleyen bir tekniktir (Black, 1976, s. 1).

Esasında bağımsız bir karar verme tekniği olan Borda Sayım tekniği, iki veya daha fazla karar verme tekniğiyle elde edilen sıralamaları, rasyonel tek bir sıraya indirmek için de kullanılabildiğinden bir veri birleştirme tekniği olarak da anılmaktadır (Saari, 1985).

Farklı karar teknikleri ile bulunan sıralamalarda en son sırada yer alan alternatiflere sıfır (0) puan, bir sonrakine bir (1) puan ve ilk sıradakine (n-1) puan verilmek üzere her bir teknik için yapılan sıralamalar puanlandırılır. Sonrasında her bir alternatifin Borda skorunu bulmak üzere her teknikte aldığı puanlar toplanır. Tüm alternatiflere Borda skorları atandıktan sonra bu skorlar büyükten küçüğe sıralanarak nihai rasyonel tercih sıralaması elde edilir (Black, 1976, s. 2; Emerson, 2013, s. 355–356).

B_k^i , k. sıralayıcının belirlediği i. alternatifin sırasını göstermek üzere, i alternatifinin Borda skoru denklem (2.36) yardımıyla hesaplanır.

$$B(i) = \sum_{k=1}^K B_k^i \quad (2.36)$$

Bu çalışmada ele alınan karar probleminin çözümü için önce yukarıda belirtilen farklı çok kriterli karar verme teknikleri ile sonuçlar elde edilmiş ve daha sonra Borda sayım tekniği yardımı ile elde edilen sonuçlar ortak bir paydada değerlendirilmiştir.

Veri derleme esnasında karar problemi için belirlenen bazı kriterlerin değerlerinin sözel, bazılarının ise sayısal olduğu görülmüştür. Çözüm teknikleri uygulanırken karmaşa

yaşanmaması adına sözel verilerin sayısal değerlere çevrilmesine karar verilmiştir. Bu işlem için de bulanık küme teorisinden yararlanılmıştır. Bu nedenle izleyen kesimde bulanık küme teorisine ve bu teori yardımıyla sözel verilerin nasıl sayısallaştırılabileceğine değinilmiştir.

2.5. Bulanık Küme Teorisi

Günlük hayatta kullanılan nesnellik içermeyen ve yargı farklılıkları nedeniyle herkesçe cevabı farklı olan sorularla sıkça karşılaşılır. Bir insanın genç veya yaşlı olduğu, boyunun uzun ya da kısa olduğu, bir arabanın hızlı ya da yavaş gittiği kişilerin bakış açılarına göre değişiklik gösterebilir. 10 yaşındaki bir çocuğa göre 30 yaşında olan bir adam yaşlıyken, 60 yaşındaki bir kadına göre genç sayılabilir. Bu tarz kesin olmayan cevaplarla ya da verilerle karşılaşılan problemlerde bu muğlaklıkları modellemek ve sayısallaştırmak için bulanık mantık teorisinden faydalanılır (Altaş, 1999, s. 80).

Bulanık Küme kavramı ilk defa Lotfi A. Zadeh tarafından (Zadeh, 1965) ortaya atılmıştır. Takip eden süreçte Zadeh, olasılık ve belirsizlik kavramlarından hareketle yazdığı makaleler ile bulanık mantığı anlatmış ve kullanım alanlarını tanıtmıştır (Zadeh vd., 1975). 1975'lerin başına gelindiğinde bu tanıtımların ışığında bulanık kümeler ve bulanık mantık araştırmalarda kullanılmaya başlanmıştır (Altaş, 1999, s. 81).

Bulanık mantık küme temelli bir yapı olarak düşünülebilir. Bir arabanın hızı örneği üzerinden gidildiğinde hızlı ve yavaş olmak üzere iki küme elde edilmiş olur. Belirli hız değerlerini hızlı kümesine ve diğer değerleri de yavaş kümesine dahil etmek mümkündür. Bulanık mantıkta bu iki kümeyi ayrı ayrı iki küme olarak düşünmek yerine kümelerin birleşim ve kesişimleri kullanılır. Belirli bir derecede hızlı ve belirli bir derecede yavaş olarak nitelendirilen hızların varlığından söz edilir ve keskin bir ayırım yapmak yerine eğimlerden yararlanılır (Altaş, 1999, s. 81).

Bu çalışmada ÇKKV teknikleri kullanılarak uygulama yapıldığından bulanık kümelerin tüm varyasyonları üzerinde durulmamış, sadece karar verme teknikleriyle bütünleştirmede gerekli olan temel kavram ve hesaplama operatörleri hakkında bilgi verilmiştir.

Bulanık küme teorisi, klasik küme teorisinden farklı olarak elemanların belirli bir kümeye üyelik dereceleriyle ilgilenmektedir. Bu teoride X uzayının bir alt kümesi olan $\tilde{A}$

alt kümesi, üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ile denklem (2.37)'da verilen biçimde tanımlanır (Buckley vd., 2002, s. 25).

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (2.37)$$

Burada $x \in X$, tüm elemanların X uzayına ait olduğu anlamını taşır ve $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0,1]$ biçiminde ifade edilir. $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ olmak üzere ayrık bir sonlu küme olarak tanımlanırsa, onun bir bulanık alt kümesi olan $\tilde{A}$, (2.38) numaralı denklemle ifade edilir. Sonlu olmayan kümelerde ise $\tilde{A}$ denklem (2.39) yardımıyla ifade edilir.

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{A}}(x) / x_i \quad (2.38)$$

$$\tilde{A} = \int_x \mu_{\tilde{A}}(x) / x \quad (2.39)$$

Bulanık kümeler, dilsel (sözel) verilerin problemi tanımlamada kullanıldığı durumlarda söz konusu olan belirsizlikleri giderebilmek için tasarlanmıştır. Daha önce de açıklandığı gibi 30 yaşındaki bir adamın genç ya da yaşlı olması farklı kişilerin bakış açılarına göre değişkenlik gösterir. Kimi bu kişiyi “çok genç” kimi “genç” kimi “yaşlı” kimi ise “çok yaşlı” olarak nitelendirebilir. Bulanık küme teorisi sayesinde bu dilsel tanımlamalar derecelendirilerek kişinin “yaşlı” ya da “genç” olması durumları sayısal verilere çevrilebilir ya da bu betimlemelerden bir tablo oluşturularak, hangi ifadenin hangi yaş aralığı için kullanıldığı grafiksel olarak ifade edilebilir. Burada olduğu gibi bir karar probleminde karar vericinin kullandığı sözlü ifadeler de sayısallaştırılarak problem modellenenebilir ya da buna benzer bulgular, bulanık küme teorisiyle herhangi bir karar tekniğinin içine yerleştirilebilir (Tzeng vd., 2011).

Bulanık kümeler içerisinde yer alan bulanık sayılar ise dışbükey, normalleştirilmiş, sınırlı sürekli üyelik fonksiyonuna sahip olan ve gerçel sayılarda tanımlanmış bir bulanık kümedir. Bulanık sayı, gerçel k sayısının genelleştirilmiş şekli olan bulanık bir A niceliğidir (Nguyen vd., 1999, s. 53).

Bulanık sayılar literatürde kullanıldıkları şekliyle üçgen ve yamuk bulanık sayılar olarak ikiye ayrılırlar. Bu çalışmada üçgen üyelik fonksiyonu yardımıyla üretilmiş ve daha önce de çok kriterli karar verme problemlerinde kullanılmış olan üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır. Bu nedenle yalnızca üçgen bulanık sayılar açıklanmıştır.

2.5.1. Üçgen bulanık sayılar

Üçgen bulanık sayılar, üç adet gerçek sayının tanımladığı bulanık sayılardır. Bu sayılar (a_l, a_u, a_s) şeklinde ifade edilir. l ve s alt indisleri sırasıyla en küçük ve en büyük olası değeri temsil ederken u alt indisi en olası değeri temsil eder.

Üçgen bulanık sayılarla aritmetik işlemler de yapılabilmektedir. İki pozitif bulanık sayı $\tilde{A} = (a_l, a_u, a_s)$ ve $\tilde{B} = (b_l, b_u, b_s)$ şeklinde tanımlandığında toplama işlemi denklem (2.40)'ta, çıkarma işlemi denklem (2.41)'de, çarpma işlemi denklem (2.42)'de ve bölme işlemi (2.43)'te verilmiştir (Chu vd., 2009, s. 446).

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a_l, a_u, a_s) \oplus (b_l, b_u, b_s) = (a_l + b_l, a_u + b_u, a_s + b_s) \quad (2.40)$$

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = (a_l, a_u, a_s) \ominus (b_l, b_u, b_s) = (a_l - b_l, a_u - b_u, a_s - b_s) \quad (2.41)$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a_l, a_u, a_s) \otimes (b_l, b_u, b_s) = (a_l \cdot b_l, a_u \cdot b_u, a_s \cdot b_s) \quad (2.42)$$

$$\tilde{A} \oslash \tilde{B} = (a_l, a_u, a_s) \oslash (b_l, b_u, b_s) = (a_l/b_l, a_u/b_u, a_s/b_s) \quad (2.43)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan $\oplus, \ominus, \otimes, \oslash$ işaretleri bulanık sayılarda sırasıyla toplama, çıkarma, çarpma ve bölme işlemlerini temsil eder.

Bulanık sayılar birçok alanda farklı amaçlar için kullanılmaktadırlar. Bunlardan biri de sayısal bir değere sahip olmayan çıktıların sayısallaştırılması işlemidir. Bu çalışmanın uygulama aşamasında kullanılan sayısallaştırma işleminin teorik ayrıntıları aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

2.5.2. Sözel verilerin sayısallaştırılması

Çok kriterli karar problemlerinde kriterler sayısal değerler alabileceği gibi sözel değerler de alabilmektedir. Bununla birlikte sayısal ve sözel kriterlerin bir arada bulunduğu karar problemlerinde değerlendirme yapmak ve çözüme ulaşmak güç olabilmektedir. Ancak daha tutarlı sonuçlar elde edilmesi için sözel değerlerin de göz ardı edilmemesi gerekir. Söz konusu bu değerleri göz ardı etmemek için de bulanık küme teorisinden faydalanılabilmektedir.

Bulanık kümeler, ait oldukları üyelik fonksiyonu ile tanımlanabilirler. Literatürde en yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları sırasıyla üçgen, normal dağılım ve yamuk üyelik fonksiyonlarıdır (Zhang vd., 2006, s. 8). Literatürde kullanılan sözel

değişkenler ve bunlara karşılık gelen üçgen bulanık sayılar Tablo (2.5)'te gösterildiği gibidir (Öztürk Avcı vd., 2011, s. 5-9).

Tablo 2.5. Üçgen bulanık sayı değerleri ve dilsel karşılıkları

Dilsel Değişken	Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları
Çok Yüksek	(9;10;10)
Yüksek	(7;9;10)
Orta Yüksek	(5;7;9)
Orta	(3;5;7)
Orta Düşük	(1;3;5)
Düşük	(0;1;3)
Çok Düşük	(0;0;1)

Bu yaklaşım kullanılarak sözel veriler sayısallaştırılabilir. Ancak elde edilen değerlerin bulanık sayılar olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmada olduğu gibi sözel kriter değerleri için kullanılan bulanık sayıların, sayısal kriter değerleri için kullanılan ve bulanık olmayan değerlerle bir arada değerlendirilmesi gereken çalışmalarda bulanık sayıların durulaştırılması da gerekmektedir.

Bulanık küme teorisi içerisinde bulanık sayıları durulaştırmak amacıyla çeşitli teknikler önerilmiştir. İzleyen başlıkta bu çalışmada kullanılan durulaştırma tekniği hakkında bilgi verilmiştir.

2.5.3. Bulanık sayıların durulaştırılması

Bulanık sayıların tek bir kesin değere dönüştürülmesi diğer bir ifade ile durulaştırılması işlemi literatürde farklı tekniklerle yapılmıştır. Bu teknikler, merkezi önceleyen teknikler, maksimum değerleri önceleyen teknikler ve ağırlıklandırma kullanan teknikler olarak üçe ayrılabilir (Runkler vd., 1993, s. 1161).

