



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

# Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilirliklerinin Önceliklendirmesi: Çoklu Kriterli Karar Verme Yaklaşımı

HAZIRLAYAN

Tülay MORSÜNBÜL PARMAKSIZ

DANIŞMAN

DOÇ.DR. SELİM L. SANİN



# ÖZET

## YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİKLERİNİN ÖNCELİKLENDİRMESİ: ÇOKLU KRİTERLİ KARAR VERME YAKLAŞIMI

Tülay MORSÜNBÜL PARMAKSIZ

Doktora, Çevre Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selim L. SANIN

Ocak 2020, 162 sayfa

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada mevcut enerji akışından elde edilmelerinden dolayı, sürdürülebilir enerji kaynakları olarak kabul görmektedirler ancak, bir enerji kaynağının sürdürülebilir olması için sınırsız olması ve çevresel değerlere karşı zararsız bir şekilde temin edilmesi gerekmektedir. Ayrıntılı olarak sorgulandığında, mevcut döngünün bu şekilde olmadığı görülmektedir.

Gelecekteki enerji yatırımlarının etkin bir şekilde yönetilebilmesi için, öngörülen enerji sektörü büyüme senaryolarının çevresel ayak izlerinden kaynaklı problemlerin, sürdürülebilir enerji üretimi uygulamalarına odaklanarak çözülmesi gerekmektedir. Etkilerin nicel bir şekilde ölçülmesi için anahtar göstergeler tanımlanmalıdır.

Seçilen beş adet yenilenebilir enerji kaynağının sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi kapsamında tasarlanan bu tez çalışmasında, Çoklu Kriterli Karar Verme (ÇKKV) analizi tabanlı, sürdürülebilirlik bileşenlerinin entegre edildiği, aynı zamanda teknik kapsamlı indikatörlerin de değerlendirildiği bir model oluşturulmuş ve duyarlılık analizleri ile test edilmiştir.

ÇKKV kapsamında uygulanan yöntemlere dayalı modeller oluşturulurken, yenilenebilir enerji projeleri üzerinde çalışmış ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirme

yapabilecek bir bakış açısına sahip uzmanların görüşlerinden faydalanılmıştır. Verilerin toplanması aşamasında en gerçekçi sonuçların elde edilmesi için Türkiye genelinde projelendirilmiş ve/veya çalışan yenilenebilir enerji santralleri ve ülke özelindeki verilerden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan modeller kendi aralarında duyarlılık analiziyle test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte farklı bir karar verme yöntemiyle de elde edilen sonuçların uyumlulukları test edilmiştir. Uygulanan tüm proseslerin ortak sonucu olarak seçilen yenilenebilir enerji kaynakları arasından güneş enerjisi, seçilen sürdürülebilirlik indikatörlerine göre, Türkiye özelinde en uygulanabilir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilirlik Analizi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Sürdürülebilirlik, ÇKKV

## **ABSTRACT**

### **SUSTAINABILITY PRIORITIZATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES: MULTICRITERIA DECISION MAKING APPROACH**

**Tülay MORSÜNBÜL PARMAKSIZ**

**Doctor of Philosophy, Department of Environmental Engineering**

**Supervisor: Doç. Dr. Selim L. SANİN**

**January 2020, 162 pages**

Renewable energy sources are accepted as sustainable energy sources because they are obtained from the natural energy flow, but considering an energy source as sustainable, it needs to be unlimited and harmless to the environment. When questioned in detail, it is seen that the current cycle does not occur in this way.

In order to manage future energy investments effectively, problems arising from environmental footprints of energy sector growth scenarios, need to be solved by focusing on sustainable energy generation practices. Key indicators should be identified to quantify impacts.

Within the scope of this study, which is designed for evaluating the sustainability of five selected renewable energy sources, models based on Multi Criteria Decision Making (MCDM) analysis, integrating sustainability components, and also technical indicators are evaluated and tested with sensitivity analyzes.

While creating models based on the methods applied within the scope of MCDM, the opinions of experts who have worked on renewable energy projects and have sustainability perspective were utilized. In the stage of data collection, to achieve the most realistic results, data from renewable energy power plants projected and / producing energy in Turkey and the country-specific data was used. The models created within the scope of the study were tested by sensitivity analysis and the results were compared. In addition this, the compatibility of the results was tested with a different decision-making method. Results showed that, solar energy can be considered as the most sustainable option, among the evaluated renewable energy systems in terms of selected sustainability indicators.

**Keywords:** Sustainability Analysis, Renewable Energy Sources, Sustainability, MCDA

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐması kapsamında değerli bilgileriyle bana yol gösteren, danıŐmanım Do. Dr. Sayın Selim L. SANİN'e, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Sayın Gülen GÜLLÜ'ye ve Doç. Dr. Sayın Tuba Hande (ERGÜDER) BAYRAMOğLU'na ve tezin son halini alması sırasındaki önemli katkılarından dolayı Doç. Dr. Sayın Ayla BİLGİN, Dr. Öğretim Üyesi Sayın Merve GÖRGÜNER'e teşekkür ederim.

Manevi desteklerinden ötürü özellikle sevgili eşime, biricik kızıma, anneme ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım içerisinde, aralarında bulunmaktan oldukça keyif aldığım Hacettepe Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü ailesine teşekkür ederim.

Tülay MORSÜN BÜL PARMAKSIZ

Ocak 2020, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ .....	xi
KISALTMALAR .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Enerji Kaynakları ve Küresel Değişimlere Genel Bir Bakış .....	2
1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	8
1.2.1. Güneş Enerjisi.....	10
1.2.2. Rüzgar Enerjisi .....	14
1.2.3. Biyokütle Enerjisi .....	16
1.2.4. Hidroelektrik Enerjisi .....	17
1.2.5. Jeotermal Enerji .....	18
1.3. Enerji Kullanımında Yenilenebilir Enerji'nin Payı .....	20
2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI.....	25
2.1. Sürdürülebilirlik İle İlgili Başlıca Sorunlar .....	28
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi.....	32
2.3. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kullanımı.....	33
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	35
3.1. Enerji Problemlerinin Çözümü İle İlgili Yaklaşımlar.....	35
3.2. Sürdürülebilirlik ve Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilirliği İle İlgili Çalışmalar	36
4. AMAÇ VE KAPSAM .....	41



4.1. Model Yaklaşımı .....	41
5. MATERYAL ve METOD.....	44
5.1. Sürdürülebilirlik Modeli.....	44
5.2. Çok Kriterli Karar Verme Sistemi.....	45
5.2.1. Model Oluşturulması.....	46
5.2.2. Senaryo Analizleri.....	46
5.2.3. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP).....	46
5.2.4. Ağırlıklı Toplam Yöntemi.....	53
5.3. MODELE AİT KRİTERLERİN BELİRLENMESİ.....	54
5.4. İndikatörlerin (Alt Kriterlerin) seçilmesi.....	55
5.5. İndikatörlere ait veriler .....	59
5.5.1. Çevresel indikatörler .....	59
5.5.2. Sosyal İndikatörler .....	69
5.5.3. Ekonomik İndikatörler .....	73
5.5.4. Teknolojik İndikatörler .....	78
5.6. Seçilen Enerji Kaynaklarının Avantaj ve Dezavantajlarının Değerlendirilmesi ...	82
6. MODEL ÇALIŞMASI VE SONUÇLAR .....	84
6.1. AHP Mekanizmasının Kurulması.....	90
6.2. Duyarlılık Analizleri.....	98
6.3. Ağırlıklı toplamlar metodu (WSM).....	107
7. TARTIŞMA .....	109
8. KAYNAKLAR .....	115
EKLER.....	127
EK 1- Uzman Tablosu .....	127
EK 2- Anket Şablonu.....	128
EK 3- İkili Karşılaştırma Örnek Matrisler.....	129
EK 4-Tüm Kriterler Açısından İkili Karşılaştırma Değerleri ve Tutarlılık Oranları.....	130
ÖZGEÇMİŞ .....	133

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dünya genelinde kişi başına enerji tüketimi .....	3
Şekil 1.2.	Enerji kaynaklarının sınıflandırılması .....	4
Şekil 1.3.	Dünya genelindeki tahmini fosil yakıt rezervleri ve yıllık tüketimler .....	6
Şekil 1.4.	Enerji kaynaklı karbondioksit emisyonlarının yıllara göre değişimi. ....	7
Şekil 1.5.	Dünya genelinde enerji kaynaklarına göre tüketim miktarları .....	8
Şekil 1.6.	Güneş hücrelerinde elektrik akımının oluşma mekanizması.....	13
Şekil 1.7.	Bir rüzgar türbininin genel yapısı ve bileşenleri .....	15
Şekil 1.8.	Global enerji tüketimi ve yıllara göre dağılımı .....	21
Şekil 1.9.	Dünya genelinde yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi miktarları ve yüzdelik payları .....	22
Şekil 1.10.	Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kapasite artışı verileri. ....	23
Şekil 1.11.	Yenilenebilir enerji kaynaklarına kapsamında son üç yıla ait artış miktarları	23
Şekil 2.1.	Sürdürülebilirlik konsepti ve bileşenleri .....	27
Şekil 4.1.	Çalışmanın basamakları. ....	42
Şekil 5.1.	Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik değerlendirilmesi üzerine oluşturulan model. ....	44
Şekil 5.2.	Sürdürülebilirlik İndikatörlerinin Belirlenme Aşamaları. ....	57
Şekil 5.3.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre CO <sub>2</sub> salım aralıkları. ....	60
Şekil 5.4.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre CO <sub>2</sub> salımları. ....	61
Şekil 5.5.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre SO <sub>2</sub> salım aralıkları. ....	62
Şekil 5.6.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre SO <sub>2</sub> salımları. ....	63
Şekil 5.7.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre NO <sub>x</sub> salım aralıkları.....	64
Şekil 5.8.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre NO <sub>x</sub> salımları.....	65
Şekil 5.9.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre su kullanım verileri aralıkları...	66
Şekil 5.10.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre su kullanım verileri. ....	66
Şekil 5.11.	Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre arazi kullanım verileri aralıkları.	67

Şekil 5.12. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre arazi kullanım verileri. ....	68
Şekil 5.13. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine istihdam olanağı verileri. ....	70
Şekil 5.14. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerinin sosyal kabul edilebilirlik bazında değerlendirme sonuçları. ....	72
Şekil 5.15. Yenilebilir enerji kaynaklarının yatırım tutarları aralıkları. ....	74
Şekil 5.16. Yenilebilir enerji kaynaklarının yatırım tutarları. ....	74
Şekil 5.17. Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının birim enerji maliyeti. ....	75
Şekil 5.18. Yenilebilir enerji kaynaklarının birim enerji maliyeti aralıkları. ....	76
Şekil 5.19. Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının işletme ve bakım masrafları aralıkları. ....	77
Şekil 5.20. Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının işletme ve bakım masrafları. ....	78
Şekil 5.21. Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimlilik değerleri. ....	79
Şekil 5.22. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite faktörü değerleri. ....	80
Şekil 5.23. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kaynak potansiyeli değerleri. ....	81
Şekil 6.1. Kurgulanan AHP hiyerarşik yapısı. ....	85
Şekil 6.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının indikatörler bazında değerlendirilmesi. ....	89
Şekil 6.3. Ana kriterlere ait önem derecesi karşılaştırması. ....	91
Şekil 6.4. Orijinal senaryo kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranları. ....	97
Şekil 6.5. Orijinal senaryo kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranlara ait değişim eğilimleri. ....	98
Şekil 6.6. Tam sürdürülebilirlik senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranları. ....	99
Şekil 6.7. Tam sürdürülebilirlik senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranlarına ait değişim eğilimleri. ....	100
Şekil 6.8. Kriter minimizasyonu senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranları. ....	101

Şekil 6.9. Kriter minimizasyonu senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranlarına ait değişim eğilimleri. ....	102
Şekil 6.10. CO <sub>2</sub> alt kriterinin önem derecesinin minimum olması durumu. ....	103
Şekil 6.11. CO <sub>2</sub> alt kriterinin önem derecesinin maksimum olması durumu. ....	104
Şekil 6.12. CO <sub>2</sub> alt kriterinin önem derecesinin eşitlenmesi durumu.....	105
Şekil 6.13. Tüm senaryolar bazında seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının yüzdelik değerleri.....	106
Şekil 6.14. Ağırlıklı toplamlar metodundan elde edilen sonuçlar. ....	107

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları ve kullanım türlerine göre sınıflandırılması.	9
Tablo 1.2. Seçilen enerji kaynaklarına göre incelenen santrallerin teknik özellikleri.	20
Tablo 2.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarını ve kurulu güç kapasitelerinin ülkeler bazında dağılımı.....	34
Tablo 5.1. Önem Derecesi Skalası .....	48
Tablo 5.2. İndikatörlerin literatürdeki dağılımları. ....	58
Tablo 5.3. İndikatörlerin kategorileri, birimleri ve sürdürülebilirlik bağıntıları.....	58
Tablo 5.4. İncelenen enerji kaynaklarının karşılaştırılması. ....	83
Tablo 6.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre indikatörlere ait değerler. ....	86
Tablo 6.2. İndikatörlerin normalize edilmiş değerleri.....	88
Tablo 6.3. Ana indikatörlere ait ikili karşılaştırma işlem tabloları ve tutarlılık hesaplamaları. ....	92
Tablo 6.4. Oluşturulan hiyerarşik yapı dahilinde elde edilen indikatörlere ait sayısal değerler. ....	95

## KISALTMALAR

AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
BP	British Petrol
BTU	British Termal Unit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
ÇKKV	Çoklu Kriterli Karar Verme
EIA	Energy Information Administration
GW	Gigawatt
Gt	Gigaton
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt Saat
m <sup>2</sup>	Metrekare
NO <sub>x</sub>	Azot oksitler
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
PV	Fotovoltaik
SO <sub>2</sub>	Kükürt dioksit
TWh	Terawatt Saat
WSM	Weighted Sum Method (Ağırlıklı Toplamlar Metodu)

# 1. GİRİŞ

Sanayi devriminden itibaren yaşanan gelişmelerle artan enerji ihtiyacı ile birlikte fosil yakıtlara olan küresel çaptaki bağımlılık, 1800'lü yıllardan itibaren atmosfere yaklaşık 1100 Gt karbondioksit salımı gerçekleşmesine yol açmıştır. Günümüzde ise konvansiyonel enerji kaynaklarının iklim değişikliğine olan etkileri ve rezervlerinin sınırları da göz önüne alınarak, konvansiyonel olmayan enerji kaynaklarına olan talep önemli derecede artmıştır (Desai, ve Bandyopadhyay, 2017).

Fosil yakıt kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki en büyük fark yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğinin olmasıdır. Bununla birlikte, sera gazlarının salımına olan katkılarının daha az olması dolayısıyla, çevresel açıdan daha temiz enerji kaynakları olarak tanımlanabilirler (Desai, ve Bandyopadhyay, 2017).

Temiz enerji konsepti açısından bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi gerektiği düşünülmektedir, ancak bu kaynakların kullanımı ile ilgili etkin bir planlama stratejisinin oluşturulmaması istenmeyen sonuçlar doğmasına yol açabilmektedir. Örneğin biyokütle enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazla su kullanımı olan bir prosesken, jeotermal enerji kullanımı sırasında CO<sub>2</sub> salımı diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazladır.

Yenilenebilir enerji kavramı genellikle sürdürülebilirlikle ilişkilendirilir ancak, yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir olup olmadığını, sürdürülebilirlik kavramının bileşenleri olan çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerini değerlendirmeden belirlemek mümkün değildir. Doğal olarak, hiçbir enerji üretim prosesi çevresel ve sosyal etkileri olmadan gerçekleşmeyeceğinden, daha pragmatik bir tanımlama ile sürdürülebilir enerji, yaşanabilir bir gelecek için çevresel negatif etkilerden tamamen sıyrılmamış ancak sınırlamış olarak, toplumsal kalkınmayı mümkün kılmalıdır (Harjanne ve Corhonen 2019).

Tester ve ark., (2005) sürdürülebilir enerjiyi, “enerji yoğun malların ve hizmetlerin tüm insanlarca eşit olarak erişilebilirliği ve gelecek nesiller için yeryüzünün korunması arasında dinamik bir uyum” olarak tanımlamıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, çevremizde doğal olarak süregelen enerji akışından elde edilmelerinden dolayı sürdürülebilir olmaları gerekmektedir. Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir olması için, sınırsız olması ve çevresel değerlere karşı zararsız bir şekilde temin edilmesi gerekmektedir. Detaylı bir şekilde sorgulandığında günümüzde gerçekleşen döngünün bu şekilde olmadığı görülmektedir.

Gelecekteki enerji yatırımlarının yönetilebilmesi için öngörülen enerji sektörü büyüme senaryolarının çevresel ayak izlerinden kaynaklı sorunların, sürdürülebilir enerji üretimi uygulamaları kapsamında çözümlenmesi gerekmektedir. Temel göstergeler etkilerin nicelleştirilmesini sağlayacak şekilde belirlenmelidir.

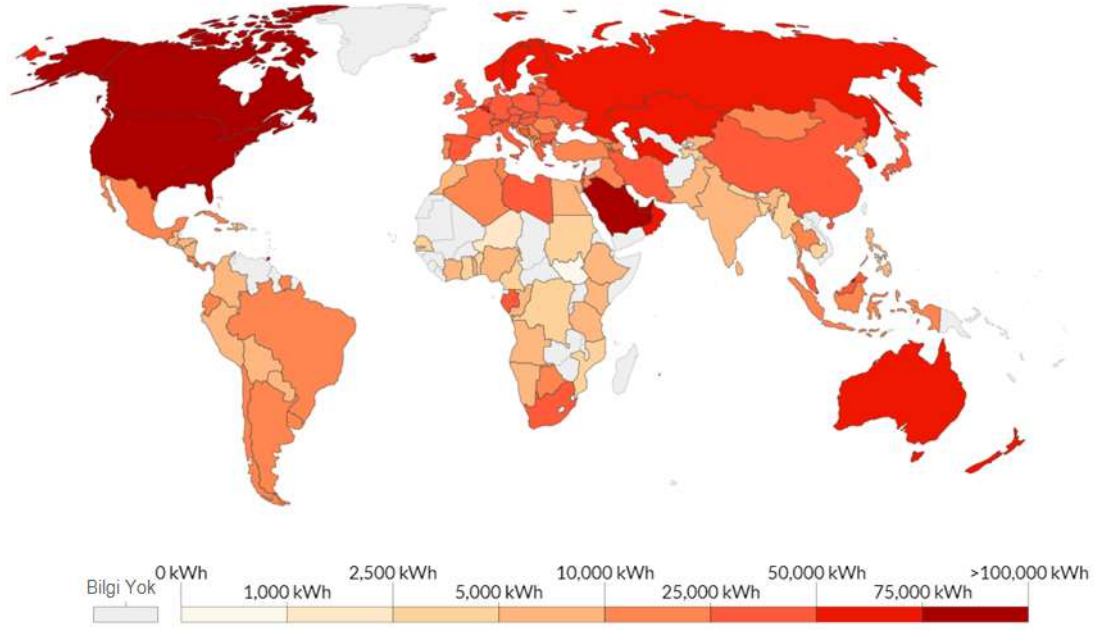
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında sürdürülebilirlik konusu esas alındığında çeşitli sürdürülebilirlik kriterlerine göre analizlerin yapılması ve buna uygun olarak politikaların geliştirilmesi, enerji planlaması ve kaynak yönetimi açısından önemli bir noktadır. Yapılan çalışma ile, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik indikatörleriyle değerlendirilmesi yöntemini benimseyen bir karar modeli geliştirerek, Türkiye özelinde, uygun plan ve politikaların geliştirilmesine ışık tutulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının, ülkemizdeki yenilenebilir enerji ve sürdürülebilirlik politikalarına katma değer sağlama amacıyla, sürdürülebilirlik indikatörleri kullanılarak Çoklu Kriterli Karar Verme Mekanizması (ÇKKV) tabanlı bir model oluşturulmuş ve çıktıları irdelenmiştir.

### **1.1. Enerji Kaynakları ve Küresel Değişimlere Genel Bir Bakış**

Sanayileşme süreciyle birlikte, günümüze dek üretim taleplerindeki artış, enerjiye duyulan ihtiyacın da önemli derecede artmasını sağlamıştır. Enerji ihtiyacının karşılanabilmesi ve enerji kullanımı ise ülkelerin refah düzeyiyle doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda Dünya genelinde kişi başına enerji tüketimi Şekil 1.1.'de verilmiştir. Yıllık ortalama enerji tüketimi kişi başına kilovat saat olarak ifade edilmiştir.





Şekil 1.1. Dünya genelinde kişi başına enerji tüketimi (<https://ourworldindata.org>)

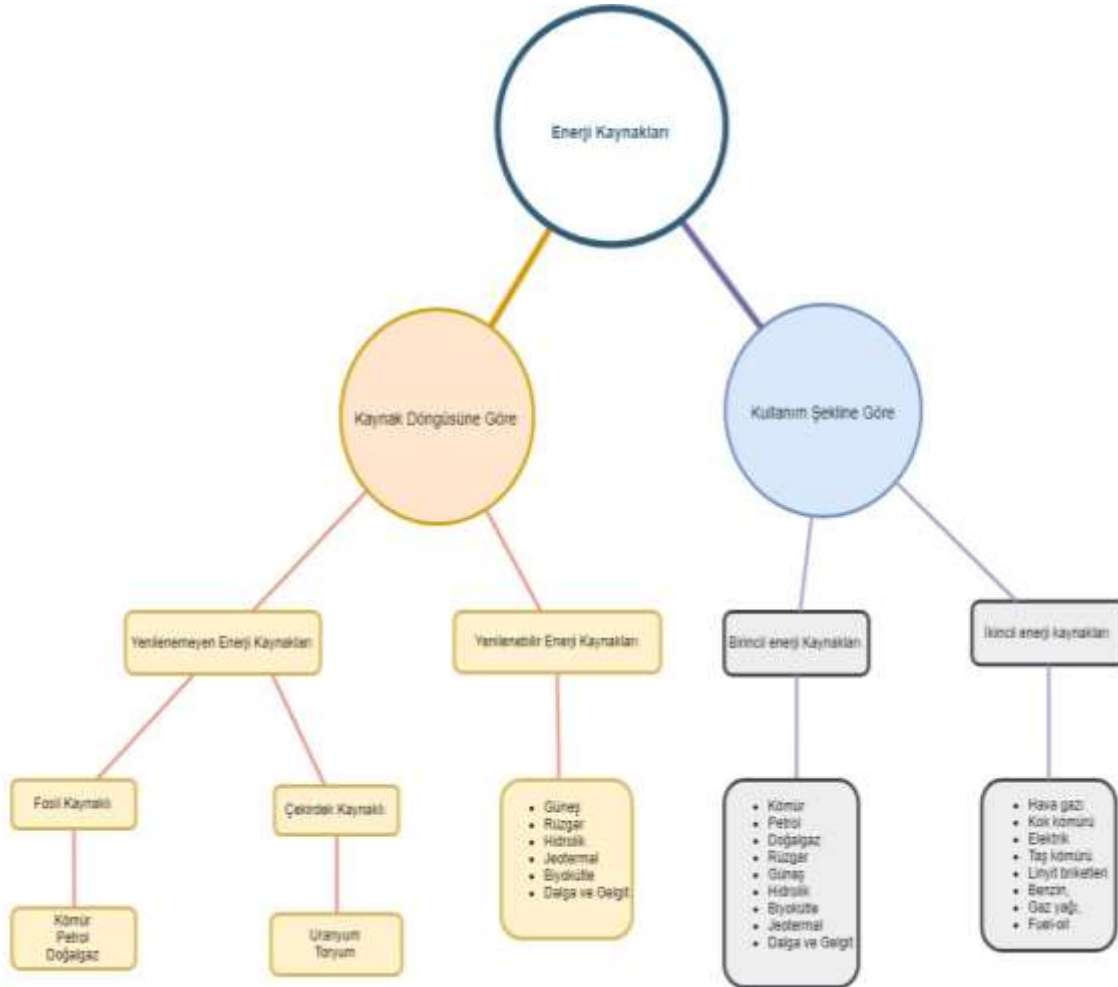
Enerjiye ulaşım; insan refahı, ekonomik kalkınma ve yoksulluğun azaltılması açısından en önemli yapıtaşlarından biridir. Tüm insanlığın enerjiye yeterli seviyede erişime sahip olması, küresel kalkınma için günümüzde devam eden zorlu bir mücadeledir.

Elektrik üretiminde girdi olarak kullanılan çeşitli enerji türleri bulunmaktadır. Bu enerji türlerini kaynak döngüsüne göre, yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan enerji kaynakları olarak ikiye ayırmak mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji ve benzeri biçimlerde karşımıza çıkmaktadır. Yenilenebilir olmayan enerji kaynakları olarak fosil yakıt türleri (petrol, kömür, linyit, doğal gaz) ve nükleer enerji türleri örnek verilebilir. (Panwar ve ark., 2011) Kullanım şekillerine göre ise, enerji kaynaklarını, birincil ve ikincil enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

- Birincil enerji;  
Hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen enerji kaynaklarını kapsayan bu kavram doğada hazır şekilde bulunan, herhangi bir dönüşüm gerçekleşmeden kullanılan enerji türleri olarak ifade edilebilir.
- İkincil enerji;

Doğada doğrudan bulunmayan ve dönüşüm yöntemleriyle kullanılabilir bir forma çevrilmiş enerji türüdür.

Enerji kaynaklarına ait sınıflandırma, Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. Enerji kaynaklarına ait ana sınıflandırma kriteri olarak görülen alanlar, halka şeklinde temsil edilmiş olup, alt kriterler ise dörtgen biçimli olarak gösterilmiştir.



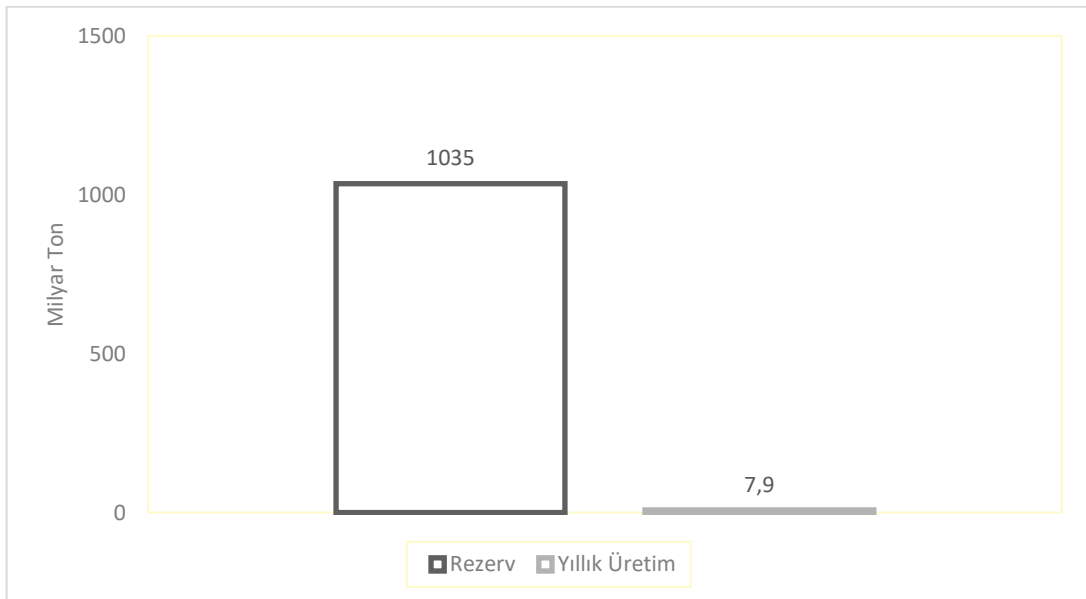
Şekil 1.2. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması

Üretim taleplerindeki artışa bağlı olarak, başta petrol olmak üzere fosil yakıt fiyatlarının ciddi oranda yükselişi ve kullanım artışıyla paralel olarak toplum ve çevre sağlığına olan etkilerinin kümülatif olarak artmasıyla, temiz, güvenli, ucuz ve sürdürülebilir enerji kaynağı arayışı hızlanmıştır. Bu kapsamda petrol, doğal gaz ve kömüre alternatif olarak yenilenebilir kaynaklara ve nükleer enerjiye yönelim olmuştur.

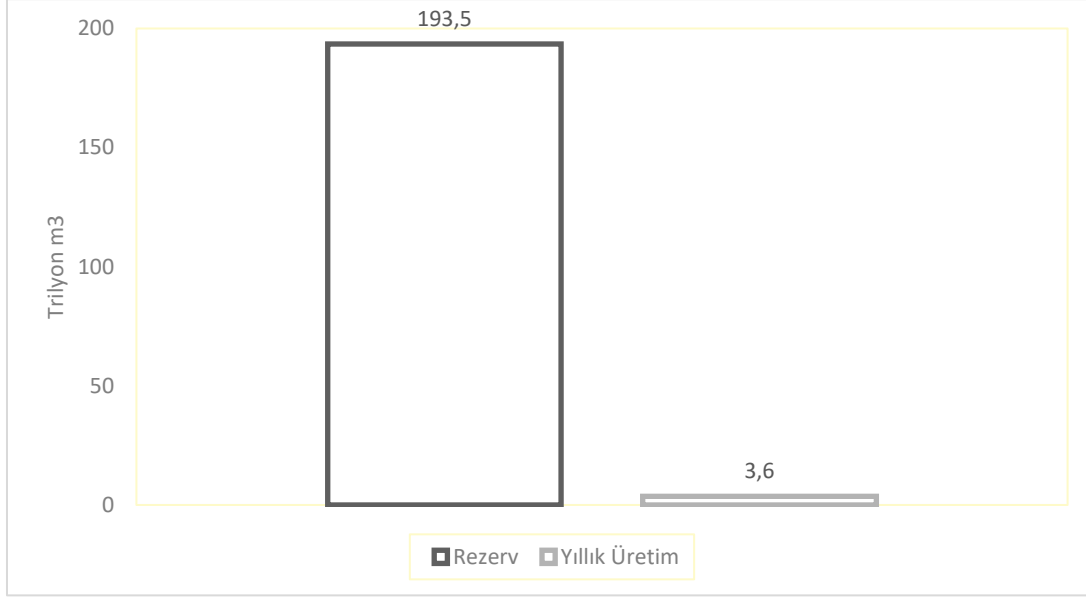
Alternatif kaynaklara bakıldığında nükleer enerji ile ilgili hususlar da gündeme gelmiştir. Özellikle nükleer atıkların bertarafındaki zorluklar, çevresel açıdan önemli geri dönülemez sorunlar yaratmaktadır. Bununla birlikte yetkin uzman gereksinimi, hammadde sorunları bu santrallerin işletilmesini zorlaştırmaktadır. Güncel deneyimler de göz önünde bulundurulduğunda, nükleer santrallerde yaşanan kazalar sonucu, ekolojik sistemde izleri silinemeyen tahribatlar yaratmakta ve etkileri nesiller boyu devam etmektedir. Bu etmenler de hesaba katıldığında, sürdürülebilir enerji konseptinde yenilenebilir enerjinin yeri nükleer enerjiye göre daha üst bir pozisyonda değerlendirilmelidir.

Geçmişten günümüze dek enerji sistemleri, ağırlıklı olarak fosil yakıtlar üzerine kurulmuştur. Üretim kontrolü ve sürekliliği açısından fosil yakıtlar, konvansiyonel enerji kaynakları olarak da adlandırılmaktadır. Bu enerji kaynaklarının en önemli özelliği üretiminin kontrol edilebilmesidir. Ancak, sanayileşme, nüfus artışı ve kentleşme gibi unsurların da artışıyla, 2017 yılı itibariyle dünya petrol rezervlerinin 51 yıllık doğalgaz rezervlerinin 53 kömür rezervlerinin ise 114 yıllık bir ömrünün kaldığı tahmin edilmektedir (Koç ve ark.,2018). Bu kaynaklara ait rezerv ve yıllık tüketim ilişkisi Şekil 1.3. a), b) ve c)'de görülmektedir.

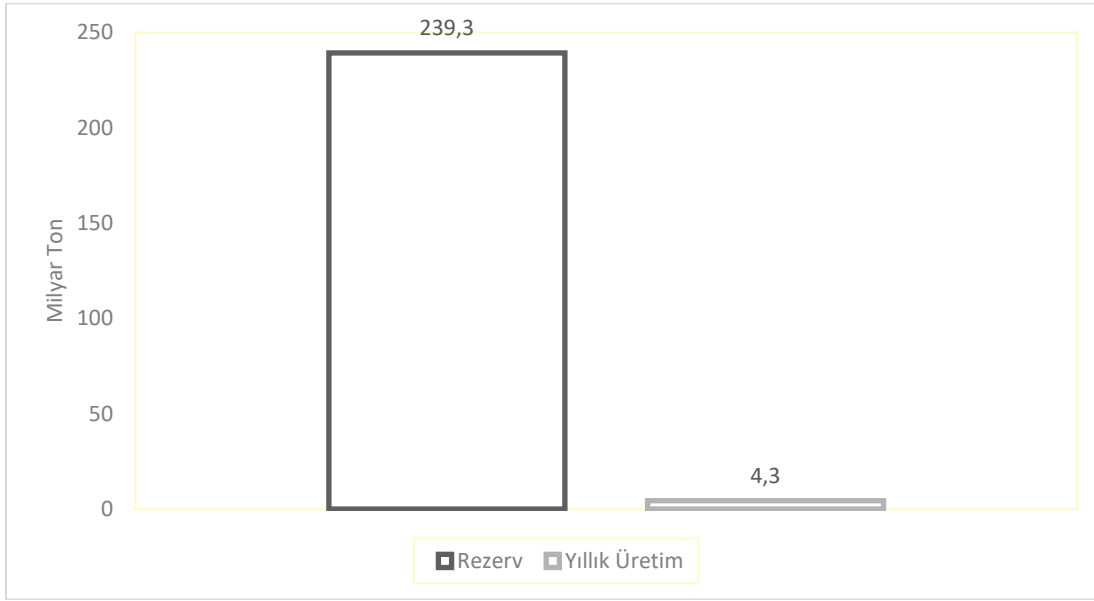
a)



b)



c)

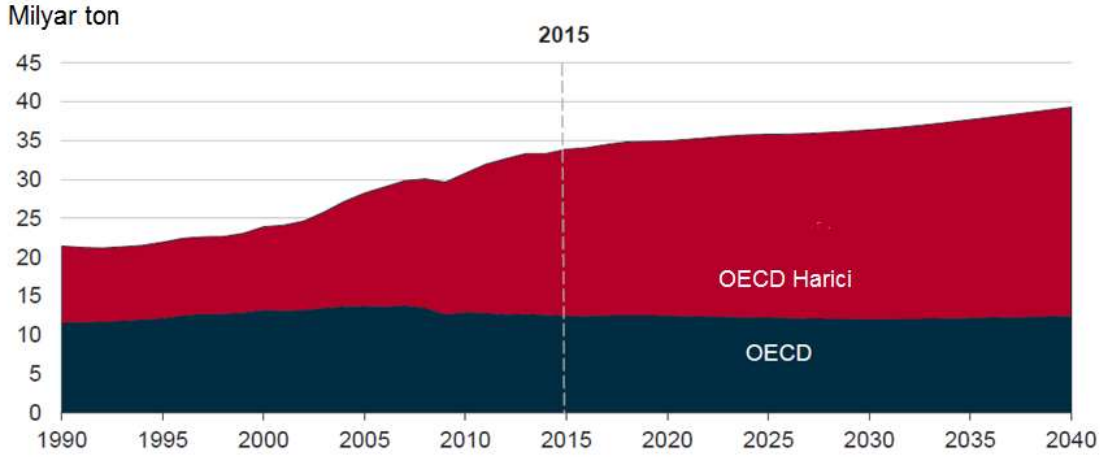


Şekil 1.3. Dünya genelindeki tahmini fosil yakıt rezervleri ve yıllık tüketimler (Koç ve ark.2018).

Bu hususlarla birlikte, enerji sistemlerinin önemli çevresel etkileri de bulunmaktadır. Kömür petrol gibi fosil yakıtlar küresel iklim değişikliğinin temel faktörü olan karbondioksit ve diğer sera gazlarının en önemli kaynaklarıdır. Küresel iklim değişikliği hedeflerine ulaşılması kapsamında enerji kaynaklarının kullanımında toplu halde bir değişime gidilmesi gerekmektedir. Enerji kaynaklı karbondioksit emisyonları

ve yıllara göre değişimi Şekil 1.4.'te verilmiştir. Karbondioksit emisyonlarının artış trendi ve tahmini artış miktarı grafikte görüldüğü üzere sürekli olarak yükselmektedir. Özellikle OECD harici ülkelerdeki artış trendi dikkat çekicidir.

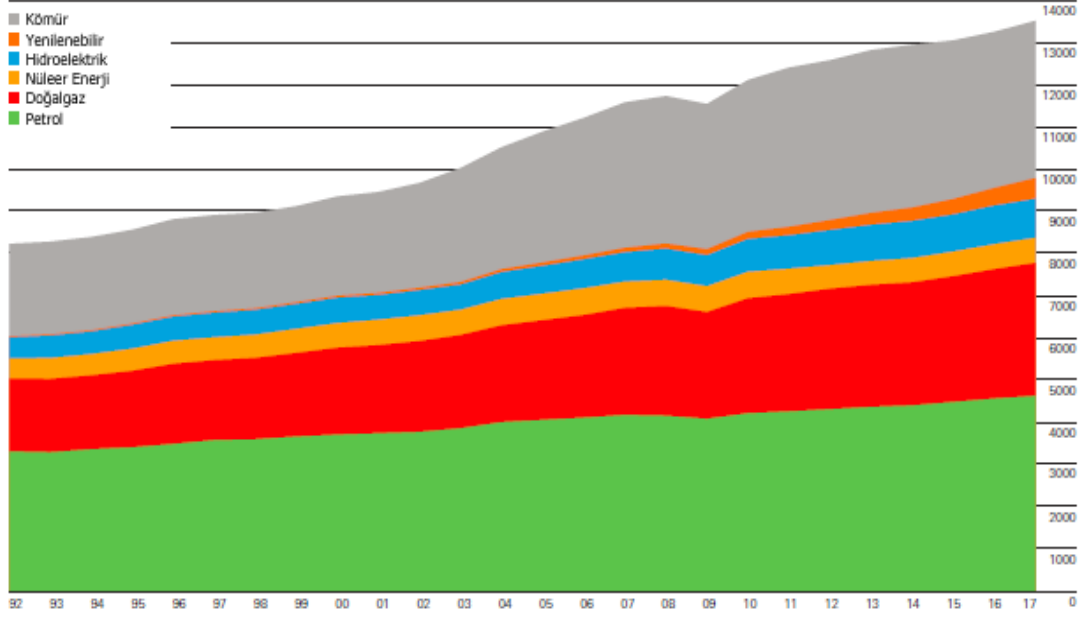
#### Enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonları



Şekil 1.4. Enerji kaynaklı karbondioksit emisyonlarının yıllara göre değişimi.

Kalkınma ve gelişim arasındaki zorlu dengenin sağlanması, global ölçekte herkesin yeterli sürdürülebilir enerjiye erişim hakkını elde etmesine, dolayısıyla iyi yaşam standartlarına sahip olması anlamına gelmektedir. Dünya genelindeki enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımını aşağıdaki Şekil 1.5.'te gösterilmektedir.

### Global tüketim Milyon ton petrol eşdeğeri



Şekil 1.5. Dünya genelinde enerji kaynaklarına göre tüketim miktarları (BP,2018).

Grafikte görülen veriler yorumlandığında dünya genelinde birincil enerji tüketiminin 2017 yılında %2,2'lik bir artış gösterdiği, bir önceki yılda %1,2'lik bir artış olduğu ve 2017 yılındaki artışın 2013 yılından beri gerçekleşen en büyük artış olduğu (BP,2018) ifade edilebilir.

## 1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları adlarından da anlaşıldığı üzere kendilerini doğal şekilde yenileyebilen tükenmeyen kaynaklar olarak tanımlanabilirler. Bu kaynaklar arasında, biyoenerji, hidroelektrik enerjisi, jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, gelgit ve dalga enerjisi gibi enerji kaynakları sayılabilir. Temel yenilenebilir enerji kaynakları ve kullanım şekilleri Tablo 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları ve kullanım türlerine göre sınıflandırılması (Panvar ve ark., 2011).

<b>Enerji Kaynağı</b>	<b>Enerji Dönüşümü ve Kullanım Seçeneği</b>
Hidroelektrik	Enerji üretimi
Modern Biyokütle	Isı ve enerji eldesi, yakma, gazlaştırma, çürütme
Jeotermal	Kentsel Isıtma, enerji üretimi, hidrotermal, kuru sıcak kaya
Güneş	Solar ev sistemleri, solar kurutucular, solar pişiriciler
Direkt Güneş	Fotovoltaik, termal enerji üretimi, su ısıtıcılar
Rüzgar	Enerji üretimi, rüzgar jeneratörleri, yel değirmenleri, su pompaları
Dalga ve Gel-git	Muhtelif dizaynlar, bent, gel-git akıntısı

Yenilenebilir enerji kavramının daha detaylı tanımlanması gerekirse, doğal prosesler sonucu oluşan ve süreklilik özelliği olan enerji kaynakları şeklinde açıklanabilir. Yenilenebilir enerji doğada süreklilik halinde ve her an kullanıma hazır durumda tükenmeyecek miktarda bulunmaktadır.

Dünya genelinde nüfus artışı ve beraberinde enerji ihtiyacındaki artış, fosil yakıt kaynaklarının sürekli kullanılmasına bağlı, kaynaklarının azalması, sera gazı emisyonlarının artışı ve diğer çevresel problemler, fosil yakıt fiyatlarının sürekli dalgalanması, jeopolitik ve askeri çatışmalara yol açmıştır. Bu problemler, netice itibarıyla, insan toplumları için potansiyel olarak geri dönüşü olmayan bir tehdide yol açacak sürdürülemez durumlar yaratacaktır. Bu koşullarda, yenilenebilir enerji kaynakları en önemli alternatif ve giderek büyüyen sorunlara tek çözüm olarak görülmektedir (Tiwari ve Mishra, 2011, Owusu ve Asumadu-Sarkodie, 2016).

Alternatif enerji arayışları 1960'lı yılların sonuna doğru hızla artmıştır. Carson tarafından 1962 yılında yayımlanan "Silent Spring" isimli kitap, sanayi devriminin çevresel sonuçları ile ilgili bir uyanış başlatmıştır. Bununla birlikte Meadows ve arkadaşları tarafından 1972 yılında yayımlanan "Limits to Growth" kontrolsüz gelişmenin kaçınılmaz bir felakete mi yoksa bir değişime mi yol açacağını tartışmaya açarak aynı etkiyi perçinlemiştir. Fosil yakıtlar bu konulardaki en önemli problem olarak görülmeye

başlanmış, bununla birlikte nükleer enerji kullanımının yaratacağı potansiyel tehlikeler daha fazla dile getirilmeye başlanmış, bu konular üzerinde gerçekleşen tartışmalar sonucu daha temiz enerji kaynakları arayışı ile ilgili çevresel hareketlerin zemini hazırlanmıştır. (Manwell ve ark.,2010). 1973 ve 1979 yıllarında yaşanan enerji krizleri ise yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan bağımlılığın potansiyel tehlikelerini gözler önüne serdi.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, çevremizde doğal olarak süregelen enerji akışından elde edilmelerinden dolayı sürdürülebilir olmaları beklenmektedir. Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir olması için, sınırsız olması ve çevresel değerlere karşı zararsız bir şekilde temin edilmesi gerekmektedir. Detaylı bir şekilde sorgulandığında günümüzde gerçekleşen döngünün bu şekilde olmadığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğini etkileyen ve iklim değişikliğini hafifletme yeteneğini engelleyen çeşitli zorluklar vardır. Bu zorluklar: piyasa başarısızlıkları, bilgi eksikliği, gelecekteki yenilenebilir kaynak dağıtımı için hammaddelere erişim ve en önemlisi insanların enerjiiyi verimli bir şekilde kullanma biçimidir. (Owusu ve Asumadu-Sarkodie, 2016).

Tez çalışması kapsamında, Tablo 1.1.'de temel anlamda ifade edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından Ülkemiz genelinde güncel uygulamaları olan kaynaklar seçilmiştir. Bu Seçim sonucunda, sürdürülebilirlik değerlendirilmesi yapılması amacıyla, Direkt Güneş Enerjisi (PV Sistemler), Rüzgar Enerjisi, Biyokütle Enerjisi, Hidroelektrik Enerjisi ve Jeotermal Enerji Projeleri incelenmiştir.