Bu çalışmada klasik durulaştırma tekniklerinden biri olan ve uygulama kolaylığı nedeniyle literatürde de birçok çalışmada kullanılmış olan maksimumun ortası tekniği kullanılmıştır. Maksimumun ortası tekniği, bulanık sayıların aritmetik ortalamalarının duru değer olarak kabul edildiği tekniktir (Bai vd., 2007, s. 29).

Bulanık sayı kümesindeki her bir bulanık sayıya ait üyelik fonksiyonu denklem (2.37)'de tanımlanmıştır. Maksimumun ortası tekniğinde bulanık küme içinde yer alan

tüm değerlerin en yüksek üyelik derecesi 1 ile bulanık kümeye ait oldukları kabul edilir ve bu ilke ile bulanık sayılar durulaştırılır. Durulaştırılmış değer x^* ile temsil edilirse, denklem (2.44) yardımıyla durulaştırılmış sayı elde edilir.

$$x^* = \frac{\sum_{x_i \in M} x_i}{|M|} \quad (2.44)$$

Denklem (2.44)'te yer alan $|M|$, M kümesinin eleman sayısıdır. M kümesi ise A bulanık kümesinin üyelik derecesi en yüksek yani 1 olan elemanlarını tanımlar (Samanta, 2016, s. 1-6).

2.6. ÇKKV Problemlerinde Kriter Ağırlıklandırma Teknikleri

Çok kriterli karar verme problemlerinde, her bir kriterin alternatifleri değerlendirme konusunda “ne kadar önemli olduğu” diğer bir ifade ile kriterlerin göreceli önemleri “kriter ağırlıkları” ile temsil edilir. Bu nedenle söz konusu ağırlıkların rasyonel ve gerçekçi bir şekilde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır (Hassan vd., 2015, s. 23).

Literatürde kriter ağırlıklarının elde edilmesi konusu iki ana başlık altında incelenmektedirler. Bunlar eşit ağırlıklandırma tekniği ve derece-sıralama (rank-order) ağırlıklandırma teknikleri olarak isimlendirilirler (Hassan vd., 2015, s. 23).

2.6.1. Eşit ağırlıklandırma tekniği

Bu teknikte her bir kriterin ağırlığı eşit kabul edilir ve denklem (2.45) ile gösterildiği gibi ağırlık atamaları yapılır.

$$W_i = \frac{1}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.45)$$

Teknik, karar vericinin öncelikleri hakkında en az bilgiye sahip olduğu varsayımında ya da karar vericinin problemin çözümüne katkısının en az olduğu durumlarda kullanılır. Uygulamadaki kolaylığı nedeniyle sıkça kullanılan bir tekniktir (Hassan vd., 2015, s. 23).

2.6.2. Derece-Sıralama (Rank-Order) ağırlıklandırma teknikleri

Yukarıda açıklandığı gibi eşit ağırlıklandırma tekniği kriterlerin göreceli önemlerini görmezden gelmektedir. Bu durum ise gerçekte daha farklı ağırlıklara sahip

olan kriterlerin eşit ağırlıklı kabul edilmesi ile problemin de gereken şekilde değerlendirilememesi ile sonuçlanmaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla önerilen kriter ağırlıklandırma teknikleri derece-sıralama (rank-order) ağırlıklandırma teknikleri başlığı altında ele alınmaktadır. Buna göre her bir kriter olması gereken önemde probleme dahil edilecek ve problem çözümü daha sağlıklı olacaktır (Roszkowska, 2013). Söz konusu tekniklerin işletilmesinde denklem (2.46) dikkate alınmaktadır.

$$W_1 \geq W_2 \geq \dots \geq W_n \geq 0 \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (2.46)$$

Derece-sıralama (rank-order) ağırlıklandırma teknikleri öznel, nesnel ve karma olmak üzere üç gruba ayrılır (Odu, 2019, s. 1450).

Öznel tekniklerde ağırlıkların atanması işlemi karar vericinin tercihleri dikkate alınarak yapılır. Buna karşın nesnel teknikler, başlangıçta elde olan verilerden yola çıkar ve matematiksel teknikler yardımıyla veriyi analiz edip ağırlık değerlerini elde eder. Karma teknikler ise öznel ve nesnel tekniklerin bir sentezi biçimindedir (Hassan vd., 2015, s. 23-25). Bu gruplarda yer alan teknikler Tablo (2.6)'te verilmiştir (Odu, 2019, s. 1451).

Tablo 2.6. Ağırlıklandırma tekniklerinin sınıflandırılması

Kategoriler	Ağırlıklandırma Teknikleri
Öznel Ağırlıklandırma	SMART SMARTER SWING TRADE-OFF SIMOS İkili Karşılaştırma AHP En Küçük Kareler Tekniği Öz Vektör Tekniği Delphi Tekniği İstikrarlı Matris Analizi PATTERN

Tablo 2.6. (Devam) *Ağırlıklandırma tekniklerinin sınıflandırılması*

Nesnel Ağırlıklandırma	En Küçük Ortalamalı Kareler Tekniği (LMS) CRITIC Tekniği Entropi Tekniği Varyasyon Katsayısı Çok Amaçlı Optimizasyon Çoklu Korelasyon Katsayısı
Karma Ağırlıklandırma	Çarpımsal Sentez Toplamsal Sentez a. Kareler Toplamına Göre Ağırlıklandırma b. Önyargının En Küçüklenmesi ile Ağırlıklandırma c. İlişkisel Derecelendirme Katsayısına Göre Ağırlıklandırma

Bu çalışmada kullanılan çok kriterli karar verme teknikleri kendi içinde herhangi bir ağırlıklandırma tekniği önermemektedir. Çalışmada ele alınan karar probleminde, kriterlerin önceliği konusunda karar vericinin kendi tercihleri en az düzeyde etkili olduğundan nesnel bir ağırlıklandırma tekniğinin kullanılması tercih edilmiştir. Bu nedenle kriterlerin ağırlıklandırılmasında görece uygulama kolaylığına da sahip nesnel bir teknik olan Entropi tekniği kullanılmıştır. İzleyen kesimde entropi tekniğine ilişkin bilgi verilmiştir.

2.6.2.1. Entropi tekniği

Entropi tekniği, karar vericinin kriterler üzerindeki öznel tercihleri en az düzeyde etkili olduğunda kullanılabileceği gibi uzmanların kişisel yargılarına ve karar vermede etkili olan kriterler hakkında düşüncelerine başvurulamadığı zamanlarda da kriter ağırlıklarının hesaplanması için kullanılabilir. Bu çalışmada da uzman görüşlerine doğrudan başvurulmadığı için entropi tekniğinin kullanılması tercih edilmiştir.

Entropi, doğa bilimlerinde sistemin düzensizliğinin ölçüsü olarak kullanılan termodinamiğin ikinci yasasıdır. Aynı zamanda belirsizlik düzeyini tespit etmek için de kullanılmaktadır (Tzeng vd., 1998, s. 343). Bu nedenle bilginin kalitesi ve kapsamı açısından bir ölçüt olarak düşünülebilir ve veriden gelen bilginin etki seviyesinin göstergesi olarak kullanılabilir (Yavuz, 2016). Bu çalışmada entropi hesaplanırken bilgi kuramında (information theory) önerilen teknik kullanılmıştır.

Teknik adımları aşağıda sıralandığı gibidir (Karaca vd., 2018, s. 485-486).

1.adım: Alternatif sayısı n ve kriter sayısı m olan bir karar matrisi (2.47) oluşturulur.

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

2. adım: Probleme ait kriterlerin fayda veya maliyet yönlü olup olmadığı incelenir ve karar matrisi, kriterlerin yönüne göre standardize edilir. Kriter fayda yönlü ise (2.48) numaralı, maliyet yönlü ise (2.49) numaralı denklem uygulanır.

$$r_{ij} = x_{ij}/\max_{ij} \quad (2.48)$$

$$r_{ij} = \min_{ij}/x_{ij} \quad \min_{ij} \neq 0 \quad (2.49)$$

3. adım: Denklem (2.50) yardımıyla standardize matrise ait değerler normalize edilir. Ardından denklem (2.51) yardımıyla kriterlerin entropi değerleri hesaplanır.

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (2.50)$$

$$e_j = - \frac{\sum_{i=1}^n [f_{ij} * (\ln f_{ij})]}{\ln n} \quad (2.51)$$

4. adım: Bu adımda önce (d_j) ile gösterilen bilginin farklılaşma değeri denklem (2.52) kullanılarak hesaplanır. Daha sonra bu değerden yararlanılarak kriter ağırlıkları denklem (2.53) kullanımı ile bulunur.

$$d_j = 1 - e_j \quad (2.52)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (2.53)$$

Entropi ağırlıkları yararlı bilginin derecesini gösterir. Bu yüzden daha büyük entropi ağırlığına sahip kriter karar verme açısından daha büyük önemde olacaktır. En büyük entropi değeri 1'dir (Sanchez vd., 1998, s. 185–186).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. UYGULAMA: TÜRKİYE İÇİN EN UYGUN YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAĞININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde, “Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı seçimi” problemine önceki bölümde teorik olarak anlatılan çok kriterli karar verme tekniklerinden yararlanılarak bir çözüm aranacaktır.

3.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı Türkiye’nin enerji ihtiyacını güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde karşılayabilmesi için, kendi topraklarında hangi yenilenebilir enerji kaynağının daha çok tercih edilmesi gerektiği konusunda bir öneri sunmaktır. Bu amaç doğrultusunda karar problemi “Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi” olarak tanımlanmış ve çözüm çok kriterli karar verme teknikleriyle elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapısı itibari ile birçok alternatiften oluşan bu tür problemlerde, alternatiflerin arasından seçim yapılabilmesi için söz konusu alternatifler, birbirlerinden farklılıklarını ya da benzerliklerini gösterebilecek çeşitli kriterler altında değerlendirilmelidirler. Bu değerlendirme de çok kriterli karar verme tekniklerinin uygulanması ile gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi problemi üç farklı teknik ile değerlendirilmiştir. Bu teknikler sırasıyla PROMETHEE, Multi-MOORA ve PSI olarak adlandırılan çok kriterli karar verme teknikleridir. Bu tekniklerin uygulanmasının ardından Borda sayım tekniği yardımıyla tüm sonuçlar birleştirilerek rasyonel tek bir sıralama elde edilmiştir.

Çalışmada Türkiye için potansiyel yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji ve jeotermal enerji olarak belirlenmiştir. Bu enerji türleri karar problemindeki alternatifler olup, altı ana kriter ve yirmi dört alt kriter çerçevesinde değerlendirilmiştir. Alternatifler, ana ve alt kriterler Tablo (3.1)’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. *Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı seçim modeli*

AMAÇ	ANA KRİTERLER	ALT KRİTERLER	ALTERNATİFLER
Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi	TEKNİK (C1)	Enerji verimliliği (C11)	Güneş Enerjisi (A1)
		Ekonomik ömür(C12)	
		Alan gereksinimi (C13)	
		Kapasite faktörü(C14)	
		İnşa süresi (C15)	
	EKONOMİK (C2)	Yatırım maliyeti (C21)	Rüzgâr Enerjisi (A2)
		İşletme ve bakım maliyeti (C22)	
		Elektrik üretim maliyeti (C23)	
		Geri ödeme periyodu (C24)	
		Devlet destek oranı (C25)	
	ÇEVRE (C3)	CO ₂ emisyonu (C31)	Biyokütle Enerjisi (A3)
		CO ₂ önleme miktarı (C32)	
		Ses kirliliği (C33)	
		Görüntü kirliliği (C34)	
		Hayvan ölümleri (C35)	
	SOSYAL-POLİTİK (C4)	Sosyal kabul faktörü(C41)	Hidrolik Enerji (A4)
		Diğer sektörlere olumsuz etki (C42)	
	POTANSİYEL (C5)	Kuruluş prosedürü (C43)	
		Teknoloji potansiyeli (C51)	
		İstihdam potansiyeli (C52)	
		Kaynak potansiyeli (C53)	
		Maksimum üretim potansiyeli (C54)	
	ÜRETİM ve KATKI (C6)	Enerji arzı (C61)	Jeotermal Enerji (A5)
		Katkı (C62)	

Tablo (3.1)’den izlenebileceği üzere ana kriterler sırasıyla teknik (C1), ekonomik (C2), çevre (C3), sosyal-politik (C4), potansiyel (C5) ile üretim ve katkıdır (C6). Her bir ana kritere ilişkin alt kriterler ve bu kriterlere ilişkin açıklamalar izleyen kesimde verilmiştir.