### **1.2.1. Güneş Enerjisi**

Güneş enerjisi potansiyel kapasitesi yeterli derece kullanılabilme safhasına erişilememiş en büyük enerji kaynağıdır (Lewis ve Nocera, 2006). Güneş enerjisi yardımıyla elektrik üretimi teknolojileri, herhangi bir sera gazı emisyonu veya toksik kimyasal madde içermemesi nedeniyle, fosil yakıtlara ve diğer karbon bazlı enerji kaynaklarına göre çeşitli çevresel avantajlara sahiptir (Fthenakis ve Bulawka, 2004).

Temelde güneş enerjisi, jeotermal ve gelgit enerjisi dışındaki tüm büyük yenilenebilir enerji teknolojilerinin ana kaynağıdır. Güneş rüzgar enerjisi için rüzgar oluşumunda,



biyoyakıtlar için bitki büyümesi ve hidroelektrik üretimini mümkün kılan su buharlaşması ile sonuçlanan atmosferik süreçleri yönetir.

Güneşten gelen direkt enerji ise, güneş enerjisi sistemlerine güç verir. Dünya genelinde, fosil kaynaklı enerji elde etmek amacıyla tüketilen bir yıllık enerjiden daha fazla güneş enerjisi Dünya'ya ulaşan bir dakikalık ışımayla teorik olarak elde edilebilir.

Güneş enerjisinden elektrik elde edilmesi ile ilgili teknolojiler, fotovoltaik ve termal olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir.

Termal güneş enerjisi teknolojileri, bir taşıyıcı sıvının, genellikle suyun ısınması prensibine dayanır. Sıcak sıvı, sıcak su ısıtmasında olduğu gibi doğrudan kullanılabilir veya elektrik üretimi gibi başka bir işlemi sürmek için kullanılabilir (Hannah,2015).

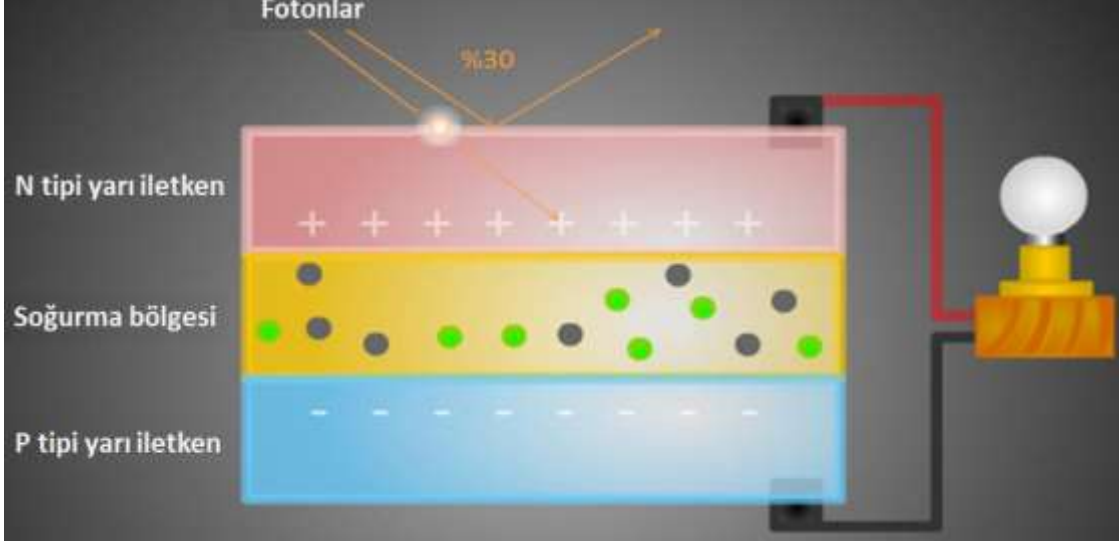
Fotovoltaik sistemler, fotovoltaik hücreler vasıtasıyla güneşten gelen ışınları direkt olarak elektrik akımına çevirirler. 1955 yılında, uzay mekiklerine enerji sağlanması amacıyla icat edilmişlerdir. Zaman içerisinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri neticesiyle verimlilikleri artarken, maliyetleri de önemli ölçüde azalmıştır (Abbasi ve Abbasi, 2011).

Einstein'ın parçacık teorisine göre ışık sadece dalga yapısında olmayıp tanecik ya da parçacık olarak da hareket etmektedir. Fotoelektrik etki olarak bilinen bu olayda, bir yüzey üzerine gönderilen ultraviyole ışığın hedef levhaya çarpması esnasında, elektron saçıldığını gözlemledi Einstein bu gözlem sonucunda ışığın, fotonlar ya da enerji paketleri içeren bir akış olduğu kanaatine varmıştır. Diğer bir ifadeyle, güneş ışınımı içerisinde elektromanyetik parçacıkların yani fotonların akışı gerçekleşmektedir. Fotonlar elektromanyetik radyasyonun parçacık boyutundaki görünümüdür. Elektromanyetik radyasyon enerjisi iletimi foton tabir edilen bu parçacıklar sayesinde gerçekleşmektedir (Öztürk, 2014).

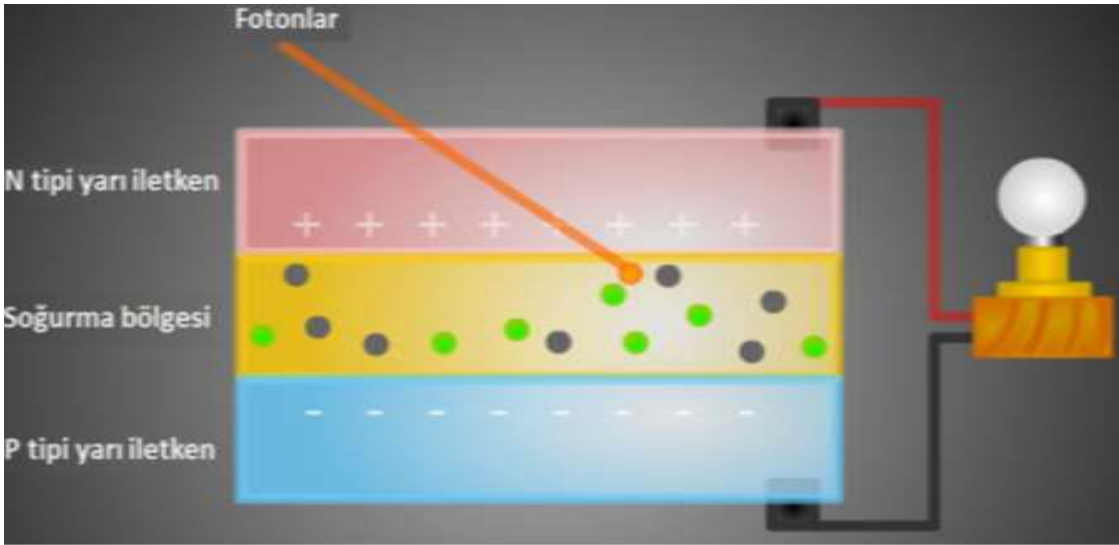
Fotovoltaik hücreler, içerdiği silikon materyalin, fotonları absorblamasıyla, güneş enerjisinin toplaması amacıyla kullanılır. Absorblama olayı, her foton çarpmasıyla birlikte silikon atomundan bir elektronun serbest kalmasına yol açar. Hücrenin her iki tarafındaki zıt yüklü kutuplar, elektronların elektrik akımı oluşturmasını sağlar. Şekil

1.6.a) b) ve c)'de elektrik akımının oluşumunun aşamaları gösterilmektedir (Maczulak, 2010).

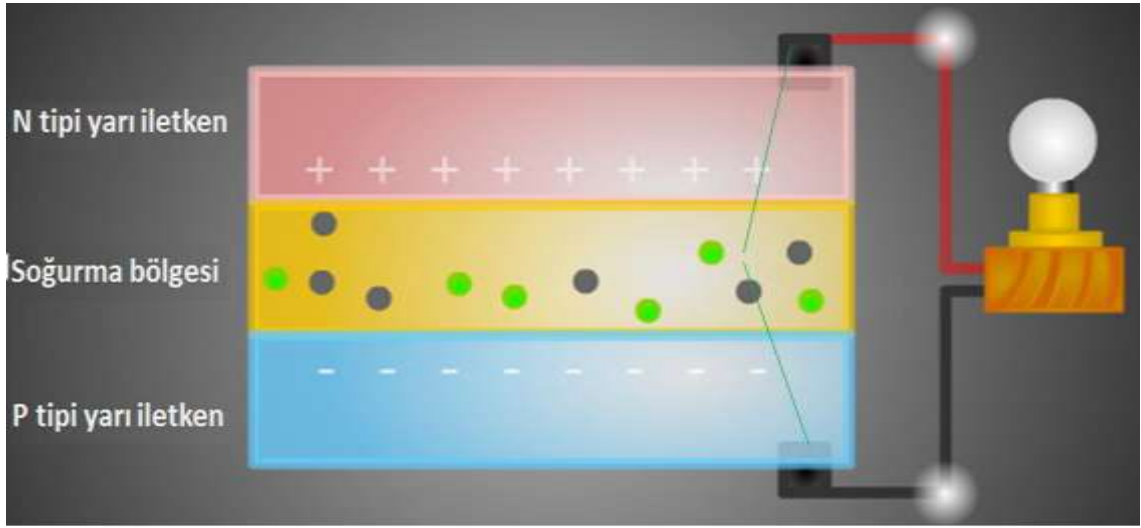
a)



b)



c)



Şekil 1.6. Güneş hücrelerinde elektrik akımının oluşma mekanizması (TKB,2015)

Özellikle PV teknolojileri geliştikçe ve olgunlaştıkça, sistem ve üretim maliyetlerinde azalma beklenir (Ribé, 2018).

Güneş enerjisinden elektrik üretiminde en önemli iki parametreden birisi bölgenin güneş radyasyonu yani ışınması, diğeri ise bölgenin güneşlenme süresidir. Bu iki parametre tesis kuruluş yerinin güneş enerjisi potansiyelini belirler. Güneş enerjisinden elektrik üretiminin hesaplanmasında, dünyada kabul görmüş birçok lisanslı bilgisayar yazılımı (PVsyst, PVGIS, PVMAP, PV\*SOL, SOLARLAB) bulunmaktadır. Bu programlar, coğrafi konum olarak noktasal bazda ışınma ve meteorolojik verileri kullanarak enerji üretimini hesaplama amacıyla kullanılırlar. Programı kullanılırken, kurulacak tesisin kurulu gücün (DC-direct current), sistem bağlantı gücü (AC-alternating current), panel ve invertör bilgileri ile panel açısı bilgisi, tesis kuruluş yerinin coğrafi yer koordinatları ile meteorolojik bilgileri ve sistemin ünite kayıp oranları programa veri olarak yüklenir ve enerji üretim hesaplamaları gerçekleştirilir.

Sürdürülebilirlik değerlendirmesi kapsamında, ülke genelinde 2013-2018 yılları arasında projelendirilmiş ve işletmeye alınmış PV sistemli Güneş Enerjisi Santralleri arasından, kurulu gücü 1-10 MW kapasiteli tesis verilerinden yararlanılmıştır.

### 1.2.2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar, üç eşzamanlı olayın birleşiminden kaynaklanan bir güneş enerjisi formudur. Bu doğal olaylar;

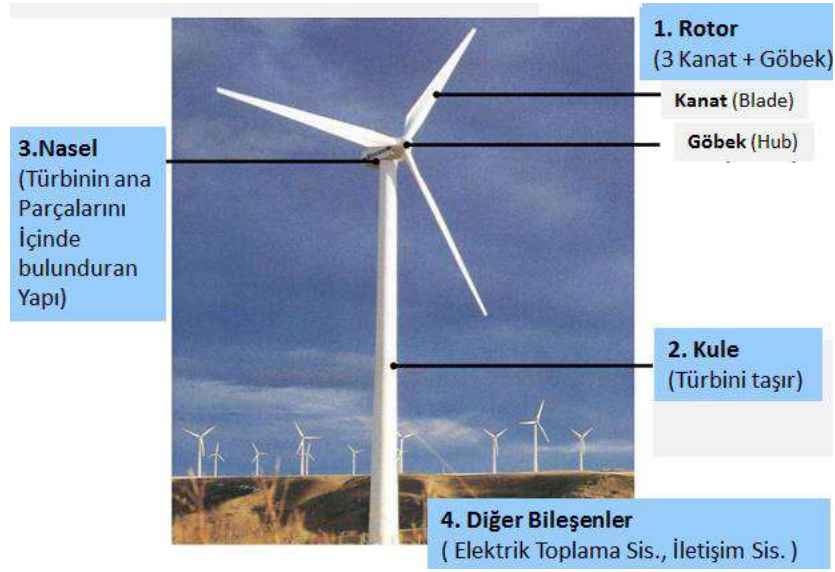
- Güneş'in dengesiz bir şekilde atmosferi ısıtması
- Dünya yüzeyindeki düzensizlikler
- Dünyanın dönüşü, şeklinde sıralanabilir (Anonim,2018)

Rüzgar Enerjisi rüzgar kaynaklı kinetik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi yoluyla elde edilir. Kinetik enerji, hızın karesiyle orantılı olduğundan, rüzgar hızı bir rüzgar türbinden elde edilen güç çıkışının belirleyici bir faktördür. Çoğu rüzgar türbini konfigürasyonu yatay veya dikey eksenli rüzgar türbini olarak sınıflandırılır. Üreticilerin çoğunluğu yatay eksenli rüzgar türbinleri üretmektedir, çünkü yatay eksenli rüzgar türbinleri daha yüksek rüzgar hız koşullarında daha fazla enerji elde edilebilmesi için yüksek kulelere yerleştirilebilmektedir (Berg, 2007). Rüzgar türbinlerinin büyüklüğü, bireysel kullanım için 3-15 kW, büyük kapsamlı enerji tesislerindeki ticari rüzgar türbinleri için 1-5 MW arasında değişmektedir (Kreith ve Kreidel, 2011, Hacatoglu, 2014).

Özellikle elektrik üretimi için tasarlanan ilk önemli rüzgar türbini, Cleveland, Ohio'da Charles Brush tarafından inşa edilmiştir. 1888'den 1900'ye kadar 12 yıl boyunca çalışmış olup malikânesinin ihtiyaçlarını karşılamıştır.

Belirli bir rüzgar rejimi için, rüzgârdan elde edilebilecek enerji miktarı türbinin süpürme alanıyla orantılıdır. 100 m çapında bir rotor tarafından süpürülen alan, 10 m çapında 100 türbininkiyle aynıdır. Santralin hacmi (birinci dereceden bir ölçeklemede) çapın küpüne göre değişir. 100 küçük türbinin toplam hacmi, büyük türbinin hacminin sadece % 10'dur. Bu nedenle, üretilen birim miktarda enerji için, toplam ekipman hacmi çapa göre değişir (Da Rosa,2013).

Rüzgar türbinleri, bir bölgede var olan potansiyel rüzgar enerjisinden yararlanmak için tasarlanmıştır. Aerodinamik modelleme yapılarak optimum kule yüksekliği, kontrol sistemleri, kanat sayısı ve kanat şekli belirlenir. Klasik bir türbinin temel yapıları aşağıdaki Şekil 1.7.'de verilmiştir.



şekil 1.7. Bir rüzgar türbininin genel yapısı ve bileşenleri (TKB,2015)

Rüzgar trbimleri, rüzgar enerjisini elektriğe dönüştürülmesi amacıyla geliştirilmiştir. Geleneksel yatay eksenli trbimler  bileşene ayrılabilir.

1. Rotor bileşeni, rüzgar türbini maliyetinin yaklaşık yüzde 20'sini oluşturan, rüzgar enerjisini düşük devirli dönme enerjisine dönüştürmek için kullanılan kanat yapılarını içerir.
2. Rüzgar türbini maliyetinin yaklaşık yüzde 34' olan jeneratör bileşeni, elektrik jeneratörü, kontrol elektroniği ve genellikle, düşük hızlı gelen dönüşü, elektrik üretmek için uygun olan yüksek hızlı dönüşe dönüştürmek için kullanılan dişli kutusu bileşenini içerir.
3. Rüzgar türbini maliyetinin yaklaşık yüzde 15'i kadar olan yapısal destek bileşeni, kule ve rotor sapma mekanizmasını içerir (Bhatia, 2014).

Tez alışması kapsamında gerçekleştirilen sürdürülebilirlik analizi doğrultusunda ülke genelinde 2013-2018 yılları arasında projelendirilmiş ve işletmeye geçmiş yenilenebilir enerji santrallerinden, 1-27 MW kurulu gücündeki Rüzgar Enerjisi Santrallerinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

### 1.2.3. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, fosil kaynaklı olmayan, bitki veya hayvanlardan elde edilen ve yenilenebilir özellik taşıyan tüm organik kökenli madde kütlesi-kalıntısı olarak ifade edilebilir. Biyokütle olarak tanımlanabilecek maddeler, karada ve suda yetişen bitkiler, orman ve tarım bitkileri, hayvan atıkları, otsu ve odunsu enerji bitkileri, kentlerin, sanayilerin ve belediyelerin organik atıklarını içeren tüm organik maddeler şeklinde sıralanabilir. Temel bileşen olarak karbonhidrat bileşiklerini içeren biyokütle, farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerden geçerek, ticari özelliği bulunan, standartlaştırılmış özelliklere sahip katı, sıvı ve gaz halinde, biyokütle enerjisine dönüştürülmektedir. Biyokütle enerjisi; metanol, etanol, butanol ve biyodizel olarak sıvı, metan ve hidrojen olarak gaz, odun ve tezek yakma olarak katı ve tribün kazanlarında ve mikrobiyal yakıt hücrelerinde yakma olarak elektrik hallerinde kullanılabilen bir enerjidir (Bayramoğlu, 2013).

Biyokütle yetiştiriciliği, enerji ormanları ve enerji tarımı yöntemleri ile modern biyokütle yakıt hammaddesini elde edilmesini hedeflemektedir. Bitkilerin fotosentez yoluyla depoladıkları güneş enerjisini temeline dayanan, biyokütle yetiştiriciliğinde özellikle çabuk büyüyen bitkiler tercih edilmektedir. En çok bilinen ve en çok kullanılan biyokütle örneği olarak odun gösterilebilir. Uzun bir yetiştirme dönemi olan ağaçların kesimi yoluyla elde edilen odun biyokütle enerjisi olarak kullanıldığında, ormansızlaşma gibi sürdürülebilirlik ve çevre sorunlarına yol açmaktadır. Günümüzde biyokütle enerjisinin kaynağını, klâsik ve modern olarak iki sınıfta değerlendirmek mümkündür:

- Klasik biyokütle enerjisi; odun ve hayvan atıklarının basit şekilde yakılarak kullanılması.
- Modern biyokütle enerjisi; enerji bitkileri, enerji ormanı, ağaç endüstrisi atıklarından elde edilen biyodizel, etanol gibi çeşitli yakıtlar, tarım kesimindeki bitkisel ve hayvansal atıklar, kentsel atıklar, tarıma dayalı endüstri atıklarının kullanılması.

Modern biyokütle yetiştiriciliğini;

- a) Enerji ormanları

- b) Enerji tarımı, yüksek verimli enerji bitkileri olarak sınıflandırabiliriz (TKB, 2015).

Biyokütle Enerjisi'nin sürdürülebilirlik indikatörleri açısından incelenmesi amacıyla, ülke genelinde 2013-2018 yılları arasında projelendirilmiş ve/veya işletmeye alınmış Biyokütle Enerji Santrallerinden elde edilen veriler değerlendirilmeye alınmıştır. İncelenen tesislerin kurulu güçleri 4,8-12 MW arasında değişmektedir.

#### **1.2.4. Hidroelektrik Enerjisi**

Hidroelektrik enerji, elektrik enerjisinin, yüksek kotlardan alçak kotlara doğru hareket eden suyun kinetik enerjisinden elde edildiği yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Kanıtlanmış, olgun, öngörülebilir ve fiyat açısından rekabetçi bir teknolojidir. Hidroelektrik, bilinen tüm enerji kaynakları arasında en iyi dönüşüm verimliliğine sahiptir (yaklaşık% 90) Nispeten yüksek ilk yatırım gerektirir, ancak çok düşük işletme ve bakım maliyetleri ile uzun bir ömre sahiptir (Killingtveit, 2014).

Günümüzde, hidroelektrik en ucuz yenilenebilir enerji kaynağıdır ve küresel ölçekte elektrik üretmek için en yaygın kullanılan kaynaktır. Bununla birlikte, büyük hidroelektrik santralleri yerel çevre üzerindeki büyük etkileri ve yerel sosyo-ekonomik bağlamla sınırlı ilişkileri ile bilinmektedir.

Hidroelektrik Santraller, yerel seviye ölçeğini atlayan ve üzerinde rezervuar inşa etmek için olası tüm sahaları kullanmaya çalışan büyük yerel şirketler (genellikle ulusallaşmış şirketler) tarafından inşa edilmektedir. Aynı zamanda, yeni tesislerin ekosistemler üzerindeki olumsuz çevresel etkileri genellikle çok az dikkate alınmaktadır. Son yüzyılda, barajların, yapay depolama göllerinin ve santrallerin inşa edilmesi yerel ekosistemlerde büyük değişikliklere neden olmuştur.

Günümüzde yeni büyük barajlar için sınırlı alan bulunduğundan, mikro ve küçük hidroelektrik santrallerinin çoğalması bu bölgeler için yeni sıkıntılar doğurabilmektedir. Bölgenin basit bir görünümünden yola çıkarak, büyük tesislerden daha az etkili olan küçük özel tesisler özel ekonomik teşvikler esasında, etkin sosyal, ekonomik ya da enerji faydalanımlar göz ardı edilerek inşa edilebilmektedir. Böyle durumlarda, sadece çeşitli tazminat ve telafi yöntemleri çözüm olarak sunulmaktadır.

Çevresel açıdan, basit ve dar bir çerçeveden olaya bakıldığında, aynı akarsu yatağında santrallerin çoğalmasının ekosistemde önemli değişikliklere neden olabileceği gerçeği dikkate alınmamaktadır. Ayrıca, santral ve bölge arasında farklı ilişkiler mevcut olabilir. Oluşabilecek problemlere daha geniş bir bakış açısıyla yaklaşıldığında, büyük hidroelektrik santrallerinin kurulması aşamasında, yerel ve yerel olmayan yetkililerle görüşmek, kullanılabilir rezervuarların sayısında azalmaya veya yeni baraj ve tesislerin inşa edilme sürecinin tamamen askıya alınmasına neden olabilir. Bununla birlikte tesisin kurulması yönünde bir karar verilirse, tesisin yapımı ile ilgili müzakerelerde, konuya farklı bakış açılarının dahil edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Aynı zamanda, cansuyu akışını sağlamak için mevcut tesislerden su akışının düzenlenmesine özen gösterilmelidir.

Mikro hidroelektrik santralleri, yerel halk aktörleri ve özel girişimler tarafından, paydaşların bölge için muhtemel ekonomik veya enerji avantajlarını elde edebilecek şekilde tesislerin inşa edilmesi için kullanılacak yöntemler konusunda mutabakata vardığı durumlarda teşvik edilebilir. Çevresel açıdan bakıldığında, enerji santrallerinin yapımı aşamasında akarsu yatağının yük kapasitesinin dikkatlice değerlendirme tabii tutulması önemli bir husustur (Bagliani ve ark.,2010).

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sürdürülebilirlik analizi doğrultusunda, ülke genelinde 2013-2018 yılları arasında projelendirilmiş ve/veya işletmeye alınmış yenilenebilir enerji santrallerinden, 25-500 MW kurulu gücündeki Hidroelektrik Enerjisi Santrallerinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

### **1.2.5. Jeotermal Enerji**

Jeotermal enerji, dünyanın doğal ısısından kaynaklanan ve dünyadaki tüm ülkelerde mevcut yerli bir enerji kaynağıdır. Günümüzde jeotermal enerji esas olarak elektrik enerjisi üretimi için kullanılmaktadır, ancak alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini destekleyen, fosil ve nükleer yakıt kullanımını azaltmayı hedefleyen birçok ülkenin ekonomisinde, mekan ve endüstriyel ısıtma gibi diğer şekillerde kullanılması da büyük önem taşıyabilir ( Roberts, 1978).



Jeotermal enerji yüzyıllar boyunca kullanılmıştır. Erken kullanımlar, alan ısıtması ve terapötik banyoları (balneoloji) içeriyordu. Mevcut uygulamalar arasında tarım, belediye ve endüstriyel ısıtma ile elektrik enerjisi üretimi bulunmaktadır.

Jeotermal enerjinin varlığı, sıklıkla geysirler ve sıcak su kaynakları gibi özelliklerle ilişkili yüzeysel göstergelerde anlaşılmaktadır. Basit bir anlatımla çekirdek kaynaklı ısı ile yüksek sıcaklıklara ulaşan suyun buhar gücünden yararlanılmaktadır. Jeotermal akışkanın sıcaklığından oluşan buhar, türbinleri döndürerek elektrik enerjisi üretilir. Üretim için kullanılıp enerjisi alınan jeotermal su, reenjeksiyon kuyusu yardımıyla tekrar yer altına gönderilir.

Yeryüzündeki toplam jeotermal enerji kurulu kapasitesi şu anda 8 GW'nin altında olmakla birlikte 2050'ye kadar iki katına çıkacağı varsayıldığında, bu kaynak küresel anlamda çok büyük bir kaynak değildir. Teorik olarak düşünüldüğünde, derin sondaj teknolojilerin gelişmesiyle daha derinlerdeki yüksek ısı kaynaklarına ulaşım sağlanabilecek ve jeotermal potansiyelini büyük ölçüde artırabilmesi mümkün olacaktır (Hannah, 2015).

Diğer yenilenebilir enerjilerle teknolojileriyle karşılaştırıldığında, jeotermal enerji, atmosferik koşullara bağlı olmama gibi bir avantaja sahiptir. Bu nedenle, tüm zamanlarda güvenilir ve elverişlidir (Fridleifsson, 2003; Heirer, 2014). Ancak, enerji elde edilesi için gerekli prosesler yüksek yatırım maliyeti ve karmaşık donanım ihtiyacı gerektirmektedir (Heirer, 2014; Yahyaoui, 2017).

Jeotermal enerjiden yararlanarak elektrik elde ederken göz önünde bulundurulması gereken hususlar aşağıdaki gibidir.

- Debi
- Kuyu sıcaklığı
- Akışkanın buhar-sıvı karışım oranı
- Akışkanın kimyasal karışım oranı
- Kuyu basıncı
- Re-enjeksiyon akışkan sıcaklığı
- Ortam sıcaklığı

- İkili çevrimde kullanılan akışkan

Uygulanan sürdürülebilirlik değerlendirmesi kapsamında, ülke genelinde 2013-2018 yılları arasında projelendirilmiş ve/veya işletmeye alınmış Jeotermal Enerji Santralleri arasından, kurulu gücü 15-24 MW kapasiteli tesis verilerinden yararlanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında değerlendirilen enerji santralleri, Türkiye’de ağırlıklı olarak bulunan tesis teknolojileri göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Yenilenebilir enerji santrallerine ait teknik özellikler Tablo 1.2.’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Seçilen enerji kaynaklarına göre incelenen santrallerin teknik özellikleri.

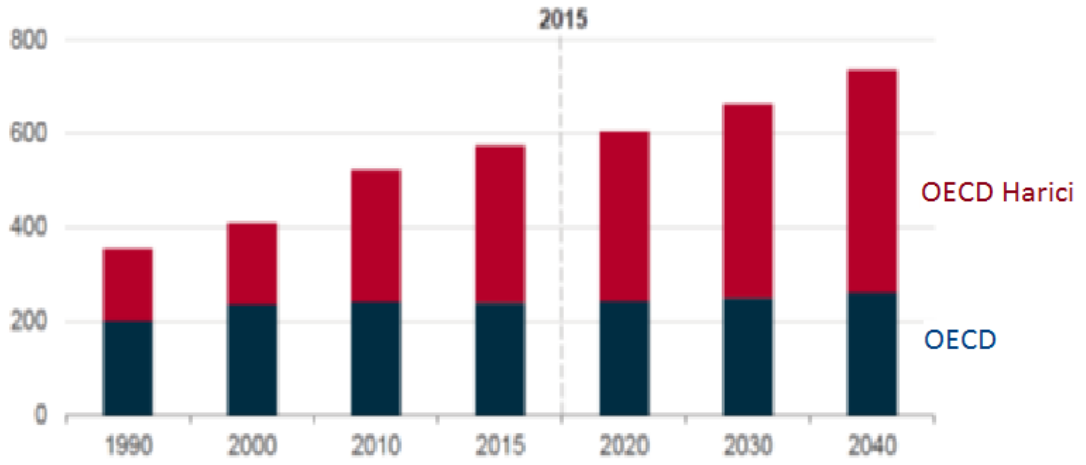
<i><b>Enerji Tesisi</b></i>	<i><b>Özellikleri</b></i>
Güneş Enerjisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotovoltaik teknolojisi kullanılan kristal silikon panelli enerji santralleri</li> <li>• Kurulu gücü 1-10 MW</li> </ul>
Rüzgar Enerjisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kara üstü (on-shore) yatay eksenli dişli kutulu ve dişli kutusuz türbinli santraller</li> <li>• Kurulu gücü 1-27 MW</li> </ul>
Hidroelektrik Enerji	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezervuarlı hidroelektrik enerji santralleri</li> <li>• Kurulu gücü 25-500 MW</li> </ul>
Biyokütle Enerjisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ek yakıtsız biyokütle yakıt kullanan türbinli santraller</li> <li>• Kurulu gücü 4,8-12 MW</li> </ul>
Jeotermal Enerji	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İki Akışkan Çevrimli (Binary) santraller</li> <li>• Kurulu gücü 15-24 MW</li> </ul>

### **1.3. Enerji Kullanımında Yenilenebilir Enerji’nin Payı**

Nüfus artışı ve endüstrileşmeye bağlı enerji talebindeki artış oldukça hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. 2015-2040 yılları arasındaki model tahminlerinde enerji kullanımındaki artışın %28 civarlarında olacağı ön görülmektedir. Referans alınan senaryoda, Şekil 1.8.’de görüldüğü üzere, global enerji tüketiminin; 2015 yılında 575 katrilyon BTU seviyesinden 2030’a kadar 663 katrilyon BTU’ya ve daha sonra da 2040 yılına kadar 736 katrilyon BTU’ya yükseleceği tahmin edilmektedir (EIA, 2017) .

## Global Enerji Tüketimi

Katrilyon BTU

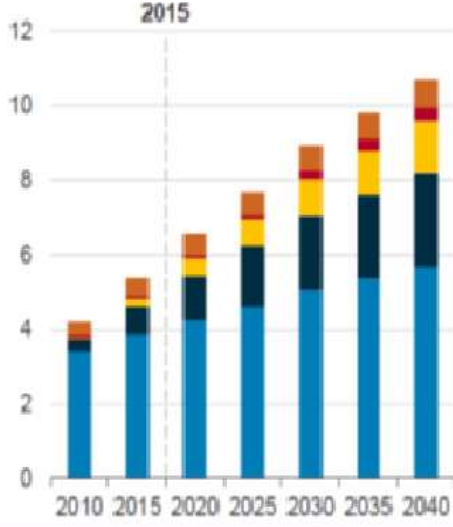


Şekil 1.8. Global enerji tüketimi ve yıllara göre dağılımı (EIA, 2017).

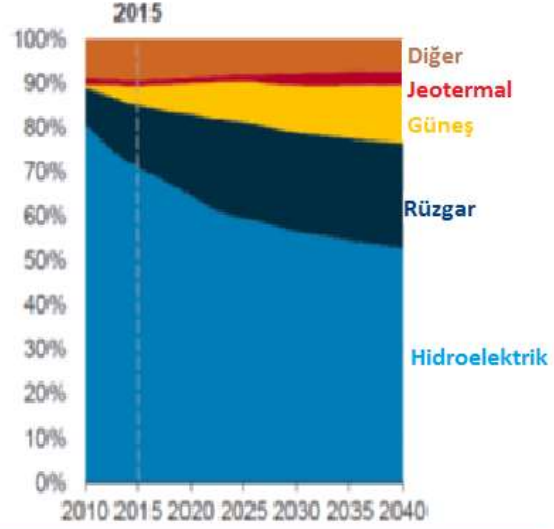
Teknolojik gelişmeler ve birçok ülkede tarafından sağlanan devlet teşvikleri ile kullanımları desteklediğinden, yenilenebilir enerji kaynakları (hidroelektrik dahil), 2015-2040 dönemi boyunca ortalama % 2,8 artışla en hızlı büyüyen üretim kaynaklarıdır.

Hidroelektrik olmayan yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar ve güneş, zaman içinde daha rekabetçi fiyatlara sahip bir hale gelmelerinden dolayı, 2015-2040 dönemi boyunca en fazla artışı göstererek sırası ile 2,5 ve 1,4 trilyon kilowatt-saat seviyelerine ulaşacağı tahmin edilmektedir (Şekil 1.9.) (EIA, 2017).

### Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretimi Trilyon kilowatt-saat

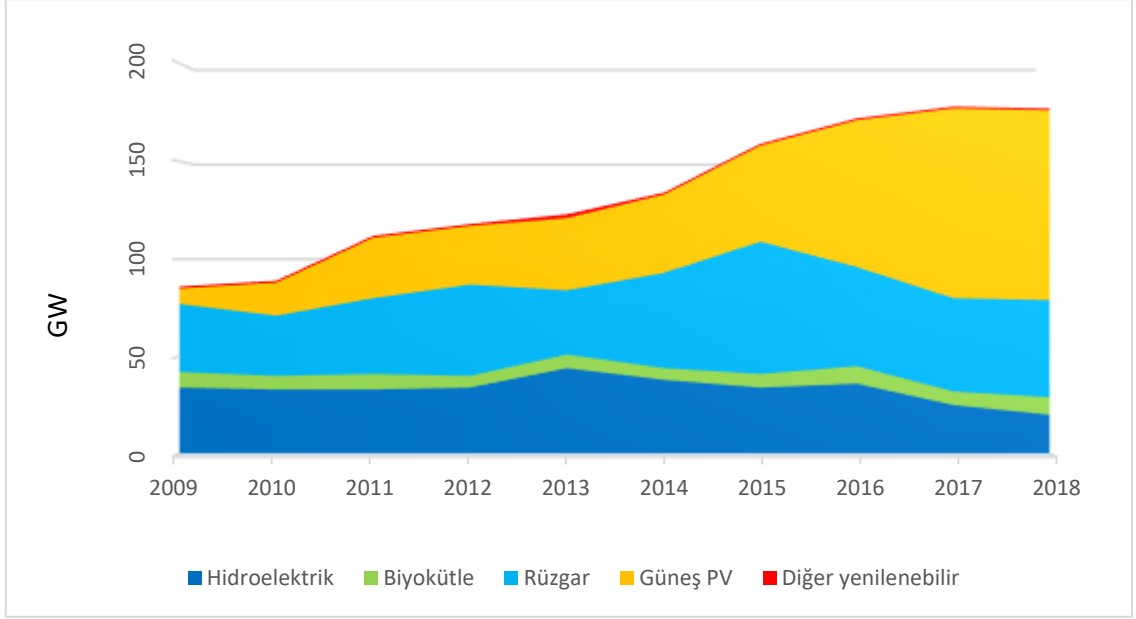


### Yenilenebilir enerjinin yüzdeler payı



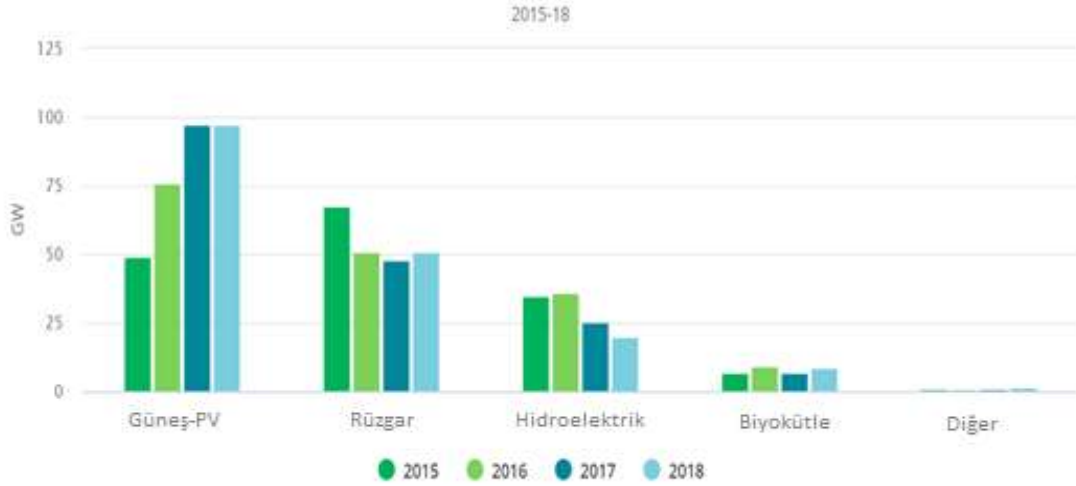
Şekil 1.9. Dünya genelinde yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi miktarları ve yüzdeler payları (EIA, 2017).

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep son yıllarda küresel ölçekte önemli derecelerde artış göstermiştir. Dünya üzerinde kapasite artışının yıllara göre dağılımı Şekil 1.10.'da görülen yığılmış alan grafiğinde verilmiştir. (EIA,2017). Özellikle güneş enerjisinin artış trendinin ve hacmindeki artışın, diğer yenilenebilir kaynaklara oranla farklı olduğu açıkça görülmektedir. Bu trendin oluşumunun, güneş enerjisi üretim maliyetlerinin zaman içerisinde, teknolojik gelişmelere paralel olarak düşmesiyle bağlantılı olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 1.10. Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kapasite artışı verileri (IEA,2018).

Enerji kaynaklarına göre dağılım incelendiğinde Şekil 1.11.' de de görüldüğü üzere, 2018 yılı itibarıyla hidroelektrik enerjisi için 20 GW biyokütle enerjisi için 9 GW Rüzgar enerjisi için 50 GW Güneş enerjisi-PV için 97 GW, diğer yenilenebilir enerji teknolojileri için ise 1 GW'lık olmak üzere, toplamda 177 GW'lık bir kapasite artışı olduğu görülmektedir.



Şekil 1.11. Yenilenebilir enerji kaynaklarına kapsamında son üç yıla ait artış miktarları (IEA,2018)

Enerji kaynağı bazında son üç yıla ait karşılaştırmalı grafik incelendiğinde ise, Güneş enerjisine dayalı PV sistemlerde artış trendi gözlemlenirken diğer sistemlerde ise stabilite eğilimi gözlemlenmektedir. Teknolojik açıdan bakıldığında, PV teknolojilerindeki gelişim hızının, diğer diğer kaynaklara ait teknolojilere oranla daha hızlı gerçekleştiği ve rekabetçilik oranının bu gelişmelerle daha da arttığı ifade edilebilir.

## 2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI

Sürdürülebilirlik, oldukça soyut bir altyapısı olan ve tanımlanması ile ilgili farklı bakış açılarının olduğu karmaşık bir yapıya sahip bir kavramdır. Latince kökenli “Sustinere” (sürdürmek) ve subtenir (korumak ve aşağıdan desteklemek)” kelimesinden doğan “sürdürülebilirlik” (Sustainability) kavramı, farklı disiplinlerce farklı şekillerde ifade edilmektedir (Tıraş, 2012; Ece 2018). Kavramın en belirgin özelliği, insanlığın geleceği ve tanımlandığı disipline ait ana kaynakların korunabilmesini ifade etmesidir. Bu bakış açısıyla yaklaşıldığında, iktisat, işletme, çevre, politika, hukuk, gibi kavramları içeren disiplinler arası bir yapısı olduğu da ortaya çıkmaktadır.

19. yüzyılın başlarında literatürde kendine somut bir yer edinmeye başlamış olup, tarım, balıkçılık ve orman gibi yenilenebilir kaynaklar kapsamında kullanılmaya başlanmıştır (Bozoğlan, 2005). Ruckelshaus’a (1989) göre sürdürülebilirlik, “ekolojinin en geniş sınırları içinde ekonomik büyümenin ve kalkınmanın karşılıklı etkileşim ile sağlanacağı ve zaman içinde korunacağı doktrindir”. Gilman’a (1992) göre ise, “toplumun, ekosistemin ya da devam eden herhangi bir sistemin ana kaynakları tüketmeden belirsiz bir geleceğe dek işlevini sürdürmesidir” (Özmehmet,2012). Genel olarak; “toplumun sosyal, kültürel, bilimsel, doğal ve insan kaynaklarının tümünün ihtiyatlı kullanılmasını sağlayan ve buna saygı duyma temelinde sosyal bir bakış oluşturan katılımcı bir süreç” (Gladwin ve ark., 1995) olarak da tanımlanabilir (Tıraş 2012).

Sürdürülebilirlik kavramına farklı disiplinlerle ilgili sınırları kaldırarak baktığımızda, tüketim toplumuna ait düşünce yapısından uzaklaşma prensibini benimsemeyi gerektirmektedir. Yaşam kalitesi bozulmadan doğa, insan, toplum ve sosyal yaşam arasındaki alışverişin dengelenmesi hedeflenmektedir.

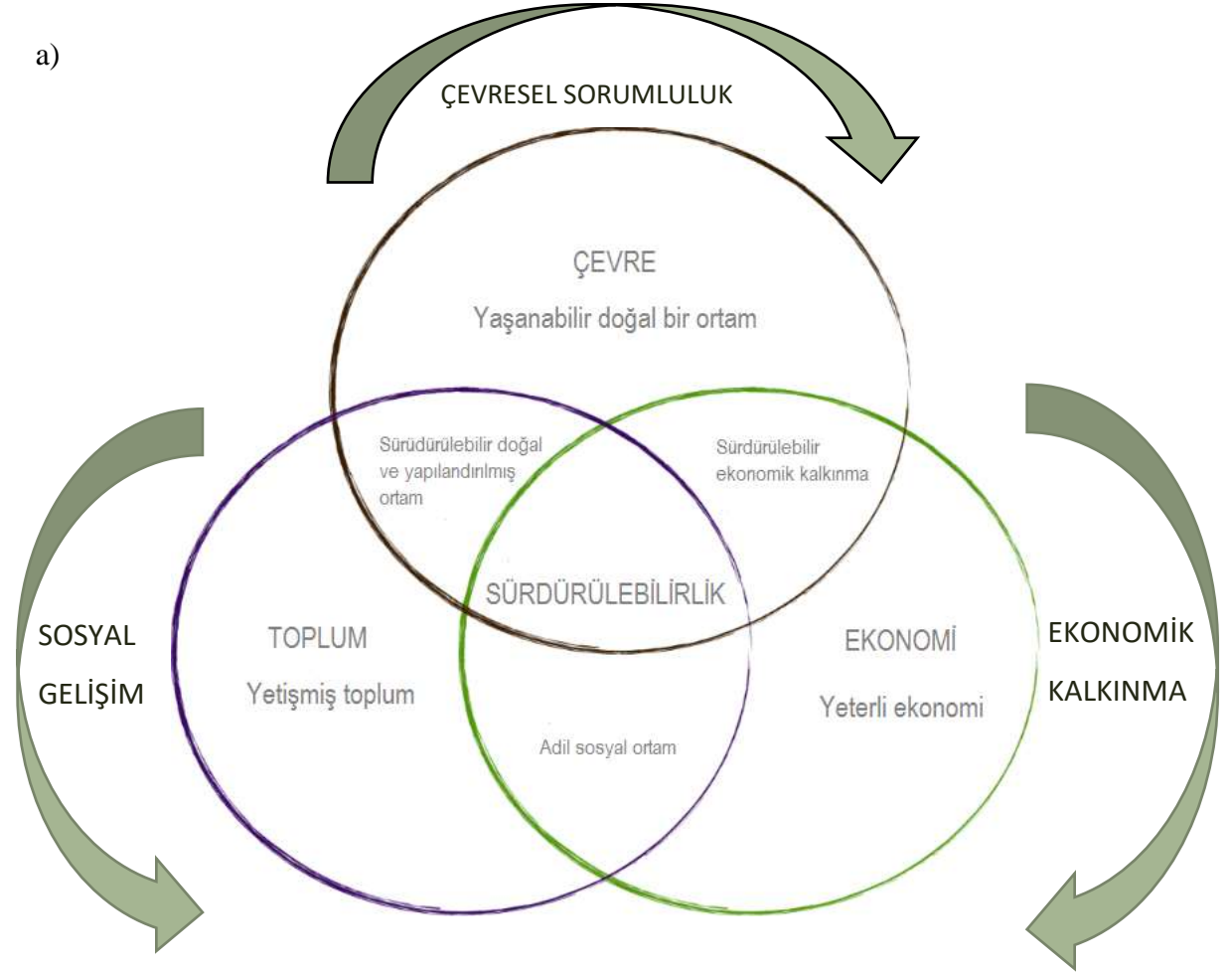
Yukarıdaki tanımlamaların temel dayanakları incelendiğinde, üç ana unsur üzerinde durulduğu görülmektedir. Bu ana unsurlar aynı zamanda sürdürülebilirliğin bileşenleri olarak da bilinen, çevresel, sosyal ve ekonomik eksenleri ifade etmektedir. Bu çoklu yapıya ait görselleştirilmiş mekanizma Şekil 2’de verilmiştir. Bu yapı aynı zamanda 1990’lı yıllardan itibaren irdelenmeye başlanan, doğal çevrenin korunarak ekonomik kalkınmanın gerçekleştirilebilmesi kavramının da sonucu olarak doğan “sürdürülebilir kalkınma modelinin” (Akün,1999) de çatı mekanizması olarak kabul edilebilir. Çevresel

sorumluluk, sosyal gelişim ve ekonomik kalkınma ekseninde şekillenen bir model olarak da tanımlanabilir (Şekil 2.1.a). Şekil 2.1.b) incelendiğinde, sürdürülebilirlik bileşenlerinden çevre ekseninin diğer bileşenleri kapsayıcı bir niteliği olduğu görülmektedir. Bu görünümün oluşmasında, sürdürülebilirlik konsepti çerçevesinde karşılaşılan çevresel problemlerin, sürdürülebilirlik problemi olarak karşımıza çıkması ile ilgili tecrübeler kaynak olarak gösterilebilir.