3.1.1. Teknik ana kriteri

Teknik (C1) ana kriteri altında yer alan alt kriterler; enerji verimliliği, ekonomik ömür, alan gereksinimi, kapasite faktörü ve inşa süresi biçiminde olup, bu kriterlere ilişkin olarak alternatiflerin aldığı değerler de Tablo (3.2)'de verilmiştir (Özcan vd., 2017, s. 214-215). Enerji verimliliği (C11) alt kriteri, üretimde birim enerji kaynağından elde edilen verimi yüzde cinsinden temsil etmektedir ve en az girdi ile en çok çıktının sağlanması esas alınmıştır. Ekonomik ömür (C12) alt kriteri, santralin ortalama kaç yıl boyunca verimli çalışabileceğini göstermektedir. Alan gereksinimi (C13) alt kriteri, ilgili yenilenebilir enerji alternatifinin santral kurulumda gerektirdiği asgari alanı km^2/MW cinsinden göstermektedir (Özcan vd., 2017, s. 214). Kapasite faktörü (C14), ilgili enerji santralinin belirli bir dönemde ürettiği toplam enerjinin, tam kapasite ile çalıştığı zaman üretebileceği enerjiye bölümü ile elde edilmiş ve yüzde cinsinden gösterilmiştir (http-7). İnşa süresi (C15) ise ilgili yenilenebilir enerji santralinin kaç senede kurulabildiğini göstermektedir (Özcan vd., 2014, s. 1159).

Tablo 3.2. Teknik ana kriteri tablosu

TEKNİK	Enerji verimliliği (C11)	Ekonomik ömür(C12)	Alan gereksinimi (C13)	Kapasite faktörü(C14)	İnşa Süresi (C15)
Güneş Enerjisi (A1)	21	25	0,04	37	2
Rüzgar Enerjisi (A2)	26	30	0,05	27	1
Biyokütle Enerjisi (A3)	40	20	20	46	2
Hidrolik Enerji (A4)	90	30	8,1	21	4
Jeotermal Enerji (A5)	16	25	0,007	78	2
BİRİM	%	Yıl	km^2/MW	(%)	Yıl
Yönü	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet

3.1.2. Ekonomik ana kriteri

Ekonomik (C2) ana kriteri altında yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, elektrik üretim maliyeti, geri ödeme periyodu, devlet desteği alt kriterleri bulunmaktadır. Söz konusu alt kriterlere ilişkin olarak alternatiflerin aldığı değerler de Tablo (3.3)'de verilmiştir (Karaca vd., 2018, s. 487–488). Yatırım maliyeti (C21) alt kriteri, ortalama

santral kurulumu için yapılan yatırımın KW saat başına kaç dolar olduğunu göstermektedir. İşletme ve bakım maliyeti (C22) alt kriteri, ortalama bir santralin MW başına yıllık kaç dolar gerektirdiğini göstermektedir. Elektrik üretim maliyeti (C23) alt kriteri ise KW saat başına üretilen elektriğin kaç dolara mal olduğunu göstermektedir. Geri ödeme periyodu (C24) alt kriteri, kurulan bir yenilenebilir enerji santralinin kendini kaç yılda amorti ettiğini göstermektedir. Son olarak devlet desteği (C25) alt kriteri ise ilgili yenilenebilir enerji kaynağı santralinde üretilen enerji için devlet tarafından garanti edilen alım fiyatını göstermektedir (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 2005, s. 9389 md.22).

Tablo 3.3. Ekonomik ana kriteri tablosu

EKONOMİK	Yatırım maliyeti (C21)	İşletme ve bakım maliyeti (C22)	Elektrik üretim maliyeti (C23)	Geri ödeme periyodu (C24)	Devlet desteği (C25)
Güneş Enerjisi (A1)	4693	56780	0,125	1,85	13,3
Rüzgar Enerjisi (A2)	1920	24050	0,07	0,9	7,3
Biyokütle Enerjisi (A3)	230	86600	0,1	1,92	13,3
Hidrolik Enerji (A4)	6300	4120	0,08	11,8	7,3
Jeotermal Enerji (A5)	3000	164640	0,05	5,7	10,5
BİRİM	\$/KWh	\$/MW-yıl	\$/KWh	Yıl	cent/kWh
Yönü	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda

3.1.3. Çevre ana kriteri

Çevre (C3) ana kriteri, karbon dioksit emisyonu, karbondioksit önleme miktarı, ses kirliliği, görüntü kirliliği ve hayvan ölümleri alt kriterlerini kapsamaktadır ve kriterlere ilişkin olarak alternatiflerin aldığı değerler Tablo (3.4)'te gösterilmektedir (Özcan vd., 2014, s. 1159-1165). Karbondioksit emisyonu (C31) alt kriteri, KW saat başına üretilen enerjinin karbon emisyonunun kaç gram olduğunu göstermektedir.

Karbondioksit önleme miktarı (C32), santralde üretilen enerjinin yıllık zararlı gaz emisyonunu kaç tona kadar engellediğini göstermektedir (Özcan vd., 2014, s. 1159). Santrallerin bulundukları bölgede meydana getirdikleri ses kirliliği, görüntü kirliliği ve hayvan ölümlerine sebebiyet verme miktarları sırasıyla ses kirliliği (C33), görüntü kirliliği (C34) ve hayvan ölümleri (C35) alt kriterlerinde sözel ifadeler olarak verilmiştir. Ses kirliliği, görüntü kirliliği ve hayvan ölümleri alt kriterlerinin sözel değerleri alanında uzman kişiler ile yapılan görüşmeler ve literatür taramaları sonucunda oluşturulmuştur.

Tablo 3.4. Çevre ana kriteri tablosu

ÇEVRE	CO ₂ emisyonu (C31)	CO ₂ önleme miktarı(C32)	Ses kirliliği (C33)	Görüntü kirliliği (C34)	Hayvan ölümleri (C35)
Güneş Enerjisi (A1)	18,6	39884	Orta	Çok Yüksek	Çok Düşük
Rüzgar Enerjisi (A2)	10	56935	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek
Biyokütle Enerjisi (A3)	25	29415	Çok Düşük	Orta	Çok Düşük
Hidrolik Enerji (A4)	10	275600	Yüksek	Düşük	Orta
Jeotermal Enerji (A5)	38	59625	Çok Düşük	Çok Düşük	Orta
BİRİM	g/KWh	Ton/Yıl	-	-	-
Yönü	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Maliyet

3.1.4. Sosyal-politik ana kriteri

Sosyal-politik (C4) ana kriteri çerçevesinde sosyal kabul faktörü, diğer sektörlerle olumsuz etki ve kuruluş prosedürü alt kriterleri yer almaktadır ve bu kriterlere ilişkin olarak alternatiflerin aldığı değerler de Tablo (3.5)’te gösterilmiştir (Özcan vd., 2014, s. 1159–1165). Bu alt kriterlerden sosyal kabul faktörü kriteri (C41), santralin kurulacağı bölgede yaşayan insanların bulundukları bölgede bir santral varlığını kabul edip etmediklerini değerlendirir. A. Özcan ve S. Erol tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada (Özcan vd., 2014, s. 1165) görüntü kirliliği, bölgeye katkı, çevresel etkiler ve

birim elektrik üretim maliyeti kriterleri kullanılarak söz konusu santrallerin sosyal kabul faktörleri AHP tekniği ile hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağının tarım, hayvancılık, üretim gibi sektörler olumsuz etkisi de diğer sektörler olumsuz etki (C42) alt kriteri ile gösterilmiştir. Kuruluş prosedürü (C43) alt kriterinde ise santral yatırımı öncesi alınması gereken izinlerin yatırımcıyı zorlayıp zorlamadığı değerlendirilmektedir. Bu alt kriterler yine alanın uzmanlarıyla bizzat yapılan görüşmeler sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda sözel olarak oluşturulmuştur.

Tablo 3.5. Sosyal-politik ana kriteri tablosu

SOSYAL- POLİTİK	Sosyal kabul faktörü (C41)	Diğer sektörler olumsuz etki (C42)	Kuruluş prosedürü (C43)
Güneş Enerjisi (A1)	0,105	Yüksek	Çok Yüksek
Rüzgar Enerjisi (A2)	0,134	Çok Yüksek	Çok Yüksek
Biyokütle Enerjisi (A3)	0,127	Çok Düşük	Orta
Hidrolik Enerji (A4)	0,0639	Düşük	Orta
Jeotermal Enerji (A5)	0,1312	Orta	Orta
BİRİM	(%)	-	-
Yönü	Fayda	Maliyet	Maliyet

3.1.5. Potansiyel ana kriteri

Potansiyel (C5) ana kriteri teknoloji potansiyeli, istihdam potansiyeli, kaynak potansiyeli ve maksimum üretim potansiyeli alt kriterlerini kapsamaktadır. Kriterlere ilişkin olarak alternatiflerin aldığı değerler Tablo (3.6)'da verilmiştir (Özcan vd., 2014, s. 1159–1165; Seyrek, 2014, s. 43). Teknoloji potansiyeli (C51), ilgili yenilenebilir enerji kaynağı santralinin ileride milli menşei olmasına katkı sağlayacak ekipmanların ülkemizde üretilme potansiyelini göstermektedir. Bu alt kriter, yenilenebilir enerji kaynağı teknolojisi geliştirme adına 2013 yılına kadar alınan patent sayıları ile ölçülmektedir (Seyrek, 2014, s. 43). İstihdam potansiyeli (C52) alt kriterinde de ilgili yenilenebilir enerji kaynağı santrali kurulduğunda santralde çalıştırılacak işçi sayısı baz alınmıştır. Kaynak potansiyeli (C53) alt kriteri ise yenilenebilir enerji kaynağı için

ülkemizde var olan teknik yıllık potansiyeli GWh cinsinden göstermektedir. Maksimum üretim potansiyeli (C54) alt kriteri de kaynağın en iyi verimle üretim yapması durumunda elde edilecek enerjiyi göstermektedir (Özcan vd., 2014, s. 1159).

Tablo 3.6. Potansiyel ana kriteri tablosu

POTANSİYEL	Teknoloji potansiyeli (C51)	İstihdam potansiyeli (C52)	Kaynak Potansiyeli (C53)	Maksimum Üretim Potansiyeli (C54)
Güneş Enerjisi (A1)	236	29	380000	67,6
Rüzgar Enerjisi (A2)	118	12	144000	96,5
Biyokütle Enerjisi (A3)	38	10	93000	55,5
Hidrolik Enerji (A4)	80	50	140000	520
Jeotermal Enerji (A5)	5	32	4500	112,5
BİRİM	Adet	Kişi	GWh/yıl	GWh
Yönü	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda

3.1.6. Üretim ve katkı ana kriteri

Son ana kriter olan üretim ve katkı (C6) ana kriteri çerçevesinde enerji arzı (C61) alt kriterinde 2019 yılında üretilen enerji miktarları gösterilmektedir. Üretilen bu enerjinin toplam üretime katısı ise katkı (C62) alt kriterinde yüzde olarak gösterilmiştir. Üretim ve katkı ana kriteri verileri Tablo (3.7)'de verilmiştir (http-7).

Tablo 3.7. Üretim ve katkı ana kriteri tablosu

ÜRETİM VE KATKI	Enerji Arzı (C61)	Katkı (C62)
Güneş Enerjisi (A1)	1.622	1,1
Rüzgar Enerjisi (A2)	1.869	1,3
Biyokütle Enerjisi (A3)	3.157	2.2

Tablo 3.7. (Devam) Üretim ve katkı ana kriteri tablosu

Hidrolik Enerji (A4)	7.639	5,3
Jeotermal Enerji (A5)	9.651	6,7
BİRİM	Bin TEP	(%)
Yönü	Fayda	Fayda

Problemin çözümünde yukarıda tablolar halinde sunulan kriterlere ilişkin değerler kullanılacaktır. Ancak çözüm için gerekli işlemleri yapabilmek için, kriterlerin sayısal değerlere sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle çok kriterli karar verme teknikleri ile çözüme geçmeden önce, sözel değerlere sahip olan alt kriterlerin değerleri sayısallaştırılacaktır.

3.2. Sözel Kriter Değerlerinin Sayısallaştırılması

Bu çalışmada elde edilen birçok veri sayısaldir, bununla birlikte az sayıda verinin de sözel olduğu görülmektedir. Söz konusu sözel kriter değerlerinin sayısallaştırılması için bulanık küme teorisiyle önerilen ve dilsel karşılıkları çalışmanın ikinci bölümünde Tablo (2.5)'da verilen üçgen bulanık sayı (ÜBS) değerlerinden faydalanılacaktır.

Sözel kriterler, çevre ana kriterleri altında yer alan; ses kirliliği, görüntü kirliliği, hayvan ölümleri ve sosyal-politik ana kriteri altında yer alan; diğer sektörlere olumsuz etki ve kuruluş prosedürü alt kriterleridir.

Tablo (2.5)'dan yararlanılarak başlangıçta sözel olarak belirlenen kriter değerleri üçgen bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Söz konusu kriterlerin sözel değerlerine karşılık gelen üçgen bulanık sayılar Tablo (3.8) ve Tablo (3.9)'da verilmiştir.

Tablo 3.8. Çevre ana kriterine ait sözel verilerinin ÜBS ile gösterimi

Alt Kriterler		Ses Kirliliği (C33)		Görüntü Kirliliği (C34)		Hayvan Ölümleri (C35)	
Alternatifler	Sözel	Bulanık	Sözel	Bulanık	Sözel	Bulanık	
Güneş Enerjisi (A1)	Orta	(3;5;7)	Çok Yüksek	(9;9;10)	Çok Düşük	(0;0;1)	

Tablo 3.8. (Devam) Çevre ana kriterine ait sözel verilerinin ÜBS ile gösterimi

Rüzgar Enerjisi (A2)	Çok Yüksek	(9;9;10)	Çok Yüksek	(9;9;10)	Yüksek	(7;9;10)
Biyokütle Enerjisi (A3)	Çok Düşük	(0;0;1)	Orta	(3;5;7)	Çok Düşük	(0;0;1)
Hidrolik Enerji (A4)	Yüksek	(7;9;10)	Düşük	(0;1;3)	Orta	(3;5;7)
Jeotermal Enerji (A5)	Çok Düşük	(0;0;1)	Çok Düşük	(0;0;1)	Orta	(3;5;7)

Tablo 3.9. Sosyal-politik ana kriterine ait sözel verilerinin ÜBS ile gösterimi

Alt Kriterler	Diğer Sektörlere Olumsuz Etki (C42)		Kuruluş Prosedürü (C43)	
	Sözel	Bulanık	Sözel	Bulanık
Güneş Enerjisi (A1)	Yüksek	(7;9;10)	Çok Yüksek	(9;9;10)
Rüzgar Enerjisi (A2)	Çok Yüksek	(9;9;10)	Çok Yüksek	(9;9;10)
Biyokütle Enerjisi (A3)	Çok Düşük	(0;0;1)	Orta	(3;5;7)
Hidrolik Enerji (A4)	Düşük	(0;1;3)	Orta	(3;5;7)
Jeotermal Enerji (A5)	Orta	(3;5;7)	Orta	(3;5;7)

Elde edilen bu üçgen bulanık sayıların diğer kriter değerleri ile analiz edilebilmesi için de durulaştırma işlemi yapılmalıdır. Durulaştırma işlemi çalışmanın ikinci bölümünde verilen denklem (2.44) kullanılarak, maksimumun ortası tekniği ile yapılmıştır. Durulaşmış kriter değerleri sırasıyla Tablo (3.10) ve (3.11) ile verilmiştir.

Tablo 3.10. Çevre ana kriterleri ÜBS değerlerinin durulaştırılmış gösterimi

Alt Kriterler	Ses Kirliliği (C33)		Görüntü Kirliliği (C34)		Hayvan Ölümleri (C35)	
	Bulanık	Duru	Bulanık	Duru	Bulanık	Duru
Güneş Enerjisi (A1)	(3;5;7)	5,00	(9;9;10)	9,33	(0;0;1)	0,33
Rüzgar Enerjisi (A2)	(9;9;10)	9,33	(9;9;10)	9,33	(7;9;10)	8,67
Biyokütle Enerjisi (A3)	(0;0;1)	0,33	(3;5;7)	5,00	(0;0;1)	0,33
Hidrolik Enerji (A4)	(7;9;10)	8,67	(0;1;3)	1,33	(3;5;7)	5,00
Jeotermal Enerji (A5)	(0;0;1)	0,33	(0;0;1)	0,33	(3;5;7)	5,00

Tablo 3.11. Sosyal-politik ana kriterleri ÜBS değerlerinin durulaştırılmış gösterimi

Alt Kriterler	Diğer Sektörlere Olumsuz Etki (C42)		Kuruluş Prosedürü (C43)	
	Bulanık	Duru	Bulanık	Duru
Güneş Enerjisi (A1)	(7;9;10)	8,67	(9;9;10)	9,33
Rüzgar Enerjisi (A2)	(9;9;10)	9,33	(9;9;10)	9,33
Biyokütle Enerjisi (A3)	(0;0;1)	0,33	(3;5;7)	5,00
Hidrolik Enerji (A4)	(0;1;3)	1,33	(3;5;7)	5,00
Jeotermal Enerji (A5)	(3;5;7)	5,00	(3;5;7)	5,00

3.3. Kriterlere Önem Derecesi Atanması

Kriterlere atanacak önem derecelerinin hesaplanması için çalışmanın ikinci bölümünde anlatılan entropi tekniği uygulanmıştır. Tekniğin ilk adımı olarak tüm kriter tablolarının birleştirilmesi ile Tablo (3.12) ile gösterilen karar matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 3.12. Karar matrisi

	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet
A1	21	25	0,04	37	2	4693	56780	0,125
A2	26	30	0,05	27	1	1920	24050	0,07
A3	40	20	20	46	2	230	86600	0,1
A4	90	30	8,1	21	4	6300	4120	0,08
A5	16	25	0,007	78	2	3000	164640	0,05
	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda
A1	1,85	13,3	18,6	39884	5,00	9,33	0,33	0,105
A2	0,9	7,3	10	56935	9,33	9,33	8,67	0,134
A3	1,92	13,3	25	29415	0,33	5,00	0,33	0,127
A4	11,8	7,3	10	275600	8,67	1,33	5,00	0,0639
A5	5,7	10,5	38	59625	0,33	0,33	5,00	0,1312
	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
A1	8,67	9,33	236	29	380000	67,6	1622	1,1
A2	9,33	9,33	118	12	144000	96,5	1869	1,3
A3	0,33	5,00	38	10	93000	55,5	3157	2,2
A4	1,33	5,00	80	50	140000	520	7639	5,3
A5	5,00	5,00	5	32	4500	112,5	9651	6,7

Daha sonra karar matrisi için standardizasyon işlemi yapılmıştır. Standardize edilmiş matris Tablo (3.13)'te verilmiştir. Öncelikle her bir kriter için alternatif değerleri arasından en büyük ve en küçük değerler belirlenmiştir. Sonrasında kriterlerin yönü (fayda ya da maliyet) dikkate alınarak entropi tekniğinde belirtildiği üzere (2.48) ya da (2.49) numaralı denklemlerden uygun olanı kullanılarak her bir alternatif değeri standardize edilmiştir.

Tablo 3.13. *Standardize matris*

	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet
A1	0,233	0,833	5,714	0,474	2,000	20,404	13,782	2,500
A2	0,289	1,000	7,143	0,346	1,000	8,348	5,837	1,400
A3	0,444	0,667	2857,143	0,590	2,000	1,000	21,019	2,000
A4	1,000	1,000	1157,143	0,269	4,000	27,391	1,000	1,600
A5	0,178	0,833	1,000	1,000	2,000	13,043	39,961	1,000
	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda
A1	0,157	1,000	1,860	0,145	15,152	28,273	1,000	0,784
A2	0,076	0,549	1,000	0,207	28,273	28,273	26,273	1,000
A3	0,163	1,000	2,500	0,107	1,000	15,152	1,000	0,948
A4	1,000	0,549	1,000	1,000	26,273	4,030	15,152	0,477
A5	0,483	0,789	3,800	0,216	1,000	1,000	15,152	0,979
	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
A1	26,273	1,866	1,000	0,580	1,000	0,130	0,168	0,164
A2	28,273	1,866	0,500	0,240	0,379	0,186	0,194	0,194
A3	1,000	1,000	0,161	0,200	0,245	0,107	0,327	0,328
A4	4,030	1,000	0,339	1,000	0,368	1,000	0,792	0,791
A5	15,152	1,000	0,021	0,640	0,012	0,216	1,000	1,000

Standardizasyon işleminden hemen sonra denklem (2.50) yardımıyla standardize matrise ait değerler normalize edilmiştir. Bu amaçla her bir alternatifin ilgili kriterdeki standardize değeri o kritere ait tüm standardize değerlerin toplamına bölünmüştür.

Elde edilen normalize değerlere denklem (2.51)'in uygulanması ile kriterlerin entropi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan tüm entropi değerleri Tablo (3.14)'te verilmiştir.

Tablo 3.14. *Entropi değerleri*

Alternatif	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
e_j	0,8697	0,9934	0,3881	0,9337	0,9418	0,8406	0,7717	0,9715
Alternatif	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
e_j	0,7668	0,9787	0,9196	0,7565	0,7347	0,7875	0,7444	0,9812
Alternatif	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
e_i	0,7916	0,9699	0,7720	0,9036	0,7831	0,7421	0,8571	0,8561

Tekniğin bir sonraki adımı olan ve her kritere ait bilginin farklılık derecesini temsil eden d_j değerleri denklem (2.52)'nin uygulanmasıyla hesaplanmıştır. Denklem uyarınca 1'den entropi değerinin çıkartılması ile bulunan değerler Tablo (3.15)'te verilmiştir.

Tablo 3.15. *Farklılık derecesi değerleri*

Alternatif	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
d_j	0,1303	0,0066	0,6119	0,0663	0,0582	0,1594	0,2283	0,0285
Alternatif	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
d_j	0,2332	0,0213	0,0804	0,2435	0,2653	0,2125	0,2556	0,0188
Alternatif	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
d_j	0,2084	0,0301	0,2280	0,0964	0,2169	0,2579	0,1429	0,1439

Son olarak da kriterlerin entropi ağırlıkları, denklem (2.53)'te verildiği üzere her bir kriterin farklılık derecesinin kriterlerin toplam farklılık derecelerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Bu şekilde yapılan hesaplamalar sonucunda tüm kriterlerin önem dereceleri elde edilmiş ve Tablo (3.16)'da verilmiştir.

Tablo 3.16. *Kriterlerin önem dereceleri*

Alternatif	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
W_j	0,0330	0,0017	0,1551	0,0168	0,0148	0,0404	0,0579	0,0072
Alternatif	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
W_j	0,0591	0,0054	0,0204	0,0617	0,0673	0,0539	0,0648	0,0048
Alternatif	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
W_j	0,0528	0,0076	0,0578	0,0244	0,0550	0,0654	0,0362	0,0365

Kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra, Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi için sırasıyla PROMETHEE, Multi-MOORA ve PSI teknikleri ayrı ayrı uygulanmıştır.

3.4. PROMETHEE Tekniği ile Problemin Çözümü

Karar probleminin PROMETHEE tekniği ile çözümü için ilk adım karar matrisinin oluşturulmasıdır. Karar matrisi tüm kriter tablolarının birleştirilmesi ve entropi

teknikleriyle elde edilen ağırlıkların da bir satır olarak eklenmesi ile oluşturulur. Oluşturulan karar matrisi Tablo (3.17)'de verilmiştir.