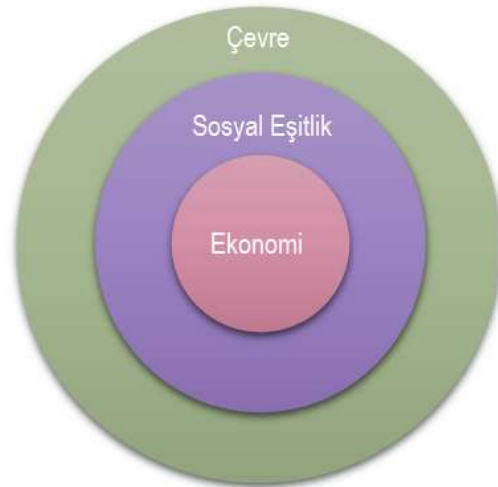
Sürdürülebilir kalkınma modeli incelendiğinde ekonomi ve çevre arasında bütünleşik bir bakış açısı oluşturulmasının hedeflendiği bir kalkınma modeli olarak tanımlanabilir. Geleceğe yönelik bakış açısıyla, çevresel duyarlılığı göz önünde bulunduran mevcut kaynakların israfının engellenerek, optimum şekilde kullanılmasını hedeflemektedir. Bu model kapsamında doğal kaynakların etkin kullanımı ve çevresel değerlerin korunması amaç edinilerek, ekonomik büyüme ile ekolojik dengenin korunması sağlanmaya çalışılır (Altınbay, 2006).

Sürdürülebilir kalkınma kavramında, anlaşmazlıkların çözümü için bu üç kategorinin dengeli bir biçimde bir araya getirilmesi amaçlanmaktadır. Üç kategori ayrımının etkilerinden biri de sürdürülebilir kalkınma ile ilgili alanlarda teknik düzeltme yaklaşımını teşvik etmektir. Bu yaklaşım, daha çok, kirlilik kontrolü, kaynak kullanımının azaltılması ve sera gazı ticareti üzerinde durmaktadır (Giddings ve ark., 2002).





b)



Şekil 2.1. Sürdürülebilirlik konsepti ve bileşenleri

Yeryüzündeki en basit yaşamsal döngünün bile enerji kaynağına ihtiyaç duyması temelinden yola çıkılırsa, enerjideki sürdürülebilirlik konseptinin genel sürdürülebilirlik anlayışında önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 2.1. Sürdürülebilirlik İle İlgili Başlıca Sorunlar

Sürdürülebilirlik 21. Yüzyılın en önemli konuları arasında yer almaktadır. İktisadi büyümenin dengesiz bir şekilde gerçekleşmesi sonucu oluşan problemler, iktisadi sistemler ile ekolojik sistemler arasında ayrılıklar nedeniyle dünyanın mevcut taşıma kapasitesinin zorlanması, beraberinde görülen ekonomik ve çevresel sorunlar tüm dünyanın dikkatini çekmiş ve bakış açılarında değişimlere neden olmuştur (Bartelmus, 1994). Bu değişimler ışığında gelişen sürdürülebilir kalkınma kavramı paralelinde, çevre sorunları, sürdürülebilirlik sorunları olarak görülmeye başlanmış, temel sürdürülebilirlik konuları ve göstergeleri olarak ele alınmıştır (UN, 1992; Bartelmus, 1994, Tutulmaz, 2011). Sürdürülebilirlik çatısı altında değerlendirilen önemli çevre sorunları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İklim değişikliği: Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşırken, bir kısmı atmosferden, bir kısmı ise yeryüzünden geri yansımaktadır. Yeryüzünden geri yansıyan ışınların atmosferde biriken sera gazlarından dolayı uzay boşluğuna geçememesi fazladan bir ısınmaya sebep olmaktadır. İklim değişikliği genellikle ana odak noktası olan, sıcaklık, yağış, rüzgar gibi etmenlerdeki zaman içindeki değişimi ifade eder (IPCC. 2007).

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), antropojenik etkilerin, 1950'lerden beri yana küresel ısınmanın en önemli etkeni olduğunu belirtmektedir (Cook ve ark. 2016). Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarındaki artış ve iklim değişikliği birbirleriyle güçlü bir korelasyon göstermektedir. (Davis 2017). İklim değişikliği, ağırlıklı olarak, (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), azot oksit (N<sub>2</sub>O), su buharları (H<sub>2</sub>O), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve sülfür hexafluoride (SF<sub>6</sub>) gibi sera gazı emisyonları ve birikiminin artışından etkilenmektedir.

İklim değişikliği, alışılmadık derecede sıcak hava koşulları, buzul erimeleri, kutup ısınması, mercanların bozulması, yoğun yağış olayları, daha uzun kuraklık ve kurak dönemler, deniz seviyesinde artış, bitki ve hayvan dağılımındaki değişiklikler, artan çevresel bozulma ve doğal afetler gibi koşullara neden olmaktadır (Kraaijenbrink ve ark., 2017).

- Biyoçeşitliliğin tahribatı: Bu sorun ormanların yok olması ve nüfus artışıyla ilişkili bir yapıdadır. Dünya Doğa Fonu (WWF) (2014) raporları, 1970-2010 yılları arasında küresel biyoçeşitliliğin %52'sinin kaybolduğunu ifade etmektedir. Bitki türlerinin neslinin tükenmesi, ekosistemde dengeyi sağlamada kilit bir rol oynaması ve diğer birçok organizmaya habitatlar sağlayarak doğrudan işleyişini etkilemesi nedeniyle büyük bir sorun olarak görülmektedir (Monteiro ve ark. 2018).

En zengin tür çeşitliliğine sahip olan bölgeler arasında gösterilen tropikal alanların % 55'i günümüzde tahrip edilmiş olup çok hızlı bir şekilde yok olmaya devam etmektedir. Yok olma hızı yıl bazında yaklaşık olarak 168.000 kilometrekarelik bir alana tekabül etmektedir (Costanza ve ark., 1997). Bununla birlikte tür çeşitliliğinde de önemli derecede bir azalma meydana gelmektedir. Tahmini olarak yılda 5.000-150.000 tür yok olmaktadır ve insan öncesi dönemle karşılaştırıldığında 10.000 kat daha hızlı bir yok olma durumu gibi ciddi bir yok olma oranı ile karşılaşılmaktadır (Goodland, 1991; Costanza, 1997; Tutulmaz, 2011).

Bu eğilimler devam ederse, 240 yıl içinde muhtemelen dünya üzerindeki altıncı kitlesel yok oluşla karşı karşıya kalacağımız öngörülmektedir (Arora ve ark.,2018).

- Çölleşme ve Toprak Aşınımı: Kuraklık, dünyada giderek daha fazla alanı içine alan tehdittir. İklim değişikliği sık aralıklarla, kuraklık ve yiyecek azalması döngüsüyle sonuçlanmış ve çölleşmeye sebep olan uzun süreli su kıtlıklarına neden olmuştur. Son 40 yılda, özellikle tropik ve alt tropik bölgelerde, kuraklıkta belirgin bir artış yaşanmıştır (Arora ve ark.,2018)

Çölleşme ve erozyon çok eski çağlardan beri binlerce yıldır yaşanmaktadır ve çoğu durumda çölleşen toprakların kurtarılması, günümüz teknolojileriyle mümkün değildir. Bununla birlikte aşımın ve çölleşmenin hızında çok büyük bir artış vardır (Costanza ve ark., 1997; Tutulmaz, 2011).

Aşımın ile zarar gören tarımsal toprakların ikamesi için insanlar, orman arazilerini tarım arazisi olarak kullanma yolunu seçmişler, dolayısıyla kısır bir döngü oluşturmuşlardır.

- **Biyokütle tüketimi:** Temel olarak, insanoğlunun ekosistemlerdeki biyokütle enerjisinin mevcudiyetini nasıl değiştirdiğini ya da ekosistemdeki diğer varlıkların kullanım hakkından ne aldığımızı ölçer, ayrıca biyolojik çeşitlilik üzerindeki baskının bir göstergesidir, çünkü yüksek bir biyokütle kullanımı, ekosistemdeki diğer tüm türler için daha az biyokütle enerjisi (ve dolayısıyla gıda) anlamına gelir.

Biyokütle kullanımı, insanoğlunun direkt olarak tükettiği ve dolaylı olarak faydalandığı karasal fotosentez ürünleri olarak tanımlanabilir (Tutulmaz, 2011).

- **Nüfus artışı:** Nüfus konusunun, yeryüzünün taşıma kapasitesi ve sürdürülebilirlik eksenindeki tartışmaların odak noktasında olduğu bilinmektedir (Roosa, 2010). Nüfus artışı genel olarak tüm çevresel problemler için bir baskı unsuru olarak kabul edilebilir. Nüfusun hızlı artışı son 80 yılda meydana gelmiş olup, hızlı artışını sürdürerek 21. yüzyılın ortalarında toplam nüfusun 9 milyara yaklaşacağı ve eğer doğum oranları düşmeye devam ederse, 2100'e kadar 10-11 milyar arasında istikrar kazanacağı tahmin edilmektedir (Kaku 2011, Conard 2013).

Nüfus artışı doğal olarak, sürdürülebilirlik kapsamında karşılaşılan problemlerin tamamının ana sebebi olmakla birlikte, insan faktörünün, kendi yarattığı bu problemlerin çözümündeki tek anahtar olduğu bilinmektedir.

- **Su kıtlığı:** Küresel olarak, su kıtlığı, gıda kıtlığı, bölgesel su çatışmaları, sınırlı ekonomik gelişme ve çevresel bozulma gibi birçok krizle sonuçlanmaktadır. Su

geri kazanımının ve yeniden kullanımın uygulanmasının önemi, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi bağlamında iyi bir şekilde anlaşılmıştır. Kentsel atık su, en çok suya ihtiyaç duyulan ve suyun en yüksek fiyatlı olduğu metropol tabir edilen yoğun nüfuslu şehirlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, mevcut geri dönüşüm seçeneklerinden yararlanmak zorunludur (Subramanian, 2007).

- Ormanların yok edilmesi: Atmosferdeki CO<sub>2</sub> artışına olan etkisi ile bağlantılı olarak sera etkisi ve iklim değişikliğiyle ilişkili diğer bir konu, ormanların yok edilmesidir. Nüfus artışı ve yoksulluk arasındaki etkileşim benzer bir şekilde ormanların yok edilmesi ve iktisadi olarak büyümenin durması veya azalması arasında kurulabilir.
- Enerji: Dünya üzerinde kurulu ekonomik düzenin fosil yakıt kullanımına bağımlı olan yapısı, enerji talebinde yaşanan ciddi artış, bu artışın getirdiği sera etkisi ve iklim değişikliği sorunlarından dolayı enerji konusu bu sorunlarla doğrudan ilişkili bir konumdadır. Yıl bazında 4 trilyon doların üzerinde bir büyüklüğe sahip olan enerji sektörü, dünyanın en büyük sektörü konumundadır (Roosa, 2010). Bu özellikleriyle enerji sürdürülebilir kalkınma içinde anahtar bir konumda bulunmaktadır. “İnsan faaliyetleri içindeki hiçbir sektör üretim ve enerji kullanımı kadar çevreyi ciddi şekilde etkilememektedir” (Andrews, 1999).

Eğer bir sebeple, bir insan topluluğunun enerji arzı, yaşam sistemlerinin karmaşıklığını sürdürmek için gerekenden daha az hale gelirse, toplum çok hızlı bir şekilde çökecektir. Bu, fosil yakıtlara olan mevcut bağımlılığımız açısından oldukça ciddiye almamız gereken bir gerçek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu konu kapsamında, farkına varılması gereken en önemli gerçeklerden biri; fosil kaynakların önemli, ancak yan ürünlerinin etkilerinden dolayı kirletici kapasiteleri yüksek kaynaklar olduğudur. İnsanlığın fosil yakıt kullanımının artışına yol açan olan mevcut bağımlılığının, şimdiden başlayarak temiz enerji alternatiflerinin aranması araştırılması ve kullanımına yönelik olarak dönüştürülmesi, enerji verimliliğinin arttırılması ve özellikle dünyadaki gelişmiş ülkelerde kişi başına enerji kullanımının azaltılması gerektiği oldukça açıktır. Böyle bir dönüşüm olmazsa, temiz olmayan enerji kaynaklarının kontrolsüz

kullanımı, mücadele etmeye hazır olamayacağımız bir çevre krizine yol açacaktır (Conard 2013).

Neoklasik ekonomi, doğal kapitalin önemi üzerinde durmaz ve tükenbilir kaynakların yönetimi ve kullanımı bağlamında çalışmaktadır, ancak tükenbilir kaynaklar açısından küresel rezervlerin kömür için 114 yıl, doğal gaz için 53 yıl ve petrol için yaklaşık 51 yıl daha yeterli olacağı tahmin edilmektedir (Koç ve ark.,2018). Bu açıdan değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması politikasının, çevresel sorunlar için de çözümün bir parçası olduğu ve sürdürülebilirlik sağlanmasındaki anahtarlardan biri olduğu gerçeğinden yola çıkılarak, önemli bir konu başlığını oluşturduğu kabul edilmelidir (Tutulmaz, 2011).

## **2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi**

Dünya üzerindeki enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı ile ilgili dağılıma bakıldığında 26700 TWh'lik üretimin %38' inin kömür, %23'ünün doğalgaz, %19'unun Hidroelektrik ve diğer, %10'unun nükleer, %7'sinin Güneş PV ve rüzgar %3'ünün petrol kaynaklı olduğu görülmektedir (EIA,2018). Kömürün kWh başına en yüksek CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip olduğu ve diğer kirleticilerin de yüksek oranda salımını (emisyon) gerçekleştirdiği bilinmesine rağmen halen pazar lideri konumunda olma sebebi düşük fiyatlı ve kolay erişilebilir olmasından kaynaklanmaktadır (Evans ve ark., 2009).

Gelecekteki enerji yatırımlarının yönetilebilmesi için öngörülen enerji sektörü büyüme senaryolarının, çevresel ayak izlerinin yarattığı problemlere, sürdürülebilir enerji üretimi uygulamalarına odaklanılarak çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Temel göstergeler etkilerin nicelleştirilmesini sağlayacak şekilde belirlenmelidir.

Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir enerji kavramlarını arasında bir nüans bulunmaktadır. Çoğu zaman birbirlerinin yerine kullanılan bu iki kavram arasındaki temel ayrım, kullanılan yenilenebilir enerji kaynağının, uzun vadede çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılması, ekonomik ve sosyal imkanların artışına katkıda bulunması konusunda ortaya çıkmaktadır. Sadece, bu koşulların sağlanabildiği bir yenilenebilir enerji kaynağı sürdürülebilir olarak ifade edilebilir.

Kullanılan yenilenebilir enerji teknolojileri daha önce detaylı olarak ifade edilen sürdürülebilirlik bileşenlerinin tamamıyla ilgili koşulları sağlamalıdır. Bileşen bazında inceleme yapıldığında; çevresel boyutta, sera gazı emisyonları ve tükenbilir kaynakların kullanımı gibi olumsuz etkilerin azaltılması; ekonomik boyutta, pahalı yakıt tüketiminin azaltılması ve yaşam döngüsü maliyetlerinin karşılanması; sosyal boyutta ise, insan sağlığını ve refahını etkilemeden temel ihtiyaçlarını karşılayarak sürdürülebilir enerji sistemleri oluşturulabilir (Luong ve ark.,2012).

### **2.3. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kullanımı**

Yenilenebilir enerji ile ilgili global gelişmelere paralel olarak ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında son yıllarda hızlı bir artış gözlenmiştir.

Türkiye’nin yenilenebilir enerji kapsamında 2017 yılsonu itibariyle toplam kurulu gücü 39,11 GW olup, toplam elektrik üretimi kapsamında, yenilenebilir enerjinin payı yaklaşık %32’dir.

2018 yılında elektrik üretiminin kaynaklara göre yüzdelerle dağılımlarına bakıldığında, %37,3’ü kömürden, %29,8’i doğal gazdan, %19,8’i hidrolik enerjiden, %6,6’sı rüzgârdan, %2,6’sı güneşten, %2,5’i jeotermal enerjiden ve %1,4’ü diğer kaynaklardan oluşmaktadır. 2018 yılı sonu itibarıyla ise toplam kurulu güç 88.551 MW olarak hesaplanmıştır. 2018 yılı sonunda Türkiye’deki kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı; yüzde 31,9’u hidrolik enerji, yüzde 25,6’sı doğal gaz, yüzde 21,5’i kömür, % 7,9’u rüzgâr, % 5,7’si güneş, %1,4’ü jeotermal ve % 5,9’u ise diğer kaynaklar şeklindedir.

Ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2018 yılı sonu itibarıyla lisanssız santrallerle birlikte 7.423 olarak belirlenmiştir. Mevcut santrallerin 653 adedi hidroelektrik, 42 adedi kömür, 249 adedi rüzgâr, 48 adedi jeotermal, 320 adedi doğal gaz, 5.868 adedi güneş, 243 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir (ETKB, 2018).

REN 21, 2018 yılı Küresel Durum Raporu’na göre Dünya geneli ve Türkiye bazında yenilenebilir enerji kaynaklarına ait kurulu güç kapasitesi Tablo 2.1.’de özetlenmiştir

Tablo 2.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarını ve kurulu güç kapasitelerinin ülkeler bazında dağılımı (Koç ve ark.,2018).

<b>Enerji Kaynakları</b>	<b>Çin</b>	<b>ABD</b>	<b>Hindistan</b>	<b>Almanya</b>	<b>Türkiye</b>	<b>Avrupa</b>	<b>Dünya</b>
Hidrolik	313	80	47	5,6	27,2	127	1114
Rüzgar	188	89	33	56	6,8	169	539
Biyoenerji	15	16,7	9,5	8	0,63	40	122
Güneş PV	131	51	18,3	42	3,42	108	442
Jeotermal	0	3,6	0	0	1,06	0,9	13,5
<b>Toplam (GW)</b>	<b>647</b>	<b>242</b>	<b>108</b>	<b>111,6</b>	<b>39,11</b>	<b>447,2</b>	<b>2235,4</b>

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarına ait kurulu kapasitenin dünya genelindeki toplam kurulu kapasitenin %1,75’ini, Avrupa genelindeki toplam kurulu kapasitenin %8,75’ini oluşturduğu görülmektedir.

Türkiye özelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşviki kapsamında oluşturulan politikaların sürdürülebilirlik bakış açısında oluşturulması oldukça önemlidir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünlük bir bakış açısıyla irdelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında bu tarz bir bakış açısı geliştirilmiş ve model yaklaşımında uygulanmıştır.



### 3. LİTERATÜR TARAMASI

Önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere, sürdürülebilirlik disiplinler arası ilişkiler içeren oldukça karmaşık bir kavramdır. Bununla birlikte araştırmacılar ve bilim insanları sürdürülebilirliğin ölçülmesi üzerine de farklı yaklaşımlar geliştirmişlerdir ancak uluslararası ölçekte tanınmış herhangi bir yöntem bulunmamaktadır. Bu sebeple, güvenilir ve kolay anlaşılabilir bir model geliştirme üzerine yapılmış olan bu çalışma entegre sürdürülebilirlik modelleri için bir örnek teşkil edecektir.

Sürdürülebilirliğin ölçülmesi ve değerlendirilmesi ile ilgili, örnek uygulama alanlarına bakıldığında, imalat prosesleri, enerji sistemleri, şehirler ve şirketler bazında araştırmalar yapıldığı ve çeşitli modellerin uygulandığı görülmüştür (Abu-Rayash, 2017).

Sürdürülebilirliğin indikatör bazlı değerlendirilmesi, enerji sistemleri ve arzı konusundaki bilinçli kararlar alınması için gerekli, sağlam altyapının oluşturulması için oldukça uygun bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Seçeneklerle bağlantılı olarak ortaya çıkan, duyarlılık profilleri de analizin önemli bir unsuru olarak görülmektedir (Hirschberg ve Burgherr, 2015).

#### 3.1. Enerji Problemlerinin Çözümü İle İlgili Yaklaşımlar

Sürdürülebilirlik ile ilgili başlıca sorunlar arasında bulunan enerji problemlerine çözüm aranmasında özellikle enerji planlaması, kaynak seçimi, tahsisi ve enerji yönetimi politikaları ile ilgili sorunların çözülmesi amacıyla karar verme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, maliyetlerin düşürülmesi ya da kar marjının yükseltilmesi gibi tek bir kritere bağımlı olmak şeklinde kurulmuş bir karar mekanizmasından, karmaşık çok kriterli karar mekanizmalarına kadar farklı bakışa açıllarını içermektedir (Lee ve Chang, 2018). Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi için kullanılmakta olan iki farklı metodoloji vardır. Ana akım ekonomistler parasal toplama yöntemini kullanırken, diğer disiplinlerdeki bilim insanları ve araştırmacılar fiziksel göstergeleri kullanmayı tercih etmektedirler (Singh ve ark.,2009).

Özellikle enerji sektörü ve enerji planlamasının, çoklu aktörlerin çıkarlarını ve kaynaklarını etkilediği göz önüne alındığında, alınan kararlardan etkilenen faktörlerin çıkarlarını ve tercihlerini dikkate almadan bir politika geliştirme veya uygulamak sosyal

anlamda kabul edilebilir bir uygulama olarak görülmemektedir. Karar verme süreçlerine, farklı ve çok sayıda aktör grupları dahil olmakta ve karşılıklı uzlaşma gerektiren farklı bakış açıları ve kriterler ortaya çıkmaktadır.

Son 20 yılda enerji planlama senaryolarını tamamen değiştiren bir diğer faktör ise, arz tarafındaki seçeneklerin neredeyse tamamının maliyetinin en aza indirilmesiyle ilgilenmekten, çoklu ve birbiriyle çelişme potansiyeli içeren hedeflerin değerlendirilmesine dayanan daha karmaşık sosyal, ekonomik, teknolojik ve çevresel unsurlar içeren bir senaryoya doğru evrilmiştir. Örneğin, bir yenilenebilir enerji projesinin başarısını etkileyen çoklu kriterler analiz edilmeli ve dikkate alınmalıdır. Literatürde, geleneksel olarak kullanılan kriterler; çevresel, ekonomik ve sosyal olarak üç gruba ayrılmakta ancak enerji ile ilgili değerlendirmelerde bu boyutlara ek olarak teknik boyutun da eklenmesi ile dört temel analiz boyutu kullanılabilir.

Geleneksel bakış açısıyla, düşük maliyetli en verimli seçeneği belirlemeyi amaçlayan tek kriterli karar verme yaklaşımı, problem çözümlemede yeterli olarak görülmemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının planlanması aşamasında disiplinler arası bir bakış açısıyla yaklaşarak, eylem planları oluşturmak, en iyi alternatifi seçmek, sürdürülebilir olmayan enerji tedarik sistemini belirlemek, çevresel ve sosyal etkilerini izlemek artık maliyet veya fayda gibi tek boyutlu bir değerlendirme ekseninde irdelenmemektedir. Fosil yakıtların, yenilenebilir enerji ile ikamesi alanında politika formülasyonu çok kriterli bir bağlamda ele alınmalıdır. Kriterlerin fazla olması, enerji planlamasının ve enerji projelerinin karmaşıklığı, çok kriterli analizleri, karar alma sürecinde değerli bir araç haline getirmektedir. Karar vericilerin, aktörler tarafından belirlenen kısıtlamaların yerine getirilmesi konusunda belirlenen nihai çözüme ulaşmak için birden fazla hedefi incelemeleri gerekir (Mateo, 2012).

### **3.2. Sürdürülebilirlik ve Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilirliği İle İlgili Çalışmalar**

Sürdürülebilir enerji ile ilgili gelişmeler günümüz toplumunda daha da önemli bir konuma gelmekle birlikte, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ile ilgili araştırma makaleleri de bununla paralel olarak artmaktadır. Enerji sektöründe sürdürülebilirlik değerlendirmesi için Çoklu Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin uygulandığı

yayın sayısındaki sürekli artış, enerji sürdürülebilirliği ile ilgili sorunları çözmek için bilimsel ve pratik alanlarda ÇKKV yöntemlerinin önemini ortaya koymaktadır.

ÇKKV yöntemleri arasında WSM (Ağırlıklı Toplam Yöntemi), WPM (Ağırlıklı Ürün Yöntemi), AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi), bulanık AHP, TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik Sırasına Göre Tercih Tekniği), bulanık TOPSIS, PROMETHEE (Zenginleştirme Değerlendirmesi İçin Tercih Sıralaması Organizasyon Metodu) ELECTRE (Eleme ve Seçim Çeviri Gerçekliği), VIKOR (Visekriterijumsko Kompromisno Rangiranje) ve çok amaçlı programlama gibi metotlar bulunmaktadır. Her yöntemin farklı uygulama alanlarının bulunmasının yanı sıra avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte yöntemlerin hiçbiri diğer yöntemlere karşı üstünlük sağlamamaktadır. Aynı çok kriterli karar problemini çözmek ve daha sağlam bir karar sonucuna ulaşmak için birden fazla yöntem kullanılabilir.

Konu ile ilgili literatür taramalarında, sürdürülebilirliğin farklı yönlerini dikkate alan, ancak sürdürülebilirlik indikatörlerinin normalizasyon yapılmadan sıralandığı, göreceli değerlendirmelerin yanı sıra (Evans ve ark., 2009; Gnanapragasam ve ark, 2010), ekonomik, sosyal ve çevresel kriterleri ele alan kantitatif sürdürülebilirlik değerlendirme araçları geliştirilmiştir (Afgan ve ark. 2000, Afgan ve Carvalho, 2002; Afgan, 2010; Frangopoulos ve Keramioti, 2010) ancak, sürdürülebilirlik göstergeleri, örneğin kirletici emisyonları normalize edilmemiştir

AHP, enerji alternatiflerini değerlendirmek ve gelişimin önceliğini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Chatzimouratidis ve Pilavachi (2008), CO<sub>2</sub>, ihtiyaç duyulan arazi, iş yaratma ve sosyal kabul gibi bir takım kriterleri göz önünde bulundurarak enerji santrallerinin yaşam standardı üzerindeki etkisinin analizi için AHP'yi uygulamışlardır. Araştırma sonucunda, farklı kriter ağırlıklarına göre güneş-PV, petrol, kömür, hidroelektrik ve rüzgar santrallerinin en istikrarlı olduğu kanaatine varılmıştır.

Evans ve arkadaşları tarafından (2009), sürdürülebilirlik göstergelerinden, elektrik üretimi birim maliyeti, sera gazı emisyonları, elektrik üretim teknolojilerinin erişilebilirliği ve kısıtları, enerjiye dönüşümdeki verimi, arazi kullanım gereksinimi, su tüketimi ve sosyal etkileri incelenerek derecelendirilme yapılmıştır. Bu derecelendirme

yapılırken daha çok nitel bir değerlendirme yapılmış olup, herhangi bir matematiksel model kullanılmamıştır.

Amer ve Daim (2011), yenilenebilir enerji teknolojilerini değerlendirmek amacıyla AHP'yi çevresel, sosyal, ekonomik ve teknik kriterler boyutunda incelemiş ve biyokütle enerjisi ile rüzgar enerjisini tercih edilen alternatifler olarak belirtmişlerdir.

Stein (2013), çeşitli yenilenebilir ve yenilenemeyen elektrik enerjisi üretim karşılaştırmak için gerçek verilere dayanan kapsamlı bir, çok kriterli model oluşturmuş sonuç olarak; güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermalin en uygun alternatifler olduğu sonucunu ortaya koymuştur.

Ahmad ve Tahar (2014), Malezya özelinde yenilenebilir enerji teknolojilerini AHP yöntemi ile değerlendirmiştir. Bu değerlendirme kapsamında, konunun teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel yönleri kriter bazında dikkate alarak, Güneş Enerjisi PV'nin Malezya için en iyi yenilenebilir enerji seçeneği olduğunu ve ardından biyokütle, hidroelektrik ve rüzgar enerjisinin sırasıyla tercih edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.

Liu (2014), Singh ve ark. (2012) ve Ness ve ark., (2007) çeşitli sürdürülebilirlik göstergelerine genel bir bakış açısı, bir bileşik endeks, yenilenebilir enerji sistemleri için genel bir sürdürülebilirlik göstergesinin geliştirilmesi, formülasyon stratejilerinin uygulanması, ölçeklendirme, normalizasyon, tartma ve toplama metodolojisine genel bir bakış açısı sağlayarak sürdürülebilirlik değerlendirmesi için farklı metodolojileri incelemişlerdir. Pohekar ve Ramachandran (2004), Wang ve ark. (2009) ve Abu Taha ve Daim (2013), Çok Kriterli Karar Verme modellerini sürdürülebilir enerji planlaması ve analizi açısından değerlendirmiştir.

Frangopoulos ve Keramioti (2010), enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik endeksini belirlemek için çok kriterli bir yaklaşım kullanmışlardır. Endeks, teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin birleştirilmesiyle belirlenmiştir.

Shen ve diğerleri(2011) Tayvan özelinde yaptıkları bir çalışma kapsamında, AHP yöntemini kullanarak, Enerji, Çevre, ve Ekonomi hedefleri olmak üç temel politika

hedefi kapsamında, kendi içinde sıralamaları yapılmış ve çevresel hedef, ağırlığı en fazla olan kriter olarak değerlendirilmiştir. En düşük ağırlık ise enerji hedefi olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, depolamalı hidroelektrik santralleri en uygun alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

Trolldborg ve diğerleri (2014), İskoçya için ulusal ölçekte bir sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve on bir yenilenebilir enerji teknolojisinin sıralaması ve verilerdeki belirsizliklerin sonucu nasıl etkilediğinin incelenmesi için bir Çok Kriterli Analiz (ÇKA) yöntemini uygulamıştır.

Hacatoglu (2014) hibrit enerji sistemlerinde çok boyutlu kantitatif bir değerlendirme yapabilmek amacıyla sürdürülebilirlik indikatörlerine dayalı bir sistem yaklaşımı geliştirmiştir.

Ligus (2017) düşük karbon emisyonlu teknolojilerin, Polonya özelinde, sosyal refaha etkilerini, bulanık AHP yöntemiyle incelemiştir.

Ziamba (2019) tarafından rüzgar enerji santralleri, sürdürülebilirlik kapsamında ekonomik, teknik, çevresel, sosyal ve mekânsal kriterler açısından AHP ve ANP metotlarıyla değerlendirilerek uygun alanlar belirlenmiştir.

Lee ve Chang (2018) tarafından yapılan bir çalışma kapsamında, Tayvan enerji politikalarına ışık tutmak amacıyla, çeşitli ÇKKV metotlarıyla (WSM, VIKOR, TOPSIS, ELECTRE) kriterlere ait verileri literatür taramasından elde ederek, yenilenebilir enerji alternatiflerini derecelendirmişlerdir.

Campos-Guzman ve ark., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaşam döngüsü analizini, ÇKKV yöntemleri arasından, AHP yöntemiyle kombinleyerek yapılan araştırmaların anlaşılabilir ve kuvvetli altyapısından dolayı tercih edilebilir bir yöntem olduğunu ifade edilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ve sürdürülebilirlik analizleri üzerine yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen, yapılan literatür taramalarına göre, genel uygulanabilirliği olan, çoklu bakış açısına sahip uzmanlar tarafından yapılan değerlendirme kapsamında

oluşturulmuş ve yaşam döngüsü temelli veri analizini barındıran bir analiz modeline rastlanmamıştır.

Oluşturulan bu analiz modeli çerçevesinde, uygulama yapılan yatırım tutarı, birim enerji maliyeti iş olanakları, kapasite faktörü, işletme ve bakım masrafları, kaynak potansiyeli gibi lokasyon bağımlı kriterler için bölgeye özel verilerin kullanılmasına zen gösterilmiştir. Böylece, daha aktüel bir model dizayn edilerek, oluşturulacak politikalardan daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilecektir. Dolayısıyla gelecekte, farklı bölgeler veyalkeler için yapılması planlanan analizlerde bu ayrıntıya dikkat edilmesi gerekmektedir.

Tez alışması kapsamında sürdürülebilirlik ve yenilenebilir enerji kaynakları ilişkisi, altyapısal bağlantılarının da değerlendirilmesi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir.

## 4. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışma, sürdürülebilirlik kapsamında yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye özelinde en uygulanabilir seçeneğin belirlenmesi ve seçilen tüm kaynakların bu kapsamda değerlendirilerek, sürdürülebilirlik ve enerji politikalarının oluşturulması aşamasındaki problemlere genel bir yanıt oluşturma amacını taşımaktadır.

Bu değerlendirmeden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak, her bir enerji kaynağının sürdürülebilirlik parametreleri açısından birbirleriyle karşılaştırılması neticesinde tartışmaya açılan dezavantajlarının giderimine yönelik gerekli önlemlerin de alınması sağlanarak, yatırım planları daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilecektir.

ÇKKV yaklaşımı kapsamında AHP ve WSM yöntemleri ile bir sürdürülebilirlik modeli oluşturulmuş, seçilen yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilirlik indikatörlerinden faydalanılarak model dahilinde değerlendirilmiştir.

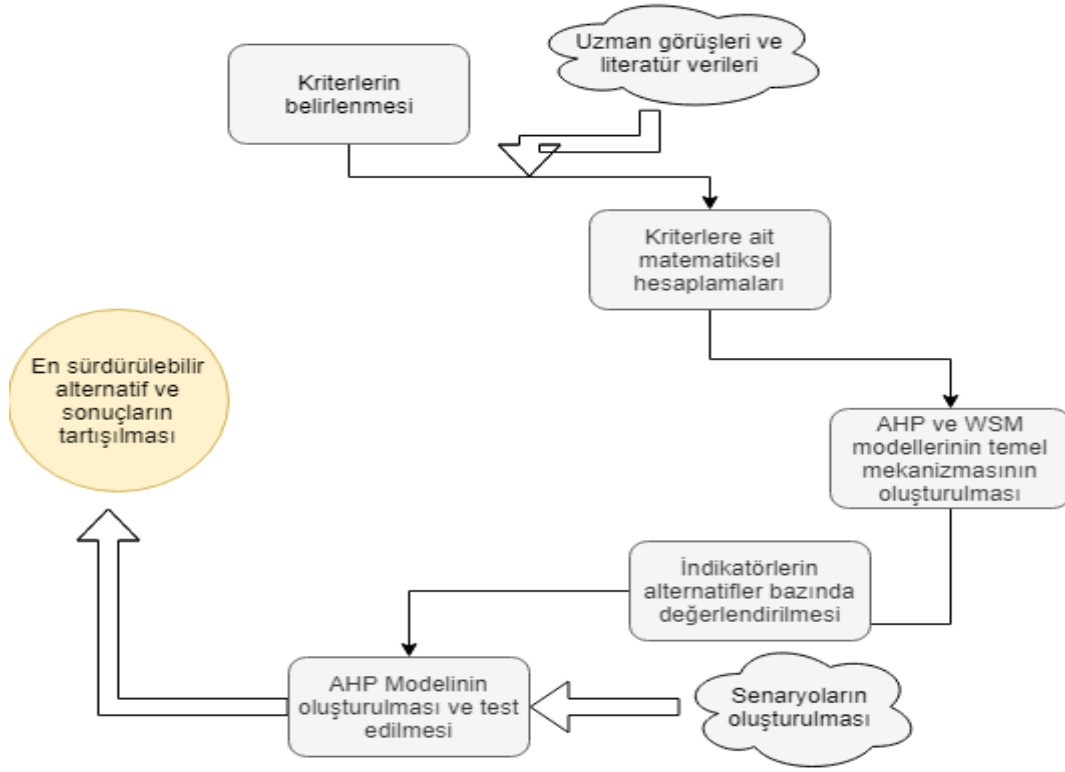
Tez çalışması, yenilenebilir enerjinin teşvik ve planlarının, sürdürülebilirlik kapsamında bütünlük bakış açısıyla değerlendirilmesi gerektiği hipotezi alt yapısını kullanarak şekillendirilmiştir.

Bu çalışma, geçerli bir politika oluşturulması konusunda sürdürülebilirlik bileşenlerinin göz önünde bulundurulması entegre bir yaklaşımın önemini belirtmek ve neoklasik bakış açısının göz ardı ettiği kaynak sürekliliğinin sağlanması için gerekli çevresel ve sosyal kavramların etkilerinin görülmesi açısından da yardımcı bir kaynak olma amacını taşımaktadır.

### 4.1. Model Yaklaşımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi kapsamında tasarlanan bu tez çalışmasında, AHP tabanlı, sürdürülebilirlik indikatörlerinin entegre edildiği, aynı zamanda teknik kapsamlı indikatörlerin de değerlendirildiği bir model oluşturulmuş ve duyarlılık analizleri ile test edilmiştir. Ayrıca farklı bir ÇKKV yaklaşımı olan WSM tabanlı bir model ile orijinal modelin uyumu değerlendirilmiştir.

Çalışma temel çerçevede yedi aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamaların görsel ifadesi Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmanın basamakları.

İlk aşamada, ÇKKV yöntemlerinden AHP'nin alt yapısı oluşturulmuştur. Kriterlerin belirlenmesi, indikatörlerin belirlenmesi, indikatörlere ait sayısal verilerin literatürden ve aktüel verilerden derlenmesi kapsamında veri toplanması işlemleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada, uzman görüşleri doğrultusunda, uygulanan ÇKKV prosesleri için temel yapılardan olan kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi ile ilgili matematiksel hesaplamalar yapılmıştır. Seçilen 20 adet uzman proje değerlendirme konusunda yetkin olup teknik, mali ve ekonomik alanlarda uzmanlaşmışlardır. Teknik uzmanlar; elektrik-elektronik, makine, inşaat, kimya, jeoloji ve çevre mühendisliği branşlarında eğitim görmüş, ekonomik ve mali uzmanlar ise işletme ve iktisat branşlarında eğitim görmüşlerdir (Ek-1).

Üçüncü aşamada, elde edilen tüm veriler karşılaştırılarak tutarlılıkları ve bölgeye özel kullanılabilirliklerine göre genel veri tablosuna işlenmiş ve bu değerler üzerinden normalize edilmeleri ile ilgili matematiksel hesaplamaları yapılmış ve tablolaştırılmıştır. Normalizasyon işlemi WSM metodunda temel basamaklardan biridir.



Dördüncü aşamada, ise alternatiflerin indikatörler bazında kendi içlerinde karşılaştırılmaları amacıyla oluşturulan genel veri tablosundan faydalanılarak, alternatiflerin her bir indikatör bazında birbirlerine göre karşılaştırmaları önem derecesi skalası üzerinden değerlendirilmiş ve önem dereceleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar AHP metodunun altyapısını oluşturmaktadır. Kurulan AHP modelinin matematiksel alt yapısı Bölüm 5’de açıklanmıştır.

Beşinci aşamada, WSM metodunun uygulamasında da kullanılmak üzere hazırlanan normalize edilmiş değerler ve hesaplanan önceliklerin her bir indikatöre özel çarpılmasından elde edilen ağırlıklı toplamlar üzerinden alternatifler kendi aralarında değerlendirilmiştir. WSM modelinin matematiksel ifadesi Bölüm 5’de verilmiştir.

Altıncı aşamada, AHP senaryosunun tutarlılığı, duyarlılık analizleri kapsamında, farklı senaryoların test edilmesiyle değerlendirilmiş olup senaryo analizleri Bölüm 6’da verilmiştir.

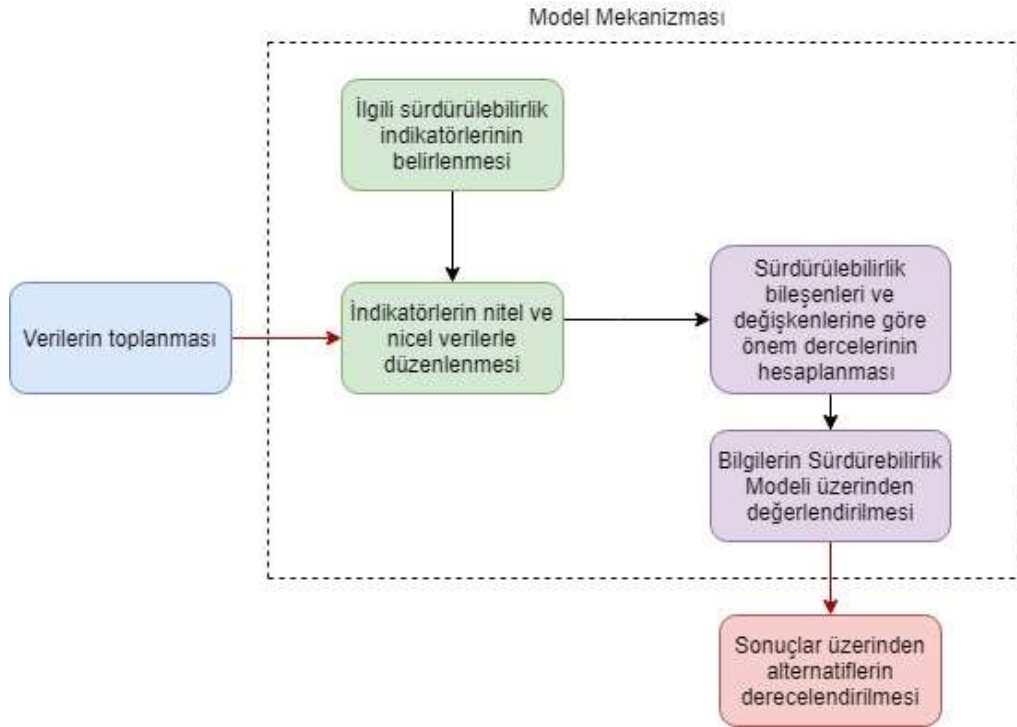
Yedinci aşamada, elde edilen tüm senaryo ve yöntemlere ait sonuçlar genel olarak değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

Tüm aşamaların tamamlanmasının ardından elde edilen sonuçlar sürdürülebilirlik analizinde kullanılmıştır.

## 5. MATERYAL ve METOD

### 5.1. Sürdürülebilirlik Modeli

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik indikatörlerine dayalı analizinin yapılması amacıyla yöntem belirlenirken, enerji kaynağı alternatiflerinin arasından en sürdürülebilir olanı ile ilgili karar verilmesi aşamasında, enerji planlama senaryosunun, sürdürülebilirlik konseptine dayalı sisteme dönüştürülmesini zorlaştıran çok sayıda amacı, tanımı ve kriteri olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınma vizyonuyla artan enerji talebinin karşılamak için gerekli politik, sosyal, ekonomik ve çevresel bakış açılarını dikkate alan uygun bir planlama modeli gereklidir. Enerji planlaması ile ilgili bu tür karmaşık sorunları çözmek için, ÇKKV'nin verimli enerji planlaması için daha iyi bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Kumar ve ark., 2017). Dolayısıyla tercih modelinin oluşturulmasında uygulanmasına karar verilmiştir. Kurulan model mekanizması ve sınırları Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik değerlendirilmesi üzerine oluşturulan model.

## 5.2. Çok Kriterli Karar Verme Sistemi

Çok Kriterli Karar Verme Sistem analizi hem felsefi bir yaklaşım hem de karmaşık sistemlerle ilgili sorunların giderilmesi için geliştirilen simülasyonlar da dahil olmak üzere, bir teknikler topluluğudur. Sistem analizi, karmaşık sistemlerin önemli özelliklerini tanımlamak ve çözmek için matematiksel modellerin kullanılmasıyla soruna bütüncül bir yaklaşımı vurgulamaktadır. Matematiksel bir model, bu nesnel arasındaki ilişkileri tanımlayan denklemler kümesidir. Bir sistemin modelini tanımlayan denklemleri çözerek, sistemin dinamik davranışını taklit edebilir veya simüle edebiliriz.