Tablo 3.17. PROMETHEE tekniği karar matrisi

	F	F	M	F	M	M	M	M
	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
A1	21	25	0,04	37	2	4693	56780	0,125
A2	26	30	0,05	27	1	1920	24050	0,07
A3	40	20	20	46	2	230	86600	0,1
A4	90	30	8,1	21	4	6300	4120	0,08
A5	16	25	0,007	78	2	3000	164640	0,05
w_j	0,0330	0,0017	0,1551	0,0168	0,0148	0,0404	0,0579	0,0072
	F	F	M	F	M	M	M	F
	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
A1	1,85	13,3	18,6	39884	5	9,33	0,33	0,105
A2	0,9	7,3	10	56935	9,33	9,33	8,67	0,134
A3	1,92	13,3	25	29415	0,33	5	0,33	0,127
A4	11,8	7,3	10	275600	8,67	1,33	5	0,0639
A5	5,7	10,5	38	59625	0,33	0,33	5	0,1312
w_j	0,0591	0,0054	0,0204	0,0617	0,0673	0,0539	0,0648	0,0048
	M	M	F	F	F	F	F	F
	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
A1	8,67	9,33	236	29	380000	67,6	1622	1,1
A2	9,33	9,33	118	12	144000	96,5	1869	1,3
A3	0,33	5	38	10	93000	55,5	3157	2,2
A4	1,33	5	80	50	140000	520	7639	5,3
A5	5	5	5	32	4500	112,5	9651	6,7
w_j	0,0528	0,0076	0,0578	0,0244	0,0550	0,0654	0,0362	0,0365

Tablo (2.17)'de kullanılan “M” ifadesi kriterin maliyet yönlü olduğunu ve “F” ifadesi de kriterin fayda yönlü olduğunu göstermektedir.

PROMETHEE tekniğinin ikinci adımı olarak bu tekniğin temel farklılıklarından biri olan tercih fonksiyonları seçilmiştir. Tercih fonksiyonları belirlenirken her bir alternatifin ilgili kriterdeki değerlerinin sürekliliği veya süreksizliği, sayısal büyüklüğü ve çalışma boyunca görüşülen yenilenebilir enerji uzmanlarından elde edilen bilgiler kullanılmıştır. Bunun yanı sıra Visual PROMETHEE isimli bilgisayar programı, verilere

uygun tercih fonksiyonlarının seçimi ve tercih fonksiyonlarının gerektirdiği parametrelerin belirlenmesi konularında önemli öneriler oluşturmıştır. Gelineen noktada probleme ait verilerin tamamı nicel olduğu için özellikle beşinci tip tercih fonksiyonu (doğrusal) ve üçüncü tip tercih fonksiyonu (V-tipi) kullanılmıştır. Hem tercih fonksiyonları hem de o tercih fonksiyonlarında kullanılan parametreler Tablo (3.18)'de verilmiştir.

Tablo 3.18. *Tercih fonksiyonları ve parametreler*

Kriter	Fonksiyon	q	p	Kriter	Fonksiyon	q	p
C11	Doğrusal	26,38	59,78	C33	V- Tipi		8,43
C12	Doğrusal	3,16	8,16	C34	Doğrusal	3,06	8,26
C13	V- Tipi		17,42	C35	V- Tipi		6,93
C14	V- Tipi		43,74	C41	Doğrusal	0,03	0,25
C15	V- Tipi		2,18	C42	Doğrusal	2,84	7,91
C21	Doğrusal	1507,06	4489,66	C43	Doğrusal	2,12	4,72
C22	V- Tipi		121713,5	C51	V- Tipi		173,52
C23	Doğrusal	0,03	0,25	C52	Doğrusal	11,64	31,64
C24	Doğrusal	3,79	8,92	C53	Doğrusal	113957,2	274357
C25	Doğrusal	2,25	5,85	C54	Doğrusal	198,65	393,43
C31	Doğrusal	8,58	22,78	C61	Doğrusal	2726,2	7091,8
C32	Doğrusal	104015	206438	C62	V- Tipi		4,93

Tercih fonksiyonları ve parametreler belirlendikten sonra üçüncü adım olarak, bu parametreler ve fonksiyonlar kullanılarak alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılmış ve ortak tercih fonksiyonları $P_j(a, b)$ belirlenmiştir. İkili karşılaştırmalar fayda yönlü kriterler için, çalışmanın ikinci bölümünde verilen (2.9) numaralı denklem kullanılarak, maliyet yönlü kriterler için ise (2.10) numaralı denklem kullanılarak yapılmıştır. Kriterlerin fazla olması nedeniyle tüm karşılaştırma tabloları gösterilmemiş, örnek olarak C11 alt kriteri için yapılan karşılaştırma Tablo (3.19)'da verilmiştir.

Tablo 3.19. *PROMETHEE tekniği C11 alt kriteri karşılaştırma tablosu*

C11	A1	A2	A3	A4	A5
A1	0	0	0	0	5
A2	5	0	0	0	10
A3	19	14	0	0	24
A4	69	64	50	0	74
A5	0	0	0	0	0

Ortak tercih fonksiyonlarının $P_j(a, b)$ hesaplanmasında, doğrusal tercih fonksiyonunun kullanıldığı kriterler için ikinci bölümde verilen (2.15) numaralı denklem ve V-tipi tercih fonksiyonunun kullanıldığı kriterler için de (2.13) numaralı denklem uygulanmıştır. Yine örnek olarak doğrusal tercih fonksiyonunun kullanıldığı C11 alt kriterine ait ortak tercih fonksiyonu ve V-tipi tercih fonksiyonunun kullanıldığı C13 alt kriterine ait ortak tercih fonksiyonu değerleri sırasıyla Tablo (3.20) ve Tablo (3.21)'de verilmiştir.

Tablo 3.20. PROMETHEE tekniği C11 alt kriteri ortak tercih fonksiyonları

P_j	A1	A2	A3	A4	A5
A1	0	0	0	0	0
A2	0	0	0	0	0
A3	0	0	0	0	0
A4	1	1	0,707185629	0	1
A5	0	0	0	0	0

Tablo 3.21. PROMETHEE tekniği C13 alt kriteri ortak tercih fonksiyonları

P_j	A1	A2	A3	A4	A5
A1	0	0,000574053	1	0,462686567	0
A2	0	0	1	0,462112514	0
A3	0	0	0	0	0
A4	0	0	0,683122847	0	0
A5	0,001894374	0,002468427	1	0,464580941	0

Ortak tercih fonksiyonları hesaplandıktan sonra PROMETHEE tekniğinin dördüncü adımına geçilerek tercih indeksleri belirlenmiştir. Alternatif çiftlerine ait tercih indeksleri belirlenirken ikinci bölümde verilen denklem (2.17) kullanılmıştır. Bu denklemde ortak tercih fonksiyonları kriter ağırlıklarıyla çarpıldıktan sonra toplanmış ve tercih indeksleri $\pi(a, b)$ oluşturulmuştur. Hesaplanan tercih indeksleri Tablo (3.22)'de verilmiştir.

Tablo 3.22. PROMETHEE tekniği tercih indeksleri

π_i	A1	A2	A3	A4	A5
A1	0	0,1964	0,2917	0,2666	0,2241
A2	0,0424	0	0,2292	0,1412	0,1320
A3	0,1614	0,2263	0	0,1799	0,1351
A4	0,4198	0,4581	0,4479	0	0,3144
A5	0,1997	0,2906	0,2626	0,2058	0

PROMETHEE tekniğinin beşinci adımında alternatiflere ait pozitif üstünlükler (Φ^+) ve negatif üstünlükler (Φ^-) tercih indeksleri yardımıyla belirlenmiştir. Bir alternatifin diğer herhangi bir alternatife göre tercih edilme dereceleri tercih indeksleri tablosunda o alternatife ait satır değerlerine bakılarak tespit edilmiştir. Örneğin A1 alternatifinin diğer alternatiflere göre tercih edilme dereceleri Tablo (3.22)'in ikinci satırına bakılarak elde edilmiştir. Alternatiflerin pozitif üstünlükleri (Φ^+) ise ikinci bölümde verilen denklem (2.18) kullanılarak hesaplanmıştır. Her alternatifin diğer alternatiflere göre tercih edilme dereceleri kendi aralarında toplanmıştır. Bu toplam alternatif sayısının bir eksiğine bölünmüş ve böylece pozitif üstünlük değeri hesaplanmıştır.

Diğer alternatiflerin belirli bir alternatife göre tercih edilme dereceleri de tercih indeksi tablosu yardımıyla belirlenmiştir. Bu sefer tablonun sütun değerlerine bakılmıştır. Örneğin diğer tüm alternatiflerin A1 alternatifi yerine tercih edilme dereceleri Tablo (3.22)'in ikinci sütununa bakılarak elde edilmiştir. Alternatiflerin negatif üstünlükleri (Φ^-) ise denklem (2.19) kullanılarak hesaplanmıştır. Tercih indeksi tablosunda yer alan her alternatife ait sütundaki değerler kendi aralarında toplanmış ve bu toplam alternatif sayısının bir eksiğine bölünerek negatif üstünlük değerleri hesaplanmıştır. Karar problemine ait pozitif ve negatif üstünlük değerleri Tablo (3.23)'te verilmiştir.

Tablo 3.23. PROMETHEE tekniği pozitif ve negatif üstünlükler

Φ	Pozitif	Negatif
A1	0,24	0,21
A2	0,14	0,29
A3	0,18	0,31
A4	0,41	0,20
A5	0,24	0,20

Pozitif üstünlüklere bakılarak yapılan sıralamalar büyükten küçüğe; negatif üstünlüklere bakılarak yapılan sıralamalar ise küçükten büyüğe şeklindedir. Diğer bir ifadeyle pozitif üstünlük değeri en büyük olan alternatif ilk sıraya yerleşmeye adayken, negatif üstünlüğü en küçük olan alternatif de ilk sıraya yerleşmeye adaydır. PROMETHEE tekniğinin altıncı adımı alternatiflerin pozitif ve negatif üstünlük değerlerine bakarak değerlendirildiği adımdır.

İkinci bölümde verilen (2.20), (2.21) ve (2.22) numaralı eşitlikler yardımıyla alternatif çiftlerinin sırasıyla üstünlükleri, farksızlıkları ve karşılaştırılmaz olup olmadıkları hakkında bilgi edinilmiştir. Buna göre A1 alternatifi A4 ve A5 alternatifi ile pozitif ve negatif üstünlük değerlerine bakılarak karşılaştırılmazken, diğer tüm alternatiflerden pozitif ve negatif üstündür. A2 alternatifi hiçbir alternatifle pozitif ve negatif üstünlüklere bakılarak karşılaştırılmaz. A3 alternatifi A2 alternatifinden üstünken, diğer hiçbir alternatifle karşılaştırılmaz. A4 alternatifi A5 alternatifinden pozitif üstünken negatif farksızdır ancak denklem (2.20) gereği üstün sayılmaktadır. Diğer alternatiflerden ise pozitif ve negatif üstündür. Son olarak A5 alternatifi A1 alternatifiyle pozitif ve negatif üstünlüklere bakılarak karşılaştırılmazken, A2 ve A3 alternatiflerinden pozitif ve negatif üstündür.

Pozitif ve negatif üstünlük değerlerine bakılarak karşılaştırılamayan alternatifler arasında da tercih yapılmak istendiği için PROMETHEE tekniğinin son adımında denklem (2.23) kullanılarak alternatiflere ait net üstünlük değerleri hesaplanmıştır. Buna göre net üstünlükler, her bir alternatifin pozitif üstünlük değerinden negatif üstünlük değerinin çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen net üstünlük değerleri ile alternatifler en büyük net üstünlük değerine sahip olan alternatif ilk sıraya gelecek şekilde sıralanmıştır. Bu değerler ve sıralamalar Tablo (3.24)'te verilmiştir.

Tablo 3.24. PROMETHEE tekniği net üstünlükler ve sıralamalar

Φ	Net	Sıralama
A1	0,039	2
A2	-0,157	5
A3	-0,132	4
A4	0,212	1
A5	0,038	3

PROMETHEE tekniğinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamada hidrolik enerji (A4) alternatifi en büyük net üstünlük değerini alarak birinci sıraya yerleşmiştir.

Onu sırasıyla güneş enerjisi (A1), jeotermal enerji (A5) ve biyokütle enerjisi (A3) takip etmiştir. En düşük net üstünlük değerine sahip olan rüzgâr enerjisi (A2) alternatifi ise son sıraya yerleşmiştir.

3.5. Multi-MOORA Tekniği ile Problemin Çözümü

Çalışmanın teorik kısmında da belirtildiği üzere, Multi-MOORA yaklaşımı tek başına bir teknik değildir. MOORA tekniği içerisinde uygulanan farklı yaklaşımlar ile elde edilen tüm sıralamaların “Sıra Baskınlık Teorisi” olarak adlandırılan değerlendirme tekniği aracılığıyla tek bir sıralama haline getirilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu nedenle Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi probleminin çözümü için önce MOORA tekniğinin farklı yaklaşımları kullanılmış daha sonra elde edilen sonuçlara Multi-MOORA tekniği uygulanmıştır. İzleyen kesimde uygulamanın ayrıntılarına yer verilmiştir.

Probleme ilişkin karar matrisi önceki kesimde oluşturulan ve Tablo (3.17)’de verilen matristir. MOORA tekniğinde kriterler için ağırlık değerleri belirlemek bir zorunluk olmasa da daha faydalı sonuçlar alınabileceği düşüncesiyle entropi tekniğiyle hesaplanan kriter ağırlıklarının çözümde kullanılması tercih edilmiştir. Bu nedenle kriter ağırlıklarının da yer aldığı karar matrisi olduğu gibi kullanılmıştır.

İkinci adım olarak karar matrisinde yer alan değerlere normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon işlemini gerçekleştirmek için denklem (2.24) kullanılmıştır. Buna göre önce her bir alternatife ait kriter değerinin karesi hesaplanmıştır. Sonra bu değerler kriter bazında toplanarak elde edilen toplamın karekökü alınmıştır. Her bir alternatife ait kriter değerleri ilgili alternatif için elde edilen bu karekök değerine bölünmüş ve normalize edilmişlerdir. Normalize edilmiş karar matrisi

Normalize değerlerin elde edilmesinin ardından MOORA tekniğinin üçüncü adımına geçilmiş ve teknik içerisinde kullanılan farklı yaklaşımlar sırayla uygulanmış daha sonra da tüm sonuçlar Multi-MOORA tekniği ile değerlendirilmiştir.

İlk olarak “MOORA-Oran” yaklaşımı uygulanmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi kriter ağırlıklarının da çözüm işlemlerine dahil edilmesi tercih edildiği için bu aşamada yaklaşımda önerilen ağırlıklı normalize matris değerleri, Tablo (3.17)’de verilen ağırlık değerleri (w_j) ile normalize edilmiş karar matrisindeki alternatiflerin kriter değerleri (x_{ij}) tek tek çarpılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama için denklem (3.1)’den yararlanılmıştır.

$$X_{ij}^* = w_j * x_{ij}^* \quad (3.1)$$

Bu değerler kullanılarak oluşturulan ağırlıklandırılmış normalize matris Tablo (3.25)'te verilmiştir.

Tablo 3.25. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi

	F	F	M	F	M	M	M	M
	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23
A1	2E-06	1E-07	2E-08	2E-06	8E-08	5E-04	9E-03	2E-09
A2	5E-06	3E-07	5E-08	3E-06	9E-08	5E-04	9E-03	3E-09
A3	1E-05	3E-07	2E-05	6E-06	2E-07	7E-05	4E-02	6E-09
A4	1E-05	2E-07	4E-06	1E-06	2E-07	8E-04	8E-04	2E-09
A5	3E-06	2E-07	6E-09	7E-06	2E-07	7E-04	5E-02	2E-09
	F	F	M	F	M	M	M	F
	C24	C25	C31	C32	C33	C34	C35	C41
A1	3E-07	2E-07	1E-06	6E-03	9E-07	1E-06	6E-08	1E-09
A2	3E-07	3E-07	1E-06	2E-02	4E-06	3E-06	4E-06	4E-09
A3	9E-07	6E-07	4E-06	1E-02	2E-07	2E-06	2E-07	5E-09
A4	2E-06	1E-07	7E-07	6E-02	2E-06	2E-07	1E-06	1E-09
A5	2E-06	3E-07	4E-06	2E-02	1E-07	1E-07	2E-06	4E-09
	M	M	F	F	F	F	F	F
	C42	C43	C51	C52	C53	C54	C61	C62
A1	1E-06	2E-07	4E-05	2E-06	5E-02	1E-05	2E-04	1E-07
A2	3E-06	5E-07	4E-05	2E-06	5E-02	4E-05	4E-04	3E-07
A3	1E-07	3E-07	2E-05	2E-06	4E-02	3E-05	9E-04	6E-07
A4	2E-07	1E-07	1E-05	4E-06	2E-02	1E-04	9E-04	6E-07
A5	2E-06	2E-07	2E-06	4E-06	1E-03	4E-05	2E-03	1E-06

Ağırlıklandırılmış normalize matris oluşturulduktan sonra alternatiflere ait performans skorları (y_i^*) ikinci bölümde verilen denklem (2.25)'ten faydalanılarak hesaplanmıştır. Buna göre fayda yönlü kriterlere ait alternatif değerleri ile maliyet yönlü kriterlere ait alternatif değerleri kendi aralarında toplanmış ve fayda yönlü kriter değerlerinin toplamından maliyet yönlü kriter değerleri toplamı çıkartılarak her alternatif için bir performans skoru (y_i^*) elde edilmiştir. Performans skorlarına göre alternatifler en yüksek skora sahip alternatif birinci sıraya yerleşecek şekilde sıralanmışlardır. Bu skorlar ve sıralamalar Tablo (3.26)'da verilmiştir.

Tablo 3.26. MOORA-Oran yaklaşımı performans skorları ve sıralamalar

	Fayda	Maliyet	y_i^*	Sıralama
A1	0,061	0,009	0,052	3
A2	0,073	0,009	0,064	2
A3	0,054	0,039	0,016	4
A4	0,081	0,002	0,079	1
A5	0,024	0,055	-0,031	5

MOORA-Oran yaklaşımı kullanılarak elde edilen sıralamada hidrolik enerji (A4) alternatifi ilk sırada yer alırken onu rüzgâr enerjisi (A2) alternatifi takip etmiştir. Sırasıyla güneş enerjisi (A1), biyokütle enerjisi (A3) ve jeotermal enerji (A5) daha düşük performans skorları alarak sıralanmışlardır.

İkinci olarak “MOORA-Referans Noktası” yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımın başlangıç aşamaları da MOORA tekniğinin ilk iki adımını kapsamaktadır. Ağırlık değerleri de dikkate alındığından bu yaklaşımda MOORA-Oran yaklaşımıyla elde edilen ve Tablo (3.25)’te verilen ağırlıklandırılmış normalize matris değerleri kullanılmıştır.

Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinde yer alan alternatiflere ait kriter değerleri içerisinde referans değeri (r_i) belirlenmiştir. Fayda yönlü kriterlerde her bir alternatifin ilgili kriterdeki değerleri içinden en büyük olanı referans değeri olarak belirlenmiştir. Maliyet yönlü kriterlerde ise her alternatifin ilgili kriter değerleri içinden en küçük olan değer o kriter için referans değeri olarak kabul edilmiştir. Daha sonra ikinci bölümde verilen denklem (2.26)’nın kullanımı ile belirlenen referans değerlerinden ağırlıklı normalize matris değerleri çıkarılarak matris değerlerinin referans değerlerinden sapmaları (d_{ij}) hesaplanmıştır.

Sapma değerleri belirlendikten sonra denklem (2.27)’den faydalanılarak alternatifler sıralanmıştır. Buna göre elde edilen sapma değerlerinden her bir alternatife ait en büyük değer seçilmiş ve bu değerlerden en küçük değere sahip olan alternatif ilk sıraya gelecek şekilde sıralamalar yapılmıştır. Alternatiflerin en büyük sapma değerleri ve sıralamaları Tablo (3.27)’da verilmiştir.

Tablo 3.27. MOORA-Referans Noktası yaklaşımı sapma değerleri ve sıralamalar

	$max_i(d_{ij})$	Sıralama
A1	0,0486	4
A2	0,0326	2
A3	0,0411	3
A4	0,0292	1
A5	0,0527	5

MOORA-Referans noktası yaklaşımı kullanılarak elde edilen sıralamada alternatiflerden hidrolik enerji (A4) ilk sırada yer almaktadır. İkinci sıraya ise rüzgâr enerjisi (A2) yerleşmiştir. Geriye kalan alternatiflerden biyokütle enerjisi (A3) üçüncü, güneş enerjisi (A1) dördüncü ve jeotermal enerji (A5) beşinci sırada yer almıştır.

Üçüncü olarak “MOORA-Tam Çarpım” yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda diğer yaklaşımlardan farklı olarak normalize edilmiş karar matrisi ve ağırlık değerleri kullanılmamaktadır. Bu nedenle daha önce entropi tekniği için Tablo (3.12)’de verilen karar matrisi kullanılmıştır.

Matris değerleri kriterin fayda veya maliyet yönlü olmasına göre ayrılmış ve alternatiflere ait (U_i) skorları denklem (2.28)’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Her bir alternatif için fayda yönlü kriter değerlerinin çarpımları (A_i), maliyet yönlü kriter değerlerinin çarpımları ise (B_i) ile ifade edilmiştir. Fayda yönlü kriter değerlerinin çarpımlarının maliyet yönlü kriter değerlerinin çarpımına bölünmesi ile her alternatif için tek bir (U_i) skoru belirlenmiştir. Elde edilen skorlar ve sıralamalar Tablo (3.28)’de verilmiştir.

Tablo 3.28. MOORA-Tam Çarpım yaklaşımı skor değerleri ve sıralamalar

	A_i	B_i	U_i	Sıralama
A1	6,3E+23	6,2E+10	1,0E+13	4
A2	5,0E+22	1,1E+11	4,8E+11	5
A3	4,8E+22	1,8E+09	2,7E+13	3
A4	1,0E+27	2,6E+11	3,9E+15	1
A5	7,7E+22	1,8E+08	4,3E+14	2

MOORA-Tam çarpım yaklaşımı ile elde edilen sıralamalarda hidrolik enerji (A4) birinci sırada yer almıştır. Jeotermal enerji (A5) ikinci, biyokütle enerjisi (A3) üçüncü ve güneş enerjisi (A1) dördüncü sırada yer alırken, son sıraya rüzgâr enerjisi (A2) gelmiştir.

Farklı MOORA yaklaşımlarıyla bulunan sıralamalar, Multi-MOORA yaklaşımı ile birleştirilerek nihai bir sıralama elde edilmiştir. Bu sıralamalar elde edilirken ikinci bölümde Multi-MOORA yaklaşımı başlığı altında bahsedilen sıra baskınlık teorisi kullanılmıştır. Önceki kısımda oran yaklaşımı, referans noktası yaklaşımı ve tam çarpım yaklaşımı kullanılarak hesaplanan tüm sıralamalar Tablo (3.29)'da toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.29. MOORA yaklaşımları ile elde edilen sıralamalar

	Oran	Referans Noktası	Tam Çarpım
A1	3	4	4
A2	2	2	5
A3	4	3	3
A4	1	1	1
A5	5	5	2

Tablo (3.29)'da verilen sıralamalar sıra baskınlık teorisine göre karşılaştırıldığında A1, A2, A3 ve A5 alternatifleri iki farklı yaklaşımda da aynı sırada oldukları için genel baskınlık durumu mevcuttur. Bu sebeple Multi-MOORA tekniği ile elde edecekleri sıralamalarda genel baskın oldukları sıralamayı korumuşlardır. A4 alternatifi ise tüm yaklaşımlarda aynı sırada yer alığı için mutlak baskınlık durumu oluşmuş ve Multi-MOORA tekniği ile sıralanırken de mutlak baskın olduğu sırayı korumuştur. Buna göre elde edilen Multi-MOORA tekniği alternatif sıralamaları Tablo (3.30)'da verilmiştir.