Tam olarak somutlaştıramadığımız birçok olgu gibi, “sistem” in tam olarak tanımlanması zordur. Fiziksel ve biyolojik bilimler açısından sistem, bir sınır ve işlevsellik tarafından belirlenen, birbiriyle ilişkili bileşenlerden oluşmuş bir bileşimdir. Malzeme, enerji ve bilgiyi sınırları dahilinde ilişkilendirir. Sistem dahili ve harici değişkenlerle tanımlanır. Sistemin iç yapısı ve süreçleri, sistemin iç değişkenleri tarafından belirlenen işlevselliğini belirler. Dış değişkenler sistemin sınırları ile tanımlanır (Afgan ve Carvalho, 2002).

Enerji sistemleri gibi kompleks sistemlerin planlanmasında bu tür bir çoklu bakış açısı kullanılması, çevresel sosyal ve ekonomik bileşenleri olan sürdürülebilirlik kavramının bu planlama aşamalarına dahil edilebilmesini sağlamaktadır.

Enerji planlaması ile ilgili karmaşık sorunları çözmek için, çok kriterli karar vermenin verimli enerji planlaması için daha iyi araçlardan biri olduğu kanıtlanmıştır. ÇKKV teknikleri, kamu sektörünün yanı sıra tarımsal kaynak yönetimi, göç, eğitim, ulaştırma, yatırım, çevre, savunma, sağlık bakımı vb. gibi sektör kararlarında geniş uygulama alanı bulmuştur (Kumar ve ark.,2017).

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) olarak bilinen yaklaşımı kapsamında problemlerin çözülmesi aşamasında, klasik ya da bulanık mantık temelli pek çok yöntem bilim çevreleri tarafından kullanılmaktadır. Farklı seçenekler arasında tercihler yapılacaksa, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Analitik Ağ Süreci (AAS), MAUT, UTA, MACBETH, PROMETHEE, ELECTRE I, TOPSIS, Amaç Programlama, Veri Zarflama Analizi, derecelendirme yapılacaksa, AHS, AAS, MAUT, UTA, MACBETH, PROMETHEE, ELECTRE III, TOPSIS, sınıflandırma yapılacaksa, AHSSort, UTADIS, FlowSort,

ELECTRE-Tri tanımlama yapılmak istendiğinde ise, GAIA ve FS-Gaia gibi yöntemlerin kullanılması tercih edilmektedir (Ishizaka ve Nemery, 2013).

### **5.2.1. Model Oluşturulması**

ÇKKV prosesi karmaşık ve dinamik bir yapıya sahip olmamakla birlikte mühendislik ve yönetimsel aşama olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Yönetimsel aşamada hedefler belirlenir ve nihai çıktı olarak en uygun alternatif seçilirken, mühendislik aşamasında alternatiflerin tanımlamaları gerçekleştirilir ve bunlardan herhangi birini seçilmesi durumunda, kriterlerin etkilerine göre ortaya çıkacak sonuçları gösterir ve bir sıralama oluşturulur. Bu aşamada aynı zamanda optimizasyon gerçekleştirilir. Kriterlerin bakış açısına göre seçilmesinin sonuçlarını belirtir ve alternatiflerin çok kriterli sıralamasını yapar. Mühendislik seviyesi optimizasyon prosedürünü gerçekleştirir.

Karar verme mekanizmasının ilk ve son aşamalarında prosese dahil olan karar vericiler, yönetimsel aşamanın yürütücüleri olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bu kişiler adlarından da anlaşıldığı üzere mühendislik aşamasından elde edilen çıktılarla varılan sonuçları, kabul veya ret yetkisine sahiptirler.

### **5.2.2. Senaryo Analizleri**

Oluşturulan model kapsamında senaryo analizleri kullanılarak, farklı koşullarda yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik dereceleri üzerindeki değişimler değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, ana ve alt kriterlerin öncelik değerlerinin, çeşitli senaryo koşulları çerçevesinde değiştirilerek, modelden elde edilen sonuçların değişkenliği ve kriter bağımlılıkları test edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarla modelin tutarlılığı değerlendirilmiştir.

### **5.2.3. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)**

Belirli bir problemin çözülmesi aşamasında, karar vericinin bir dizi alternatif çözümün uygulanabilirliği açısından performansını değerlendirmek istediğinde ve problem dahilinde çoklu hedeflerin bulunması durumunda alternatiflerin arasından seçim yapabilmek zorlu bir süreç halini almaktadır. Bu alternatifler çeşitli karar kriterleri kapsamında incelenerek değerlendirilebilir ve sonuç olarak bazı alternatifler diğerine göre öne çıkabilirler.

Kalitatif kriterlerin sürece dahil edilebilmesi, fazla kriter kullanılabilmesi gibi özellikleri sebebiyle AHP yöntemi ÇKKV uygulama aracı olarak kabul görmektedir.

AHP, matematiksel boyutu ve anlaşılabilirlik açısından daha kullanıcı dostu olması dolayısıyla yukarıda sayılan yöntemler içerisinde tercih edilme açısından önemli bir dereceye sahiptir (Uludağ ve Doğan 2016).

AHP yöntemi 1970'li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiştir. AHP yönteminde öncelikli olarak uygulama amacı doğrultusunda kriterlerin belirlenmesi ve alt kriterlerin seçilerek hiyerarşik yapının oluşturulması gerekmektedir.

AHP, temelde bir sorunun bileşenlerine ayrılması suretiyle uygulanır. Bu uygulama sorunun hiyerarşik şekilde ifade edilerek her bir etkenin derecelendirilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Ulaşılması belirlenen hedefler hiyerarşinin en üst basamağında yer alır, kararı etkileyen kriterler orta basamakta, alternatifler ise en alt basamakta yer alır. Karar verici daha sonra, hiyerarşideki öğelerin etkisinin göreceli gücünü veya etkisinin yoğunluğunu ifade etmek için bir dizi ikili karşılaştırmalar yaparak sonuca ulaştırılır ve karşılaştırmalı değerlendirme kararı ile yönlendirilir.

Alternatiflerin ve kriterlerin kendi aralarında karşılaştırılarak karar verilmesi için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. Bu matrisler oluşturulurken iki öge arasındaki değerlendirme Saaty tarafından önerilen Tablo 5.1'deki Önem Derecesi Skalası kullanılarak gerçekleştirilir. Bu tabloya göre 2, 4, 6, 8 gibi değerler ara değerlerdir. Kullanılma amaçları ise, ana değerler arasında uygulayıcının kararsız kalması söz konusu olduğunda, ara değeri kullanarak derecelendirme aşamasını daha sağlıklı bir şekilde ilerlemesini sağlamaktır. Sayısal değerler verilerek elde edilen bu değerlendirmeler, değişkenlerin öncelik değerlerinin belirlenmesinde kullanılır.

Tablo 5.1. Önem Derecesi Skalası (Goepel, 2019'dan adapte edilmiştir).

Tanım	Değer	Açıklama
Eşit derecede önemli	1	İki seçenek hedefe eşit katkıda bulunur.
Biraz daha önemli	3	İki seçenekten biri diğerinden biraz daha öne çıkmaktadır.
Çok daha önemli	5	İki seçenekten biri diğerine göre çok fazla öne çıkmaktadır
Oldukça önemli	7	Bir seçenek diğerine karşı çok kuvvetli bir şekilde tercih edilir.
Son derece önemli	9	Bir seçeneğin diğerine tercih edilmesi ile ilgili mümkün olan en üst seviye, kesin üstünlük mevcuttur.
Ara değerler	2,4,6,8	İki değer arasında net bir seçim yapılmadığında ilgili değerler arasında karşılık gelen değer kullanılabilir.

Bazı kriterler birbirleriyle ters etkileşimli olabileceğinden, en iyi seçeneğin, her kriter için en uygun olanı değil, her biri farklı kriterler arasında en uygun dengeyi sağlayan seçim olduğu bilinmelidir. Önem derecesi arttıkça, ilgili kriter öne çıkmaktadır. Belirli bir kriter için, karar vericinin o kriterle ilgili seçenekleri ikili olarak karşılaştırması sonucunda seçeneklerin puanlanması gerçekleştirilir. Alternatifin puanı yükseldikçe, dikkate alınan kriterlere göre performansı da artar. Son aşamada, AHP önem dereceleri ve alternatiflerin puanlarını birleştirerek her seçenek için genel bir puan ve puan sıralaması oluşturulmaktadır. Belirli bir seçenek için genel puan, tüm ölçütlere göre elde ettiği puanların ağırlıklı bir toplamıdır.

AHP kurgulanması ile ilgili gerçekleştirilmesi gereken adımlar aşağıdaki gibidir:

- 1) Karar için bir model geliştirilmesi: Karara erme amacıyla, hedefler, kriterler ve alternatifler hiyerarşisi oluşturulur.
- 2) Kriterler için önceliklerin (ağırlıkların) elde edilmesi: Kriterleri, ağırlıklarını türetmek istenen hedefe göre ikili olarak karşılaştırılır. Daha sonra kararların tutarlılığını kontrol ederiz; yani, orantılılık ve geçişlilik açısından makul bir tutarlılık seviyesi sağlamak için kararların gözden geçirilmesi yapılır.

- 3) Alternatifler için yerel öncelikleri (tercihler) türetilmesi: Her bir kritere ilişkin öncelikleri veya alternatifleri önceki adımdakine benzer işlemi takip ederek, diğer bir deyişle alternatifler her bir kritere göre ikili olarak, karşılaştırılır. Tutarlılık gereken şekilde kontrol edilir ve gerektiğinde ayarlanır.
- 4) Genel Öncelikleri Türetme (Model Sentezi): Elde edilen tüm alternatif öncelikler, her bir kriterin ağırlığını hesaba dahil edebilmek için ağırlıklı bir toplam olarak birleştirilir. Genel olarak en yüksek önceliğe sahip olan alternatif en iyi seçimdir.
- 5) Duyarlılık analizinin yapılması: Kriterlerin ağırlığındaki değişikliklerin sonucu nasıl etkileyebileceği üzerine bir araştırma biçimidir, elde edilen sonuçların arkasındaki mantığı anlamak için yapılır.
- 6) Nihai Karar Verme: Sentez sonuçlarına ve duyarlılık analizine dayanarak bir karar verilebilir.

AHP yöntemi ile ilgili özet bir değerlendirme yapıldığında, en önemli adımlardan birisinin, pair-wise olarak da adlandırılan ikili karşılaştırmalar bölümü olduğu ifade edilebilir. İkili karşılaştırmalar yapıldıktan sonra, oluşturulan matris, her bir kritere ait değerlerin ayrı ayrı ilgili kriter değerlerinin toplamına bölünerek normalize hale getirilir. Bu matristeki satır ortalaması hesaplanarak kriterlere ait ağırlıklar bulunur. Kriterler arasında karşılaştırma yapılırken karar vericilerin olası tutarsızlıklarının belirlenmesi için Tutarlılık Oranı (CR veya T.O.) hesaplanmalıdır. Bu hesaplama yapılırken kriter sayısına (n) bağlı olarak belirlenmiş sabit indeks (RI) sayıları kullanılır. CR değeri 0,10 ve altında ise oluşturulan karşılaştırma matrisi tutarlı, tersi durumda karar matrisi tutarsız kabul edilir ve ikili karşılaştırmalar tekrar gerçekleştirilir. AHP'nin son adımı kriterlerin önem ağırlıkları ve alternatiflerin önem ağırlıklarının çarpımı ile ilgili alternatife ait öncelik değerinin hesaplanmasıdır. Bu değerlerin toplamı 1'e eşittir. En yüksek değeri alan alternatif, karar problemi için en iyi alternatiftir (Sarucan ve ark. 2010, İç ve Yurdakul, 2010).

Modelin matematiksel ifadesi ile ilgili detaylar incelendiğinde;

Karşılaştırılan element sayısı n olmak üzere, karşılaştırma sonuçları  $n \times n$  boyutunda A matrisini oluşturur. Bu matris oluşturulurken önem derecesi skalasından yararlanır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matris elemanları veya karşılaştırılan seçenekler arasındaki oran aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (2)$$

Karşılaştırılan seçenekler arasında ilk seçeneğin üstünlüğünün, ikinci seçenekten önemsiz olduğu ters ilişkili durumlarda, aşağıdaki verilen formülden elde edilen değer kullanılır.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (3)$$

Pratik anlamda ifade edildiğinde önem derecesi skalasından yararlanılarak iki kriterin birbirlerine göre karşılaştırması yapılır.

Daha sonra, matris değerlerinin normalize edilmesi ile oluşturulacak matris  $B=[b_{ij}]$  için, aşağıda verilen formül kullanılır. Elde edilen  $a_{ij}$  değeri tüm satırın toplamına bölünür.

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

Normalize edilmiş B matrisinden önem derecelerinin (ağırlıkların) ( $w=[w_i]$ ) hesaplanması, aşağıdaki formüle göre, matrisin her bir sırası için aritmetik ortalama hesaplanarak yapılır.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (5)$$



Karşılaştırma Matrisinin Tutarlılığının hesaplanmasını ayrı bir proses olarak irdelediğimizde;

Tutarlık hesaplarının sonuçları, karar vericinin ikili karşılaştırmalara ilişkin olarak tutarlı bir yargıya ulaşıp ulaşmadığını işaret eder. Matematiksel olarak, A karşılaştırma matrisinin, tüm i, j ve k değerleri için,  $a_{ij}a_{jk}=a_{ik}$  olduğunda tutarlı olduğunu söyleyebiliriz.

Esasında tüm karşılaştırma matrislerinin tutarlı olması olağandışıdır çünkü insan kararının bu matrislerin inşası için temel olduğu düşünüldüğünde, bazı “makul” tutarsızlıklar beklenebilir ve tolere edilir.

Bir tutarlılık seviyesinin “makul” olup olmadığını belirlemek için, A karşılaştırma matrisi için ölçülebilir bir sistem geliştirmemiz gerekir. A matrisi tamamen tutarlı olduğunda, tüm sütunların aynı olduğu normalize edilmiş bir C matrisi oluşur.

$$C = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ardından, orijinal karşılaştırma matrisi A'nın, i sütununun elemanlarını  $w_i$ 'ye bölerek C matrisinden faydalanılarak belirlenebilir. Elde edilen yeni matris aşağıdaki gibi olacaktır;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & 1 & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Elde edilen oran karşılaştırmaları aşağıda gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$n \times w$  terimini elde etmek için matris sağdaki  $w$  değeri ile çarpılır. Daha özel bir ifadeyle;  $w$ , göreceli önem derecelerinin ( $w_i, i=1,2,3\dots n$ ) sütun vektörü olduğundan,  $A$  matrisi,  $Aw=nw$  olduğunda tutarlı olarak kabul edilir.

$A$ 'nın tutarlı olmadığı durumlarda, göreceli önem derecesine ( $w_i$ ), normalize edilmiş  $C$  matrisinde  $i$  satırındaki  $n$  tane elemanın ortalaması ile tahmin edilir.  $w_{ort}$  hesaplanan ortalama vektör olarak kabul edildiğinde, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.  $\lambda_{max}$ , matrisin temel özdeğeridir ve kriterlerin ağırlıklı toplamlarının, kriter ağırlıklarına bölünmelerinin toplam değerinin, kriter sayısına bölünmesiyle elde edilir.

$$Aw_{ort} = \lambda_{max} w_{ort}, \lambda_{max} \geq n$$

Bu durumda,  $\lambda_{max}$ ,  $n$ 'ye ne kadar yakınsa, karşılaştırma matrisi  $A$  da o kadar tutarlı olur. Bu varsayımı temel alarak AHP yönteminde, tutarlılık oranını aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

$RI$  değerleri karşılaştırılan  $n$ -kriter sayısına göre değişen sabit bir endeks olarak tanımlanabilir.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

$CI$ ,  $A$ 'nın tutarlılık endeksidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

$CR \leq 0.1$  ise tutarsızlık seviyesi kabul edilebilir. Aksi takdirde tutarsızlık yüksektir ve karar vericinin daha kabul edilebilir bir tutarlılık seviyesi sağlaması için A'nın  $a_{ij}$  unsurlarını yeniden değerlendirmesi gerekebilir (Atanasova-Pacemka ve ark., 2014).

#### 5.2.4. Ağırlıklı Toplam Yöntemi

Ağırlık Toplama Modeli (WSM), bir dizi karar kriteri açısından bir dizi alternatifini değerlendirmek amacıyla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri içerisinde, tanınmış bir yöntem ve karar verme mekanizmasıdır.

Genel olarak, belirli bir ÇKKV probleminin alternatif  $m$ ' de ve karar kriterleri  $n$ 'de tanımlandığını varsayalım, bununla birlikte tüm fayda kriterlerinin, değerler ne kadar yüksekse, o kadar iyi olduğunu varsayalım. Ayrıca,  $W_j$ 'nin  $C_j$  kriterinin göreceli önemini gösterdiğini ve  $A_{ij}$ 'in,  $C_j$  kriteri açısından değerlendirildiğinde alternatif  $A_i$ 'nin performansı olduğunu varsayalım. Bu varsayımlar ışığında tüm kriterler aynı anda değerlendirildiğinde,  $A_i$  alternatifinin,  $A_i^{WSM-Skoru}$  olarak adlandırılan önemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Handoko ve ark.2017).

$$A_i^{WSM-Skoru} = \sum_{j=1}^n W_j A_{ij} \text{ için, } i = 1, 2, 3 \dots, m \quad (11)$$

Ağırlıklı toplam metodunun uygulanması için tüm kriterlerin ifade olarak karşılıkları aynı türden olmalıdır. Bu amaçla normalizasyon prosedürü uygulanır. Model oluşturulması kapsamında takip edilecek aşamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Problemin tanımlanması
- Alternatiflerin ve kriterlerin belirlenmesi
- Verilerin toplanması
- Normalizasyon
- Önceliklerin belirlenmesi
- Ağırlıklı toplamların hesaplanması
- En iyi seçeneğin belirlenmesi

### 5.3. MODELE AİT KRİTERLERİN BELİRLENMESİ

Enerji sistemleri bir ülkenin ekonomik ve sosyal gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal boyutları olan, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve çeşitlendirilmesi için farklı alternatifler arasından seçim yapılması, güçlü karar verme metotlarının kullanılmasını gerektirmektedir.

Geleneksel bakış açısıyla, düşük maliyetli en verimli seçeneği belirlemeyi amaçlayan tek kriterli karar verme yaklaşımı, problem çözümlemede yeterli olarak görülmemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının planlanması aşamasında disiplinler arası bir bakış açısıyla yaklaşarak, eylem planları oluşturmak, en iyi alternatifi seçmek, sürdürülebilir olmayan enerji tedarik sistemini belirlemek, çevresel ve sosyal etkilerini izlemek artık maliyet veya fayda gibi tek boyutlu bir değerlendirme ekseninde irdelenmemektedir. Fosil yakıtların, yenilenebilir enerji ile ikamesi alanında politika formülasyonu çok kriterli bir bağlamda ele alınmalıdır (Mateo, 2012).

Enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğinin ölçülmesi, sürdürülebilirliğin geliştirilmesi alanında tartışmaların itici gücü olmanın yanı sıra başlı başına önemli bir mesele olarak görülmektedir. Sürdürülebilirliği güvenilir bir şekilde ölçen değerlendirme kriterleri ve yöntemleri geliştirilmesi; en iyi alternatifi seçmek, sürdürülebilir olmayan enerji tedarik sistemini belirlemek, alternatiflerin entegre performanslarının ölçülerek enerji sistemleri tasarımcılarına yol göstermek ve sosyal çevre üzerindeki etkileri izlemek için bir ön gereklilik olarak görülmektedir. Oldukça hızlı büyüyen bu alanda, geliştirilen kriterlerin ve ölçüm araçlarının çokluğu, kavramsal ve metodolojik çalışmaların önemini göstermektedir. Kriterlerin seçimi ve geliştirilmesi; güvenilirlik, uygunluk, pratiklik ve ölçüm sınırlamaları kapsamındaki parametreler dahilinde gerçekleşir (Wang ve ark.,2009).

Kriterlerin belirlenmesi aşamasında sürdürülebilirliğin ana bileşenleri olan çevresel, sosyal ve ekonomik kapsam göz önünde bulundurulmuştur. Bununla birlikte, enerji kaynaklarının kullanımında, uygulanabilirlik açısından teknik boyutların da, gerek literatür araştırmaları sırasında, gerek problemin sorgulanması ile ilgili aşamalar esnasında, yeterli bir değerlendirme için önemli olduğu kanısına varılmıştır.

Enerji sistemleri ile ilgili karar verme aşamalarında gittikçe önemli bir hale gelen sosyal ve çevresel boyutların dahil edilmesi ile ilgili global kanıya rağmen, ekonomik ve teknik boyut hala önceliğini korumaktadır. Teknik boyut, enerji sistemlerinin mühendislik kapsamındaki teknik özelliklerini içermekte olup genel anlamda, enerji sistemleri ile ilgili sürdürülebilirlik değerlendirmesi ile ilgili uygulamalarda kullanılan temel bir kriterdir, çünkü sistemin ekonomik boyut ile doğrudan ilişkili olduğu için, teknik olarak mümkün olmayan bir enerji sistemi kurmak mantıklı değildir. Bu nedenle karar vericiler, sonunda bir ürün sağlayabileceklerinden emin olmak için genellikle bu boyutu öncelikli olarak belirlemiştir (Shaaban, 2017).

Teknik boyutun eklenmesi ile nicel verilere dayalı indikatörler de modele eklenerek daha sağlıklı bir seçim prosesinin oluşturulması hedeflenmiştir.

İndikatörlerin seçimi açısından incelenen literatür araştırmalarında, (Tablo 5.2.) klasik sürdürülebilirlik bileşenlerinden çevre, sosyal ve ekonomik boyutlara ek olarak teknik boyutları da içeren indikatörlerin de eklendiği görülmüş ve teknik indikatörlerin eklenmesinin, çalışmanın amacı doğrultusunda, teknolojik değerlendirme boyutunun da önemli olmasından dolayı, daha kapsamlı bir bakış açısı elde edilmesini sağlayacağı kanısına varılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen, yenilenebilir enerji teknolojilerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesi kapsamında çevresel, sosyal ekonomik ve teknik olmak üzere dört ana kriter belirlenmiştir

#### **5.4. İndikatörlerin (Alt Kriterlerin) seçilmesi**

İndikatörler, belirli bir problemin çözülmesi amacıyla uygulanan karar verme süreçlerindeki karmaşık yapıyı, bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilebilmesi için kullanılan bileşenler olarak ifade edilebilir. Karmaşık bir sisteme ait parametre verilerinin bir özetini oluşturarak, sistemin durumunun, süreçlerinin, reaksiyon ya da davranışlarının ölçülmesi olarak kabul edilebilir.

Karar verme sürecinde, belirli bazı bilgiler önem kazandığında, bu verinin ait olduğu konu bir indikatör olarak sınıflandırılabilir. İndikatörler, temel istatistikler üzerine kurulu

neden-sonuç ilişkileri kurarak, gerçek durumun kavranabilme kapasitesini artırır (La Rovere ve ark.,2010).

Sürdürülebilirlik değerlendirmesi ile ilgili çalışmalarda indikatörler belirlenirken indikatör sayısının fazla olmasından ziyade sürdürülebilirliğin tüm bileşenlerinin yansıtılması ve kendi aralarında çok fazla çakışmalarının daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesinde yardımcı olduğu düşünülmektedir (Phillis ve Kouikoglou, 2009; Liu 2014). Bununla birlikte belli prensipler kapsamında seçimi yapılmalıdır.

Enerji sisteminin performansını belirlemek için çeşitli kriterler bulunmaktadır. Sürdürülebilir enerji ile ilgili karar verme mekanizmaları oluşturulurken çok sayıda kriter kullanılmasının yararlı olduğu tartışmalıdır, keza daha az kriter, enerji sistemlerinin değerlendirilmesinde daha faydalı görülmektedir. Genel olarak, enerji sistemleri ile ilgili karar verme mekanizmalarında kullanılan “ana” kriterleri seçmek için genel ilkelere bağlı kalınmaktadır (Wang ve ark.,2009).

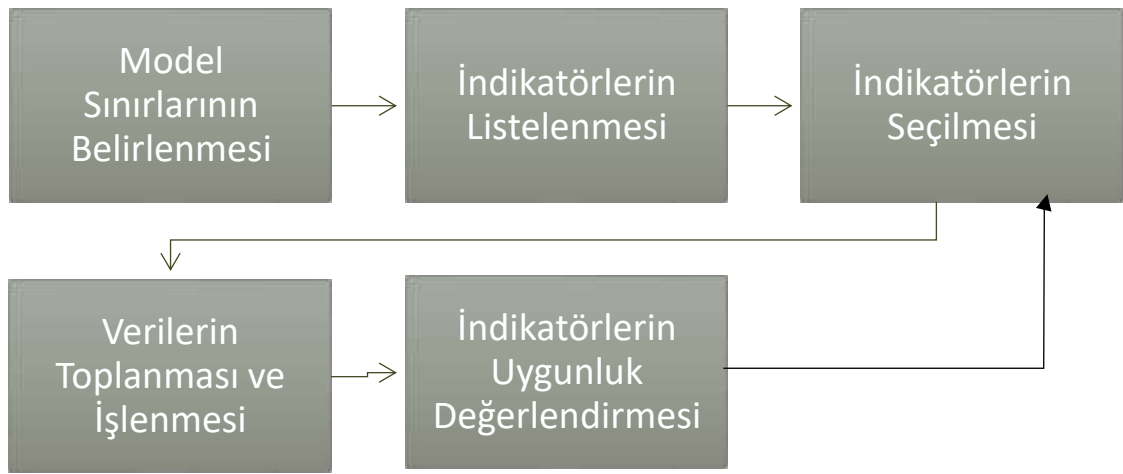
Türkiye’de yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirliği üzerine gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, indikatörlerin seçilmesi aşamasında aşağıdaki prensipler dahilinde değerlendirme yapılmıştır.

1. Çalışma konusuyla alakası yüksek düzeyde olmalıdır
2. Türkiye’deki yenilenebilir enerji üretimi ve gelişimi ile ilgili konuları yansıtmalıdır
3. İndikatörler sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik sosyal ve çalışma özelinde ek olarak, teknik boyutlarını içermelidir
4. Nicelleştirilebilir ve erişilebilir datalara sahip olmalıdır (Musango, 2012).

Literatür taraması sırasında, sürdürülebilirlik indikatörlerinin kullanımına dayalı araştırmalar içeren kaynaklar taranmıştır. (Evans ve ark.,2009; Fritsche, 2017; Afgan ve Carvalho, 2002; Spang, 2014; Davies ve ark.,2013 ; Begic ve Afgan,2007; Desai ve Bandyopadhyay, 2017; Hacatoglu,2014; Onat ve Bayar, 2010; Shaaban,2017 ). İndikatör

seçiminde La Rovere ve ark. (2010), tarafından uygulanan bir sistematik, çalışma kapsamında kurulan modele adapte edilmiştir. İndikatörlerin belirlenmesi amacıyla, yukarıda belirtilen kriterler ile uyumlu olanlar çalışma kapsamında kullanılmak üzere seçilmiştir. Daha sonra belirlenen bu indikatörler ile ilgili veri kaynakları taranmıştır. İlk basamakta kriterler ile uyumlu görünen ancak veri toplanması ve işlenmesi aşamasında uyumsuzluk gözlemlenen indikatörler elenmiş ve indikatör seti bu kapsamda revize edilmiştir.

İndikatörlerin belirlenmesi aşamasında izlenen sistematik Şekil 5.2.' de özetlenmiştir.



Şekil 5.2. Sürdürülebilirlik indikatörlerinin belirlenme aşamaları.

İndikatörlerin seçilmesi ile ilgili yapılan literatür taramasında oluşturan çevresel sosyal ve ekonomi boyutunu içeren parametreler ve seçilen yenilenebilir enerji kaynağı hakkındaki teknik yeterlilikler ile ilgili kriterler dikkate alınmıştır. Bununla birlikte sağlıklı bilgi kaynaklarının varlığı ve analiz edilebilirliği de göz önünde bulundurulmuştur. Seçilen indikatörler ve literatür uygulamaları Tablo 5.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. İndikatörlerin literatürdeki dağılımları.

Kategori	İndikatör	Kaynakça
Çevresel	CO <sub>2</sub>	a b,c,d,f,g,j,i,k,l,m,o,q
	SO <sub>2</sub>	b,d,i,o,q
	NO <sub>x</sub>	b,d,i,o,q
	Su Kullanımı	f,j,h,k,m,o
	Arazi Kullanımı	a,d,f,h,j,k,m,p,q
Sosyal	İş Olanakları	d,i,m,o,p,q
	Sosyal Kabul Edilebilirlik	c,d,f,n,o,q
Ekonomik	Yatırım Tutarı	a,b,c,e,f,i,l,n,o,p,q
	Birim Enerji Maliyeti	a,b,g,h,j,k,l,o
	İşletme ve Bakım Masrafları	c,e,f,i,n,o,p,q
Teknik	Elektrik Üretim Verimliliği	a,b,e,f,h,k,l,m,o,p
	Kapasite Faktörü	e,f,o,q
	Kaynak Potansiyeli	e,f,h,k,m,o,p

a. Afgan ve Carvalho,2002.

b. Begic ve Afgan,2007.

c. Burton ve Hubacek,2007.

d. Chatzimouratidis, Pilavachi, 2008.

e. Chatzimouratidis ve Pilavachi.2009.

f. Demirtaş 2013.

g. Evans ve ark.,2009.

h. Evansve ark.,2017.

i. Liu, 2014.

j. Desai ve Bandyopadhyay, 2017.

k. Onat ve Bayar, 2010.

l. Pilavachi ve ark., 2006.

m. La Rovere ve ark., 2010

n. Santoyo ve Azapagic, 2014

o. Shaaban, 2017

p. Şengül ve ark., 2015

q. Wang ve ark., 2009

Seçilen indikatörler arasından, literatürde en çok karşılaşılan indikatörleri değerlendirdiğimizde; Çevresel İndikatörler arasından CO<sub>2</sub>, Sosyal İndikatörler arasından, İş Olanakları ve Sosyal Kabul Edilebilirlik eşit seviyede, Ekonomik İndikatörlerden Yatırım Tutarı, Teknolojik İndikatörlerden Elektrik Üretim Verimliliği öne çıkmaktadır. Genel olarak bakıldığında ise Sürdürülebilirlik değerlendirmesinde en çok kullanılan indikatörün CO<sub>2</sub> olduğu görülmektedir.

İndikatörlere ait veriler hesaplamalara dahil edilirken indikatörün modele olan olumlu etkisinin, değerinin artması yoluyla mı yoksa azalış yoluyla mı olduğu matematiksel kurgu açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda indikatörlerin, sürdürülebilirliğin gerçekleştirilmesine hangi yönden katkı sağladığı Tablo 5.3'te özetlenmiştir.

Tablo 5.3'te ifade edildiği üzere; sürdürülebilirlik indikatörlerine ait değerlerin artması veya azalması sürdürülebilirliğin sağlanması açısından farklı yönlerde etki etmektedirler.



Örneğin çevresel indikatörlerden “CO<sub>2</sub>” değerinin azalması sürdürülebilirliğe pozitif yönde katkı sağlarken, sosyal indikatörlerden “İş Olanakları’nın” artışı benzer şekilde pozitif etki sağlamaktadır.

Tablo 5.3. İndikatörlerin kategorileri, birimleri ve sürdürülebilirlik bağıntıları (Shaaban, 2017’den adapte edilmiştir)

Kategori	İndikatör	Birim	Sürdürülebilirlik Bağıntısı
Çevresel	CO <sub>2</sub>	g/kWh	Azalma
	SO <sub>2</sub>	g/kWh	Azalma
	NO <sub>x</sub>	g/kWh	Azalma
	Su Kullanımı	kg/kWh	Azalma
	Arazi Kullanımı	m <sup>2</sup> /MWh	Azalma
Sosyal	İş Olanakları	Kişi/MW	Artış
	Sosyal Kabul Edilebilirlik	Tercih Ölçeği	Artış
Ekonomik	Yatırım Tutarı	USD/kWh	Azalma
	Birim Enerji Maliyeti	USD/kWh	Azalma
	İşletme ve Bakım Masrafları	USD/kWh	Azalma
Teknik	Elektrik Üretim Verimliliği	%	Artış
	Kapasite Faktörü	%	Artış
	Kaynak Potansiyeli	GWh/y	Artış

Sürdürülebilirlik indikatörlerinin belirlenmesinden sonra birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için çeşitli istatistiksel süreçlerin uygulanması gerekmektedir. Normalizasyon işlemi uygulanarak indikatörlerin 0 ile 1 arasında boyutsuz bir değerle ifade edilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede farklı birimlerde ifade edilen farklı indikatörler kendi aralarında bir değerlendirmeye tabi tutulabilecek bir değere getirilmiş olur. İşlem sonrasında sonucun 1’e yakın olması istenilen durumdur. Yukarıda belirtildiği üzere, bazı indikatörler sürdürülebilirlik ile doğru korelasyonlu bazıları ise ters korelasyonludur. Yani bazılarının artışı bazılarının ise azalması sürdürülebilirlik açısından olumlu sonuçlar vermektedir. 12 numaralı formül doğru korelasyonlu indikatörlere, 13 numaralı formül de ters korelasyonlu indikatörlere uygulanmıştır. Özellikle ağırlıklı toplam metodunun uygulanmasında önemli bir basamaktır.

$$\frac{(v - v_{min})}{(v_{max} - v_{min})} \quad (12)$$

$$\frac{(v_{max} - v)}{(v_{max} - v_{min})} \quad (13)$$

## 5.5. İndikatörlere ait veriler

Sayısal verilere dayalı indikatörlerin, enerji kaynakları arasında daha sağlıklı şekilde değerlendirme yapılması amacıyla, sayısal değerleri üzerinden karşılaştırılması yapılmıştır. Literatür verileri ve daha önceden projesi üzerinde birebir çalışılmış, halihazırda Türkiye’de enerji üretimi yapan yenilenebilir enerji santrallerinin verileri karşılaştırılarak, her bir indikatör için örnekler içerisinde tutarlı bir değer elde edilerek bu değerler kullanılmıştır.

### 5.5.1. Çevresel indikatörler

Çevresel indikatörler sürdürülebilirlik boyutunun çevresel boyutunun irdelendiği parametreleri kapsamaktadır. Bu parametreler;

- CO<sub>2</sub> Salımı
- SO<sub>2</sub> Salımı
- NO<sub>x</sub> Salımı
- Su Kullanımı
- Arazi Kullanımı

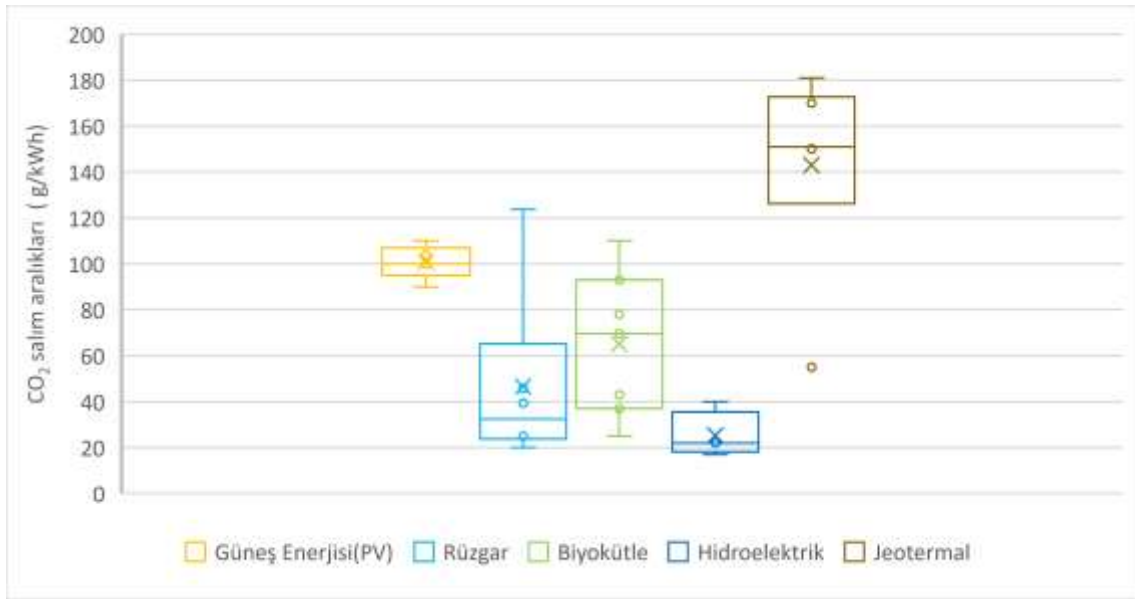
Şeklinde sıralanabilir. Bu indikatörlerin her bir kaynak için ölçülebilir ve birbirleriyle karşılaştırılabilir olmasına özen gösterilmiştir.

#### 5.5.1.1. CO<sub>2</sub> Salımı

CO<sub>2</sub> en bilinen sera gazları içerisinde yer almaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişikliğine % 9-26 oranında katkıda bulunan önemli bir sera gazıdır. Özellikle kömür, petrol doğalgaz gibi kaynakların yanma proseslerinde açığa çıkmaktadır (Liu 2014). Elektrik üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi durumunda, nihai ürünle ilgili tüm önemli emisyonların dikkate alınması gerekir. Elektrik için bu

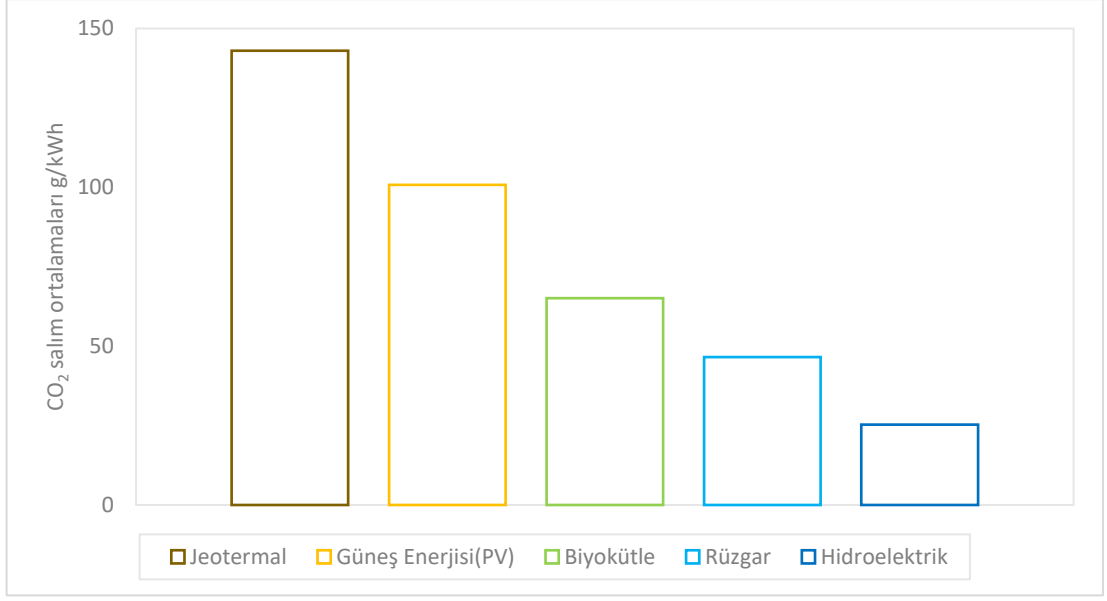
genellikle elektrik birimi başına eşdeğer karbondioksit gram cinsinden, örneğin, gCO<sub>2</sub> / kWh şeklinde ifade edilir.

Günümüzde, birçok uluslararası kuruluş iklim değişikliği konusunda oldukça duyarlı bir tutum sergilemekte ve CO<sub>2</sub> salımını azaltmak için mekanizmalar geliştirerek bu göstergeye sürdürülebilirliğin sağlanması hususunda değerlendirmede büyük önem vermektedirler (Shaaban, 2017).



Şekil 5.3. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre CO<sub>2</sub> salım aralıkları.

İncelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının yaşam döngüsü analizlerinden yararlanılarak elde edilen literatür verilerinden yola çıkarak (Evans ve ark.,2009,Afgan ve Carvalho, 2002; Şahin, 2016; Desai ve Bandyopadhyay, 2017; Shaaban, 2017) her bir yenilenebilir enerji kaynağına göre g/kWh cinsinden CO<sub>2</sub> salım değerlerinin 90-165 g/kWh, rüzgar enerjisi için 25-123,7 g/kWh, biyokütle enerjisi için 25-110 hidroelektrik enerjisi için 22-140 g/kWh jeotermal enerji için ise 55-181 g/kWh aralığında değiştiği görülmüştür.



Şekil 5.4. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre CO<sub>2</sub> salımları.

Şekil 5.4’de görüldüğü üzere Jeotermal enerji en yüksek CO<sub>2</sub> salım değerine sahip yenilenebilir enerji teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Jeotermal enerji santrallerinde kapalı sistemler mevcut olmakla birlikte bu tür sistemlerde bile CO<sub>2</sub> gazının yeraltına geri verilmesi oldukça zor bir prosestir ancak sanayide kullanım amaçlı (kuru buz yapımı vb.) satışı mümkündür.

Jeotermal enerjiden sonra CO<sub>2</sub> salımı en fazla olan yenilenebilir enerji kaynağı Güneş enerjisidir. Santralin enerji üretimi sırasında emisyon olmamakla birlikte, özellikle güneş panelleri üretilirken CO<sub>2</sub> salımı gerçekleşmektedir.

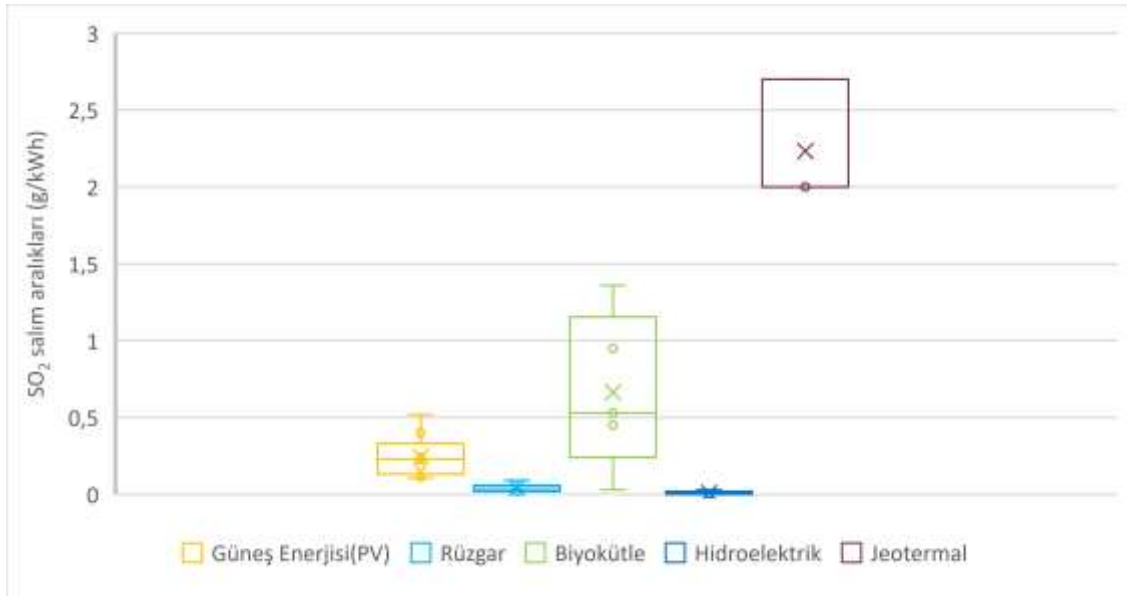
Güneş enerjisinden sonra en yüksek salım değerine sahip olan Biyokütle enerjisinde ise, biyokütlenin enerjiye dönüşümü döngüsü esnasında hem tüm doğal döngüde hem de teknik proses sırasında CO<sub>2</sub> ortaya çıkmaktadır.

Rüzgar ve hidroelektrik enerjisinde de güneş enerjisine benzer bir durum mevcuttur. Santral tamamen sıfır emisyon prensibine göre çalışsa da ekipman üretim prosesleri CO<sub>2</sub> salımına yol açmaktadır.

### 5.5.1.2. SO<sub>2</sub> Salımı

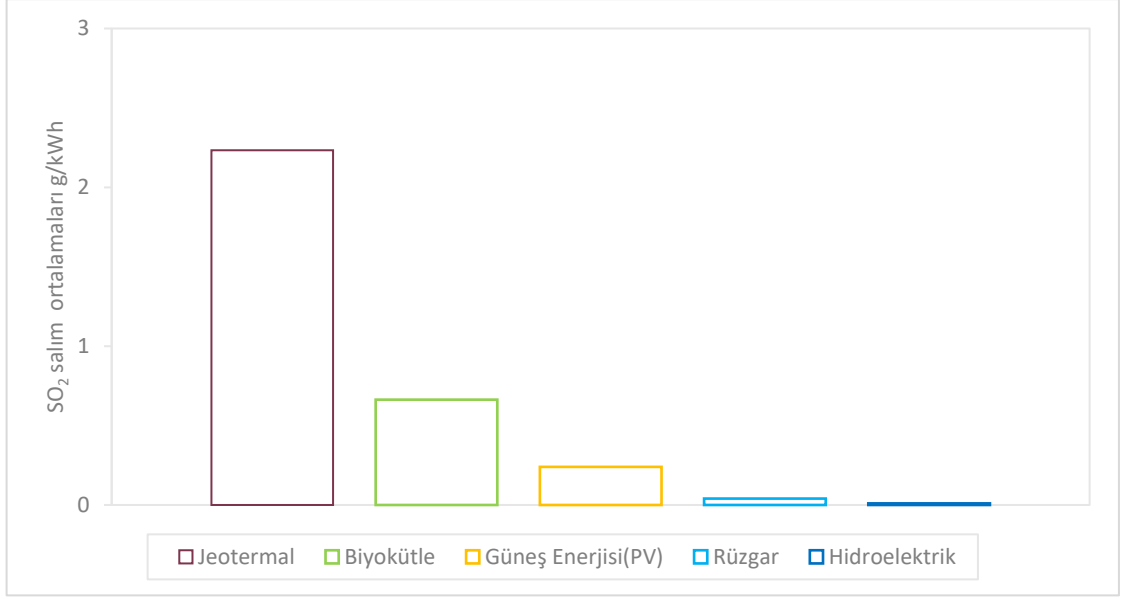
Sülfür dioksit, fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan ve yenilenebilir enerji santrallerinin bileşenlerinin yapımında kullanılan alüminyum, bakır, çinko, kurşun ve demirin erimesi sırasında yayılan önemli derecede zararlı bir gazdır.

Fiziksel olarak renksiz bir gaz veya güçlü bir boğucu kokusu olan bir sıvıdır. Bununla birlikte, özellikle insanlarda solunum sistemi ve tarım ürünleri üzerinde çok zararlı etkileri olan sülfürik asit yağmuru (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) oluşturur. Ayrıca, iklim değişikliğine ve çevresel problemlere büyük ölçüde katkıda bulunur. Bu tür emisyonlar için, kükürt giderimi prosesleriyle azaltma çalışmaları yapılmaktadır (Wang ve ark., 2009; Liu 2014).



Şekil 5.5. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre SO<sub>2</sub> salım aralıkları.

İncelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının yaşam döngüsü analizlerinden yararlanılarak elde edilen literatür verilerinden (Evans ve ark.,2009,Afgan ve Carvalho, 2002; Kowalski ve ark.,2009 ;Şahin, 2016; Desai ve Bandyopadhyay, 2017; Shaaban, 2017) yola çıkarak, her bir yenilenebilir enerji kaynağına göre g/kWh cinsinden SO<sub>2</sub> salımları Şekil 5.5'te verilmiştir. Bu verilere göre güneş enerjisi için SO<sub>2</sub> salım değerlerinin 0,100-0,52 g/kWh, rüzgar enerjisi için 0,02-0,09 g/kWh, biyokütle enerjisi için 0,03-1,36 hidroelektrik enerjisi için 0,009-0,03 g/kWh jeotermal enerji için ise 2,-2,7 g/kWh aralığında değiştiği görülmüştür.



Şekil 5.6. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre SO<sub>2</sub> salımları.

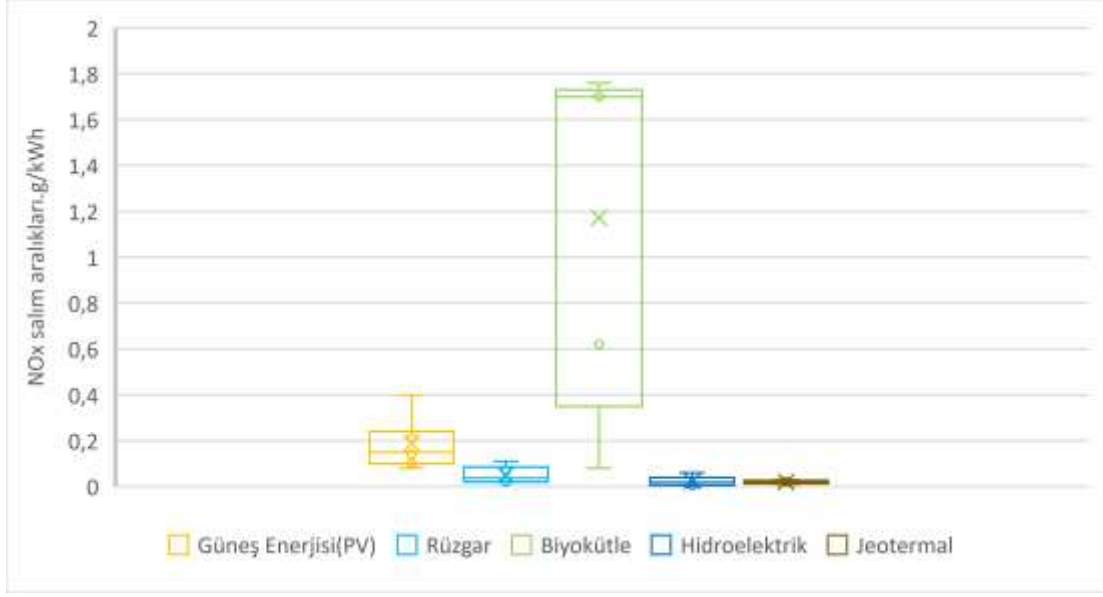
Jeotermal enerji santralleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında SO<sub>2</sub> salımı en yüksek enerji kaynağıdır (Şekil 5.6). Jeotermal akışkan içerisinde doğal olarak bulunan H<sub>2</sub>S gazının atmosferik dönüşümü nedeniyle SO<sub>2</sub> gazı ortaya çıkmaktadır.

Jeotermal enerjiden sonra en yüksek salım değerleri, biyokütle enerjisi güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve hidroelektrik enerji şeklinde en yüksek değerden düşük değere doğru sıralanmaktadır.

Biyokütle ve jeotermal enerji haricindeki seçilen diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında santralin enerji üretimi sırasında salım gerçekleşmemektedir.

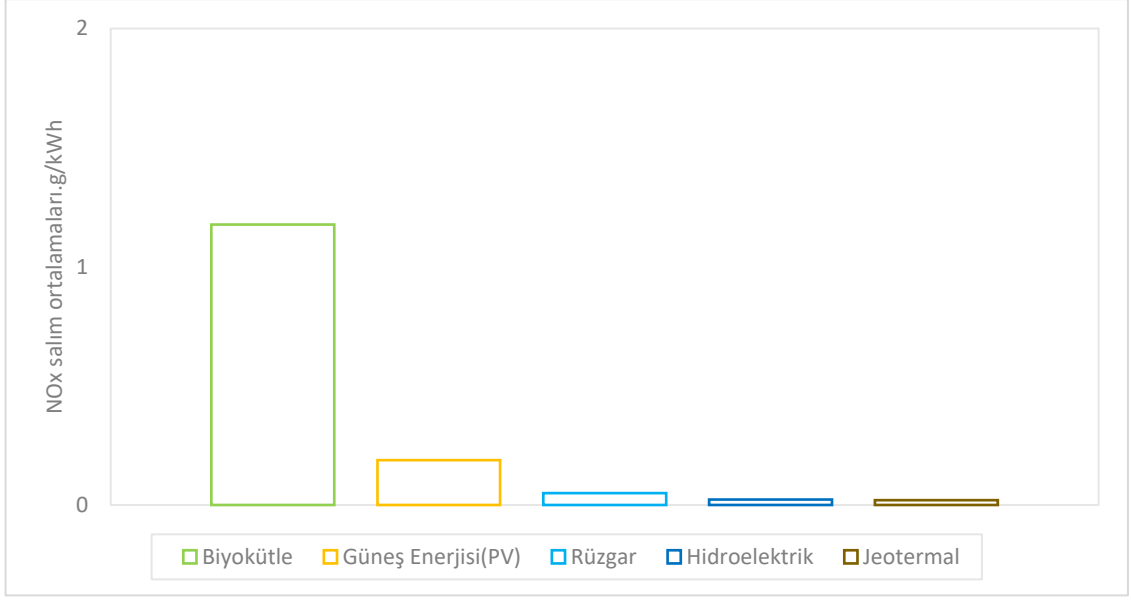
### 5.5.1.3. NO<sub>x</sub> Salımı

Azot monoksit ve azot dioksit (NO ve NO<sub>2</sub>), biyokütle ve fosil yakıtların yüksek sıcaklıkta yanması sonucu atmosfere salınır. Yalnızca Küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine katkıda bulunan sera gazları oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda yerel hava kirliliğine ve asit çökmesine de neden olur. İnsan sağlığı için zararlı olmakla birlikte, tarımsal ürünleri etkiler, amonyak, nem, uçucu organik bileşikler, organik kimyasallar ve hatta ozon ile reaksiyona girerek toksik ürünler oluştururken biyolojik mutasyona neden olurlar. (Wang ve ark., 2009; Liu 2014; Shaaban, 2017).



Şekil 5.7. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre NO<sub>x</sub> salım aralıkları.

İncelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının yaşam döngüsü analizlerinden yararlanılarak elde edilen literatür verilerinden yola çıkarak (Evans ve ark.,2009,Afgan ve Carvalho, 2002; Şahin, 2016; Desai ve Bandyopadhyay, 2017; Shaaban, 2017), her bir yenilenebilir enerji kaynağına göre g/kWh cinsinden NO<sub>x</sub> salımları Şekil 5.7’te verilmiştir. Bu verilere göre güneş enerjisi için NO<sub>x</sub> salım değerlerinin 0,08-0,4 g/kWh, rüzgar enerjisi için 0,02-0,11 g/kWh, biyokütle enerjisi için 0,08-1,76 hidroelektrik enerjisi için 0,04-0,06 g/kWh aralığında değiştiği görülmüştür.



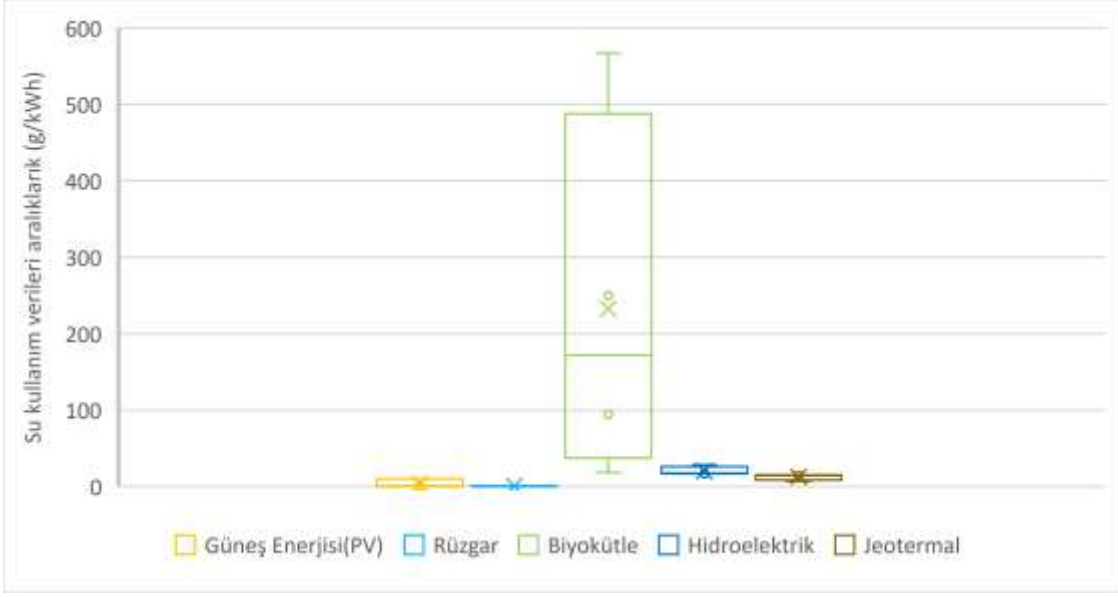
Şekil 5.8. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre NO<sub>x</sub> salımları.

Şekil.5.8.'de görüldüğü üzere seçilen yenilenebilir enerji kaynakları arasında, biyokütle enerjisinden elektrik üretimi sırasında en fazla NO<sub>x</sub> salımı gerçekleşmektedir. Biyokütle enerjisini takiben güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve jeotermal enerjisi şeklinde bir sıralama oluşmuştur.

#### 5.5.1.4. Su Kullanımı

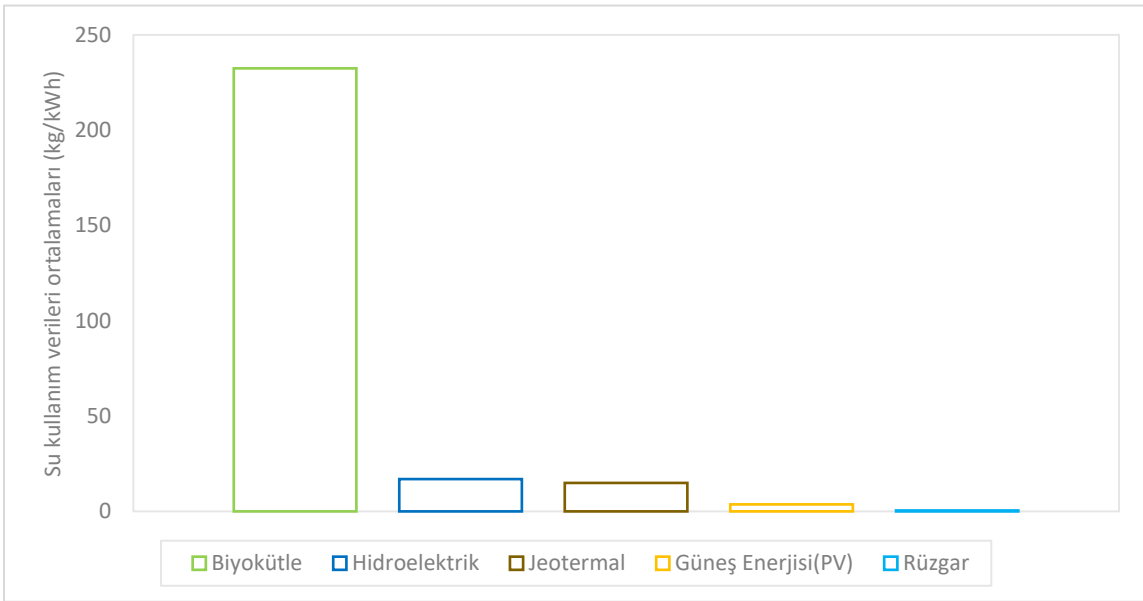
Yenilenebilir enerji santrallerinin yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarında, özellikle imalat ve kurulum sırasında ve sistemin işletimi sırasında su kayıpları meydana gelebilir. Su kullanımı ile ilgili veriler değerlendirilirken bütüncül bir bakış açısıyla yaklaşmış ve su tüketilen tüm proseslerin değerlendirildiği veriler kullanılmıştır (Spang, 2014; Davies ve ark., 2013; Carillo ve ark., 2009).





Şekil 5.9. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre su kullanım verileri aralıkları.

İncelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının su kullanımı verileri kg/kWh cinsinden şekil 5.9’da verilmiştir. Bu verilere göre güneş enerjisi için su kullanımı değerlerinin 0,15-1 kg/kWh, rüzgar enerjisi için 0,03-1 kg/kWh, biyokütle enerjisi için 18,5-250 hidroelektrik enerjisi için 17-28,7 kg/kWh jeotermal enerji için ise 6,82-15 kg/kWh aralığında değiştiği görülmüştür.



Şekil 5.10. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre su kullanım verileri.

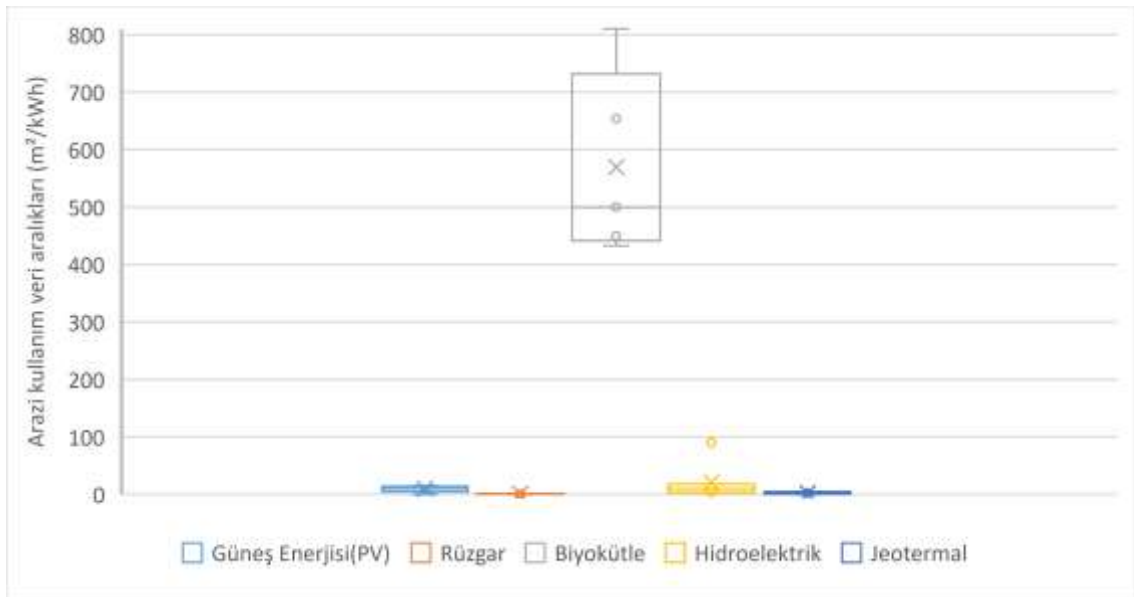
Enerji oluşum döngüsü açısından tüm prosesler dikkate alındığında, biyokütle enerjisinin en çok su tüketiminin gerçekleştiği proses olması çok beklenmeyen bir durum değildir. Özellikle biyokütle eldesi sırasında sulama işlemleri en fazla su kullanımının gerçekleştiği adım olarak görülebilir (Şekil 5.10.)

Biyokütle enerjisinin ardından su tüketimi açısından en yoğun kullanımın hidroelektrik enerji üretimi esnasında gerçekleştiği, hidroelektrik enerjisini de sırasıyla jeotermal enerji, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin takip ettiği görülmektedir.

### 5.5.1.5. Arazi Kullanımı

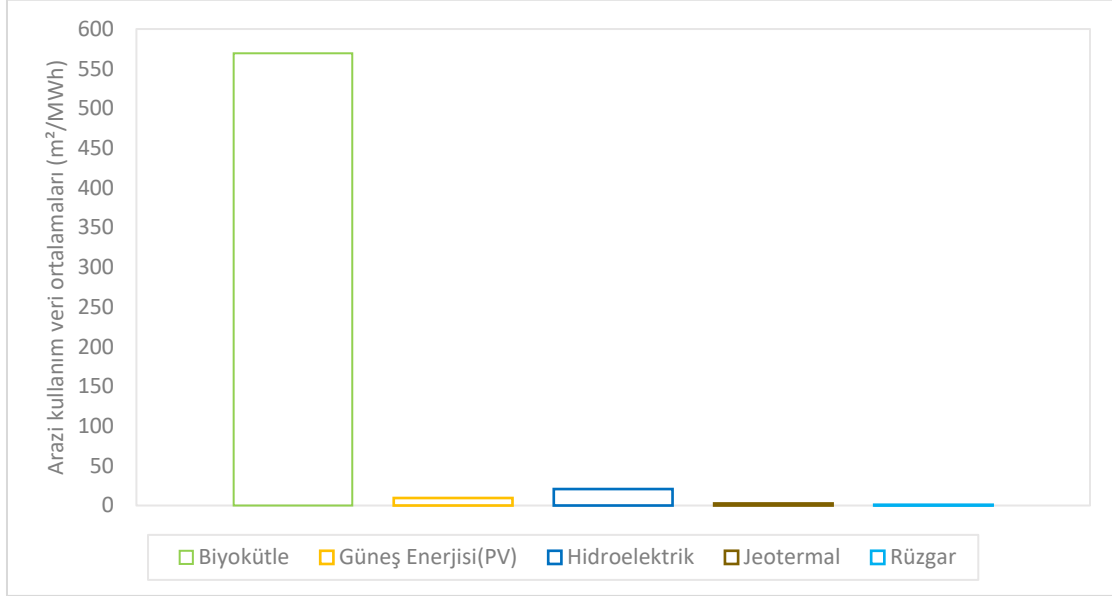
Enerji ve toprak, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle kökten ilişkilidir ve bu konudaki başarılı uygulamalar, sürdürülebilir enerji ve sürdürülebilir arazi kullanımını teşvik edebilmektedir.

Güncel çalışmalar, dünya genelindeki potansiyelinin yarısı en üst biyolojik çeşitlilik alanlarında yoğunlaşması sebebiyle biyokütle enerjisi üretiminin, biyolojik çeşitliliğe ciddi şekilde zarar verebileceğini göstermektedir (Santangeli ve ark., 2016). Rüzgar ve güneşten kaynaklanan enerji üretim potansiyelinin üçte ikisinin en üst biyolojik çeşitlilik alanlarının dışında kalması nedeniyle potansiyel biyolojik çeşitlilik etkileri genellikle biyokütle enerjisinden daha azdır (Santangeli ve ark., 2016; Fristche ve ark., 2017).



Şekil 5.11. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre arazi kullanım verileri aralıkları.

İncelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının (Harjanne ve Korhonen, 2019; Fristche ve ark., 2017) arazi kullanımı verileri  $m^2/MWh$  cinsinden şekil 5.11’de verilmiştir. Bu verilere göre güneş enerjisi için arazi kullanım değerlerinin  $0,3-15 m^2/MWh$ , rüzgar enerjisi için  $0,3-1,3 m^2/MWh$ , biyokütle enerjisi için  $13-810$ , hidroelektrik enerjisi için  $17-28,7 m^2/MWh$ , jeotermal enerji için ise  $0,3-5,1 m^2/MWh$  aralığında değiştiği görülmüştür.



Şekil 5.12. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre arazi kullanım verileri.

Enerji üretim proseslerinin döngüsünü göz önünde bulundurduğumuzda biyokütle enerjisinin arazi ihtiyacının ön planda olması beklenebilir bir sonuç olarak göze çarpmaktadır ve seçilen diğer enerji kaynaklarına oranla oldukça fazla bir gereksinimi olduğu görülmektedir ( Şekil 5.12.). Biyokütle eldesi için gerekli arazi kaynakları ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda, arazi kullanımı açısından, diğer enerji kaynaklarıyla arasındaki farkın açıklanmasındaki en önemli etken olarak gösterilebilir. Bununla birlikte enerji santrali bazında değerlendirilme yapılması halinde biyokütle enerjisinden elektrik üretimi amaçlı arazi kullanımı, çok büyük arazi kullanımlarına ihtiyaç duymamaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında ve bütüncül bakış açısının benimsendiği benzer yaklaşımlar için santralin kapladığı alan üzerinden kurgu yapılmasının çok sağlıklı sonuçlar vermeyeceği düşünülmektedir.

Seçilen diğer enerji teknolojileri arasında biyokütle enerjisinde olduğu gibi belirgin bir arazi kullanımı farkı bulunmamaktadır. Santral bileşenlerinin üretimini paralel kapasitelerde değerlendirildiğinde, güneş enerji santrallerinin panel yerleşimleri ve hidroelektrik santral yapılarının konumlandırılması nispeten yüksek arazi ihtiyacını doğurmaktadır. Jeotermal enerji santralleri genel olarak santral binası ve iletim yapılarından oluşmaktadır. İletim yapılarının konumlandırıldığı arazilerin genelde uç ve köşe kısımlarının kullanılması tercih edilmekte olup, kiralanın ya da satın alınan arazilerin, daha önceki kullanım vasıflarının değiştirilmemesi sosyal etkiler açısından tercih edilen bir arazi kullanım alternatifidir.

Rüzgar enerji santralleri açısından değerlendirilme yapıldığında rüzgar direkleri ve betonarme yapıları dışında kalan kısımlar arazi yapısını değiştirmemektedir. Santral içi enerji iletimi alt yapıları yeraltından ilerlemektedir. Dolayısıyla toplam işgal edilen alan seçilen enerji kaynakları açısından en düşük düzeyde kalmaktadır.

### **5.5.2. Sosyal İndikatörler**

Enerji ve toplum arasında enerjinin toplumu etkilemesi ya da toplumun enerjiyi etkilemesi şeklinde oluşmuş, karşılıklı bir risk-fayda ilişkisi vardır. Bu bağlamda, genel olarak, yerel halk tarafından farklı enerji sistemlerine ilişkin görüş, algı, karar verme ve gerçekleştirme ile ilgili konular tartışılmaktadır.

Genel olarak kamu sektörü, enerjiye erişimi uygun maliyetlerle sağlamak ve özellikle de düşük gelirlili insanlarla eşitlik ve adaleti sunabilmekle ilgilenmektedir. Sosyal indikatörlerin değerlendirilmesi, karar alma sürecinde toplum üyelerinin görüşlerinin alınarak memnun edilmeleri ve karşılaşılabilecekleri risklerden onları koruyarak, sürdürülebilir kalkınmayı gerçekleştirmede önemli bir basamaktır.

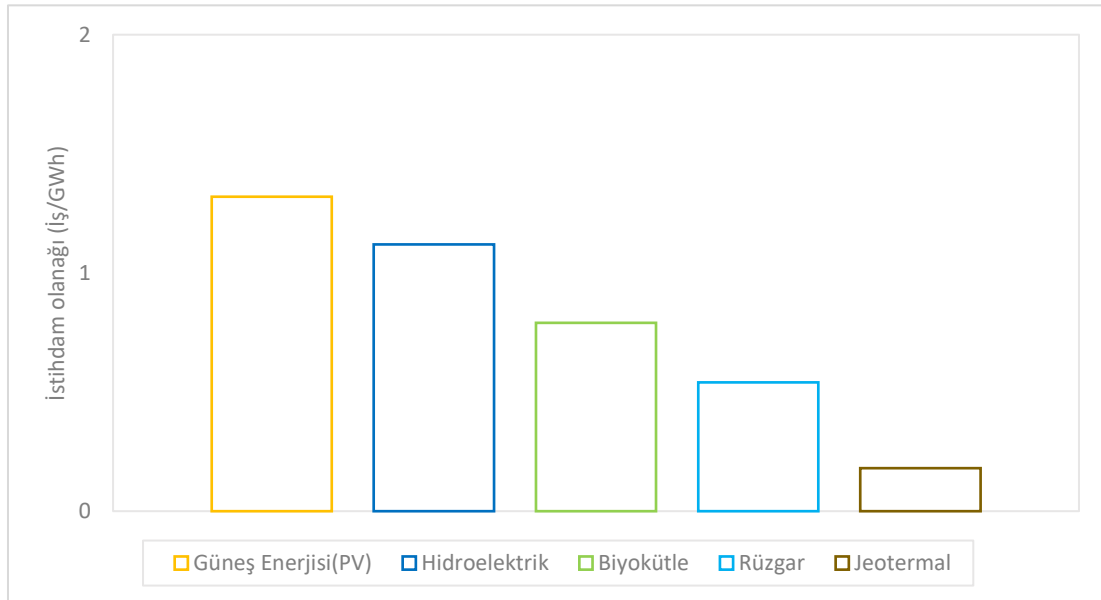
Çalışma kapsamında her bir yenilenebilir enerji kaynağı açısından birbirleriyle karşılaştırılabilen ve tutarlılığı olan indikatörler seçilmiştir. Seçilen indikatörler;

- İş Olanakları
- Sosyal Kabul Edilebilirlik, olarak sıralanabilir.

### 5.5.2.1. İş Olanakları

İş olanakları hususu, sürdürülebilir kalkınmanın hem ekonomik hem de sosyal boyutunu temsil eder. Enerji kaynaklarından faydalanırken oluşan iş fırsatları, yerel toplumun yaşam kalitesinin iyileşmesine katkı sağlamakta (Liu 2014) ve işsizliği azaltmaktadır. Santrallerin yaşam döngüsü boyunca birçok insan ya imalat, montaj, işletme ve bakım gibi doğrudan işlerde ya da ekipman, inşaat ve montaj malzemeleri tedarikçileri gibi dolaylı işlerde çalışmaktadır.

İncelenen yenilenebilir enerji kaynağının yaşam döngüsü analizlerine göre yapılandırılmış Türkiye kapsamındaki literatür verilerinin İş/GWh cinsinden değerlendirilmesiyle (Arlı Yılmaz,2014) oluşturulmuş grafik Şekil 5.13.'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerine istihdam olanağı verileri.

Mevcut istihdam verileri ve potansiyeli üzerine oluşturulmuş senaryo analizlerinden yola çıkılarak elde edilen veriler kapsamında özellikle ülke genelindeki teknolojik kapasite ve yerli üretim desteklerinin artışına paralel olarak istihdam artışlarının da dahil olduğu bir yaklaşıma ait verilerin üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda genel bir değerlendirme yapıldığında, güneş enerjisi kapsamında, yerli hücre üretimi ile ilgili yatırımların da hayata geçirilmesine ilişkin çalışmalarla paralellik gösterecek şekilde istihdam imkanlarının fazla olduğu göze çarpmaktadır. Genel mantık çerçevesinde, en fazla emek-yoğun sektör olarak karşımıza çıkması beklenen sektör hidroelektrik enerji üretim

sektörüdür, ancak projeksiyonu yapılan enerji üretimi ülkemiz genelinde akarsu HES'lere göre nispeten daha az emek yoğun barajlı HES'lerde daha yüksek olduğundan dolayı GWh başına Güneş enerjisine oranla daha düşük bir istihdam değeri yaratacağı öngörülmüştür.

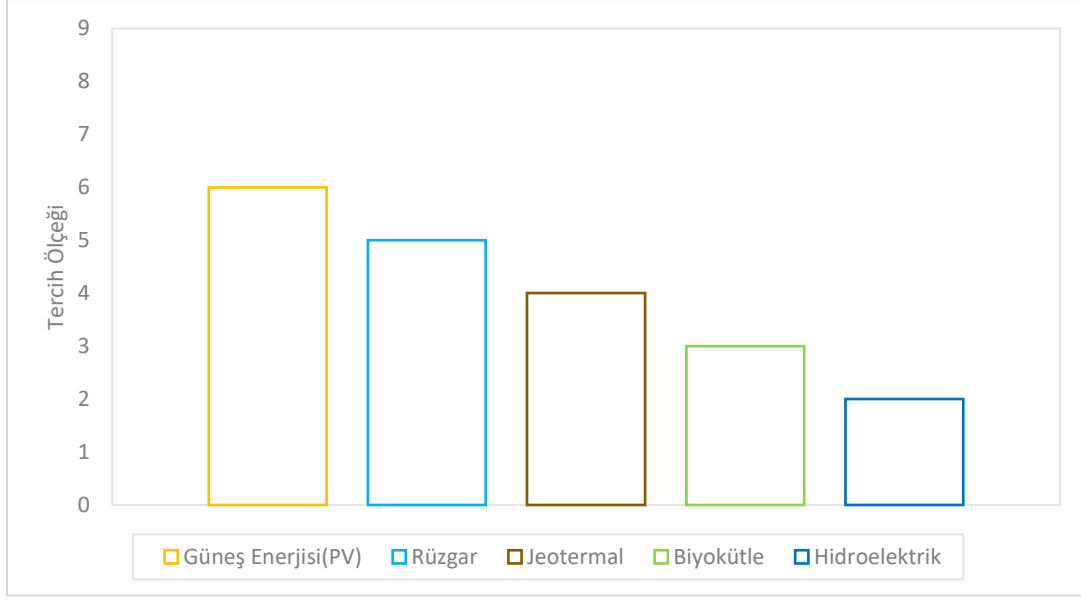
Biyokütle enerjisi üretiminde de rüzgar ve jeotermal enerji üretim proseslerindeki zincirlere ek olarak tarımsal ürünlerin yetiştirilmesi ve hasılatı kapsamında, daha emek-yoğun bir özelliğe sahiptir. Bu açıdan değerlendirildiğinde oluşan sıralama açısından mantıklı sonuçların ortaya çıktığı da teyit edilmiş olmaktadır.

#### **5.5.2.2. Sosyal Kabul Edilebilirlik**

Bu indikatör, tüm paydaşların görüş ve çıkarlarının karar alma sürecine katkısını sağlar ve saygı duyulduğu algısını destekler. Enerji projesi ile ilgili, görsellik, gürültü, koku gibi bölgesel etkiler ile ilgili bir geri bildirim sağlar.

Projenin etki alanında yaşayan halk tarafından reddedilmesi, çatışmalara yol açabileceği, uygulamayı geciktirebileceği ve daha kötü bir tahminle, projeye tamamen zarar verebileceği için bu konu, çok önemli bir sosyal göstergedir. Bu nedenle, paydaş analizi aktörlerin ilgi alanlarını, teşviklerini, stratejilerini ve etkileşimlerini incelemek için temel bir gereksinimdir (Del Rio ve Burguillo 2009).

Bir teknolojinin sosyal olarak kabulü büyük ölçüde faydalara, maliyetlere ve risklerin yanı sıra kişisel zevk ve tercihlere de bağlıdır (Burton ve Hubacek, 2007). Bu gösterge, yerel topluluk ile yapılan anketler ve kamuya açık oturumlar yoluyla niteliksel olarak değerlendirilebilir (Wang ve ark. 2009; Shaaban 2017). Bu kapsamda, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının projelendirilmesi aşamasında, konuya çok boyutlu şekilde dahil edilmiş Uzman grubundan ikili görüşme yöntemi ile elde edilen geri bildirimler kapsamında seçenekler arasında tercih ölçeğine göre puanlandırılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Verileri içeren grafik Şekil 5.14.'te sunulmuştur.



Şekil 5.14. Yenilenebilir enerji kaynağı türlerinin sosyal kabul edilebilirlik bazında değerlendirme sonuçları.

Tercih ölçeğinin belirlenmesinde oldukça anlaşılabilir olması açısından temel bir yaklaşım açısı ile proje değerlendirme konusunda uzman olan kişilerin görüşleri üzerinden puanlama yapılmıştır. 20 adet uzman örnek grubuna yaşam ortamlarının yakınında sürdürülebilirlik kapsamı altında çevresel sosyal ve ekonomik avantaj ve dezavantajlarına yönelik olmak üzere, en çok tercih edecekleri alternatifleri sıralamaları istenmiş olup ilgili sorular Ek-2’de verilmiştir. Sıralamadaki yerleri ve bulunma sıklıklarına göre AHP prosesine kolayca entegre edilebilmesi amacıyla 1-9 arasında 9 en yüksek puan olmak üzere tercih skalasına oturtulmuş ve güneş enerjisi en tercih edilebilir alternatif olarak belirlenmiştir. Güneş enerjisinin tercih edilme sebepleri arasında uzmanların ifadelerine dayanarak, özellikle yaşam alanlarında görülebilir etkilerinin az olması öne çıkmaktadır.

Güneş enerjisini takiben rüzgar enerjisi en tercih edilebilir alternatif olarak görülmektedir. Gelişmiş rüzgar türbinleri her ne kadar oldukça sessiz çalışıyor olsa da genellikle yöre halkından uğultu benzeri şikayetler alınması ve rekreasyonel etkilerinin temel olarak dezavantaj olarak görüldüğü katılımcılar tarafından ifade edilmiştir.

Tercih sıralamasında üçüncü sırada yer alan jeotermal enerji santralleri özellikle ülkemizin jeotermal sahalarının özelliklerinden kaynaklı CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S salımı miktarları,

ilk projelerde tecrübesizlik ve bilinçsizlikten kaynaklı direkt deşarjların çevresel ve sosyal etkilerinden dolayı dezavantajlı olarak görüldükleri ifade edilmiştir.

### **5.5.3. Ekonomik İndikatörler**

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik kavramındaki ana bileşenlerden olan ekonomi ile ilgisi oldukça yüksektir. Kaynak kullanımının devamlılığının sağlanabilmesi, çevresel ve sosyal dengenin korunabilmesi için yenilenebilir enerjinin önemi günümüz ekonomik kavramları içerisinde kabul görmektedir. Bu kapsamda, kaynak kullanımının sürekliliği aynı zamanda enerji bağımlı bir sektör olan üretim sektörünü dolayısıyla yerel ve küresel ekonomiyi doğrudan etkilemektedir.

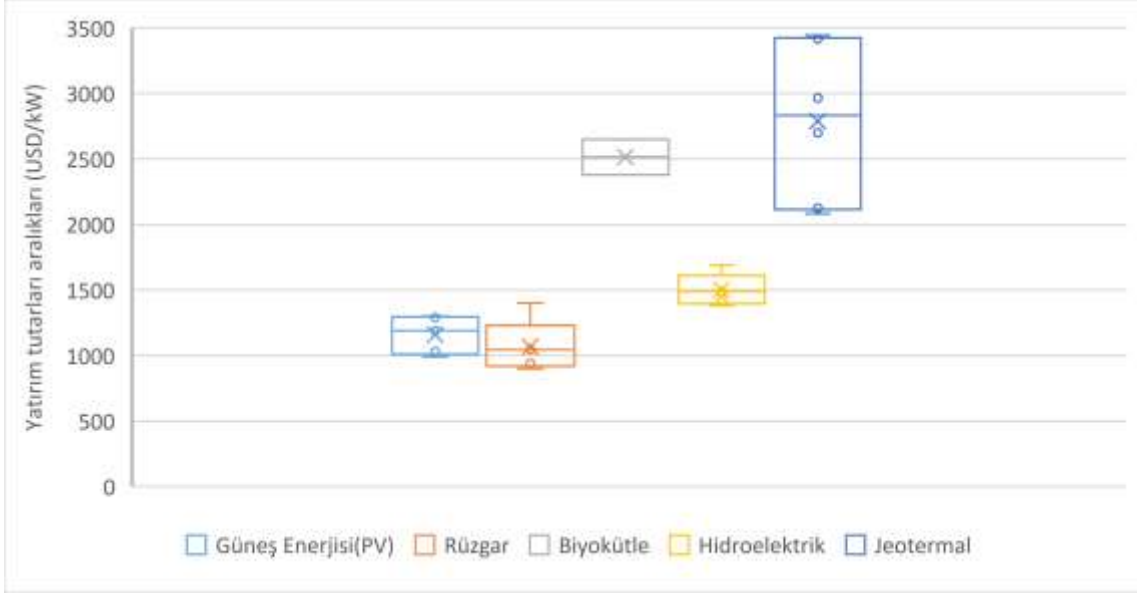
Sürdürülebilirlik analizleri gerçekleştirilirken ekonomik boyutta incelenen parametreler, seçilen indikatörlerin taşınması gereken özellikler kapsamında, yatırım tutarı, birim enerji maliyeti, işletme ve bakım masrafları olarak belirlenmiştir.

#### **5.5.3.1. Yatırım Tutarı**

Yatırım tutarı, bir proje tasarlanırken değerlendirilen en önemli adımlardan birisidir, projenin gerek teknik, gerek ekonomik, gerek mali boyutlarını etkileyen bir bileşendir. Yatırım tutarının alt kırılımları arasında, Etüd-fizibilite, teknik yardım ve lisans giderleri, teknik ekipman, inşaat maliyetleri gibi kalemler sayılabilir. Bu unsurlara ait değerler, projeden projeye, ülkeden ülkeye değişmektedir.

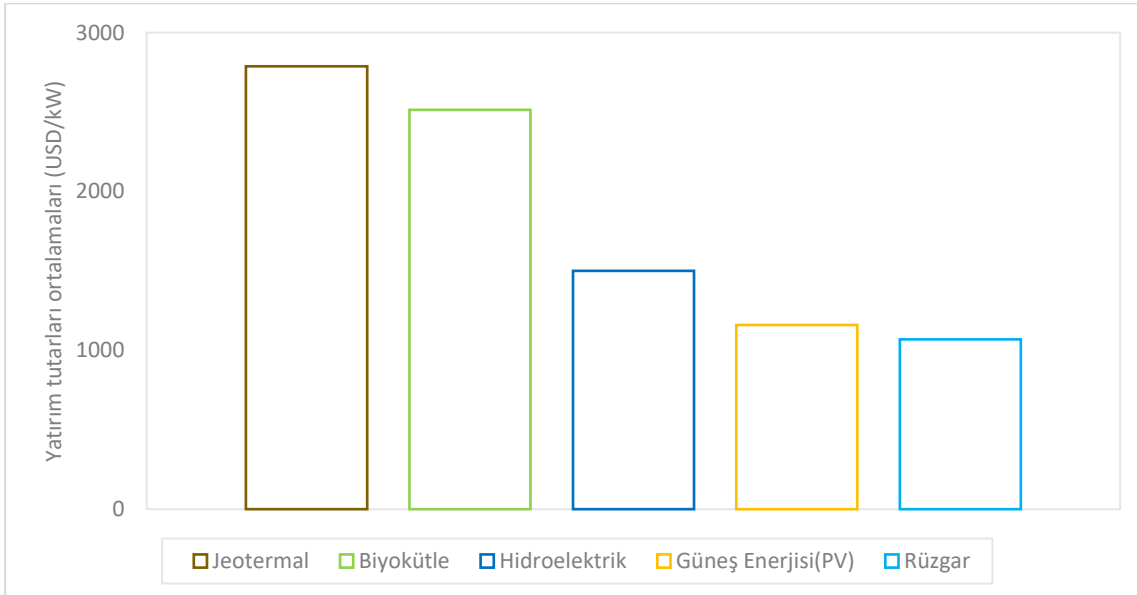
Her bir unsur bir ya da çoğunlukla birden çok fonksiyon üzerinde ciddi fark yaratabilmektedir, dolayısıyla çalışma kapsamında literatür verileri ile karşılaştırmalar yapılmış olup, bölgesel veriler tercih edilmiştir. Bu bağlamda, ülkemiz genelinde çalışan ve son beş yılda projesi oluşturulmuş, her bir kaynak özelinde beş adet olmak üzere, seçilen yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden değerlendirme yapılmıştır.





Şekil 5.15. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yatırım tutarları aralıkları.

Elde edilen veriler incelenerek yatırım tutarları, USD/kW cinsinden değerlendirilerek Şekil 5.15'te verilen grafik oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, jeotermal enerji yatırım tutarı açısından seçilen yenilenebilir enerji teknolojileri arasında en yüksek maliyetlere sahiptir (Şekil 5.16.). Kuyu açma maliyetleri bu oranı artıran en önemli unsurlardandır.



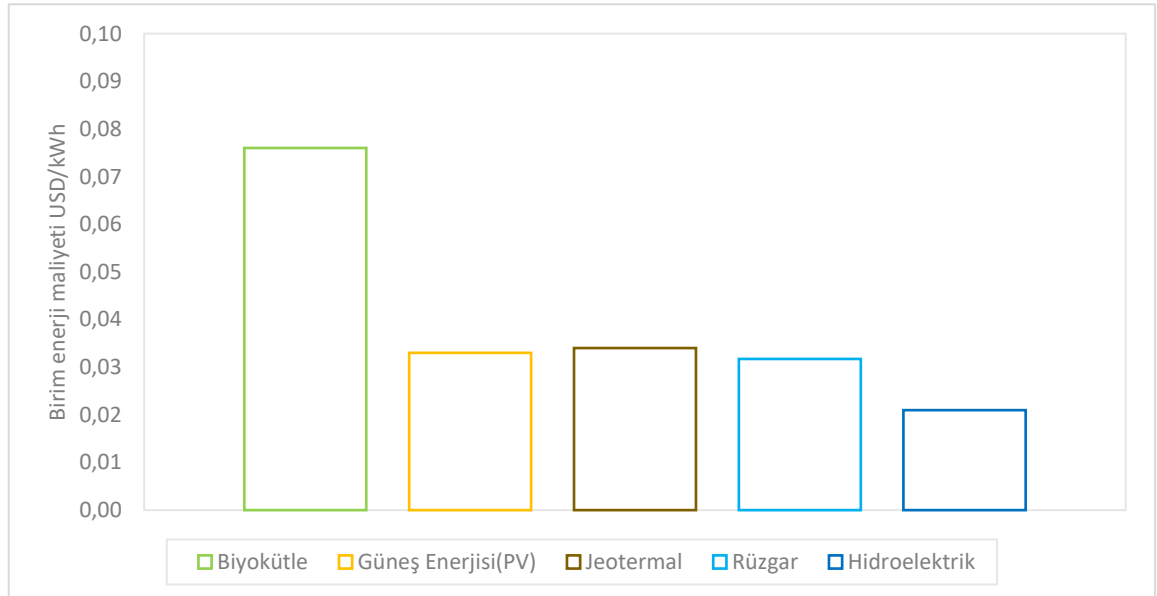
Şekil 5.16. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yatırım tutarları.