Tablo 3.30. Multi-MOORA tekniği nihai sıralamalar

Multi-MOORA Sıralamaları	
A1	4
A2	2
A3	3
A4	1
A5	5

Multi-MOORA tekniği ile elde edilen sıralamalarda hidrolik enerji (A4) birinci sırada yer almıştır. Rüzgâr enerjisi (A2) ikinci, biyokütle enerjisi (A3) üçüncü ve güneş enerjisi (A1) dördüncü sırada yer almıştır. Son sıraya ise Jeotermal enerji (A5) gelmiştir.

3.6. Tercih İndeksi Tekniği (PSI) ile Çözüm

Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi probleminde kullanılan çok kriterli karar verme tekniklerinden biri de Tercih İndeksi (PSI) tekniğidir. Bu tekniğin çalışmada kullanılan diğerk tekniklerden temel farkı kriter ağırlıklarına ihtiyaç duyulmadan sıralamaların elde ediliyor olmasıdır. Birinci adımda oluşturulması gereken karar matrisi Tablo (3.12)'de verilen matristir.

PSI tekniğinin ikinci adımında karar matrisi normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi için fayda yönlü kriterlerde ikinci bölümde verilen denklem (2.29) ve maliyet yönlü kriterlerde ise denklem (2.30) kullanılmıştır. Fayda yönlü kriterlere ait değerler normalize edilirken her kriter için alternatif değerlerinden en büyük olan değer seçilmiş, her kriter değeri bu en büyük değere bölünerek normalize edilmiştir. Maliyet yönlü kriterlere ait değerler normalize edilirken ise her kriter için alternatif değerlerinden en küçük olan değer seçilmiş, bu değer kriter değerlerine tek tek bölünerek, değerler normalize edilmiştir.

Tekniğin üçüncü adımında, önce her kriter için denklem (2.32) kullanılarak o kritere ait alternatif değerleri toplanıp alternatif sayısına bölünmüş ve ortalaması alınmış normalize değerler ($\bar{R}_j$) elde edilmiştir. Sonrasında bu değerler yardımıyla kriterlere ait tercih varyans değerleri (PV_j) denklem (2.31) kullanılarak hesaplanmıştır. Tercih varyans değeri her bir normalize alternatif değerinden ilgili kriterdeki ortalaması alınmış normalize değerlerin çıkarılması ve elde edilen sonuçların karelerinin toplanması ile hesaplanmıştır.

PSI tekniğinin dördüncü adımında önce tercih değerlerindeki sapmalar (Φ_j) denklem (2.33)'ün yardımıyla hesaplanmıştır. Buna göre tercih varyans değeri 1'den çıkarılmış ve sonuç mutlak değer olarak verilmiştir. Sonrasında bu sapma değerlerinin toplamı alınmış ve her kritere ait sapma değeri ikinci bölümde denklem (3.34)'ta verildiği gibi tek tek bu toplama bölünmüştür. Böylece her kriter için bir genel tercih değeri (ψ_j) hesaplanmıştır.

Genel tercih değerleri tıpkı diğer tekniklerde normalize matris değerlerinin kriter ağırlıklarıyla çarpıldığı gibi normalize matris değerleri ile çarpılmış ve genel tercih değerli normalize matris oluşturulmuştur. Bu matriste yer alan her bir alternatifin kriter değerleri toplanmış ve tercih indeksi değeri (I_i) elde edilmiştir. Bu hesaplama için de ikinci bölümde verilen denklem (2.35)’ten faydalanılmıştır.

Tercih indeksi değerlerinin büyükten küçüğe sıralanmasıyla da PSI tekniği tercih sıralamaları elde edilmiştir. Tercih indeksi değerleri ve sıralamalar Tablo (3.31)’de verilmiştir.

Tablo 3.31. PSI tekniği tercih indeks değerleri ve sıralamalar

	I_i	Sıralamalar
A1	0,0586	4
A2	0,0518	5
A3	0,0592	3
A4	0,1288	1
A5	0,0956	2

Tercih indeksi (PSI) tekniği kullanılarak elde edilen sıralamalarda hidrolik enerji (A4) birinci sırada yer almıştır. Jeotermal enerji (A5) ikinci sırada yer alırken biyokütle enerjisi (A3) üçüncü sıraya yerleşmiştir. Güneş enerjisi (A1) ve rüzgâr enerjisi (A2) de sırasıyla dördüncü ve beşinci sırada yer almışlardır.

Bu noktada ikinci bölümde anlatılan tüm çok kriterli karar verme teknikleri ile ayrı ayrı sıralamalar elde edilmiştir. Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi için, oluşturulan tüm sıralamalar izleyen kesimde “Borda Sayım” tekniği yardımıyla birleştirilmiştir.

3.7. Borda Sayım Tekniği ile Sonuçların Sıralanması

Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı seçimi probleminin çözümü için kullanılan tüm çok kriterli karar verme teknikleri sonucunda elde edilen sonuçların daha rasyonel bir biçimde ve tek bir sıralama ile birleştirilmesi amaçlanarak borda sayım tekniği kullanılmıştır.

Bu tekniğin uygulanabilmesi için önce tüm teknikler sonucunda elde edilen sıralamalar Tablo (3.32)’de bir arada verilmiştir.

Tablo 3.32. ÇKKV teknikleri ile elde edilen sıralamalar

	PROMETHEE	Multi-MOORA	PSI
A1	2	4	4
A2	5	2	5
A3	4	3	3
A4	1	1	1
A5	3	5	2

Borda sayım tekniğinin sonraki adımında her bir karar tekniği sonucunda elde edilen sıralamalarda en son sırada yer alan alternatiflere sıfır (0) puan, bir sonrakine bir (1) puan ve ilk sıradakine (n-1) puan verilmek üzere tüm sıralamalar puan değerlerine dönüştürülmüştür. ÇKKV teknikleri sonucunda sıralanan alternatiflerin Borda puanları Tablo (3.33)'te verilmiştir.

Tablo 3.33. Borda Sayım tekniği puan tablosu

	PROMETHEE	Multi-MOORA	PSI
A1	3	1	1
A2	0	3	0
A3	1	2	2
A4	4	4	4
A5	2	0	3

Son olarak her bir alternatifin borda skoru ikinci bölümde verilen denklem (2.36)'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Böylece tüm alternatiflere Borda skorları atanmış ve bu skorlar büyükten küçüğe sıralanarak nihai rasyonel tercih sıralaması Tablo (3.34)'te verilen biçimde elde edilmiştir.

Tablo 3.34. Borda Sayım tekniği skorları ve nihai sıralamalar

	Borda Sayım Skoru	Nihai Sıralamalar
A1	5	2
A2	3	3
A3	5	2
A4	12	1
A5	5	2

Borda sayım tekniği ile rasyonelleştirilip elde edilen sıralamalarda en yüksek toplam borda puanına sahip olan hidrolik enerji (A4) alternatifi olmuştur ve ilk tercih sırasına yerleşmiştir. Güneş enerjisi (A1), biyokütle enerjisi (A3) ve jeotermal enerji (A5) alternatifleri ise eşit puan alarak ikinci sıraya yerleşmişlerdir. nc yani sonuncu sırada ise rüzgâr enerjisi (A2) alternatifi yer almıştır.

Her bir alternatifi ilgili karar verme tekniği ile elde ettiği sıralamaların tek bir puan türüyle puanlanması göz ardı edilebilecek olan alternatiflerin tekrar değerlendirilmesini ve karar vericinin tüm tekniklerle elde edilen alternatif sıralamalarını ortak bir puan türünde görmesini sağlar. Bu nedenle, Borda sayım tekniği, karar verme işleminin farklı teknikler kullanılarak gerçekleştirileceği problemlerde karar vermeyi daha rasyonel bir hale getirmektedir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Fosil kaynakların doğada yarattığı geri döndürülemez hasarlar ve zamanla tükeneneğine dair inanç nedeniyle tüm dünyada alternatif enerji kaynaklarına yönelme ihtiyacı doğmuştur. Alternatif enerji kaynaklarından biri olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da bu nedenle günden güne artmaktadır. Enerji ve enerjinin temin edilmesi konuları Türkiye için de büyük öneme sahiptir. Türkiye'nin enerji ihtiyacını güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde temin edebilmesi, enerjide dışa bağımlılığını azaltması açısından da önemli bir konudur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir biçimde kullanımı da Türkiye'nin bu konuda atacağı önemli bir adımdır.

Bu çalışma, potansiyel yenilenebilir enerji kaynağı alternatifleri arasından Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi konusunda bir öneri sunmak amacıyla yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda uygulamada çok kriterli karar verme teknikleri kullanılmıştır.

Türkiye için potansiyel yenilenebilir enerji kaynağı alternatifleri, altı ana kriter ve yirmi dört alt kriter ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla çok kriterli karar verme tekniklerinden PROMETHE, Multi-MOORA ve PSI teknikleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir teknik sonucunda farklı alternatif sıralamaları elde edilmiştir. Bunun temel nedeni kullanılan tüm tekniklere ait uygulama algoritmalarının birbirinden farklı olmasıdır. Söz konusu çok kriterli karar verme teknikleriyle elde edilen farklı sonuçlar Borda sayım tekniği yardımıyla puanlanmış ve nihai bir sıralama elde edilmiştir. Elde edilen Borda skorlarına göre alternatifler büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Borda skoru 12 puanla en yüksek olan “Hidrolik Enerji” alternatifi Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynağı olarak belirlenmiştir. “Güneş Enerjisi”, “Biyokütle Enerjisi”, ve “Jeotermal Enerji” alternatiflerinin Borda skorları eşittir. Her birinin Borda skoru ikinci en yüksek puan olan 5'tir. Bu nedenle tüm bu alternatifler ikinci sıraya yerleşmişlerdir. Borda skoru 3 olan “Rüzgâr Enerjisi alternatifi ise son sıraya yerleşmiştir.

İlk sırada yer alan alternatif ile diğer alternatifler arasındaki Borda skor farkının büyük olması ilk sırada yer alan alternatifin diğer alternatiflere bir hayli baskın olduğunu göstermektedir. Ancak geri kalan dört alternatiften üçünün Borda skorlarının eşit olması Türkiye'nin potansiyel olarak belirlenen çoğu yenilenebilir enerji alternatiflerinden verim alabileceği anlamına gelmektedir. Borda skorları eşit olduğu için, ikinci sıraya yerleşen alternatifler de Türkiye'nin enerji ihtiyacını güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde temin edebilmesi adına faydalı yatırım alternatifleridir. Bölgesel bazda bir değerlendirme

yapılarak sıralanan tüm alternatifler kendilerine daha uygun olan bölgelerde yatırım aracı olarak kullanılabilirler. Ancak bu çalışma sonucunda “Hidrolik Enerji” alternatifi; teknik, ekonomik, çevre, sosyal-politik, potansiyel ve üretim gibi kriterler çerçevesinde değerlendirildiğinde diğer yenilenebilir enerji alternatiflerine kıyasla Türkiye genelinde kullanımı en uygun yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Hidrolik enerjinin ilk sırada yer almasının önemli nedenlerinden biri, ülkemizde halihazırda en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı olmasıdır. Üretim kapasitesinin yüksek olması da bir başka sebep olarak değerlendirilebilir. Birçok yenilenebilir enerji kaynağı, santral kurulumu aşamasında kullanılacak malzemelerin ithalatını gerektirmektedir. İthalat ihtiyacı da ilgili yenilenebilir enerji kaynağının üretim maliyetini yükseltmektedir. Hidrolik enerji santralleri Türkiye’de uzun zamandır kullanıldığı için santral kurulumunda ithalat ihtiyacı görece azdır. Bu durum da hidrolik enerjiyi daha tercih edilebilir yapmaktadır.

Enerjinin depolanabilirliği yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarında önemli bir konudur. Hidrolik enerji santralleri aracılığıyla elde edilen enerjinin depolanması konusunda Türkiye’de yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu durum da hidrolik enerjinin uygun bir kaynak olma şansını arttırmıştır. Hidrolik enerji yatırımları için en büyük problem santralin kapladığı alanın büyük olmasıdır. Bu problem de yer kısıtlamasını en aza indirgeyen çalışmalar yapılarak azaltılırsa hidrolik enerji alternatifi diğer yenilenebilir enerji alternatiflerine kıyasla daha baskın bir alternatif olmaya devam edebilir.