Jeotermal enerjiden sonra sırasıyla biyokütle enerjisi, hidroelektrik enerjisi, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi gelmektedir. Tüm teknolojiler karşılaştırıldığında yenilenebilir enerji kaynakları toplam yatırım maliyetleri 1.069 USD/kW-2.789 USD/kW arasında değişmektedir.

### 5.5.3.2. Birim Enerji Maliyeti

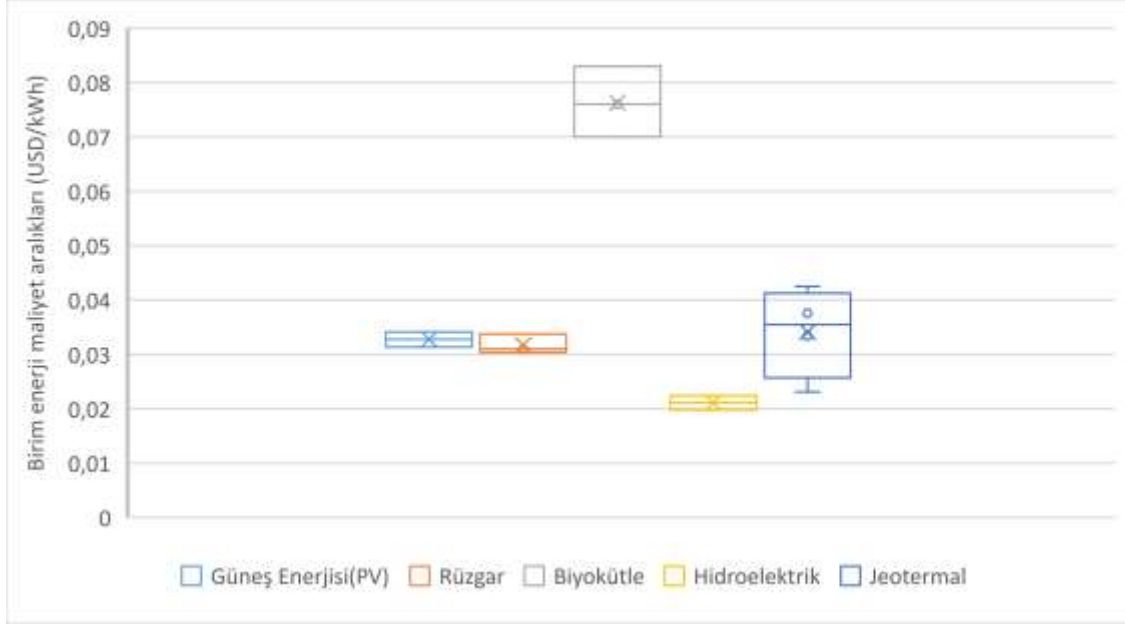
Petrol fiyatlarındaki sürekli artış ve yenilenebilir enerji yatırımlarının azalan maliyetleri yenilenebilir kaynakları elektrik üretiminde tercih edilebilir seçenek haline getirmektedir. Ulaşımı sorunlu mahrumiyet bölgelerine elektriğin götürülebilmesinde PV, biyokütle ve rüzgar santralleri modüler çözümler haline gelmiştir: Bu gelişme ekonomik ve sosyal kalkınma hedeflerine ulaşmayı da mümkün kılmaktadır. Nakliye masraflarının fosil yakıtlı enerji üretim maliyetinin %10'undan %100 üne kadar ulaşabildiği, altyapı bulunmayan yoksul ve uzak bölgeler için yenilenebilir kaynaklar fosil yakıtlardan çok daha ucuz olabilmektedir (TKB, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin ekonomik boyutları kapsamında birim enerji maliyeti de önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı miktar enerji üretimi için ortaya çıkan birim maliyet tercih edilebilirliği etkileyen bir kriterdir.



Şekil 5.17. Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının birim enerji maliyeti.

Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi gerçekleştirilirken ortaya çıkan birim maliyet USD/kWh cinsinden Şekil 5.17.'de verilmiştir. Literatür verilerinden de desteklendiği biçimde (Kowalski ve ark., 2009; Evans ve ark.,2017; Desai ve Bandyopadhyay; Shaaban, 2017) incelenen projeler kapsamında, biyokütle kaynaklı enerji üretimi birim enerji üretim fiyatı açısından en maliyetli teknoloji olarak belirlenmiştir.



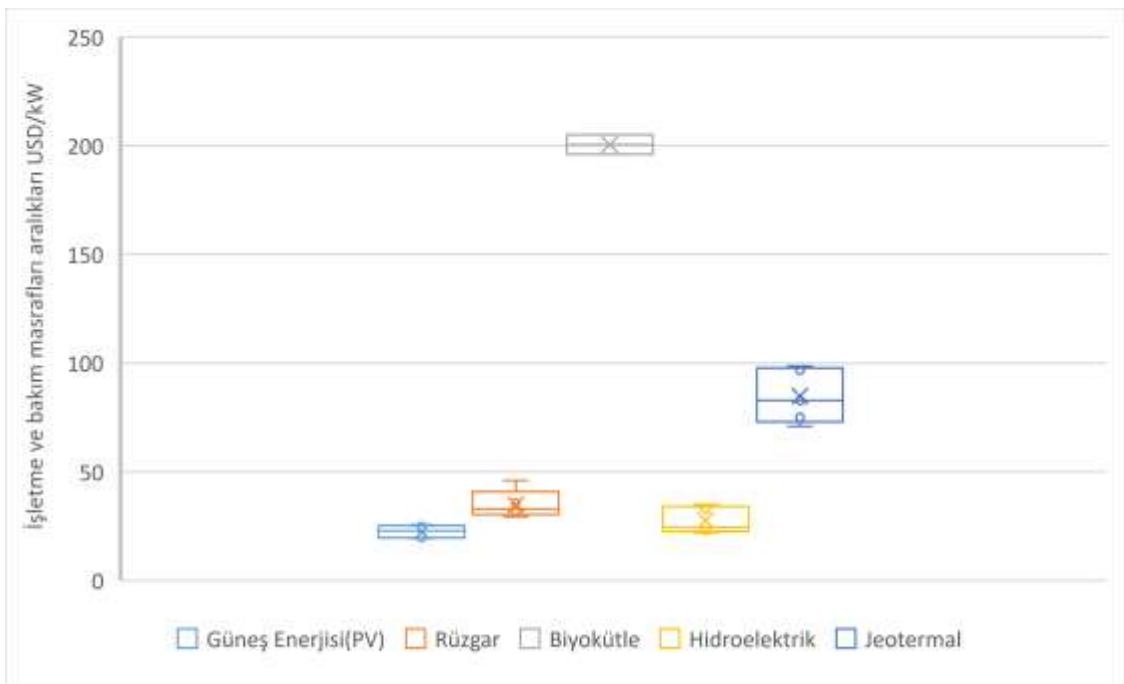
Şekil 5.18. Yenilenebilir enerji kaynaklarının birim enerji maliyeti aralıkları.

Biyokütle dışındaki yenilenebilir enerji kaynakları, 0,210-0,330 USD/kWh arasında birim maliyet fiyatlarıyla oldukça yakın bir aralıkta bulunmaktadır (Şekil 5.18.). Biyokütle santralleri açısından, hammadde ve taşıma giderlerinin, toplam elektrik üretim maliyeti içerisinde önemli bir payı vardır (%40-50) (TKB, 2015). Bu kapsamda ek bir işletme gideri olarak ortaya çıkan hammadde ve taşıma gideri aradaki maliyet farkının etkileyen unsurlardan biri olarak değerlendirilebilir.

### 5.5.3.3. İşletme ve Bakım Giderleri

Yatırımın ekonomik yönden değerlendirilmesi açısından, işletme ve bakım giderleri önemli bir bileşendir. Bu kalemin alt bileşenleri olarak, sistem bedelleri, işçilik personel giderleri, bakım-onarım giderleri varsa hammadde ve işletme malzemesi giderleri sayılabilir.

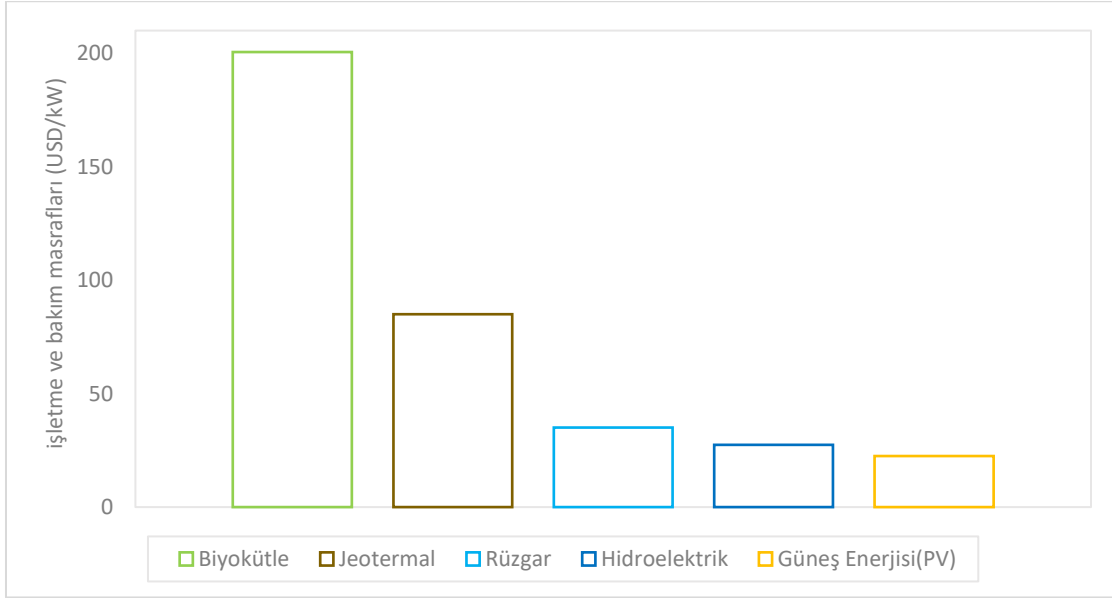
İşletme giderleri tesis tam kapasitede çalıştırılacağı varsayımına göre yıllık bazda hesaplanır. Üretim kapasitesindeki değişiklikler kapsamında gösterdikleri eğilimler kapsamında, “sabit”, “değişken” ve “yarı-değişken” olmak üzere üç grupta ifade edilir. Üretim hacminden bağımsız, kısa vadede sabit olan giderlere “sabit” (kira, amortisman ve irtifak bedelleri vb.), üretim kapasitesiyle aynı doğrultuda artan ya da azalan giderlere “değişken” (hammadeler, yardımcı maddeler işletme malzemesi vb.), değişme oranı üretim miktarından bağımsız şekilde artan ya da azalan giderlere “yarı-değişken” giderler (personel, bakım onarım vb.) olarak adlandırılmaktadır (TKB, 2009).



Şekil 5.19. Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının işletme ve bakım masrafları aralıkları.

İşletme ve bakım masrafları açısından seçilen yenilenebilir enerji kaynakları incelenen projeler kapsamında değerlendirilmiştir (ülkemiz genelinde çalışan ve son beş yılda projesi oluşturulmuş, her bir kaynak özelinde beş adet olmak üzere, seçilen yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden değerlendirme yapılmıştır). Bu verilere göre güneş enerjisi için işletme ve bakım masrafları değerlerinin 19,84-24,8 USD/kW, rüzgar enerjisi için 29,29-35,6 USD/kW, biyokütle enerjisi için 196-205 USD/kW, hidroelektrik enerjisi için 22-35 USD/kW, jeotermal enerji için ise 70,83-98,66 USD/kW aralığında değiştiği

görülmüştür (Şekil 5.19.). Biyokütle kaynaklı yenilenebilir enerji üretimi en maliyetli seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Jeotermal enerji üretimi ikinci sırada yer almaktadır. Takip eden sıralamayı, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve güneş enerjisi oluşturmaktadır (Şekil 5.20.).



Şekil 5.20. Seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının işletme ve bakım masrafları.

#### 5.5.4. Teknolojik İndikatörler

Teknolojik indikatörler, enerji sistemlerinin mühendislik ile ilgili boyutunu vurgulamaktadır.

Sürdürülebilirlik değerlendirmesini uygulamak için seçilen dört ana indikatörden en temel olanıdır, çünkü sistemin ekonomik boyutunu doğrudan etkileyeceği için teknik olarak mümkün olmayan bir enerji sistemi kurmak mantıklı değildir. Bu nedenle karar vericiler, sonunda bir ürün elde edebileceklerinden emin olmak için genellikle bu boyutu gündemlerinde ilk konu olarak belirlemiştir.

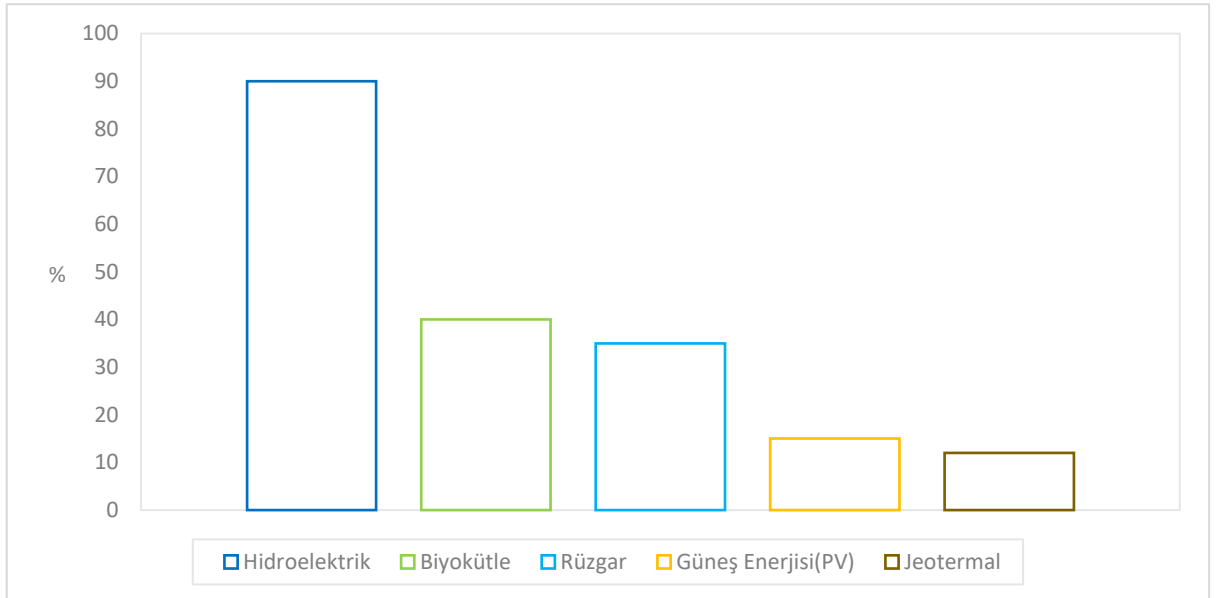
Tez çalışması kapsamında teknik olarak uygulanabilirlikle aranan üç ana etmen indikatör olarak belirlenmiş olup aşağıda verilmiştir.

- Elektrik Üretim Verimliliği
- Kapasite Faktörü

- Kaynak Potansiyeli

#### 5.2.4.1. Elektrik Üretim Verimliliği

Elektrik üretim verimliliği, girdi (birincil) enerjiden ne kadar çıkış (ikincil) enerji kazanıldığını açıklamaktadır. Bu bağlamda her bir yenilenebilir enerji kaynağına ait verimlilik değerleri ile ilgili literatür verilerinden (Afgan ve Carvalho,2002; Begic ve Afgan 2007; Chatzimouratidis ve Pilavachi, 2009; Demirtaş 2013; Şahin 2016; Desai ve Bandyopadhyay, 2017; Evans ve ark., 2017) elde edilen değerleri Şekil 5.21.'de verilmiştir.



Şekil 5.21. Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimlilik değerleri.

Elektrik üretim verimliliğinde seçilen yenilenebilir enerji kaynağına özgü proje bileşenlerinin enerji dönüşümündeki kapasitesi ifade edilmektedir. Bu bağlamda bakıldığında hidroelektrik santrallerinde bu kapasite yaklaşık %90 civarında olup oldukça yüksektir.

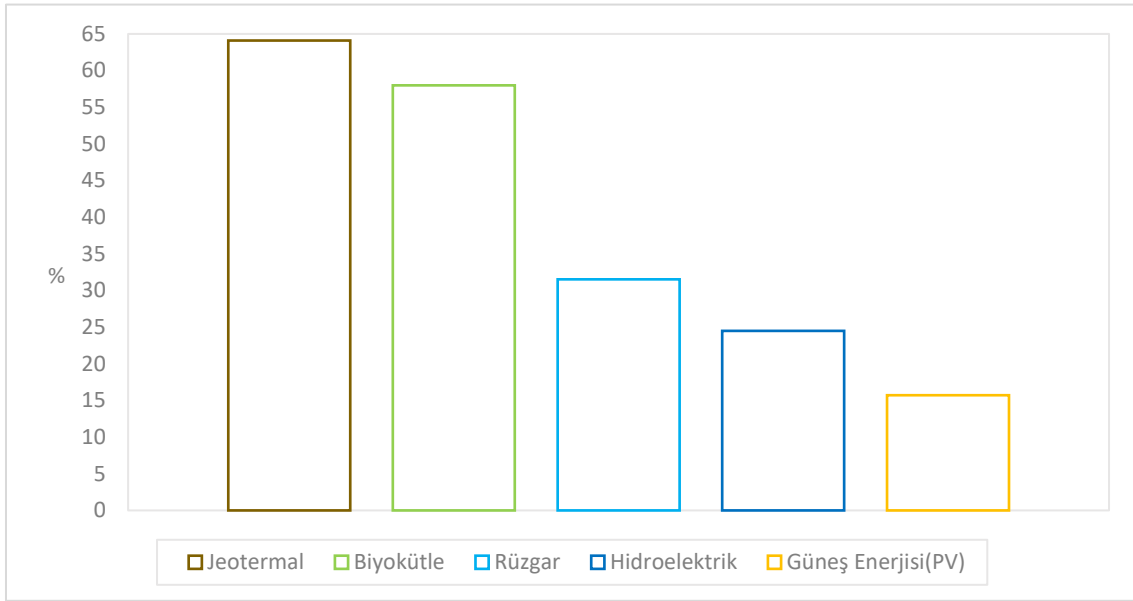
Biyokütle enerjisi seçilen yenilenebilir enerji kaynakları arasında ikinci sırada bulunmakla birlikte hidroelektrik santrallerin yaklaşık yarı veriminde dönüşüm gerçekleşmektedir. Rüzgar enerjisi de biyokütle enerjisine oldukça yakın bir oranda olup

güneş ve jeotermal enerji sırasıyla elektrik üretim verimliliği açısından yüksekten düşüğe doğru sıralanmaktadır.

#### 5.2.4.2. Kapasite faktörü

Kapasite faktörü, sistemin ürettiği enerjinin nominal güçte üretmesi gereken enerjiye oranı olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, sistemin belli bir zaman aralığında ürettiği toplam enerjinin tam kapasitede üretebileceği enerjiye bölümüdür. Bir anlamda, enerji kaynağının güvenilirliğini yansıtmaktadır. İklim koşullarından bağımsız teknolojilerde kapasite faktörünün daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çalışma kapsamında seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarına ait kapasite faktörleri, yüzdelik oranları üzerinden değerlendirilerek Şekil 5.22.'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 5.22. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite faktörü değerleri.

Kapasite faktörü her bir proje özelinde değişken olmakla birlikte, bulunan coğrafi ve iklimsel koşullara göre değişime oldukça açık olmasından dolayı genel literatür verilerinden ziyade yerel verilerle oluşturulmuştur (TEİAŞ, 2018). Bu kapsamda, Türkiye genelinde ortalama değerler ele alındığında Jeotermal enerji çalışma kapsamında seçilen alternatifler arasında en yüksek kapasite faktörü değerine sahiptir.

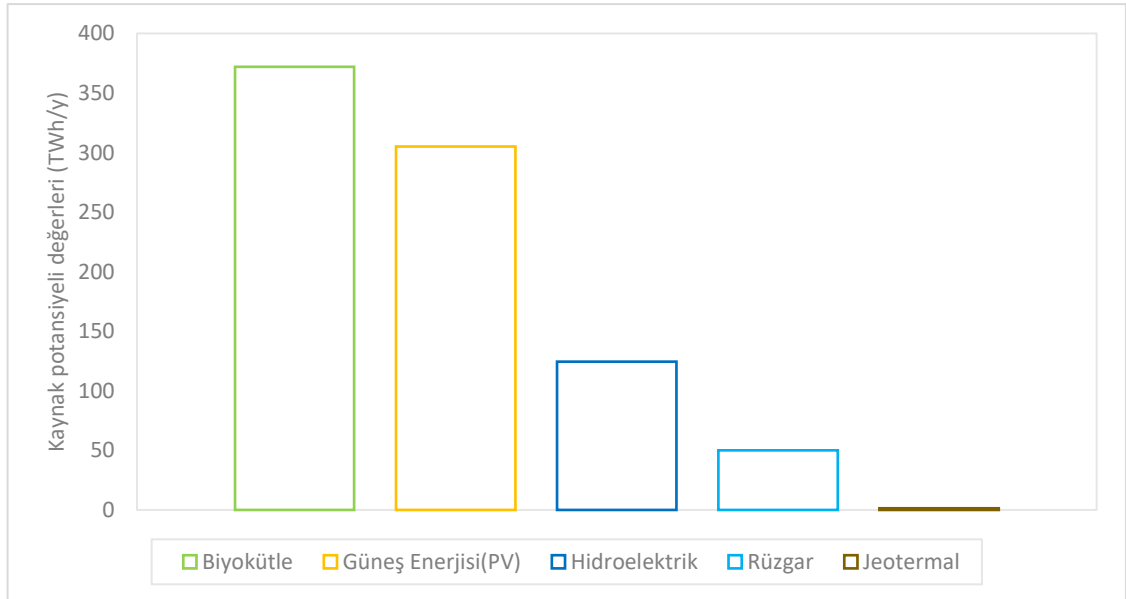
Biyokütle enerjisi jeotermal enerjiden sonra en yüksek kapasite faktörüne sahiptir. İlk iki sırada bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının, seçilen diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına iklimsel koşullarla direkt bağlantıları olmaması bu bağlamda dikkat çekici bir özellik olarak öne çıkmaktadır.

Biyokütle enerjisini takiben rüzgar enerjisi hidroelektrik enerjisi ve güneş enerjisi sırasıyla kapasite faktörüne göre yüksekten düşüğe doğru sıralanmaktadır. Sıralamada son basamakta yer alan güneş enerjisinin doğal olarak günün belli saatlerinde çalışabilmesi ve mevsimsel ışıma kapasitelerinden etkilenmesi, bu konuda önemli bir etki ve durumu oldukça açık ifade eden faktör olarak görülebilir.

#### 5.2.4.3. Kaynak Potansiyeli

Kaynak potansiyeli teorik olarak, belirli bir alan ya da ülke özelinde enerji sisteminden yıllık olarak ne kadar enerji sağlanabileceğini ifade etmek için kullanılır (La Rovere ve ark. 2010, Mainali ve Silveira 2015). Kaynak potansiyeli zaman başına enerji birimi cinsinden ölçülür.

Çalışma kapsamında seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye özelindeki kaynak potansiyelleri literatür verilerine (Şengül ve ark.,2015) dayalı olarak belirlenmiş ve Şekil 5.23'te TWh/y cinsinden verilmiştir.



Şekil 5.23. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kaynak potansiyeli değerleri.



Kaynak potansiyeli aından durum değerlendirilmesi yapıldığında oldukça karmaşık bir durum ortaya çıkmaktadır. Potansiyelin sabit ve kabul edilmiş bir ölçüm yöntemi bulunmamasıyla birlikte kendi içerisinde de doğal teknik ve ekonomik kapasite olmak üzere bölümlere ayrılmaktadır. Bu bağlamda teorik verilerin içerisinde uygulanabilirliği en yüksek kapasite verisi olan ekonomik kapasitenin kullanılması uygun görülmüştür.

Biyokütle enerjisini kaynak potansiyeli seçilen yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek değere sahiptir. Bu durum değerlendirilebilir tarımsal atıklar biyokütle enerjisine dönüştürülebilir doğal materyaller açısından değerlendirildiğinde ülkemiz açısından anlamlı bir sonucu ifade etmektedir. Aynı şekilde güneş enerjisinin kaynak potansiyeli de, ülkemizin güneşlenme kapasitesi açısından bakıldığında oldukça doğal bir sonucu işaret etmektedir.

Hidroelektrik santraller mevsimsel yağışlara oldukça bağımlı teknolojiler olmakla birlikte özellikle kar yağışlarının yoğunluğu önemli bir etkidir. Bununla birlikte, özellikle 2016 yılında elektrik üretim gerçekleştirmeleri, ülkemiz genelinde belirgin düzeyde düşüş göstermiştir. Bu olayın en önemli sebebinin, yağışsız geçen dönemin etkilerinden kaynaklandığı, değerlendirilen projeler kapsamında da görülmüştür.

Hidroelektrik enerjinin ardından sırasıyla, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji kaynak kullanımını potansiyeli açısından birbirlerini takip etmektedir.

### **5.6. Seçilen Enerji Kaynaklarının Avantaj ve Dezavantajlarının Değerlendirilmesi**

Çalışma kapsamında elde edilen yaşam döngüsü temelli veriler ışığında bir değerlendirme yapıldığında, Tablo 5.4 'te de özetlendiği üzere, jeotermal enerji birçok avantajı olmasına rağmen güncel ticari teknolojiler göz önünde bulundurulduğunda, çok ciddi dezavantajları olan bir enerji kaynağı olarak görülmektedir (Li ve ark., 2015). Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin en önemli dezavantajlarından biri, hava koşullarından etkilenme durumları ile bağlantılı olan kapasite faktörünün düşük olmasından mütevellit, stabilite sorunları ve elektrik şebekesi üzerinde yaratabileceği riskler olarak ifade edilebilir.

Tablo 5.4. İncelenen enerji kaynaklarının karşılaştırılması.

Enerji Kaynağı	Avantaj	Dezavantaj
<b>Güneş Enerjisi (PV)</b>	Kolay Kurulum Düşük Maliyet Az Sosyal Etki Yüksek Kaynak Potansiyeli Kısa İnşa Süresi	Düşük Kapasite Faktörü Düşük Verim Yüksek Co <sub>2</sub> Salımı İklim Koşullarına Bağımlılık
<b>Rüzgar Enerjisi</b>	Düşük Maliyet Düşük Su Kullanımı Kolay Kurulum Orta/Az Sosyal Etki Kısa İnşa Süresi	Düşük Kapasite Faktörü Nispeten Düşük Kaynak Potansiyeli İklim Koşullarına Bağımlılık
<b>Hidroelektrik Enerji</b>	Yüksek Verim Düşük Karbon Salımı Düşük Maliyet	Uzun İnşa Süresi Düşük Sosyal Kabul
<b>Biyokütle Enerjisi</b>	Yüksek Kaynak Potansiyeli Üst-Orta Elektrik Üretim Verimliliği İklim Koşullarından Bağımsızlık	Düşük Sosyal Kabul Yüksek Emisyon Yüksek Arazi İhtiyacı Yüksek Su İhtiyacı
<b>Jeotermal Enerji</b>	Yüksek Kapasite Faktörü İklim Koşullarından Bağımsızlık Düşük Arazi Kullanımı	Yüksek Maliyetler Yüksek Emisyon Uzun İnşa Süresi Düşük Kaynak Potansiyeli Kaynağa Ulaşım Zorluğu

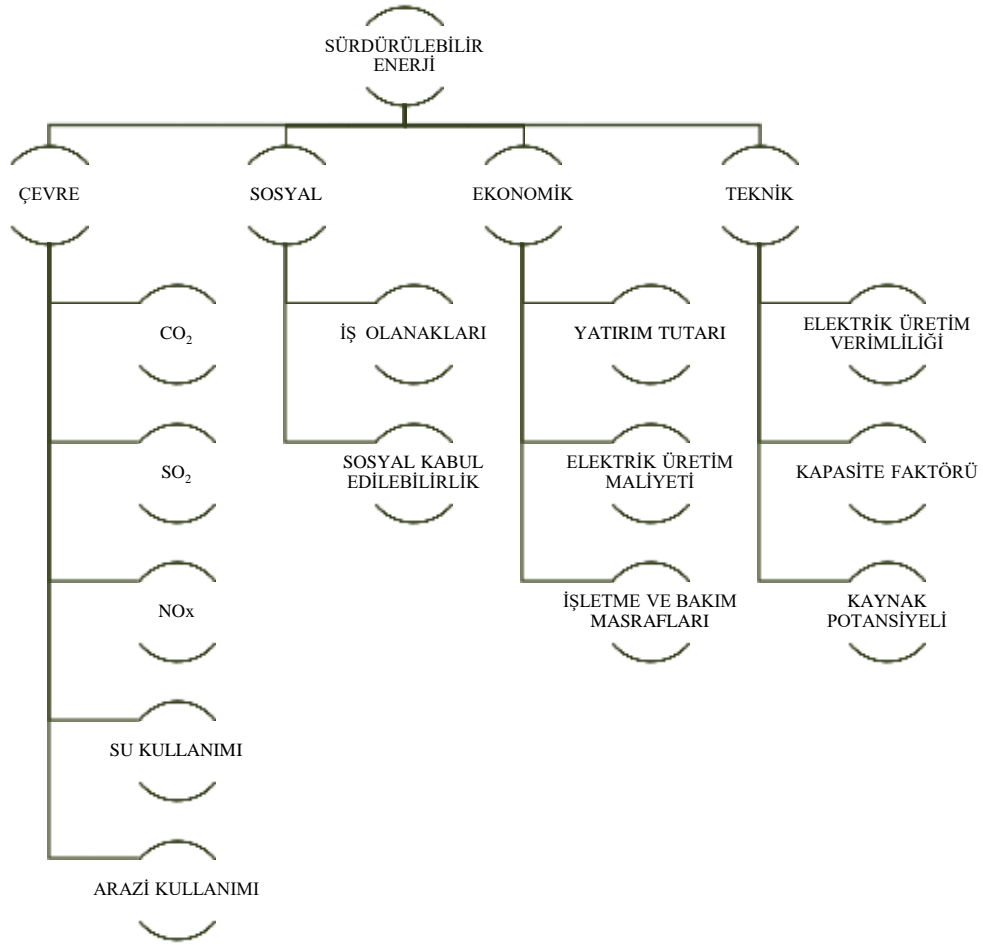
## 6. MODEL ÇALIŞMASI VE SONUÇLAR

Sürdürülebilirlik; ekonomik, sosyal ve çevresel bileşenleri bulunan çok boyutlu bir kavramdır. Sürdürülebilirlik analizi yapılırken, sistemin sürdürülebilirliğinin değerlendirilebilmesi için, birbiriyle benzerliği olmayan alanlarla ilgili sonuçların birleştirilmesi gerekmektedir. Çok Kriterli Karar Verme Analizi, çalışma alanı bakımından, sürdürülebilirlik değerlendirmeleri konusunda oldukça uygulanabilir bir yöntemdir.

Temel olarak indikatörlerin bir kısmı literatürden elde edilmiş veriler ve çalışan yenilenebilir enerji santrallerinin proje verilerine dayanmaktadır. Projeler üzerinde çalışan uzmanların değerlendirmeleri de kullanılmış olup, elde edilen indikatör değerleri sürdürülebilirlik değerlendirmesinin dört boyutlu yapısını oluşturmaktadır.

Uygulanılan AHP sürecine ilişkin oluşturulmuş hiyerarşik yapı Şekil 6.1.'de verilmiştir. Şekilde en üst seviyede yer alan konsept; “Sürdürülebilir Enerji” ÇKKV analizi sonucunda ulaşılması planlanan hedef olarak tanımlanabilir. Bir alt seviyede yer alan ana indikatörler, hedefe ulaşılmasını etkileyen faktörlerdir. En alt seviyedeki alt indikatörlerden de bu faktörleri etkileyen bileşenler olarak ifade edilebilir. Alt indikatörleri etkileyen bileşenler de olması karşılaşılabilecek bir durumdur.

Ulaşılması hedeflenen sürdürülebilir enerji kavramını etkileyen faktörler ve bu faktörleri etkileyen alt bileşenlerin oluşturduğu kademeli yapı, modeli etkileyen değişkenlerin matematiksel ifadeleriyle, en uygun alternatifin seçilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 6.1. Kurgulanan AHP hiyerarşik yapısı.

İndikatörlere ait değerler gerek literatür taramalarından elde edilen verilere gerek projelerin değerlendirilmesi ve uzman görüşlerinden elde edilen verilerden yararlanılarak elde edilmiştir. Her bir indikatörün sayısal değeri seçilen yenilenebilir enerji kaynağı bazında ifade edilerek Tablo 6.1.'de verilmiştir.



Tablo 6.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre indikatörlere ait değerler.

Kategori	İndikatör	Güneş Enerjisi(PV)	Rüzgar	Biyokütle	Hidroelektrik	Jeotermal	Birim	Sürdürülebilirlik Bağıntısı
<b>Çevresel</b>	CO <sub>2</sub>	100,80	46,53	65,07	25,25	143,00	g/kWh	Azalma
	SO <sub>2</sub>	0,24	0,04	0,66	0,01	2,23	g/kWh	Azalma
	NOx	0,19	0,05	1,17	0,02	0,02	g/kWh	Azalma
	Su Kullanımı	3,72	0,50	232,38	20,30	12,71	kg/kWh	Azalma
	Arazi Kullanımı	9,40	0,86	476,67	20,83	2,60	m <sup>2</sup> /MWh	Azalma
<b>Sosyal</b>	İş Olanakları	1,32	0,54	0,79	1,12	0,18	İş/GWh	Artış
	Sosyal Kabul Edilebilirlik	6,00	5,00	3,00	2,00	4,00	Tercih Ölçeği	Artış
<b>Ekonomik</b>	Yatırım Tutarı	1.159,80	1.068,60	2.514,00	1.500,20	2.788,67	USD/kW	Azalma
	Birim Enerji Maliyeti	0,03	0,03	0,08	0,02	0,03	USD/kWh	Azalma
	İşletme ve Bakım Masrafları	22,51	35,00	200,50	27,50	84,81	USD/kW	Azalma
<b>Teknolojik</b>	Elektrik Üretim Verimliliği	15,00	35,00	40,00	90,00	12,00	%	Artış
	Kapasite Faktörü	15,70	31,50	58,00	24,50	64,10	%	Artış
	Kaynak Potansiyeli	305,00	50,00	372,00	124,50	1,40	TWh/y	Artış

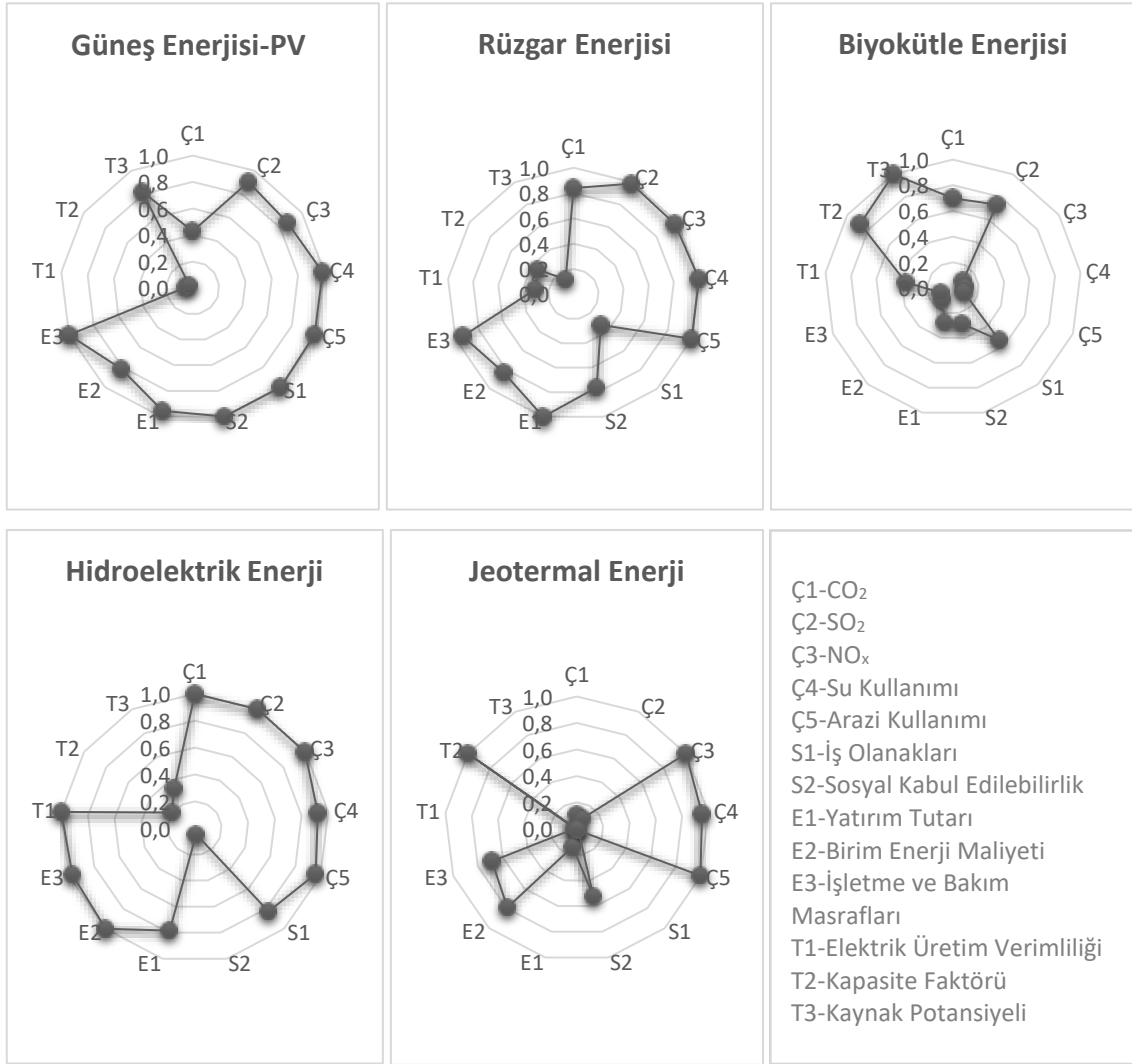
Yenilenebilir enerji kaynağı bazında, seçilen indikatörlere ait sayısal veriler daha sonra, özellikle ağırlıklı toplam metodunda sonuçların oluşturulabilmesi kapsamında, kendi aralarında karşılaştırılabilmesi açısından boyutsuz olarak ifade edilmesi amacıyla 0-1 arasında normalize edilmiştir. Bu proses aynı zamanda AHP değerlendirmesi yapılırken derecelendirme işlemlerinde sistem uygulayıcısına kolaylık da sağlamaktadır. Elde edilen değerlerin 1'e yakınsaması tercih edilen durum olarak ifade edilebilir. Normalize edilmiş değerler her bir yenilenebilir enerji alternatifi kapsamında Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. İndikatörlerin normalize edilmiş değerleri.

Kategori	İndikatör No	İndikatör	Güneş Enerjisi(PV)	Rüzgar	Biyokütle	Hidroelektrik	Jeotermal
Çevresel	1	CO <sub>2</sub>	0,4279	0,8388	0,6984	1,0000	0,1083
	2	SO <sub>2</sub>	0,9041	0,9869	0,7326	1,0000	0,0913
	3	NOx	0,8673	0,9762	0,0923	0,9974	1,0000
	4	Su Kullanımı	0,9874	1,0000	0,0911	0,9224	0,9522
	5	Arazi Kullanımı	0,9837	1,0000	0,0911	0,9619	0,9967
Sosyal	6	İş Olanakları	1,0000	0,3264	0,5423	0,8273	0,0155
	7	Sosyal Kabul Edilebilirlik	1,0000	0,7619	0,2857	0,0476	0,5238
Ekonomik	8	Yatırım Tutarı	0,9544	1,0000	0,2769	0,7841	0,1395
	9	Birim Enerji Maliyeti	0,8146	0,8309	0,1214	1,0000	0,7923
Teknik	10	İşletme ve Bakım Masrafları	1,0000	0,9369	0,1012	0,9748	0,6854
	11	Elektrik Üretim Verimliliği	0,0530	0,3056	0,3687	1,0000	0,0152
	12	Kapasite Faktörü	0,0314	0,3476	0,8779	0,2075	1,0000
	13	Kaynak Potansiyeli	0,8193	0,1315	1,0000	0,3324	0,0004



Normalize edilen değerlerden yola çıkılarak, her bir alternatif için, indikatörler bağlamında radar grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 6.2.). Bu grafiklerde alternatifler bazında indikatörlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafikler Tablo 6.2'deki sayısal verilerin görselleştirilerek, indikatörlerin dağılımının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olması açısından tercih edilmiştir. En çok 1'e yakınsayan indikatörü barındıran yenilenebilir enerji seçeneği seçilen sürdürülebilirlik analizi yöntemleri açısından tek başına yeterli bir değerlendirme olarak görülmesi de ağırlıklandırma prosesi öncesinde güneş enerjisinin ve hidroelektrik enerjinin öne çıktığı görülmektedir. Örneğin, hidroelektrik enerji, emisyon değerleri açısından en iyi konumda bulunmakta, güneş enerjisi ise su kullanımı, sosyal kabul edilebilirlik, yatırım tutarı gibi konularda üst sıralarda yer almaktadır.



Şekil 6.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının indikatörler bazında değerlendirilmesi.

Alternatiflerin değerlendirmesi aşamasında, kriterlerinin önem derecelerinin bu sonuçlar üzerindeki etkileri daha net görülebilmekte ve tercih sıralamasında daha gerçekli sonuçlar elde edilmektedir.

### **6.1. AHP Mekanizmasının Kurulması**

Analitik hiyerarşi prosesini dahilinde aşağıda belirtilen adımlar uygulanarak karar verme mekanizması oluşturulmuştur.

Karar verme mekanizmasının; hedefler, kriterler ve alternatifler hiyerarşisi şeklinde basamaklı bir sistem şeklinde altyapısı oluşturularak model geliştirilmiştir. Daha sonra, kriterlerin birbirlerine göre önem dereceleri, önceliklerin hesaplanması için, belirlenen hedef doğrultusunda ikili olarak karşılaştırılmıştır. Ardından, kararların tutarlılığını kontrol edilir; yani, orantılılık ve geçişlilik açısından makul bir tutarlılık seviyesi sağlamak için kararların gözden geçirilmesi yapılır. Tutarlılık oranlarının anlamlı olabilmesi için %10'un altında olmalıdır. Bu değerin üstünde çıkması durumunda ikili karşılaştırmaların gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Bu hesaplamaların ardından, alternatifler için yerel öncelikler (tercihler) hesaplanır ve her bir kritere ilişkin öncelikler ayrı ayrı belirlenir. Özetle, bir önceki adımda da bahsedildiği gibi alternatifler, her bir kritere göre ikili olarak karşılaştırılır. Sonrasında tutarlılık açısından kontrol tekrar edilir.

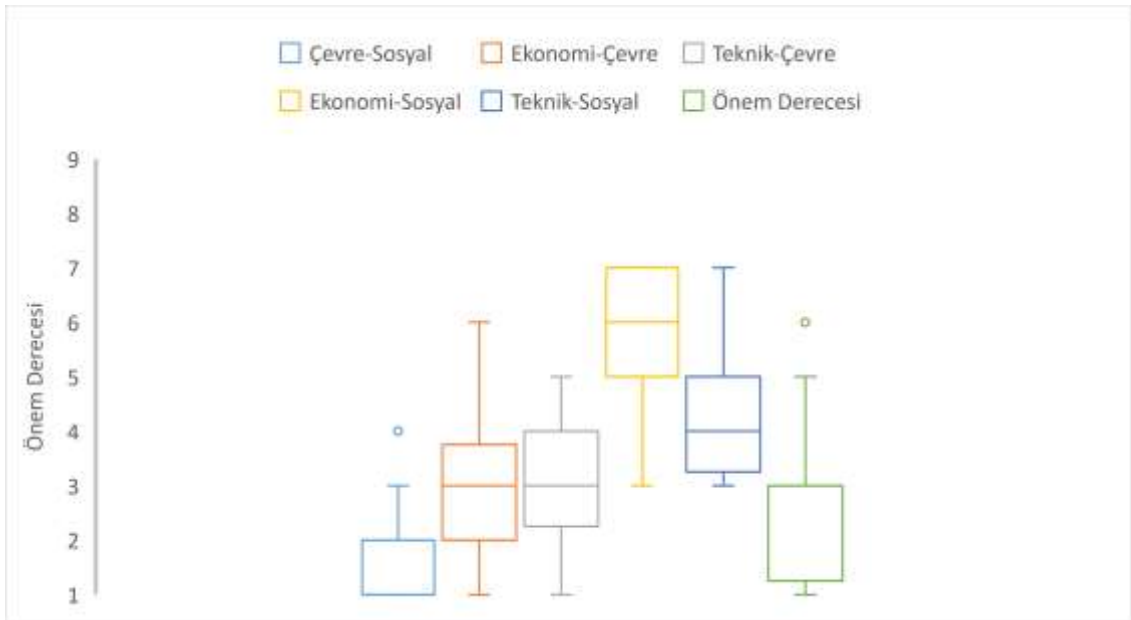
Bir sonraki adım olarak, toplam önceliklerin hesaplanması (model sentezi) gerçekleştirilir. Alternatiflerin toplam önceliklerini hesaplayabilmek için, daha önceden hesaplanmış olan tüm öncelik değerleri, ağırlıklı bir toplam olarak birleştirilir. Bu hesaplamalar doğrultusunda, en yüksek öncelik değerine sahip olan alternatif en iyi seçim olarak görülür.

Son olarak, duyarlılık analizleri gerçekleştirilir. Bu kapsamda, kriterlerin öncelik değerlerinde olabilecek değişikliklerin karar mekanizmasını nasıl etkileyebileceği üzerine testler yapılarak, mekanizmanın arkasındaki mantık ortaya konulmaya çalışılır ve yorumlamalar yapılır. Sentez sonuçları ve duyarlılık analizinde ortaya konulan çıkarımlar doğrultusunda en uygun alternatif belirlenir ve mekanizmanın çalıştırılması ile elde edilen nihai çıkarım ortaya konulur.

Oluşturulan model kapsamında yukarıda belirtilen işlem basamaklarının uygulanışı ile ilgili detaylar şu şekildedir:

Öncelikli olarak ana kriterler olan Çevre Sosyal Teknik ve Ekonomik boyuta ait önem derecesine göre karşılaştırmaya yönelik, uzman grubuna ait cevaplara ilişkin değerler bir veri havuzu oluşturularak, ortalama alma işlemi ile tekil bir değere dönüştürülmüştür.

Bu verilere ait değerler Şekil 6.3.'te gösterilmektedir. Grafikte gösterilen değere ait etiketlerde diğerine göre tercih edilme oranı yüksek olan kriter önce yazılmış olup, önem derecesini ifade eden sayısal değer ise tercih edilme oranını ifade etmektedir. Sayısal değer yükseldikçe ilk kriterin ikinci kriterle karşı tercih edilme oranı artmaktadır.



Şekil 6.3. Ana kriterlere ait önem derecesi karşılaştırması.

Bu grafiğin matrisel olarak gösterimini de içeren, yukarıda belirtilen işlemlerin en iyi sürdürülebilir enerji alternatifinin belirlenmesi esasına dayalı mekanizmanın oluşturulması amacıyla uygulanmasına ilişkin veriler Tablo 6.3'te görülmektedir.

Tablo 6.3. a)'da verilmiş olan, ikili karşılaştırma matrisi kriterlerden hangisinin diğerine göre daha önemli olduğunu ifade etmek için kullanılır. Önceki bölümlerde anlatılmış olan önem derecesi skalasındaki 1-9 arasındaki değerler, karşılaştırılan iki kriterin hangisinin

diğerine göre, ne derece önemli olduğunun belirlenmesinde kullanılır. Örneğin, Sürdürülebilir enerjiye ulaşma hedefinde çevre kriteri (i) sosyal kriterine göre (j) biraz daha önemli görülmekte ve 2/1 olarak ifade edilmektedir. Aynı şekilde sosyal kriter ekonomik kriterine göre daha düşük bir önem derecesine sahip olmakta ve ikili karşılaştırma değerleri 1/6 olarak tabloya işlenmiştir. Daha sonra toplamları alınarak her bir kriter için matriste işlenen bu verilere bölünerek normalize hale getirilmiş ve Tablo 6.3.b)'de görüldüğü üzere normalize edilen bu tablonun her satırının ortalaması alınarak ilgili kriterlerin öncelikleri hesaplanmıştır. Bu aşamalar tamamlandıktan sonra, takip eden işlemleri görsel olarak daha iyi ifade edebilmek amacıyla iki tablonun birleştirildiği Tablo 6.3.c) oluşturulmuştur. Öncelik satırında verilen her bir değer, ilgili kriter sütunundaki değerle çarpılır ve ilgili satırın ortalaması alınarak Tablo 6.3.d)' de görülen ağırlıklı toplam değerleri hesaplanır. Uzman görüşleriyle oluşturulan bu yapının anlamlı olarak sayılması için tutarlılık oranının hesaplanması gerçekleştirilir. Daha önce AHP'nin temel mekanizmasının anlatıldığı bölümde verilen formüller kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanmış ve değerler Tablo 6.3.e)' de verilmiştir.

Tablo 6.3. Ana indikatörlere ait ikili karşılaştırma işlem tabloları ve tutarlılık hesaplamaları.

a) İkili karşılaştırma matrisi

Sürdürülebilir enerji	Çevre	Sosyal	Ekonomik	Teknik
<b>Çevre</b>	1,000	2,000	0,333	0,333
<b>Sosyal</b>	0,500	1,000	0,167	0,250
<b>Ekonomik</b>	3,000	6,002	1,000	0,333
<b>Teknik</b>	3,000	4,000	3,000	1,000
<b>Toplam</b>	7,500	13,002	4,500	1,917

b) Önceliklerin hesaplanması

Sürdürülebilir enerji	Çevre	Sosyal	Ekonomik	Teknik	Öncelik
<b>Çevre</b>	0,133	0,154	0,074	0,174	0,134
<b>Sosyal</b>	0,067	0,077	0,037	0,130	0,078
<b>Ekonomik</b>	0,400	0,462	0,222	0,174	0,314
<b>Teknik</b>	0,400	0,308	0,667	0,522	0,474
<b>Toplam</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>

c) Birleştirilmiş matris

Sürdürülebilir enerji	Çevre	Sosyal	Ekonomik	Teknik
<b>Öncelik</b>	0,134	0,078	0,314	0,474
<b>Çevre</b>	1,000	2,000	0,333	0,333
<b>Sosyal</b>	0,500	1,000	0,167	0,250
<b>Ekonomik</b>	3,000	6,000	1,000	0,333
<b>Teknik</b>	3,000	4,000	3,000	1,000

d) Ağırlıklı toplamların hesaplanması

Sürdürülebilir enerji	Çevre	Sosyal	Ekonomik	Teknik	Ağırlıklı Toplam
<b>Çevre</b>	0,134	0,156	0,105	0,158	0,552
<b>Sosyal</b>	0,067	0,078	0,052	0,119	0,316
<b>Ekonomik</b>	0,401	0,467	0,314	0,158	1,340
<b>Teknik</b>	0,401	0,311	0,943	0,474	2,130

e) Tutarlılık hesaplaması

Ağırlıklı Toplam	Ağırlık	Sonuç
0,552	0,134	4,127
0,316	0,078	4,058
1,340	0,314	4,263
2,130	0,474	4,493
	<b>Toplam</b>	16,941
	<b><math>\lambda</math> (max)</b>	4,235
	<b>CI</b>	0,078
	<b>CR</b>	0,087

Tutarlılık oranlarının (CR) anlamlı olabilmesi için %10'un altında olması gerekliliği sağlandığından oluşturulan sistem sağlıklı olarak kabul edilmektedir. Hiyerarşik yapının oluşturulması ile ilgili sürece devam edilmesinde sakınca bulunmamaktadır.

Alt kriterlere ait işlemlerin de uygulanmasından sonra alternatiflerin değerlendirilmesi ile ilgili analizlere geçilmiştir. Bu analizlerin yapılması için öncelikle seçilen yenilenebilir enerji alternatifleri her bir indikatör açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Örneğin CO<sub>2</sub> indikatörü güneş enerjisi rüzgar enerjisi ve biyokütle enerjisi açısından değerlendirildiğinde salım değerlerine bakılarak ikili karşılaştırmaları yapılmış daha sonra her bir alt kriter göre alternatiflere ait birleştirilmiş tercihlere dayalı matrisler oluşturulmuştur. Bu adımlar her bir alt kriter için tekrarlanmıştır. İkili karşılaştırmalara ait detaylı örnek matrisler Ek-3'te tüm kriterlere ait matrisler Ek-4'te verilmiştir.

Tüm sistem için kriterlere ait verilerin değerlendirildiği karar hiyerarşisi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Tablo 6.4. Oluşturulan hiyerarşik yapı dahilinde elde edilen indikatörlere ait sayısal değerler.

## Sürdürülebilir Enerji

1. seviye	Çevre 0,134					Sosyal 0,078		Ekonomi 0,314			Teknik 0,474			Toplam
2. seviye	CO2 0,451	SO2 0,130	NOx 0,079	Su Kullanımı 0,265	Arazi Kullanımı 0,074	İş Olanakları 0,250	Sosyal Kabul Edilebilirlik 0,750	Yatırım Tutarı 0,637	Birim Elektrik Maliyeti 0,258	İşletme ve Bakım Masrafları 0,105	Elektrik Üretim Verimliliği 0,109	Kapasite Faktörü 0,345	Kaynak Potansiyeli 0,547	
Toplam öncelik	%6,00	%1,74	%1,00	%3,50	%0,99	%1,95	%5,85	%20	%8,10	%3,29	%5,20	%16,40	%26	%100
Güneş Enerjisi-PV	0.064	0.141	0.086	0.303	0.115	0.424	0.474	0.326	0.130	0.428	0.055	0.042	0.322	%23.7
Rüzgar Enerjisi	0.289	0.315	0.162	0.466	0.491	0.086	0.271	0.398	0.222	0.173	0.139	0.127	0.073	%21.0
Biyokütle	0.170	0.094	0.029	0.031	0.029	0.146	0.076	0.066	0.030	0.030	0.202	0.303	0.446	%21.9
Hidroelektrik	0.428	0.420	0.313	0.086	0.115	0.311	0.039	0.173	0.455	0.300	0.563	0.071	0.129	%20.3
Jeotermal	0.049	0.030	0.409	0.115	0.250	0.033	0.139	0.037	0.163	0.069	0.040	0.456	0.030	%13.2

Çalışma kapsamında elde edilen veriler Tablo 6.4. üzerinden değerlendirildiğinde; CO<sub>2</sub> indikatörünün, literatür taramalarında, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilirlik analizlerinde en çok kullanılan indikatör olarak öne çıktığı görülmüştür. Uzman görüşleriyle oluşturulan model mekanizmasında da önem derecesi olarak, benzer bir eğilim görülmektedir.

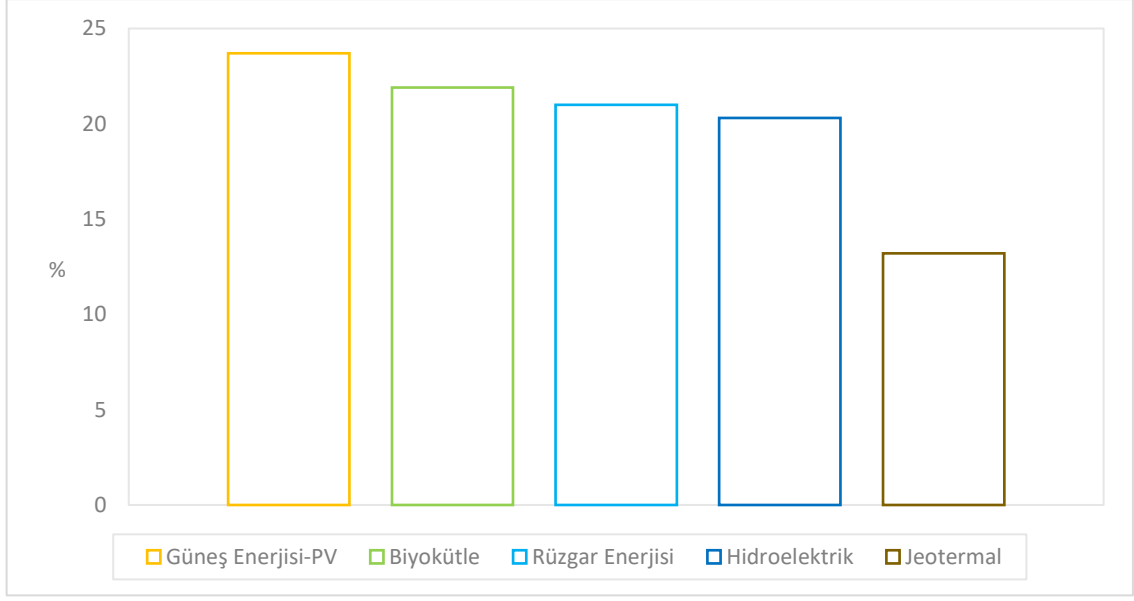
Ekonomik indikatörlerde, yatırım tutarının, literatürdeki diğer ekonomik indikatörlerden daha fazla kullanıldığı gözlemlenmiş olup, katılımcılar da bu konuda benzer bir bakış açısı geliştirmiş olarak görülmektedirler.

Sosyal indikatörlerin literatürde kullanım sıklıkları, eşit derecede tercih edildiği görülmüş olup, oluşturulan modelde ise, sosyal kabul edilebilirlik daha fazla ön plana çıkmıştır. Bunun sebeplerinden biri, değerlendirme yapan uzmanların, projelere daha entegre bir bakış açısıyla, sosyal ve çevresel etkilerin geri bildirimleri konusundaki saha tecrübelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Teknik indikatörler arasında, tercih sıralamasında literatürde en çok karşılaşılan indikatör kaynak potansiyeli olarak belirlenmiş olup, uzman tercihlerinde de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir.

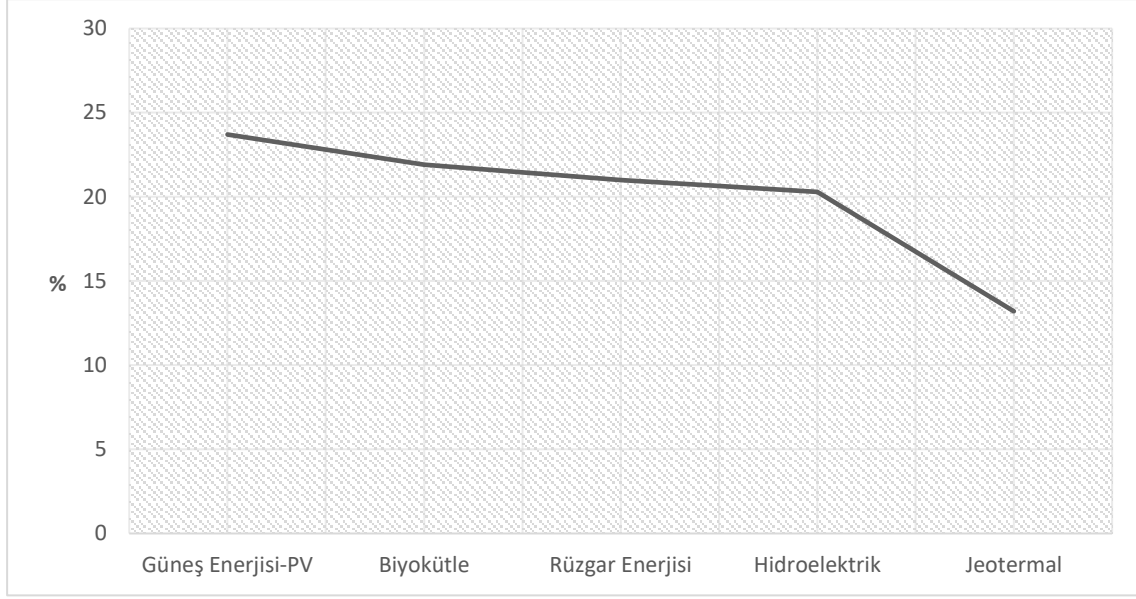
Oluşturulan karar matrisinin çıktıları karşılaştırıldığında en iyi alternatifin güneş enerjisi olduğu belirlenmiştir. Güneş enerjisini takiben sırasıyla biyokütle enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve jeotermal enerjisi alternatiflerinin en uygulanabilir alternatifler olduğu görülmüştür. Bu verilere göre oluşturulan grafik Şekil 6.4.'te verilmiştir.





Şekil 6.4. Orijinal senaryo kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranları.

Güneş enerjisinin %23,7'lik bir tercih oranı ile ilk sırada yer aldığı, biyokütle enerjisinin %21,9'luk bir tercih oranı ile ikinci sırada ve %21'lik bir oranla rüzgar enerjisinin onu takip ettiği, hidroelektrik enerjisini %20,3 ile 4. sırada olduğu, son sırada ise %13,2'lik bir tercih oranına sahip jeotermal enerjinin bulunduğu görülmüştür. Genel bir değerlendirme yapıldığında tercih yüzdeleri arasında yüksek farklar görülmediği gözlemlenmiştir ancak bu en iyi alternatif ile ilgili bakış açısını değiştirmeyi gerektirecek bir faktör olarak görülmemelidir. Özellikle jeotermal enerji tercih sıralamasında diğer alternatiflere oranla farklı bir trend çizmektedir. Bu ifadelerin görselleştirilmiş biçimi Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5. Orijinal senaryo kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranlarına ait değişim eğilimleri.

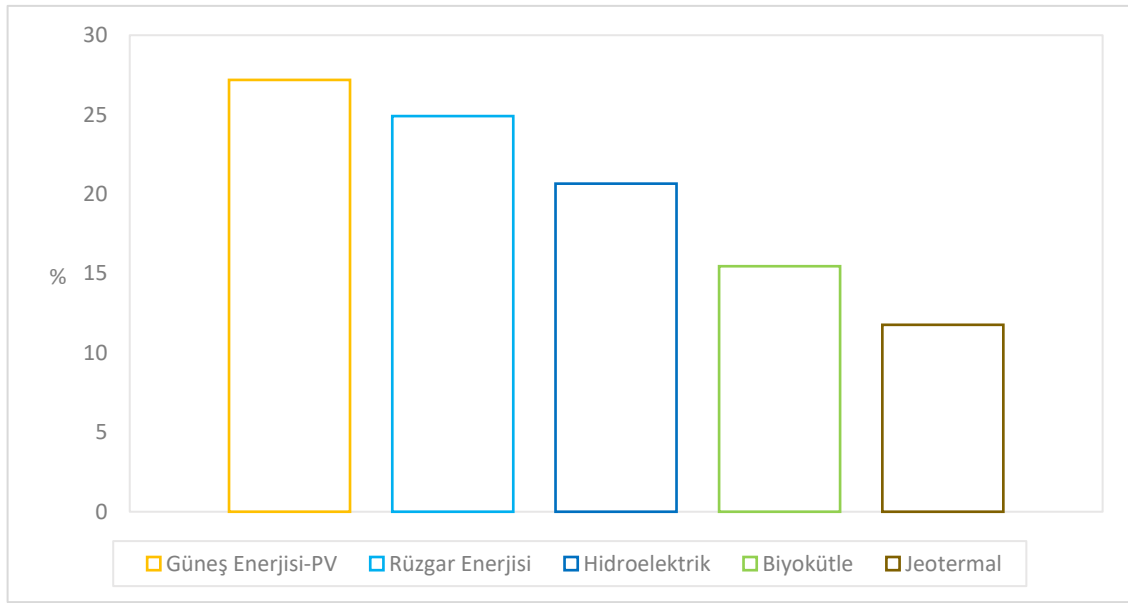
Yukarıda ifade edilen değerler indikatörlerin ağırlıklarıyla da doğrudan ilişkilidir ve karar vericilerin bilgi ve tecrübeleri bu ağırlıkların oluşmasında etkin rol oynamaktadır. Dolayısıyla kendi içlerinde her ne kadar tutarlılık oranının belli sınırlarda olunması oluşturulan modelin bir kuralı olsa da modelin genel tutarlılığının da test edilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda duyarlılık analizleri yapılmış olup, çalışmaya ait tercih matrislerinin ağırlıkları çeşitli senaryolar kapsamında yeniden oluşturularak modelin sonuçları test edilmiştir.

## 6.2. Duyarlılık Analizleri

AHP'de duyarlılık analizinin uygulanmasının ana sebeplerinden biri, hiyerarşik yapıdaki kriterlerin önem derecelerindeki değişimlerin ve hiyerarşik model yapısındaki değişikliklerin alternatiflerin sıralamasını etkileyen, yani en iyi alternatifin belirlenmesini sağlayan toplam önceliklere olan etkisinin gözlemlenmesini vasıtasıyla, geçerli bir model oluşup oluşmadığının değerlendirilmesini sağlamaktır.

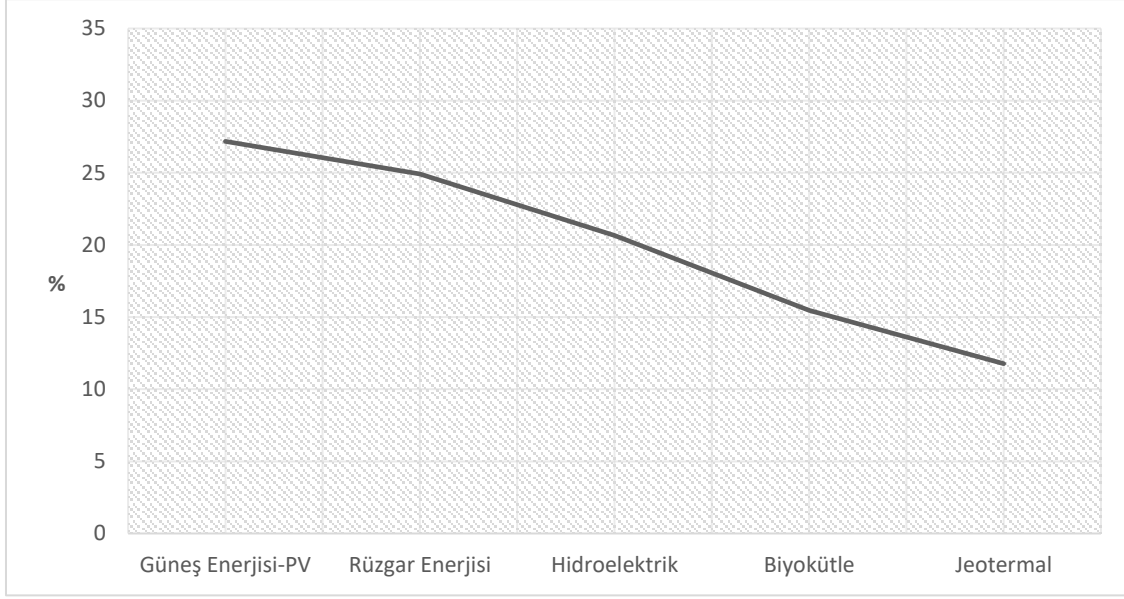
Model analizini gerçekleştirirken, ilk kurgudan elde edilen çıktılarının önem dereceleri farklı senaryolar kurgulanarak değiştirilmiş ve yeni çıktılar üzerinden modelin yorumlanması gerçekleştirilmiştir.

Analiz kapsamında, öncelikle her bir ana kritere ait önem derecesinin eşit alındığı “tam sürdürülebilirlik” senaryosu uygulanmıştır. Bu senaryoya göre çevresel, sosyal, ekonomik ve teknik ana kriterlerinin önem dereceleri eşit değere getirildiğinde, en iyi alternatif sıralamasında güneş enerjisi yine ilk sırada yer almaktadır. Güneş enerjisini takiben sırasıyla, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerjisi alternatiflerinin en uygulanabilir alternatifler olduğu görülmüştür. Bu verilere göre oluşturulan grafik Şekil 6.6.’da verilmiştir.



Şekil 6.6. Tam sürdürülebilirlik senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranları.

Oluşturulan “Tam Sürdürülebilirlik” senaryosu kapsamında her bir kriterin eşit değerlendirilmesi durumunda bile güneş enerjisinin %27,2’lik bir tercih oranı ile en üst sırada yer aldığı görülmektedir. Rüzgar enerjisi ise %24,9’luk bir oranla ikinci sırada, Hidroelektrik enerjisi %20,6’lık bir oranla üçüncü sırada yer almaktadır. Biyokütle enerjisi %15,4, Jeotermal enerji ise %11,8’lik bir oranla tercih sıralamalarında daha alt sıralarda yer almaktadır. Bu değerlerin değişim eğilimlerine ait veriler Şekil 6.7.’de görselleştirilmiştir.

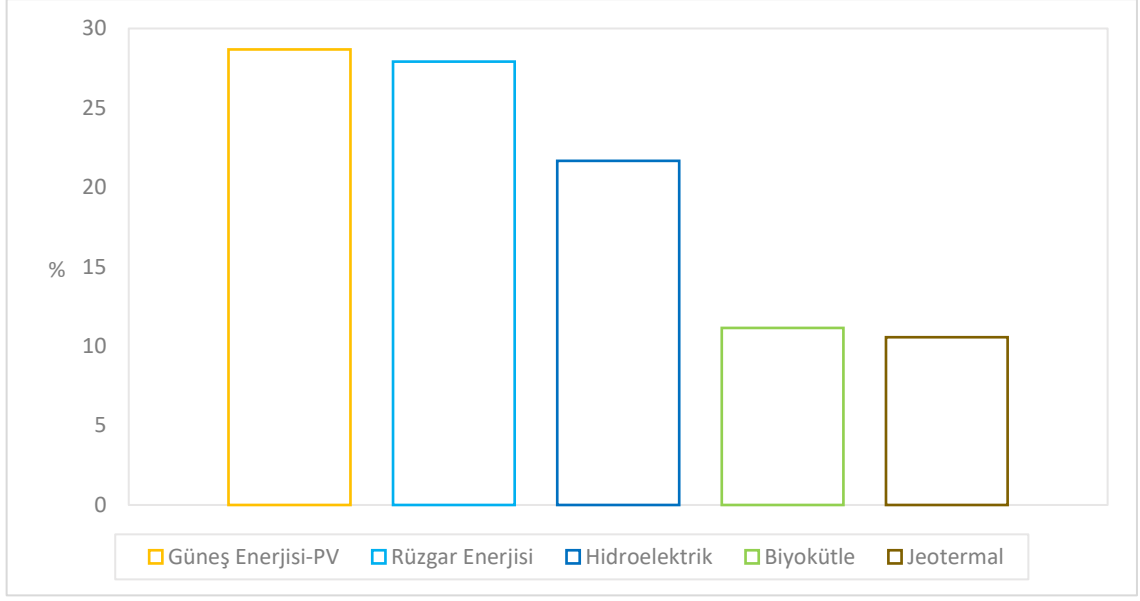


Şekil 6.7. Tam sürdürülebilirlik senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranlarına ait değişim eğilimleri.

Bu senaryoda en çok göze çarpan husus biyokütle enerjisinin uzman görüşlerinin yer aldığı senaryodaki yerinin değişmesidir. Ancak diğer enerji alternatiflerinde çok fazla yüzdelik ve sıralama farklılıkları gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla en iyi alternatif bu senaryo için de hala geçerlidir.

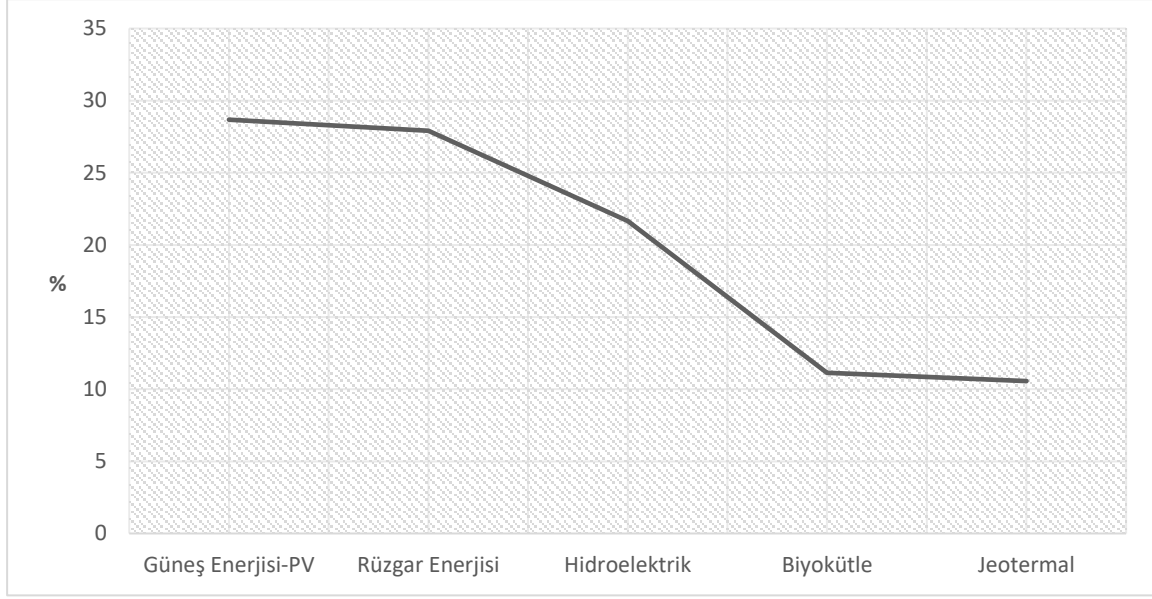
Tez çalışması kapsamında, “tam sürdürülebilirlik” senaryosundan sonra, ana kriterler arasında en yüksek önem derecesine sahip olan teknik kısmın önem derecesini en minimum değere getirerek diğer önem derecelerinin değerlerini ise kendi aralarında eşitleyerek yeni bir senaryo test edilmiştir. Böylece model sonuçlarının teknik kriterle bağımlılığının test edilmesi amaçlanmaktadır.

Oluşturulan “kriter minimizasyonu” senaryosundan elde edilen sonuçlar yorumlandığında, güneş enerjisinin ilk sıradaki yerini koruduğu gözlemlenmiştir. Güneş enerjisinden sonra en iyi alternatifler, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji olarak sıralanmaktadır.



Şekil 6.8. Kriter minimizasyonu senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranları.

Teknik kriter üzerinde yapılan değişiklik sonucu elde edilen sonuçlara göre, güneş enerjisi hala en iyi alternatif olma özelliğini korumaktadır. Yüzdeler oranlara bakıldığında Güneş Enerjisi %28,7'lik bir oranla ilk sırada Rüzgar Enerjisi % 27,9'luk bir oranla ikinci sırada, Hidroelektrik enerjisi %21,7'lük bir değerle üçüncü sırada Biyokütle Enerjisi %11,1'lik bir değerle dördüncü sırada, Jeotermal enerji %10,6'lık bir değerle beşinci sırada yer almaktadır (Şekil 6.8). Oluşturulan bu senaryo kapsamında yüzdeler değerlerde bir miktar değişiklik olsa da alternatiflerin sıralamasında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Yüzdeler sıralamalara ait eğilimlerin görselleştirildiği Şekil 6.9.'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Kriter minimizasyonu senaryosu kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih oranlarına ait değişim eğilimleri.

Uzman görüşlerinden yola çıkılarak oluşturulan modelin farklı senaryolar yardımıyla değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlara göre güneş enerjisi seçilen yenilenebilir enerji alternatifleri arasında, en iyi alternatif olma özelliğini korumuştur.

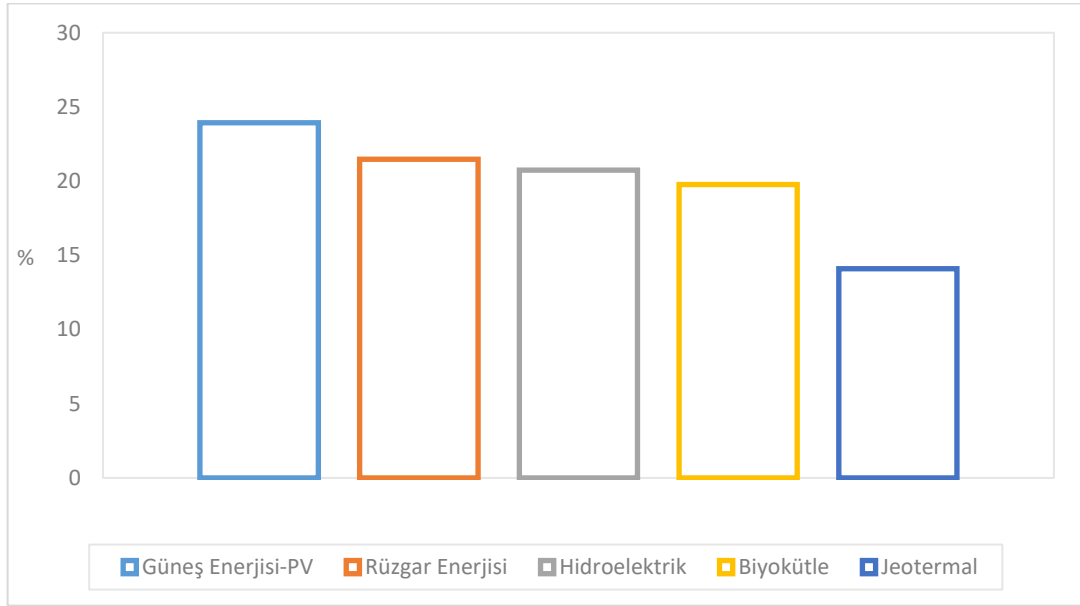
Teknik kriterler içerisinde kaynak potansiyeli enerji kaynağının güvenilirliği konularında önemli bir ağırlığının olması ve bu kriterin önem derecesinin değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar yorumlandığında, biyokütle enerjisinin teknik kriter tercihleriyle olan bağıntısı daha iyi anlaşılmaktadır.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, elde edilen veriler ışığında güneş enerjisi hem uzman görüşlerinin alındığı özgün senaryo da hem de uygulanan alternatif senaryolarda sürdürülebilirlik kriterleri açısından en iyi alternatif seçeneği olarak en üst sırada yer almıştır. Diğer alternatifler açısından da biyokütle enerjisi haricinde sıralamalarında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiş olup oluşturulan modelin tutarlılığının göstergesi olarak kabul edilebilir.

Modele ait ana kriterler kapsamında genel duyarlılık analizlerine ilave olarak, alt kriterlerden literatür taramaları sonucunda, önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere, en

çok irdelenen alt kriter olarak belirlenmiş olan CO<sub>2</sub> alt kriterinin değışiminin etkileri de incelenmiştir.

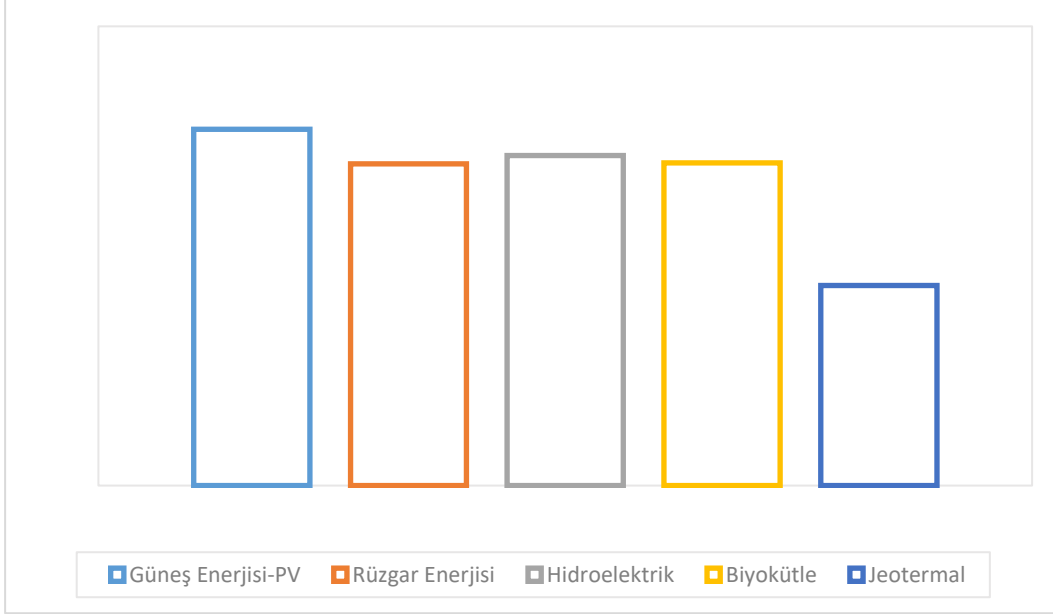
Bu kapsamda modele ait diğer kriterler sabit tutularak, CO<sub>2</sub> alt kriterinin bağlı olduğu çevre ana kriterinin kapsamında olan alt kriterler arasında analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak CO<sub>2</sub> değeri, olabilecek en minimum değere çekilmiş ve diğer kriterler, eşit önem derecesine çekilerek CO<sub>2</sub> değerin önem derecesinin düşürölmesinin sonuçları test edilmiştir. Bu durumda, incelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik kriterleri açısından sıralaması şekil 6.10.' da verilmiştir. CO<sub>2</sub> değerin önem derecesi, olabilecek en düşük değere getirildiğinde, Güneş enerjisi %23,93'lük bir değerle tercih sıralamasında en önde bulunmaktadır. Güneş enerjisini takiben, sırasıyla %21,48'lik bir değerle rüzgar enerjisi, %20,73'lük bir değerle hidroelektrik enerjisi, %19,77'lik bir değerle biyokütle enerjisi ve son olarak %14,09'luk bir değerle jeotermal enerjisi tercih sıralamasında yer almaktadır.



şekil 6.10. CO<sub>2</sub> alt kriterinin önem derecesinin minimum olması durumu.

Bir sonraki aşama olarak CO<sub>2</sub> önem derecesinin maksimum değere getirilerek, diğer alt kriterlerin değeri birbirleriyle aynı seviyeye getirilmiş ve sürdürülebilirlik derecelendirmesindeki değışim incelenmiştir. Bu analizinden elde edilen sonuçlar değeriendirildiğinde; şekil 6.11.'de de görölldüğü üzere, güneş enerjisi %23,28'lik bir değerle tercih sıralamasında en üs sırada bulunmaktadır. Güneş enerjisini takiben,

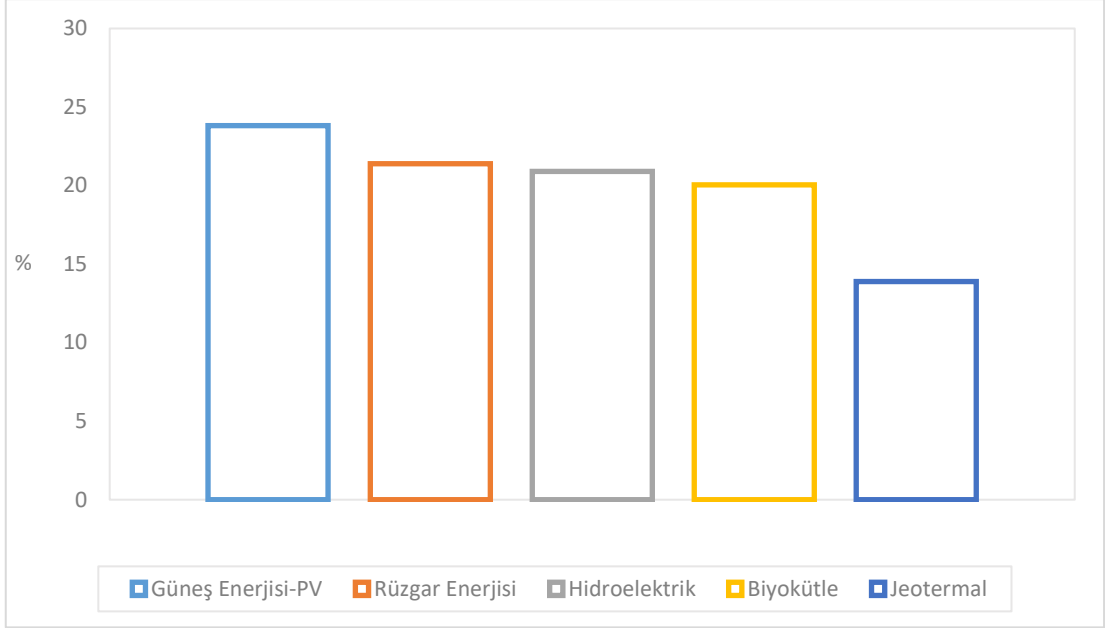
sırasıyla %21,56'lık bir değerle hidroelektrik enerjisi, %21,07'lik bir değerle biyokütle enerjisi, %21,01'lik bir değerle rüzgar enerjisi ve son olarak %13,07'lik bir değerle jeotermal enerjisi tercih sıralamasında yer almaktadır.



Şekil 6.11. CO<sub>2</sub> alt kriterinin önem derecesinin maksimum olması durumu.

Son aşamada ise CO<sub>2</sub> değeri ve diğer kriterler, birbirleriyle eşit önem derecesine getirilerek, tüm bağlı alt kriterlerin önem derecesinin eşitlenmesi durumu analiz edilmiştir. Bu koşullar altında, incelenen yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik kriterleri açısından sıralaması şekil 6.12.' de verilmiştir. CO<sub>2</sub> değerinin önem derecesi, diğer alt kriterlerle eşitlendiğinde, Güneş enerjisi %23,80'lik bir değerle tercih sıralamasında en önde bulunmaktadır. Güneş enerjisini takiben, sırasıyla %21,38'lik bir değerle rüzgar enerjisi, %20,89'lük bir değerle hidroelektrik enerjisi, %20,03'lük bir değerle biyokütle enerjisi ve son olarak %13,89'luk bir değerle jeotermal enerjisi tercih sıralamasında yer almaktadır.





Şekil 6.12. CO<sub>2</sub> alt kriterinin önem derecesinin eşitlenmesi durumu.

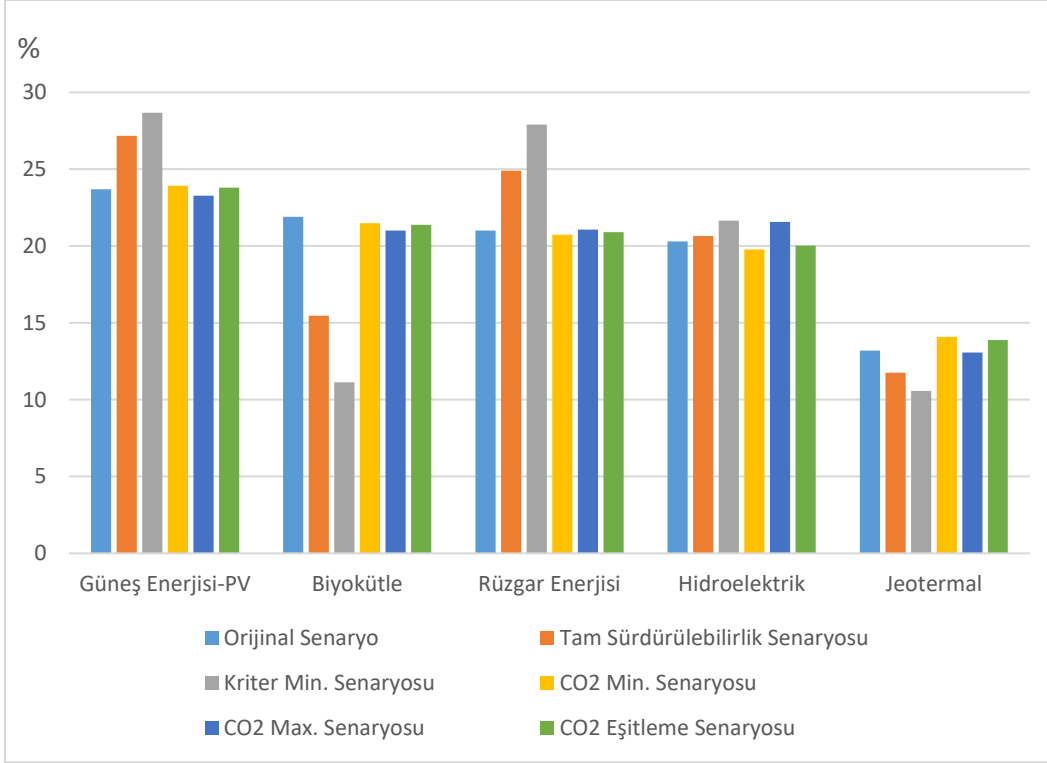
Literatür değerlendirmesinden elde edilen bilgiler ışığında, en çok kullanılan alt kriter olan CO<sub>2</sub> değerinin önem derecesinin maksimize edilmesi, minimize edilmesi ve diğer bağlantılı kriterlerle eşit dereceye getirilmesi yoluyla gerçekleştirilen analizlerde Güneş Enerjisi tüm koşullarda en sürdürülebilir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır. Benzer şekilde Jeotermal Enerji de en son sırada yer almaktadır.

CO<sub>2</sub> değerinin önem derecesinin minimize edilmesi ve eşitlenmesi koşullarında sürdürülebilirlik değerlendirmesi sıralamasında, Güneş Enerjisi, Rüzgar Enerjisi, Hidroelektrik enerjisi, Biyokütle Enerjisi ve Jeotermal Enerji şeklinde bir sıralama gerçekleşmiş ve yüzdelik değerlerde çok büyük sapmalar görülmemiştir.