KAYNAKÇA

- Aktaş, R., Doğanay, M. M., Gökmen, Y., Gazibey, Y., & Türen, U. (2015). *Sayısal Karar Verme Yöntemleri* (1. baskı). İstanbul: Beta Yayıncılık.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık mantık: Bulanıklılık kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80–85.
- Arrow, K. J., & Hurwicz, L. (1972). An optimality criterion for decision-making under ignorance. *Uncertainty and Expectations in Economics*.
- Aytaç, M., & Gürsakal, N. (2015). *Karar verme*. Bursa: Dora Yayınevi.
- Bai, Y., & Wang, D. (2007). Fundamentals of fuzzy logic control-fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications. Y. Bai, H. Zhuang, & D. Wang (Editörler), *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications* içinde (s. 17–36). Springer.
- Basar, O. D., & Genc, E. G. (2019). Comparison of country ratings of credit rating agencies with MOORA method. *Business and Economics Research Journal*, 10(2), 391–404.
- Bayes, T. (1763). An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *The Philosophical Transactions, Reprinted in Biometrika*, 53, 370–418.
- Bayrak, Y. (2020). Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimini destekleme mekanizması (YEK-DEM). *Türkiye'nin enerji görünümü* içinde (s. 347–364). Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- Bayram, N. (2015). Belirsizlik altında karar verme. M. Aytaç & N. Gürsakal (Editörler), *Karar verme* içinde (s. 33–45). Bursa: Dora Yayınevi.
- Black, D. (1976). Partial justification of the Borda count. *Public Choice*, 28, 1–15.
- Borda, J. C. (1781). Mémoire sur les élections au scrutin. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*.
- Brans, J.P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. G. Salvatore, M. Ehrgott, & J. R. Figueira (Editörler), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* içinde (s. 164–195). London: Springer.

- Brans, J.P., & Vincke, P. (1985). Note—A preference ranking organisation method. *Management Science*, 31(6), 647–656.
- Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238.
- Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2011). MultiMOORA optimization used to decide on a bank loan to buy property. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(1), 174–188.
- Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2012). Robustness of MULTIMOORA: A method for multi-objective optimization. *Informatica*, 23(1), 1–25.
- Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K., Peldschus, F., & Turskis, Z. (2008). Multi-objective decision-making for road design. *Transport*, 23(3), 183–193.
- Brauers, W., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*, 35(2), 445–469.
- Buckley, J. J., & Eslami, E. (2002). *An introduction to fuzzy logic and fuzzy sets*. New York: Springer.
- Can, M. (2018). Karar teorisi. B. F. Yıldırım & E. Önder (Editörler), *Operasyonel, yönetsel ve stratejik problemlerin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemleri* içinde (s. 1–11). Bursa: Dora Yayınevi.
- Chu, T. C., & Lin, Y. (2009). An extension to fuzzy MCDM. *Computers and Mathematics with Applications*, 57(3), 445–454.
- Dağ, S., & Yıldırım, B. F. (2018). PROMETHEE. B. F. Yıldırım & E. Önder (Ed.), *Operasyonel, yönetsel ve stratejik problemlerin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemleri* içinde (s. 177–200). Bursa: Dora Yayınevi.
- Earman, J. (2002). Bayes, Hume, Price, and Miracles. *Bayes's Theorem*, 113, 91–109.
- Ecer, F. (2020). *Çok kriterli karar verme: Geçmişten günümüze kapsamlı bir yaklaşım* (1. baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.

- Emerson, P. (2013). The original Borda count and partial voting. *Social Choice and Welfare*, 40(2), 353–358.
- Gürsakal, S. (2015). Çok kriterli karar verme. M. Aytaç & N. Gürsakal (Editörler), *Karar verme içinde* (s. 243–274). Bursa: Dora Yayınevi.
- Hassan, N., Kamal, Z., Moniruzzaman, A. S., Zulkifli, S., & Yusop, B. (2015). *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision-Making Model Outcomes in Water Resources Management*. London: Springer.
- Hurwicz, L. (1951). Optimality criteria for decision making under ignorance. *Cowles Comission Discussion Paper*, 370.
- International Energy Agency (IEA). (2016). *Energy policies of IEA countries: Turkey*.
- International Energy Agency (IEA). (2018). *Renewables information 2018: Overview*.
- International Energy Agency (IEA). (2019). *World energy outlook 2019*.
- International Energy Agency (IEA). (2020a). *Global energy review 2019*.
- International Energy Agency (IEA). (2020b). *Global energy review 2020*.
- Işığışok, E. (2015). Karar vermeye giriş. M. Aytaç & N. Gürsakal (Editörler), *Karar verme içinde* (s. 1–32). Bursa: Dora Yayınevi
- Karaca, C., & Ulutas, A. (2018). Entropi ve WASPAS yöntemleri kullanılarak Türkiye için uygun yenilenebilir enerji kaynağının seçimi. *Ege Akademik Bakış*, 18(3), 483–494.
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiyede enerji durumu: Genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32–44.
- Laplace, P. S. (1820). *Théorie analytique des probabilités*. <https://play.google.com/store/books/details?id=J7gl92QRdZMC&rdid=book-J7gl92QRdZMC&rdot=1> (Erişim tarihi: 04.11.2020)
- Lezki, Ş., Sönmez, H., Şıklar, E., Özdemir, A., & Alptekin, N. (2019). *İşletmelerde Karar Verme Teknikleri* (H. Durucasu (Editör)). Eskişehir: T.C. Anadolu Üniversitesi.

- Maniya, K., & Bhatt, M. G. (2010). A selection of material using a novel type decision-making method: Preference selection index method. *Materials and Design*, 31(4), 1785–1789.
- Nguyen, H. T., & Walker, E. A. (1999). *A First Course In Fuzzy Logic* (2. baskı). Florida: CRC Press LLC
- Odu, G. O. (2019). Weighting methods for multi-criteria decision-making technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(8), 1449–1457.
- Oğuzlar, A. (2015). Risk altında karar verme. M. Aytaç & N. Gürsakal (Editörler), *Karar verme içinde* (s. 49–66). Bursa: Dora Yayınevi.
- Önay, O. (2018). MOORA. B. F. Yıldırım & E. Önder (Editörler), *Operasyonel, yönetsel ve stratejik problemlerin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemleri içinde* (s. 245–258). Burse: Dora Yayınevi.
- Oral, M. (2020). Solar energy potential of Turkey and evaluation of PV applications in local scale: Case of Karabük province. *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, 42, 482–503.
- Özcan, E. C., & Erol, S. (2014). A multi-objective mixed integer linear programming model for energy resource allocation problem: The case of Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 27(4), 1157–1168.
- Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). ANP ve TOPSIS yöntemleriyle Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi. *Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, 5(2), 204–219.
- Özdağoğlu, A. (2013). Üretim işletmelerinde lazer kesme makinelerinin PROMETHEE yöntemi ile karşılaştırılması. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 9(19), 305–318.
- Özdemir, M. S., Dalcalı, A., & Ocak, C. (2020). Akarsu tipi hidroelektrik santraller ve bu santrallerde kullanılan türbin-jeneratörler. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 69–75.

- Öztürk Avcı, B., & Başkaya, Z. (2011). Bulanık TOPSIS algoritmasında üçgen bulanık sayılar ile satış elemanlarının değerlendirilmesi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 6(16), 1–21.
- Pınar, A., Buldur, A. D., & Tuncer, T. (2020). Türkiye’deki rüzgar enerji santralleri dağılışının coğrafi perspektifle incelenmesi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 25(43), 167–182.
- Roszkowska, E. (2013). Rank ordering criteria weighting methods – a comparative overview. *Optimum. Studia Ekonomiczne*, 5(65), 14–33.
- Runkler, T. A., & Glesner, M. (1993). A set of axioms for defuzzification strategies towards a theory of rational defuzzification operators. *IEEE*, 3, 1161–1166.
- Saari, D. G. (1985). The optimal ranking method is the Borda count. *International Institute For Applied Systems Analysis* içinde (s.1-57).
- Samanta, D. (2016). *Defuzzification Method*. [http://cse.iitkgp.ac.in/~dsamanta/courses/archive/sca/Archives/Chapter5Defuzzification Methods.pdf](http://cse.iitkgp.ac.in/~dsamanta/courses/archive/sca/Archives/Chapter5Defuzzification%20Methods.pdf) (Erişim tarihi: 02.05.2019)
- Sanchez, P. P., & Soyer, R. (1998). Information concepts and pairwise comparison matrices. *Information Processing Letters*, 68(4), 185–188.
- Savage, L. J. (1954). *The foundation of statistics*. Jhon Wiley & Sons. https://books.google.co.uk/books?id=N_bBAgAAQBAJ&dq=The+Foundations+of+Statistics.+Wiley,+New+York,+1954&lr= (Erişim tarihi: 01.01.2021)
- Serdar, S. (2020). Türkiye hidroelektrik potansiyeli ve gelişme durumu. *Türkiye’nin enerji görünümü* içinde (s. 271–282). Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- Seyrek, E. (2014). *Temiz enerji AR-GE çalışmalarının patent perspektifinden değerlendirilmesi*. Ankara: T.C. Türk patent enstitüsü patent dairesi başkanlığı.
- Soyu, E., & Ürün, E. (2016). Türkiye’ nin enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları üzerine bir değerlendirme. *Sosyal Bilimler Dergisi, ICEBSS*(Özel sayısı), 31–45.

- Strateji Geliştirme Başkanlığı. (2016). *Dünya ve ülkemizde enerji ve tabii kaynaklar görünümü*. Ankara.
- TDK. (2021). *Büyük Türkçe Sözlük*. <https://sozluk.gov.tr> (Erişim tarihi:15.04.2018)
- Tezioglu, H., Arslan, M., & Demirok, H. D. (2019). Rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi. *Mühendislik alanında araştırma makaleleri içinde* (s. 219–241). Gece Akademi.
- Tian, Z. peng, Wang, J., Wang, J. qiang, & Zhang, H. yu. (2017). An improved MULTIMOORA approach for multi-criteria decision-making based on interdependent inputs of simplified neutrosophic linguistic information. *Neural Computing and Applications*, 28(1), 585–597.
- Turan, G. (2018). Çok kriterli karar verme. B. F. Yıldırım & E. Önder (Ed.), *Operasyonel, yönetsel ve stratejik problemlerin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemleri içinde* (s. 15–20). Bursa: Dora Yayınevi.
- Tzeng, G.H., & Huang, J.J. (2011). *Multiple attribute decision making*. New York: CRC Press.
- Tzeng, G. H., Chen, T. Y., & Wang, J. C. (1998). A weight-assessing method with habitual domains. *European Journal of Operational Research*, 110(2), 342–367.
- Vinodh, S., & Jeya Girubha, R. (2012). PROMETHEE based sustainable concept selection. *Applied Mathematical Modelling*, 36(11), 5301–5308.
- Wald, A. (1947). *Sequential analysis*. https://books.google.co.uk/books?id=4FZMAAAAMAAJ&dq=Abrahamwaldcriterion1947&hl=tr&lr&source=gbs_book_other_versions (Erişim tarihi:01.01.2021)
- Yavuz, V. A. (2016). Coğrafi pazar seçiminde PROMETHEE ve entropi yöntemlerine dayalı çok kriterli bir analiz: Mobilya sektöründe bir uygulama. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(2), 163–177.
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33–54.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.

- Zadeh, L. A., Fu, K.S., Tanaka, K., & Shimura, M. (1975). *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. London: Academic Press, INC.
- Zaim, A., & Çavşı, H. (2018). Türkiye’deki jeotermal enerji santrallerinin durumu. *Mühendis ve Makina*, 59(691), 45–58.
- Zhang, H., & Liu, D. (2006). *Fuzzy modeling and fuzzy control*. Berlin: Birkhauser.
- http-1: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (Erişim tarihi: 08.03.2021)
- http-2: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> (Erişim tarihi: 31.10.2020)
- http-3: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-biyokutle> (Erişim tarihi: 31.10.2020)
- http-4: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik> (Erişim tarihi:31.10.2020)
- http-5: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-jeotermal> (Erişim tarihi: 31.10.2020)
- http-6: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita> (Erişim tarihi:13.12.2020)
- http-7: <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari> (Erişim tarihi: 09.10.2020)