CO<sub>2</sub> değerinin önem derecesinin maksimize edilmesi koşulunda ise sıralama, Güneş Enerjisi, Hidroelektrik Enerji, Biyokütle Enerjisi, Rüzgar Enerjisi ve Jeotermal Enerji şeklinde gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde Güneş Enerjisi'nin sürdürülebilirlik sıralamasında en tercih edilebilir alternatif olmasının sebebinin, CO<sub>2</sub> salınımı değerinin nispeten yüksek olmasına rağmen diğer alt kriterler genelinde, sürdürülebilirlik katma değerinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, Rüzgar Enerjisi,

Hidroelektrik Enerji ve Biyokütle Enerjisi CO<sub>2</sub> değerinin önem derecesinin değişimine karşı daha düşük bir stabiliteye sahip, dolayısıyla diğer alt kriterler genelinde değişkenliğe daha açık bir pozisyonda bulunmaktadır.



Şekil 6.13. Tüm senaryolar bazında seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının yüzdelerik değerleri.

Tez kapsamında gerçekleştirilen tüm senaryo analizleri değerlendirildiğinde, güneş enerjisi ve jeotermal enerjinin sıralamasının tüm koşullarda aynı kaldığını görmekteyiz (Şekil 6.13.). Bu sıralamanın oluşumundaki temel faktörler incelendiğinde, en yüksek etkili kriterdeki değişimden bile etkilenmemiş olmaları, sürdürülebilirlik modelinin alt yapısının iyi kurgulanmış olduğunun bir göstergesi olmakla birlikte kriter ağırlıklarına bağımlılıklarının diğer kaynaklara nazaran daha stabil olduğunu düşündürmektedir. Genel sıralama değişimi incelendiğinde; diğer enerji kaynakları arasındaki sıralama değişimlerinin “Tam Sürdürülebilirlik Senaryosu” ve “Kriter Minimasyonu Senaryosu” kapsamında biyokütle enerjisinde belirgin bir şekilde değiştiği göze çarpmaktadır. Bunun olası sebebi olarak biyokütle enerjisinin kaynak potansiyelinin ülkemiz genelinde yüksek olması ve teknik kriterin ağırlığının da fazla olmasının etkisiyle, biyokütle enerjisinin bu alt kriterlere olan bağımlılığı gösterilebilir. Biyokütle enerjisinin sıralama değiştirmesinin

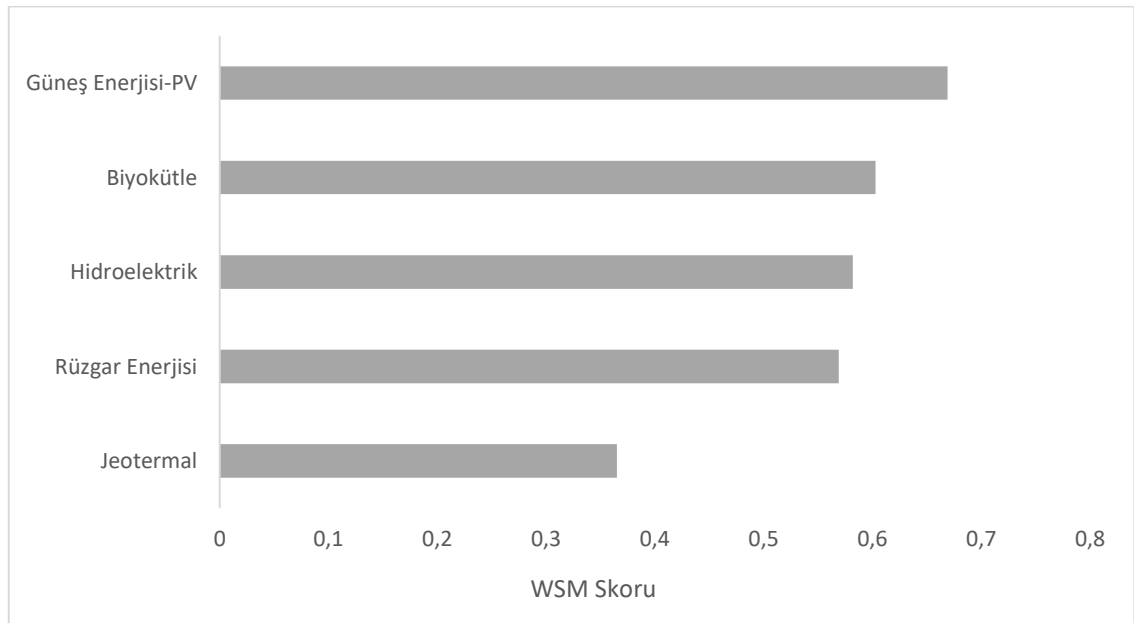
haricinde genel sıralamada herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu kapsamda, modelin güvenilirliği açısından tatmin edici bir sonuç karşımıza çıkmaktadır.

### 6.3. Ağırlıklı toplamlar metodu (WSM)

Ağırlıklı toplamlar metodu uygulanırken alt kriterlere ait sayısal değerler normalize edilmiş ve hesaplanan önem dereceleri ile her bir kritere ait ağırlıklı toplamlar elde edilmiştir. Ağırlıklı toplamların her bir kriter bazında en yüksek değeri almış olması onun en iyi alternatif olduğunu göstermektedir.

Ağırlıklı toplam metodu için oluşturulan hesap matrisinden elde edilen veriler aşığıdaki grafikte özetlenmiştir. Bu veriler yorumlandığında, en iyi alternatif sıralamasında güneş enerjisi birinci sırada yer almaktadır. Ağırlıklı toplamlar metodundan elde edilen sonuçlara ait veriler Şekil 6.14'te görülmektedir.

Grafikte de görüldüğü üzere, ilk sırada yer alan Güneş enerjisini takiben sırasıyla, biyokütle enerjisi, hidroelektrik enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji en uygulanabilir alternatif seçeneklerini oluşturmaktadır. WSM skoru olarak, güneş enerjisi, 0,67'lik bir değerle birinci, biyokütle enerjisi, 0,60'lık bir değerle ikinci, hidroelektrik enerji 0,58'lik bir değerle üçüncü, rüzgar enerjisi 0,57'lik bir değerle dördüncü, jeotermal enerji ise, 0,36'lık bir değerle son sırada yer almaktadır.



Şekil 6.14. Ağırlıklı toplamlar metodundan elde edilen sonuçlar.

Ağırlıklı toplamlar metodundaki sıralama değerlendirildiğinde uygulanan diğer karar verme yöntemi ve senaryolarıyla oldukça örtüşen bir yapı olduğu görülmektedir.

Uygulanan metotların ve oluşturulan kurguların sonucu olarak seçilen yenilenebilir enerji kaynakları arasında en tercih edilebilir alternatifin güneş enerjisi olduğu sonucuna varılmıştır. Jeotermal enerji ise tüm model ve senaryolarda en son sırada yer almaktadır.

## 7. TARTIŞMA

Sanayi devrimiyle oldukça hız kazanan çevresel problemlerle ilgili 1960'lı yılların sonlarına doğru yaşanan farkındalık hareketleri, kontrolsüz büyümenin de sorgulanmaya başlaması ve fosil yakıtların bu konulardaki en önemli problem kaynağı olduğu bilincinin yerleşmesiyle birlikte daha temiz enerji alternatiflerinin aranılması hareketlerin zemini hazırlanmıştır. Bununla birlikte 1973 ve 1979 yıllarında yaşanan enerji krizleri ise yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan bağımlılığın potansiyel tehlikelerini gözler önüne sermiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, çevremizde doğal olarak süregelen enerji akışından elde edilmelerinden dolayı genellikle sürdürülebilirlikle ilişkilendirilir. Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir olması için, sınırsız olması ve çevresel değerlere karşı zararsız bir şekilde temin edilmesi gerekmektedir. Detaylı bir şekilde sorgulandığında günümüzde gerçekleşen döngünün bu şekilde olmadığı görülmektedir.

Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir olup olmadığını, sürdürülebilirlik kavramının bileşenleri olan çevresel sosyal ve ekonomik etkilerini değerlendirmeden belirlemek mümkün değildir. Doğal olarak hiçbir enerji üretim prosesi çevresel ve sosyal etkileri olmadan gerçekleşmeyeceğinden, daha pragmatik bir tanımlama ile sürdürülebilir enerji, yaşanabilir bir gelecek için çevresel negatif etkilerden tamamen sıyrılamamış ancak sınırlamış olarak, toplumsal kalkınmayı mümkün kılmalıdır (Harjanne-Corhonen 2019).

Tester (2005) sürdürülebilir enerjiyi, “enerji yoğun malların ve hizmetlerin tüm insanlarca eşit olarak erişilebilirliği ve gelecek nesiller için yeryüzünün korunması arasında dinamik bir uyum” olarak tanımlamıştır. Bu tanımdan yola çıkılarak, gelecekteki enerji yatırımlarının yönetilebilmesi için öngörülen enerji sektörü büyüme senaryolarının çevresel ayak izlerinin sürdürülebilir enerji üretimi uygulamalarına odaklanılarak iyi bir şekilde çözümlenmesi gerekmektedir. Temel göstergeler etkilerin nicelleştirilmesini sağlayacak şekilde belirlenmelidir.

Sürdürülebilir enerji ile ilgili gelişmeler günümüz toplumunda daha da önemli bir konuma gelmekle birlikte, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ile ilgili araştırma makaleleri

de bununla paralele olarak artmaktadır. Enerji sektöründe sürdürülebilirlik değerlendirmesi için ÇKKV yöntemlerinin uygulandığı yayın sayısındaki sürekli artış, enerji sürdürülebilirliği ile ilgili sorunları çözmek için bilimsel ve pratik alanlarda ÇKKV yöntemlerinin önemini haklı kılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik analizleriyle ilgili model oluşturulması kapsamında çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. ÇKKV yöntemlerinin de uygulamalarının bulunduğu bu çalışmalarda fark edilen önemli hususlardan birisi teorik literatür verileri üzerine kurgulamalar yapılması, ayrıca uzman görüşleri olarak değerlendirilen verilerin seçilen yenilenebilir enerji kaynaklarının proje ve işletme aşamasında bulunan kişilerin değerlendirmelerinin üzerine kurgulanması gibi daha gerçekçi bir yaklaşım uygulanmasının eksikliği olarak belirtilebilir. Bununla birlikte, planlama ile ilgili yapılan sürdürülebilirlik çalışmalarında, bölgesel verilerin kullanılması da oldukça önemlidir. Uygulanan modelde dikkat edilen hususlar, özellikle yukarıda bahsedilen boşlukların doldurulması ve bu sayede, ulusal ölçekteki enerji politikalarına ışık tutabilecek bir çalışmanın hazırlanması olarak ifade edilebilir.

Öncelikle analitik hiyerarşi prosesi uygulanmış olup, oluşturulan karar matrisinin çıktıları karşılaştırıldığında en iyi alternatifin güneş enerjisi olduğu belirlenmiştir. Güneş enerjisini takiben sırasıyla biyokütle enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve jeotermal enerjisi alternatiflerinin en uygulanabilir alternatifler olduğu görülmüştür. Modelin kendi içerisindeki tutarlılığının ölçülmesi için farklı senaryolar kurgulanmıştır. Öncelikle her bir ana kritere ait önem derecesinin eşit alındığı “tam sürdürülebilirlik” senaryosu uygulanmıştır. Bu senaryoya göre çevresel, sosyal, ekonomik ve teknik ana kriterlerinin önem dereceleri eşit değere getirilmiştir. Bu senaryodan elde edilen sonuçlara göre, en iyi alternatif sıralamasında güneş enerjisi yine ilk sırada yer almaktadır. Güneş enerjisini takiben sırasıyla, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerjisi alternatiflerinin en uygulanabilir alternatifler olduğu görülmüştür.

Uzman görüşleri doğrultusunda oluşturulan senaryoda ana kriterler arasında en yüksek önem derecesine sahip olan teknik kısmın etkisini gözlemlemek amacıyla, teknik önem derecesini en minimum değere getirerek diğer önem derecelerini kendi aralarında eşitleyerek yeni bir senaryo test edilmiştir. Bu senaryodan elde edilen sonuçlar

yorumlandığında güneş enerjisinin ilk sıradaki yerini koruduğu gözlemlenmiştir. Güneş enerjisinden sonra en iyi alternatifler, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji olarak sıralanmaktadır.

Test edilen senaryolar kapsamında teknik kriterin önem derecesinin değiştirilmesinin biyokütle enerjisinin tercih sıralamasına etkisi olduğu, diğer alternatifler için ise yüzdelik oranlarında ufak değişiklikler haricinde sıralamalarına etki etmediği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar modelin kendi içerisindeki tutarlılığına işaret etmekle birlikte, biyokütle enerjisinin teknik kriterlerle yüksek bir bağıntısı olduğunu işaret etmektedir.

Literatür taramalarında ve uzman görüşlerini sonucu yapılan ağırlıklandırmalarda CO<sub>2</sub> alt kriterinin en çok önem verilen alt kriter olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kapsamda modele ait diğer kriterler sabit tutularak, CO<sub>2</sub> alt kriterinin altında bulunduğu çevre ana kriteri kapsamında olan alt kriterlerin değerlerinin değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilen analizler kapsamında CO<sub>2</sub> değerinin önem derecesi maksimize edilmiş, minimize edilmiş ve diğer bağlantılı kriterlerle eşit dereceye getirilmiştir. Güneş enerjisi tüm koşullarda en sürdürülebilir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır. Benzer şekilde jeotermal enerji de en son sırada yer almaktadır. Elde edilen bu sonuç, diğer alt kriterlerin sürdürülebilirlik katkılarının yüksek olduğu böylece modelin CO<sub>2</sub> değeri ile ilgili değişimlere oldukça stabil bir yanıt verdiği görülmektedir.

AHP uygulamasından sonra farklı bir yöntemle modelin test edilmesi amacıyla ağırlıklı toplamlar metodu uygulanmıştır. Bu metottan elde edilen sonuçlara göre, ilk sırada yer alan Güneş enerjisini takiben sırasıyla, biyokütle enerjisi, hidroelektrik enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji en uygulanabilir alternatif seçenekleri olarak belirlenmiştir.

ÇKKV kapsamında uygulanan yöntemlere dayalı model oluşturulurken temel yapı uzman değerlendirmelerinden faydalanılmıştır. Bu yöntemlerle karar verme süreçleri oluşturulurken en dikkat edilmesi gereken konulardan birisi konu hakkında yeterli bilgi düzeyine sahip olunması gerekliliğidir. Çalışma kapsamında oluşturulan modeller kendi aralarında duyarlılık analiziyle test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte farklı bir karar verme yöntemiyle de elde edilen sonuçların uyumlulukları test edilmiştir. Uygulanan tüm proseslerin ortak sonucu olarak seçilen yenilenebilir enerji kaynakları

arasından güneş enerjisi, değerlendirilen sürdürülebilirlik indikatörlerine göre Türkiye özelinde en uygulanabilir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Model uygulamasından önce, kriterler bazında yapılan değerlendirmede Güneş Enerjisi ve Hidroelektrik Enerji alternatifleri başa baş bir durumda olmalarına karşın, model kapsamında yapılan değerlendirmek ile kriterlere özel hesaplanan ağırlıklandırma sonucu Güneş Enerjisi sürdürülebilirlik değerlendirmesinde öne çıkmıştır ve tüm senaryolarda sıralamadaki yerini korumuştur. Bu sonuçtan da anlaşıldığı üzere, kriterlerin önem dereceleri model yapısında önemli bir bileşendir ve dengeli sonuçların elde edilmesinde, iyi bir şekilde belirlenmiş olması önem arz etmektedir.

Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği üzerine yapılan farklı çalışmalarla, tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında Onat ve Bayar (2010), tarafından yapılan kriterlerin değerlere göre sıralanıp derecelendirildiği analiz kapsamında ilk üç sırayı rüzgar enerjisi, nükleer enerji ve hidroelektrik enerji almıştır. Yenilenebilir kaynaklar açısından sıralama güneş enerjisi ve jeotermal enerji olarak devam etmektedir. Türkiye özelinde, Şengül ve ark.(2015), tarafından farklı bir ÇKKV yöntemi olan Fuzzy TOPSIS metodu kullanılarak yapılan bir başka çalışmada, hidroelektrik enerjisi ilk sırada jeotermal enerji ikinci sırada, küçük çaplı hidroelektrik santraller üçüncü sırada rüzgar enerjisi ise dördüncü sırada yer almaktadır. Şahin (2016), tarafından ÇKKV yöntemlerinden ANP kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada ise, rüzgar enerjisinin birinci sırada yer aldığı ve bunu sırasıyla güneş, hidrolik, jeotermal ve biyokütle enerjisinin takip ettiği görülmektedir. Tez çalışması kapsamında uzman görüşleri ve kriter değerleri açısından kriterlerin ağırlıklandırılması, yerel verilerin kullanılması ve çalışan tesislerden veri sağlanması, sıralamada oluşan farklılıkların etmenleri olarak gösterilebilir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen çıktılar ve literatürden elde edilen çıkarımlar yorumlandığında, sürdürülebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi açısından önemli hususlar ve politika önerileri aşağıdaki gibidir.

- ÇKKV proseslerindeki önemli aşamalardan biri olan kriterlerin önem derecelerinin (ağırlıklarının) en uygun alternatifin belirlenmesi konusunda oynadığı etkin rol, yalnızca kriterlere göre yapılan sıralama ile uzman



görüşlerinden elde edilen AHP çıktılarıyla karşılaştırıldığında oldukça bariz olarak görülmektedir. Kriterler bazında elde edilen sıralamada güneş ve hidroelektrik enerjisi oldukça yakın skorlara sahipken, kriterlerin ağırlıklandırılması ile hidroelektrik enerjisi dördüncü sıraya gerilemiştir.

- Oluşturulan model kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, global trendlerde görüldüğü üzere, güneş enerjisi yatırımlarındaki artış, yerel ölçekte, Türkiye genelinde de tercih edilebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri olarak teknolojik gelişmelerle birlikte PV yatırım maliyetlerindeki düşüş gösterilebilir.
- Türkiye’de kullanılacak tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının detaylı teknik ve ekonomik analizlerinin yapılarak daha stabil ve gerçekçi potansiyel tahminleri gerçekleştirilmelidir.
- Yenilenebilir enerji üretim birim maliyetleri, teknolojik gelişmelerle bağlantılı olarak zamanla azalmaktadır. Dolayısıyla konvansiyonel enerji kaynaklarındaki düşük maliyet avantajı yakın zamanda ortadan kalkacağı tahmin edilmektedir. Buna fosil kaynak kullanımından ortaya çıkan gizli maliyetler de dahil değildir.
- Sürdürülebilirliğin sağlanması açısından yenilenebilir enerji kullanımı oldukça önemlidir ancak enerji verimliliği ve enerji tasarrufunun sağlanması ile ilgili teşvikler ve toplumsal bilinçlendirme çalışmaları da önemli bir etken olarak değerlendirilebilir.
- Enerji üretiminin yanı sıra enerji iletimi de önemli bir süreçtir. Elde edilen enerjinin mümkün olduğunca verimli bir şekilde en az kayıpla iletilmesi maliyetleri de etkileyeceğinden, iletim alt yapısı ile ilgili verimlilik ve yenileme çalışmalarının da desteklenmesi gerekmektedir.
- Uzman görüşlerinden elde edilen cevaplardan, bireylerin temiz ve sürdürülebilir olarak nitelendirilen enerji kaynakları arasında seçim yapma şansları olduğunda, çevresel açıdan bilinç düzeylerindeki artışla bağlantılı olarak farklı bakış açıları

geliştirdikleri görülmüştür. Sosyal kabul edilebilirlik kriteri bu bağlamda, planlama aşamasında önemli bir konu olarak değerlendirilebilir.

- En önemli alt kriterlerden biri olarak CO<sub>2</sub> salımının görüldüğü, hem literatür hem de model mekanizmasının oluşturulması aşamasında kullanılan uzman görüşlerinden anlaşılmış olup, düşük karbon emisyonlu enerji üretiminin teşvik edilmemesi ile ilgili finansal destek mekanizmalarının genişletilmesi konusunda çalışmaların genişletilmesi gerektiği düşünülmektedir. (örn., karbon vergisi ve proje teşvikleri).
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretim potansiyelleri çoğunlukla iklim koşullarıyla bağlantılı olduğun konvansiyonel enerji kaynaklarına oranla stabiliteyi daha düşük olduğundan, günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ülke genelinde yenilenebilir enerjinin artırılması hedefleriyle bağlantılı olarak şebeke stabilitesinin de sağlanabilmesi için depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve desteklenmesi ile ilgili politikaların da oluşturulması gerekmektedir. Bununla birlikte halihazırda yerli üretim destekleri ile ilgili devam eden destek mekanizmalarının
- Son kullanıcılar için de şebekeden bağımsız olarak yenilenebilir enerji kullanımı seçenekleri de mevcuttur. Bununla birlikte ulaşım amaçlı enerji kullanımında da temiz enerjili araç opsiyonları mevcuttur. Kullanıcıların bu tür alternatiflere yönlendirilmesi ile ilgili teşvik politikaları geliştirilmelidir.

## 8. KAYNAKLAR

- Abbasi, T., and Abbasi, S. A., Renewable energy sources: their impact on global warming and pollution. PHI Learning Pvt. Ltd.. **2011**.
- Abu Taha, R., and Daim. T., Multi-criteria Applications in Renewable Energy Analysis: A Literature Review. In Research and Technology Management in the Electricity Industry, edited by T. Daim, T. Oliver, and J. Kim, 17–30. Springer, London, **2013**.
- Abu-Rayash, A., Development of a new integrated sustainability assessment model for energy systems, Doctoral dissertation, University of Ontario Institute of Technology, Canada, **2017**.
- Afgan, N. H., & Carvalho, M. G., Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), (2002), 739-755.
- Afgan, N. H., Sustainability paradigm: intelligent energy system. *Sustainability*, 2(12), , (2010), 3812-3830.
- Ahmad S. and Tahar R.M., Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: a case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63, (2014),458–66.
- Akün, L.,Çevre Muhasebesi: Genel Bir Bakış , Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi, 1:1., (1999), 147-148.
- Altınbay, A. Çevresel Maliyetlerin Raporlanması Akademik Bakış E-Dergisi 11, **2006**.
- Amer M. and Daim T.U., Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy Sustain Dev* 15, 420, (2011), 35.
- Andrews, R. L., *Managing the environment, managing ourselves*, Yale University Press New Haven, Conecticut, **1999**.
- Anonim, How do wind turbines work, <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work> (Erişim tarihi: 01 Aralık 2018)
- Arlı Yılmaz, S., Yeşil işler ve Türkiye’de yenilenebilir enerji alanındaki potansiyeli. Uzmanlık Tezi, TC Kalkınma Bakanlığı, Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü., Ankara, **2014**.

- Arora, N. K., Fatima, T., Mishra, I., Verma, M., Mishra, J., & Mishra, V., Environmental sustainability: challenges and viable solutions. *Environmental Sustainability*, 1(4), (2018), 309-340.
- Atanasova-Pacemska, T., Lapevski, M., Timovski, R.. Analytical Hierarchical Process (AHP) method application in the process of selection and evaluation. *International Scientific Conference Gabrovo*, November 2014.
- Bagliani, M., Dansero, E., & Puttilli, M. Territory and energy sustainability: the challenge of renewable energy sources. *Journal of Environmental Planning and Management*, 53(4), (2010), 457-472.
- Bartelmus, P. *Environment, Growth, and Development: The Concepts And Strategies Of Sustainability*. New York, Routledge, 1994.
- Bayaramoğlu T. *Biyokütle Enerjisi Ve Yerel Ekonomik Kalkınma*, İmaj Yayınevi, Ankara, Şubat 2014.
- Begić, F., Afgan, N. H. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system-Bosnian case. *Energy*, 32(10), 1979-1985, (2007).
- Berg, D.E., *Wind energy conversion*, *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Kreith, F., Goswami, D.Y. (Eds.),. CRC Press, Boca Raton, USA. 2007.
- Bhatia, S. C. *Advanced renewable energy systems*, (Part 1 and 2). WPI Publishing. New Delhi, 2014.
- Bozdoğan, R. 2007. Sürdürülebilir Gelişme Düşüncesinin Tarihsel Arka Planı, Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Siyaset Konferansları, Kitap 50, <http://iibf.kocaeli.edu.tr/ceko/ssk/kitap50/39.pdf>. (Erişim tarihi: 05 Eylül 2014).
- BP, *BP statistical review of world energy* 2018.
- Burton, J., Hubacek, K., Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. *Energy Policy* 35, (2007), 6402–6412.
- Campos-Guzman, V., García-Cáscales, M. S., Espinosa, N., & Urbina, A., Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104,(2019), 343-366.

- Carrillo, A. M. R., & Frei, C. Water: A key resource in energy production. *Energy Policy*, 37(11), **2009**, 4303-4312.
- Chatzimouratidis A.I., Pilavachi P.A., Sensitivity analysis of the evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Conversion Management*, 49,3599, (**2008**), 611.
- Chatzimouratidis A.I., Pilavachi P.A., Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. *Energy Policy*, (**2009**).
- Conard, B., Some challenges to sustainability. *Sustainability*, 5(8), (**2013**), 3368-3381.
- Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R. ve Norgard, R.. *An Introduction to Ecological Economics*. Boca Raton, Florida, USA: St. Lucie Press, **1997**.
- Da Rosa, A. V., *Fundamentals of renewable energy processes*. Academic Press, Waltham, **2012**.
- Davies, E. G., Kyle, P., & Edmonds, J. A. An integrated assessment of global and regional water demands for electricity generation to 2095. *Advances in Water Resources*, 52, (**2013**), 296-313.
- Del Río, P., Burguillo, M., An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, (**2009**), 1314-1325.
- Desai, N. B., ve Bandyopadhyay, S. Sustainability in Power Generation Systems. In M. A. Abraham (Ed.) *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 157. **2017**.
- Ece, O. Değer Maksimizasyonu için Değer Temelli Yönetim ile Kurumsal Sürdürülebilirlik İlişkisinin Belirlenmesi: BİST’de Bir Uygulama. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(1), (**2018**), 299-329.
- ETKB, Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2018, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik> (Erişim tarihi: 10 Mart 2019).
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T. J.. Sustainability concepts of energy generation technologies. In M. A. Abraham (Ed.), *Encyclopedia of sustainable technologies* (Vol. 3, 3-10). Elsevier. **2017**.

- Evans, A., Strezov, V., Evans, T. J., Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(5), (2009), 1082-1088.
- Frangopoulos, C. A., & Keramioti, D. E., Multi-criteria evaluation of energy systems with sustainability considerations. *Entropy*, 12(5), (2010), 1006-1020.
- Fridleifsson, I. B., Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *Geothermics*, 32(4-6), (2003), 379-388.
- Fritsche, U. R., Berndes, G., Cowie, A. L., Dale, V. H., Kline, K. L., Sharma, N., ... & Woods, J. Energy and land use. Working Paper for the UNCCD Global Land Outlook.– Darmstad, 2017.
- Fthenakis, V., Bulawka, Environmental impact of photovoltaics. *Encyclopedia of Energy*, Cutler J, (Eds.), Elsevier, Cleveland, (2004), 61-69.
- Giddings, B., Hopwood, B., O'Brien, G.. *Environment, Economy And Society: Fitting Them Together Into Sustainable Development*. *Sustainable Development*, 10(4), (2002), 187-196.
- Gilman, R., Sustainability By Robert Gilman from the 1992 UIA/AIA Call for Sustainable Community Solutions., <http://www.context.org>. (Erişim tarihi: 25 Ekim 2014).
- Gladwin, T.N., Kennelly, J.J. ve Krause, T-S., Shifting Paradigms For Sustainable Development: Implications For Management Theory And Research, *Academy of Management Review*, 20(4), (1995), 874-907.
- Gnanapragasam, N. V., Reddy, B. V., & Rosen, M. A., A methodology for assessing the sustainability of hydrogen production from solid fuels. *Sustainability*, 2(6), (2010). 1472-1491.
- Goepel, K. D., Comparison of judgment scales of the Analytical Hierarchy Process - A new approach, *International Journal of Information Technology and Decision Making* Vol.17, (2019).
- Goodland, R.. *Tropical Deforestation: Solutions, Ethics And Religion*. Environment Department Working Paper 43, World Bank Press, Washington, DC, 1991.

- Hacatoglu, K, A systems approach to assessing the sustainability of hybrid community energy systems, Doktora Tezi, University of Ontario Institute of Technology, Ontario, **2014**.
- Handoko, D., Mesran, M., Nasution, S. D., Yuhandri, Y., & Nurdiyanto, H., Application Of Weight Sum Model (WSM) In Determining Special Allocation Funds Recipients. The IJICS (International Journal of Informatics and Computer Science), 1(2), **2017**.
- Hannah, L., Climate change biology. Academic Press., **2015**
- Harjanne, A., ve Korhonen, J. M.. Abandoning the concept of renewable energy. Energy Policy, 127, (**2019**), 330-340.
- Heier, S., Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems. Sussex, John Wiley & Sons. **2014**.
- Hirschberg, S. and Burgherr, P., Sustainability Assessment for Energy Technologies. In Handbook of Clean Energy Systems; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 1–22, **2015**.
- İç, Y. T., & Yurdakul, M., Development of a quick credibility scoring decision support system using fuzzy TOPSIS. Expert Systems with Applications, 37(1), 567-574, **2010**.
- IEA, International Energy Outlook 2017  
[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) (Erişim tarihi: 15 Aralık 2018)
- IEA, Renewable capacity growth,  
<https://www.iea.org/newsroom/news/2019/may/renewable-capacity-growth-worldwide-stalled-in-2018-after-two-decades-of-strong-e.html> (Erişim tarihi: 21 Mayıs 2019).
- IPCC, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (Eds) Cambridge Univ Press, Cambridge, **2007**.
- Ishizaka, A., and Nemery, P. Multi-criteria decision analysis: methods and software. John Wiley & Sons, Sussex, **2013**.

- Kaku, M., *Physics of the future: How science will shape human destiny and our daily lives by the year 2100*. Anchor, New York, **2011**
- Killingveit, Å., in *Future energy: improved, sustainable and clean options for our planet (Second Edition)*, Letcher, T. M. (Ed.). Elsevier, **2014**
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., Uğurlu, İ., *Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi*, *Engineer & the Machinery Magazine*, 59, (**2018**), 692.
- Kowalski, K., Stagl, S., Madlener, R., Omann, I. *Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis*. *European Journal of Operational Research*, 197(3), (**2009**), 1063-1074
- Kraaijenbrink, P. D. A., Bierkens, M. F. P., Lutz, A. F., & Immerzeel, W. W., *Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia’s glaciers*. *Nature*, 549(7671), (**2017**), 257.
- Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Sustainable Energy*. CRC Press, Boca Raton, USA, **2011**.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C., *A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, (**2017**), 596-609.
- La Rovere, E. L., Soares, J. B., Oliveira, L. B., and Lauria, T., *Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision-making*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, (**2010**), 422–429.
- Lee, H. C. and Chang, C. T., *Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, (**2018**), 883-896.
- Lee, H. C., & Chang, C. T., *Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, (**2018**), 883-896.
- Lewis, N. S., and Nocera, D. G. *Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, (**2006**), 15729.



- Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., and Yang, Y., comparison of geothermal with solar and wind power generation systems, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 42, (2015), 1464– 1474.
- Ligus, M., Ranking of Low-carbon Energy Technologies in the Context of the Degree of Achievement of Sustainable Development Objectives–Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) Approach. *Acta Energetica*, (32), (2017) , 136-141.
- Liu, G., Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, (2014), 611-621.
- Liu, J., China's road to sustainability. *Science*, 328(5974), (2010), 50-50.
- Luong, S., Liu, K. and Robey, J, Sustainability Assessment Framework for Renewable Energy Technology, *Technologies for Sustainable Built Environment Centre*. Reading: Informatics Research Centre, 1-8, (2012).
- Maczulak, A.. *Renewable energy, sources and methods*. New York, USA, Factson File Inc. 2010.
- Mainali, B., & Silveira, S., Using a sustainability index to assess energy technologies for rural electrification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1351-1365, 2015.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- Mateo J.R.S.C., *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry*. London, Springer, 2012.
- Monteiro, L., Machado, N., Martins, E., Pougy, N., Verdi, M., Martinelli, G., & Loyola, R., Conservation priorities for the threatened flora of mountaintop grasslands in Brazil. *Flora*, 238, 234-243.,2018
- Musango, J.K., *Technology Assessment of Renewable Energy Sustainability in South Africa*, Ph.D. Thesis, Faculty of Economics and Management Sciences, Stellenbosch University. 2012.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L., Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological economics*, 60(3), 498-508. 2007

- Onat, N.; Bayar, H. The sustainability indicators of power production systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 14, 3108–3115, 2010.
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990.
- Özmehmet, E., Dünyada ve Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Yaklaşımları. *Journal of Yaşar University*, 3(12), 1853-1876, 2008.
- Öztürk, H. H. Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler. [http://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf) (Erişim tarihi: 05 Mart 2019).
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524.
- Phillis Y.A., Kouikoglou V.S. Fuzzy measurement of sustainability. Nova Science Publishers, Inc. New York, **2009**.
- Phillis, Y. A., and Kouikoglou, V. S., Fuzzy measurement of sustainability. Nova Science Publishers, New York, 2009.
- Pilavachi, P.A., Roumpeas, C.P., Minett, S., Afgan, N.H., Multi-criteria evaluation for CHP system options. *Energy Conversion Management*, 47, 3519–29, (2006).
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M., Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 8(4), 365-381. 2004
- REN21, Renewables 2018 Global Status Report, Renewables Energy Policy Network for the 21st Century [www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/06/17-8652\\_GSR2018\\_FullReport\\_web\\_-1.pdf](http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_-1.pdf), (Erişim tarihi: 05 Mart 2019).
- Ribé, V. Environmental issues associated with energy technologies and natural resource utilization, *Encyclopedia of the Anthropocene* DellaSala, D. A., & Goldstein, M. I. (Eds.), Vol. 1, Elsevier. 2018
- Roberts, V., Geothermal energy, in *Advances in Energy Systems and Technology*, Volume 1, 1978.

- Roosa, S. R. Sustainable Development Handbook (2nd ed.). The Fairmont Press Boca Raton, FL, 2010.
- Ruckelshaus, W. D., Toward a sustainable world. *Scientific American*, 261(3), 66-175, 1989
- Saha, P. C., Sustainable Energy Development: A Challenge For Asia and Pacific Region in The 21st Century. *Energy Policy*, 31, 1051-1059, 2003.
- Santangeli, A., Di Minin, E., Toivonen, T., Pogson, M., Hastings, A., Smith, P., & Moilanen, A. Synergies and trade-offs between renewable energy expansion and biodiversity conservation—a cross-national multifactor analysis. *GCB Bioenergy*, 8(6), 1191-1200, 2016.
- Santoyo-Castelazo, E. and Azapagic, A. Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and Sosyal aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80, , (2014), 119–138
- Sarucan, A., Akkoyunlu, M. C., & Baş A., Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi İle Rüzgâr Türbin Seçimi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25(1), 11-18. 2010.
- Shaaban, M. The Roadmap to Energy Security in Egypt. Ph.D. Thesis, University of Hamburg, Hamburg, 2017.
- Singh, K. R., Murty, H. R., Dikshit, A. K., and Gupta, S. K., An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 9(2), , (2009). 189–212
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., and Dikshit, A. K., An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological indicators*, 15(1),. (2012), 281-299
- Spang, E. S., Moomaw, W. R., Gallagher, K. S., Kirshen, P. H., & Marks, D. H. The water consumption of energy production: an international comparison. *Environmental Research Letters*, 9(10), (2014), 105002
- Stein E.W., A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Renewable Sustainable Energy Review*., 640, (2013), 54
- Subramanian, N., Sustainability-Challenges and solutions. *IndIan ConCreTe Journal*, 81(12), 39, 2007.

- Şahin, U. Sustainability Assessment of Renewable Energy Sources for Electricity Production in Turkey Using Analytic Network Process (ANP) with Benefits, Opportunities, Costs and Risks (BOCR) Analysis. *Cumhuriyet Science Journal (CSJ)*. 37, (2016), 180-188.
- Şengül, Ü., Eren, M., Shiraz, S. E., Gezder, V., Şengül, A. B. Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, 75, (2015) 617-625.
- TEİAŞ, Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2018-2022). Ankara, 2018.
- Tester J.W., Drake E.M., Driscoll M.J., Golay MW, Peters W.A., Sustainable energy. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2005.
- Tıraş, H., Sürdürülebilir Kalkınma Ve Çevre: Teorik Bir İnceleme. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2(2), (2012), 57-73.
- Tiwari, G. N., & Mishra, R. K, Advanced renewableenergy sources. Royal Society of Chemistry. (2011).
- TKB, Yatırım Projelerinin Değerlendirilmesi, Eğitim ve Halkla ilişkiler Müdürlüğü, Ankara, 2009.
- TKB, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimi, Teknoloji İzleme ve Araştırma Müdürlüğü, Ankara, 2015.
- Troldborg, M., Heslop, S., and Hough, R. L., Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, (2014), 1173-1184.
- Tutulmaz, O.. Ekonomi - Çevre İlişkisi ve Sürdürülebilir Kalkınma: Ampirik Bir Değerlendirme, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalı Doktora Tezi, Ankara, 2011.
- Uludağ, A , Doğan, H . Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Karşılaştırılmasına Odaklı Bir Hizmet Kalitesi Uygulaması, Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi 6, (2016), 17-48.

- United Nations (UN), Report of The United Nations Conference on Environment and Development 1992, <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm> (Erişim tarihi: 10 Ağustos 2014).
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., and Zhao, J. H., Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), (2009), 2263-2278.
- Yahyaoui, I.. Specifications of photovoltaic pumping systems in agriculture: sizing, fuzzy energy management and economic sensitivity analysis, Cambridge, Elsevier, 2017.
- Ziamba, P., Inter-criteria dependencies-based decision support in the sustainable wind energy management. *Energies*, 12(4), (2019), 749.



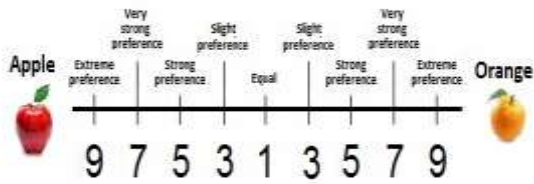
## EKLER

### EK 1- Uzman Tablosu

<b>Alan</b>	<b>Teknik</b>	<b>Mali</b>	<b>Ekonomist</b>
<b>Brans</b>			
Elektrik-Elektronik Müh.	1	-	-
Makine Müh.	2	-	-
İnşaat Müh.	2	-	-
Kimya Müh.	1	-	-
Çevre Müh.	2	-	-
Jeoloji Müh.	1	-	-
İşletme	-	1	1
İktisat	-	4	5
<b>Öğrenim Durumu</b>			
Lisans	3	3	3
Yüksek lisans	6	2	3

## EK 2- Anket Şablonu

İsim:		Meslek:	
Tercih Değerlendirmesi Yapılacak Enerji Kaynakları; *Güneş Enerjisi-PV *Rüzgar Enerjisi *Hidroelektrik Enerji *Biyokütle Enerjisi *Jeotermal Enerji			
Değerlendirme yaparken tercih ettiğiniz kriteri diğerine oranla ne kadar tercih ettiğinizi işaretleyip, 1-9 arasında bir rakamla ifade ediniz. Derecelendirmenin yapılışı ile ilgili, formun altında bulunan şekil ve tablodan faydalabilirsiniz.			
1) Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretim Projelerinde Alternatifleri Değerlendirirken Hangi Kriter Sizin İçin Daha Önceliklidir?			Öncelik Derecesi
Çevre			Teknik
Çevre			Sosyal
Çevre			Ekonomi
Sosyal			Ekonomi
Sosyal			Çevresel
Ekonomi			Teknik
2-Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hangisinin yaşadığımız bölgeye yakın bir konumda olmasını tercih edersiniz? Nedeni ile birlikte açıklayınız.			



Tanım	Değer
Eşit derecede önemli	1
Eşit veya biraz fazla önemli	2
Biraz daha önemli	3
Biraz daha fazla önemli	4
Çok daha önemli	5
Çok daha fazla önemli	6
Oldukça önemli	7
Oldukça fazla önemli	8
Son derece önemli	9



### EK 3- İkili Karşılaştırma Örnek Matrisler

CO<sub>2</sub> - CR: %2.3

No			Sıralama
1	Güneş Enerjisi-PV	%6.4	4
2	Rüzgar Enerjisi	%28.9	2
3	Biyokütle	%17.0	3
4	Hidroelektrik	%42.8	1
5	Jeotermal	%4.9	5

Alternatif	1	2	3	4	5
1	1	0,17	0,33	0,14	2
2	6	1	2	0,5	5
3	3	0,5	1	0,5	3
4	7	2	2	1	8
5	0,5	0,2	0,33	0,13	1

SO<sub>2</sub> - CR: %9.6

No			Sıralama
1	Güneş Enerjisi-PV	%14.1	3
2	Rüzgar Enerjisi	%31.5	2
3	Biyokütle	%9.4	4
4	Hidroelektrik	%42.0	1
5	Jeotermal	%3.0	5

Alternatif	1	2	3	4	5
1	1	0,25	3	0,20	6
2	4	1	4	0,50	8
3	0,33	0,25	1	0,33	5
4	5	2	3	1	8
5	0,17	0,13	0,20	0,13	1

## EK 4-Tüm Kriterler Açısından İkili Karşılaştırma Değerleri ve Tutarlılık Oranları.

### Alt Kriter Karar Matrisleri

CO <sub>2</sub>	CR= 0,022647				
	1	0,166667	0,333333	0,142857	2
	6	1	2	0,5	5
	3	0,5	1	0,5	3
	7	2	2	1	8
	0,5	0,2	0,333333	0,125	1
SO <sub>2</sub>	CR= 0,095951				
	1	0,25	3	0,2	6
	4	1	4	0,5	8
	0,333333	0,25	1	0,333333	5
	5	2	3	1	8
	0,166667	0,125	0,2	0,125	1
NO <sub>x</sub>	CR= 0,076792				
	1	0,333333	6	0,2	0,2
	3	1	7	0,333333	0,333333
	0,166667	0,142857	1	0,125	0,125
	5	3	8	1	0,5
	5	3	8	2	1
Su Kullanımı	CR=0,092287				
	1	0,5	7	5	4
	2	1	8	6	6
	0,142857	0,125	1	0,166667	0,166667
	0,2	0,166667	6	1	0,5
	0,25	0,166667	6	2	1
Arazi Kullanımı	CR=0,075455				
	1	0,2	7	1	0,333333
	5	1	8	5	3
	0,142857	0,125	1	0,142857	0,125
	1	0,2	7	1	0,333333
	3	0,333333	8	3	1
İş Olanakları	CR=0,089278				
	1	5	4	2	7
	0,2	1	0,333333	0,25	5
	0,25	3	1	0,25	6
	0,5	4	4	1	7
	0,142857	0,2	0,166667	0,142857	1
Sosyal Kabuledilebilirlik	CR=0,05952				
	1	3	5	7	4
	0,333333	1	4	7	3
	0,2	0,25	1	3	0,333333

	0,142857	0,142857	0,333333	1	0,25
	0,25	0,333333	3	4	1
Yatırım Tutarı	CR=0,09148				
	1	0,5	5	4	6
	2	1	5	3	7
	0,2	0,2	1	0,2	3
	0,25	0,333333	5	1	6
	0,166667	0,142857	0,333333	0,166667	1
Birim Elektrik Maliyeti	CR=0,06334				
	1	0,5	7	0,333333	0,5
	2	1	7	0,333333	2
	0,142857	0,142857	1	0,125	0,142857
	3	3	8	1	4
	2	0,5	7	0,25	1
İşletme ve Bakım Masrafları	CR=0,087323				
	1	4	8	2	5
	0,25	1	7	0,333333	5
	0,125	0,142857	1	0,125	0,25
	0,5	3	8	1	5
	0,2	0,2	4	0,2	1
Elektrik Üretim Verimliliği	CR=0,064194				
	1	0,25	0,2	0,142857	2
	4	1	0,5	0,2	4
	5	2	1	0,2	5
	7	5	5	1	8
	0,5	0,25	0,2	0,125	1
Kapasite Faktörü	CR=0,067455				
	1	0,25	0,2	0,333333	0,142857
	4	1	0,25	3	0,2
	5	4	1	5	0,5
	3	0,333333	0,2	1	0,166667
	7	5	2	6	1
Kaynak Potansiyeli	CR=0,08974				
	1	6	0,5	4	8
	0,166667	1	0,166667	0,333333	5
	2	6	1	5	8
	0,25	3	0,2	1	6
	0,125	0,2	0,125	0,166667	1